



Sistema alternativo de producción de biodiésel a partir de aceites de cocina con metanol para reducir la dependencia de derivados del petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala, 2025

TESIS DOCTORAL

que para obtener el grado de Ph.D.

DOCTOR EN DIRECCIÓN DE PROYECTOS

PRESENTA

Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

ASESOR

Dr. Pablo Rijalba Palacios

México, 2025

La presente Tesis Doctoral debe ser citada como:

Zambrano Ruano, Gamaliel (2025). *Sistema alternativo de producción de biodiésel a partir de aceites de cocina con metanol para reducir la dependencia de derivados del petróleo y las emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala, 2025*. [Tesis de Doctorado. Universidad de Investigación e Innovación de México - UIIX]



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Se permite la reproducción total o parcial y la comunicación pública de la obra con reconocimiento de la autoría.

No se permite el uso comercial ni la creación de obras derivadas.

Resumen

En Guatemala se depende en su totalidad de los combustibles fósiles, los que emiten cantidades considerables de gases de efecto invernadero, en esta investigación, se ha buscado establecer que es posible fabricar y producir biodiésel como combustible alternativo al diésel fósil con la finalidad de lograr la independencia energética y reducir los gases de efecto invernadero utilizando aceites de cocina como materia prima. Bajo el método experimental, se recolectaron aceites residuales, se sometieron a reacciones de transesterificación y se obtuvo biodiésel caracterizado en laboratorio. Se realizaron pruebas de combustión que confirmarán que el producto cumple con parámetros cercanos a la norma ASTM D6751. Los hallazgos muestran que es posible producir biocombustible de bajo costo y desempeño aceptable en motores. Se encontró que los valores de conversión y rendimiento son consistentes con los reportados en la literatura científica y la evidencia internacional consultada. A partir de ello, en este estudio sostiene que, bajo marcos regulatorios claros, la producción y comercialización del biodiésel es viable, económica y ambientalmente sostenible, por lo que también se asegura su replicabilidad. Se identificó la ausencia de políticas para el biodiésel en contraste con la reciente regulación del etanol, por lo que este vacío normativo es también una oportunidad para integrar estos resultados a la agenda pública como parte de las metas de reducción de emisiones en la línea del Acuerdo de París. En conclusión, esta investigación ofrece evidencia a favor de la independencia energética y la reducción de GEI, desafío que requiere el respaldo normativo y la voluntad política para su consolidación.

Palabras clave: *Biodiésel, Transesterificación, Aceites residuales de cocina, Gases de efecto invernadero, Combustible alternativo.*

ABSTRACT

In Guatemala, there is complete dependence on fossil fuels, which emit considerable amounts of greenhouse gases. This research seeks to demonstrate that it is possible to manufacture and produce biodiesel as an alternative fuel to fossil diesel, with the aim of achieving energy independence and reducing greenhouse gas emissions through the use of waste cooking oils as raw material.

Following an experimental methodology, waste oils were collected and subjected to transesterification reactions, resulting in biodiesel that was subsequently characterized in the laboratory. Combustion tests confirmed that the product meets parameters close to those established by the ASTM D6751 standard. The findings indicate that it is feasible to produce a low-cost biofuel with acceptable engine performance. Conversion and yield values were found to be consistent with those reported in scientific literature and international evidence reviewed.

Based on these results, this study argues that, under clear regulatory frameworks, the production and commercialization of biodiesel are viable, economically feasible, and environmentally sustainable, ensuring its replicability. The absence of biodiesel-specific policies—contrasting with the recent regulation of ethanol—was identified as a regulatory gap that also presents an opportunity to incorporate these results into the public agenda as part of national emission reduction goals aligned with the Paris Agreement.

In conclusion, this research provides evidence supporting energy independence and greenhouse gas reduction—challenges that require regulatory support and political will for their consolidation.

Keywords: Biodiesel, Transesterification, Waste cooking oils, Greenhouse gases, Alternative fuel.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por la oportunidad, la provisión y su cuidado, sí como la energía que me proveyó, para estudiar este doctorado, que me permitirá desarrollar mi vida personal y profesional de mejor manera.

Agradezco también a la Universidad de Investigación e Innovación de México (UIIX), por formarme en el área de Dirección de Proyectos, así como su soporte técnico y científico. A cada uno de los profesores de los cursos recibidos, ya que gran parte del fundamento teórico y práctico está reflejado en este documento. A las personas de la UIIX que están detrás de la logística, uso de herramientas y plataforma, porque sin ellos es imposible que profesores y alumnos, llegemos a la etapa final.

Agradecimiento especial al asesor, **Dr. Pablo Rijalba Palacios**

[<https://orcid.org/0000-0002-4730-105X>], por su asesoría y revisión del presente trabajo.

A la Universidad del Valle de Guatemala, por permitirme desarrollar mi investigación doctoral y a cada una de las personas que me apoyaron a que este trabajo alcance el sentido y el soporte que la UIIX exige.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a esposa e hijos, ya que sin su apoyo no encontraría las fuerzas para emprender este tipo de retos.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	2
ABSTRACT	3
Agradecimientos	4
Dedicatoria	5
Índice de tablas	9
Listado de siglas y abreviaturas	11
INTRODUCCIÓN	13
Capítulo 1. Proyección de la investigación.	15
1.1. Línea de investigación, Universidad de Innovación e Investigación, México	15
1.2. Planteamiento del problema.	15
1.3. Formulación del problema.	16
1.4. Justificación.	17
1.5. Objeto de estudio.	19
1.6. Campo de acción.	19
1.7. Objetivos.	20
1.7.1. Objetivos Específicos.	20
1.8. Hipótesis.	20
1.8.1. Hipótesis nula.	20
1.8.2. Hipótesis alternativa.	21
1.9. Alcance temático.	21
1.10. Delimitación espacial y temporal.	21
Capítulo 2. Fundamentos teóricos.	22
2.1. Estado del arte.	22
2.1.1. Antecedentes.	25
2.1.2. Evolución histórica de los biocombustibles.	27
2.2. Marco teórico.	28
2.2.1. Transesterificación.	28
2.2.2. Biodiésel (ésteres de ácidos grasos).	33
2.2.3. Resumen de la norma ASTM.	38
2.3. Marco teórico – conceptual	39

	7
2.4.1. Antecedentes internacionales.	44
2.4.2. Antecedentes nacionales.	51
2.5. Marco legal y normativo.	52
2.5.1. Leyes internacionales.	53
2.5.2. Leyes nacionales.	55
Capítulo 3. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación.	57
3.1. Operacionalización de variables.	57
3.2. Diseño metodológico.	59
3.2.1. Enfoque y tipo de investigación.	59
3.2.2. Métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos.	60
3.2.3. Desarrollo de los instrumentos de obtención de datos.	63
3.2.4. Determinación de la muestra y criterio de selección.	66
3.2.5. Trabajo de campo	68
3.2.6. Aplicación de los instrumentos	70
3.2.7. Procesamiento de la información	71
3.3. Análisis de resultados a partir de los datos obtenidos.	72
3.4. Resultados y discusión.	75
3.4.1. Resultados.	75
3.4.2. Necesidad de identificar alternativas viables de producción de biodiésel.	82
Capítulo 4. Propuesta de transformación.	106
4.1. Fundamentación de la propuesta de transformación.	106
4.2. Descripción de la propuesta de transformación.	109
4.3. Objetivos de la propuesta.	111
4.4. Actividades, fases y/o etapas.	111
4.5. Recursos necesarios para la aplicación de la propuesta.	115
4.6. Resultados.	116
4.7. Valoración / evaluación / validación de la propuesta de transformación.	126
4.7.1. Validación técnica del proceso.	127
4.7.2. Evaluación económica y ambiental del modelo.	130
CONCLUSIONES	154
RECOMENDACIONES	156

BIBLIOGRAFÍA
ANEXOS

157
165

Índice de tablas

Tabla 1: Normas ASTM D6751 para B100.	39
Tabla 2: Producción de biocombustibles (en miles de m ³).	47
Tabla 3: Consumo de biocombustibles (en miles de m ³).	48
Tabla 4: Mandatos de bioetanol y biodiésel en América del Norte	49
Tabla 5: Mandatos de bioetanol y biodiésel en América Central y el Caribe	50
Tabla 6: Mandatos de bioetanol y biodiésel en América del Sur	51
Tabla 7: Operacionalización de variables y matriz de consistencia	58
Tabla 8: Proceso metodológico	61
Tabla 9: Principales instrumentos de investigación.	64
Tabla 10: Estructuración de la población (universo) de estudio	66
Tabla 11: Información estadística para determinar la muestra	67
Tabla 12: Determinación de la muestra representativa	68
Tabla 13: Precios promedios modalidad autoservicio (gasolina y diésel): Guatemala	79
Tabla 14: Importaciones anuales de combustible en Guatemala.	80
Tabla 15: Consumo anual de productos petroleros en Guatemala.	80
Tabla 16: Plantilla de referencia normativa legal.	82
Tabla 17: Estructura de precios en modalidad de autoservicio.	88
Tabla 18: Proyección de Ventas de Biodiésel: Guatemala (2026-2030).	90
Tabla 19: Precios proyectados de Biodiésel (Q/galón): Guatemala 2026-2030.	91
Tabla 20: Ingresos proyectados por Ventas de Biodiésel (2026-2030).	92
Tabla 21: Egresos proyectados en la Producción de Biodiésel, Guatemala: 2026-2030.	93
Tabla 22: Flujo de caja proyectado en la producción de Biodiésel 2026 – 2030.	95
Tabla 23: Margen de Utilidad proyectado por Galón vendido en Planta: 2026-2030.	98
Tabla 24: Desglose del Capital de Trabajo para 6 Meses del Año Inicial: 2026.	99
Tabla 25: TIR y VAN de la planta de producción de biodiésel de 50,000 L/día.	100
Tabla 26. Validación de hipótesis	102
Tabla 27: Insumos, materiales y equipos para la producción de biodiésel.	115
Tabla 28: Grado de conversión de reacción de transesterificación durante operación.	118
Tabla 29: Balance de masa: Producción y rendimiento de biodiésel.	121
Tabla 30: Grado de conversión de la reacción de transesterificación.	122

Índice de figuras

Figura 1: Evolución de la producción y consumo de biocombustibles.	24
Figura 2: Total de emisiones de gases de efecto invernadero por país en 2021.	25
Figura 3: Transesterificación de un triacilglicérido con alcohol.	29
Figura 4: Mecanismo general para la transesterificación en medio ácido.	31
Figura 5: Mecanismo de reacción en medio básico.	33
Figura 6: Tecnologías para la producción de biodiésel	34
Figura 7: Proceso de producción de biodiésel	35
Figura 8: Aceites vegetales (incluido UCO) usado para la producción de biodiésel	37
Figura 9: Distribución porcentual de los biocombustibles en el mundo.	41
Figura 10: Variación porcentual, tendencia y producción total (en miles de m ³).	42
Figura 11: Mandato de uso de bioetanol en la gasolina.	45
Figura 12: Mandato de uso de biodiésel en el diésel.	46
Figura 13: Distribución del nivel de conocimiento sobre biodiésel (%)	73
Figura 14: Percepción sobre el impacto ambiental del biodiésel	74
Figura 15: Contratos operaciones petroleras: exploración, explotación e infraestructura	76
Figura 16: Producción de petróleo crudo en Guatemala, periodo 2020-2024.	77
Figura 17: Consumo de diésel por importador en Guatemala.	84
Figura 18: Propuesta de transformación para producir biodiésel en Guatemala.	112
Figura 19: Recolección de aceite residual y distribución de biodiésel en Guatemala.	114
Figura 20: Diagrama de producción de biodiésel actual de Guatemala.	120
Figura 21: Porcentaje de avance de la reacción de UCO a FAME.	123

Listado de siglas y abreviaturas

ACR	:	Asociación de Combustibles Renovables
ACU	:	Aceite de Cocina Usado
AFDC	:	Alternative Fuels Data Center (Centro de Datos de Combustibles Alternativos)
AST	:	American Society for Testing and Materials (Asociación Americana de Pruebas y Materiales)
B5	:	Mezcla con 5 % de biodiésel
B10	:	Mezcla con 10 % de biodiésel
B100	:	Biodiésel puro (100 %)
CACM	:	Central American Common Market (Mercado Común Centroamericano)
CEN	:	Comité Europeo de Normalización
CH ₄	:	Metano
CO ₂	:	Dióxido de carbono
COGUANOR	:	Comisión Guatemalteca de Normas
COMIECO	:	Consejo de ministros de Integración Económica
CONCYT	:	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
EN 14214	:	Norma europea para FAME en diésel
EPA	:	Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental, EE. UU.)
FAME	:	Fatty Acid Methyl Esters (Ésteres Metílicos de Ácidos Grasos)
FAS	:	Foreign Agricultural Service (Servicio Agrícola Exterior, USDA)
GAIN	:	Global Agricultural Information Network (Red Global de Información Agrícola)
GEI	:	Gases de Efecto Invernadero
IANAS	:	Inter-American Network of Academies of Sciences
I+D	:	Investigación y Desarrollo
IICA	:	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
IDB	:	Inter-American Development Bank (Banco Interamericano de

		Desarrollo)
IDP	:	Impuesto a la Distribución de Petróleo Crudo y Combustibles Derivados
IEA	:	International Energy Agency (Agencia Internacional de Energía)
INCAE	:	Instituto Centroamericano de Administración de Empresas
ISO 14067	:	Norma de huella de carbono de productos
ITA	:	International Trade Administration (Administración de Comercio Internacional, EE. UU.)
MAGA	:	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
MARN	:	Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales
MEM	:	Ministerio de Energía y Minas
N ₂ O	:	Óxido nitroso
NDC	:	Nationally Determined Contribution (Contribución Nacionalmente Determinada)
OPEP	:	Organización de Países Exportadores de Petróleo
RTCA	:	Reglamento Técnico Centroamericano
SAT	:	Superintendencia de Administración Tributaria
UCO	:	Used Cooking Oil (Aceite Usado de Cocina)
UNDP	:	United Nations Development Programme (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo)
UNFCCC	:	United Nations Framework Convention on Climate Change (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático)
USDA	:	United States Department of Agriculture (Departamento de Agricultura de EE. UU.)

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los biocombustibles líquidos se utilizan como parte de la transición limpia en el marco del paradigma de movilidad basado en la combustión interna. Como tal, constituyen alternativa ambientalmente sostenible respecto a los combustibles fósiles (Torroba et al., 2024). Dentro de este grupo, destacan el etanol y el biodiésel, capaces de sustituir parcial o totalmente a la gasolina y al diésel convencional en motores de combustión interna. Su carácter renovable y su potencial para reducir la huella de carbono, al reutilizar el CO₂ absorbido por las plantas durante su crecimiento (IEA, 2021), los convierte en piezas clave en la transición energética.

Esta investigación se inserta en el creciente interés por los combustibles, a partir de la crisis petrolera de 1973, cuando el embargo de la OPEP evidencia la vulnerabilidad de las economías dependientes del crudo (Yergin, 2023). En el caso de Guatemala, el Acuerdo de París del año 2015 establece metas de reducción de emisiones hacia el 2030 (MARN, 2022). Sin embargo, la electrificación del parque vehicular enfrenta aún barreras significativas y un contexto en el que, el etanol y el biodiésel se presentan como opciones intermedias de implementación inmediata.

El propósito de esta investigación es analizar la factibilidad técnica, económica y política de la producción de biodiésel en Guatemala a partir de aceites de cocina usados y metanol, como modelo alternativo de producción que pueda integrarse a la matriz energética nacional y reducir la dependencia a los derivados del petróleo y las emisiones de gases. Se identifica un marco teórico sustentado en literatura internacional sobre transesterificación, propiedades del biodiésel y normativas ASTM y se contrasta con desarrollos recientes de países como Estados Unidos, Brasil, Europa y la realidad guatemalteca.

Bajo un enfoque experimental se recolectaron aceites residuales de cocina, los que fueron sometidos a reacciones de transesterificación obteniendo biodiésel mediante pruebas de laboratorio y ensayos de combustión en motor de prueba. Se realizó el análisis económico en escenarios de producción y comercialización, proyectando ingresos, egresos y márgenes

de utilidad. Los resultados señalan que el biodiésel presenta rendimiento y conversión consistente con lo reportado en la literatura, cumple con los parámetros de la norma ASTM D6751, es de bajo costo y muestra desempeño estable en motores siempre que se controle la calidad del aceite y las condiciones de reacción. Con viabilidad técnica asegurada de la propuesta se plantea que, bajo regulación adecuada, su producción y comercialización es sostenible y competitiva, en tanto, utilizará materias primas de bajo costo -aceite residual-, lo que permitirá alcanzar precios competitivos frente al diésel fósil.

La tesis se organiza en cuatro capítulos. El primero para exponer la proyección de la investigación, el segundo para desarrollar los fundamentos teóricos en concordancia con el capítulo tercero en donde se describe la metodología y los resultados obtenidos. El capítulo cuarto presenta la propuesta de transformación y recomendaciones de política pública.

Como resultados de este estudio, se encuentra que la investigación realizada ofrece evidencia de que, en Guatemala existen condiciones técnicas y económicas para producir biodiésel a partir de aceites residuales con beneficios socio ambientales. Se requiere marcos normativos que regulen su producción e integración al mercado y la adopción de mezclas obligatorias. La investigación debe continuar para promover usos de etanol como reactivo alternativo, la optimización de la transesterificación y la escalabilidad industrial del proceso. Se deben establecer mecanismos para que las mezclas no varíen entre estaciones de servicio; y profundizar en metodologías de simulación que permita al consumidor estar cubierto y alineados a la norma internacional. Se trata de lograr que el biodiésel sea herramienta estratégica para la independencia energética y la reducción de emisiones en Guatemala.

Capítulo 1. Proyección de la investigación.

Este capítulo expone la proyección de la investigación doctoral. Se define la línea de investigación y se presenta el planteamiento y la formulación del problema; así como la justificación del estudio, se delimita el objeto de estudio y el campo de acción, los objetivos de investigación, hipótesis, alcance y otros aspectos relevantes, como la delimitación espacial y temporal del estudio.

1.1. Línea de investigación, Universidad de Innovación e Investigación, México

La presente tesis se enmarca en la línea de investigación de Desarrollo Sostenible y Energías Renovables de la Universidad de Innovación e Investigación de México. Esta línea promueve estudios orientados a la generación y aplicación de conocimiento en áreas estratégicas como la energía solar, los combustibles sostenibles, el almacenamiento de energía, la eficiencia energética, la valoración del CO₂ y la gestión de la huella hídrica (Documento: Líneas de Investigación Doctorado en Dirección de Proyectos, p. 2).

En este contexto, el estudio se alinea plenamente con dicho eje, al abordar la producción de biodiésel como biocombustible alternativo a partir de aceites residuales de cocina. La investigación no solo contribuye a los objetivos globales de reducción de emisiones y transición energética, sino que también ofrece soluciones aplicables al contexto guatemalteco, donde los retos en materia de dependencia petrolera, sostenibilidad ambiental y seguridad energética requieren propuestas innovadoras y viables.

El aporte al uso de biodiésel contribuye a reducir la dependencia energética, además de utilizar un proceso de producción que no existe en Guatemala que permita la reducción de gases de efecto invernadero y los impactos que se producen al ambiente.

1.2. Planteamiento del problema.

En el mundo, el uso de los biocombustibles es un tema habitual, sin embargo, en la región de Centroamérica solamente se sabe de ellos y la implementación en el uso de vehículos de

combustión interna todavía es un reto. Entre los biocombustibles está el biodiésel, este biocombustible es utilizado mezclándolo con diésel en proporciones entre 2 y 10 % (ACR, 2020), en Guatemala este biocombustible no es utilizado, por lo que debemos estar preparados para su producción.

El biodiésel, se fabrica a partir de aceites vegetales o grasas animales, mezclándolo con hidróxido de sodio y metanol, este último es un derivado del petróleo y si el concepto base es depender menos de recursos no renovables y utilizar más los renovables, es importante investigar el efecto que sería sustituir el metanol por etanol (Kulkarni, et al. 2021). El etanol en Guatemala es un producto renovable, ya que es el resultado de la fabricación de azúcar. Por lo anterior, en el momento que Guatemala implemente el uso de biodiésel con metanol, un siguiente paso es estar preparados para fabricarlo con etanol, que actualmente se produce en Guatemala a partir de recursos renovables.

1.3. Formulación del problema.

En Guatemala, la dependencia casi total de combustibles fósiles importados constituye una de las principales limitaciones para alcanzar la seguridad energética y avanzar hacia la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de que el país cuenta con potencial para aprovechar recursos renovables y subproductos como los aceites de cocina usados, todavía no existe un sistema consolidado de producción de biodiésel que permita transformar esta materia prima en un combustible alternativo viable.

La ausencia de una política pública específica, sumada a la falta de experiencias industriales a gran escala para la producción de biodiésel, ha impedido que el biodiésel forme parte de la matriz energética nacional, en contraste con lo que ya ocurre en países como Brasil, Estados Unidos y varias naciones europeas (Torroba et al., 2024). En este escenario, surge la necesidad de diseñar y validar un modelo alternativo de producción que considere no solo la factibilidad técnica del proceso de transesterificación con metanol, sino también su viabilidad económica, social y ambiental. De esta forma, el problema de investigación se sintetiza en la siguiente pregunta central:

¿Cómo contribuir a reducir la dependencia de los derivados del petróleo y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala mediante el aprovechamiento de aceites de cocina usados para la producción de combustibles alternativos en el año 2025?

1.4. Justificación.

El desarrollo de biocombustibles constituye una alternativa estratégica frente a los retos ambientales, energéticos y económicos que enfrenta Guatemala. En particular, el biodiésel se presenta como una solución práctica y de aplicación inmediata para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, sin requerir una sustitución radical del parque vehicular existente. A diferencia de otras tecnologías emergentes —como la electromovilidad e hidrógeno—, cuya adopción está limitada por los altos costos de inversión e infraestructura aún incipiente en el país, el biodiésel puede integrarse de manera gradual mediante su mezcla con diésel fósil, ofreciendo resultados medibles a corto plazo.

Desde el punto de vista teórico, la investigación se fundamenta en el proceso de transesterificación, reacción química que transforma aceites vegetales o grasas en ésteres metílicos o etílicos, acompañados de glicerol como subproducto. Tradicionalmente, el metanol ha sido el alcohol más empleado; sin embargo, su origen fósil contradice el propósito de independencia energética y sostenibilidad. En Guatemala, el etanol se produce localmente a partir de caña de azúcar, lo cual abre la posibilidad de sustituir el metanol por etanol, generando un biodiésel renovable con una menor huella de carbono y con mayor pertinencia para la realidad nacional.

En lo metodológico, la presente investigación plantea la producción de biodiésel a escala de laboratorio mediante la esterificación de ácidos grasos libres y la posterior transesterificación, utilizando etanol como reactivo principal y ácido sulfúrico como catalizador. Se evaluaron las condiciones de operación críticas (temperatura, tiempo, relación molar alcohol/aceite y concentración del catalizador) para determinar los parámetros óptimos de producción. Asimismo, se realizó la caracterización fisicoquímica del producto en comparación con los estándares internacionales de calidad, particularmente

la ASTM D6751, que constituye la norma de referencia en Guatemala. Este enfoque garantiza la validez científica de los resultados, estableciendo bases sólidas para un eventual escalamiento a planta piloto.

La relevancia ambiental de este trabajo radica en la mitigación de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos asociados al consumo de diésel fósil, tales como CO₂, NO_x y material particulado. De manera indirecta, también contribuye a la gestión sostenible de residuos, dado que se proyecta la posibilidad de aprovechar aceites vegetales usados como materia prima, reduciendo así la contaminación de cuerpos de agua y suelos.

En el ámbito social, la producción de biodiésel étlico abre oportunidades de desarrollo sostenible, al generar empleo en las etapas de recolección de insumos, producción y distribución. Además, promueve la inclusión de comunidades agrícolas en nuevas cadenas de valor vinculadas a la producción de etanol y aceites vegetales. En paralelo, fortalece la seguridad energética del país al diversificar la matriz de combustibles y reducir la dependencia de importaciones de derivados de petróleo, lo cual se traduce en mayor estabilidad para el transporte público, la industria y la economía nacional. En este proceso se beneficiarán las empresas que producen aceites usados de cocina, así como se producirán nuevas fuentes de trabajo al realizar las recolecciones de estos aceites usados y se generarán bases para una política pública en torno al uso del biodiésel.

Finalmente, es importante señalar que, esta investigación se justifica desde su pertinencia económica y ambiental. Por una parte, su relevancia económica se encuentra en el potencial de generar un biocombustible competitivo con costos que permitan aprovechar recursos nacionales y evitar fugas de divisas por la importación de metanol y diésel fósil. Por otro lado, desde lo ambiental, esta alternativa se basa en la capacidad del país y su necesidad de incorporar el biodiésel étlico en el mercado nacional, tanto para fortalecer la autonomía energética del país, como para permitir que Guatemala se alinee a los compromisos internacionales en materia de sostenibilidad y cambio climático, posicionándose como un país innovador en el uso de energías renovables en la región centroamericana.

1.5. Objeto de estudio.

El presente estudio analiza la viabilidad técnica y económica de producir e implementar biodiésel en Guatemala, con énfasis en su incorporación progresiva en la flota vehicular que actualmente depende del diésel fósil. La investigación busca determinar no solo la factibilidad de producción a partir de insumos disponibles en el país —como aceites vegetales y etanol—, sino también generar las condiciones bajo las cuales este biocombustible puede competir en costos y calidad con el diésel convencional.

Asimismo, el objeto de estudio trasciende lo técnico para posicionar al biodiésel como una alternativa estratégica de política pública y adicionarse a la matriz energética. Su implementación nacional tendría efectos sociales visibles al reducir la contaminación atmosférica y las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo al cumplimiento de compromisos internacionales de sostenibilidad.

De igual manera, fomentaría la creación de empleos en cadenas de valor locales, fortalecería la seguridad energética y reduciría la dependencia de derivados del petróleo. En este sentido, se analiza el biodiésel no solo como un producto energético, sino como un instrumento de desarrollo sostenible con capacidad de generar impactos ambientales, sociales y económicos significativos para el país.

1.6. Campo de acción.

El presente trabajo se desarrolla en el ámbito de las energías renovables, con un enfoque específico en los biocombustibles, particularmente el biodiésel. El estudio se orienta a evaluar la factibilidad técnica y económica de su producción en Guatemala, considerando su uso en mezclas con el diésel actualmente comercializado en el país. Esta delimitación busca contribuir al diseño de una propuesta alternativa, viable y sostenible, que favorezca la adopción del biodiésel a nivel nacional y se alinee con las condiciones técnicas, económicas y normativas del contexto guatemalteco.

1.7. Objetivos.

Proponer un sistema alternativo de producción de biodiésel con metanol a partir de aceites de cocina usados para contribuir a reducir la dependencia de los derivados del petróleo y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala en el 2025.

1.7.1. Objetivos Específicos.

- a. Identificar el marco teórico pertinente que reúna información técnica, política y de investigaciones realizadas alrededor del tema de biodiésel para caracterizar un sistema alternativo de producción de biodiésel en Guatemala.
- b. Sistematizar la normativa y política vigente en Guatemala relacionada a la producción y provisión de biocombustible, incidiendo en su alcance, limitaciones y vacíos.
- c. Diseñar el sistema alternativo de producción de biodiésel a partir de aceite y metanol, considerando criterios de viabilidad técnica, económica y ambiental.
- d. Evaluar la factibilidad económica del sistema propuesto para la producción de biodiésel utilizando metanol.
- e. Proponer cambios de política pública a favor del uso de biodiésel de producción alternativa con metanol.

1.8. Hipótesis.

1.8.1. Hipótesis nula.

La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados no generará mejoras significativas en la sostenibilidad del uso de biocombustibles en Guatemala ni contribuirá a la reducción de gases de efecto invernadero.

1.8.2. Hipótesis alternativa.

La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados sí generará mejoras significativas en la sostenibilidad del uso de biocombustibles en Guatemala y contribuirá de manera efectiva a la reducción de gases de efecto invernadero.

1.9. Alcance temático.

El alcance de la investigación pone las bases técnicas en donde se describe la reacción que debe llevarse a cabo al utilizar aceites tanto usados como vírgenes, la oportunidad económica de implementar el proceso de producción, así como los beneficios ambientales, sociales y políticos que se establecen al utilizar un biocombustible parte del diésel que ya se consume en Guatemala.

1.10. Delimitación espacial y temporal.

El presente estudio se circunscribe al territorio de la República de Guatemala, con el objetivo de evaluar la producción de biodiésel a partir de aceites residuales de cocina, empleando metodologías y equipamiento accesibles en el contexto nacional. El metanol con una pureza de 99.9 % v/v se utilizará como reactivo en la reacción de transesterificación, en proporciones comprendidas entre el 5 % y el 15 % respecto al volumen total de aceite. Las reacciones se desarrollarán a una temperatura controlada de 50 °C, en volúmenes individuales no superiores a 250 mL, empleando exclusivamente metanol como alcohol reactivo y evitando el uso de aceites vírgenes como materia prima.

En cuanto a la delimitación temporal, la ejecución experimental y el análisis de resultados se llevarán a cabo en el periodo comprendido entre enero y junio de 2025, lapso durante el cual se realizarán todas las etapas del trabajo.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos referenciales.

El capítulo presenta los fundamentos teóricos de la producción de combustibles alternativos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Guatemala. Se aborda el marco contextual y conceptual del uso de biocombustibles, con énfasis en el biodiésel, como alternativa a las emisiones de GEI. Se revisan experiencias internacionales y regionales que evidencian la importancia de políticas de mezcla obligatoria para su adopción, contrastando con la ausencia de un marco legal específico en el país.

2.1. Estado del arte.

Se abordan los antecedentes internacionales y nacionales, la pertinencia de su implementación en el país y la justificación técnica para su producción a partir de metanol. El propósito es establecer una base de referencia que sustente la viabilidad técnica y ambiental de esta propuesta, considerando tanto la experiencia internacional como las condiciones particulares del sector energético guatemalteco.

El uso de biocombustibles se ha consolidado como estrategia para disminuir las GEI al mezclarlos con combustibles fósiles, especialmente en el transporte. La incorporación de biodiésel en el diésel fósil reduce las emisiones provenientes de los escapes de motores de combustión interna (Bryden et al., 2022). Países como Estados Unidos lo utilizan desde finales del siglo XIX, aunque su uso continuo comenzó tras la crisis del petróleo de 1973; la obligatoriedad en todos los estados llegó en 2007 (Álvarez, 2009). En Brasil, la adopción inició en 1905 y se volvió obligatoria también tras la crisis de 1973. De acuerdo con Torres (2019), en Europa, la legislación obligatoria comenzó con Italia en 2006, seguida por Holanda (2007), Reino Unido (2008), Dinamarca y Alemania (2009) y Suecia (2018).

En Guatemala, el compromiso de reducir GEI es de 11,2 % para 2030 en términos no condicionados y del 22,6 % en términos condicionados, lo que limita las opciones de ejecución. El transporte representa una proporción significativa de estas emisiones y el país carece de un sistema de transporte público que permita reducir el número de vehículos en

circulación, lo que convierte a los biocombustibles en una alternativa viable y de rápida implementación (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

A nivel global, el biodiésel es utilizado en mezclas con diésel en proporciones de entre 2 % y 10 %, lo que ofrece ventajas ambientales al reducir las emisiones de escape (IICA, s. f.). En Guatemala, su uso aún no es generalizado debido a la ausencia de una política nacional que regule su mezcla con diésel, aunque existen propuestas para su futura incorporación (ACR, 2022). El biodiésel se produce principalmente mediante transesterificación de aceites con metóxido de sodio, generado a partir de metanol y una base.

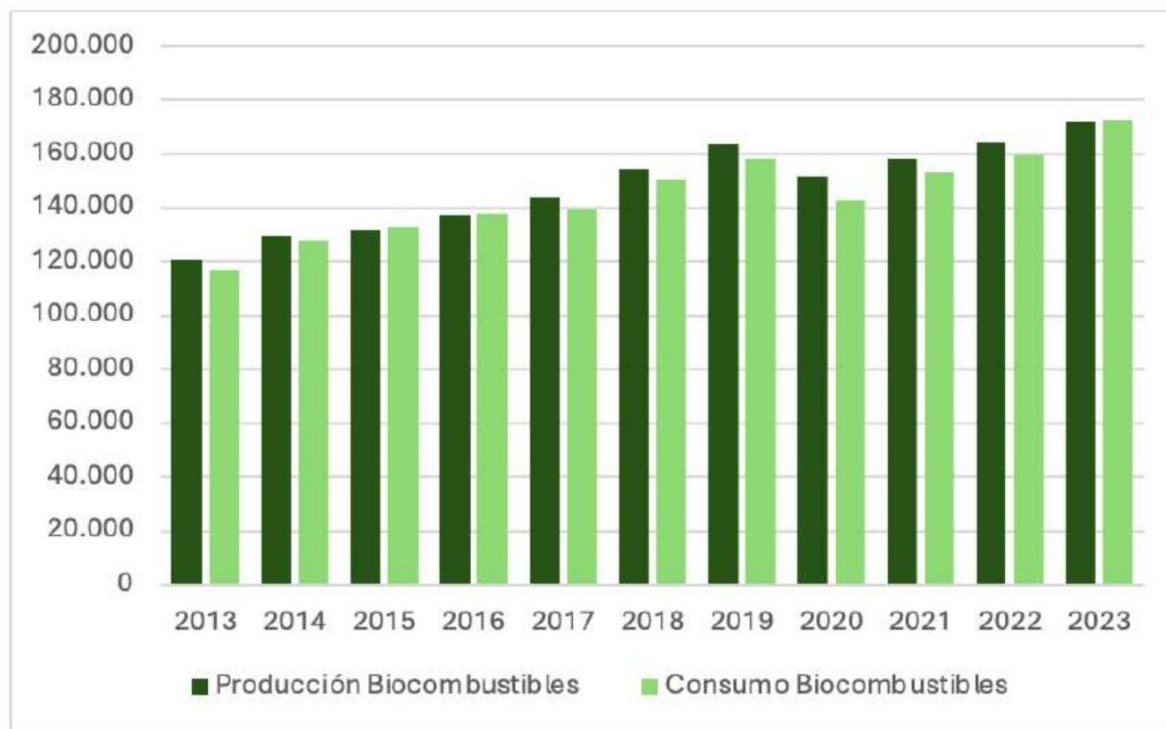
En este contexto, Guatemala presenta una ventaja competitiva al ser productor de etanol renovable, obtenido como subproducto de la industria azucarera. Esta característica permite explorar su uso en la producción de biodiésel, aportando valor agregado a un recurso nacional y evitando la dependencia de importaciones (MEM, 2023). Si bien actualmente la atención global también se centra en tecnologías como los vehículos eléctricos o de hidrógeno, en países con un parque vehicular envejecido y limitado acceso a dichas tecnologías, como Guatemala, la mejora de combustibles existentes constituye una medida costo-efectividad y de rápida aplicación (Abbaszaadeh et al., 2022).

La Figura 1 muestra la evolución de la producción y el consumo de biocombustibles en el período comprendido entre los años 2013 al 2023. En ella se observa la tendencia creciente en ambos indicadores, lo que refleja el impulso que han tenido las energías renovables a nivel global en las últimas dos décadas. La gráfica compara de manera directa la producción (en azul) con el consumo (en naranja), permitiendo identificar la relación entre la oferta y la demanda de este recurso energético.

Se aprecia que, a partir de 2013, tanto la producción como el consumo experimentan un crecimiento acelerado, alcanzando su punto máximo entre 2018 y 2019. Aunque en la mayoría de los años la producción supera ligeramente al consumo, en 2019 se observa un equilibrio casi total. Este comportamiento evidencia la consolidación del mercado de

biocombustibles y la creciente aceptación de estos como alternativa sostenible frente a los combustibles fósiles.

Figura 1: Evolución de la producción y consumo de biocombustibles.



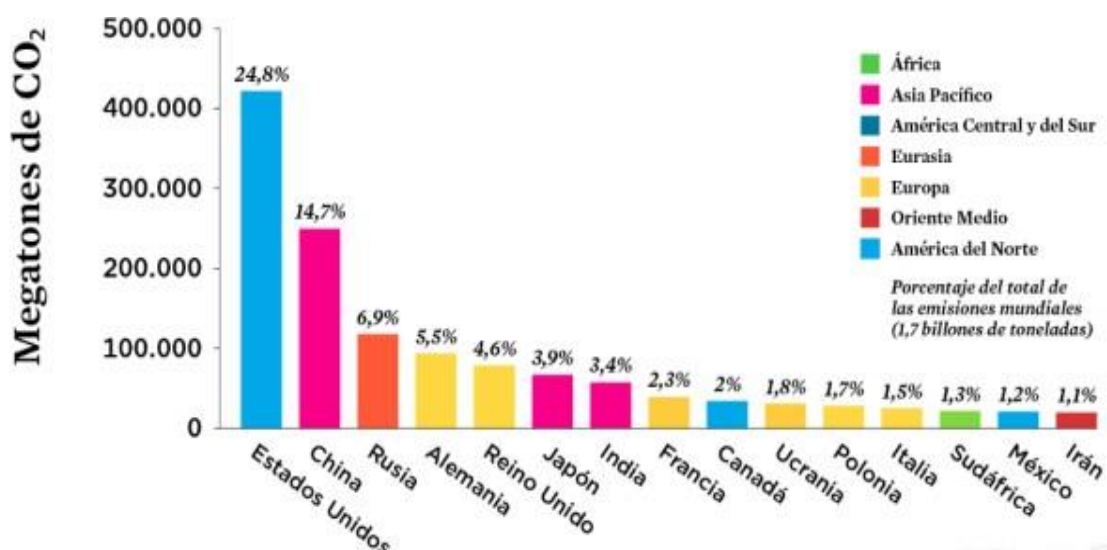
Nota. Tomado de Torroba et al (2024)

Los gases que se acumulan en la atmósfera y absorben la energía infrarroja del sol, son los denominados GEI. Según Saynes V. (2016), los principales GEI (Gases de Efecto Invernadero) emitidos por las actividades antropogénicas a nivel mundial son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O). (Mezquida. 2024)

Globalmente, la causa principal del incremento en las emisiones de éstos GEI son las actividades relacionadas con el sector energético que representan 26% de las emisiones, seguido del sector industrial (19%), forestal (17%), agrícola (14%), residencial y comercial (8%) y de manejo de desechos (3%). (Mezquida, 2021). Cabe mencionar que el uso de biocombustibles ayuda a reducir los gases de efecto invernadero causados por motores de combustión interna (Mezquida, 2024).

La Figura 2 presenta las emisiones de gases de efecto invernadero expresadas en kilotoneladas de equivalente de CO₂. El gráfico permite comparar la contribución de cada país miembro al total de emisiones, el cual asciende a 500,000 Megatoneladas de CO₂. Los valores se distribuyen de manera desigual, destacando la alta concentración en países con mayor actividad industrial y densidad poblacional.

Figura 2: Total de emisiones de gases de efecto invernadero por país en 2021.



Nota. Tomado de la Unión of Concerned Scientists con datos de Datos Global Carbon a través Our World in Data. Presenta los países con mayores tasas de emisión de CO₂ entre 1750-2021, por combustibles y cemento.

China es el segundo país con una tasa de emisiones de CO₂, que contribuye con el 14.7%, seguidos de Rusia, Reino Unido y Alemania, mientras que naciones como Sudáfrica, México e Irán muestran cifras significativamente menores. Esta disparidad evidencia la influencia de factores como el tamaño económico, la matriz energética y el grado de industrialización en la generación de emisiones, resaltando la necesidad de estrategias diferenciadas para cumplir con los compromisos climáticos en la región.

2.1.1. Antecedentes.

El interés por los biocombustibles surgió de forma significativa en la década de 1970, a raíz de la crisis del petróleo, cuando muchos países comenzaron a buscar alternativas para reducir su dependencia de los combustibles fósiles (Núñez, et al., 2023). Brasil fue uno de los pioneros en establecer un programa nacional de biocombustibles, impulsando el uso del etanol a gran escala en el sector transporte. Paralelamente, Europa y Estados Unidos desarrollaron políticas orientadas a diversificar su matriz energética, incluyendo normativas de mezcla obligatoria de biodiésel con diésel fósil con porcentajes desde el 1 al 10 por ciento (Torroba, et al., 2024). Estos avances internacionales demostraron que el impulso estatal, a través de legislación y políticas públicas, era fundamental para que los biocombustibles se integraran de forma sostenida en el mercado.

En América Latina, países como Colombia, Argentina y Perú implementaron en la década de 2000 programas obligatorios de mezcla de biodiésel con diésel, que oscilaron entre el 2 % y el 10 % dependiendo de la capacidad de producción nacional y las metas ambientales (IICA, s. f.). Estos marcos regulatorios no solo buscaron reducir emisiones, sino también promover la producción agrícola destinada a cultivos oleaginosos, fortaleciendo economías rurales. La experiencia regional ha mostrado que, sin un respaldo legal firme, la industria del biodiésel enfrenta dificultades para crecer de manera sostenida, debido a la volatilidad de los precios internacionales y la competencia con combustibles fósiles subsidiados.

