



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍAS
DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

TESIS DOCTORAL

**USO POTENCIAL DE *Ricinus communis* COMO
BIOENERGÉTICO**

PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:
Ing. José Manuel González Fernández

Directora:
Dra. Alma Delia Román Gutiérrez

Mineral de la Reforma, Hidalgo, 2025



Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
School of Engineering and Basic Sciences

Mineral de la Reforma, Hgo., a 12 de noviembre de 2025

Número de control: ICBI-D/2088/2025
Asunto: Autorización de impresión de tesis.

MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA UAEH

Por este conducto le comunico que el comité revisor asignado al Ing. José Manuel González Fernández, alumno del Doctorado en Ciencias Ambientales (Directo) con número de cuenta 429400, autoriza la impresión del proyecto de tesis titulado "**USO POTENCIAL DE Ricinus communis COMO BIOENERGÉTICO**", en virtud de que se han efectuado las revisiones y correcciones pertinentes.

A continuación, se registran las firmas de conformidad de los integrantes del comité revisor.

PRESIDENTE	Dr. José Roberto Villagómez Ibarra
SECRETARIO	Dr. Ramón Razo Zárate
1 ^{er} VOCAL	Dra. Alma Delia Román Gutiérrez
2 ^{do} VOCAL	Dra. Gabriela Sánchez Olgún
3 ^{er} VOCAL	Dr. José Belisario Leyva Morales
1 ^{er} SUPLENTE	Dr. Gabriela Marisol Vázquez Cuevas
2 ^{do} SUPLENTE	Dr. César Camacho López

Sin otro particular, reitero a Usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
"Amor, Orden y Progreso"

Mtro. Gabriel Vergara Rodríguez
Director del ICBI



Ciudad del Conocimiento, Carretera Pachuca-Tulancingo Km. 4.5 Colonia Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México. C.P. 42184
Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 40001
dirección_icbi@uaeh.edu.mx, vergarar@uaeh.edu.mx

"Amor, Orden y Progreso"



2025



uaeh.edu.mx

DEDICATORIAS

A mi esposa, **Sara Madai**, mi compañera de vida, mi mayor soporte y el amor incondicional. Este logro no habría sido posible sin tu paciencia infinita, tus incontables sacrificios y tu fe inquebrantable en mí. Gracias por ser la luz que iluminó este largo camino. . Tu fortaleza y compañía han sido pilares fundamentales para la culminación de este logro.

A mis peques, **Romina**, fuente constante de alegría y motivación, y a **Renata**, quien está por llegar a este mundo, con la esperanza de que este esfuerzo les inspire a perseguir sus propios sueños con convicción y perseverancia. Son la motivación y la alegría de mis días.

A mis padres, **María del Rocío e Hilario**. Les dedico la culminación de este sueño que comenzó con su sacrificio y sus incontables enseñanzas, así como por su respaldo constante en cada etapa de mi formación. Gracias por inculcarme el valor del trabajo honesto, el amor por el estudio y la convicción de que la educación es la llave de la vida. Su ejemplo es mi mayor legado.

A mi hermano **Ismael**, por su cercanía, palabras de aliento y compañía silenciosa pero firme en este recorrido. Gracias por tu amistad, tu ánimo y por compartir la memoria de nuestra infancia y el orgullo de nuestros logros.

A mis suegros, **Clarita y Boris**, por su afecto, aliento y por acogerme siempre con generosidad y confianza.

AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto doctoral es el resultado de un largo camino que no habría sido posible sin la invaluable contribución, guía y apoyo de numerosas personas e instituciones. A todos ellos, mi más sincero y profundo agradecimiento.

A **Dios**, por ser guía y fortaleza en cada paso de este recorrido. Por darme la sabiduría en los momentos de incertidumbre, la paciencia en la dificultad y la luz necesaria para no perder el rumbo. Este logro es, ante todo, testimonio de Su gracia y fidelidad.