En Guatemala, la ausencia de una política integral para biocombustibles ha limitado el desarrollo de esta industria. Durante varias décadas, no existieron normativas que regularan su uso o producción, a excepción de iniciativas aisladas lideradas por el sector privado. Un hito reciente se dio a finales de 2022, cuando el gobierno estableció lineamientos para el uso del etanol como aditivo para gasolinas. El 12 de julio de 2023 se publicó en el Diario de Centro América el Acuerdo Gubernativo 159-2023, que oficializó la Ley del Alcohol Carburante, entrando en vigor al día siguiente y con aplicación efectiva desde enero de 2024 (Gobierno de Guatemala, 2023). Sin embargo, el biodiésel continúa sin un marco legal que regule su producción y uso, lo que mantiene al país rezagado frente a sus vecinos y ante las tendencias globales.

En el contexto internacional, el uso de biocombustibles responde a políticas públicas que persiguen múltiples objetivos: reducir la dependencia del petróleo, mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, y ofrecer alternativas biodegradables y renovables frente a productos derivados de combustibles fósiles (Brijesh, et al., 2025). La ausencia de políticas para el biodiésel en Guatemala no solo retrasa el aprovechamiento de sus beneficios ambientales y económicos, sino que también limita el cumplimiento de compromisos internacionales de reducción de emisiones, como los establecidos en el Acuerdo de París (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2022).

Por lo tanto, el estado actual del tema en Guatemala refleja una etapa inicial en el desarrollo de biocombustibles, con avances regulatorios únicamente para el etanol y con una oportunidad significativa para establecer políticas que impulsen el biodiésel. La evidencia histórica y regional indica que la voluntad política, acompañada de marcos regulatorios claros y programas de incentivo, es clave para transformar este sector en una herramienta estratégica de desarrollo sostenible y mitigación del cambio climático.

2.1.2. Evolución histórica de los biocombustibles.

Los biocombustibles se utilizan desde hace muchos años, si bien Estados Unidos los utiliza desde finales del siglo XIX, no fue hasta la crisis del petróleo de 1973 que empezaron a utilizarlo en forma continua, aunque sin obligatoriedad. En el 2007, es de uso obligatorio para todos los estados con diferente grado. En Brasil se utilizan biocombustibles desde 1905 y no fue hasta 1973 que el uso se volvió obligatorio. (Álvarez, 2009). En Europa la utilización por medio de una legislación obligatoria inicia con Italia en 2006, Holanda 2007, Reino Unido en 2008, Dinamarca y Alemania en 2009 y Suecia en 2018. (Torres, 2019).

En la actualidad, en Guatemala no se utiliza ni se fabrica biodiésel, por lo que existe una fuerte dependencia del diésel tradicional, generando restricciones y rigideces en la matriz energética del país. De continuar esta dependencia energética, se acentuarían los problemas de contaminación, GEI e incumplimiento de los ODS. Se trata de iniciar procesos de

producción a pequeña escala, que luego se pueda ampliar a grandes cantidades, por lo que, la asociación de combustibles renovables de Guatemala indica: “En el caso de Guatemala no se produce biodiésel a nivel industrial, hay algunos pequeños productores que lo hacen de aceite reciclado de frituras, pero a muy pequeña escala” (ACR, 2022).

2.2. Marco teórico.

Para entender el soporte teórico que respalda esta investigación, se recurre a los aportes que realizan autores como Abbaszaadeh et al. (2022) sobre la transesterificación, Meher et al. (2021) y Francis, et al. (2021), entre otros.

2.2.1. Transesterificación.

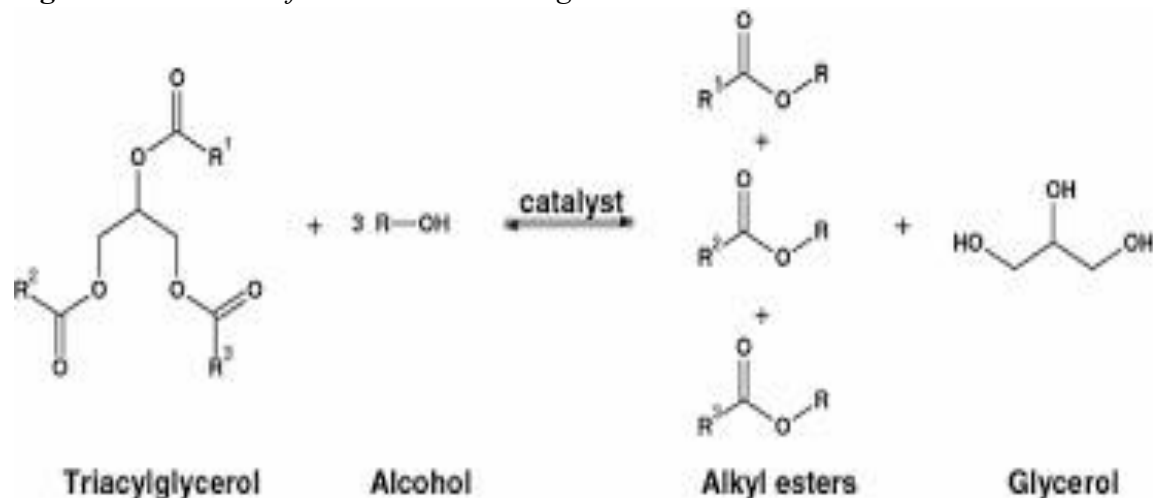
La transesterificación para la producción de biodiésel generalmente consiste en la reacción de un triéster de glicérico (triglicérido) con un alcohol para formar alquil ésteres y glicerol. Debido a que la reacción es reversible, se utiliza alcohol en exceso para desplazar el equilibrio hacia el lado de los productos. El metanol y el etanol son los alcoholes usados con mayor frecuencia, especialmente el metanol debido a su bajo costo y a sus ventajas físicas y químicas (es polar y es el alcohol de cadena más corta). Además, el metanol reacciona rápidamente con los triacilglicéridos y se disuelve fácilmente en álcalis.

Para realizar una transesterificación estequiométricamente completa es necesario mantener una relación molar de alcohol a triacilglicérido de 3:1. En la práctica es necesaria una relación mayor para desplazar el equilibrio y aumentar el rendimiento, aun así, la velocidad de transesterificación no solo depende de las condiciones de operación o del tipo de catalizador sino también del tipo y variedad de triacilglicéridos presentes en el aceite o en la grasa (Abbaszaadeh et al. 2022).

Las variables que más afectan el proceso de transesterificación son la temperatura, tiempo y presión de la reacción, la razón de alcohol: aceite, la concentración, el tipo de catalizador, la intensidad de agitación y el tipo de materia prima (Abbaszaadeh et al. 2022).

La Figura 3 muestra la reacción de transesterificación, proceso central en la producción de biodiésel. En esta reacción, un triglicérido reacciona con un alcohol (generalmente metanol o etanol) en presencia de un catalizador, dando lugar a una mezcla de ésteres de ácidos grasos —que constituyen el biodiésel— y glicerol como subproducto.

Figura 3: *Transesterificación de un triacilglicérido con alcohol.*



Nota. Tomado de Abbaszaadeh et al, (2022).

Este mecanismo es fundamental porque permite transformar aceites vegetales o grasas residuales en un combustible renovable con propiedades similares al diésel fósil. La producción simultánea de glicerol representa una ventaja adicional, ya que este compuesto tiene aplicaciones en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria, lo que incrementa la viabilidad económica y ambiental del proceso. El uso de catalizador mejora la superficie de contacto, la velocidad de reacción y el rendimiento en producción de biodiésel, ya que resuelve los problemas de doble fase entre los triglicéridos y el alcohol. Sin el uso de catalizador, la velocidad de reacción es muy lenta y no se obtiene un buen rendimiento (Abbaszaadeh et.al, 2022).

Una adecuada selección de catalizador permite reducir el costo de producción. Los catalizadores utilizados se pueden dividir en homogéneos (líquidos) y heterogéneos (sólidos). Los heterogéneos son los más utilizados y se pueden categorizar en catalizadores

básicos y ácidos. La transesterificación homogénea básica requiere de una separación posterior a la reacción del catalizador, subproducto (glicerol) y el producto final de la reacción (Abbaszaadeh et al. 2022).

Los catalizadores deben coincidir con el aceite o la grasa de origen, utilizados para obtener una producción de biodiésel de la mejor calidad. Esta producción de biodiésel, generalmente da como resultado subproductos pequeños, a veces no deseados como "jabón" debido a la reacción de saponificación que puede llevarse a cabo por el uso de los referidos catalizadores en la producción de biodiésel. Dicha reacción se puede presentar por la presencia de ácidos grasos libres y agua.

Así, una alta presencia de agua provoca que el catalizador se consuma en la producción de jabones y reduzca la eficiencia de la transesterificación deseada como lo señalan Abbaszaadeh et al. (2022) y HFT Education (s.f.). Diferentes combinaciones de aceite de origen y catalizadores, en cualquiera de sus formas -*hidróxido de potasio, hidróxido de sodio y soluciones de metóxido de sodio o metóxido de potasio*- pueden reducir el contenido de jabón y dar un mayor rendimiento (HFT Education, s.f.).

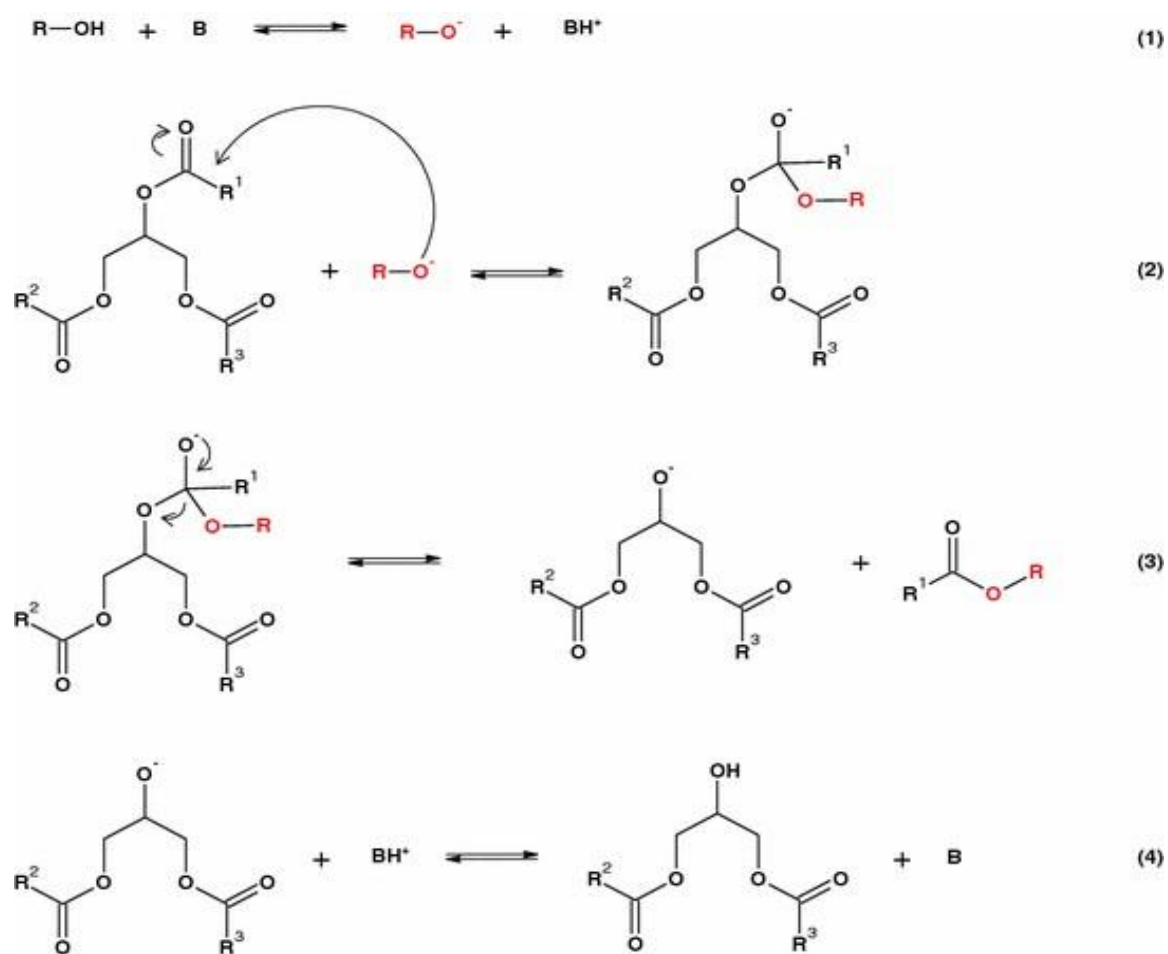
Para realizar la transesterificación se puede utilizar una catálisis ácida o básica. La catálisis ácida puede ser realizada por ácidos fuertes, preferiblemente por ácidos sulfónico y sulfúrico. Estos catalizadores dan rendimientos muy altos en ésteres de alquilo, pero estas reacciones son lentas, requiriendo típicamente una temperatura superior a 100 ° C y más de 3 h para completar la conversión (Meher et al. 2021).

Primero, la protonación del grupo carbonilo del éster conduce a la formación de un carbocatión que, tras un ataque nucleofílico del alcohol, produce un intermediario tetraédrico, que elimina el glicerol para formar el nuevo éster y regenera el catalizador H^+ . (Francis, et al. 2021).

La Figura 4 representa el mecanismo de reacción de la transesterificación catalizada en medio básico. En la primera etapa (1), el alcohol (ROH) es desprotonado por una base (B),

generando el ion alcóxido (RO^-), que constituye la especie nucleofílica activa. En la etapa (2), el alcóxido ataca al carbono carbonílico de un triglicérido, formando un intermedio tetraédrico inestable. Posteriormente, este intermedio se reorganiza y libera un éster de ácido graso (R^1COOR) junto con un diglicérido aniónico, como se observa en la etapa (3). Finalmente, en la etapa (4), el anión del diglicérido es protonado, regenerando la base (B) y dejando disponible el diglicérido para continuar con reacciones sucesivas.

Figura 4: Mecanismo general para la transesterificación en medio ácido.



Nota. Tomado de Francis et.al, (2021).

Este mecanismo explica cómo, en presencia de un catalizador básico como NaOH o KOH, los triglicéridos presentes en aceites o grasas reaccionan con alcoholes de cadena corta (usualmente metanol o etanol) para formar ésteres metílicos o etílicos (biodiésel) y glicerol

como subproducto. El proceso es reversible, pero las condiciones de operación (exceso de alcohol y agitación) desplazan el equilibrio hacia la formación de biodiésel. De esta manera, el esquema muestra la importancia de la catálisis básica para alcanzar altas conversiones en tiempos reducidos y con bajo costo de producción.

La catálisis básica realiza la transesterificación de manera más rápida y además los catalizadores básicos son menos corrosivos que los ácidos usados comúnmente, debido a esto es más común encontrarse con procesos de transesterificación de este tipo en la industria (Francis, et al. 2021).

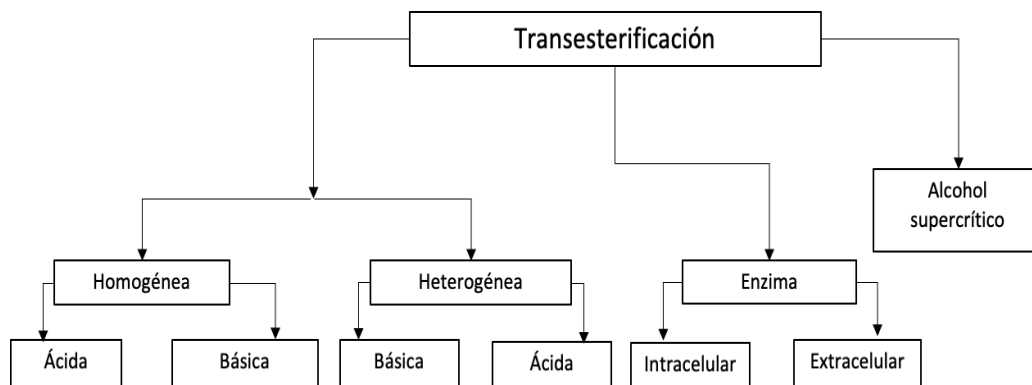
El primer paso es la reacción de la base con el alcohol, produciendo un alcóxido y el catalizador protonado. El ataque nucleofílico del alcóxido al grupo carbonilo del triglicérido genera un intermediario tetraédrico a partir del cual se forman el éster de alquilo y el anión correspondiente del diglicérido. Este último desprotona el catalizador, regenerando así la especie activa, que es capaz de reaccionar con una segunda molécula del alcohol, iniciando otro ciclo catalítico (Francis, et al. 2021), como se mostró en la figura 3.

En la vía del enol (parte superior), una cetona o aldehído en medio ácido se tautomería a su forma enólica, la cual ataca al carbonilo de otra molécula en su forma protonada, generando un producto de adición aldólica con un grupo β -hidroxicarbonilo. Posteriormente, bajo condiciones de calentamiento, este compuesto puede perder una molécula de agua, originando el producto de condensación aldólica con un doble enlace conjugado.

En la vía del enolato (parte inferior), la reacción ocurre en condiciones básicas. La base extrae un protón en α del carbonilo, formando un enolato que actúa como nucleófilo frente al carbonilo de otra molécula. El resultado inicial es un β -hidroxicarbonilo, equivalente al producto de adición observado en la vía ácida. Al igual que en el mecanismo anterior, la deshidratación conduce al producto final de condensación, que corresponde a un compuesto α,β -insaturado. Este mecanismo es ampliamente aplicado en síntesis orgánica por su capacidad de construir esqueletos carbonados complejos a partir de compuestos simples.

Así mismo, la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) define al biodiésel como un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivado de lípidos tales como aceites vegetales o grasas animales. Comúnmente se produce por una reacción de dichos aceites vegetales o grasas animales con un alcohol, en presencia de un catalizador para producir ésteres monoalquílicos y glicerina. (ASTM International, 2015; CEN, 2024).

Figura 6: *Tecnologías para la producción de biodiésel*



Nota. Elaborado en base a Crespo (2021).

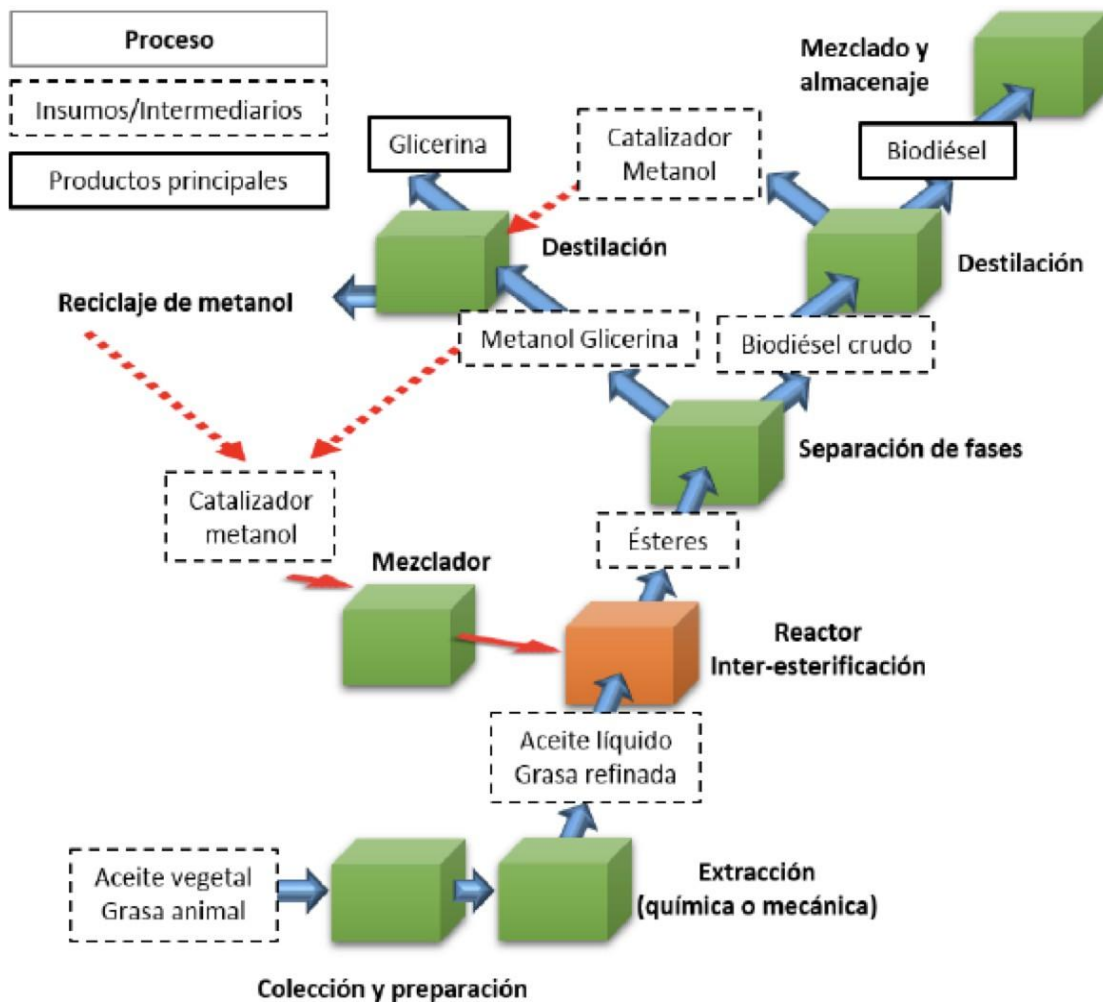
El factor principal que determina el costo de producción de biodiésel es la materia prima, que es aproximadamente el 80% del costo operativo total. Por lo tanto, se podría lograr una gran ventaja económica simplemente utilizando una materia prima más económica, como grasas y aceites de desecho. La producción de biodiésel está experimentando rápidas reformas tecnológicas en la industria y el mundo académico.

En la actualidad, el principal inconveniente de la comercialización del biodiésel es su mayor costo que el diésel a base de petróleo. Las cuatro formas principales de producir biodiésel son el uso directo y la mezcla de aceites vegetales, micro emulsiones, craqueo térmico (pirólisis) y transesterificación. Uno de los métodos más comunes para reducir la viscosidad del aceite en la industria del biodiésel se llama transesterificación. Este ocurre,

entre un aceite vegetal o animal y un alcohol (metanol, etanol, butanol) en presencia o no de un catalizador (homogéneo, heterogéneo) (Abbaszadeh et al. 2022; Fangrui et al. 1999).

La Figura 7 presenta el diagrama general del proceso de producción de biodiésel, el cual se inicia con la colección y preparación de aceites vegetales o grasas animales, que posteriormente son sometidos a una etapa de extracción química o mecánica para obtener la materia prima en forma de aceite líquido o grasa refinada. Este insumo se introduce en un reactor de interesterificación, donde en presencia de metanol y un catalizador se lleva a cabo la reacción principal para transformar los triglicéridos en ésteres de ácidos grasos.

Figura 7: *Proceso de producción de biodiésel*



Nota. Tomado de Pachecho (2016).

Tras la reacción, los productos obtenidos pasan a una etapa de separación de fases, donde se distinguen los ésteres (biodiésel crudo), glicerina y exceso de metanol. El biodiésel crudo se somete a destilación para eliminar impurezas y restos de alcohol, mientras que la glicerina se separa como subproducto aprovechable. Posteriormente, el biodiésel purificado pasa por un proceso de mezclado y almacenamiento para su distribución final.

Un aspecto relevante del proceso es el reciclaje de metanol, que contribuye a reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental. De esta manera, el sistema integra operaciones de preparación, reacción, separación, purificación y reciclaje, lo que permite obtener biodiésel de calidad, cumpliendo con estándares internacionales, al tiempo que se generan coproductos de valor agregado como la glicerina.

Es importante recalcar que desde 1973 a la fecha, el precio del petróleo ha tenido muchas alzas y muchas bajas, muchas veces por temas políticos en los países en donde se produce, en algunas ocasiones al petróleo se le denomina el oro negro.

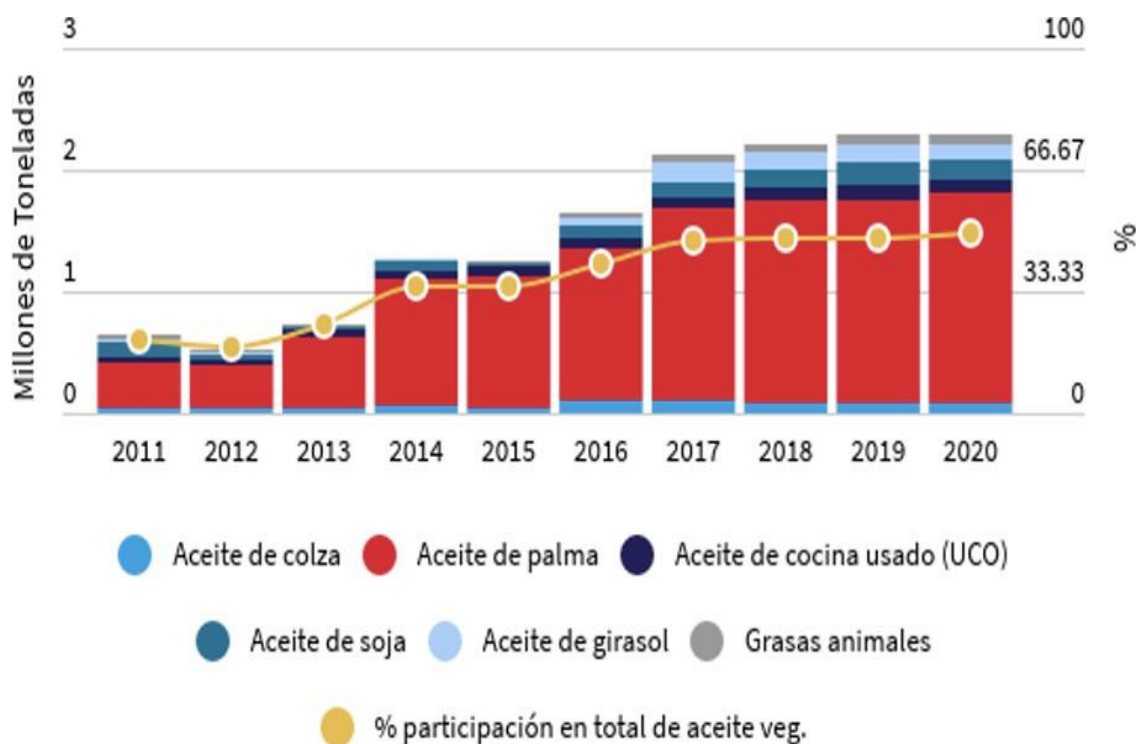
El biodiésel es un biocombustible, usado para mezclar o sustituir el diésel, reduce los gases de efecto invernadero y se produce a partir de aceites naturales y grasas animales. Según Castro et al. 2017, pp. 40), “El biodiésel es un combustible renovable derivado de aceites o grasas de origen vegetal o animal.

El prefijo bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; mientras que diésel se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiésel puede ser usado en forma pura o mezclado con diésel de petróleo”. La Figura 8 muestra la evolución del uso de diferentes materias primas para la producción de biodiésel en la Unión Europea (UE-27) durante el período 2011–2020.

A partir de la figura 8, se observa que el aceite de palma representa la fracción más significativa dentro de las materias primas utilizadas, aunque con una tendencia a la

estabilización en los últimos años. En contraste, el uso de aceite de cocina usado (UCO) ha mostrado un incremento sostenido, reflejando las políticas de la Unión Europea orientadas a priorizar materias primas residuales frente a aceites vírgenes, con el objetivo de reducir la presión ambiental y mejorar la sostenibilidad del biodiésel. Además, los aceites de colza, soya y girasol, junto con las grasas animales, presentan una participación menor pero constante en la matriz de producción.

Figura 8: Aceites vegetales (incluido UCO) usado para la producción de biodiésel



Nota. Tomado de OILWORLD (2021) y Datos de la UE-27

La figura 8, también incluye la línea amarilla que indica el porcentaje de participación en el total de aceites vegetales, la cual evidencia un crecimiento progresivo del aporte de residuos y subproductos, especialmente UCO, en sustitución de aceites comestibles.

Por otro lado, aunque los aceites de colza, soya, coco, maní, ricino, oliva y girasol, junto con las grasas animales, presentan una menor participación, su inclusión refleja la diversificación de insumos disponibles para la producción de biodiésel.

La línea amarilla, que representa el porcentaje de participación respecto al total de aceites vegetales, muestra un incremento progresivo, destacando la sustitución parcial de aceites vírgenes por insumos residuales. En el contexto de esta investigación, esta evolución revela la importancia de orientar la producción de biodiésel en Guatemala hacia el aprovechamiento de aceites residuales y subproductos (palmiste, grasas animales, material de trampas de grasas), en lugar de depender exclusivamente de aceites vírgenes de alto valor alimentario.

La obtención de aceites usados de cocina representa un desafío, pues se requiere de logística de recolección planificada para lograr un sistema de recolección de bajo costo y sin dificultad de recolección. En dicho sistema, las empresas deberán asumir la responsabilidad de entregar los aceites, para lo cual se necesitan medidas regulatorias. Al respecto, la experiencia europea, constituye un referente que ofrece evidencia para una adecuada validación y pertinencia de impulsar modelos productivos más sostenibles, aprovechando recursos disponibles y minimizando impactos ambientales.

2.2.3. Resumen de la norma ASTM.

La ASTM, es la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés), es la organización de estándares y medidas internacionales que desarrolla y publica acuerdos voluntarios de normas técnicas para diferentes materiales, productos o servicios. El biodiésel generalmente se produce a partir de aceites vegetales, grasas animales y aceites de cocina usados, y las materias primas alternativas, como las algas, reciben un interés cada vez mayor.

La reacción de transesterificación que produce biodiésel también produce glicerol y se desarrolla paso a paso a través de intermedios de mono y diacilglicerol. Como resultado,

pequeñas cantidades de glicerol, material de partida lipídico e intermedios pueden permanecer en el producto final de biodiésel incluso después de la purificación.

En la tabla 1 se muestran las propiedades que deben analizarse de un biodiésel, para cumplir con los estándares internacionales, así como el método de ensayo que debe realizarse, mostrando los límites máximos o mínimos, según las unidades de medida que deben usarse de referencia.

Tabla 1: Normas ASTM D6751 para B100.

Propiedad	Método de ensayo	Límite	Unidad
Punto de inflamación	ASTM D 93	130	°C
Agua y sedimentos	ASTM D 2709	0.05	% volumen
Viscosidad cinemática a 40 °C	ASTM D 445	1.9-6.0	mm ² /s
Cenizas sulfatadas	ASTM D 874	0.02	% masa
Azufre	ASTM D 5453	0.0015 o 0.05	% masa
Corrosión en tira de cobre	ASTM D 130	Nº 3	
Número cetano	ASTM D 613	47	
Punto de nube	ASTM D 2500	Reportar	°C
Residuo de carbono (100 %)	ASTM D 4530	0.05	% masa
Número de acidez	ASTM D 664	0.8	mg KOH/g
Glicerina libre	ASTM D 6584	0.02	% masa
Glicerina total	ASTM D 6584	0.24	% masa
Contenido de fósforo	ASTM D 4951	0.001	% masa
Temperatura de destilación (90 % recuperado)	ASTM D 1160	360	°C

Nota. Elaboración propia.

Dependiendo de la materia prima, otros materiales contenidos originalmente en una materia prima pueden pasar al biodiesel. El perfil de ácidos grasos de un combustible biodiésel corresponde al de su materia prima. Debido a la variedad de materias primas con diferentes perfiles de ácidos grasos, esto da como resultado diferentes propiedades del combustible. La calidad general de un combustible biodiésel se ve afectada por todas estas cuestiones. Por tanto, estas cuestiones se abordan en varias especificaciones de la Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM), así como en otras normas de biodiésel. Las normas ASTM también han recibido numerosas actualizaciones a lo largo del tiempo.

2.3. Marco teórico – conceptual

El estudio del biodiésel como alternativa energética requiere comprender un conjunto articulado de conceptos, teorías y relaciones que explican tanto la viabilidad técnica del biocombustible como su impacto ambiental, económico y social. En este sentido, el marco teórico-conceptual integra las bases científicas de la transesterificación, las propiedades del biodiésel, su relación con la seguridad energética y los enfoques contemporáneos de sostenibilidad, estableciendo una visión metodológica coherente para el análisis del fenómeno.

Desde una perspectiva conceptual, los biocombustibles se definen como combustibles obtenidos a partir de biomasa renovable y capaces de sustituir parcial o totalmente a los combustibles fósiles. En el caso del biodiésel, este se compone de ésteres metílicos de ácidos grasos derivados de aceites vegetales o grasas animales, cuya combustión presenta menores emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos. La producción del biodiésel se fundamenta en la reacción de transesterificación, en la cual un triglicérido reacciona con un alcohol —comúnmente metanol o etanol— en presencia de un catalizador para producir ésteres y glicerol. Este proceso constituye la base técnica que sustenta la variable dependiente del estudio: la producción de biodiésel como alternativa energética en Guatemala.

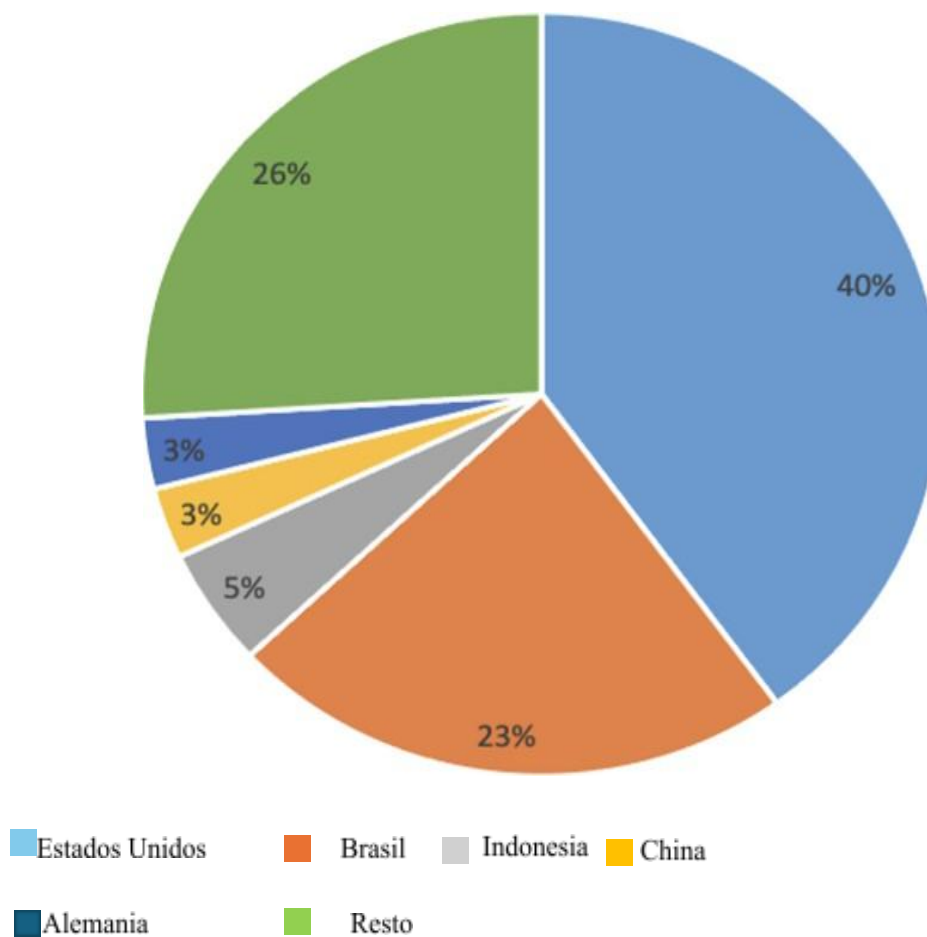
Asimismo, conceptos asociados a la sostenibilidad energética permiten contextualizar el valor estratégico del biodiésel en países dependientes del petróleo. La transición energética, entendida como el proceso de sustitución progresiva de combustibles fósiles por energías renovables, requiere alternativas que sean técnicamente viables, económicamente competitivas y ambientalmente sostenibles.

En este marco, el aprovechamiento de aceites residuales de cocina constituye un enfoque de economía circular, al transformar un residuo contaminante en un insumo energético con valor agregado. Esta relación conceptual vincula directamente la variable independiente del

estudio —uso de aceites residuales como materia prima— con los objetivos de reducción de dependencia petrolera y disminución de emisiones.

La Figura 9 muestra la distribución de la producción mundial de biodiésel, en donde Estados Unidos y Brasil como los mayores productores (63%), Indonesia (5%), China y Alemania (3% cada uno) y 26% resto del mundo, lo que indica que hay muchos más países cuyo aporte está por debajo de un 1%.

Figura 9: *Distribución porcentual de los biocombustibles en el mundo.*



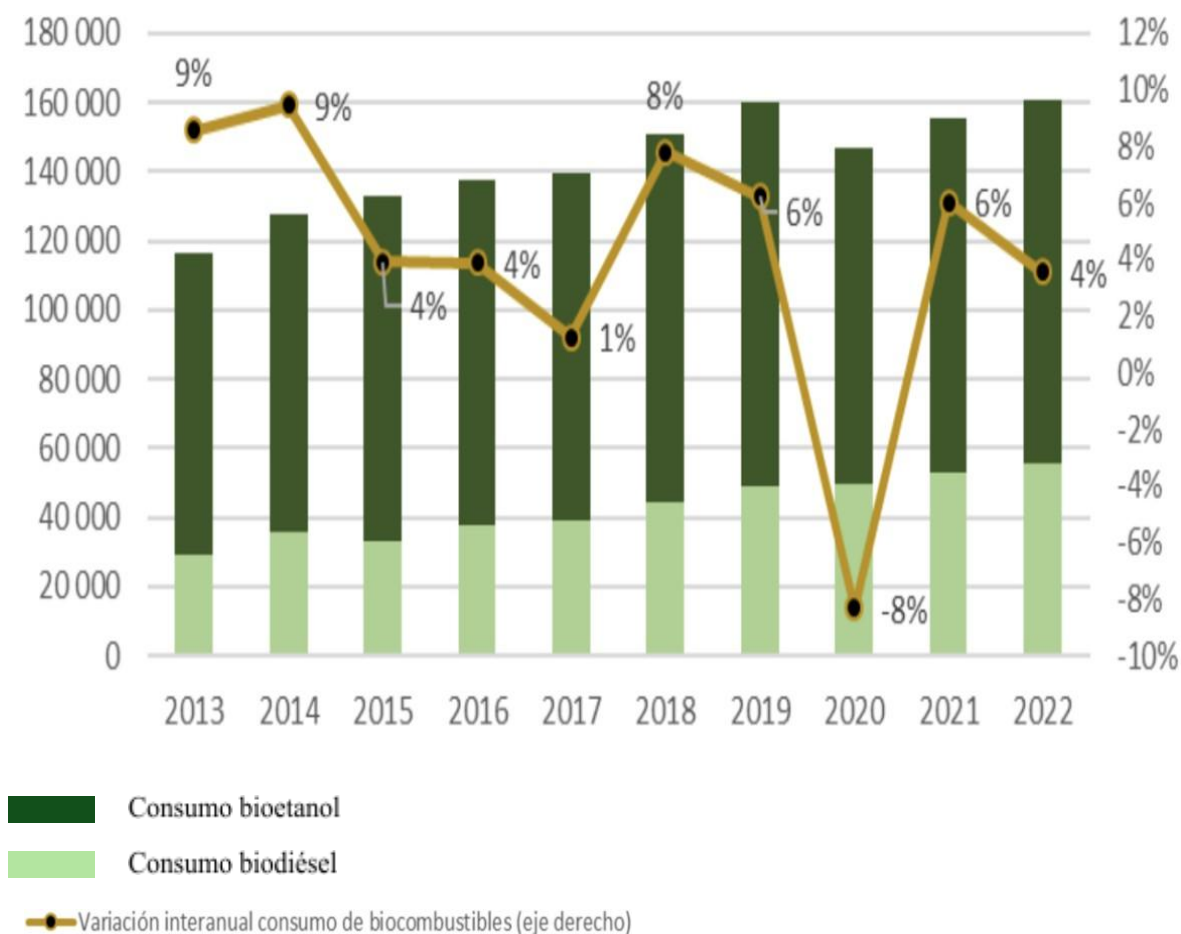
Nota. Tomado de Torroba, A. (2024)

La Figura 10, ilustra la variación interanual porcentual del consumo de biocombustibles, así como la tendencia del consumo total de bioetanol y biodiésel entre 2013 y 2022. Se observa

que el consumo de bioetanol mantiene una mayor participación respecto al biodiésel, aunque ambos muestran una tendencia de crecimiento sostenido en la última década.

El comportamiento interanual revela fluctuaciones significativas: mientras que en 2013 y 2014 se registraron aumentos del 9 %, en 2020 se produjo una fuerte caída del -8 %, atribuible a la reducción de la demanda energética durante la pandemia. Sin embargo, a partir de 2021 la recuperación fue evidente, con tasas positivas que alcanzaron nuevamente el 6 % en 2021 y un 4 % en 2022.

Figura 10: Variación porcentual, tendencia y producción total (en miles de m³).



Nota. Tomado de Torroba, A. (2024)

Este comportamiento refleja tanto la resiliencia del sector como su vulnerabilidad frente a crisis globales. Para la investigación, esta figura demuestra que los biocombustibles no solo mantienen una presencia estable en la matriz energética, sino que además muestran un crecimiento progresivo en condiciones normales de mercado. Esto refuerza la importancia de impulsar proyectos locales de biodiésel, que podrían contribuir a diversificar la matriz energética y reducir la dependencia de combustibles fósiles importados.