Mi más profundo respeto y agradecimiento a la **Dra. Alma Delia Román Gutiérrez**, por su excepcional dirección, su sabiduría, su crítica constructiva y su paciencia inagotable. Su visión y mentoría fueron fundamentales para dar forma a esta investigación.

A los miembros de mi **Comité de Tesis**, por sus valiosas observaciones y el tiempo dedicado a revisar y enriquecer este trabajo con sus conocimientos expertos.

A la Universidad **Autónoma del Estado de Hidalgo**, por brindarme el espacio académico y los recursos necesarios para desarrollar mi tesis doctoral.

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías**, por el apoyo económico fundamental que me permitió dedicarme por completo a esta investigación, a través de la beca número 745947.

CONTRIBUCIONES DERIVADAS DE LA TESIS DOCTORAL

Producción científica en eventos académicos

1. González-Fernández, J.M., Prieto-Méndez, J., Aquino-Torres, E., Pacheco-Trejo, J. **2021.**Optimización del proceso de obtención de biodiesel de higuerilla partiendo directamente de semillas utilizando catalizador básico heterogéneo en la transesterificación. **4º Congreso Internacional de Tecnología, Innovación, Competitividad y Sostenibilidad**, En Universidad Autónoma de Guerrero del 29 y 30 de noviembre de 2021
2. González-Fernández, J. M., Aquino-Torres, E., Román-Gutiérrez, A. D. **2023.** Caracterización de biodiésel de higuerilla (*Ricinus communis*) obtenido por transesterificación *in situ*. **XX Congreso Internacional y XXVI Congreso Nacional de Ciencias Ambientales**, en la Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo y la Academia Nacional de Ciencias Ambientales, del 14 al 16 de junio de 2023
3. González-Fernández J. M. Aquino-Torres E. 2 , Pacheco-Trejo J., Román Gutiérrez A. D. **2024.**Obtención de biodiésel de higuerilla (*Ricinus communis*) por transesterificación *in situ*. **X Congreso de la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental (AMEQA) y 1st Meeting of the Aquatic Ecosystem Health & Management Society-Latin American Chapter (AEH&MS-LA)**, por la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental, del 29 de enero al 02 de febrero de 2024.
4. González-Fernández J. M. Aquino-Torres E. 2 , Pacheco-Trejo J., Román Gutiérrez A. D. **2024.** “Conocimiento tradicional y uso de *Ricinus communis* en regiones indígenas Hidalgo”.**X Congreso de la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental (AMEQA) y 1st Meeting of the Aquatic Ecosystem Health & Management Society-Latin American Chapter (AEH&MS-LA)**, por la Asociación Mesoamericana de Ecotoxicología y Química Ambiental, del 29 de enero al 02 de febrero de 2024.

Producción científica aceptada y enviada

1. González-Fernández, J.M., Aquino-Torres, E., Acevedo-Sandoval, O. A., Pacheco-Trejo, J., Prieto-García, F. & Prieto-Méndez, J. (2022). Optimization of the Process for Obtaining Biodiesel from Seeds of *Ricinus communis* using Basic Heterogeneous Catalyst in Transesterification. *Applied Engineering in Agriculture*, 38(1), 193-206. [doi: 10.13031/aea.14731](https://doi.org/10.13031/aea.14731) (**Publicado**)
2. González-Fernández, J.M. & Román Gutiérrez A. D. (2024). Agroethnobotanical and physicochemical evaluation of wild *Ricinus communis* L. in Hidalgo. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* (**Enviado**).

INDICE

Resumen	12
Abstract...	13
1. Introducción	14
2. Antecedentes	16
2.1. Generalidades de la Higuerilla.....	16
2.1.1. Cultivo de higuerilla: origen y distribución.....	16
2.1.2. Morfología de la planta de higuerilla.....	16
2.2. Biocombustibles y sus clasificaciones	17
2.3. Importancia del Biodiésel.....	21
2.4. Reacciones de transesterificación.....	21
2.5. Materias primas para la transesterificación.....	25
2.5.1. Ácidos grasos	25
2.6. Usos comunes de la higuerilla	26
2.6.1. Uso de la higuerilla en la obtención de biodiésel	27
2.7. Catalizadores	28
2.8. Alcoholes.....	29
2.9. El proceso, en síntesis	30
2.10. Características y propiedades de calidad del biodiesel.....	31
2.10.1. Punto de ebullición	31
2.10.2. Poder calorífico	32
2.10.3. Número de cetano	32
2.10.4. Densidad.....	32
2.10.5. Viscosidad cinética	33
2.11. Normativa de biocombustibles en México	33
3. Planteamiento del problema	35
4. Justificación.....	36
5. Objetivos	37
5.1. Objetivo general	37

5.2.	Objetivos específicos.....	37
6.	Hipótesis.....	37
7.	Metodología.....	38
7.1.	Recolección de muestras de variedades de semillas de Higuerilla.....	38
7.2.	Ánálisis agrícola de <i>Ricinus communis</i>	39
7.2.1.	Trabajos de campo y recolección de datos etnobotánicos	39
7.2.2.	Procesamiento de encuestas y análisis estadístico	39
7.3.	Ánálisis Agronómico.....	40
7.4.	Ánálisis Morfológico	40
7.5.	Caracterización de las materias primas	41
7.5.1.	Determinación de humedad	41
7.5.2.	Determinación de cenizas	41
7.5.3.	Determinación de grasa.....	41
7.5.4.	Determinación de proteína.....	42
7.8.	Caracterización del aceite de higuerilla.....	43
7.8.1.	Ánálisis por espectrofotometría infrarroja (FTIR)	43
7.8.2.	Ánálisis por Resonancia Magnética (RMN-H1)	43
7.9.	Diseño experimental para obtención de biodiésel.....	43
7.10.	Caracterización del biodiésel obtenido	45
7.10.1.	Color y apariencia	45
7.10.2.	Densidad.....	45
7.10.3.	Viscosidad cinemática.....	45
7.10.4.	Índice acidez	46
8.	Resultados y Discusiones.....	47
8.1.	Caracterización etnobotánica	47
8.2.	Caracterización agronómica y morfológica de <i>Ricinus communis</i>	52
8.2.1.	Caracterización varietal de <i>Ricinus communis</i>	56
8.2.2.	Caracterización de semilla de <i>Ricinus communis</i>	59
8.2.2.1.	Caracterización física	59
8.2.2.2.	Ánálisis proximal.....	59

8.3.	Caracterización de aceite de <i>Ricinus communis</i>	61
8.4.	Obtención de biodiésel.....	64
8.4.1.	Rendimiento del proceso de transesterificación a partir de semilla de higuerilla.	64
8.4.2.	Análisis de rendimiento entre las muestras de higuerilla.....	66
8.5.	Caracterización química de biodiésel de <i>Ricinus communis</i>	67
8.5.1.	Cromatografía de capa fina.....	67
8.5.2.	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de biodiésel de <i>Ricinus communis</i>	68
8.5.3.	Resonancia Magnética (RMN 1H) de biodiesel.....	69
8.5.4.	Ánálisis térmico de biodiésel.....	74
8.5.5.	Caracterización fisicoquímica de biodiésel	75
9.	Conclusiones y perspectivas.....	79
10.	Referencias	82