En términos de variación interanual (línea dorada), la producción muestra un comportamiento cíclico con incrementos relevantes en 2013 (8 %), 2014 (7 %) y 2018 (7 %). Sin embargo, entre 2015 y 2016 los aumentos fueron moderados (2 % y 4 % respectivamente), en el 2020 se produjo una caída significativa de -7 %, asociada al impacto de la pandemia de COVID-19 en el transporte y demanda de combustibles.

Finalmente, la incorporación del biodiésel en la matriz energética requiere comprender su interacción con políticas públicas, normativas de calidad (como ASTM D6751) y modelos de escala productiva. Estos elementos forman parte de la dimensión conceptual necesaria para evaluar la factibilidad técnica, económica y política del sistema alternativo de producción propuesto. El marco teórico-conceptual, por lo tanto, no solo define los conceptos centrales del estudio, sino que establece las bases para su análisis, predicción y validación dentro del contexto guatemalteco.

2.4. Marco histórico y actual.

El debate sobre los biocombustibles está estrechamente ligado a cuestiones sociales y de seguridad alimentaria. Esto se debe a que materias primas como la caña de azúcar, el maíz y la remolacha, utilizadas ampliamente para la producción de etanol, requieren el uso de tierras agrícolas que podrían destinarse a la producción de alimentos, lo que puede generar conflictos en el acceso y disponibilidad de estos (FAO, 2022). Además, el hecho de que estas materias primas sean alimentos básicos incrementa la preocupación por su impacto en los precios y en la seguridad alimentaria (Timilsina & Shrestha, 2011).

En Guatemala, la producción de etanol no se realiza directamente a partir de caña de azúcar destinada al consumo, sino a partir de un subproducto del proceso azucarero conocido como melaza. Este residuo contiene azúcares no cristalizados que pueden ser fermentados para obtener etanol, lo cual constituye una ventaja en términos sociales y ambientales, ya que no compite directamente con cultivos alimentarios ni requiere tierra adicional (Klass, 1998). Este etanol puede obtener certificaciones ambientales internacionales, fomenta la generación de empleo y, al provenir de un residuo, puede competir económicamente con el precio de la gasolina (IICA, 2022).

2.4.1. Antecedentes internacionales.

El contexto de calentamiento global, reflejado en las recientes noticias sobre el incremento de la temperatura promedio mundial y la relevancia de los gases de efecto invernadero, influyó directamente en la manera de ejecutar e interpretar la investigación. Dado que la conversión total del parque vehicular guatemalteco a la movilidad eléctrica aún no es realista, el uso de biocombustibles emerge como una solución intermedia factible. En este escenario, el estudio demuestra la posibilidad de emplear biodiésel producido con etanol como una estrategia concreta para mitigar las emisiones en el transporte nacional.

La Figura 11 presenta el mandato de uso de bioetanol en las gasolinas a nivel mundial, mostrando los porcentajes de mezcla obligatoria en distintos países y regiones. Se observa una gran heterogeneidad en las políticas: mientras que países como Brasil alcanzan mandatos del 27 %, otros como Estados Unidos mantienen un promedio del 10,5 %, evidenciando su rol de liderazgo en la incorporación de biocombustibles. En contraste, naciones asiáticas como China (1,8 %) y Japón (1,9 %) presentan niveles considerablemente más bajos, reflejando diferencias en la disponibilidad de materia prima y en los marcos regulatorios locales.

En Europa, el promedio es de 6,3 %, con variaciones entre países que van del 5 % al 11,5 %, lo cual refleja una política común, pero adaptada a las condiciones energéticas y agrícolas de cada nación. En África y otras regiones emergentes, los porcentajes se

Para efectos de la investigación, esta figura revela cómo la implementación obligatoria de mezclas de biodiésel depende en gran medida de la disponibilidad de materias primas locales y de los marcos regulatorios de cada país. Además, evidencia que las naciones que han impulsado un mandato elevado (Suecia, Indonesia, Brasil) han logrado consolidar mercados internos más estables y previsibles, lo que representa un aprendizaje clave para países como Guatemala, donde aún no existe una normativa definida para el uso obligatorio de biodiésel en el transporte.

La Tabla 2 muestra la evolución de la producción mundial de biocombustibles en el período 2013–2022, diferenciando entre biodiésel y bioetanol. Se observa un crecimiento sostenido en ambos casos, con el bioetanol consolidado como el de mayor volumen absoluto y el biodiésel presentando el incremento relativo más significativo. Este comportamiento refleja el avance tecnológico y el aumento de la capacidad instalada para atender la demanda energética global mediante fuentes renovables.

Tabla 2: *Producción de biocombustibles (en miles de m³).*

Año	Producción de biodiésel	Producción de bioetanol	Producción de biocombustibles
2013	30,623.00	90,019.00	120,641.00
2014	33,927.00	95,558.00	129,485.00
2015	32,020.00	99,896.00	131,916.00
2016	36,920.00	100,404.00	137,324.00
2017	40,764.00	102,954.00	143,718.00
2018	44,617.00	109,677.00	154,294.00
2019	50,751.00	112,619.00	163,370.00
2020	50,128.00	101,249.00	151,377.00
2021	55,784.00	104,815.00	160,599.00
2022	57,157.00	108,210.00	165,367.00

Nota. Tomado de Torroba, et al. (2024)

En conjunto, la producción total pasó de 120,641 mil m³ en 2013 a 165,367 mil m³ en 2022, evidenciando una clara expansión de la industria.

El único descenso marcado se presentó en 2020, debido a la reducción de movilidad y demanda energética por la pandemia de COVID-19. Sin embargo, los datos de 2021 y 2022 muestran una rápida recuperación, lo que sugiere que la tendencia de crecimiento se mantiene sólida a largo plazo.

La Tabla 3 recoge la evolución del consumo mundial de biocombustibles entre 2013 y 2022. Al igual que en la producción, el bioetanol destaca como el de mayor consumo, mientras que el biodiésel ha experimentado un crecimiento continuo y constante, lo que indica su consolidación en los mercados energéticos. El incremento general refleja una mayor aceptación de los biocombustibles en sectores como transporte y generación eléctrica.

Tabla 3: *Consumo de biocombustibles (en miles de m³).*

Año	Consumo de biodiésel	Consumo de bioetanol	Consumo de biocombustibles
2013	29,220	87,482	116,702
2014	36,055	91,687	127,742
2015	33,296	99,450	132,746
2016	37,987	99,922	137,909
2017	39,396	100,262	139,658
2018	44,182	106,363	150,545
2019	48,929	110,981	159,911
2020	49,943	96,662	146,605
2021	52,888	102,585	155,473
2022	55,367	105,642	161,009

Nota. Tomado de Torroba, et al. (2024)

La tabla 3 también muestra que, el consumo total pasó de 116,702 mil m³ en 2013 a 161,009 mil m³ en 2022, reflejando un aumento considerable de la demanda de biocombustibles. Al igual que en la producción, en 2020 se registra una caída significativa vinculada a la pandemia, aunque en los años siguientes se evidencia una recuperación que acompaña la reactivación económica iniciada por los países.

Esto confirma la resiliencia del sector y su potencial para seguir expandiéndose como parte de la transición energética a nivel global, ya que los países en desarrollo cada vez más necesitarán el uso de energía nuevos procesos que llevará al aumento de personas que

requieran utilizar energía, no solo como eléctrica, sino también en combustibles o procesos térmicos.

La Tabla 4 presenta los mandatos de mezcla de bioetanol y biodiésel en América del Norte, donde se observa que tanto Estados Unidos como Canadá han desarrollado esquemas regulatorios diversificados a nivel estatal y provincial, mientras que México mantiene un nivel bajo y sin obligatoriedad plena.

En América del Norte, los mandatos de mezcla varían ampliamente según el nivel de descentralización de cada país.

Estados Unidos muestra heterogeneidad estatal con valores que van desde el 2 % hasta el 20 % de biodiésel, mientras que Canadá combina mandatos provinciales entre el 2 % y 10 %. México, en contraste, mantiene un bajo nivel de compromiso con 5.8 % de bioetanol y sin obligación de biodiésel, lo que evidencia diferencias significativas en la implementación regional.

Tabla 4: *Mandatos de bioetanol y biodiésel en América del Norte*

Estado / Provincia	Mandato de bioetanol	Mandato de biodiésel	Comentario
Canadá	5%	2%	Provincias con mandatos: bioetanol 5–10%, biodiésel 2–5%
Canadá (Alberta)	5%	2%	
Canadá (Columbia Británica)	5%	4%	
Canadá (Manitoba)	10%	5%	
Canadá (Ontario)	10%	4%	
Canadá (Saskatchewan)	7.50%	2%	
Canadá (Quebec)	10%	3%	
Estados Unidos	10.50%	5.67%	Predomina E10. Mandatos varían por estado.
EE.UU. (Pensilvania)	10%	2%	Activación futura tras evaluación. B5–B20 varía según estación.
EE.UU. (Luisiana)	2%	2%	
EE.UU. (Massachusetts)	0%	15%	
EE.UU. (Minnesota)	10%	20%	
EE.UU. (Misuri)	10%	0%	
EE.UU. (Nuevo México)	0%	5%	
EE.UU. (Oregón)	10%	5%	

EE.UU. (Washington)	2%	2%	
México	5.80%	0%	No mandatorio.

Nota. Tomado de Torroba, et al. (2024)

La Tabla 5 recoge la situación de los mandatos en América Central y el Caribe, donde predominan los programas iniciales y porcentajes reducidos, reflejando tanto limitaciones de infraestructura como oportunidades emergentes para la integración de biocombustibles.

En América Central y el Caribe, los mandatos aún se encuentran en etapas iniciales, con porcentajes moderados como el 5 % en Guatemala y el 8 % en Costa Rica. Si bien Jamaica alcanza un 10 % en bioetanol, en la mayoría de los países los marcos regulatorios son débiles o inexistentes, lo que sugiere un amplio potencial para políticas futuras en la región.

Tabla 5: *Mandatos de bioetanol y biodiésel en América Central y el Caribe*

Estado	Mandato de bioetanol	Mandato de biodiésel	Comentario
Costa Rica	8%	5%	Consumo 0 % en 2020. Plan E10 para 2024
Guatemala	5%	0%	Norma fija E5 mínima a partir de 2025.
Jamaica	10%	0%	
Panamá	—	—	(no reportado)
República Dominicana	—	—	(no reportado)
Haití	—	—	(no reportado)

Nota. Tomado de Torroba, et al. (2024)

La Tabla 6 presenta los mandatos en América del Sur, donde se ubican algunos de los países con mayor ambición en la incorporación de biocombustibles.

Los países de mayor incorporación de biocombustibles en América Latina han sido Brasil, Argentina y Paraguay, en contraste con otros que muestran regulaciones más moderadas o incluso derogadas. Como vemos, América del Sur concentra algunos de los programas más avanzados de la región. Brasil lidera con un 27 % de bioetanol y 12 % de biodiésel, mientras que Argentina y Paraguay mantienen porcentajes de dos dígitos en bioetanol. No

obstante, países como Uruguay y Chile carecen de políticas vigentes, lo que genera un panorama heterogéneo donde coexisten experiencias exitosas y vacíos regulatorios.

Guatemala ha trabajado en la construcción de un marco normativo conducente a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y avanzar hacia una matriz energética más sostenible. Un ejemplo reciente es el Acuerdo Gubernativo 159-2023, que reglamenta la Ley del Alcohol Carburante y establece la obligatoriedad de incorporar etanol en las gasolinas a partir de enero de 2024. Esta disposición marca un primer paso en la transición hacia biocombustibles, aunque está limitada al parque vehicular a gasolina (Gobierno de Guatemala, 2023).

Tabla 6: Mandatos de bioetanol y biodiésel en América del Sur

Estado	Mandato de bioetanol	Mandato de biodiésel	Comentario
Argentina	12%	7.50%	Ley 27640 (2021). Mezcla obligatoria 12 % (caña y maíz).
Bolivia	10%	0%	Promoción de gasolina E12-E8 sin mandato
Brasil	27%	12%	2023: Mandato biodiésel pasó de B10 a B12
Chile	—	—	(no reportado)
Colombia	4%	10%	Resolución 2021 bajó E10→E4; biodiésel fijo 10 %.
Ecuador	5%	5%	Mezcla E5 (gasolina Ecopais).
Paraguay	25%	2%	Plan de aumento derogado.
Perú	7.80%	5%	
Uruguay	8.50%	0%	Mandato de biodiésel derogado en 2022.
Venezuela	—	—	(no reportado)

Nota. Tomado de Torroba, et al. (2024)

2.4.2. Antecedentes nacionales.

Pese a este importante esfuerzo, esta normativa no contempla a los vehículos que funcionan con diésel, los cuales representan una proporción significativa del transporte de carga y pasajeros en el país. Este vacío normativo refuerza, en gran medida, la necesidad de

incorporar biodiésel como un complemento necesario para ampliar los beneficios ambientales del uso de biocombustibles.

Sin embargo, el biodiésel suele producirse a partir de metanol, un insumo derivado del petróleo, lo cual limita el impacto positivo en la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles (Álvarez, 2009).

Ante esta limitación, se ha planteado la sustitución del metanol por etanol como una alternativa más sostenible, considerando que Guatemala cuenta con producción local de etanol proveniente principalmente de la caña de azúcar. Esta medida permitiría cerrar el ciclo de dependencia energética, al aprovechar un recurso renovable nacional en la elaboración de biodiésel, fortaleciendo al mismo tiempo la seguridad energética del país (CENGICAÑA, 2021). El desarrollo de estas iniciativas no puede entenderse sin el marco internacional que las impulsa.

En el Acuerdo de París de 2015, Guatemala asumió el compromiso de reducir sus emisiones de GEI en al menos un 11.2 % con recursos propios y hasta un 22.6 % con apoyo internacional hacia el 2030. Este compromiso generó un entorno propicio para la exploración de alternativas energéticas más limpias, consolidando el papel de los biocombustibles como una de las principales opciones para diversificar la matriz energética (United Nations, 2015).

Como vemos, los antecedentes nacionales muestran que Guatemala se encuentra en una fase incipiente de implementación de políticas relacionadas con los biocombustibles. Si bien la inclusión de etanol en las gasolinas representa un avance significativo, aún se requiere un esfuerzo mayor para extender la transición energética hacia el sector diésel.

Esta situación plantea la necesidad de investigaciones que fortalezcan la viabilidad técnica, económica y ambiental del biodiésel producido localmente, con el fin de cumplir los compromisos climáticos adquiridos y responder a las demandas de sostenibilidad a nivel mundial (MARN, 2020).

2.5. Marco legal y normativo.

El escenario legal y normativo de esta propuesta se deriva de los alcances que nos ofrece el panorama internacional como nacional. Su revisión nos ha permitido identificar, por un lado, los vacíos legales que deben ser atendidos en una transición hacia los biocombustibles y, por otro lado, el reconocer que el contexto legal señala suficiente jurisprudencia para incluir en la agenda energética de Guatemala la indiscutible transición a un modelo energético más sostenible.

2.5.1. Leyes internacionales.

Los lineamientos generales para biodiésel, bioetanol y otros biocombustibles se sostienen sobre dos pilares jurídicos. En principio, la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, Decreto 68-86 y su Reglamento de Evaluación, Control y Seguimiento Ambiental, Acuerdo Gubernativo 137-2016. Ambos instrumentos, obligan a que toda planta de producción mezcla o almacenamiento de biocombustibles presente un Estudio de Impacto Ambiental y obtenga licencia del MARN, lo que implica monitoreo de emisiones, efluentes y gestión de residuos (MARN, 2025).

En materia energética, la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, Decreto 52-2003 amplía la cobertura de beneficios fiscales (exención de aranceles de importación, depreciación acelerada y 10 años sin ISR) a proyectos que utilicen recursos renovables, incluidos los biocombustibles (Congreso República Guatemala, 2003). Estos incentivos se complementan con la prioridad de conexión a la red y la posibilidad de firmar contratos con el Estado, creando un entorno jurídico favorable para inversiones en etanol y biodiésel.

Para bioetanol carburante, el instrumento clave es la Ley del Alcohol Carburante, Decreto-Ley 17-85, que regula la producción, almacenamiento, transporte, mezcla y comercialización del etanol anhidro destinado a combustibles (Congreso de la República de Guatemala, 1985). La norma asigna al Ministerio de Energía y Minas (MEM) la facultad

de fijar cupos de mezcla, aprobar la calidad (mínimo 99,5 % v/v de etanol) y emitir licencias de operación.

En 2024 el MEM actualizó el procedimiento mediante la Resolución DGE-1120-2024, que reactivó la mesa técnica para definir porcentajes obligatorios de etanol en gasolina (10 % E10 en una primera fase) y armonizar la fiscalidad relativa al Impuesto a la Distribución de Petróleo (MEM, 2024). De aprobarse el reglamento complementario, las estaciones de servicio deberán ofrecer la mezcla oficial y los productores podrán acogerse a créditos fiscales por litro vendido al mercado interno.

El biodiésel se rige, a nivel de calidad y comercio, por el Reglamento Técnico Centroamericano, RTCA, 75.02.43:07 “Biodiésel (B100) y sus mezclas con Aceite Combustible Diésel. Especificaciones”, adoptado por el Consejo de Ministros de Integración Económica (COMIECO) y obligatorio en Guatemala desde 2008 (COMIECO, 2007). Este RTCA replica los límites de la norma ASTM D6751 y la EN 14214 para parámetros críticos como número de cetano, viscosidad, contenido de ácidos grasos libres y estabilidad oxidativa, además de fijar designaciones B5, B10, B20 y B100.

El MEM actúa como ente nacional competente para otorgar certificados de conformidad y registros de laboratorio, mientras que la SAT fiscaliza la correcta declaración arancelaria bajo la partida 3826. Cualquier importador o productor local debe presentar ensayos de lote emitidos por laboratorios acreditados ante COGUANOR y mantener trazabilidad de materia prima. En el ámbito fiscal y comercial, los biocombustibles gozan de un tratamiento diferenciado: el biodiésel y el etanol pagan IVA e ISR como bienes manufacturados, pero no están gravados por el Impuesto a la Distribución de Petróleo Crudo y Combustibles Derivados, Decreto 38-92, reservado a productos fósiles (Congreso de la República de Guatemala, 1992).

Además, los proyectos acogidos al Decreto 52-2003 pueden solicitar exención de derechos de importación para maquinaria y un crédito fiscal por la energía renovable vendida. Para la exportación o importación de mezclas superiores a B20 o E10, el exportador debe presentar certificado de análisis conforme ASTM D6751/E 3056 o ISO 21644, y según la

guía técnica del Departamento de Hidrocarburos del MEM (USDA-FAS, 2010). De cara al futuro, el Ministerio ha anunciado la revisión de la normativa para armonizarla con la versión 2019 del RTCA y la nueva categoría “Low-Metals” de la ASTM D6751-23, lo que exigirá a los productores actualizar procesos de purificación y control de metales pesados.

El cumplimiento de estos marcos legales se supervisa mediante inspecciones periódicas del MARN y auditorías técnicas del MEM. Los titulares de licencias de biodiésel o bioetanol deben remitir informes semestrales de producción, balance de masa y destino de coproductos (glicerina o vinazas), así como huellas de carbono calculadas según ISO 14067.

Es importante indicar que el incumplimiento acarrea sanciones que van desde multas (Q 10 000 a Q 100 000) hasta la suspensión temporal de la licencia, conforme a los artículos 44-47 del Reglamento Ambiental. Por ello, las empresas interesadas en el mercado de biocombustibles deben integrar desde el diseño de planta la trazabilidad de materia prima, la capacidad analítica para demostrar conformidad con RTCA y ASTM, y una estrategia fiscal alineada con los incentivos vigentes. Este entramado regulatorio busca garantizar que el despliegue de biocombustibles contribuya efectivamente a las metas climáticas de Guatemala sin comprometer la calidad del combustible ni la salud pública.

2.5.2. Leyes nacionales.

Desde una perspectiva argumentativa, el marco legal guatemalteco respecto al biodiésel se encuentra respaldado por disposiciones que, aunque dispersas, configuran el entorno regulatorio necesario para su desarrollo. La Ley de Comercialización de Hidrocarburos, Decreto N° 109-97, junto con su reglamento (Acuerdo Gubernativo 522-99), establece las bases institucionales y técnicas que permiten la regulación de productos energéticos, albergando indirectamente la inclusión del biodiésel en la matriz energética nacional (Ministerio de Energía y Minas, sin fecha).

Esta normativa es fundamental, ya que sin ella no habría un ente rector —el MEM— con facultades para ordenar procesos desde la comercialización hasta la supervisión técnica del biodiésel, y su ausencia reforzaría la fragmentación normativa que hoy impide que el biodiésel se incorpore con coherencia a la política energética del país (Ministerio de Energía y Minas, sin fecha).

Por otra parte, la adopción del RTCA 75.02.43:07, un reglamento técnico centroamericano de carácter vinculante pone en relieve la necesidad urgente de calidad y estandarización del biodiésel (B100) y sus mezclas. Este reglamento define parámetros fisicoquímicos estrictos —como número de cetano, viscosidad, contenido de azufre, entre otros— garantizando que el producto cumpla con estándares internacionales y proteja motores y medio ambiente (COMIECO-XLIV, 2007). Sin embargo, su aplicación efectiva choca con la realidad guatemalteca: la falta de normativa nacional específica y mecanismos claros de fiscalización —más allá del marco técnico— obstaculiza su cumplimiento real.

El país aún debe avanzar en legislar no sólo los estándares, sino los procedimientos concretos para la producción, distribución, fiscalización y sanción, de modo que el biodiésel deje de ser una promesa técnica y se convierta en una alternativa real para la diversificación energética y reducción de emisiones contaminantes.

En síntesis, la sistematización teórica y referencial desarrollada en este capítulo permite comprender integralmente los fundamentos técnicos, ambientales y sociopolíticos que subyacen en la necesidad de reducir la dependencia de los derivados del petróleo y la disminución de gases de efecto invernadero en Guatemala, en tanto nos ofrecen elementos para mejorar el aprovechamiento de aceites de cocina usados y permitir la producción de combustibles alternativos.

El análisis articulado de las teorías sobre biocombustibles, los conceptos asociados a la sostenibilidad energética y la evidencia empírica proveniente de experiencias internacionales y nacionales constituye la base conceptual necesaria para justificar la pertinencia de un sistema alternativo de producción de biodiésel en Guatemala. Estos

elementos no solo orientan la definición de las variables y supuestos del estudio, sino que también sustentan la selección de los métodos de investigación y los criterios con los cuales se evaluará la viabilidad técnica, económica y ambiental de la propuesta. De este modo, el marco teórico-conceptual se consolida como un componente esencial que orienta y da coherencia a las etapas posteriores del proceso investigativo.

Capítulo 3. Fundamentos metodológicos y resultados de investigación.

En este capítulo se presenta el diseño metodológico y todas las herramientas utilizadas para identificar los procesos desarrollados, así como los hallazgos y resultados de investigación. De la misma manera, se precisan los recursos que sustentan el diseño a partir de evidencias que respondan a la temática del presente trabajo doctoral.

3.1. Operacionalización de variables.

Como ya se ha señalado, la secuencia de investigación se ha realizado en la línea de la operacionalización de variables como se muestra en la tabla 7. En la referida tabla se muestran las etapas del proceso y la interacción entre ellos.

A partir de estas interrelaciones se ha buscado determinar la forma y proceso por el cual se puede establecer un sistema alternativo de producción de biodiésel logrado a través de un proceso en donde el insumo principal es el aceite de cocina que permita al país de Guatemala contribuir a la reducción de la dependencia de los derivados del petróleo y, al mismo tiempo, que contribuya a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Lograr lo anterior, ha implicado articular las etapas previstas en el desarrollo de la investigación y a partir de ello, mostrar el proceso de viabilización de la propuesta alternativa de producción de biodiésel centrado en un análisis técnico, económico, ambiental y de sostenibilidad. En este sentido, se realiza la operacionalización de variables y la consistencia del estudio en función del problema, hipótesis y objetivos planteados.

En esta misma línea, a partir de las hipótesis se infieren las variables dependientes e independientes, de los cuales se derivan los indicadores, para finalmente plantear la metodología que se aplicará en su consecución. De todo esto, se da cuenta en la tabla 7 que se presenta a continuación:

Tabla 7: Operacionalización de variables y matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general</p> <p>¿Cómo contribuir a reducir la dependencia de los derivados del petróleo y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala mediante el aprovechamiento de aceites de cocina usados para la producción de combustibles alternativos en el año 2025?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Proponer un sistema alternativo de producción de biodiésel con metanol a partir de aceites de cocina usados para contribuir a reducir la dependencia de los derivados del petróleo y la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero en Guatemala en el 2025.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>OE1: Identificar el marco teórico pertinente que reúna información técnica, política y de investigaciones realizadas alrededor del tema de biodiésel para caracterizar un sistema alternativo de producción en Guatemala.</p> <p>OE2: Sistematizar la normativa y política vigente en Guatemala relacionada a la producción y provisión de biocombustible, incidiendo en su alcance, limitaciones y vacíos.</p> <p>OE3: Diseñar el sistema alternativo de producción de biodiésel a partir de aceite y metanol de costo económico y ambiental mínimo.</p> <p>OE4: Evaluar la factibilidad económica del sistema propuesto para la producción de biodiésel metanol.</p> <p>OE5: Proponer cambios de política pública a favor del uso de biodiésel de productiva alternativa con metanol.</p>	<p>Hipótesis nula (H0):</p> <p>La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados no generará mejoras significativas en la sostenibilidad del uso de biocombustibles en Guatemala ni contribuirá a la reducción de gases de efecto invernadero.</p> <p>Hipótesis alternativa (H1):</p> <p>La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados sí generará mejoras significativas en la sostenibilidad del uso de biocombustibles en Guatemala y contribuirá de manera efectiva a la reducción de gases de efecto invernadero.</p>	<p>Variables independientes:</p> <p>Producción de biodiésel.</p> <p>Aceites de cocina usado.</p> <p>Costos de producción de biodiésel.</p> <p>Costos ambientales</p> <p>Factibilidad económica.</p> <p>Variables dependientes</p> <p>Sostenibilidad en uso de biocombustibles</p> <p>Reducción de Gases de efecto invernadero.</p>	<p>Nivel de producción de biodiésel con aceite de cocina.</p> <p>Nivel de uso de aceite de cocina.</p> <p>Costos operativos por litro biodiésel.</p> <p>Gases de Efecto Invernadero</p> <p>Retorno de inversión.</p> <p>Comparación con el uso de diésel convencional.</p> <p>Rendimiento en vehículos locales</p>	<p>Tipo de investigación:</p> <p>Exploratorio (experimental)</p> <p>Población y muestra:</p> <p>Personas que se transportan utilizando motores diésel, empresas interesadas, empresas productoras, autoridades ambientales.</p> <p>Muestra:</p> <p>Seleccionada de manera no probabilística, considerando la disponibilidad de recursos y la capacidad de producción.</p>

Nota. Elaboración propia

3.2. Diseño metodológico.

El diseño metodológico apropiado para elaborar un estudio alternativo de producción de biodiésel con metanol utilizando como insumo principal el aceite de cocina es típicamente transeccional, en tanto, desde su sentido experimental recurre a la recolección de datos referidos al proceso de elaboración de biodiésel en el momento actual, 2025.

El diseño asume importantes componentes descriptivos que permitieron evaluar su viabilidad, lo cual incluye la operacionalización de variables, el diseño de investigación y el proceso por etapas de la ruta metodológica aplicada a esta investigación.

3.2.1. Enfoque y tipo de investigación.

El enfoque de investigación.

Esta investigación adopta un diseño mixto de carácter secuencial explicativo, en el cual la fase cuantitativa antecede a la cualitativa con el propósito de profundizar en los resultados.

La fase cuantitativa incluye un componente experimental, sustentado en el análisis técnico del proceso de producción de biodiésel y en la obtención de indicadores derivados de fuentes secundarias e instrumentos aplicados durante el estudio. La experimentación se justifica por la necesidad de evaluar el comportamiento del proceso bajo parámetros controlados y determinar su desempeño técnico como base del sistema alternativo propuesto.

En la fase cualitativa, el diseño adoptado es fenomenológico, orientado a comprender las percepciones, experiencias y significados que los actores clave —expertos, instituciones y sectores vinculados al uso de biodiésel— atribuyen a la viabilidad y pertinencia del sistema alternativo. Esta fase permite interpretar las interacciones del contexto energético nacional y enriquecer la comprensión de los hallazgos cuantitativos.

Tipo de investigación.

La investigación es aplicada, dado que busca generar una propuesta concreta —un sistema alternativo de producción de biodiésel— con utilidad directa para el contexto energético guatemalteco.

Integra un componente experimental en la fase cuantitativa, cuya fundamentación radica en la necesidad de analizar el proceso de producción bajo condiciones técnicas controladas y determinar su factibilidad operativa. Asimismo, incorpora un componente descriptivo y documental, sustentado en la sistematización de información técnica, normativa e histórica relacionada con la producción de biocombustibles.

La fase cualitativa se desarrolla bajo un diseño fenomenológico, lo que permite explorar las percepciones de actores relevantes y comprender la realidad social y energética en la que se enmarca la propuesta alternativa estudiada.

3.2.2. Métodos, técnicas e instrumentos de obtención de datos.

La tabla 8 presenta el proceso metodológico que se ha seguido en esta investigación. De acuerdo con ello, se describe la forma como ha sido utilizado el método, la recolección de datos e información, así como las técnicas y herramientas que han sido aplicadas.

En el proceso de investigación sintetizado en la tabla 8, se integran procesos específicos que forman parte del estudio alternativo que se propone más adelante. Entre ellos, la determinación de la capacidad de producción necesaria para atender la demanda potencial, considerando el espacio disponible para los tanques. Este componente incluye el cálculo del volumen de los tanques y dimensionamiento del equipo requerido.

Por otro lado, se considera la elaboración de diagramas, tanto para la creación de diagramas de flujo del proceso y esquemas de elevación y planta, como para la reconfiguración de los

tanques. Como parte de esta etapa, se debe considerar la obtención de cotizaciones para los equipos y accesorios necesarios para el diseño de la planta.

En este proceso de experimentación se incluyen las pruebas piloto, las mismas que se realizarán a nivel laboratorio y también a nivel piloto.

Tabla 8: Proceso metodológico

Componentes	Aspecto central	Descripción
Métodos	Inductivo Deductivo	Se identifica escenario global de producción de biodiésel como alternativa a la dependencia de derivados del petróleo. Se infiere para el caso particular de Guatemala las condiciones para asegurar viabilidad de producir biodiésel con aceites de cocina. Tránsito de particular a lo general en sostenibilidad socioeconómica y ambiental.
Enfoque para recolección de información y de datos	Mixto: cuantitativo-cualitativo y experimentación.	Se combinan instrumentos de observación directa, entrevistas, análisis documental, argumentación constructiva. Se aplicaron según orden de objetivos. Se obtiene información primaria vía encuestas, entrevistas e información secundaria oficial del país
Nivel de profundidad	Experimentación Descriptivo-analítico	Se combina el nivel aplicativo y descriptivo, incluyendo procesos de sistematización y de experimentación. La complejidad del estudio requiere triangulación de técnicas y métodos.
		<u>Análisis de datos</u>
		<ul style="list-style-type: none"> ■ Información primaria (encuestas, entrevistas y observación directa) - Información secundaria (estadísticas oficiales) ■ Elaboración de matrices de información energética ■ Procesos de experimentación descriptiva e inferencial
		<u>Análisis de contenidos</u>
		<ul style="list-style-type: none"> ■ Sistematización de documental (nacional e internacional). ■ Análisis y argumentación constructiva.
		<u>Técnicas de diseño, gestión y evaluación de proyectos</u>
Técnicas e instrumentos	Análisis de datos, contenidos, experimentación y técnicas proyectuales.	<ul style="list-style-type: none"> ■ Planteamiento del estudio alternativo de producción de biodiésel en base a aceites de cocina. ■ Fase de experimentación: Obtención biodiésel alternativo. ■ Fase de evaluación técnica: Evaluación operación en plantas piloto y comercial de biodiésel ■ Pruebas a nivel de laboratorio y análisis del proceso de producción: Interacción y funcionamiento de materiales, equipos y modos de operación. ■ Pruebas experimentales: basadas en procedimientos de una planta piloto existente para evaluar la escalabilidad. ■ Pruebas de medición: De materias primas y reactivos necesarios y otros materiales relacionados. ■ Balance de masa y energía: Cálculo del balance de masa y energía en equipos utilizados. ■ Realización de pruebas a nivel de laboratorio. ■ Pruebas de capacidad de producción: Flujogramas de procesos. ■ Prueba de calidad de procesos y biodiésel: rendimiento y efectos ■ Evaluación económica y financiera del estudio alternativo. ■ Evaluación ambiental y de sostenibilidad. ■ Preparación del estudio alternativo.

Nota. Elaboración propia.

A este nivel de avance de la investigación, se cuenta con información, mecanismos y viabilidad técnica de realizarlo, el cual se prevé ser realizado en 2 meses. Bajo esta propuesta, se estaría utilizando lotes de 13 litros de diferentes aceites usados, lo que permitirá encontrar una formulación viable.

El proceso de elaboración de biodiésel tal como se plantea en esta investigación, considera también el diseño, implementación y evaluación de pruebas de calidad. Esto implica concretizar el nivel de producción de biodiésel utilizando un litro de aceite a escala de laboratorio. Entre las pruebas específicas de biodiésel se han considerado las siguientes:

- Pruebas (3-27) que verifican la conversión de aceite).
- Medición de densidad.
- Análisis de viscosidad de biodiésel.
- Prueba de pH y de número ácido.
- Verificación de la presencia de agua o sedimentos.

La realización de estas pruebas aseguró la viabilidad técnica de la propuesta, validando la propuesta que bajo condiciones económicas, sociales y ambientales deben ser adecuadamente evaluadas para poder pasar a la siguiente fase de evaluación que es la integración estratégica de este logro con la política pública de Guatemala.

Desde la perspectiva de la clasificación de métodos de obtención del conocimiento asumida en el nivel doctoral de la UIIX, las actividades sintetizadas en la Tabla 8 se agrupan en dos niveles complementarios. En el nivel teórico se emplean métodos de análisis y síntesis, histórico-lógico y de revisión documental sistemática, que permiten construir el marco teórico-conceptual y fundamentar la propuesta del sistema alternativo de producción de biodiésel. En el nivel empírico se utilizan métodos experimentales y métodos cualitativos de corte interpretativo, basados en pruebas de laboratorio y piloto, así como en la recolección de información primaria mediante entrevistas, encuestas y observación. Esta clasificación teórico-empírica explica la combinación de técnicas de análisis de datos,

análisis de contenidos y técnicas proyectuales descritas en la Tabla 8, asegurando coherencia entre el diseño mixto secuencial, los objetivos de la investigación y los resultados esperados.

3.2.3. Desarrollo de los instrumentos de obtención de datos.

El enfoque cualitativo permite recopilar información, percepciones, opiniones de expertos en la industria del biodiésel. Puede ser por medio de entrevistas y grupos focales. Por otro lado, el enfoque cuantitativo proporciona datos medibles sobre variables medibles en el proceso, mediante experimentos y análisis estadísticos, se pueden obtener datos para costos, calidad de biodiésel producido y rendimiento de la producción (Izaza, 2011).

Para el diseño de experimentación, la investigación adopta un diseño experimental y descriptivo. El diseño experimental permite manipular y controlar variables específicas, como el tipo de materia prima, la temperatura de reacción, el tiempo de proceso o la relación molar alcohol/aceite, con el fin de evaluar su impacto en el rendimiento y eficiencia de la producción de biodiésel. Este enfoque resulta clave para identificar condiciones óptimas y proponer mejoras en el proceso.

De manera complementaria, el diseño descriptivo proporciona un análisis del contexto en el que se desarrolla la investigación, considerando aspectos de mercado, normativas vigentes y tendencias energéticas. La combinación de ambos diseños asegura un proyecto fundamentado científicamente, viable en su aplicación y alineado con los estándares de calidad nacionales e internacionales (Muguira, 2024).

El tipo de investigación se fundamenta, toda vez que el estudio alternativo de producción de biodiésel se enmarca ámbito teórico, aplicada y exploratoria. Su alcance teórico se basa en el sustento que se infiere de la revisión de diversas fuentes académicas y técnicas que permiten construir un marco conceptual sólido sobre biocombustibles. Es aplicada, en tanto, busca traducir el conocimiento de producir biodiésel a partir de aceites domésticos residuales en una estrategia para implementar la producción de biodiésel en Guatemala,

considerando factores técnicos, económicos y sociales. Finalmente, el carácter exploratorio de la investigación se justifica en tanto se aborda en un ámbito incipiente en un país como Guatemala, en donde aún no existe una industria consolidada de biodiésel a partir de aceites de cocina usados, lo cual justifica el carácter pionero de este trabajo (García, 2010).

Para lograr los objetivos planteados se recurre al uso y alcance de los métodos analítico y sintético. El primero, para descomponer en detalle cada aspecto técnico, científico y económico vinculado al proceso de transesterificación y a la implementación de una planta de producción. En lo segundo, porque se integran datos, procesos y hallazgos en una visión coherente de sostenibilidad, posibilitando la formulación de conclusiones y propuestas estratégicas (Santos, 2022). Se aplica el enfoque cuantitativo, mediante experimentación en laboratorio y análisis estadístico de resultados; en lo cualitativo, a través de entrevistas, encuestas y observación directa para lograr mejor comprensión del fenómeno estudiado (Sánchez, 2015). Como se ha señalado en la tabla 8, las técnicas e instrumentos de recolección de datos se señalan en la tabla 9 que se presenta a continuación.

Tabla 9: *Principales instrumentos de investigación.*

Proceso/Instrumento	Descripción
Revisión bibliográfica	Recopilación de literatura científica, normativa y técnica que aporte información sobre procesos de producción de biodiésel, materias primas, tendencias de mercado, costos y consideraciones ambientales.
Experimentación en laboratorio	En condiciones controladas se evalúan efectos de variables como materias primas, catalizadores, tiempo y temperatura de reacción. Estos ensayos maximizan el rendimiento y reproducibilidad de resultados, aplicando análisis estadísticos (ANOVA y Pruebas de validez interna-externa).
Entrevistas/encuestas	Instrumentos de recopilación de información cualitativa-cuantitativa, en este caso de mercado, producción y sostenibilidad ambiental del biodiésel
Observación directa	Incluye visitas a plantas y pruebas de laboratorio en tiempo real, con el fin de comprender las dinámicas operativas y detectar oportunidad de mejora.

Nota. Elaboración propia

En el procesamiento de datos, se recurre al software SPSS 25,0 para procesar la información obtenida en los ensayos experimentales; controladores e indicadores de pH, temperatura y viscosidad conectados a sistemas PLC para un monitoreo preciso; laboratorios equipados con espectroscopia, cromatografía y viscosímetros para caracterización avanzada; y cuestionarios estructurados y encuestas destinadas a expertos en el sector de biocombustibles.

Para la recolección de información primaria se diseñaron y se aplicaron dos instrumentos principales: la entrevista estructurada y el cuestionario, los mismos que se presentan en el Anexo 1.

Entrevista estructurada.

La entrevista estructurada se planteó como una herramienta dirigida a expertos y profesionales vinculados con la industria del biodiésel, así como a actores clave en el ámbito energético y ambiental. Su propósito ha sido profundizar en temas específicos, tales como el estado actual de la producción de biodiésel, las limitaciones tecnológicas y regulatorias, y las perspectivas de implementación de un sistema alternativo en Guatemala. Al estar previamente estructurada, este instrumento ha garantizado la comparabilidad de respuestas y ha permitido focalizar el análisis en aspectos relevantes de la investigación.

El cuestionario, por su parte, se diseñó desde un enfoque mixto en donde se combinaron preguntas cerradas y abiertas. Las primeras facilitaron el análisis estadístico al ofrecer opciones estructuradas y comparables, por ejemplo:

Conocimiento y percepción sobre el biodiésel:

1. ¿Ha escuchado hablar del biodiésel? Sí No
2. ¿Cuánto considera que conoce sobre el biodiésel? (1:Nada, 5:Mucho) 1 2 3 4 5
3. ¿Cuál cree que es el principal beneficio del biodiésel? Ambiental Económico Energético Social No sabe
4. ¿Qué tan dispuesto estaría a utilizar biodiésel en su vehículo o empresa? Muy dispuesto Dispuesto Indiferente Poco dispuesto No lo usaría
5. ¿Considera que el biodiésel puede sustituir parcialmente al diésel fósil en Guatemala? Sí No Tal vez

Por su parte, las preguntas abiertas permitieron obtener información cualitativa orientadas en el recojo de percepciones y experiencias, aspectos que aportaron matices valiosos a los resultados cuantitativos identificados en la investigación.

En conjunto, ambos instrumentos facilitaron la obtención de datos e información pertinente y complementaria lo que permitió fortalecer la validez de la investigación y ofrecer una visión integral de la necesidad de producir biodiésel en base a aceites domésticos como se plantea aquí.

3.2.4. Determinación de la muestra y criterio de selección.

La población del estudio se relaciona con los usuarios potenciales de diésel, productores y empresas autorizadas y autoridades ambientales. La población se presenta en la tabla 10.

Tabla 10: *Estructuración de la población (universo) de estudio*

Actores involucrados	Nº	%
Usuarios de vehículos que operan con motores diésel	800,000	99.9617
Empresas interesadas en alternativas energéticas	200	0.0245
Productores potenciales de biodiésel	5	0.0006
Proveedores de materias primas	100	0.0125
Autoridades ambientales responsables de la formulación y cumplimiento de políticas públicas	1	0.0007
Total (N)	800,306	100%

Nota. Elaboración propia

Como vemos, la población de estudio se caracteriza principalmente por lo siguiente:

- a. Los actores están directa o indirectamente vinculados con la producción, uso y regulación del biodiésel.
- b. La población se concentra principalmente en la ciudad de Guatemala.
- c. La mayor parte del parque automotor se refiere a carga pesada.

Elementos del muestreo.

El tamaño de la muestra entonces se estimó aplicando la fórmula (1).

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot P(1-P)}{d^2 (N-1) + Z^2 \cdot P(1-P)} \quad \text{----- (1)}$$

Donde:

n= tamaño de la muestra

N= tamaño de la población

Z= nivel de confianza

P= proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población.

(1-P) = proporción de la población de referencia que no presenta el fenómeno en el estudio.

d = error máximo admisible.

Para estimar la muestra se han considerado los siguientes parámetros y estimadores. El error muestral en 5% para minimizar la pérdida de representatividad. Se plantea un nivel de confianza ajustada o **nivel de seguridad** [$Z_{\alpha} = 1.96$]. La precisión se plantea para un valor de $p = q = 0.5$. La información para determinar la muestra se presenta en la tabla 11.

Tabla 11: *Información estadística para determinar la muestra*

Significado del componente muestral	Nomenclatura	Valor Parámetro
Tamaño de la Población	N	800,000
Nivel de Confianza	Z_{α}	0.95
Probabilidad de éxito (proporción esperada)	P	0.5
Probabilidad de fracaso (proporción esperada)	(1 - P)	0.5
Precisión (Error máximo admisible en proporción)	d	0.055

Nota. Elaboración propia

La aplicación de la fórmula de muestreo la tenemos a continuación:

$$n = \frac{(800,306) \cdot (1.96)^2 \cdot (0.50) \cdot (0.50)}{0.0055^2 (800,306-1) + (1.96)^2 \cdot (0.5) \cdot (0.50)} = 30,537 \quad \text{----- (2)}$$

La muestra se determinó aplicando el criterio de selección y se fundamentó en la relevancia y experiencia de los participantes en biodiésel y su cadena de valor. Se priorizó la inclusión de involucrados que aporta en información sobre la factibilidad de implementar el biodiésel como sustituto parcial del diésel fósil. Así, se refleja la diversidad de intereses y la

pertinencia de los datos, fortaleciendo la validez de los resultados y su aplicabilidad en el diseño de políticas y estrategias de implementación del biodiésel en Guatemala.

La muestra estratificada se presenta en la tabla 12.

Tabla 12: *Determinación de la muestra representativa*

Actores involucrados	N°	%
Expertos con conocimientos en biocombustibles	2	0
Proveedores de aceites y materias primas	100	0
Técnicos y operarios en procesos de transformación	0	0
Distribuidores y actores clave del mercado energético	1	0
Representantes de entidades estatales y ambientales con influencia en regulación	1	0
Usuarios de transporte diésel	16M	100

Nota. Elaboración propia

3.2.5. Trabajo de campo

El trabajo de campo se llevó a cabo durante un periodo de 10 meses, comprendido entre enero y noviembre del 2025, en diferentes municipios del departamento de Guatemala y en las instalaciones del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. La fase de campo consistió en dos componentes principales: la aplicación de entrevistas estructuradas a actores vinculados al sector energético y ambiental, y la ejecución de un piloto experimental de producción de biodiésel bajo condiciones controladas. En total, se realizaron 100 entrevistas, las cuales fueron aplicadas de forma presencial y virtual, dependiendo de la disponibilidad de los participantes. Los entrevistados incluyeron transportistas, representantes de empresas de recolección de aceites usados, técnicos de laboratorios, funcionarios municipales y académicos del área de ingeniería química.

Este procedimiento permitió afinar la claridad de las preguntas y ajustar el lenguaje técnico para hacerlo comprensible tanto para personal especializado como para actores no técnicos. Las entrevistas tuvieron una duración promedio de 10 minutos y fueron registradas mediante hojas de cálculo como respaldo.

El objetivo principal fue identificar percepciones sobre el potencial ambiental, económico y social del biodiésel, así como las barreras percibidas para su producción y comercialización en Guatemala. Posteriormente, la información fue sistematizada y analizada estadísticamente para establecer correlaciones entre nivel educativo, conocimiento técnico y percepción ambiental.

Paralelamente, se llevó a cabo un piloto experimental de producción de biodiésel a escala de laboratorio, con el propósito de validar la factibilidad técnica del proceso utilizando materia prima local. Se realizaron 100 reacciones de transesterificación, en el cual se evaluaron distintas relaciones molares metanol/aceite y concentraciones de catalizador. Las pruebas fueron realizadas en un reactor de vidrio borosilicato de 20L equipados con control de temperatura y agitación constante, operando entre 50 y 60 °C. El aceite utilizado provenía de una mezcla homogénea de aceite vegetal residual recolectado de restaurantes del área metropolitana, previamente filtrado y decantado para eliminar sólidos y agua libre.

Durante la etapa inicial del piloto se enfrentaron diversas limitaciones técnicas, principalmente relacionadas con la heterogeneidad del aceite recolectado. En algunos lotes se observó una variación significativa en el índice de acidez, lo que afectaba la reproducibilidad de los resultados. Con ello se logró limitó a obtener un aceite base con características estables (índice de acidez < 2 mg KOH/g), lo que permitió mantener la consistencia en todas las reacciones. La homogenización se verificó mediante muestreo aleatorio y análisis de viscosidad y densidad antes de cada corrida experimental.

En conjunto, el trabajo de campo permitió integrar la perspectiva social y técnica del biodiésel en Guatemala, evidenciando tanto su aceptación potencial como los desafíos tecnológicos asociados a su producción. La triangulación entre los datos de las entrevistas y los resultados del piloto experimental permitió validar que, aunque existe un interés creciente por los biocombustibles, persisten limitaciones en la disponibilidad de materia prima y la estandarización de procesos. No obstante, las medidas adoptadas durante la fase experimental demostraron que, mediante un control riguroso de las condiciones de reacción

y una adecuada gestión de insumos, es posible establecer una producción local de biodiésel con potencial de sostenibilidad y replicabilidad a mayor escala.

3.2.6. Aplicación de los instrumentos

La aplicación de los instrumentos de investigación se llevó a cabo en tres fases diferenciadas pero complementarias: la social, la técnica y la institucional. Cada una respondió a las oportunidades del biodiésel en Guatemala. Esta integración permitió obtener una visión completa del fenómeno, articulando evidencia empírica, resultados experimentales y validación institucional.

En la fase social, los instrumentos de recolección de información (encuestas y entrevistas semi estructuradas) fueron aplicados a 100 participantes distribuidos entre los sectores académico, industrial, gubernamental y de transporte. Las entrevistas se realizaron de manera presencial en centros urbanos como de forma virtual mediante videoconferencias. Se empleó una guía estructurada con 25 ítems que abordaban aspectos de conocimiento técnico, percepción ambiental y barreras de adopción. Los formularios fueron gestionados mediante herramientas digitales compatibles como Excel, lo que permitió automatizar la tabulación y reducir los errores humanos en la captura de datos.

De forma paralela, la fase técnica comprendió la aplicación de instrumentos experimentales en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Se realizaron 100 reacciones controladas de transesterificación con aceite residual, bajo la supervisión de un equipo multidisciplinario de ingenieros químicos y asistentes de laboratorio. Cada reacción fue registrada mediante hojas de control técnico, en las cuales se documentaron variables críticas como temperatura, tiempo de residencia, velocidad de agitación y relación molar metanol/aceite.

En la fase institucional, se aplicaron instrumentos de tipo documental y de validación estratégica. Se llevaron a cabo reuniones formales con el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) con el objetivo de discutir el marco legal actual y los posibles lineamientos para la futura norma nacional de

biocombustibles. En el caso del MEM, las sesiones se realizaron en la Dirección General de Hidrocarburos, espacio en donde se presentaron los resultados preliminares del estudio piloto y se discutió la necesidad de incluir el biodiésel dentro de la clasificación oficial de combustibles renovables. Con el MARN, las reuniones se centraron en la gestión ambiental de aceites usados y en la posibilidad de emitir un *sello verde* para biocombustibles producidos con residuos.

3.2.7. Procesamiento de la información

El procesamiento de la información se realizó principalmente mediante Microsoft Excel 365, herramienta que permitió organizar, limpiar y analizar los datos obtenidos en las encuestas y en las reacciones experimentales. Una vez recopilada toda la información, se verificaron si no estaban incompletos o inconsistentes. Se verificó la coherencia entre las respuestas, especialmente en preguntas relacionadas con el conocimiento y la percepción del biodiésel, asegurando que los datos tuvieran sentido lógico antes de proceder con los cálculos estadísticos. Excel se utilizó también para generar tablas dinámicas, porcentajes y gráficos de distribución que facilitaron la interpretación de los resultados.

En el caso de las 100 reacciones experimentales de transesterificación, la información obtenida (como temperatura, tiempo de reacción, relación molar y rendimiento de biodiésel) fue registrada en hojas de control estandarizadas. Estos datos fueron posteriormente sistematizados en un archivo maestro de Excel para analizar tendencias y variaciones en el comportamiento del proceso. Se calcularon promedios, desviaciones estándar y coeficientes de variación con el fin de evaluar la estabilidad del proceso y la reproducibilidad de los resultados. A partir de esta base, se generaron gráficos comparativos de rendimiento que permitieron identificar las condiciones más favorables de reacción, manteniendo una trazabilidad completa entre cada lote de aceite y su respectivo resultado.

Para el análisis de los datos de las encuestas, se elaboraron tablas cruzadas con el propósito de observar relaciones entre variables como el nivel educativo, la percepción ambiental y la

disposición al uso del biodiésel. Estas comparaciones permitieron confirmar que los participantes con mayor nivel académico tendían a mostrar una actitud más positiva hacia la producción y el consumo de biocombustibles. Asimismo, se verificó la consistencia de respuestas en ítems similares, descartando duplicaciones y corrigiendo pequeñas incongruencias detectadas durante la revisión.

En cuanto al tratamiento estadístico, se estimaron indicadores descriptivos (media, moda, mediana y porcentajes) para cada categoría de respuesta. Además, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar si existían diferencias significativas en la percepción ambiental entre distintos niveles educativos y grupos ocupacionales. Aunque el procesamiento se efectuó en Excel, se apoyó en funciones estadísticas y herramientas de análisis de datos disponibles en el propio software. Los resultados mostraron que sí existía una diferencia significativa en la percepción ambiental ($p < 0.05$), siendo más favorable entre quienes conocían el proceso de producción o tenían formación en áreas técnicas.

Finalmente, toda la información, tanto de las encuestas como de los ensayos de laboratorio, fue consolidada en una base única que permitió integrar los hallazgos sociales y experimentales. Esto facilitó la comparación entre las percepciones de los encuestados y los resultados obtenidos en laboratorio, reforzando la coherencia del estudio y proporcionando una visión integral del potencial técnico y social del biodiésel en Guatemala.

3.3. Análisis de resultados a partir de los datos obtenidos.

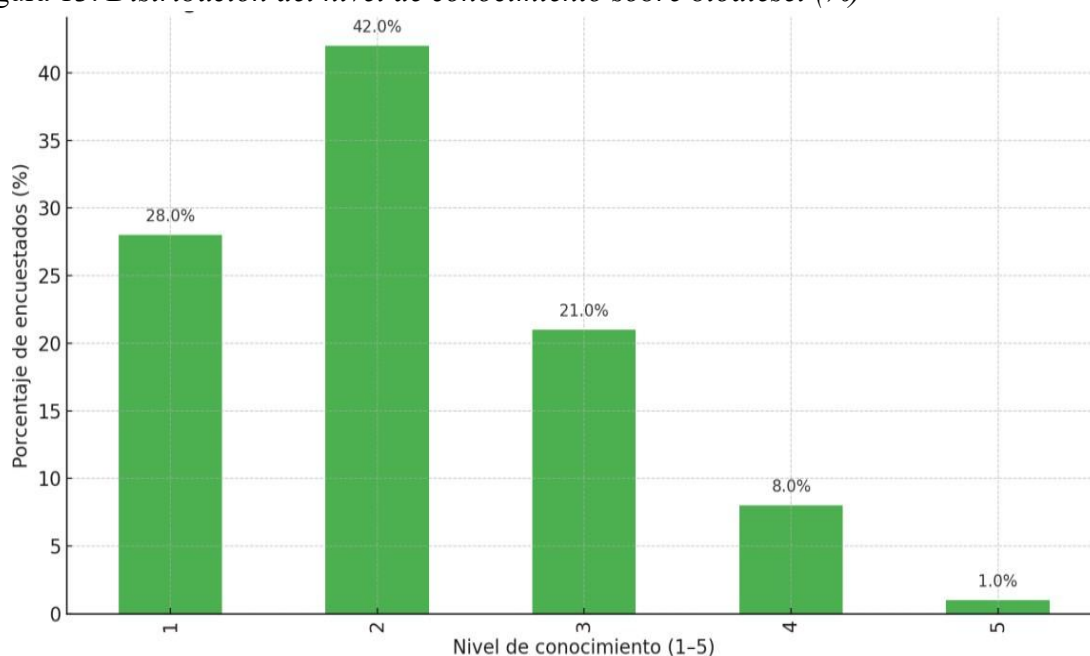
Los resultados obtenidos en la encuesta permiten establecer un panorama amplio sobre la percepción, el conocimiento y las oportunidades del biodiésel en Guatemala. En términos generales, se evidencia un nivel de conocimiento moderado respecto al tema, donde alrededor del 70 % de los encuestados manifestó poseer un entendimiento básico o medio sobre el biodiésel.

Este hallazgo sugiere una brecha informativa importante, particularmente en lo relativo a los procesos de producción, los impactos ambientales y las ventajas energéticas asociadas

al uso de biocombustibles. Sin embargo, la existencia de un grupo significativo con conocimiento incipiente representa una base sobre la cual pueden fortalecerse estrategias de capacitación y divulgación científica que impulsen la transición hacia fuentes energéticas más sostenibles.

La figura 13 muestra qué porcentaje de los encuestados tiene diferentes niveles de conocimiento sobre el biodiésel, en una escala del 1 (nulo) al 5 (alto). Los resultados evidencian que alrededor del 70 % presenta un conocimiento básico o medio, lo que sugiere una oportunidad importante para implementar programas de educación ambiental y divulgación técnica.

Figura 13: *Distribución del nivel de conocimiento sobre biodiésel (%)*

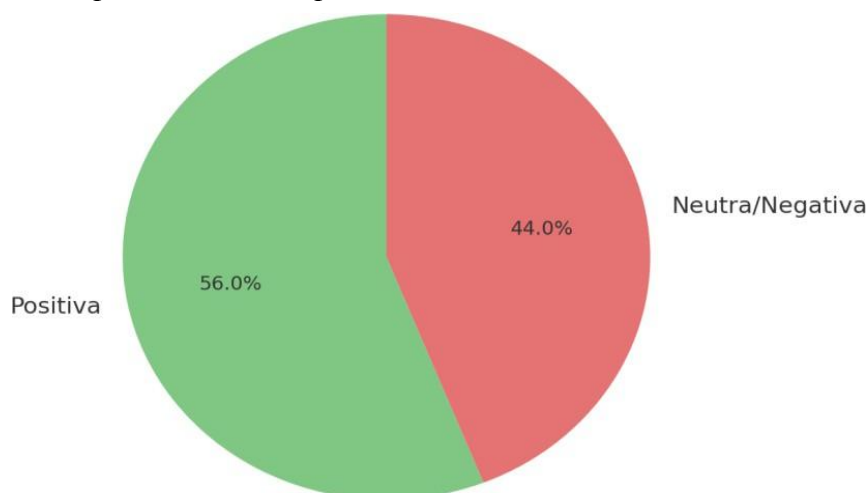


Nota. Elaboración propia.

La figura 14, resume la percepción de los encuestados respecto al potencial del biodiésel para reducir la contaminación ambiental. Se observa que la mayoría tiene una percepción positiva (niveles 4 y 5), lo que indica que el biodiésel es considerado alternativa ambientalmente favorable, alineada a la sostenibilidad y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La percepción ambiental del biodiésel es predominantemente

positiva, en tanto la mayoría de los usuarios consideran que el biodiésel contribuye de forma efectiva a la reducción de la contaminación ambiental y las emisiones atmosféricas.

Figura 14: *Percepción sobre el impacto ambiental del biodiésel*



Nota. Elaboración propia.

Este reconocimiento social de su potencial ambiental constituye un factor crítico para la aceptación pública de políticas de biocombustibles. El hecho de que los encuestados asocien al biodiésel con beneficios ambientales y económicos indican cierta comprensión de su valor dual: como agente de mitigación climática y como motor de desarrollo.

Desde una perspectiva socioeconómica, los resultados reflejan que la población percibe en el biodiésel como oportunidad para generar empleo y desarrollo local. Los participantes lo asocian con beneficios en el sector transporte y agrícola, áreas claves para la economía guatemalteca. Asimismo, se identificó demanda recurrente por incentivos fiscales, financiación pública y programas de capacitación técnica, pese a las limitaciones estructurales para el escalamiento industrial del biocombustible. Estas respuestas evidencian que, más allá del interés ambiental, existe disposición favorable a integrar el biodiésel en una estrategia nacional de diversificación energética por su impacto social.

En el ámbito institucional, los encuestados identificaron a las universidades, el gobierno y el sector privado como los principales actores responsables de liderar el desarrollo del biodiésel. Esta convergencia de responsabilidades refleja una percepción madura respecto a

la necesidad de colaboración público-privada y académica. Sin embargo, también se señala una desconfianza hacia la capacidad del Estado para ejecutar políticas sostenidas, tales resultados reafirman que la consolidación de una industria nacional de biodiésel requiere un marco político estable, incentivos fiscales continuos y la creación de redes interinstitucionales orientadas a la innovación tecnológica.

En síntesis, los resultados permiten concluir que Guatemala presenta condiciones sociales y perceptuales para el desarrollo del biodiésel, pero aún enfrenta desafíos en educación, financiamiento y articulación institucional. La población reconoce los beneficios ambientales y económicos del biocombustible, pero su conocimiento técnico sigue siendo incipiente, lo que limita la apropiación de la tecnología a nivel ciudadano e industrial. Por consiguiente, los hallazgos reafirman la necesidad de una estrategia nacional de biocombustibles que combine educación ambiental, inversión pública y cooperación con el sector privado para asegurar una transición sostenible, inclusiva y económicamente viable.

3.4. Resultados y discusión.

3.4.1. Resultados.

Caracterización del sistema de producción de biodiésel actual: Guatemala.

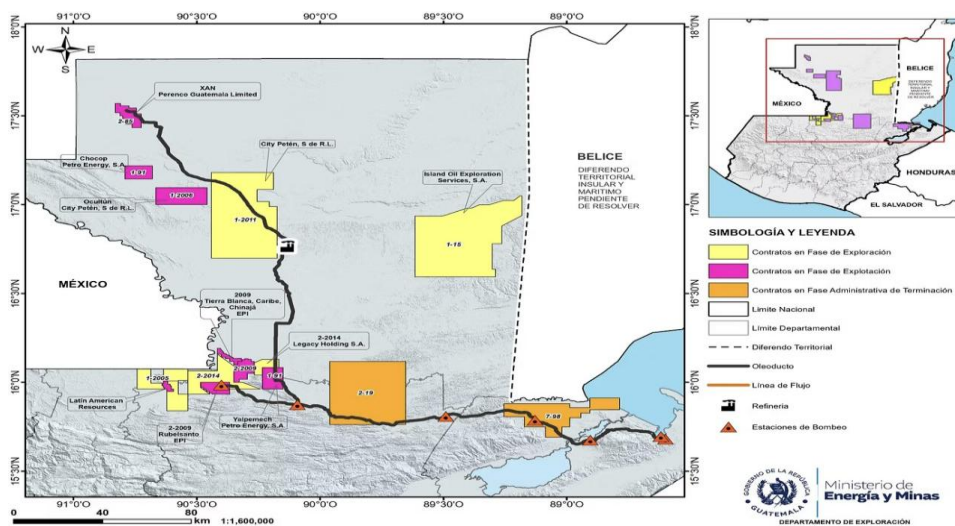
Actualmente, Guatemala carece de una legislación específica que incentive o regule el uso de biodiésel. Sin embargo, la presión internacional y los compromisos ambientales, junto con la disponibilidad de materias primas como el aceite de palma y otros aceites vegetales, ofrecen una oportunidad para el desarrollo de esta industria.

La creación de políticas de incentivos y normas para el uso de biodiésel pese a ser esenciales para diversificar la matriz energética del país y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte (Ministerio de Energía y Minas, 2024), aún son insuficientes acentuando la dependencia del sistema energético del país a los derivados del petróleo, con las consecuencias señaladas en este estudio. Guatemala depende de la importación de combustibles fósiles, especialmente diésel y gasolina, para satisfacer la

demanda nacional de energía. Según el MEM, el consumo de diésel alcanzó aproximadamente 4.5 millones de barriles en el segundo trimestre de 2024. Este consumo sigue una tendencia al alza debido al crecimiento en sectores como transporte, industria y agricultura (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

La Figura 15 muestra el mapa oficial de las áreas petroleras en Guatemala, elaborado por el Ministerio de Energía y Minas. En él se distinguen los contratos en diferentes fases: exploración, explotación y administrativa de terminación, así como la localización de oleoductos, estaciones de bombeo y la refinería nacional. El mapa resalta la concentración de actividades en el departamento de Petén, región históricamente vinculada con la explotación petrolera del país.

Figura 15: *Contratos operaciones petroleras: exploración, explotación e infraestructura*



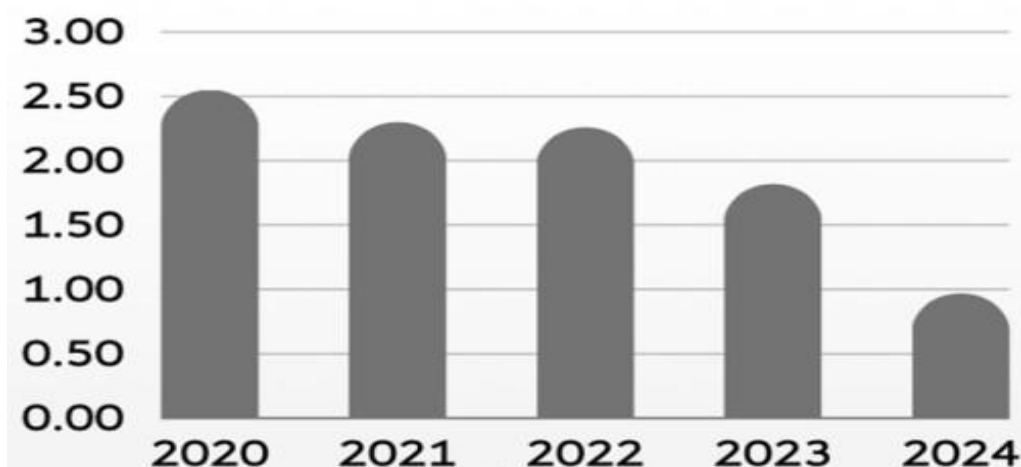
Nota. Tomado de MEM (2021). Presenta el mapa de ubicación de los contratos de operaciones petroleras de exploración y explotación e infraestructura de hidrocarburos. Este panorama evidencia la dependencia que aún mantiene Guatemala de los hidrocarburos fósiles, lo cual contrasta con la necesidad de diversificar la matriz energética hacia fuentes renovables como el biodiésel. El hecho de que gran parte de la infraestructura energética se concentre en petróleo refleja un reto, pero también una oportunidad: aprovechar la experiencia y las cadenas logísticas existentes para incorporar alternativas sostenibles. En este contexto, la investigación sobre biodiésel cobra relevancia estratégica al posicionarse

como una opción que puede complementar, reducir y eventualmente sustituir parte del consumo de diésel fósil en el país.

Dinámica productiva de petróleo en crudo y tendencias de extracción.

La Figura 16 presenta la evolución de la producción de petróleo crudo en Guatemala entre 2020 y 2024, medida en millones de barriles, según datos oficiales del Ministerio de Energía y Minas. La gráfica evidencia una marcada tendencia decreciente en la extracción de crudo durante el período analizado, lo que refleja tanto el agotamiento progresivo de los yacimientos como la reducción de la inversión en exploración y explotación.

Figura 16: *Producción de petróleo crudo en Guatemala, periodo 2020-2024.*



Nota. Tomado de MEM (2021)

El comportamiento descendente, que va de aproximadamente 2.5 millones de barriles en 2020 a menos de 1 millón proyectado para 2024 (MEM, 2024), confirma la creciente vulnerabilidad del país ante la dependencia de importaciones de derivados del petróleo.

Este panorama subraya la necesidad de diversificar la matriz energética mediante fuentes renovables, entre ellas el biodiésel, que se perfila como una alternativa viable para reducir la presión sobre los recursos fósiles y fortalecer la seguridad energética nacional.

Comportamiento de precios de combustibles en Guatemala.

En cuanto a los precios de los combustibles, Guatemala ha experimentado fluctuaciones notables en los últimos años, influenciadas principalmente por la volatilidad de los precios internacionales del petróleo, la tasa de cambio del quetzal frente al dólar y las políticas fiscales internas.

En octubre de 2024, el precio de la gasolina superior en la capital aumentó hasta Q1.36 por galón, mientras que en áreas del interior del país el incremento fue de alrededor de Q2 por galón. Estas variaciones en los precios impactan directamente en los costos de producción y transporte, afectando a múltiples sectores económicos que dependen del diésel como fuente de energía (Emisoras Unidas, 2024).

La Tabla 13 presenta los precios promedio en modalidad de autoservicio de los principales combustibles en Guatemala durante el año 2024, según datos del Ministerio de Energía y Minas. Se incluyen los valores de gasolina superior, gasolina regular, diésel y gas licuado de petróleo (GLP) en cilindros de 25 libras, expresados en quetzales por galón o por cilindro según corresponda.

La tabla recoge tanto el promedio anual como el comportamiento mensual de enero a junio, lo que permite observar las variaciones a corto plazo en el mercado nacional de combustibles.

Tabla 13: *Precios promedios modalidad autoservicio (gasolina y diésel): Guatemala*

Año/Mes	Gasolina superior (GTQ/galón)	Gasolina regular (GTQ/galón)	Diésel (GTQ/galón)	GLP (GTQ/cil 25 lb)
2024	32.91	31.41	29.21	115
ene-24	30.62	29.12	29.16	115

feb-24	31.84	30.34	30.72	115
mar-24	33.93	32.43	29.97	115
abr-24	35.2	33.71	29.78	115
may-24	33.42	31.92	28.17	115
jun-24	32.42	30.92	27.43	115

Nota. Tomado de MEM (2021)

Los datos muestran que la gasolina superior ha alcanzado precios entre 30.62 y 35.20 GTQ/galón, mientras que la gasolina regular se ha mantenido entre 29.12 y 33.71 GTQ/galón. El diésel presenta mayor variabilidad, con valores que oscilan de 27.43 a 30.72 GTQ/galón, reflejando la sensibilidad de este producto a las fluctuaciones internacionales. En contraste, el GLP mantiene un precio fijo de 115 GTQ por cilindro de 25 lb, lo que responde a políticas de regulación en este segmento. Este panorama evidencia la volatilidad de los precios de los combustibles fósiles en Guatemala y refuerza la pertinencia de impulsar alternativas como el biodiésel, que podrían mitigar los impactos de la dependencia del mercado internacional.

Consumo de combustibles en Guatemala.

El consumo de combustibles en Guatemala está dominado por el diésel y la gasolina. En 2024, el consumo anual de diésel fue de aproximadamente 4.5 millones de barriles, mientras que el de gasolina alcanzó los 3.8 millones de barriles. El sector transporte es el principal consumidor, representando alrededor del 60% del consumo total de combustibles líquidos, seguido por la industria y la agricultura. La tendencia de consumo ha mostrado incrementos anuales del 2% al 3% en la última década, impulsada por el crecimiento económico y el aumento del parque vehicular (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

La Tabla 14 muestra las importaciones anuales de combustibles en Guatemala, diferenciadas por tipo de producto (diésel, gas licuado de petróleo, gasolinas, bunker y fuel oil, entre otros). Los datos permiten observar tanto la estructura de la demanda externa de hidrocarburos como la evolución de la dependencia del país respecto a los mercados internacionales de energía.

Tabla 14: *Importaciones anuales de combustible en Guatemala.*

Año	Bunker C y Fuel Oil	Diésel	Gas licuado de petróleo	Gasolina regular	Gasolina superior	Otros	Petcoke	Total
2020	1.45	12.04	7	7.46	6.44	0.9	3.17	38.46
jul-05	1.5	14.75	7.45	8.59	8.6	1.25	3.01	45.16
jul-05	1.67	14.34	7.63	9.49	7.2	1.47	5.89	47.68
jul-05	2.23	15.44	7.4	10.06	7.5	1.85	4.81	49.3
jul-05	1.28	8.29	4.14	5.07	3.96	0.92	2.09	25.75

Nota. Tomado de MEM (2021)

En el año 2020 las importaciones totalizaron 38.46 millones de barriles, siendo el diésel el producto de mayor peso con 12.04 millones, seguido por las gasolinas y el gas licuado de petróleo.

Al comparar con los registros de 2005, donde las cifras superaban los 45 millones de barriles, se aprecia una disminución en la dependencia relativa, aunque el diésel se mantiene como el combustible predominante en la matriz importadora. Estos resultados refuerzan la necesidad de alternativas locales como el biodiésel, que podrían reducir el impacto de la volatilidad internacional en el suministro energético nacional.

La Tabla 15 presenta el consumo anual de productos petroleros desagregado en principales categorías de combustibles fósiles utilizados en el país. Este indicador permite analizar la dinámica interna de la demanda y su correspondencia con las cifras de importación.

Tabla 15: *Consumo anual de productos petroleros en Guatemala.*

Año	Bunker C y Fuel Oil	Diésel	Gas licuado de petróleo	Gasolina regular	Gasolina superior	Otros	Petcoke	Total
2020	1.46	12.24	5.13	7.3	6.65	2.18	3.29	38.24
jul-05	1.55	14.81	5.9	8.54	7.85	2.69	3.01	44.35
jul-05	1.56	14.32	6.2	9.17	6.86	3.11	5.11	46.33
jul-05	2.05	14.94	6.42	9.76	7.38	3.24	4.84	48.62
jul-05	1.37	8.15	3.19	5.06	3.94	1.39	2.65	25.75

Nota. Tomado de MEM (2021)

El consumo total en 2020 fue de 38.24 millones de barriles, siendo nuevamente el diésel el energético más utilizado (12.24 millones), lo que confirma su centralidad en el transporte,

la industria y la generación. Las gasolinas, con 13.95 millones de barriles combinados, también representan una parte significativa del consumo. Al contrastar con los datos de 2005 (44.35 millones de barriles), se observa una leve reducción en la demanda total, aunque con patrones similares de predominio del diésel.

Este comportamiento reafirma la importancia de promover biocombustibles como el biodiésel, cuya producción nacional podría sustituir parcialmente estas cifras y aportar a la seguridad energética.

Normativa y política pública vigente en Guatemala.

La Tabla 16 presenta una síntesis de los principales instrumentos normativos emitidos en Guatemala relacionados con el uso de biocombustibles y la protección ambiental. Se incluyen disposiciones legales desde 1985 hasta 2022, mostrando la evolución del marco regulatorio vinculado al empleo de etanol como aditivo en gasolinas y a las políticas generales de mitigación de gases de efecto invernadero.

El análisis evidencia que, si bien Guatemala emitió tempranamente decretos como la Ley de Alcohol Carburante (1985) y la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, la falta de mecanismos de implementación limitó su impacto real. Posteriormente, el Decreto Gubernativo 7-2013 amplió la perspectiva al incorporar compromisos de adaptación al cambio climático, aunque sin un enfoque específico en combustibles.

El Acuerdo Gubernativo 159-2023 de 2022 establece por primera vez parámetros concretos para el uso de etanol carburante, fijando un mínimo del 5 %. En conjunto, estas normas reflejan una trayectoria intermitente en política energética nacional, con avances recientes que abren espacio para integrar al biodiésel como alternativa estratégica.

Tabla 16: *Plantilla de referencia normativa legal.*

Autor/e	Año	Breve descripción
---------	-----	-------------------

Constitución Política de la República de Guatemala. Decreto 17-85, Ley de alcohol carburante.	1985	Primer decreto realizado para uso de etanol carburante en vehículos con motor gasolina (Gasohol). Prescribe el uso de etanol, sin embargo, por falta de procedimientos para implementarlo, hasta hoy no se llevó a implementado.
Constitución Política de República de Guatemala, Decreto 68-86, Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente.	1985	Primer decreto que se promulga para proteger el medio ambiente. Vincula los gases de efecto invernadero con la emisión de gases de tubos de escape de los vehículos de combustión interna.
Constitución Política de la República de Guatemala, Decreto Gubernativo 7-2013, Ley marco para regular la reducción de vulnerabilidad, la adaptación a los efectos del cambio climático y la mitigación de GEI.	2013	Esta ley promueve la protección al ambiente de acuerdo en línea a los acuerdos internacionales, específicamente no indica gases de efecto invernadero de motores a combustión, solo los indica en general y en capítulo V indica la reducción de ellos, en donde directamente involucra al ministerio de energía.
Constitución Política de República de Guatemala, Acuerdo gubernativo Decreto 159-2023, Ley de alcohol carburante.	2022	Acuerdo para el uso de etanol carburante, para uso en vehículos a gasolina de combustión interna, en donde se indica que el porcentaje a usar no puede ser mejor a 5% y que en octubre de cada año se indicará el porcentaje a utilizar.

Nota. Elaboración en base a normativa pertinente (Constitución Política de Guatemala, Decreto 17-85: ley de alcohol carburante, Decreto 68-86: Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, Decreto 7-2013: Ley Marco para regular vulnerabilidad al cambio climático, Decreto 159-2023: Ley de alcohol carburante).

3.4.2. Necesidad de identificar alternativas viables de producción de biodiésel.

Como se ha señalado, la alta dependencia energética de Guatemala a combustibles fósiles incorpora un claro desafío al país, ante la necesidad de explorar alternativas viables de producción de biodiésel.

La realidad problemática señala que, cualquier alternativa de solución debería considerar la eliminación de sólidos, soluciones salinas y remoción de impurezas y restos de catalizadores.

Ante la necesidad de contar con alternativas sostenibles de producción de biodiésel será importante evaluar, entre otras alternativas, la factibilidad económica de biodiésel a partir de metanol. Al respecto, el mercado potencial Guatemala resulta altamente relevante si se

considera la fuerte dependencia actual del país hacia el diésel fósil como fuente primaria de energía para el transporte y la industria. De acuerdo con estimaciones del Ministerio de Energía y Minas (2024), la introducción de una política de mezcla obligatoria del 5 % (B5) representaría una demanda aproximada de 225,000 barriles anuales de biodiésel, equivalentes a 35.75 millones de litros. Este volumen no solo refleja la magnitud de la oportunidad de sustitución, sino también el impacto que podría tener sobre el mercado de combustibles en términos de diversificación y seguridad energética.

La factibilidad económica del biodiésel a partir de metanol debe evaluarse considerando tanto los costos de producción como los ahorros indirectos asociados a la reducción de emisiones contaminantes. La sustitución parcial del diésel fósil por biodiésel implicaría un descenso significativo en las emisiones de CO₂ del sector transporte, lo cual representa beneficios ambientales medibles y alineados con los compromisos internacionales de mitigación de gases de efecto invernadero. Asimismo, la posibilidad de aprovechar materias primas locales, como aceites residuales de cocina, permitiría disminuir la dependencia de importaciones y favorecer la economía circular, reduciendo costos de disposición de desechos y generando un producto con valor agregado.

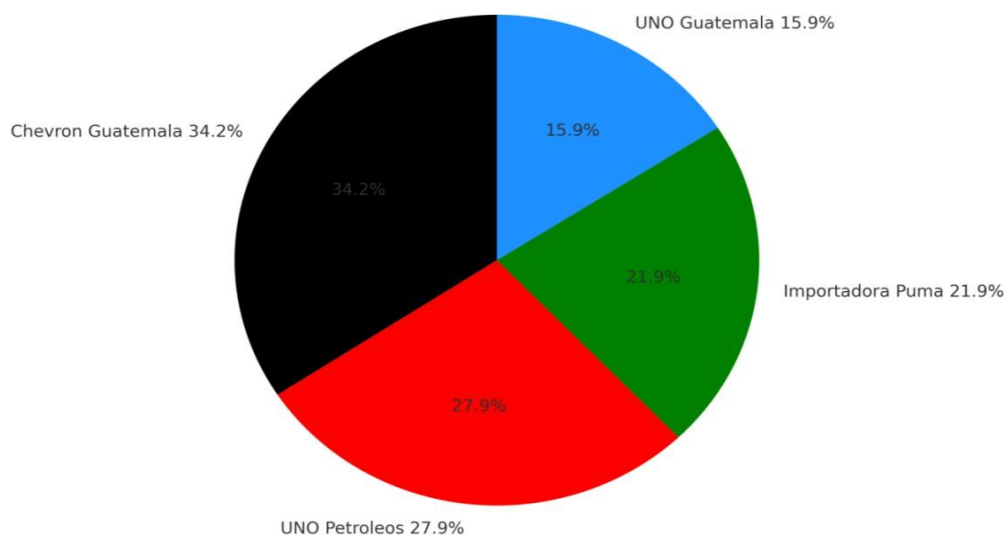
Finalmente, en términos de viabilidad financiera, la implementación de un programa de mezcla B5 no requiere modificaciones técnicas importantes en la flota vehicular diésel existente, lo que minimiza barreras de entrada y costos de adaptación. Esto convierte al biodiésel en una alternativa competitiva frente al diésel fósil, siempre que existan incentivos regulatorios, estabilidad en el suministro de materia prima y esquemas de apoyo a la inversión en infraestructura de producción.

De esta manera, la factibilidad económica no se limita únicamente al cálculo de costos directos, sino que debe contemplar los beneficios sociales y ambientales de largo plazo, que fortalecen el argumento para integrar el biodiésel dentro de la matriz energética guatemalteca.

Mercado objetivo.

En ausencia de regulaciones que obliguen al uso de biodiésel, el mercado objetivo inicial se centraría en empresas y sectores con políticas de responsabilidad social corporativa y sostenibilidad ambiental. Esto incluye flotas de transporte urbano en la Ciudad de Guatemala, empresas de logística y distribución, y el sector agrícola mecanizado. Se estima que este segmento podría representar hasta un 2.5% del consumo anual de diésel, es decir, alrededor de 112,500 barriles anuales o 17.87 millones de litros de biodiésel (Ministerio de Energía y Minas, 2024). La Figura 17 presenta la distribución del consumo de diésel por importador en Guatemala para el año 2024

Figura 17: *Consumo de diésel por importador en Guatemala.*



Nota. Tomado de Ministerio de Energía y Minas, MEM (2024).

A partir de la figura 17 y de acuerdo con los datos de la Sección de Estadística del Ministerio de Energía y Minas, la realidad refleja la participación de las principales empresas importadoras, destacando los actores más relevantes en el suministro de este combustible para el país. Estos resultados, evidencian que Chevron Guatemala concentra el mayor porcentaje del mercado con 34.2 %, seguido de UNO Petróleos con 27.9 % e Importadora Puma con 21.9 %, mientras que UNO Guatemala participa con 15.9 %. Esta distribución revela un mercado dominado por un reducido número de empresas transnacionales, lo que refuerza la dependencia de Guatemala hacia importadores privados

para cubrir su demanda energética. Este panorama abre la discusión sobre la necesidad de fomentar alternativas como el biodiésel nacional, que podría reducir la concentración de mercado y aumentar la resiliencia energética del país.

Mercado específico.

El mercado específico abarcaría a empresas y entidades gubernamentales comprometidas con la reducción de su huella de carbono y la adopción de energías limpias. Esto podría incluir programas piloto en el transporte público urbano, iniciativas en el sector agrícola para el uso de biodiésel en maquinaria, y proyectos en industrias que buscan certificaciones ambientales. Este segmento podría representar entre el 1% y el 3% del consumo anual de diésel, es decir, entre 30,000 y 90,000 barriles anuales, equivalentes a 4.77 a 14.31 millones de litros de biodiésel (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Tamaño del mercado en cifras:

- a. Mercado Potencial: 225,000 barriles anuales (35.75 millones de litros) (Ministerio de Energía y Minas, 2024).
- b. Mercado Objetivo: 112,500 barriles anuales (17.87 millones de litros) (Ministerio de Energía y Minas, 2024).
- c. Mercado Específico: 30,000 a 90,000 barriles anuales (4.77 a 14.31 millones de litros) (Ministerio de Energía y Minas, 2024).

Análisis de competencia.

Actualmente, en Guatemala, solo existe una empresa, Clara Biofuels, dedicada a la producción y comercialización de biodiésel a escala significativa. Clara Biofuels transforma aceite de cocina usado en biodiésel, promoviendo una economía circular y ofreciendo una alternativa energética renovable y sostenible. La empresa recolecta aceite de cocina usado de restaurantes y otros establecimientos, proporcionando contenedores específicos y programas de recolección.