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Reacción de transesterificación en la obtención de biodiésel	22
Figura 2. Mecanismos de reacción de transesterificación.	23
Figura 3. Esquematización del proceso optimizado de la obtención de biodiésel, partiendo de aceites vegetales.....	31
Figura 4. Forma general de recolección o toma de muestras de platas por municipio.	38
Figura 5. Mapa del Estado de Hidalgo donde se realizaron las colectas de semilla de higuerilla.....	39
Figura 6. Matriz de la correlación del coeficiente de Spearman para usos de higuerilla ..	50
Figura 7. matriz de correlación no paramétrica de Kendall para usos de higuerilla	51
Figura 8. Matriz de correlación no paramétrica Lineal R de Pearson	51
Figura 9. Espectros FTIR del aceite de ricino de las colectas realizadas	63
Figura 10. Placas de cromatografía de capa fina, comparación materia prima y muestra obtenida de las tres variedades de semilla evaluadas. En cada una de las placas se evalúan: (1) aceite, (2) Hg-A1, (3) Hg-T2, (4) Hg-S3.	67
Figura 11. Espectro FTIR biodiésel de <i>Ricinus communis</i>	69
Figura 12. Espectros de RMN H. Aceite de Higuerilla (<i>Ricinus communis</i>).	70
Figura 13. Espectros de RMN 1H, Hg-A1(colecta obtenida de la semilla de Atotonilco el Grande) Metanol Ca(OH) ₂	71
Figura 14. Espectros de RMN 1H en biodiésel de higuerilla, de investigaciones previas..	72
Figura 15. Espectros de RMN H, Hg-T2, Etanol BaCO ₃	73
Figura 16. Espectros de RMN H, Hg-S3 Isopropanol MgCO ₃	74
Figura 17. Análisis térmico de las materias primas y del biodiesel obtenido.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de tipos de biocombustibles	19
Tabla 2. Principales ácidos grasos en aceites vegetales usados en la producción de biodiesel.....	25
Tabla 3. Transesterificación alcalina utilizada en la producción de biodiesel a partir de aceite de ricino.....	28
Tabla 4. Tipos de catalizadores utilizados en la obtención de biodiésel.	29
Tabla 5. Factores y niveles en el diseño experimental de optimización.	44
Tabla 6. Matriz del diseño experimental para la obtención de biodiésel.	45
Tabla 7. Usos dados a la higuerilla de acuerdo a la información recabada en la encuesta	48
Tabla 8. Características del sitio de colectas de higuerilla (<i>Ricinus communis</i>).	53
Tabla 9. Caracterización de colectas en base a planta, hoja, racimo y semilla.	55
Tabla 10. Variedades de referencia para las características de <i>Ricinus communis</i> colectado.	58
Tabla 11. Caracterización física de semilla de higuerilla (<i>Ricinus communis</i>).	59
Tabla 12. Análisis proximal de semilla de higuerilla.	60
Tabla 13. Rendimiento y caracterización de aceite de higuerilla	62
Tabla 14. Rendimientos en porcentaje de semilla de higuerilla en el proceso de transesterificación.....	64
Tabla 15. Calculo teórico de rendimiento de biodiesel a partir del aceite (HG-A1, HG-T2, HG-S3).....	65
Tabla 16. Resultados de parámetros fisicoquímicos para biodiesel de higuerilla y comparación con resultados utilizando otras materias <i>primas</i>	77
Tabla 17. Trabajos de caracterización fisicoquímica de biodiesel obtenido a partir de higuerilla (<i>Ricinus communis</i>).	78

Resumen

Actualmente los biocombustibles se vislumbran a nivel mundial como impulsores del desarrollo social, económico y ambiental, las materias primas para estos actualmente en la actualidad se basan en cultivos, grasas animales y aceites de desecho. El objetivo de esta investigación se centró en lograr un proceso optimizado para la obtención de biodiesel, partiendo directamente de las semillas de *Ricinus communis* maceradas o molidas y no necesariamente del aceite previamente extraído, el proceso de obtención consto de una serie de paso, se realizó un macerado previo de la semilla, mezclado con solvente y catalizador en 9 diferentes combinaciones, esta mezcla fue colocada en una parrilla con agitación constante por 2 horas. Se obtuvo el mayor rendimiento en la variedad HG-A1 (variedad Hidalgo – Atotonilco el Grande 1), HG-T2 (variedad Hidalgo – Tulancingo 2), HG-S3(variedad Hidalgo – Santiago 3) de semilla directa (33.2%, 30.6%, 24.7%, respectivamente). La reacción de transesterificación de manera directa permitió obtener biodiesel de acuerdo con los espectros de resonancia magnética ¹H utilizando 1 gramo de catalizador Ca(OH)₂,y metanol como solvente, en una relación alcohol: semilla, 4:1, por medio de la implementación de la metodología de parámetros de Taguchi. De todo este estudio se concluye que es viable la obtención de biodiesel como biocombustible a partir de semillas de ricino maceradas y directamente, sin extracción previa de aceite con el consiguiente ahorro de n-hexano.