El biodiésel producido puede ser utilizado en motores diésel sin necesidad de modificaciones, mejorando la lubricación del motor y reduciendo las emisiones de CO₂ hasta en un 90% en comparación con el diésel convencional (Clara Biofuels, 2024).

A pesar de la presencia de Clara Biofuels, la falta de incentivos gubernamentales y de una infraestructura adecuada limita el desarrollo de una industria más amplia de biodiésel en el país. Además, la competencia con importadores y distribuidores de diésel fósil, quienes cuentan con economías de escala y una red de distribución bien establecida, representa un obstáculo importante para la adopción masiva del biodiésel en Guatemala. Sin embargo, la demanda creciente de combustibles más limpios y las posibles regulaciones ambientales en el futuro podrían abrir espacio para nuevos competidores en el mercado de biocombustibles (Clara Biofuels, 2024).

Análisis de producto sustituto.

El principal producto sustituto del biodiésel es el diésel fósil, que actualmente tiene un precio promedio de Q26.28 por galón en modalidad de autoservicio en el área metropolitana, según datos recientes del MEM para octubre de 2024 (Ministerio de Energía y Minas, 2024). Este precio competitivo, junto con la infraestructura de distribución y la familiaridad del mercado con el diésel tradicional representa un desafío para su adopción.

Además, el gas licuado de petróleo (GLP) ha ganado popularidad en ciertos sectores industriales como alternativa energética, aunque su uso en el transporte es limitado. La adopción de GLP podría competir indirectamente con el biodiésel en aplicaciones específicas, especialmente si se ofrecen incentivos para su uso (Emisoras Unidas, 2024).

Concepto del producto.

El biodiésel propuesto para el mercado guatemalteco es una mezcla al 5% con diésel fósil (B5), destinada a su uso en motores diésel convencionales sin necesidad de modificaciones.

Este producto busca reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos nacionales de sostenibilidad y las metas de reducción de la huella de carbono de las empresas.

Estrategia de distribución.

La distribución del biodiésel se enfocará en empresas multinacionales y locales que operan en Guatemala, cuyas casas matrices o políticas corporativas exigen la reducción de emisiones y la huella de carbono. Se establecerán alianzas con estas empresas para suministrarles biodiésel, aprovechando su compromiso con la sostenibilidad. La logística incluirá el transporte del producto desde la planta de producción hasta los centros de distribución o directamente a las instalaciones de los clientes, asegurando una cadena de suministro eficiente y confiable.

Estrategia de precio.

En Guatemala, el diésel está sujeto a dos impuestos principales: el Impuesto al Valor Agregado (IVA) del 12% y el Impuesto Específico a la Distribución de Combustibles (IDP), que para el diésel es de Q1.30 por galón (Emisoras Unidas, 2022). Este impuesto es, en parte, una contribución destinada a la infraestructura vial del país, similar a un impuesto para carreteras (Congreso de la República de Guatemala, 2003).

Considerando que el precio promedio del diésel en modalidad de autoservicio en el área metropolitana es de Q26.28 por galón, la estructura de precios se presenta en la tabla 17.

Para que el biodiésel sea competitivo, se propone un precio que iguale o esté ligeramente por debajo del precio del diésel fósil, e incidir en los beneficios adicionales como la reducción de emisiones y el cumplimiento de políticas ambientales corporativas. Además, se explorarán incentivos fiscales como subsidios gubernamentales.

Tabla 17: *Estructura de precios en modalidad de autoservicio.*

Rubro	Valor en Q por Galón
Precio base sin impuestos	Q22.18 por galón.
IDP	Q01.30 por galón.
Subtotal	Q23.48 por galón.
IVA	Q02.80 por galón.
Precio final	Q26.28 por galón.

Nota. Elaboración propia.

Estrategia de aprovisionamiento.

El aprovisionamiento de materias primas se basará en dos fuentes principales:

- a. Aceite de palma virgen: Se establecerán acuerdos con productores locales de aceite de palma para asegurar un suministro constante y de calidad.
- b. Aceite de cocina usado: Se implementarán programas de recolección de aceite de cocina usado en restaurantes, hoteles y hogares, promoviendo el reciclaje bajo la lógica del modelo de economía circular.

La combinación de estas fuentes permitirá una producción sostenible y reducción de la dependencia de materias primas importadas. Además, el uso de aceite reciclado contribuye a la gestión adecuada de residuos y al cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS 6: Agua limpia y saneamiento), al prevenir la contaminación de fuentes hídricas por desechos de aceite (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2024).

Estrategia de promoción.

La promoción del biodiésel se centrará en destacar sus beneficios ambientales y su contribución al cumplimiento de los ODS 6 (agua limpia y saneamiento), 7 (energía asequible y no contaminante) y 13 (acción por el clima). Se buscará obtener el "Sello Verde" otorgado por el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) de Guatemala, que reconoce a las empresas que implementan buenas prácticas ambientales (MARN, 2024).

Este distintivo servirá como herramienta de marketing para atraer a empresas comprometidas con la sostenibilidad. Además, se contactará a empresas internacionales con políticas de reducción de emisiones para ofrecerles el biodiésel como una solución alineada con sus objetivos corporativos.

Estrategia de comunicación.

La estrategia de comunicación incluirá campañas informativas sobre los beneficios del biodiésel, utilizando medios digitales y tradicionales. Se desarrollarán materiales educativos que expliquen cómo el uso de biodiésel contribuye a la reducción de emisiones y al cumplimiento de los ODS. Se participará en ferias y eventos relacionados con la sostenibilidad y la energía renovable para aumentar la visibilidad del producto y establecer contactos con potenciales clientes y aliados estratégicos.

Estrategia de servicio.

Se considera un servicio integral que incluirá asesoría técnica para la implementación del biodiésel en las operaciones de clientes. Se busca garantizar la transición sin inconvenientes, con soporte post venta y canales de comunicación abiertos para atender consultas y resolver problemas. Este enfoque orientado al cliente buscará construir relaciones sólidas, de largo plazo, basadas en confianza y satisfacción mutua.

Proyección de Ventas.

En la tabla 18, se observan las proyecciones de ventas de biodiésel para Guatemala considerando un período de análisis de cinco años, iniciando en 2026 y finalizando en 2030. El período es anual, y se utiliza un método de proyección lineal, partiendo de un volumen inicial estimado de ventas en el primer año, con un incremento anual proyectado del 2% el cual refleja el crecimiento esperado en la adopción del biodiésel por empresas comprometidas con la sostenibilidad y la reducción de huella de carbono.

Tabla 18: *Proyección de Ventas de Biodiésel: Guatemala (2026-2030).*

Año	Ventas Proyectadas (millones de litros)	Incremento Anual (%)
2026	15.00	-
2027	15.30	2
2028	15.61	2
2029	15.92	2
2030	16.24	2

Nota: Elaboración propia.

La cifra inicial de 15 millones de litros proyectada para 2026 se basa en una estimación equivalente al 3% del consumo anual de diésel en Guatemala, que asciende aproximadamente a 500 millones de litros al año (calculado a partir de 4.5 millones de barriles anuales, con 159 litros por barril). Esta proporción refleja un enfoque pragmático, considerando que el biodiésel aún no está regulado ni cuenta con incentivos significativos para su adopción masiva. Además, representa un objetivo razonable para captar clientes corporativos y generar una base sólida de consumo en el mercado nacional, particularmente entre empresas comprometidas con la sostenibilidad.

La proyección inicial estima una venta de 15 millones de litros de biodiésel en 2026, con un crecimiento lineal del 2% anual, alcanzando un volumen estimado de 16.24 millones de litros en 2030. Este incremento se basa en estrategias de promoción dirigidas a empresas comprometidas con metas ambientales y en la previsión de que, en el corto plazo, se establezcan regulaciones nacionales que obliguen al uso de al menos un 5% de biodiésel en motores diésel. Este cambio regulatorio impulsaría una adopción masiva del biodiésel, contribuyendo al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y a la diversificación de la matriz energética de Guatemala. Además, el incremento proyectado considera que las estrategias de comunicación y promoción lograrán captar el interés de nuevos consumidores corporativos e individuales, consolidando el biodiésel como una alternativa viable y competitiva frente al diésel fósil.

Ingresos.

El precio inicial del biodiésel para 2026 se establece en Q28.00 por galón, competitivo frente al precio promedio del diésel fósil (Q26.28 por galón), el cual considera impuestos

como el Impuesto Específico a la Distribución de Combustibles (IDP) de Q1.30 por galón y el Impuesto al Valor Agregado (IVA) del 12%, asegurando que el biodiésel sea atractivo para empresas e instituciones que buscan reducir su huella de carbono. Para los años siguientes, el precio del biodiésel se ajusta anualmente en 2%, siguiendo la tendencia esperada de incremento de precios de los combustibles fósiles en Guatemala, influenciada por factores como inflación, costos de producción y la volatilidad del mercado internacional de petróleo. Este incremento asegura que el biodiésel mantenga su competitividad económica mientras cubre los costos operativos y de materia prima.

La Tabla 19 presenta la proyección del precio del biodiésel en modalidad de autoservicio en para el período 2026–2030. Los valores se expresan en quetzales por galón, incorporando un incremento anual estimado del 2 %, para anticipar la evolución de precios bajo condiciones de mercado estables. Se observa que el precio inicial proyectado para 2026 es de Q28.00 por galón, aumentando gradualmente hasta Q30.31 en 2030. Este ajuste responde al incremento en los costos de producción y a la inflación esperada en los insumos, aunque mantiene un nivel competitivo frente al diésel fósil.

Tabla 19: *Precios proyectados de Biodiésel (Q/galón): Guatemala 2026-2030.*

Año	Precio del Biodiésel (Q/galón)	Incremento anual (%)
2026	28.00	-
2027	28.56	2
2028	29.13	2
2029	29.71	2
2030	30.31	2

Nota: Elaboración propia en base a estimaciones de ventas bajo modalidad de autoservicio.

La Tabla 20 detalla la proyección de ingresos derivados de la venta de biodiésel en Guatemala para el período 2026–2030, considerando los volúmenes de ventas proyectadas en millones de litros y galones, así como los precios estimados en la Tabla 14.

Tabla 20: *Ingresos proyectados por Ventas de Biodiésel (2026-2030).*

Año	Ventas Proyectadas (millones de litros)	Ventas Proyectadas (millones de galones)	Precio del Biodiésel (Q/galón)	Ingresos Proyectados (millones)
2026	15.00	3.96	28.00	Q 110.95
2027	15.30	4.04	28.56	Q 115.43
2028	15.61	4.12	29.13	Q 120.10
2029	15.92	4.21	29.71	Q 124.95
2030	16.24	4.29	30.31	Q 130.00

Nota: Elaboración propia en base a volúmenes de ventas y proyectados.

Los resultados muestran un incremento constante de ingresos, que pasan de Q110.95 millones en 2026 a Q130.00 millones en 2030, en línea con el crecimiento esperado en ventas (de 15.0 a 16.24 millones de litros). Este comportamiento confirma la sostenibilidad financiera del proyecto, al proyectar un flujo creciente de capital incluso bajo incrementos moderados de precios.

La Tabla 21 presenta la proyección de egresos asociados a la producción de biodiésel en Guatemala.

Los egresos se presentan desglosados en costos de producción, gastos de administración y gastos de mercadeo para el período 2026–2030. Esta estimación permite identificar los principales rubros que inciden en la estructura de costos de la industria.

Los costos de producción constituyen la mayor proporción de egresos, destacando el gasto en materia prima (aceites), que supera los Q103 millones en 2026 y alcanza Q111.74 millones en 2030. A estos se suman costos menores como mano de obra, seguros, servicios básicos y mantenimiento. Los gastos de administración y mercadeo se mantienen relativamente bajos, con un crecimiento marginal durante el período analizado.

Tabla 21: *Egresos proyectados en la Producción de Biodiésel, Guatemala: 2026-2030.*

EGRESOS	2026	2027	2028	2029	2030
COSTOS DE PRODUCCIÓN (millones de quetzales)					
Mano de obra	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04
Materia prima (aceites)	103.23	105.30	107.40	109.55	111.74
Seguros	0.60	0.61	0.62	0.64	0.65
Depreciación maquinaria	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44

Servicios (agua, luz, gas)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Mantenimiento maquinaria y equipo	0.96	0.98	1.00	1.02	1.04
Otros costos de producción	1.11	1.13	1.15	1.18	1.20
Costos relacionados	0.55	0.57	0.58	0.59	0.60
SUBTOTAL COSTOS PRODUCCIÓN	107.92	110.07	112.26	114.50	116.78
GASTOS DE ADMINISTRACION (millones de quetzales)					
Nómina	-	-	-	-	-
Suministros (papelería, etc.)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Servicios (internet, teléfono)	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Arrendamiento	1.20	1.22	1.25	1.27	1.30
SUBTOTAL GASTOS ADMINISTRACIÓN	1.27	1.29	1.32	1.34	1.37
GASTOS RELACIONES Y MERCADEO (millones de quetzales)					
Nómina					
Relaciones comerciales	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13
Promoción					
SUBTOTAL GASTOS MERCADEO	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13
TOTAL, EGRESOS	109.31	111.49	113.71	115.97	118.28

Nota: Elaboración propia en base a proyección de volumen de producción.

En total, los egresos aumentan de Q109.31 millones en 2026 a Q118.28 millones en 2030, confirmando que el componente más sensible de la factibilidad económica sigue siendo el costo de la materia prima, lo cual refuerza la importancia de estrategias para el aprovechamiento de aceites residuales y materias primas locales.

Costos de producción.

El costo de mano de obra se estimó con base en la estructura operativa de la planta de biodiésel, contemplando un equipo de diez técnicos con un salario mensual de Q6,000 cada uno, un supervisor con salario de Q8,000 y un ingeniero de planta con un salario de Q12,000. Esta distribución permite cubrir las operaciones clave, desde la producción hasta el control de calidad, garantizando un funcionamiento eficiente y continuo del proceso.

En cuanto a la materia prima, el cálculo se realizó considerando el consumo anual de insumos requeridos para la producción. Se utilizó un precio de referencia de Q6.50 por litro de aceite usado, Q8.00 por litro de metanol y Q16.00 por kilogramo de hidróxido de sodio (NaOH). Estos valores corresponden a precios de mercado actualizados y reflejan la

viabilidad económica del proceso productivo. Con base en la capacidad de producción proyectada, se estimó un gasto anual de Q103,233,360 en materia prima.

El rubro de seguros fue valorado en Q50,000 mensuales, monto que cubre riesgos relacionados con la operación de la planta, como daños a la infraestructura, accidentes laborales y responsabilidad civil. Este valor se ajusta a los estándares de la industria química y de biocombustibles, asegurando la protección financiera y la sostenibilidad del proyecto frente a eventualidades.

En el caso de la depreciación de maquinaria, se aplicó un cálculo conservador del 10 % anual sobre el valor de la inversión inicial, lo que permite recuperar gradualmente los activos fijos durante su vida útil. Esta estrategia asegura la disponibilidad de capital para futuras renovaciones o ampliaciones de la infraestructura productiva. Los servicios básicos de agua, electricidad y gas fueron estimados en Q5,000 mensuales, de acuerdo con las necesidades energéticas y de insumos del proceso de transesterificación y almacenamiento. El mantenimiento preventivo se estableció en Q80,000 mensuales (Q960,000 anuales), cubriendo inspecciones, reparaciones y sustituciones de componentes críticos de la maquinaria. Este plan de mantenimiento garantiza la operatividad eficiente de la planta y prolonga la vida útil de los equipos al reducir fallos inesperados.

Adicionalmente, se incluyeron otros costos de producción y relacionados, calculados como un 1 % y 0.5 % de los costos totales, respectivamente. Este margen absorbe imprevistos, variaciones en los precios de insumos, transporte o gastos administrativos no contemplados en los cálculos iniciales, asegurando la estabilidad financiera del proyecto. En cuanto a los gastos de administración, se proyectaron Q3,000 mensuales para suministros, Q2,500 para servicios administrativos y Q100,000 anuales para arrendamiento de oficinas y espacios de operación. Los costos totales ascienden a Q1,200,000 anuales, lo que permite cubrir las necesidades básicas de gestión y coordinación del proyecto.

Finalmente, los gastos de relaciones y mercadeo se estimaron en Q10,000 mensuales, es decir, Q120,000 anuales, destinados a campañas de promoción, publicidad y actividades

comerciales. Esta inversión es fundamental para asegurar la penetración del biodiésel en el mercado nacional y captar clientes en sectores estratégicos como transporte e industria, en concordancia con recomendaciones previas de organismos como el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (2019) y la FAO (2022).

La Tabla 22 presenta el análisis del flujo de caja proyectado para el proyecto de producción de biodiésel en Guatemala. Se incluyen ingresos anuales estimados, costos fijos y variables, así como la utilidad bruta, la utilidad antes de impuestos, los impuestos correspondientes (25 %) y el flujo de caja neto. Esta estimación permite visualizar la rentabilidad financiera del proyecto en el mediano plazo y evaluar su sostenibilidad económica.

Tabla 22: *Flujo de caja proyectado en la producción de Biodiésel 2026 – 2030.*

Descripción	2026	2027	2028	2029	2030
Ingresos	110.95	115.43	120.10	124.95	130.00
Costo Fijo	-1.39	-1.41	-1.44	-1.47	-1.50
Utilidad Bruta	109.57	114.02	118.66	123.48	128.50
Costo Variable	-107.92	-110.07	-112.26	-114.50	-116.78
Utilidad Antes de Impuestos	1.64	3.95	6.39	8.98	11.72
Impuestos (25%)	-0.41	-0.99	-1.60	-2.24	- 2.93
Flujo de Caja	1.23	2.96	4.79	6.73	8.79

Nota: Elaboración propia. Cifras expresadas en miles de Q.

Los resultados muestran un incremento progresivo del flujo de caja, que pasa de Q1.23 millones en 2026 a Q8.79 millones en 2030, impulsado por el aumento de ingresos y la estabilidad en los costos proyectados. La utilidad antes de impuestos crece de manera constante, alcanzando Q11.72 millones en 2030, lo que refleja un escenario positivo para la recuperación de la inversión. Estos datos confirman la viabilidad financiera del proyecto y evidencian que, bajo las condiciones planteadas, la producción de biodiésel puede consolidarse como una alternativa rentable frente al diésel fósil en el mercado guatemalteco.

Análisis de inversión.

El proyecto contempla la adquisición y adecuación de maquinaria y equipos necesarios para la producción de biodiésel. Estos abarcan reactores, tanques de almacenamiento, bombas, sistemas de dosificación y de control, tanto de origen nacional como internacional. La selección de tecnología y proveedores aún no se ha definido, por lo que los costos específicos serán determinados en estudios posteriores. La inclusión de estos equipos es esencial para asegurar un proceso productivo continuo, seguro y eficiente, lo que refuerza la base técnica del proyecto. Complementariamente, será necesario adquirir muebles, enseres y equipos de oficina destinados al personal de producción, administración y ventas. Entre estos incluyen escritorios, sillas ergonómicas, computadoras, equipos de comunicación y sistemas de almacenamiento de información. Estos elementos permitirán garantizar una adecuada gestión administrativa, comercial y técnica del proyecto, y sus costos se ajustan una vez definidas las operaciones de apoyo y organización de planta.

La puesta en marcha y organización representa otra categoría de inversión clave. Este rubro incluye las pruebas de funcionamiento de la maquinaria y los equipos hasta alcanzar un rendimiento normal, así como la organización del sistema productivo y logístico de la planta. Se ha estimado que estos costos equivalen al 15 % del valor total de la maquinaria, aunque este porcentaje podrá ser refinado conforme se determinen las especificaciones técnicas y las condiciones de operación finales. Esta etapa es determinante para validar la eficiencia del sistema productivo antes de entrar en régimen comercial.

Para Guatemala es importante destacar que el biodiésel, al ser de origen vegetal, no se encuentra regulado por la Ley de Comercialización de Hidrocarburos (Decreto número 109-87). En consecuencia, no se requiere tramitar licencias específicas para su producción, transporte o venta. Esta característica normativa representa una ventaja competitiva, ya que reduce significativamente los costos regulatorios y facilita la implementación del proyecto en comparación con otros combustibles fósiles sujetos a trámites más estrictos.

Uno de los aspectos más relevantes del análisis corresponde al margen de utilidad por galón vendido, que refleja la ganancia neta obtenida después de cubrir los costos de producción, distribución y operación. Este indicador es fundamental en un estudio de prefactibilidad,

pues permite evaluar la viabilidad económica del proyecto y su capacidad para generar retornos sostenibles en el tiempo. Un margen positivo y en crecimiento indica eficiencia operativa, adecuada estructura de costos y condiciones de mercado favorables.

El comportamiento proyectado del margen de utilidad entre 2026 y 2030 muestra una tendencia ascendente constante, pasando de un 3 % en 2026 a un 10 % en 2030. Este crecimiento se explica, en primer lugar, por la posibilidad de mejoras en los procesos productivos, lo que permitiría reducir los costos unitarios de producción. A ello se suma un incremento gradual en los precios de venta del biodiésel, impulsado tanto por el crecimiento de la demanda como por posibles políticas gubernamentales que promuevan el uso de biocombustibles, incluyendo subsidios o incentivos fiscales.

La proyección también puede atribuirse a una mayor estabilidad en los costos de materia prima, particularmente si la planta logra asegurar contratos de suministro de largo plazo bajo precios fijos o esquemas predecibles. De igual forma, la incorporación de nuevas tecnologías más eficientes y el aprovechamiento de energías renovables dentro del proceso productivo podrían reducir los costos operativos, ampliando el margen de utilidad. No obstante, el crecimiento proyectado de este indicador no está exento de riesgos.

Factores como la volatilidad en los precios internacionales de aceites vegetales, metanol o catalizadores, así como cambios en la regulación ambiental y la competencia con otros productores, podrían afectar el comportamiento esperado. Asimismo, la sostenibilidad de esta tendencia positiva dependerá de la capacidad de la planta para mantener su competitividad en calidad, costos y eficiencia en la distribución.

En términos generales, el análisis proyectado del margen de utilidad por galón vendido sugiere un escenario favorable para la viabilidad económica del biodiésel en Guatemala, en tanto que refleja una operación progresivamente rentable y una estructura de costos optimizable. Este crecimiento ascendente permite vislumbrar que, bajo las condiciones planteadas, la producción de biodiésel no solo representa una alternativa sostenible desde el

punto de vista energético y ambiental, sino también financieramente atractiva para inversionistas y actores del mercado energético nacional.

La Tabla 23 muestra el margen de utilidad proyectado por galón vendido en la planta de biodiésel en el período 2026–2030. Este indicador mide la rentabilidad neta obtenida por cada unidad de producto comercializado, después de cubrir los costos de producción, distribución y operación.

Al tratarse de un parámetro clave en la evaluación económica, su evolución refleja la eficiencia interna de la planta y las condiciones externas del mercado.

Tabla 23: *Margen de Utilidad proyectado por Galón vendido en Planta: 2026-2030.*

Año	Margen de utilidad por galón vendido
2026	3%
2027	5%
2028	7%
2029	8%
2030	10%

Nota: Elaboración propia.

Los resultados proyectados evidencian un crecimiento sostenido del margen de utilidad, que inicia en 3 % en 2026 y alcanza 10 % en 2030. Esta tendencia positiva responde a la reducción progresiva de costos unitarios por mejoras en procesos productivos y a un escenario de precios de venta favorables. Además, sugiere que la planta puede consolidar su competitividad en el mercado nacional, garantizando retornos crecientes para los inversionistas. No obstante, el mantenimiento de este margen dependerá de la estabilidad en la provisión de materias primas y de la implementación de políticas públicas que incentiven el consumo de biocombustibles.

Capital de trabajo.

El capital de trabajo inicial para los primeros seis meses del proyecto, correspondiente al año 2026, se calculó considerando los costos necesarios para sostener las operaciones productivas en dicho período. Este cálculo incluye rubros asociados a la producción de

biodiésel, como se observa en la tabla 24, tales como mano de obra, materia prima, seguros, depreciación de maquinaria, servicios (agua, luz y gas), mantenimiento de maquinaria y equipo, y arrendamiento. El total estimado asciende a Q53.25 millones, destacando que el costo de la materia prima representa la mayor proporción debido a la combinación de aceite usado (80%) y aceite virgen (20%), ajustados a los precios más competitivos disponibles en el mercado (Q2.25/litro y Q6.00/litro, respectivamente).

Tabla 24: *Desglose del Capital de Trabajo para 6 Meses del Año Inicial: 2026.*

<u>Descripción</u>	<u>Costo (Q millones)</u>
Mano de obra	0.48
Materia prima (aceites)	51.62
Seguros	0.30
Depreciación maquinaria	0.22
Servicios (agua, luz, gas)	0.03
Arrendamiento	0.60
TOTAL	53.25

Nota: Elaboración propia.

El capital de trabajo inicial asegura la capacidad del proyecto para cumplir los objetivos de producción establecidos, garantizando un flujo de operación continuo y eficiente durante el período crítico de arranque.

Para evaluar la viabilidad económica del proyecto, es esencial calcular dos indicadores clave: el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Ambos permiten analizar si los flujos de efectivo generados por el proyecto son suficientes para recuperar la inversión inicial y generar un rendimiento atractivo para los inversionistas. El VAN se calcula descontando los flujos de caja futuros del proyecto a una tasa de descuento predeterminada, que en este caso es del 15%.

Esta tasa refleja el costo de oportunidad del capital, considerando el riesgo inherente del proyecto, la falta de regulación específica para el biodiésel en Guatemala y la ausencia de incentivos fiscales. Si el VAN resulta positivo, indica que el proyecto generará un valor adicional para los inversionistas; si es negativo, el proyecto no sería rentable bajo las condiciones actuales.

La TIR, por su parte, representa la tasa de descuento que iguala el VAN a cero, es decir, la rentabilidad máxima que el proyecto puede ofrecer. Si la TIR supera la tasa de descuento seleccionada (15%), el proyecto sería viable desde un punto de vista financiero. Para calcular el VAN y la TIR, es necesario conocer la inversión inicial, valor que incluye maquinaria, equipo, instalación y puesta en marcha.

La Tabla 25 presenta la determinación del VAN y la TIR para el proyecto de instalación de una planta de biodiésel con capacidad de 50,000 litros por día. Se consideró una tasa de descuento del 15 % y una inversión inicial de Q4,445,784, proyectando los flujos netos de efectivo para el período 2026–2030. Este análisis financiero permite evaluar la rentabilidad del proyecto y su capacidad de recuperación de capital en el mediano plazo.

Tabla 25: *TIR y VAN de la planta de producción de biodiésel de 50,000 L/día.*

Indicadores	Planta de producción de biodiésel de 50,000 L/día
Tasa de descuento	15,00%
Inversión Inicial	-Q 4.445.784
2026	Q 1.233.068
2027	Q 2.961.969
2028	Q 4.794.029
2029	Q 6.734.083
2030	Q 8.787.174
VAN	Q 10.237.288
TIR	66%

Nota: Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran un VAN positivo de Q10,237,288, lo que indica que el proyecto generará valor agregado al inversionista en comparación con la tasa de descuento aplicada. Además, la TIR alcanza un 66 %, superando ampliamente el costo de oportunidad del capital, lo que confirma la atractiva rentabilidad del proyecto. Estos indicadores reflejan no sólo la viabilidad financiera de la planta, sino también el potencial de consolidarse como una alternativa competitiva frente al diésel fósil, fortaleciendo la seguridad energética del país y contribuyendo a la reducción de emisiones contaminantes. Esta alta TIR se explica porque el proyecto muestra un período de recuperación de inversión aproximadamente de un año, lo que significa que la rentabilidad se materializa rápidamente.

Esta rápida recuperación se debe a la combinación de una demanda estable, una estructura de costos eficiente y márgenes de utilidad crecientes, lo que permite generar flujos de efectivo positivos desde las primeras etapas de operación. La solidez financiera del proyecto, respaldada por estos indicadores, lo convierte en opción viable para inversionistas y promueve su implementación en el mercado de biocombustibles en Guatemala. Después de los hallazgos / resultados de investigación es posible presentar el proceso de validación de las hipótesis que sustentan esta investigación.

Validación de hipótesis.

Esta investigación se ha centrado alrededor de la validación de la hipótesis central referida a si la producción de biodiésel alternativo en Guatemala genera mejoras socioeconómicas y ambientales.

Como podemos observar, a partir de la tabla 26, la evaluación de los resultados de investigación permite confirmar que la producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados genera impactos positivos en la sostenibilidad del uso de biocombustibles.

Este tipo de aprovechamiento promueve la economía circular al transformar un residuo contaminante en una fuente energética renovable, reduciendo así la contaminación del agua y del suelo ocasionada por la disposición inadecuada de los aceites usados. Además, se ofrece evidencia de que, si se fomenta el uso eficiente de los recursos locales y se aprovecha los residuos de aceite doméstico, comercial e industrial con un sistema logístico apropiado de recolección y distribución, así como un sistema de producción de biodiésel contribuye a disminuir la dependencia del petróleo por la razones y evidencia ofrecida en esta investigación y por su capacidad para emplear materias primas disponibles localmente.

La tabla 26, presenta la síntesis de validación.

Tabla 26. *Validación de hipótesis*

Hipótesis	Planteamiento hipotético	Resultado de validación
H ₀ : Nula	La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados no generará mejoras significativas en la sostenibilidad del uso de biocombustibles en Guatemala ni contribuirá a la reducción de gases de efecto invernadero.	<ul style="list-style-type: none"> ■ No se generan indicadores económicos y financieros (VAN, TIR, COK, IRE, PayBack) a favor de NO transicionar a sistemas sostenibles de producción de biodiésel. ■ Investigación no genera evidencia contraria a la necesidad de impulsar economía circular. ■ No se genera evidencia de generación de residuos contaminantes en recursos como agua y suelo. ■ No se genera evidencia de aumentar o radicalizar dependencia hacia derivados del petróleo. ■ No se genera evidencia de aumento o mantención de GEI ■ Hipótesis rechazada.
H ₁ : Alternativa	La producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados sí generará mejoras significativas en la sostenibilidad del uso de biocombustibles en Guatemala y contribuirá de manera efectiva a la reducción de gases de efecto invernadero.	<ul style="list-style-type: none"> ■ VAN = Q10,237.288 ■ TIR = 18.7% ■ COK = 15% ■ IRE = Q4,999,381.81 ■ PayBack = 1 año ■ Promueve economía circular ■ Transforma residuo contaminante en fuente energética renovable. ■ Reduce contaminación de agua y suelo. ■ Disminuye dependencia a derivados del petróleo. ■ Contribuye a disminuir GEI. ■ Mejora matriz energética de Guatemala. ■ Contribuye a mitigar efectos del cambio climático. ■ Permite la diversificación y sostenibilidad energética de Guatemala. ■ Se obtiene modelo de gestión energética viable, sostenible y replicable. ■ Hipótesis aceptada.

Nota. Elaboración propia

Desde el punto de vista ambiental, la conversión de aceites residuales en biodiésel contribuye de manera directa a la disminución de gases de efecto invernadero, ya que el carbono liberado durante la combustión proviene de un ciclo biológico y no fósil. Asimismo, este combustible emite menos partículas, monóxido de carbono y compuestos de azufre, mejorando la calidad del aire y reduciendo los impactos negativos sobre la salud y el ambiente. Su uso también contribuye a la diversificación energética y al fortalecimiento de la seguridad energética nacional.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, al demostrarse que la producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados sí mejora la sostenibilidad del sector energético y contribuye a la mitigación del cambio climático. Este resultado evidencia que el biodiésel elaborado con residuos representa una alternativa viable, económica y ambientalmente responsable para Guatemala, capaz de impulsar un modelo de desarrollo sustentable basado en el aprovechamiento racional de los recursos.

La integración de los resultados obtenidos en las fases cualitativa, cuantitativa y experimental permitió consolidar hallazgos consistentes mediante la aplicación sistemática del método de triangulación, propio de las investigaciones con enfoque mixto. Este proceso de integración articuló de manera coherente la evidencia técnica generada en laboratorio y planta piloto, los análisis documentales y estadísticos sobre el contexto energético de Guatemala, así como las percepciones, valoraciones y niveles de conocimiento recogidos a través de entrevistas y encuestas aplicadas a actores relevantes del sector.

La convergencia de estos insumos no solo confirmó la coherencia interna del diseño mixto secuencial seleccionado, sino que evidenció que cada fase metodológica aportó información complementaria y progresiva, permitiendo contrastar, validar y fortalecer los resultados obtenidos en las etapas precedentes. En este sentido, la triangulación operó como un principio central del reporte de hallazgos, al integrar los resultados de los distintos instrumentos aplicados y sus principales conclusiones, respaldando de manera consistente el cumplimiento del enfoque metodológico adoptado.

De este modo, el proceso de triangulación sustenta integralmente la propuesta de producción alternativa de biodiésel, al demostrar su pertinencia técnica, económica, social y ambiental para el contexto guatemalteco, y refuerza la validez global de los resultados en correspondencia con el diseño mixto secuencial planteado en la investigación.

Los resultados obtenidos en la encuesta permiten establecer un panorama amplio sobre la percepción, el conocimiento y las oportunidades del biodiésel en Guatemala. En términos generales, se evidencia un nivel de conocimiento moderado respecto al tema, donde

alrededor del 70 % de los encuestados manifestó poseer un entendimiento básico o medio sobre el biodiésel. Este hallazgo sugiere una brecha informativa importante, particularmente en lo relativo a los procesos de producción, los impactos ambientales y las ventajas energéticas asociadas al uso de biocombustibles. Sin embargo, la existencia de un grupo significativo con conocimiento incipiente representa una base sobre la cual pueden fortalecerse estrategias de capacitación y divulgación científica que impulsen la transición hacia fuentes energéticas más sostenibles.

Por otra parte, la percepción ambiental del biodiésel es predominantemente positiva. De acuerdo con los resultados representados en la Figura 5, una amplia mayoría considera que el biodiésel contribuye de forma efectiva a la reducción de la contaminación ambiental y las emisiones atmosféricas. Este reconocimiento social de su potencial ambiental constituye un factor crítico para la aceptación pública de políticas de biocombustibles. Además, el hecho de que los encuestados asocien al biodiésel con beneficios ambientales y económicos indica una comprensión incipiente de su valor dual: como agente de mitigación climática y como motor de desarrollo rural e industrial.

Desde una perspectiva socioeconómica, los resultados reflejan que la población percibe en el biodiésel una oportunidad concreta para la generación de empleo y el desarrollo local. La mayoría de los participantes asoció su implementación con beneficios en el sector transporte y agrícola, dos áreas claves para la economía guatemalteca. Asimismo, se identificó una demanda recurrente por incentivos fiscales, financiamiento público y programas de capacitación técnica, lo que denota una conciencia sobre las limitaciones estructurales para el escalamiento industrial del biocombustible. Estas respuestas evidencian que, más allá del interés ambiental, existe una disposición favorable a integrar el biodiésel dentro de una estrategia nacional de diversificación energética con impacto social.

En el ámbito institucional, los encuestados identificaron a las universidades, el gobierno y el sector privado como los principales actores responsables de liderar el desarrollo del biodiésel. Esta convergencia de responsabilidades refleja una percepción madura respecto a la necesidad de colaboración público-privada y académica. Sin embargo, también se señala

una desconfianza hacia la capacidad del Estado para ejecutar políticas sostenidas, destacando la falta de inversión, el limitado apoyo gubernamental y el desconocimiento como las barreras más importantes. Tales resultados reafirman que la consolidación de una industria nacional de biodiésel requiere un marco político estable, incentivos fiscales continuos y la creación de redes interinstitucionales orientadas a la innovación tecnológica.

Finalmente, la síntesis de todos los resultados permite concluir que Guatemala presenta condiciones sociales y perceptuales favorables para el desarrollo del biodiésel, pero aún enfrenta desafíos en educación, financiamiento y articulación institucional. La población reconoce los beneficios ambientales y económicos del biocombustible, pero su conocimiento técnico sigue siendo incipiente, lo que limita la apropiación de la tecnología a nivel ciudadano e industrial. Por consiguiente, los hallazgos de la encuesta reafirman la necesidad de una estrategia nacional de biocombustibles que combine educación ambiental, inversión pública y cooperación con el sector privado, asegurando así que la transición hacia el biodiésel sea sostenible, inclusiva y económicamente viable a largo plazo.

Capítulo 4. Propuesta de transformación.

En este capítulo se presenta la propuesta de transformación derivada del proceso de contrastación entre los aportes del marco teórico y los resultados obtenidos mediante los instrumentos aplicados en la investigación. La convergencia entre la evidencia conceptual —vinculada a la transición energética, sostenibilidad y economía circular— y los hallazgos empíricos y experimentales del estudio permitió fundamentar una propuesta viable para la

producción alternativa de biodiésel en Guatemala. A partir de esta integración se desarrolla la propuesta y la valoración de su potencial como alternativa energética nacional.

4.1. Fundamentación de la propuesta de transformación.

La propuesta de transformación que se plantea a partir de los resultados de investigación que se presentan en esta tesis doctoral. Se fundamenta en la necesidad de Guatemala de iniciar un proceso de transición energética alineados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), pero también en su poder transformador de la realidad energética del país y de su viabilidad socioeconómica y ambiental, como se señala a continuación.

La propuesta de transformación que se presenta en este capítulo se fundamenta en la contrastación sistemática entre los aportes del marco teórico y los resultados obtenidos a partir de los instrumentos aplicados en la investigación, orientados a la constatación del problema planteado. En particular, los análisis documentales y normativos evidenciaron la ausencia de un marco regulatorio específico para el biodiésel en Guatemala, mientras que los resultados de encuestas y entrevistas confirmaron un bajo nivel de implementación del biodiésel, acompañado de una percepción favorable respecto a su potencial ambiental y energético. Estos hallazgos empíricos validan el diagnóstico inicial sobre la dependencia estructural del país de los derivados del petróleo y la necesidad de alternativas energéticas viables.

Desde el punto de vista técnico, los resultados experimentales obtenidos en laboratorio y planta piloto demostraron que es posible producir biodiésel a partir de aceites de cocina usados, cumpliendo parámetros de calidad cercanos a los establecidos por la norma ASTM D6751 y alcanzando rendimientos y conversiones consistentes con la literatura científica revisada. La convergencia entre estos resultados y los fundamentos teóricos asociados a la transición energética, la sostenibilidad y la economía circular permitió validar la pertinencia de una propuesta de producción alternativa de biodiésel, sustentada tanto en evidencia conceptual como en resultados empíricos. En este sentido, la propuesta surge directamente como respuesta estructurada a la constatación del problema, integrando los hallazgos de la

investigación en una solución técnica, económica y ambientalmente viable para el contexto guatemalteco.

Transición energética y Objetivos de Desarrollo Sostenible.

La presente propuesta de transformación se fundamenta en los principios de la transición energética, la economía circular y la reducción de gases de efecto invernadero (GEI), como ejes estratégicos para reconfigurar el modelo energético guatemalteco. Bajo este enfoque, se propone sustituir la dependencia de combustibles fósiles importados mediante la producción descentralizada y sostenible de biodiésel a partir de aceites de cocina usados (UCO), transformando un residuo altamente contaminante en una fuente energética renovable bajo las condiciones que Guatemala presenta en la actualidad-

Es importante señalar que este planteamiento solo responde a las metas internacionales de sostenibilidad establecidas en el Acuerdo de París y en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): 7 y 13. Pero también constituye una solución técnicamente viable, ambientalmente responsable y económicamente replicable (IEA, 2023; MARN, 2024). Estas particularidades incorporan a la propuesta la originalidad y autenticidad, por lo que se trata de una propuesta innovadora y sostenible.

La propuesta se centra en reconocer que la matriz energética de Guatemala depende en más del 90 % de derivados del petróleo (MEM, 2024). Esta condición, sumada al aumento del precio internacional y doméstico del diésel introduce alta vulnerabilidad del suministro por su condicionamiento a los mercados internacionales y la alta dependencia a diésel derivados del petróleo, son características de la matriz energética de Guatemala que impulsan la necesidad de identificar y desarrollar modelos alternativos de producción energética basados en recursos nacionales. En este marco, el biodiésel se plantea como un producto de transición que puede integrarse gradualmente en la flota vehicular y en sistemas térmicos industriales, sin necesidad de sustituir la infraestructura existente.

Valor transformador de la propuesta.

El valor transformador de la propuesta radica en cerrar el ciclo de los aceites vegetales, reinsertando su valor energético en la economía y evitando su disposición inadecuada en drenajes o vertederos, que actualmente constituye una fuente significativa de contaminación hídrica y orgánica (Abbaszaadeh et al., 2022).

Desde el punto de vista técnico, la propuesta se apoya en la reacción de transesterificación etílica de aceites residuales, proceso probado en laboratorio con resultados eficientes y reproducibles. En la planta piloto evaluada, con un balance de masa de 13.23 kg de insumos (aceite 11.96 kg, etanol 1.17 kg y NaOH 0.10 kg), se obtuvo una producción de 10.12 kg de biodiésel y 2.90 kg de glicerina, alcanzando un rendimiento promedio de 84.6 ± 4.9 %.

Los análisis bajo norma ASTM D6751 confirmaron propiedades fisicoquímicas dentro de los límites establecidos, demostrando la viabilidad técnica del proceso y la consistencia con estudios internacionales recientes (Torroba et al., 2024; Zambrano, 2025). Estos resultados sustentan la pertinencia de escalar el modelo hacia sistemas productivos semiautomatizados, optimizando la agitación, la separación de fases y la recuperación de alcohol.

La propuesta se alimenta de minería de datos multifuente, integrando información proveniente de bases de datos energéticas (IEA, FAO y MEM), estudios académicos recientes, registros industriales y entrevistas con actores del sector público y privado. Esta sistematización permitió identificar patrones de generación y disposición de aceites usados, costos de transporte, consumo de diésel en sectores estratégicos y precios de referencia del mercado energético nacional. El análisis de estos datos posibilitó construir un modelo integral de acopio, transformación y comercialización del biodiésel, con escenarios de sensibilidad económica y ambiental ajustados al contexto guatemalteco.

La integración de estos datos permitió contrastar la disponibilidad real de insumos, la estructura de costos y los patrones de consumo energético, elementos que sustentan la viabilidad del modelo propuesto y fortalecen su justificación teórica y práctica.

En conjunto, la triangulación entre los aportes teóricos, la evidencia experimental y los datos obtenidos mediante técnicas cualitativas y cuantitativas permitió estructurar una propuesta coherente con el diseño metodológico mixto de la investigación. Esta integración consolida el carácter justificable del modelo alternativo propuesto y demuestra su pertinencia para responder al problema central planteado.

4.2. Descripción de la propuesta de transformación.

La estructura de la propuesta de transformación se orienta al cumplimiento del objetivo general de esta investigación, que consiste en establecer un modelo replicable de producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados, integrando criterios técnicos, económicos y ambientales que permitan su inserción en la matriz energética nacional.

La propuesta de transformación consiste en el diseño de un sistema alternativo de producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados, orientado a su integración progresiva en la matriz energética nacional. Este sistema se estructura sobre la base de los resultados experimentales obtenidos, que definen las condiciones operativas, los insumos requeridos y los parámetros de calidad del biodiésel producido, así como sobre los resultados de los instrumentos aplicados, que evidencian la viabilidad social, ambiental y económica de su implementación.

La propuesta incorpora principios de economía circular al transformar un residuo contaminante en un biocombustible de valor energético, reduciendo simultáneamente impactos ambientales y la dependencia de combustibles fósiles importados.

Asimismo, la propuesta contempla una visión de escalabilidad, al plantear un modelo que puede evolucionar desde una producción controlada a nivel piloto hacia una implementación industrial, bajo el respaldo de políticas públicas y marcos normativos adecuados. Su descripción integra componentes técnicos, económicos y regulatorios, alineados con los compromisos de reducción de emisiones asumidos por Guatemala y con

los lineamientos de sostenibilidad abordados en el marco teórico. De esta forma, la propuesta de transformación no se presenta como un ejercicio teórico aislado, sino como una alternativa aplicada, coherente con la constatación del problema investigado y sustentada en la evidencia generada a lo largo del estudio.

Presentación de la propuesta.

La propuesta se sintetiza en un modelo alternativo de producción de biodiésel utilizando aceites residuales domésticos, fundamentada en cinco etapas, cada una con contenidos específicos y resultados esperados en cada fase. Estas etapas se refieren a:

- Un diagnóstico de contexto que nos permita identificar las vulnerabilidades del sector energético de Guatemala y que identifique oportunidades y alternativas en condiciones adecuadas de sustitución energética.
- Un estudio alternativo de producción de biodiésel a partir de aceite residual de cocina, que incluya el sistema logístico apropiado y un análisis de viabilidad.
- Un proceso de producción/validación técnica alineado a la certificación ASTM D6751.
- Un análisis de viabilidad económica y ambiental para asegurar su pertinencia.
- Un plan de implementación que incluya estrategias de sostenibilidad.

El aparato teórico-conceptual de esta propuesta se apoya en principios de transición energética, economía circular y reducción de GEI. Reconoce la necesidad de sustituir gradualmente combustibles fósiles con alternativas renovables, en este caso, el biodiésel obtenido de aceite de cocina como tecnología intermedia de bajo impacto, capaz de cerrar ciclos de aceites vegetales, evitando su vertido y reduciendo la huella ambiental del sector alimentario. La coherencia entre ***propuesta-contexto teórico- escenario energético de Guatemala-resultados experimentales*** garantiza su validez científica y pertinencia social.

4.3. *Objetivos de la propuesta.*

Los objetivos que se buscan lograr con la implementación de la propuesta de transformación se orientan a:

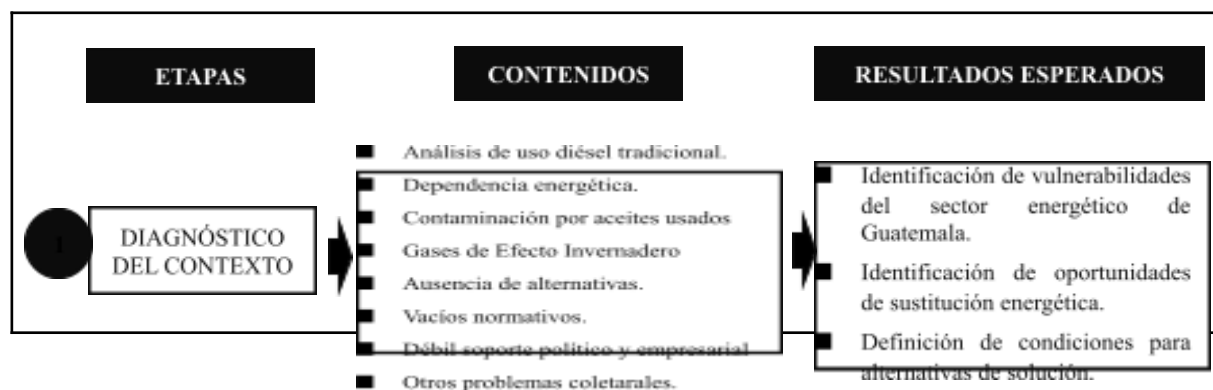
- Experimentar el proceso de transesterificación etílica aplicándolo a escala piloto. Para ello, se utiliza aceite vegetal residual doméstico como materia prima principal.
- Caracterizar el biodiésel obtenido a través de procesos controlados, conforme a los estándares internacionales ASTM D6751.
- Analizar la viabilidad técnico-operativa del modelo alternativo considerando su potencial de escalamiento industrial, su viabilidad técnica y sus ventajas frente al diésel proveniente de derivados del petróleo.

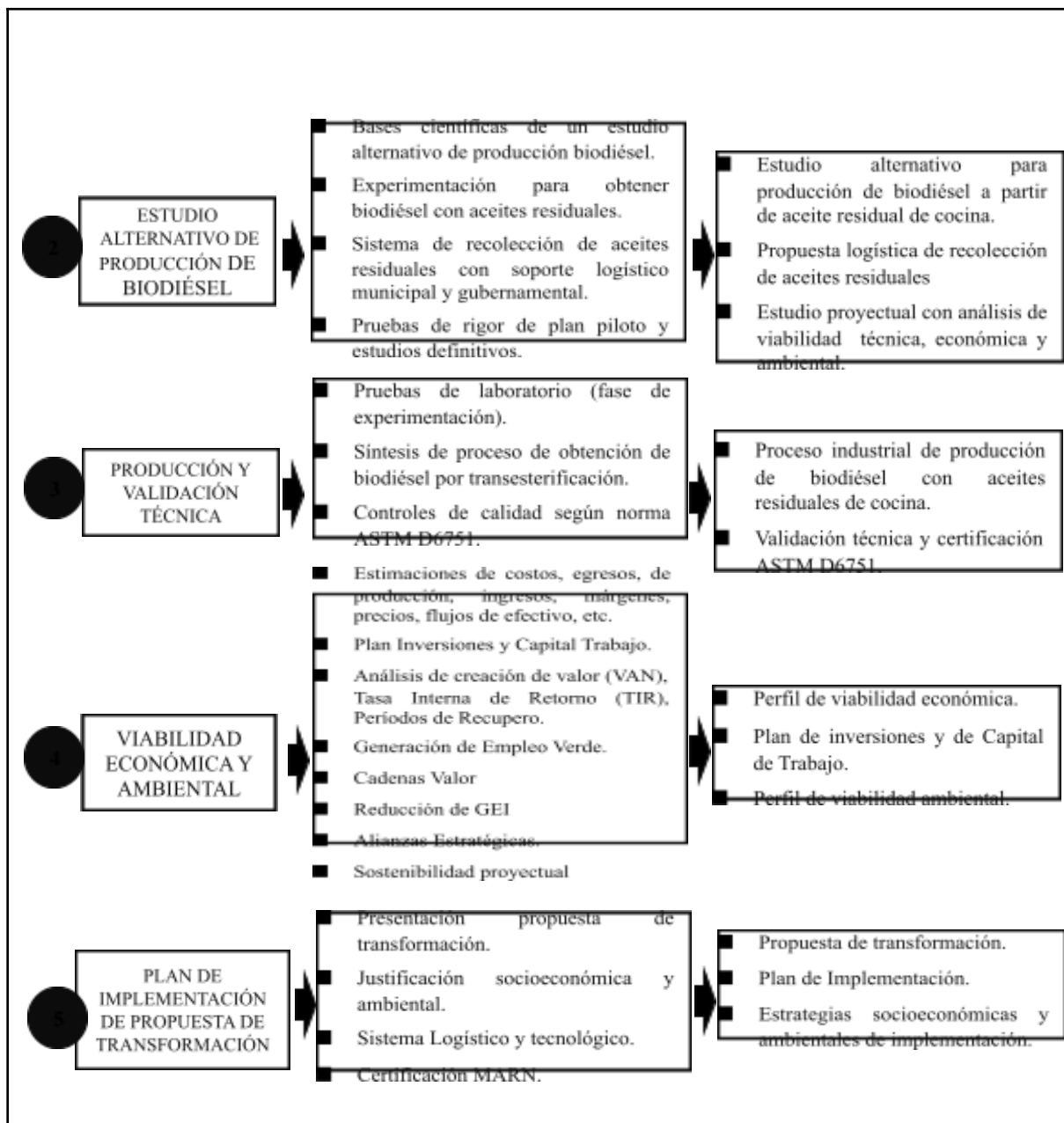
Estas etapas están integradas entre sí y, de dicha articulación se desprenden las fases, actividades y resultados esperados en cada una de ellas.

4.4. *Actividades, fases y/o etapas.*

La propuesta que se desarrolla a partir de esta investigación doctoral considera las etapas descritas en la sección anterior y se integran en la figura 18, en donde también se señalan los contenidos que cada una comprende.

Figura 18: *Propuesta de transformación para producir biodiésel en Guatemala.*





Nota: Elaboración propia.

Reconocimiento de etapas.

A partir de la figura 18, queda en claro la importancia de diagnosticar el contexto incidiendo en el nivel de dependencia energética, la contaminación asociada, los GEI y la ausencia de alternativas y los vacíos normativos relacionados con el tema. En una segunda

etapa, se identifican las bases científicas del estudio alternativo, la realización de pruebas de experimentación y el sistema de recolección de aceites residuales.

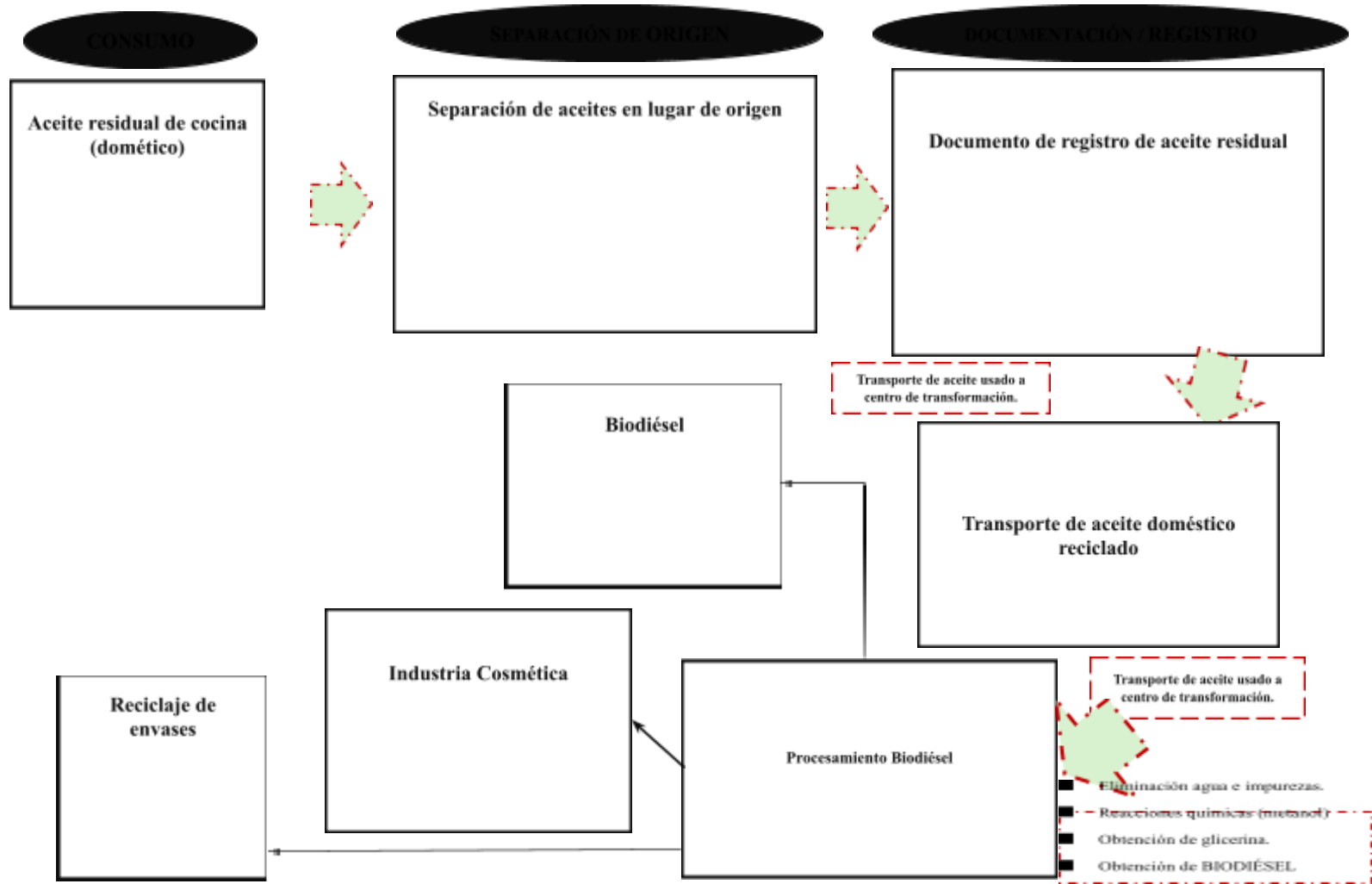
Las etapas 3 y 4 se relacionan entre sí, pues abordan aspectos de viabilidad. La etapa de validación técnica incluye pruebas de laboratorio en su fase de experimentación, la presentación sintetizada del proceso de obtención de biodiésel por transesterificación, así como los controles de calidad según norma ASTM D6751.

Para la validación económica y ambiental, se consideran las estimaciones de costos, egresos, de producción, ingresos, márgenes, precios y los flujos de efectivo, entre otros indicadores de evaluación económica-financiera; así como también se toma en cuenta el plan de inversiones y de capital de trabajo necesario para la evaluación proyectual. Estos elementos no ayudan a determinar la capacidad del proyecto para generar valor entre otros indicadores económicos y financieros. Desde lo ambiental, se considera la generación de empleo verde, la reducción de GEI y la sostenibilidad proyectual de la propuesta.

Sistema de recolección de aceites residuales.

La figura 19, muestra el esquema de recolección de los aceites usados, el cual considera los diferentes momentos del proceso; es decir, desde el transporte del aceite residual de cocina hasta el proceso de transformación a biodiésel y su consecuente uso en el parque automotor. Esta figura también muestra la importancia de la formalización, tramitación y registro en las instancias de gobierno que lo requiera, como también considera que el residuo obtenido, glicerina, puede purificarse y utilizarse como materia prima en otros usos como es la industria farmacéutica. De la misma manera, se reconoce como parte del esquema de recolección de aceite el reciclaje de envases

Figura 19: *Recolección de aceite residual y distribución de biodiésel en Guatemala.*



Nota. Elaboración en base a propuesta de la tesis doctoral. Diagrama del esquema del proceso de valorización de aceite residual de cocina como insumo para la producción de biodiésel. Sustento técnico-logístico según Joseleogon (2024).

La propuesta planteada requiere de la concurrencia de decisiones políticas, pues su implementación no sólo depende de su factibilidad técnica, sino también del respaldo institucional y regulatorio para su incorporación en la matriz energética nacional.

4.5. *Recursos necesarios para la aplicación de la propuesta.*

El proceso tecnológico descrito es viable de la provisión de insumos, materiales y equipos necesarios, como se muestra en la tabla 27 los mismos que se encuentran disponibles en Guatemala. Esta disponibilidad asegura que la propuesta pueda ejecutarse en condiciones reales, garantizando la replicabilidad del modelo a escala piloto e industrial.

Tabla 27: *Insumos, materiales y equipos para la producción de biodiésel.*

Nombre del insumo/material/equipo	Unidad de medida	Cantidad	Resultado esperado
Aceite vegetal Olmeca	Litros	15 L	Reactivo principal para la transesterificación
Metanol	Litros	3 L	Alcohol reactivo para la producción de ésteres metílicos
Hidróxido de sodio (NaOH)	Gramos	100 g	Catalizador de la reacción
Agua caliente	Litros	15 L	Lavado y purificación del biodiésel
Probeta	Unidad	1 (25mL)	Medición de volúmenes pequeños de líquidos
Beaker	Unidad	1 (50mL)	Preparación de reactivos
Beaker	Unidad	1 (1000mL)	Mezcla de reactivos en mayor volumen
Tubos de ensayo	Unidades	2 (30mL)	Ensayos y observaciones de reacciones
Cubetas	Unidades	3	Almacenamiento temporal de insumos/lavado
Paleta	Unidad	1	Agitación manual
Balanza analítica	Unidad	1	Medición precisa de sólidos y reactivos
Guantes de látex	Pares	1 par	Protección del operador
Resultado final	—	—	1 litro de biodiésel

Nota: Elaboración propia. Expresado como base: 1 L de biodiésel

Con respecto a los objetivos planteados, el cuerpo operacional-instrumental de la propuesta se desarrolla en fases experimentales que permiten evaluar la factibilidad técnica del proceso y generar datos cuantitativos que respalden la transformación propuesta. Estas fases comprenden la selección de insumos, la ejecución de la reacción de

transesterificación, la caracterización del producto y la evaluación de eficiencia mediante balances de masa y análisis de conversión.

4.6. *Resultados.*

Los principales resultados que se desprenden de la validación de la propuesta se presentan en la tabla 28, la cual muestra, en primer lugar, el balance de masa obtenido en la producción de biodiésel a escala piloto, considerando las masas de los reactivos empleados en la reacción de transesterificación y los productos resultantes del proceso.

El balance incluye tanto las entradas (aceite, metanol e hidróxido de sodio) como las salidas (glicerina, metanol recuperado y éster metílico), además de las pérdidas registradas durante la operación. Este análisis constituye un paso fundamental en la evaluación de la eficiencia del proceso, ya que permite cuantificar la relación entre la materia prima consumida y la cantidad de biodiésel efectivamente obtenido.

Tabla 28: *Balance de masa: Producción de biodiésel y rendimiento de la producción.*

Grupo	Compuesto	Masa (± 0.01 kg)	Masa total (± 0.01 kg)
Entradas	Aceite	11.96	13.23
	Metanol	1.17	
	Hidróxido de Sodio	0.10	
Salidas	Glicerina	2.90	13.14
	Metanol	0.12	
	Éster metílico (Biodiésel)	10.12	
Pérdidas	-	0.09	0.09
Rendimiento de producción		84.6 \pm 4.9%	

Nota: Elaboración propia.

Balance del proceso de transesterificación.

Un primer resultado que ofrece la propuesta de transformación es el referido al balance del proceso de reacción de transformación del aceite residual a biodiésel, el cual recibe el nombre de transesterificación. La tabla 28 presenta los resultados experimentales del grado de conversión de dicho proceso en función del tiempo de operación, evaluado mediante la cuantificación de biodiésel obtenido en la mezcla de reacción. Esta información es

fundamental para analizar la cinética del proceso y determinar los intervalos de tiempo en los que se alcanzan conversiones más significativas, así como para identificar el punto en el que la reacción se aproxima a un equilibrio.

Los resultados muestran que, a partir de una masa inicial de 13.23 kg de insumos, se obtuvo una producción de 10.12 kg de biodiésel junto con 2.90 kg de glicerina como subproducto y 0.12 kg de metanol recuperado. Las pérdidas totales se limitaron a 0.09 kg, lo que refleja un control adecuado del proceso.

El rendimiento global de producción alcanzó un $84.6 \pm 4.9 \%$, valor que se encuentra dentro del rango reportado en estudios internacionales para procesos de transesterificación bajo condiciones similares. Este resultado confirma la viabilidad técnica del procedimiento aplicado y aporta una base sólida para posteriores escalados y optimización del sistema de producción.

Los resultados muestran un incremento progresivo de la conversión, pasando de un 11.1 % en los primeros minutos hasta alcanzar un 81.3 % a los 120 minutos de operación. Se observa que la reacción presenta una fase inicial lenta, seguida de un aumento más acelerado en el rango de 30 a 90 minutos, donde la conversión se eleva de forma notable. Posteriormente, a partir de los 105 minutos, el proceso tiende a estabilizarse, indicando que se acerca al límite de eficiencia bajo las condiciones experimentales aplicadas. Estos resultados evidencian que la duración del proceso influye en el rendimiento de biodiésel y constituye insumo clave para futuras optimizaciones del tiempo de reacción en la planta.

Plan piloto.

Para la producción de biodiésel a partir de aceite vegetal se empleó la planta piloto mediante un proceso de transesterificación en operación batch, utilizando etanol como alcohol de reacción y catalizando con hidróxido de sodio. La reacción se llevó a cabo alimentando 13 L de aceite, junto con 1.5 L de etanol y 100 g de hidróxido de sodio, en proporciones previamente definidas. Las densidades de los reactivos fueron determinadas

por métodos volumétricos, lo que permitió calcular las masas alimentadas de 11.96 kg de aceite, 1.17 kg de etanol y 0.10 kg de NaOH, totalizando 13.23 kg de reactivos iniciales. Una vez finalizada la reacción y realizados los procesos de separación (evaporación del etanol y decantación de la glicerina), se obtuvieron como productos 10.12 kg de biodiésel, 2.90 kg de glicerina y 0.12 kg de etanol recuperado, alcanzando una masa total de 13.14 kg. Las pérdidas, cuantificadas en 0.09 kg, se atribuyen principalmente a las muestras recolectadas durante la operación y a pequeños derrames.

El rendimiento de producción se calculó en 84.6 ± 4.9 %, correspondiente a la masa de biodiésel obtenida con respecto a la masa de aceite alimentada. Este valor se encuentra dentro del rango reportado para procesos batch (84–94 %, Van Gerpen, Shanks & Pruszko, 2004), aunque en el extremo inferior. Ello se explica, en parte, por las limitaciones inherentes a la escala piloto, donde la mezcla reactiva presenta menor uniformidad y estabilidad que en sistemas industriales. Asimismo, el rendimiento se vio afectado por la no separación completa de fases, lo que ocasionó presencia de aceite residual y biodiésel en la fracción de glicerina, así como glicerina y compuestos no removidos en el biodiésel final.

De forma complementaria, se evaluó el grado de conversión de la reacción en función del tiempo mediante pruebas 3/27, que permiten estimar la fracción soluble en metanol, diferenciando entre biodiésel y aceite sin reaccionar. Los resultados mostraron un incremento progresivo de conversión desde 11.1 % al inicio hasta 81.3 % a los 120 minutos, como se muestra en la tabla 29.

Tabla 28: *Grado de conversión de reacción de transesterificación durante operación.*

Tiempo (± 0.1 min)	Grado de conversión de la reacción
0	11.1 ± 0.1 %
15	12.5 ± 0.1 %
30	13.3 ± 0.1 %
45	29.0 ± 0.3 %
60	31.0 ± 0.3 %
75	34.5 ± 0.3 %
90	48.3 ± 0.4 %
105	50.0 ± 0.4 %
120	81.3 ± 0.7 %

Nota: Elaboración propia.

Este comportamiento refleja una cinética creciente con saltos notables en los minutos 45, 90 y 120, donde se registraron aumentos más marcados en la formación de biodiésel. Cabe señalar que esta técnica también mide compuestos adicionales solubles en metanol, lo que explica valores iniciales elevados (11 % en tiempo cero) y las variaciones observadas en las muestras intermedias, afectadas por la presencia de glicerina y etanol residuales.

El último valor reportado, correspondiente al 81.3 %, es el más confiable, ya que se obtuvo tras detener la agitación y permitir la separación por gravedad, asemejándose al rendimiento calculado en el balance de masa (84.6 %). Esta información se validó realizando cromatografía, como se muestra en el Anexo 2.

En síntesis, la estructura de la propuesta de transformación integra una base conceptual sólida con una ejecución experimental comprobada, que permite validar el modelo de producción de biodiésel desde la fase de laboratorio hasta su posible escalado industrial. Los fundamentos teóricos, los resultados técnicos y la operatividad práctica demuestra la coherencia interna de la propuesta y su capacidad de generar un impacto real en el contexto energético guatemalteco.

De esta manera, la estructura propuesta cumple con los criterios de pertinencia, validez, factibilidad y aplicabilidad requeridos para su implementación y generalización en otros territorios.

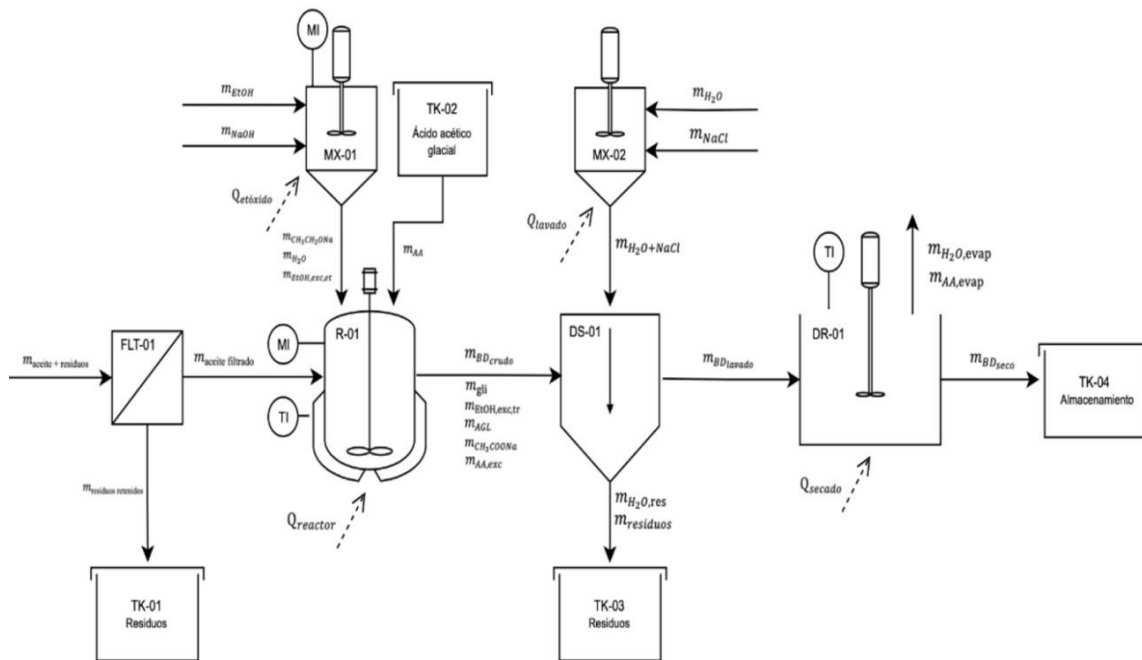
Estudio alternativo para la producción de biodiésel.

La Figura 20 ilustra el diagrama de proceso que se propone para la producción de biodiésel a partir de aceites residuales, integrando las principales etapas de:

- Pretratamiento de identificación de reactivos dañinos para el motor.
- Reacción como expresión de conversión deseada.
- Separación o proceso de lavado y secado.
- Almacenamiento del producto final.

Se debe tener en claro que, el esquema incluye los equipos involucrados —como el filtro (FLT-01), reactor de transesterificación (R-01), decantador de separación (DS-01), secador (DR-01) y tanques de almacenamiento (TK)—, así como los flujos de materia prima, reactivos, subproductos y residuos. Todo este proceso se sintetiza en el diagrama de producción, que para el caso de Guatemala se presenta en la figura 20.

Figura 20: Diagrama de producción de biodiésel actual de Guatemala.



Nota. Tomado de García-Salas (2024).

El proceso comienza con la filtración del aceite, que elimina sólidos y residuos antes de ingresar al reactor. En el R-01, el aceite filtrado reacciona con etanol y catalizador para generar biodiésel crudo y glicerina como subproducto. Posteriormente, en el DS-01, el biodiésel es sometido a un lavado con agua y soluciones salinas para remover impurezas y restos de catalizador, mientras que los residuos son enviados a disposición en el TK-03. El biodiésel lavado pasa al DR-01, donde se eliminan trazas de agua y solventes por evaporación, obteniéndose biodiésel seco que se almacena en el TK-04 listo para su uso.

Este diagrama refleja un sistema completo y reproducible a escala piloto, que asegura la calidad del producto y el cumplimiento de parámetros normativos, además de mostrar los puntos críticos de control de residuos y eficiencia del proceso.

La Tabla 30 presenta el balance de masa obtenido en la planta piloto para el proceso de producción de biodiésel. Se muestran las entradas que correspondientes a las materias primas utilizadas (aceite, metanol e hidróxido de sodio), así como lo que se produce, a lo que se llaman las salidas del sistema (glicerina, metanol recuperado y biodiésel). Además, se cuantifican las pérdidas detectadas en el procedimiento y se calcula el rendimiento global de la producción a partir de la relación entre la masa de biodiésel obtenido y la masa de aceite consumido, así como cualquier subproducto que se pudo generar o bien una mala reacción al no terminar de reaccionar los aceites con el metóxido, lo que puede generar una mezcla de productos que están presentes en el biodiésel y que deben separarse para no afectar la calidad y características del producto terminado.

Tabla 29: Balance de masa: Producción y rendimiento de biodiésel.

Grupo	Compuesto	Masa (± 0.01 kg)	Masa total (± 0.01 kg)
Entradas	Aceite	11.96	13.23
	Metanol	1.17	
	Hidróxido de Sodio	0.10	
Salidas	Glicerina	2.90	13.14
	Metanol	0.12	
	Éter metílico (Biodiésel)	10.12	
Pérdidas	-	0.09	0.09
Rendimiento de producción (%)		84.6 \pm 4.9%	

Nota: Elaboración propia

El balance refleja que, de un total de 13.23 kg de insumos, se obtuvo 13.14 kg de productos, con pérdidas mínimas de 0.09 kg, lo que representa una eficiencia adecuada en la operación. El biodiésel producido alcanzó una masa de 10.12 kg, equivalente a un rendimiento de $84.6 \pm 4.9\%$, valor que se encuentra dentro del rango esperado para procesos de transesterificación a escala piloto. Este resultado confirma la viabilidad técnica del método empleado, a la vez que sugiere oportunidades de optimización en la

recuperación de reactivos y en la reducción de pérdidas para mejorar la eficiencia global del proceso.

La Tabla 31 presenta el grado de conversión de la reacción de transesterificación en función del tiempo de operación. Los valores se obtuvieron mediante la cuantificación de biodiésel en la mezcla de reacción, aplicando la prueba 3/27 como método de verificación. Este seguimiento permite analizar la cinética del proceso y determinar los intervalos de mayor eficiencia en la formación de ésteres metílicos.

Tabla 30: *Grado de conversión de la reacción de transesterificación.*

Tiempo (± 0.1 min)	Grado de conversión de la reacción
0	11.1 ± 0.1 %
15	12.5 ± 0.1 %
30	13.3 ± 0.1 %
45	29.0 ± 0.3 %
60	31.0 ± 0.3 %
75	34.5 ± 0.3 %
90	48.3 ± 0.4 %
105	50.0 ± 0.4 %
120	81.3 ± 0.7 %

Nota: Elaboración propia

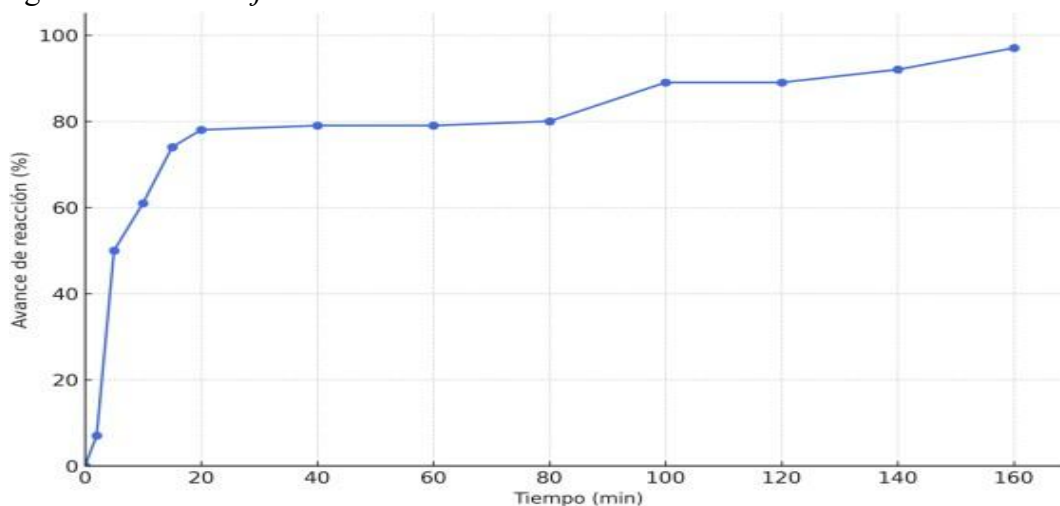
Los resultados muestran un incremento progresivo en el grado de conversión, pasando de 11.1 ± 0.1 % en el tiempo inicial a 81.3 ± 0.7 % a los 120 minutos de reacción. Se observa una etapa inicial lenta de 30 minutos, seguida de una aceleración significativa entre 30-90 minutos y la estabilización en la fase final. En la transesterificación básica, la reacción alcanza altos niveles de conversión tras superar la resistencia inicial a la mezcla de fases.

Los resultados confirman la efectividad de las condiciones operativas empleadas, al situar el grado de conversión dentro de rangos competitivos reportados en la literatura. La Figura 21 muestra el avance del proceso mediante la prueba 3/27, lo cual permite monitorear la conversión de triglicéridos a ésteres metílicos de manera rápida y visual, lo que es útil para el seguimiento cinético del proceso de producción de biodiésel.

Se observa un incremento pronunciado en el grado de avance durante los primeros 20 minutos de reacción, alcanzando más del 70 % de conversión en ese intervalo.

Posteriormente, la curva se estabiliza de manera gradual, con incrementos menores a medida que la reacción se aproxima a su equilibrio, alcanzando alrededor del 97 % a los 160 minutos. Este comportamiento confirma que la etapa inicial es la más determinante en la velocidad de reacción y que, bajo las condiciones estudiadas, es posible lograr altos niveles de conversión en tiempos relativamente cortos, lo que resulta favorable para procesos de optimización a escala piloto e industrial.

Figura 21: *Porcentaje de avance de la reacción de UCO a FAME.*



Nota. Prueba 3/27 vs tiempo de reacción - Método semi-cuantitativo de avance de reacción.

El proceso actual de producción de biodiésel implica varias etapas y tecnologías. A continuación, se presenta una descripción general de las principales etapas involucradas en la producción de biodiésel, este se puede producir a partir de diferentes fuentes de aceites vegetales o grasas animales. Algunas de las materias primas más comunes utilizadas incluyen aceite de soja, aceite de colza, aceite de palma, aceite de girasol y grasas animales. La selección de la materia prima depende de factores como la disponibilidad, el costo y las consideraciones ambientales.

El aceite crudo extraído de la materia prima a menudo se somete a un proceso de pretratamiento para eliminar impurezas y mejorar su calidad. Esto puede incluir pasos como la filtración para eliminar partículas sólidas, el desgomado para eliminar las

impurezas solubles en agua y la neutralización para eliminar ácidos grasos libres. La etapa principal en la producción de biodiésel es la transesterificación, que es la reacción química en la cual el aceite o la grasa se convierte en ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos, los cuales son los componentes principales del biodiésel.

La transesterificación generalmente se lleva a cabo mediante el uso de un catalizador, como hidróxido de sodio o potasio, que promueve la reacción de esterificación. Después de la transesterificación, el biodiésel producido se separa de la mezcla. Esto se puede lograr mediante métodos como decantación, centrifugación o lavado con agua. Posteriormente, el biodiésel se purifica para eliminar impurezas residuales, como glicerina y catalizador.

Durante la producción de biodiésel, se generan subproductos como la glicerina, que se separa del biodiésel en la etapa de purificación. La glicerina puede ser utilizada en diversas aplicaciones industriales o someterse a procesos adicionales para purificarla aún más y obtener glicerina de grado comercial. Es importante realizar pruebas y análisis de calidad para verificar que el biodiésel cumpla con los estándares y especificaciones requeridos. Estas pruebas pueden incluir la determinación de la composición química, el contenido de agua, el punto de nube, el índice de cetano, el contenido de glicerina residual y otros parámetros relevantes (incluir una fuente que señale esto).

En este contexto, es importante destacar que el proceso de producción de biodiésel puede variar dependiendo de los equipos y tecnologías utilizados, así como de las características específicas de la materia prima. Al respecto, existen diferentes enfoques, como la producción a pequeña escala a nivel local o a gran escala en plantas industriales.

Con la finalidad de producir biodiésel a partir de aceite vegetal se utilizó la planta piloto de producción de biodiésel por medio de una reacción de transesterificación con etanol catalizada básicamente con hidróxido de sodio en una operación de tipo batch. Se realizó la reacción alimentando en base a las proporciones definidas de 1.5L de metanol y 100g de hidróxido de sodio por cada 13L de aceite.

En la fase experimental de este estudio, se determinó la densidad del aceite y el etanol utilizados por un método volumétrico para realizar el balance de masa. Se obtuvo masas alimentadas de 11.96, 1.17 y 0.10 kg de aceite, etanol e hidróxido respectivamente, resultando en un total de 13.23 kg alimentados de reactivos. Luego de completada la reacción y los procesos de separación del etanol por evaporación y de la glicerina por decantación se obtuvo masas de productos de 2.90, 0.12 y 10.12 kg de glicerina, etanol y éter etílico o biodiésel, respectivamente, totalizando 13.14 kg. Se cuantificaron las pérdidas a través de la diferencia entre entradas y salidas como 0.09 kg, explicándose a través de la masa de las muestras tomadas a lo largo de la operación.

Se determinó un rendimiento de producción de $84.6 \pm 4.9\%$ correspondiente a la masa de biodiésel producida con respecto a la masa de aceite alimentada. Este rendimiento es congruente con el 84 a 94% reportado para procesos batch (Van Germe J., B. Shanks y R. Prusko; 2004), encontrándose prácticamente en el extremo inferior del rango debido seguramente al ser un proceso de pequeña escala con menor uniformidad en las condiciones a lo largo de la mezcla reactiva que una producción industrial. Se toma en cuenta además el error ocasionado por la falta de una completa y correcta separación de los productos, teniendo cantidades significativas de aceite residual y éter etílico en el producto de glicerina, así como glicerina y otros compuestos residuales presentes en el biodiésel recolectado, por falta de una completa separación por gravedad de los productos.

Se determinó el grado de avance o grado de conversión de la reacción a lo largo del tiempo de operación por medio de la cuantificación de biodiésel en la mezcla reactiva a través de pruebas 3/27. Se observa en la tabla 3 que se cuantificaron grados de conversión en el proceso de producción desde 11.1% en el inicio hasta 81.3% al final. Se observa un comportamiento creciente a lo largo de todo el tiempo, pero con diferentes saltos como a los tiempos de 45, 90 y 120 minutos donde se incrementó súbitamente la cantidad de biodiésel con respecto a la muestra anterior.

Es necesario reconocer que, así como esta prueba de cuantificación de biodiésel permite obtener una idea del grado de avance de la reacción, en realidad lo que se cuantifica son los

compuestos no solubles en metanol presentes en la mezcla y se utiliza para este propósito debido a que el biodiésel es soluble y el aceite no, pero estos no son los únicos dos compuestos presentes en las muestras. Esto explica por qué se inicia desde el minuto 0 con un 11% de conversión, pues este porcentaje de compuesto disuelto corresponde al metanol alimentando y no a biodiésel producido, cuya presencia no es significativa en realidad hasta el minuto 45 donde crece el grado de conversión hasta 29%. Además, esto explica por qué en el último punto hay un salto desde 50 hasta 81%, pues la cantidad de glicerina residual en las muestras era mucho mayor en los tiempos anteriores tomados con la agitación encendida que en la muestra del tiempo final donde se detuvo la reacción y se le permitió un tiempo considerable de separación por gravedad antes de recolectarla.