Palabras clave: biodiesel, higuerilla, catalizador, aceite

Abstract

Biofuels are currently seen worldwide as drivers of social, economic, and environmental development. The raw materials for these fuels are currently based on crops, animal fats, and waste oils. The objective of this research was to achieve an optimized process for obtaining biodiesel, starting directly from macerated or ground *Ricinus communis* seeds and not necessarily from previously extracted oil. The process consisted of a series of steps: the seeds were first macerated and mixed with solvent and catalyst in nine different combinations. This mixture was placed on a grill and stirred constantly for two hours. The highest yield was obtained in the HG-A1 variety (Hidalgo – Atotonilco el Grande 1 variety), HG-T2 (Hidalgo – Tulancingo 2 variety), and HG-S3 (Hidalgo – Santiago 3 variety) from direct seeds (33.2%, 30.6%, and 24.7%, respectively). The direct transesterification reaction allowed biodiesel to be obtained according to the ^1H magnetic resonance spectra using 1 gram of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ catalyst and methanol as a solvent, in an alcohol:seed ratio of 4:1, through the implementation of the Taguchi parameter methodology. This study concludes that it is feasible to obtain biodiesel as a biofuel from macerated castor seeds directly, without prior oil extraction, with the consequent savings in n-hexane.

Key words: biodiesel, higuerilla, catalyst, oil.

1. Introducción

Los biocombustibles son productos químicos ricos en energía obtenidos por el ser humano a través de procesos biológicos utilizando biomasa de organismos vivos, como lo son las plantas, microalgas, bacterias, grasas animales y grasas de aceites de desecho (Gebremariam, 2018). La materia prima utilizada puede encontrarse en cualquiera de sus estados de agregación con la finalidad de liberar la energía que está contenida en sus componentes químicos, la cual es extraída mediante una reacción de combustión (Gebremariam, 2018). El biodiésel, es una mezcla de ésteres alquílicos de ácidos grasos, característicos por su biodegradabilidad, no toxicidad y ausencia de azufre. El biodiésel más común, de primera generación, se produce por metanolisis de aceites vegetales utilizando catalizadores homogéneos básicos o ácidos (Zhang et al., 2015; Gebremariam, 2018; Ramos et al., 2019). Se obtiene a partir de una reacción química, transesterificación, la cual el glicerol de los aceites es sustituido por un alcohol con la presencia de un catalizador que interviene en la reacción química (Díaz et al., 2018).

Algunos biocombustibles proceden de plantas que pueden servir de alimento para el ser humano, lo que genera un conflicto con la producción alimenticia, dentro de estos se encuentran los aceites de girasol, soya, colza, coco o de palma, lo que conlleva un grave problema ya que esto significa que su uso podría reducir la disponibilidad de alimentos o aumentar sus precios., esa competencia no se produce en los cultivos de segunda generación, como lo son *Jatropha spp*, *Moringa oleífera*, así como con *Ricinus communis*, plantas consideradas forestales y que no tiene un uso principal (Fernández et al., 2014). El biodiésel producido a través de cultivos oleaginosos representa una alternativa válida. Se reportan rendimientos a partir de este tipo de cultivos que oscilan entre 80-99% (Fernández et al., 2014; Giwa & Ogunbona, 2014). Estudios realizados para la obtención de biodiésel han reportado resultados muy diversos: a partir de microalgas se obtienen entre 60-98% de rendimiento (g biodiésel/g aceite extraído) empleando temperaturas altas 60-170°C, tiempos de reacción entre 0.5 y 6 horas, en presencia de metanol (Kim et al. 2019; Pandey et al. 2024).

Por lo anterior el objetivo de este proyecto es optimizar el método de obtención de biodiésel a partir de un proceso de tecnología verde empleando directamente semillas de higuerilla (*Ricinus communis*) de tres municipios del estado de Hidalgo y catalizadores básicos heterogéneos de bajo costo.

2. Antecedentes

2.1. Generalidades de la Higuerilla

2.1.1. Cultivo de higuerilla: origen y distribución

La planta de higuerilla (*Ricinus communis*) es una especie nativa del área tropical de África y la India, esta especie se encuentra ampliamente distribuida e introducida, en algunos casos, en todas las regiones del mundo, destacando su presencia en zonas de clima cálido y tropical con la finalidad de la extracción de su aceite para fines comerciales destacando sus usos en: producción de plásticos, fibras sintéticas, lubricantes, pinturas, cosméticos, productos farmacéuticos, principalmente (Kallamadi et al., 2015; Portillo et al., 2017).

En México un país megadiverso en sus climas tiene una amplia distribución dentro de los estados que precisan mayor presencia se encuentran: Chiapas, Chihuahua, Coahuila, Ciudad de México, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, Estado de México, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Sinaloa, Sonora, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Yucatán, (Vibrans, 2009) de acuerdo con INIFAP, 2021 entre 2018 y 2020 en promedio se cosecharon 635 hectáreas de higuerilla y se obtuvo una producción de 4 mil 361 toneladas, destacando los estados de Sonora y Nayarit.

2.1.2. Morfología de la planta de higuerilla

Las características morfológicas son las que tienen una mayor variabilidad fenotípica ya que de acuerdo a la región influyendo principalmente los factores edafoclimáticos se puede observar una diversidad en color del follaje, tallo (color y grosor), tamaño de la semilla, aceite (contenido y color) (García et al., 2019).

En cuanto al tamaño de la planta de higuerilla se puede clasificar en tres accesiones; enanas (<1.8 m), medias (1.8 a 2.5 m) y altas (>2.5 m) pueden alcanzar alturas de hasta 10 metros y llegar a obtener ciclos hasta por 10 años continuos, siempre y

cuando las condiciones ambientales se lo permitan (Falasca et al. 2012; Cabrales et al., 2014).

Con base a en los tamaños y buscando unificar las características a nivel mundial se han realizado siembras comerciales y producciones intensivas, la selección de los ejemplares a usar en estas grandes producciones se enfoca en la identificación de plantas, que sean de ciclo corto, que tengan rendimientos de contenido de aceite por encima del 45%, sean tolerantes a condiciones climáticas adversas. Todo esto se ha logrado con la creación de híbridos comerciales creados a partir de colectas de ejemplares que cumplan con dichas características y mediante el mejoramiento genético. Es por ello que se ha logrado obtener plantas de higuerilla específicas para distintos lugares de producción en México de acuerdo a sus características edafoclimáticas, una de las dependencias que más realiza investigaciones de dicho cultivo en México es el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP, 2021).

2.2. Biocombustibles y sus clasificaciones

Dentro de la amplia gama de definiciones que puede darse a biocombustible se encuentra la que hace referencia a combustibles líquidos o gaseosos para el sector del transporte donde el uso de la biomasa es importante para su obtención. En general, se considera que los biocombustibles ofrecen muchas oportunidades, incluida la sostenibilidad, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, además de impulsar el desarrollo regional a través de la generación de empleos y fortalecimiento de economías principalmente en el sector rural, mejora en la agricultura fomentando la diversificación productiva y el aprovechamiento cultivos alternativo, finalmente, favorecen la seguridad del suministro energético al reducir la dependencia de combustibles fósiles importados y aumentar la disponibilidad de fuentes renovables (Ruan et al., 2019).

El incremento poblacional a nivel mundial ha aumentado las necesidades de demanda de energía para las actividades humanas, lo que ha provocado un uso desmedido de las reservas de petróleo. Esto ha traído consigo una crisis energética

detonada principalmente por la incertidumbre en el aumento de la contaminación ambiental. La cual se espera que entre los años 2012-2040 tenga un aumento de 48%, esto ha llevado a la comunidad científica a encaminar sus esfuerzos en a la búsqueda de alternativas energéticas eficientes, renovables, biodegradables, fiables, económicas, limpias y sostenibles ambientalmente (Gebremariam, 2018; Thapa et al., 2018).