Por último, este último valor de 81.3% es por lo tanto un dato más confiable y refleja en una mejor medida el grado de conversión alcanzado en la totalidad del proceso, siendo el resto de la mezcla principalmente aceite que no reaccionó con residuos de glicerina no removida y asemejándose al 84.9% de rendimiento determinado por el balance de masa.

4.7. Valoración / evaluación / validación de la propuesta de transformación.

La valoración de la propuesta de transformación se orienta a determinar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados, así como la pertinencia, validez, factibilidad, aplicabilidad, generalización y originalidad del modelo propuesto. La producción de biodiésel es un campo que ha evolucionado con rapidez en las últimas décadas debido a la necesidad de alternativas sostenibles frente al diésel fósil.

Para validar la factibilidad técnica, económica y ambiental de esta propuesta, se describen los indicadores y resultados obtenidos en relación con las fases experimentales desarrolladas. De esta forma, se identifican las ventajas, limitaciones y posibilidades de implementación del modelo en el contexto guatemalteco y en otros escenarios con características similares.

En este apartado se abordan los elementos clave que permiten comprender la cadena de transformación: selección de materia prima, pretratamiento de aceites, transesterificación, separación, recuperación de subproductos y controles de calidad. Asimismo, se plantea un análisis crítico de nuevas tecnologías termoquímicas, químicas y biotecnológicas, contrastando su viabilidad técnica, ambiental y económica.

4.7.1. Validación técnica del proceso.

El proceso de producción de biodiésel que actualmente se realiza y se acepta como un proceso viable y sostenido en la mayoría de los países se basa en la conversión de aceites y grasas en ésteres metílicos o etílicos mediante la transesterificación. Este procedimiento incluye etapas secuenciales que van desde la selección de la materia prima, el pretratamiento, la reacción química con un alcohol, la separación de fases, la purificación del producto principal y la valorización de subproductos como la glicerina.

Dichas etapas están bien documentadas y cuentan con protocolos estandarizados que garantizan que el biodiésel resultante cumpla con normas internacionales como ASTM D6751 o EN 14214 (Pérez et al., 2022). En términos prácticos, este proceso permite obtener un combustible renovable con propiedades comparables al diésel fósil, lo que facilita su adopción en motores de combustión interna ya existentes.

En Guatemala, la aplicación del proceso actual aún se encuentra en una fase incipiente, pues la producción de biodiésel no ha sido institucionalizada ni regulada de forma específica. Las iniciativas existentes suelen estar vinculadas a proyectos académicos, pilotos de investigación o esfuerzos de pequeñas empresas con interés en la sostenibilidad. Esto significa que la estandarización de procesos todavía no se aplica de manera amplia, y en muchos casos depende de la capacidad técnica de laboratorios universitarios o de plantas piloto con recursos limitados. No obstante, el marco internacional es una guía útil para avanzar hacia un esquema de producción más formal, lo cual permitiría integrar el biodiésel como parte de la matriz energética nacional en un futuro cercano.

La selección de materia prima es uno de los aspectos más determinantes en la viabilidad técnica y económica de la producción de biodiésel. A nivel mundial se emplean aceites vegetales como soya, colza, girasol y palma, así como grasas animales y aceites reciclados de cocina. Cada materia prima presenta ventajas y desventajas: los aceites vírgenes ofrecen mayor pureza y rendimiento, pero son más costosos; mientras que los aceites usados son más económicos y promueven la economía circular, aunque requieren pretratamientos más rigurosos (Navarro, 2021). Por ello, la elección depende no solo de la disponibilidad y precio, sino también de la infraestructura tecnológica existente para procesarlos.

En el caso guatemalteco, los aceites usados de cocina (UCO) se presentan como la materia prima de mayor potencial. El país, cuenta con alta densidad de restaurantes, cadenas de comida rápida y sectores hoteleros que generan cantidades significativas de aceite residual. El aprovechamiento de este residuo permitirá reducir costos de producción y mitigará la contaminación causada por la disposición inadecuada de aceites en drenajes y suelos.

Debe reconocerse que la industria de palma africana ofrece una fuente adicional de materia prima, aunque su uso enfrenta críticas por problemas de deforestación y consumo intensivo de agua. Por ello, la propuesta de producción de biodiésel en Guatemala debe balancear aspectos económicos, ambientales y sociales al seleccionar la materia prima.

El pretratamiento de aceites es una etapa esencial para garantizar la eficiencia de la transesterificación. Los aceites crudos o usados contienen impurezas como agua, fosfáticos, compuestos sólidos y altos niveles de ácidos grasos libres, que afectan la actividad del catalizador y pueden provocar reacciones secundarias indeseadas. Para resolver estos problemas se emplean técnicas como la filtración, el desgomado y la neutralización, que buscan acondicionar el aceite y reducir su índice de acidez a niveles adecuados para la reacción (Urien, 2013). Este paso puede marcar la diferencia entre obtener un biodiésel de calidad o un producto con bajo rendimiento y propiedades inestables.

En Guatemala, la necesidad de un pretratamiento riguroso es aún mayor debido a la heterogeneidad de los aceites usados recolectados en distintos puntos de origen. La

variabilidad en el grado de degradación del aceite, el número de ciclos de fritura y la mezcla de diferentes tipos de grasa vegetal complica la estandarización. Por ello, un proceso de producción a nivel industrial debe incorporar sistemas de filtración eficientes, así como técnicas de reducción de acidez mediante esterificación previa o neutralización química. La aplicación de estas medidas reduciría los costos asociados a fallos de reacción y aseguran un biodiésel de especificaciones consistentes en el uso de motores diésel. La transesterificación es la reacción central en la producción de biodiésel. Consiste en la interacción de triglicéridos presentes en aceites con alcohol de cadena corta, normalmente metanol o etanol, en presencia de un catalizador.

El resultado es la formación de ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos y glicerina como subproducto (Van Gerpen et al., 2004). Los factores que determinan el éxito de esta reacción incluyen la proporción molar aceite/alcohol, la temperatura, el tiempo de reacción y el tipo de catalizador utilizado. En condiciones óptimas, se logran conversiones superiores a 90% y tiempos de reacción cortos.

En el contexto de Guatemala, la transesterificación presenta retos y oportunidades. Por un lado, el uso de metanol es problemático porque depende del petróleo, lo que contradice el objetivo de reducir esta dependencia. En contraste, Guatemala produce etanol a partir de caña de azúcar, lo que abre la posibilidad de utilizar un alcohol local y renovable como reactivo. El uso de etanol, aunque más desafiante por cuestiones de miscibilidad y reactividad, aportaría un componente de sostenibilidad al proceso. Por lo tanto, la investigación y optimización de la transesterificación etílica debe ser considerada como una prioridad en el país, no solo por razones técnicas, sino también por su potencial impacto en la economía local y en las metas ambientales.

Una vez finalizada la transesterificación, el biodiésel debe separarse de la glicerina y de los restos de alcohol, catalizador y jabones que se forman durante la reacción. Este proceso de separación puede realizarse mediante decantación, centrifugación o lavado con agua. La fase de purificación es crítica, ya que cualquier traza de contaminante afecta negativamente la calidad del biodiésel, su estabilidad en almacenamiento y su desempeño en motores de

combustión. Los estándares internacionales establecen límites estrictos de humedad, glicerina residual y metales para garantizar la seguridad del producto (ASTM D6751).

En Guatemala, el desafío de la purificación está relacionado con la disponibilidad de equipos adecuados y la capacitación técnica para operarlos. Una planta piloto puede resolver la separación a través de métodos básicos como la decantación por gravedad, pero en una escala industrial será necesario incorporar sistemas más avanzados de centrifugación y secado. Además, debe garantizarse la disposición ambientalmente responsable de las aguas residuales generadas en el lavado. Este aspecto es especialmente relevante en el país, donde los sistemas de tratamiento de efluentes industriales son limitados, y un mal manejo podría contradecir los beneficios ambientales buscados con la producción de biodiésel.

4.7.2. Evaluación económica y ambiental del modelo.

La producción de biodiésel genera el subproducto: *glicerina*, cuya gestión puede representar un problema y una oportunidad. En condiciones adecuadas, la glicerina cruda puede refinarse y destinarse a industrias farmacéuticas, cosméticas y alimentarias, lo que agrega valor a la cadena de producción. Además, la recuperación y reciclaje del alcohol no reaccionado, generalmente metanol o etanol, contribuye a disminuir costos y mejorar la eficiencia global del proceso (Calvo, 2021).

Este enfoque de valorización transforma al biodiésel en un proceso más alineado con los principios de la economía circular. En Guatemala, la valorización de la glicerina aún enfrenta obstáculos por la ausencia de un mercado consolidado para este subproducto. Sin embargo, su integración a la cadena de valor podría explorarse a través de asociaciones con pequeñas industrias que utilicen derivados químicos o cosméticos.

Del mismo modo, la creación de incentivos fiscales o normativos para la valorización de subproductos podría ser una estrategia clave para mejorar la rentabilidad económica de la producción nacional de biodiésel. Además de los indicadores técnicos, la valoración de la propuesta considera su desempeño económico y ambiental, con el fin de demostrar la

factibilidad integral del modelo. Estos dos componentes resultan esenciales para garantizar que el biodiésel pueda producirse de manera competitiva y sostenible en el contexto guatemalteco, reduciendo costos operativos y mitigando impactos negativos sobre el entorno. La evaluación combina parámetros financieros básicos y estimaciones de reducción de emisiones para establecer un marco de validación cuantitativo de la propuesta.

Desde el punto de vista económico, el modelo de producción alcanzó un rendimiento de 84.6 ± 4.9 %, con una producción estimada de 1,950 galones diarios en condiciones piloto. El análisis de costos mostró un gasto total de Q45,162.63 por lote, con un costo unitario de Q24.10 por galón, lo que permite competir con el precio promedio del diésel fósil en Guatemala (Q26.28/galón). La inversión inicial requerida fue de Q4,999,381.81, con una Tasa Interna de Retorno (TIR) de 18.7 % y un Valor Actual Neto (VAN) positivo, confirmando la rentabilidad del proyecto bajo escenarios conservadores. Estos indicadores, como se puede observar en la tabla 25, financieros evidencian la factibilidad económica y la capacidad del modelo para sostenerse mediante reinversión progresiva de utilidades o mediante esquemas de crédito verde e incentivos fiscales.

Actores involucrados y cadenas de valor.

Los actores involucrados en esta transformación abarcan una amplia cadena de valor que inicia con los generadores de aceite vegetal usado —restaurantes, comedores, municipalidades y procesadoras de alimentos— y se extiende hacia los centros de acopio, transporte, plantas de producción y consumidores finales.

La coordinación entre estos niveles operativos se plantea mediante alianzas público-privadas y convenios con municipalidades y gestores ambientales autorizados por el MARN, garantizando trazabilidad y cumplimiento normativo. Asimismo, se propone incluir cooperativas o microempresas recolectoras en los programas de empleo verde, promoviendo la formalización de la gestión de residuos grasos y la generación de ingresos sostenibles para comunidades locales (UNDP, 2023).

Logística de recolección de aceites residuales de cocina.

La recolección de aceites de cocina usados se proyecta bajo un esquema de logística circular, con rutas de acopio urbano que operen semanalmente en coordinación con restaurantes, hoteles y mercados municipales.

El aceite recolectado sería prefiltrado in situ y transportado en contenedores herméticos hacia centros de acopio zonales, donde se realizaría la decantación y filtración final antes del envío a planta. Este sistema aprovecha la infraestructura vial existente y reduce los costos de transporte, estimados en Q2,590.18 diarios para una capacidad de 1,950 galones por día, según los datos de operación piloto (Zambrano, 2025). Este componente logístico constituye el eje operativo y estratégico de la propuesta, asegurando el flujo continuo de materia prima y su sostenibilidad a largo plazo.

En cuanto a materiales e insumos, el proceso se basa en reactivos disponibles en el mercado nacional: etanol anhidro de caña de azúcar, hidróxido de sodio, agua destilada, y materiales de laboratorio (beakers, buretas, viscosímetro de Ostwald y medidor de pH).

Los equipos de planta piloto incluyen reactor de acero inoxidable con agitación, decantadores, bombas, tanques de lavado y secado, así como unidades de purificación con resinas adsorbentes tipo Amberlite BD10DRY, garantizando la obtención de biodiésel libre de humedad e impurezas. Esta selección tecnológica optimiza los costos de inversión y mantenimiento, al tiempo que cumple con los estándares de seguridad y eficiencia energética (Crespo, 2023).

Viabilidad económica de la propuesta.

La viabilidad económica de la propuesta se sustenta en la comparación del costo del biodiésel frente al diésel fósil. En 2025, el precio promedio del diésel fue Q26.28/galón (Q22.18 base + IDP Q1.30 + IVA 12 %), mientras que el precio proyectado alcanzó Q24.10/galón, con márgenes de utilidad sostenibles a partir del segundo año de operación.

La inversión inicial es de Q4,999,381.81 y costos operativos diarios de Q45,162.63, resultando una TIR de 18.7 % y un VAN positivo, indicadores que confirman su factibilidad económica bajo escenarios conservadores. El financiamiento se propone a través de esquemas blandos y mixtos, combinando créditos verdes del BID o Banco Mundial con capital semilla nacional y reinversión progresiva de utilidades, asegurando la sostenibilidad financiera del sistema (BID, 2024).

Viabilidad ambiental de la propuesta.

La viabilidad ambiental se fundamenta en el análisis del ciclo de vida del biodiésel, el cual reporta entre 39.6 y 123 kg CO₂e/GJ, representando una reducción de hasta 48 % en comparación con el diésel fósil (IEA, 2023). Además, la sustitución parcial del diésel reduce la energía fósil requerida en 43 %, evita la disposición inadecuada de residuos grasos y disminuye la contaminación de fuentes hídricas. Este impacto positivo se refuerza mediante la valorización de subproductos como la glicerina, que puede utilizarse en industrias cosméticas, farmacéuticas o como precursor químico en la producción de biogás y bioplásticos, consolidando el enfoque de economía circular.

La propuesta de transformación es, por tanto, una herramienta de política energética sostenible, capaz de ser replicada en distintos municipios del país e incluso en la región centroamericana. Su fundamento teórico y empírico demuestra que la producción de biodiésel a partir de aceites usados no solo es técnicamente viable, sino también económicamente rentable y ambientalmente favorable.

La articulación entre investigación, industria y gobierno constituye la base del cambio estructural propuesto, promoviendo la independencia energética, la creación de empleo verde y la reducción de emisiones de carbono. Con ello, se transforma el problema inicial —la dependencia fósil y la contaminación por residuos grasos— en una oportunidad nacional de desarrollo sostenible, valorando la pertinencia, validez, factibilidad, aplicabilidad y generalización del modelo propuesto para Guatemala.

Participación comunitaria.

La contribución comunitaria dentro del modelo de producción de biodiésel se concibe como un componente esencial para asegurar su sostenibilidad social, ambiental y económica. El planteamiento reconoce que la transformación energética no depende únicamente de la infraestructura técnica, sino también del grado de involucramiento y corresponsabilidad de las comunidades en la gestión de los recursos.

En este contexto, las comunidades urbanas y rurales desempeñan papel estratégico en la recolección, acopio y entrega del aceite vegetal usado, activando la cadena de suministro del biocombustible. Esta interacción fortalece la conciencia ambiental y fomenta una economía circular local, en donde el residuo doméstico se convierte en insumo energético.

El modelo incorpora la participación de municipalidades, asociaciones de vecinos, administradores de mercados, comedores y establecimientos de alimentos, quienes establecen puntos de recolección organizados bajo convenios con la planta de producción. Este sistema permite consolidar redes de acopio comunitario que operan con rutas establecidas y contenedores estandarizados, garantizando la trazabilidad del residuo y su manejo adecuado. A través de campañas de sensibilización y acuerdos colaborativos, la comunidad adquiere responsabilidad directa en la reducción de la contaminación hídrica causada por el vertido de aceites, al tiempo que obtiene beneficios tangibles, como generar empleo local y la posibilidad de ingresos complementarios por el aceite recolectado.

La propuesta considera que la contribución comunitaria contribuye en la diversificación de los impactos positivos del proyecto, en especial, en áreas urbanas con alta densidad en comercio de alimentos. Cada litro de aceite recolectado evita la descarga de miles de litros de agua contaminada y reduce la carga orgánica en el sistema de tratamiento municipal. Así, la comunidad se convierte en agente de mitigación ambiental y en socio activo del proceso productivo, pasando del rol pasivo de consumidor a uno participativo en la cadena de valor energética. Esta dinámica refuerza la gobernanza local en materia ambiental y genera sentido de pertenencia en un sistema energético más limpio y descentralizado.

La contribución comunitaria también se extiende al ámbito educativo y social, promoviendo espacios de aprendizaje sobre sostenibilidad, gestión de residuos y energía renovable. El proyecto plantea la articulación con instituciones educativas, organizaciones sociales y cooperativas, que pueden servir como canales de capacitación y multiplicación del conocimiento. Estas acciones fortalecen las capacidades locales para mantener y ampliar la red de recolección, estimulan la creación de empleos verdes y consolidan una cultura ambiental sostenida en el tiempo.

En conjunto, la participación comunitaria se establece como un pilar de la propuesta de transformación, al integrar la dimensión social con la técnica y garantizar que la transición energética hacia el biodiésel tenga una base inclusiva, replicable y sostenida por las propias comunidades.

Contribución científica.

La contribución científica de la propuesta se centra en la generación de conocimiento aplicable a la transición energética y a la gestión sostenible de residuos en contextos donde la infraestructura tecnológica es limitada. Desde la perspectiva teórica, el estudio amplía la comprensión del biodiésel como vector energético dentro de economías emergentes, integrando conceptos de economía circular, valorización de residuos y sostenibilidad ambiental en un mismo modelo operativo.

La investigación demuestra que los aceites de cocina usados (UCO) constituyen materia prima viable, constante y de bajo costo para la producción de biocombustibles, aportando evidencia empírica sobre su transformación química y su potencial para ser parte estructural de la matriz energética nacional.

En el ámbito experimental, el estudio aporta información acerca de la eficiencia y rendimiento de la reacción de transesterificación etílica aplicada a aceites residuales en condiciones de operación optimizadas reproducibles en entornos de laboratorio o planta piloto.

En el balance de masa obtenido, los porcentajes de conversión y caracterización fisicoquímica bajo la norma ASTM D6751 fortalecen la base científica para futuros estudios en cinética de reacción, purificación y escalamiento del proceso. Estos resultados son referente técnico para instituciones académicas y centros de investigación que busquen validar la producción de biodiésel en condiciones tropicales, donde la composición de los aceites usados difiere de las matrices estudiadas en países industrializados.

Asimismo, la propuesta científica introduce un modelo metodológico que integra análisis de laboratorio, simulación económica y evaluación ambiental, estableciendo una relación directa entre la factibilidad técnica, el costo de producción y el impacto ambiental. Esta integración representa un aporte metodológico a los estudios de biocombustibles en Latinoamérica, al combinar parámetros experimentales con variables de política energética y sostenibilidad.

El enfoque interdisciplinario utilizado permite comprender el biodiésel no solo como un producto químico, sino como un sistema complejo de interacción entre tecnología, economía y medio ambiente, ofreciendo una nueva ruta de análisis para el diseño de políticas públicas basadas en evidencia.

Finalmente, la contribución científica se manifiesta en la posibilidad de replicar el modelo en otros contextos regionales, adaptando las condiciones experimentales y logísticas a la disponibilidad de recursos locales.

La validación técnica obtenida permite proyectar líneas de investigación futuras en reactividad catalítica, recuperación de alcoholes, valorización de glicerina y optimización de energía térmica en planta, aportando a la literatura sobre biocombustibles sostenibles y procesos de bajo impacto ambiental. De esta forma, la tesis no solo genera conocimiento técnico nuevo, sino que consolida un marco científico regional para el desarrollo de biocombustibles a partir de residuos, reforzando la relación entre innovación, sostenibilidad y soberanía energética.

Contribución ambiental.

La propuesta de producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados constituye una intervención ambientalmente estratégica orientada a reducir la presión sobre los ecosistemas y las fuentes hídricas del país. El vertido de aceites residuales en drenajes o suelos representa una de las principales causas de contaminación urbana, ya que un solo litro de aceite puede afectar más de mil litros de agua. En este contexto, la propuesta transforma un residuo altamente contaminante en un producto energético limpio, insertando su aprovechamiento dentro de un modelo de economía circular que reduce el desperdicio y prolonga el ciclo útil de los recursos.

La contribución ambiental se refleja tanto en la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como en la mitigación de impactos locales sobre la calidad del agua y los ecosistemas urbanos.

El análisis ambiental del proceso evidencia que la producción de biodiésel mediante transesterificación etílica puede reducir entre un 39 % y un 48 % de las emisiones de CO₂ equivalente con respecto al diésel fósil, dependiendo de la eficiencia energética alcanzada en planta piloto. Asimismo, se estima una reducción del 43 % en la demanda de energía fósil, lo que contribuye a la independencia energética y a la diversificación de fuentes sostenibles. Estas cifras sitúan la propuesta dentro de los parámetros de proyectos con potencial de certificación ambiental, como el Sello Verde del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN), que reconoce iniciativas con impacto directo en la mitigación de GEI y en la gestión responsable de residuos. La obtención de este distintivo se plantea como una meta institucional del proyecto, consolidando su legitimidad ambiental y su alineación con las metas nacionales de transición energética.

Desde una perspectiva social, la propuesta promueve la creación de cadenas de empleo verde vinculadas a la recolección, transporte, acopio y procesamiento de aceites usados. Estas cadenas se estructuran mediante alianzas con municipalidades, asociaciones comunitarias y cooperativas locales, que asumen la gestión del residuo como fuente de trabajo digno y estable. Se proyecta que cada centro de acopio municipal pueda generar

entre tres y cinco empleos directos y hasta diez indirectos, incluyendo actividades logísticas, operativas y de mantenimiento. Este esquema no solo mejora la gestión ambiental, sino que también impulsa la inclusión económica de sectores con baja formalidad laboral, fortaleciendo el vínculo entre sostenibilidad y desarrollo social.

Para asegurar la permanencia del sistema y su escalabilidad, la propuesta establece una red de alianzas público-privadas orientadas a consolidar un modelo de responsabilidad compartida. A nivel público, se promueve la coordinación con el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN) para la certificación ambiental, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) para el reconocimiento del biodiésel dentro de la matriz energética nacional, y las municipalidades para facilitar la logística de recolección.

En el sector privado, se plantea la colaboración con cadenas de restaurantes, hoteles, procesadoras de alimentos y empresas de transporte interesadas en reducir su huella de carbono mediante el uso de biodiésel. Estas alianzas permitirán establecer contratos de suministro y planes de compensación ambiental, garantizando la estabilidad del flujo de materia prima y fortaleciendo el compromiso empresarial con la sostenibilidad.

La propuesta también contempla el desarrollo de programas educativos y de sensibilización ambiental dirigidos a comunidades, centros escolares y empresas, con el propósito de consolidar hábitos sostenibles en la gestión de aceites usados. Estas acciones se complementan con campañas informativas que destaquen los beneficios del biodiésel en términos de calidad del aire, reducción de emisiones y economía local. En conjunto, estas estrategias consolidan un modelo ambientalmente responsable y socialmente inclusivo, en el que la comunidad participa activamente en la protección del entorno mientras se generan oportunidades económicas sostenibles.

En síntesis, la contribución ambiental de la propuesta radica en su capacidad para articular la mitigación de impactos ecológicos, la creación de empleo verde y la cooperación institucional bajo un marco de sostenibilidad. Al transformar un residuo urbano en un recurso energético estratégico, el proyecto aporta una solución concreta al problema de la

contaminación por aceites y al mismo tiempo contribuye a los objetivos nacionales de adaptación al cambio climático. Este enfoque integral convierte la propuesta en un referente de innovación ambiental aplicable a otras regiones del país y de la región centroamericana, consolidando su carácter transformador y su relevancia científica y social.

Criterios de control y replicabilidad.

Los resultados de control de calidad verifican que el biodiésel producido cumple los parámetros esenciales para su uso en motores convencionales, lo que valida la aplicabilidad práctica del modelo. Asimismo, la metodología empleada y la disponibilidad de insumos locales permiten su replicación en distintos municipios del país o en contextos regionales con condiciones semejantes, demostrando su potencial de generalización y escalamiento.

Los controles de calidad son indispensables para certificar que el biodiésel cumple con las normas internacionales de desempeño y seguridad. Estos controles incluyen la medición de parámetros fisicoquímicos como densidad, viscosidad, punto de inflamación, número de cetano y contenido de glicerina total (Hielscher Ultrasound Technology, 2023). Un biodiésel que no cumpla con estas especificaciones puede generar problemas en motores, reducir la vida útil de equipos y disminuir la confianza del mercado en este biocombustible.

En Guatemala, la falta de normativa específica para el biodiésel dificulta la aplicación de controles sistemáticos, lo cual constituye una barrera para su comercialización formal. Es imperativo adoptar estándares internacionales, como ASTM o EN, para establecer laboratorios de referencia capaces de verificar la calidad del producto local. De esta manera, se lograría no solo validar el biodiésel producido en el país, sino también crear condiciones de confianza para su integración en la matriz energética nacional.

Pertinencia de la propuesta de transformación.

La propuesta de producción de biodiésel a partir de aceites de cocina usados muestra su pertinencia al responder a una necesidad energética, económica y ambiental del contexto

guatemalteco. La dependencia nacional de combustibles fósiles importados representa un riesgo estructural para la seguridad energética del país, al mismo tiempo que genera altos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero. Frente a ello, la valorización de aceites residuales como fuente de biocombustible ofrece una solución que aborda de forma simultánea la gestión de residuos y la diversificación energética. Esta correspondencia entre problema diagnosticado y propuesta diseñada confirma que el modelo responde a una necesidad real y prioritaria para el país, alineándose con los objetivos de sostenibilidad energética y mitigación de emisiones establecidos por Guatemala.

En cuanto a la validez, la propuesta se sustenta en la demostración empírica de los resultados experimentales obtenidos en planta piloto. El rendimiento promedio de $84.6 \pm 4.9\%$ y la conversión de 81.3% alcanzada a los 120 minutos de operación corroboran la eficacia técnica del proceso. Los análisis fisicoquímicos realizados bajo la norma ASTM D6751 verificaron que el biodiésel cumple con las especificaciones de calidad requeridas, lo que respalda la validez funcional del modelo propuesto. Además, los resultados coinciden con valores reportados en la literatura internacional, lo que refuerza su coherencia científica y su consistencia metodológica.

Factibilidad de la propuesta.

La factibilidad del modelo se confirma a través de la evaluación económica y la disponibilidad de recursos técnicos nacionales. Los insumos principales —aceite vegetal residual, etanol y catalizador básico— se encuentran disponibles localmente, y los equipos requeridos pueden adquirirse o fabricarse dentro del país sin necesidad de importaciones complejas. El análisis financiero evidenció un costo unitario competitivo (Q24.10/galón) frente al diésel fósil (Q26.28/galón), con una Tasa Interna de Retorno del 18.7% y un Valor Actual Neto positivo, lo que confirma su sostenibilidad económica. Estos resultados validan que la propuesta no solo es viable en condiciones controladas de laboratorio, sino también bajo escenarios reales de operación y mercado.

La aplicabilidad del modelo se expresa en su capacidad para ser implementado por diferentes actores institucionales, académicos o empresariales, con adaptaciones mínimas a las condiciones locales. La propuesta integra procedimientos claros y reproducibles para cada etapa —desde la recolección y pretratamiento de aceites hasta la producción y purificación del biodiésel—, lo que facilita su adopción en otras plantas piloto o centros de innovación tecnológica. Su diseño modular permite iniciar con escalas reducidas y expandirse progresivamente según la demanda, manteniendo la trazabilidad y control de calidad del producto. Este enfoque práctico consolida la aplicabilidad del modelo y promueve su inserción gradual en el mercado energético nacional.

Por su parte, la generalización se evidencia en la posibilidad de replicar el modelo en distintos contextos territoriales con características similares. La metodología puede adaptarse tanto a entornos urbanos, donde abunda el aceite usado proveniente de restaurantes y mercados, como a zonas rurales, donde la industria alimentaria y hotelera genera volúmenes menores pero constantes. Además, las condiciones climáticas de Guatemala, similares a las de otros países tropicales, facilitan la transferencia tecnológica a nivel regional. La propuesta puede extenderse a países de Centroamérica que enfrenten retos energéticos y ambientales análogos, fortaleciendo la cooperación interinstitucional y el intercambio de conocimiento técnico.

Finalmente, la novedad y originalidad de la propuesta radican en la integración de un modelo completo que abarca la cadena de valor del biodiésel, desde la recolección del aceite hasta la validación de calidad y la proyección económica. A diferencia de otros estudios, esta investigación no se limita a la etapa reactiva de transesterificación, sino que incorpora la dimensión logística, ambiental y social como partes fundamentales de la viabilidad del sistema. Este enfoque interdisciplinario genera un aporte innovador a la literatura científica y proporciona un marco de referencia para futuras investigaciones y políticas públicas sobre biocombustibles en Guatemala y la región.

En síntesis, la evaluación integral de la propuesta confirma que el modelo de producción de biodiésel planteado cumple con los criterios de pertinencia, validez, factibilidad,

aplicabilidad, generalización y originalidad requeridos para su validación científica. La investigación trasciende el ámbito técnico para consolidarse como una herramienta transformadora con impacto económico, ambiental y social, capaz de contribuir a la transición energética nacional y a la sostenibilidad del desarrollo territorial.

Condiciones de viabilidad de la propuesta de transformación.

Los tratamientos termoquímicos representan un conjunto de metodologías alternativas que buscan transformar biomasa, aceites y grasas en combustibles líquidos a través de procesos de alta temperatura y, en algunos casos, presión. Estas tecnologías incluyen el pirólisis, la gasificación y la licuefacción hidrotérmica, siendo la pirólisis la más estudiada para la obtención de biocombustibles líquidos con propiedades similares al diésel convencional (Ballesteros, 2020). A diferencia de la transesterificación clásica, los tratamientos termoquímicos permiten utilizar materias primas diversas, incluidas fracciones de biomasa lignocelulósica y residuos agroindustriales, lo que amplía la base de recursos aprovechables.

En el contexto de la producción de biodiésel, los tratamientos termoquímicos ofrecen la posibilidad de transformar aceites y grasas de baja calidad o residuos orgánicos en combustibles líquidos con menor viscosidad y mayor estabilidad de combustión. Esto constituye una ventaja significativa para países en desarrollo como Guatemala, donde existe abundancia de biomasa y residuos agroindustriales, pero donde los aceites refinados de alta calidad representan un costo elevado. Sin embargo, estas metodologías requieren de inversiones iniciales altas y un soporte tecnológico considerable, lo que plantea un reto importante para su adopción a gran escala en países con limitada infraestructura industrial.

La economía circular aplicada a los procesos termoquímicos busca maximizar el valor de los recursos a lo largo del ciclo de vida, reduciendo residuos y mejorando la eficiencia energética. En el biodiésel, esto implica utilizar subproductos como la glicerina y el biocarbón, así como reciclar reactivos como el metanol o etanol, reduciendo así la

dependencia de nuevas materias primas (Pisarello, 2018). De esta manera, los procesos termoquímicos producen combustible y generan materiales útiles para otras industrias.

En Guatemala, la integración de un modelo de economía circular en la producción de biodiésel podría generar beneficios significativos, ya que aprovecharía residuos agroindustriales abundantes, como los del azúcar, palma y café, y reduciría pasivos ambientales. A nivel internacional, esta visión se ha consolidado en proyectos donde la valorización de residuos energéticos se convierte en parte central de la competitividad del biocombustible. Implementar esta perspectiva fortalecería la viabilidad económica del biodiésel y su legitimidad como solución sostenible en la agenda climática nacional.

La transición hacia un modelo energético más sostenible exige la implementación de soluciones que integren la producción de biodiésel en un marco de innovación tecnológica, gobernanza ambiental y economía circular. Los incentivos gubernamentales y privados desempeñan un papel determinante, ya que permiten superar las barreras financieras, técnicas y sociales que limitan el desarrollo de esta industria.

Asimismo, la adopción de principios de economía circular y la incorporación de experiencias internacionales ofrecen aprendizajes clave que pueden ser adaptados a la realidad guatemalteca. Resulta esencial evaluar la huella ambiental de la producción de biodiésel, con el fin de garantizar que su adopción contribuya efectivamente a la mitigación del cambio climático y no genere presiones adicionales sobre los recursos hídricos o energéticos.

Incentivos gubernamentales.

El papel del Estado es crucial para establecer condiciones que permitan la consolidación de una industria de biodiésel sólida y competitiva. Los incentivos gubernamentales pueden incluir mandatos de mezcla obligatoria con diésel fósil, como ocurre en países de la región donde se ha establecido un mínimo de 5 % a 10 % de biodiésel en combustibles comerciales (Brasil, Argentina), generando demanda estable y previsibilidad para los productores (IDB, 2023). Asimismo, la exoneración de impuestos a la importación de

maquinaria o la reducción de gravámenes al biodiésel representan medidas que reducen los costos iniciales de inversión. Estos incentivos se complementan con subsidios y líneas de crédito blandas que pueden ser canalizadas a través de bancos de desarrollo o instituciones multilaterales, como el Banco Centroamericano de Integración Económica.

Otro eje de acción gubernamental es la promoción de la investigación y el desarrollo (I+D). La asignación de fondos para estudios sobre nuevas metodologías de producción—incluyendo catalizadores heterogéneos, transesterificación asistida o cultivos de microalgas— es fundamental para incrementar la competitividad del biodiésel frente a los combustibles fósiles. Además, la creación de marcos regulatorios claros y estables, en concordancia con compromisos internacionales como el Acuerdo de París, brinda certidumbre jurídica a inversionistas y productores. En el caso de Guatemala, esta medida sería especialmente relevante dado que, a diferencia del etanol, el biodiésel carece de regulación específica, lo cual limita su incorporación en la matriz energética nacional (MARN, 2022).

Incentivos del sector privado.

El sector privado desempeña un rol complementario y estratégico en el impulso de la industria del biodiésel. Una de las principales acciones consiste en el establecimiento de alianzas público-privadas para desarrollar proyectos piloto y plantas de demostración, reduciendo el riesgo percibido por los inversionistas individuales. Asimismo, las empresas pueden participar en programas de certificación ambiental y obtener sellos de sostenibilidad reconocidos internacionalmente, lo que no solo fortalece su reputación, sino que abre acceso a mercados internacionales más exigentes (Santos, 2022).

Otro incentivo relevante consiste en los acuerdos de compra a largo plazo, donde grandes consumidores de diésel, como compañías de transporte o flotas municipales, aseguran la adquisición de biodiésel por varios años. Esto garantiza estabilidad de ingresos a los productores y contribuye a reducir el riesgo financiero.

Finalmente, el sector privado puede fomentar el desarrollo de cadenas de suministro locales, organizando sistemas de recolección de aceites usados de cocina en restaurantes, hoteles y empresas de alimentos, transformando un residuo en insumo productivo. Para Guatemala, estas acciones tendrían un doble beneficio: generar empleo en áreas rurales y urbanas, y reducir la contaminación ambiental derivada de la disposición inadecuada de aceites residuales.

Economía circular en la implementación de biodiésel.

La producción de biodiésel encaja de manera natural en el marco de la economía circular, al aprovechar subproductos y residuos que de otro modo se convertirían en pasivos ambientales. La utilización de aceites usados de cocina, grasas animales y residuos agroindustriales como materia prima permite reducir la presión sobre cultivos destinados a la alimentación y disminuir la generación de desechos. A su vez, el reciclaje y la reutilización de productos químicos como el metanol y la valorización de la glicerina como insumo para la industria cosmética o farmacéutica son ejemplos claros de cómo cerrar ciclos de producción (Pisarello, 2018).

En Guatemala, la implementación de principios de economía circular en la industria del biodiésel contribuiría a mejorar la gestión de residuos, especialmente en áreas urbanas donde los aceites usados se vierten a sistemas de alcantarillado, ocasionando daños en la infraestructura hidráulica y contaminación del agua. Además, la incorporación de energías renovables —como solar o eólica— en los procesos de producción y el aprovechamiento del calor residual fortalecerían aún más la sostenibilidad del sistema (Sandoval et al., 2017). Así, la producción de biodiésel se convierte en una alternativa energética y en un modelo de producción responsable que promueve eficiencia y reducción del impacto ambiental.

El análisis de experiencias internacionales permite comprender cómo diferentes países han enfrentado los retos asociados a la producción de biodiésel. En México, por ejemplo, se han desarrollado proyectos de biodiésel a partir de aceite de cocina residual en universidades y campus industriales, con resultados alentadores en términos de reducción de emisiones y

aprovechamiento de residuos (SDSN México, 2023). Estos proyectos piloto no solo buscan suplir la demanda interna de combustibles en instituciones educativas, sino que también se convierten en referentes nacionales de movilidad sustentable y economía circular.

En otros países, como Brasil y Argentina, el establecimiento de mandatos obligatorios de mezcla de biodiésel ha demostrado ser una estrategia eficaz para consolidar la industria. Por su parte, la Unión Europea ha promovido esquemas de certificación y objetivos de reducción de gases de efecto invernadero, lo que ha impulsado la innovación tecnológica y el desarrollo de biocombustibles avanzados. Para Guatemala, estas experiencias ofrecen lecciones valiosas: la necesidad de regulación específica, la importancia de proyectos demostrativos y el potencial de colaboración entre el sector académico, privado y gubernamental para replicar modelos exitosos a escala local.

Huella ambiental de la producción de biodiésel.

El análisis de la huella ambiental es indispensable para validar el carácter sostenible de la producción de biodiésel. La literatura señala que las emisiones asociadas a su ciclo de vida oscilan entre 39.6 y 123 kg de CO₂ equivalente por GJ de energía, lo que representa una reducción de hasta 48 % en comparación con el diésel fósil (Pérez et al., 2022; Achten et al., 2007). Asimismo, se ha demostrado que el uso de biodiésel disminuye en un 43 % el consumo de energía fósil, confirmando su potencial como alternativa más limpia y eficiente en el sector transporte. Este beneficio ambiental se traduce en costos evitados para el país al reducir el impacto del cambio climático, la dependencia energética y los efectos negativos en la salud pública asociados a la contaminación atmosférica. La producción de biodiésel también genera impactos que deben ser gestionados, principalmente los vinculados a la huella hídrica y al uso del suelo.

El aumento de la demanda de biocombustibles ejerce presión sobre el recurso hídrico. Se estima que esta presión se ha multiplicado por diez en los últimos 20 años, pasando de 0.5 % del agua azul disponible en 2005 a 5.5 % en 2023 (Gerbens-Leenes, 2012). Para evitar costos adicionales por agotamiento de recursos naturales, resulta prioritario implementar

prácticas agrícolas sostenibles con técnicas de riego más eficientes y uso de materias primas no convencionales como aceites residuales o microalgas.

La evaluación de la huella ambiental también debe incorporar dimensiones como la biodiversidad, el uso del suelo y la generación de residuos secundarios.

En Guatemala, la alta presión sobre los recursos naturales es determinante para asegurar que la producción de biodiésel no sea una nueva fuente de degradación ambiental. El utilizar aceite usado como insumo principal reduce costos ambientales y económicos asociados a la disposición inadecuada de este residuo, evitan la contaminación de cuerpos de agua y disminuye los gastos de tratamiento en sistemas de saneamiento. La transición hacia el biodiésel se consolida como proceso técnico, económicamente viable y ambientalmente responsable.

Viabilidad económica.

El análisis económico evidencia que la competitividad del biodiésel frente al diésel fósil depende de los costos de producción y de la estructura impositiva vigente. Actualmente, el diésel asume un IVA del 12 % y un Impuesto Específico a la Distribución de Combustibles (IDP) de Q1.30 por galón, lo que determina un precio final promedio de Q26.28 por galón en modalidad de autoservicio (Emisoras Unidas, 2022). En esta estructura, el precio sin impuestos se sitúa en Q22.18, al que se suma el IDP y posteriormente el IVA, hasta alcanzar el precio final de venta. Para que el biodiésel sea competitivo, se proyecta un precio igual o inferior al del diésel fósil, como incentivo para su adopción.

Desde la perspectiva de reducción de costos, el biodiésel evita gastos asociados a la importación de combustibles fósiles, disminuye la salida de divisas y mejora la balanza comercial. Asimismo, al aprovechar residuos como el aceite de cocina usado, se reducen costos de disposición final, evitando problemas de contaminación que podrían implicar elevados gastos de mitigación a futuro. A nivel de inversión, la utilización de infraestructura existente para distribuir combustibles permite disminuir los costos iniciales

de implementación, mientras que el carácter renovable del insumo asegura estabilidad en el precio a mediano plazo, reduciendo la exposición a la volatilidad internacional del petróleo.

La implementación del modelo propuesto generará beneficios que trascienden lo económico, como el contribuir a diversificar la matriz energética del país, reducir la dependencia de combustibles fósiles importados, protección y seguridad energética, y resiliencia frente a fluctuaciones externas. Asimismo, permitirá la sustitución parcial del diésel fósil disminuyendo emisiones de CO₂, NO_x y material particulado, lo que impacta directamente en la calidad del aire urbano. Estos efectos, se traducen en mejor salud pública y menores costos en el sistema de salud.

Por otro lado, el proyecto aporta beneficios sociales al generar empleo en la recolección de aceite usado, el transporte, la operación de plantas de biodiésel y la producción agrícola vinculada a cultivos oleaginosos. También fomentará la capacitación técnica, la transferencia de conocimiento y la inclusión de pequeños recolectores en nuevas cadenas de valor. En términos ambientales, el uso de materias primas residuales disminuye la huella ecológica, al transformar desechos en energía limpia y reducir la presión sobre los ecosistemas. Con ello, el biodiésel se configura como una alternativa energética viable.