Los biocombustibles se clasifican en generaciones según su origen y proceso de producción, desde los más tradicionales hasta los más innovadores. Los biocombustibles de primera generación se obtienen de cultivos alimentarios, mientras que los de segunda generación utilizan residuos orgánicos y biomasa no alimentaria. Los de tercera generación emplean algas y microorganismos, y los de cuarta generación modifican genéticamente microorganismos para la producción de bioenergía.

Los biocombustibles de primera generación, son provenientes del sector alimentario y están conformados por partes alimenticias de las plantas que contengan un alto contenido de almidón, azúcares y aceites, ejemplo de estas son granos de maíz, jugo de caña de azúcar, jugo de remolacha o betabel, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maní o cacahuate, entre otros. Ver tabla 1. También son utilizados como insumos las grasas animales, grasas y aceites de desecho provenientes de la cocción y elaboración de alimentos (Dahman, 2019; García et al., 2019, Campos, et al., 2020).

Los biocombustibles de segunda generación se obtienen del aceite reciclado de cocina, cuando ya no tiene uso alimentario. Ver tabla 1. Hay varias formas de producir biocombustibles de segunda generación, de las cuales la vía bioquímica y la termoquímica son las más conocidas. La primera emplea microorganismos para reducir a azúcares simples y complejas cadenas químicas de las moléculas de celulosa, y luego transforma los azúcares en biocombustible (Cortés et al., 2019).

Los biocombustibles de tercera generación provienen de organismos que pueden producir su propio alimento a partir de energía solar y CO₂, entre ellos algas, que se pueden cultivar en reactores fotoquímicos o en piletas al aire libre. Luego de secarlas, se extrae el aceite que contienen en sus células y se transforma en biocombustible por alguno de los métodos anteriores (Cortés et al., 2019; Casas et al., 2021).

Los biocombustibles de cuarta generación se producen a partir de organismos genéticamente modificados para que capturen más dióxido de carbono del ambiente, con lo que tienen la doble característica de provenir de una fuente alternativa de energía y ser generados por procedimientos que disminuyen el contenido atmosférico de gases de efecto invernadero. Así se ha alterado por procedimientos de ingeniería genética árboles como el eucalipto para que almacenen hasta tres veces más CO₂ que los normales, y provean celulosa en mayores proporciones, lo cual se traduce en un incremento de biocombustible generado. Asimismo, algunas empresas recurren a microorganismos modificados genéticamente, como Algenol (fundada en 2006 con sedes en los Estados Unidos y Alemania), que produce bioetanol de manera directa (Cortés et al., 2019; Casas et al., 2021).

Tabla 1. Características de tipos de biocombustibles

Biocombustible	Ejemplos	Materias primas	Ventajas	Desventajas
Primera generación	Bioalcoholes, aceite vegetal, biodiésel, biometanol, biosyngas, biogás	Azúcar, almidón, grasas animales, soja, colza, mostaza, girasol, maíz, caña de azúcar, remolacha azucarera, sorgo, patata, aceite de palma, coco, canola, mandioca, jatrofa, desechos de aguas residuales.	(1) Biodegradables (2) La materia prima se puede producir fácilmente con la infraestructura y la tecnología existentes (3) Beneficios ambientales y sociales	(1) Competencia por el uso de la tierra (2) Huella de carbono más alta ya en comparación con otras generaciones de biocombustibles (3) Requiere una gran cantidad de insumos en términos de fertilizantes, agua y área de tierra, lo que reduce la