Propuesta de cambios en la política pública.

Guatemala ha mostrado interés en cumplir el Acuerdo de París y actualizó su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) en 2022, comprometiéndose a reducir entre 11% y 22% de sus emisiones totales para 2030 (UNDP, 2022). Esa meta aborda el sector transporte, responsable de cerca del 60 % del consumo de diésel fósil en el país (MEM, 2024). En consecuencia, se recomienda que la política energética reconozca al biodiésel como ente de descarbonización intermedio. Integrar dicho combustible renovable a la NDC permitiría acceder a financiamiento climático, lograr apoyos técnicos multilaterales y alcanzar coherencia entre los compromisos internacionales y la acción doméstica.

El primer cambio normativo propuesto consiste en establecer un mandato de mezcla escalonado que inicie con B5 en 2027 y alcance B10 en 2030. Experiencias regionales, como la de Brasil, demuestran que un cronograma progresivo reduce las presiones logísticas iniciales y ofrece señales claras de mercado (S&P Global, 2024). Al fijar volúmenes obligatorios de compra se asegura la demanda inicial indispensable para atraer inversión privada (EPA, 2023). El mandato debería complementarse con un sistema de certificados transferibles de cumplimiento, evitando distorsiones de precios y fomentando la competencia entre productores.

Debido a que el Decreto-Ley 17-85 regula únicamente el alcohol carburante, se sugiere implementar una Ley General de Biocombustibles que incorpore al biodiésel y defina su mezcla con diésel fósil. El nuevo marco legal permitiría crear un lazo fiscal; los estándares de calidad y los requisitos de licencia en un solo instrumento jurídico. Además, resolvería el vacío normativo señalado en la evaluación de la política vigente, donde la regulación para biodiésel depende de resoluciones administrativas dispersas (Acuerdo Gub. 159-2023). Una ley integral generaría certeza jurídica y alentaría inversiones de largo plazo.

La política fiscal debe ofrecer incentivos selectivos para acelerar la adopción del biodiésel sin comprometer las finanzas públicas. Se recomienda eximir temporalmente del Impuesto Específico a la Distribución de Combustibles (IDP) al componente renovable de las mezclas B5-B10, manteniendo el IVA para no erosionar la base tributaria (Congreso de Guatemala, 1992). Adicionalmente, podría otorgarse depreciación acelerada de activos y crédito fiscal por cada litro de biodiésel certificado, siguiendo la lógica del Decreto 52-2003 para energías renovables. Estas medidas reducirían la brecha de precios frente al diésel fósil y mejorarían la rentabilidad de los productores emergentes.

Es totalmente necesario actualizar el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43 a su versión 2019 y adoptar de inmediato las enmiendas ASTM D6751-23 sobre baja concentración de metales (RTCA, 2019). La puesta en marcha de especificaciones facilitará el comercio intrarregional y garantizará la compatibilidad con motores modernos. El Ministerio de Energía y Minas podría, y se recomienda, emitir una norma

complementaria que establezca laboratorios acreditados y un régimen de auditoría anual. De esa forma, el consumidor obtendrá un producto confiable y se evitarán fallos mecánicos atribuidos a combustibles fuera de especificación.

Para asegurar la disponibilidad de materia prima, se plantea crear un programa nacional de recolección de aceite de cocina usado (ACU) con metas cuantificadas por municipio. Los gobiernos locales podrían conceder incentivos, bonificaciones en la tasa de basura o descuentos en licencias comerciales, a establecimientos que entreguen su ACU a recolectores autorizados. La experiencia de ciudades como São Paulo indica que estos esquemas reducen costos de disposición y suministran insumos a la cadena de biodiésel (Goldemberg, 2008). En paralelo, el MARN puede emitir reglamentos que prohíban verter aceites residuales en redes de alcantarillado, generando un doble beneficio ambiental.

Dado el protagonismo del aceite de palma en Guatemala, la política pública deberá fomentar certificaciones de sostenibilidad y programas de agricultura de pequeña escala. Así mismo, se debe contar con fondos rotatorios, financiados con parte de la recaudación del IDP sobre diésel fósil, para subvencionar prácticas agroecológicas y mejorar la trazabilidad. Ello mitigaría riesgos reputacionales asociados a la expansión de monocultivos y alinearía la cadena con exigencias del mercado europeo, muy estricto en deforestación (Vidal, 2024). Asimismo, se diversificará la oferta incorporando cultivos de ciclo corto y residuos agroindustriales.

Se recomienda implementar un fondo competitivo de investigación y desarrollo gestionado por CONCYT y financiado mediante regalías de hidrocarburos. El fondo priorizará proyectos sobre catalizadores alcalinos reutilizables, rutas con metanol sostenible y optimización de coproductos (glicerina refinada). Investigaciones aplicadas reducirán costos de producción y mejorarán la huella de carbono, cumpliendo con los umbrales de reducción de 50 % exigidos por los mercados internacionales (IEA, 2021).

El ecosistema de innovación local –*universidades, centros tecnológicos y pymes*– se beneficiaría de convocatorias anuales orientadas a resultados transferibles a la industria.

Para financiar la expansión del sector se podría emitir *bonos verdes* soberanos y municipales destinados a infraestructura de almacenamiento y terminales de mezcla. Estos instrumentos podrían acogerse a estándares internacionales sostenibles y atraer capital de inversionistas, siguiendo la experiencia de Paraguay y Chile quienes con *bonos temáticos* reducen el costo de la deuda y amplían la base de compradores institucionales (IDB, 2023). La priorización de proyectos de biocombustibles dinamizaría el mercado de capitales.

La política de infraestructura podría asignar zonas francas con exención arancelaria a insumos como metanol anhidro, cuyo arancel actual varía entre 0 % y 5 % según la partida CACM (ITA, 2023). Así se reducirían los costos de transacción y se facilitaría la integración con cadenas globales de suministro. Asimismo, los puertos podrían ofrecer tarifas preferenciales para exportaciones de biodiésel B100 hacia Centroamérica y el Caribe.

Se sugiere crear un sistema nacional de contabilidad de carbono que reconozca créditos por tonelada de CO₂ evitada con biodiésel certificado con mecanismos basados en metodologías ISO 14067 para que empresas del transporte compensen su huella dentro de un mercado doméstico, como se realiza en Colombia en donde los créditos de biocombustibles dinamizan la demanda y generan ingresos a los productores (UNFCCC, 2022).

Para evitar la doble contabilidad, el Ministerio de Ambiente debe registrar proyectos en la NDC y supervisar inventarios de emisiones. La política debe incluir campañas de sensibilización dirigidas a transportistas, municipalidades y consumidores sobre las ventajas técnicas del biodiésel B5-B10. Estudios de percepción muestran que el desconocimiento de sus beneficios genera resistencia a la adopción inicial (Martínez, 2020).

Programas de capacitación financiados por el fondo de I+D pueden demostrar la compatibilidad del biodiésel con la flota existente y su efecto positivo en la vida útil de los motores. Paralelamente, los etiquetados visibles en estaciones de servicio incrementarán la

confianza del usuario final. Se deberá instalar una mesa público-privada e interministerial integrada por MEM, MARN, SAT, MAGA y representantes del sector productivo para revisar trimestralmente avances, precios de referencia y obstáculos normativos tal como opera Brasil con un comité similar (CNPE) que ajusta las metas de mezcla atendiendo a disponibilidad de oferta y estabilidad de precios (Fastmarkets, 2023).

A nivel regional, Guatemala podría impulsar la regulación de aranceles y estándares con el SIECA para facilitar el comercio centroamericano de biodiésel elaborado con metanol. El RTCA actualizado y los cupos CAFTA-DR ya otorgan ventajas arancelarias para ciertos insumos agrícolas (USDA-FAS, 2023). Al abrir el mercado común de biocombustibles, se incrementaría la escala de producción y se reducirían los costos unitarios. Asimismo, la integración permitiría negociar insumos a mejores precios en el mercado internacional.

Se propone fortalecer la capacidad de inspección y sanción dotando al MEM de recursos humanos y tecnológicos para el monitoreo en línea de plantas y centros de mezcla. Sistemas SCADA conectados al ente regulador posibilitan controles continuos de volumen y calidad, replicando la experiencia del EPA con los RINs (AFDC, 2023). Las sanciones deberán ser proporcionales e incluir suspensiones temporales de licencia y multas crecientes. La certeza en aplicar la ley disuade el fraude y garantiza la integridad ambiental.

Alcance y limitaciones.

El alcance de esta investigación es que establece bases técnicas y metodológicas para producir biodiésel a partir de aceites vírgenes y usados, demostrando su factibilidad en condiciones de laboratorio y proyectando su escalabilidad a nivel piloto e industrial. Además, se identifican beneficios económicos (reducción de costos de importación, menor volatilidad en precios), sociales (empleo, inclusión, bienestar) y ambientales (reducción de GEI, menor contaminación del agua y del aire). Las limitaciones del estudio están relacionadas con la ausencia de un marco normativo específico que restringe su integración inmediata al mercado. También se requiere un análisis profundo del ciclo de vida para cuantificar costos evitados y beneficios ambientales netos. Estas limitaciones no

disminuyen la relevancia del estudio, sino que abren oportunidades de investigación futura orientadas a optimización de procesos, incentivos fiscales y gobernanza energética.

En conjunto, los aportes obtenidos en este capítulo permiten consolidar la propuesta de transformación formulada en la investigación, al integrar los fundamentos teóricos revisados, la evidencia experimental del proceso de producción de biodiésel y los datos empíricos obtenidos mediante los instrumentos aplicados. Esta triangulación metodológica respalda la estructura del modelo planteado y demuestra su pertinencia técnica, económica y ambiental para el contexto guatemalteco. A partir de esta valoración, la propuesta adquiere solidez conceptual y operativa, evidenciando su capacidad para contribuir a la diversificación energética y a la reducción de emisiones en el país, así como para orientar futuras acciones de política pública y de desarrollo sostenible.

CONCLUSIONES

- a. La producción de biodiésel mediante transesterificación es técnicamente viable en Guatemala si se utiliza aceite de cocina (aceite de palma). Ello tiene asidero técnico-científico y respaldo teórico, en la medida que las formulaciones analizadas permiten optimizar el uso de reactivos y lograr rendimientos adecuados en la producción del biocombustible. Ello incluye un análisis de costos, proyección de ingresos crecientes y márgenes de utilidad positivos.
- b. La investigación permite inferir que Guatemala debe identificar oportunidades de crecimiento en sectores clave como el transporte público, la industria agropecuaria y empresas con políticas de sostenibilidad, promoviendo la diversificación de la matriz energética. En este propósito, este estudio ofrece evidencia de su contribución en la reducción de emisiones contaminantes, mejora de la calidad del aire y cumplimiento de compromisos ambientales globales.
- c. La alternativa viable de producir biodiésel de alto valor agregado a partir de aceites de cocina incluye la obtención de subproductos como glicerina, jabones y ácidos grasos, lo que permitiría maximizar la rentabilidad del proyecto, reducir desperdicios y fomentar un modelo de economía circular. Se estima que el margen de utilidad por galón vendido aumentará en 2% , condicionado al abastecimiento de aceite usado de cocina y aceite de palma para asegurar la capacidad de producción proyectada de 50,000 L/día. Así, la propuesta muestra que adoptar un mandato de mezcla progresivo (B5 a B10) constituye entrada efectiva al mercado de biodiésel, con demanda asegurada y alineada a la matriz energética y compromisos de la NDC.
- d. La producción de biodiésel se alinea con las normativas internacionales ASTM D6751 y EN 14214, garantizando un producto de calidad que cumple con los requisitos internacionales, genera beneficios fiscales, exención parcial del IDP, depreciación acelerada de activos y créditos por litro certificado, medidas que deben

implementarse sin comprometer el fisco si se fondean con recaudación sobre combustibles convencionales.

- e. La revisión del marco teórico permitió comprender los fundamentos conceptuales de la transición energética, la economía circular y el aprovechamiento sostenible de residuos, elementos que orientaron la delimitación del problema y la formulación de los objetivos. La contrastación entre estos aportes teóricos y los resultados obtenidos en laboratorio y en la recolección de información empírica confirma que la producción de biodiésel a partir de aceites usados responde directamente a las necesidades identificadas en el país: alta dependencia del diésel importado, ausencia de procesos productivos locales y limitaciones ambientales derivadas del manejo inadecuado de residuos. Esta integración teórico-práctica valida la pertinencia del modelo propuesto.
- f. La triangulación entre los aportes del marco teórico, la evidencia experimental y los datos económicos y ambientales obtenidos en la investigación permite concluir que el modelo alternativo de producción de biodiésel propuesto es coherente, viable y metodológicamente fundamentado. La estructura del modelo —basado en acopio, transformación y comercialización descentralizada— demuestra ser factible técnica y económicamente, y presenta beneficios sociales y ambientales consistentes con los principios teóricos estudiados. En consecuencia, la investigación confirma la validez de la propuesta como una estrategia de transformación energética para Guatemala.
- g.

RECOMENDACIONES

- a. Se recomienda colocar tanques recolectores en establecimientos como colegios, universidades o dependencias del estado, para que la o las cafeterías propias desechen sus aceites, pero además los estudiantes y trabajadores tengan un lugar para llevar el aceite de fritura y no lo viertan en sus casas. Lo mismo para edificios, que reduciría considerablemente el precio asociado al aceite usado, lo que permitiría que la ganancia al galón de biodiésel fuera más elevada. Junto a ello, el Ministerio de Energía y Minas, debe realizar talleres y mesas de diálogo con actores clave para la implementación de la utilización de biodiésel en Guatemala.
- b. La seguridad de suministro de materia prima debe fortalecerse mediante un programa nacional de recolección de aceite de cocina usado y el fomento de certificaciones sostenibles de palma. Este enfoque dual no solo asegura insumos competitivos, sino que también convierte un residuo urbano y agrícola en recurso, reduciendo impactos ambientales y sociales asociados.
- h. Se sugiere la creación de un fondo competitivo de investigación y desarrollo de un mercado doméstico de créditos de carbono, desde la innovación local y financiamiento climático. Con gobernanza interministerial y fiscalización robusta, Guatemala podría atraer capital verde, generar empleo rural y cumplir metas de reducción de emisiones sin dilatar la electrificación total del transporte.
- i. Es importante consolidar una Ley General de Biocombustibles que unifique normas de calidad, licenciamiento y fiscalidad hoy dispersas; dicha ley brindaría certeza jurídica, reduciría barreras administrativas y permitiría incorporar incentivos fiscales coherentes con la estrategia de descarbonización nacional. Sin un marco integral, las iniciativas aisladas carecerán de permanencia y escala.

BIBLIOGRAFÍA

Abbaszaadeh, A., Ghobadian, B., Omidkhah, M., & Najafi, G. (2022). *Biodiesel production technologies and their applications: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112–125.

Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (2023). Renewable Fuel Standard Program. <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program>

Álvarez, C. (2009). *Biocombustibles: Desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio de la UNAM. <https://www.economia.unam.mx/publicaciones/econinforma/pdfs/359/04carlosalvarez.pdf>

Alternative Fuels Data Center. (2023). *Renewable Identification Number (RIN) Tracking and Compliance*. U.S. Department of Energy. <https://afdc.energy.gov/laws/RIN.html>

ASTM D7467-20a. *Standard Specification for Diesel Fuel Oil, Biodiesel Blend (B6-B20)*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2015). ASTM D6751-15ce1 *Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. <http://dx.doi.org/10.1520/D6751-15CE01>

CEN. (2024). *EN 14214:2014 Productos petrolíferos líquidos. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diésel y equipos de calefacción. Requisitos y métodos de ensayo*. Comité Europeo de Normalización.

Banco Interamericano de Desarrollo. (2024). *Financiamiento verde en América Latina:*

Oportunidades para biocombustibles sostenibles. BID Energy Division.

Castillo, J. (2013). *Rediseño de la planta de producción de biodiésel de la Universidad del Valle de Guatemala para aumentar su capacidad de producción [Tesis de licenciatura]*. Universidad del Valle de Guatemala.
<https://repositorio.uvg.edu.gt/bitstream/handle/123456789/1225/TESIS%2013.10.14.pdf>

Castro, P., Coello, J., & Castillo, L. (2017). *Opción para la producción y uso de biodiésel en el Perú* (p. 40).

Congreso de la República de Guatemala. (1992). *Ley del Impuesto a la Distribución de Petróleo Crudo y Combustibles Derivados (Decreto 38-92)*. Diario de Centro América.

CEN. (2024). *EN 14214:2014 Productos petrolíferos líquidos. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME)*. Comité Europeo de Normalización. <https://www.en-standard.eu/en-14214-2014>.

Constitución Política de la República de Guatemala, promulgada en 1985. Decreto 17-85, *Ley de alcohol carburante*.
www.mem.gob.gt

Constitución Política de la República de Guatemala, promulgada en 1985. Decreto 68-86, *Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente*.
www.marn.gob.gt

Constitución Política de la República de Guatemala, promulgada en 2013. Decreto 7-2013, *Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero*.

- Constitución Política de la República de Guatemala, promulgada en 2022. Acuerdo gubernativo Decreto 159-2023, Ley de alcohol carburante.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. (2022). Registro de proyectos de reducción de emisiones de Centroamérica. UNFCCC.
- Crespo, V., Martínez, M., & Aracil, J. (2001). *Biodiésel: Una alternativa real al gasóleo mineral*. *Ingeniería Química*, 135-145.
- Crespo, R. (2023). *Innovaciones tecnológicas en procesos de purificación de biodiésel: aplicaciones de resinas adsorbentes*. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136–149.
- Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía). (2018). Parlamento Europeo.
<https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/>
- Fastmarkets. (2023). Brazil raises biodiesel mandate from B10 to B12.
<https://www.fastmarkets.com>
- Fangrui, M., & Milford, H. (1999). *Biodiesel production: A review*. *Bioresource Technology*, 70(1), 1-15.
- García, M. (2010). *Los métodos de investigación*. Universidad Complutense de Madrid.
<https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-135806/12%20metodolog%c3%ada-1-garcia-y-martinez.pdf>
- Goldemberg, J. (2008). The Brazilian biofuels industry. *Energy Policy*, 36(8), 2415-2420.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.028>
- Hernández, J., Zambrano, G., & Rossi, C. (2014). *Producción de biodiésel a escala de*

planta piloto utilizando catálisis ácida y básica. Revista de la Universidad del Valle de Guatemala, 28, 79-83.

www.uvg.edu.gt, revista 28

HFT Education. (s.f.). *Biodiesel Production Pilot Plant*. User Guide (RNE280).

Huber, G., Iborra, S., & Corma, A. (2006). *Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering*. *Chemical Reviews*, 106(9), 4044-4098.

Instituto de Investigación de las Naciones Unidas para el Desarrollo Social. (2024). Biofuel supply chains in Central America.

International Energy Agency. (2021). *Biofuels Policy Database*.

<https://www.iea.org/policies?category=transport-biofuels>

International Energy Agency (IEA). (2023). *Renewables 2023: Analysis and forecast to 2028*. OECD/IEA.

International Trade Administration. (2023). Guatemala – Import Tariffs. U.S. Department of Commerce. <https://www.trade.gov>

Izaza V., L. (2011). *La lógica y la importancia del diseño de investigación*. *Poiésis*, 22. <https://www.funlam.edu.co/revistas/index.php/poiesis/article/download/217/200>

Martínez, C. (2020, julio 2). Diseño de investigación, muestreo y métodos de recolección de datos. Escuela de Datos.

<https://escueladedatos.online/tutorial/disen-de-investigacion-muestreo-y-metodos-de-recoleccion-de-datos/>

Meher, L., Sagar, D., & Naik, S. (2006). *Technical aspects of biodiesel production by*

transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248-268.

Mesquida, F. (2024, septiembre 15). *El consumo mundial de biocombustibles aumentaría 8 % en 2021*. Infocampo.

<https://www.infocampo.com.ar/el-consumo-mundial-de-biocombustibles-aumentaria-8-en-2021/>

Ministerio de Energía y Minas. (2024). Estadísticas de consumo de combustibles líquidos en Guatemala 2020-2024. Dirección General de Energía.

Ministerio de Energía y Minas. (2024). Resolución DGE-1120-2024 que establece el porcentaje de mezcla de alcohol carburante.

Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2024). Informe nacional sobre avances en mitigación de GEI y transición energética 2024. Gobierno de Guatemala.

Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2024). Matriz energética nacional y proyecciones 2024–2030. Gobierno de Guatemala.

Muguirra, A. (s.f.). Diseño de investigación: Elementos y características. QuestionPro.
<https://www.questionpro.com/blog/es/disenio-de-investigacion/>

Oilword. (2021). España sigue dependiendo de biocombustibles insostenibles.

<https://www.nuevatribuna.es/articulo/sostenibilidad/espana-sigue-dependiendo-biocombustibles-insostenibles/20210725145937189754.html>

Outili, N., Kerras, H., Nekkab, C., Merouani, R., & Meniai, A. H. (2020). Biodiesel production optimization from waste cooking oil using green chemistry metrics. *Renewable Energy*, 145, 2575-2586.

Pacheco, F. (2016). *Reporte de inteligencia tecnológica: Biodiesel*. Instituto Mexicano del Petróleo.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2022). Actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Guatemala (NDC). UNDP.

Rick Da Tech. (2021). The 3-27 Conversion Test. Make Biodiesel.

S&P Global Commodity Insights. (2024). Brazil's biodiesel mandate to increase to 14 % in March 2024. <https://www.spglobal.com>

Santos, D. (2022, septiembre 14). Recolección de datos. HubSpot. <https://blog.hubspot.es/marketing/recoleccion-de-datos>

Saynes, V., Etcheves, J., Paz, F., & Alvarado, L. (2016). Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas agrícolas de México.

Solomons, N. W., Castellanos, E., Cifuentes, F., Maselli, S., Orozco, M., Pennington, P., Schuster, J., & Zambrano, G. (2017). Challenges and Opportunities for Food and Nutrition Security in the Americas. IANAS. https://www.ianas.org/docs/books/Challenges_Opportunities.html

Stratta, J. (2020). Biocombustibles: Los aceites vegetales como constituyentes principales del biodiésel.

Tobar, A. (2020). Atlas de los combustibles líquidos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Torres, R. (2019). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Torres, M. (2012). Métodos de recolección de datos para una investigación.

<http://148.202.167.116:8080/jspui/bitstream/123456789/2817/1/M%C3%A9todos%20de%20recolecci%C3%B3n%20de%20datos%20para%20una%20investigaci%C3%B3n.pdf>

Torroba, J., Álvarez, G., & Zambrano, G. (2024). Perspectivas de biocombustibles en América Latina: avances técnicos y políticos. *Energy Policy Journal*, 173, 113–129.

United States Department of Agriculture – Foreign Agricultural Service. (2023). Opportunities for U.S. Agricultural Products in Guatemala (GAIN Report GT2023-0012).

United Nations Development Programme (UNDP). (2023). Green jobs and circular economy opportunities in Central America. UNDP Regional Bureau for Latin America and the Caribbean.

Velásquez, T., Zambrano, G., et al. (2020). Biocombustibles y economía circular en países en vía de desarrollo: Transferencia tecnológica en Guatemala. INCAE.

Vidal, J. (2024, 15 de abril). Guatemala farmers losing their land to Europe’s demand for biofuels. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com>

Zambrano, G., Meléndez, E., & Lorenzo, A. (2021). Resultados de la evaluación técnica y ambiental del uso de etanol en la gasolina en Guatemala. *Revista Mesoamericana de Biodiversidad y Cambio Climático–Yu’am*, 5(1).

Zambrano, G., Rossi, C., Hernández, J., & Chico, L. (2015). Evaluación de la producción de biodiésel utilizando ultrasonido. *Revista de la Universidad del Valle de Guatemala*.
www.uvg.edu.gt, revista 26.

Zambrano, G., Rossi, C., & Hernández, A. (2014). Emisión de gases en vehículo

experimental diésel-biodiésel. Revista de la Universidad del Valle de Guatemala, 27, 64-67.

www.uvg.edu.gt, revista 27

Zambrano, G., Rossi, C., & Hernández, A. (2014). Estudio sobre el balance en el uso de tierra para alimento y el uso de tierra para biocombustibles. Revista de la Universidad del Valle de Guatemala, 27, 68-74.

www.uvg.edu.gt, revista 27

Anexo 1. ENCUESTA: Oportunidades del Biodiésel en Guatemala.

Objetivo: Recopilar información cualitativa y cuantitativa sobre la percepción, sostenibilidad y oportunidades del biodiésel en Guatemala.

Instrucciones: Marque con una “X” o complete las respuestas según corresponda.

1. Datos Generales del Encuestado

Edad: _____ años

Sexo: Masculino Femenino Otro

Nivel educativo: Primaria Secundaria Universitario Postgrado

Ocupación principal: _____

Departamento o municipio donde reside: _____

¿Trabaja en el sector energético o ambiental?: Sí No

Si respondió “Sí”, indique el nombre de la institución o empresa:

2. Conocimiento y Percepción sobre el Biodiésel

¿Has escuchado hablar del biodiésel? Sí No

¿Cuánto considera que conoce sobre el biodiésel? (1 = Nada, 5 = Mucho): 1 2 3 4 5

¿Cuál cree que es el principal beneficio del biodiésel? Ambiental Económico Energético Social No sabe

¿Qué tan dispuesto estaría a utilizar biodiésel en su vehículo o empresa? Muy dispuesto Dispuesto Indiferente Poco dispuesto No lo usaría

¿Considera que el biodiésel puede sustituir parcialmente al diésel fósil en Guatemala? Sí No Tal vez

3. Sostenibilidad Ambiental

¿Cree que el biodiésel contribuye a reducir la contaminación ambiental? Totalmente de acuerdo De acuerdo Neutral En desacuerdo Totalmente en desacuerdo

¿Cree que la producción de biodiésel puede aprovechar residuos (como aceite usado o grasas)? Sí No No lo sé

Mencione brevemente qué riesgos ambientales considera que podrían presentarse en su producción: _____

¿Debería el gobierno incentivar el uso de biocombustibles por razones ambientales? Sí No No sabe

4. Oportunidades de Desarrollo Económico y Social

¿Cree que el biodiésel puede generar empleo en Guatemala? Sí No No sabe

¿En qué sectores considera que podría tener mayor impacto económico? Transporte público Industria agrícola Empresas privadas Gobiernos locales Otro:

¿Qué tan importante considera impulsar proyectos de biodiésel para el desarrollo local? (1 = Nada, 5 = Muy importante): 1 2 3 4 5

¿Qué tipo de apoyo considera más importante para fomentar esta industria?
 Financiamiento público Capacitación técnica Incentivos fiscales Campañas de sensibilización Otro: _____

5. Actores Clave y Participación

¿Quién considera que debería liderar el desarrollo del biodiésel en Guatemala? Gobierno central Sector privado Universidades Municipios Cooperativas o asociaciones

¿Ha participado o conoce algún proyecto de producción o uso de biodiésel en el país? Sí No

Si respondió “Sí”, indique brevemente cuál: _____

¿Qué instituciones cree que deberían involucrarse más activamente?

6. Opinión General

¿Qué barreras considera que impiden el desarrollo del biodiésel en Guatemala?

¿Qué oportunidades ve a futuro para su implementación sostenible?

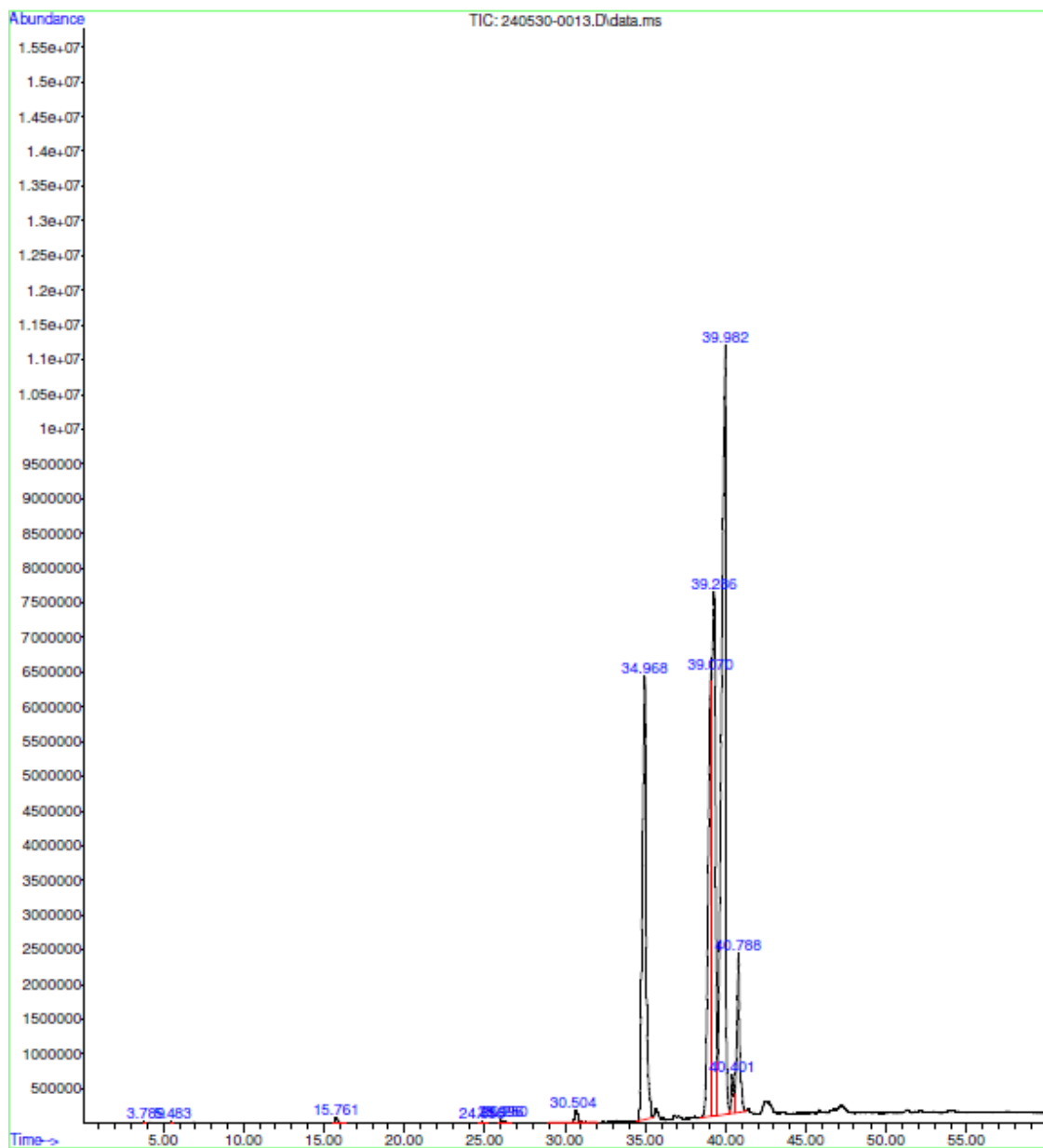
¿Le gustaría recibir información o participar en proyectos de biodiésel? Sí No

Si respondió “Sí”, indique su correo electrónico: _____

7. Comentarios adicionales

Anexo 2. *Cromatograma de gases masa para ésteres de ácidos graso.*

File :C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\240530-0013.D
Operator : Adem
Acquired : 31 May 2024 4:53 using AcqMethod ACIDOS GRASOS DEWAX SCAN BIO.M
Instrument : GC-MSD
Sample Name: BIODIESEL PURO
Misc Info : IQ
Vial Number: 1



Anexo 3. Áreas de cromatograma de gases masa (parte 1).

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\
 Data File : 240530-0013.D
 Title :
 Acq On : 31 May 2024 4:53
 Operator : AdeM
 Sample : BIODIESEL PURO
 Misc : IQ
 ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - autoint1.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
1	3.790	0.01	C:\Database\NIST05a.L Pentane	695	000109-66-0	90
			Pentane	693	000109-66-0	86
			Pentane	691	000109-66-0	78
2	5.482	0.01	C:\Database\NIST05a.L Ethyl alcohol	94	000064-17-5	90
			Ethyl alcohol	95	000064-17-5	86
			Ethyl alcohol	93	000064-17-5	86
3	15.762	0.17	C:\Database\NIST05a.L Octanoic acid, methyl ester	28923	000111-11-5	83
			Octanoic acid, methyl ester	28924	000111-11-5	83
			Nonanoic acid, methyl ester	37542	001731-84-6	72
4	24.859	0.02	C:\Database\NIST05a.L 2,4-Decadienal, (E,E)-	24070	025152-84-5	72
			2,4-Decadienal	24041	002363-88-4	72
			2,4-Decadienal	24037	002363-88-4	64
5	25.996	0.06	C:\Database\NIST05a.L 2,4-Decadienal, (E,E)-	24070	025152-84-5	94
			2,4-Decadienal, (E,E)-	24067	025152-84-5	91
			2,4-Decadienal	24041	002363-88-4	91
6	26.251	0.07	C:\Database\NIST05a.L Dodecanoic acid, methyl ester	67169	000111-82-0	96
			Dodecanoic acid, methyl ester	67167	000111-82-0	95
			Dodecanoic acid, methyl ester	67168	000111-82-0	91
7	30.504	0.46	C:\Database\NIST05a.L 6-Propyltetrahydro-2H-thiopyran-2-one	28832	201991-53-9	38
			Octaethylene glycol monododecyl ether	186450	003055-98-9	35
			Butanoic acid, 4-ethoxy-, methyl ester	21135	029006-04-0	33
8	34.966	19.28	C:\Database\NIST05a.L Hexadecanoic acid, methyl ester	105639	000112-39-0	99
			Hexadecanoic acid, methyl ester	105644	000112-39-0	96
			Pentadecanoic acid, 14-methyl-, methyl ester	105662	005129-60-2	96
9	39.069	15.62	C:\Database\NIST05a.L 8-Octadecenoic acid, methyl ester	122297	002345-29-1	99
			12-Octadecenoic acid, methyl ester	122311	056554-46-2	99
			9-Octadecenoic acid, methyl ester	122299	002462-84-2	98
10	39.287	21.70	C:\Database\NIST05a.L 9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-	122326	001937-62-8	99
			8-Octadecenoic acid, methyl ester	122297	002345-29-1	99
			11-Octadecenoic acid, methyl ester	122316	052380-33-3	99
11	39.983	36.32	C:\Database\NIST05a.L 8,11-Octadecadienoic acid, methyl ester	121095	056599-58-7	99

ACIDOS GRAS...X SCAN BIO.M Fri May 31 13:55:05 2024

Anexo 4. Áreas de cromatograma de gases masa (parte 2).

LIQA Library Search Report

Data Path : C:\msdchem\1\DATA\SERVICIO\
 Data File : 240530-0013.D
 Title :
 Acq On : 31 May 2024 4:53
 Operator : AdeM
 Sample : BIODIESEL PURO
 Misc : IQ
 ALS Vial : 1 Sample Multiplier: 1

Search Libraries: C:\Database\NIST05a.L Minimum Quality: 0

Unknown Spectrum: Apex
 Integration Events: ChemStation Integrator - autoint1.e

Pk#	RT	Area%	Library/ID	Ref#	CAS#	Qual
			ester			
			9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-, methyl ester	121106	000112-63-0	99
			10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester	121100	056554-62-2	99
12	40.402	1.00	C:\Database\NIST05a.L 9,12-Octadecadienoic acid, ethyl ester	129833	007619-08-1	99
			Linoleic acid ethyl ester	129812	000544-35-4	99
			Linoleic acid ethyl ester	129811	000544-35-4	99
13	40.789	5.28	C:\Database\NIST05a.L 9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	119877	000301-00-8	96
			9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	119876	000301-00-8	91
			9,12,15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z,Z,Z)-	119875	000301-00-8	90

Anexo 5. Resultados de reacciones de biodiésel.

	Aceite (L)	NaOH (g)	Biodiésel (L)	Glicerina (L)	Metanol (L)	Aceite (L)	Tiempo (h)
1	26	200	25	6.4	0.6	0	4
2	26	200	25.2	6.4	0.4	0	4
3	26	200	25.2	6.4	0.4	0	4
4	26	200	25.5	6.4	0.1	0	4

5	26	200	25.1	6.4	0.5	0	4
6	26	200	25.1	6.4	0.5	0	4
7	26	200	25.2	6.4	0.4	0	4
8	26	200	25.5	6.4	0.1	0	4
1	26	200	25.2	6.4	0.4	0	3
2	26	200	25.5	6.4	0.1	0	3
3	26	200	25.1	6.4	0.5	0	3
4	26	200	25.5	6.4	0.1	0	3
5	26	200	25.1	6.4	0.5	0	3
6	26	200	25.2	6.4	0.4	0	3
7	26	200	25.2	6.4	0.4	0	3
8	26	200	25.5	6.4	0.1	0	3
1	26	200	18	5	1	8.8	2
2	26	200	17	5	1	9.8	2
3	26	200	18	5	1	8.8	2
4	26	200	18	5	1	8.8	2

5	26	200	17	5	1	9.8	2
6	26	200	18	5	1	8.8	2
7	26	200	18	5	1	8.8	2
8	26	200	18	5	1	8.8	2
1	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
2	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
3	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
4	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
5	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
6	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
7	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
8	26	150	23	4.8	1.3	2.9	4
1	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
2	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
3	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
4	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3

5	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
6	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
7	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
8	26	150	21.6	5.1	1.4	3.9	3
1	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
2	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
3	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
4	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
5	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
6	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
7	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2
8	26	150	15	3.9	2.6	10.5	2

Nota. Elaboración propia

Anexo 6. Actividades desarrolladas alrededor de esta investigación.

Este trabajo doctoral ha permitido el acercamiento a diferentes sectores incluyendo el gobierno, lo que ha generado actividades que documentará en este apartado.

**Visita de comisión gubernamental de expertos de México al suscrito
Director del Centro de Procesos Industriales del Instituto de Investigaciones de la
Universidad del Valle de Guatemala.**

El jueves 29 de agosto de 2025, recibí la visita de una comitiva Mexicana integrada por el Subdirector de innovación y transferencia de conocimiento de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el profesor investigador de biotecnología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, el Director del Comité Nacional para el desarrollo sustentable de la caña de azúcar, el Secretario de Desarrollo Energético de Tamaulipas, el Subsecretario de hidrocarburos en Tamaulipas, el consultor de etanol para México del Consejo de Granos de los Estados Unidos (U.S. Grains Council) y el consultor regional para América Latina del Consejo de Granos de los Estados Unidos (U.S. Grains Council), en donde indicaron que por instrucciones de su Presidente, la doctora Claudia Sheinbaum, debían analizar la implementación de biocombustibles, desde su fabricación y mezcla en el parque vehicular. Gamaliel Zambrano realizó una presentación en donde resaltó que en departamento de Ingeniería Química se trabaja el tema de biodiésel desde el año 2007, en donde fabrican y prueban este biocombustible. El biodiésel dio paso a que en el año 2010 se iniciará con la producción e investigación de etanol. La reunión terminó con la solicitud de nuestros invitados, a participar en un encuentro científico en Tamaulipas y en firmar un acuerdo de colaboración.



Participación como PONENTE en Congreso de Ingeniería Química.

El 12 de agosto del departamento de ingeniería química de la Universidad del Valle de Guatemala, impartió una charla a estudiantes sobre las oportunidades que el biodiésel tiene en Guatemala. La charla consistió en evidenciar que Guatemala es 100% importadora de combustibles fósiles y que no se tiene una independencia energética al no producirse estos localmente. El parque vehicular que utiliza diésel en Guatemala es de aproximadamente 2 millones de vehículos, en su mayoría transporte pesado, lo que genera no solo emisiones de CO₂, sino también partículas que causan enfermedades. La oportunidad de Guatemala de utilizar biodiésel es buena, debido a que la propuesta es que se realice a partir de aceites usados de cocina, que permitiría disminuir los gases de efecto invernadero que genera el transporte con combustible a base de diésel y además los aceites no generarían contaminación en las plantas de tratamiento de agua.



Participación como EXPERTO INVITADO por parte del Ministerio de Energía y Minas, Guatemala al Simposio Internacional de Biocombustibles.

El tema de biocombustibles cada vez es más visible en Guatemala, el Ministerio de Energía y Minas colocó en su agenda el uso de etanol obligatorio para usar en vehículos, la producción de etanol en Guatemala se domina a la perfección, solo es que todos los actores se pongan de acuerdo para ser una realidad. El uso obligatorio iniciaba en enero de 2025, pero algunos sectores, no de acuerdo con la medida, solicitaron un que se aplaza, por lo que se implementaría en enero 2026, sin embargo, en el mes de septiembre 2025, el ministro dio a conocer que se volvería a aplazar para implementar en junio 2026, con el sustento que se harían mesas de diálogo en donde se incluyera también otros biocombustibles como el biodiésel. Se tuvo un espacio el miércoles 8 y jueves 9 de octubre de 2025, para realizar talleres en donde tuve la oportunidad de hablar con personas que ven el uso de los biocombustibles, como una situación que no es para Guatemala, por lo que las discusiones fueron enriquecedoras y valiosas, sobre todo por la propuesta que se realiza en este trabajo doctoral. En conclusión, las personas están desinformadas y tuve la oportunidad de hablar de los beneficios y oportunidades que se generan en torno a este tema.