		relación de energía neta	
Segunda generación	<p>Bioalcoholes, bioaceite, biodiésel, BioDMF, biometanol, bioFischer Tropsch diésel, biohidrógeno.</p> <p>Cultivos no alimentarios, paja de trigo, maíz, madera, pasto varilla, paja de cereal, bagazo de caña de azúcar, alpiste de caña, residuos forestales, cultivos energéticos, residuos sólidos municipales, alfalfa, agave, jatrofa, ricino.</p>	<p>(1) El uso de toda la planta y el uso de residuos.</p> <p>(2) Materias primas disponibles en grandes cantidades</p> <p>(3) Bajo costo de materia prima.</p> <p>(4) Seguridad energética.</p> <p>(5) Cerca de cumplir con los beneficios ambientales declarados</p>	<p>(1) Tecnologías son más costosas que las utilizadas en biocombustibles de primera generación.</p> <p>(2) El uso de residuos agrícolas y forestales degradada la calidad del suelo y también induce la erosión del suelo.</p> <p>(3) Falta de tecnologías eficientes para aplicaciones comerciales</p>
Tercera generación	<p>Bioetanol, aceite vegetal, biodiésel, biometanol, combustibles para aviones.</p> <p>Especies microbianas, algas, levaduras, hongos, cianobacterias</p>	<p>(1) Las algas se pueden cultivar usando tierra y agua no aptas para la producción de alimentos</p> <p>(2) Alto rendimiento de aceite</p> <p>(3) Sin contenido tóxico</p> <p>(4) Seguridad energética</p> <p>(5) Las algas creadas con bioingeniería son renovables</p>	<p>(1) Difícil de cosechar y procesar</p> <p>(2) Aún no es comercialmente factible</p> <p>(3) Requiere nuevas tecnologías desde la producción de materia prima hasta el procesamiento de biocombustibles.</p>
Cuarta generación	<p>Diésel verde, biogasolina, combustible de aviación verde</p> <p>Aceite vegetal, biodiésel</p>	<p>(1) Se argumenta que el biocombustible de cuarta generación es carbono negativo en lugar de simplemente neutral en carbono, ya que "bloquea" más carbono del que produce</p> <p>(2) Materias primas sintéticas para</p>	<p>(1) Falta de estudio sobre su desempeño práctico en términos de aspectos técnicos y económicos</p> <p>(2) Alto costo</p> <p>(3) Todavía en etapa</p>

producir biocombustibles es desarrollo una posibilidad (3) Seguridad energética

y

Fuente: Elaboración propia a partir de (Acheampong et al., 2017; Renzaho et al., 2017)

2.3. Importancia del Biodiésel

El aumento de la demanda de energía y el desarrollo de una mayor conciencia sobre el medio ambiente, ha llevado a los investigadores a buscar la opción de un combustible alternativo que pueda complementar o reemplazar los combustibles fósiles. El biodiésel es considerado como uno de los combustibles alternativos para motores diésel y es un combustible no tóxico, lo que lo hace seguro para su manipulación y uso; además, es renovable, pues se obtiene a partir de aceites vegetales, grasas animales o aceites reciclados, lo que permite una producción sostenible, también es biodegradable (Niju et al., 2014; Vyas et al., 2019).

La forma más factible de satisfacer la creciente demanda de combustibles en general, es utilizando combustibles alternativos. El biodiésel se define químicamente como los ésteres monoalquílicos de aceites vegetales o grasas animales. La mayor ventaja que tiene el biodiesel sobre la gasolina y el diésel de petróleo es su respeto al medio ambiente, esto se debe a que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes. Además, el biodiésel puede mejorar el rendimiento del motor y prolongar su vida útil. El biodiesel se quema de manera similar al diésel de petróleo ya que se trata de contaminantes regulados. Por otro lado, el biodiésel probablemente tiene mejor eficiencia que la gasolina (Brahma et al., 2022)

2.4. Reacciones de transesterificación

El biodiésel se produce principalmente a partir de aceites vegetales y grasas animales, cuya composición está basada en triglicéridos. Desde el punto de vista químico, estos son ésteres formados por ácidos grasos y glicerina. Para su transformación en biodiésel, dichos aceites o grasas se someten a una reacción

denominada transesterificación, que implica el uso de un alcohol (generalmente metanol) y un catalizador, comúnmente una base. En esta reacción, las cadenas de ácidos grasos, representadas por "R", permanecen sin cambios y son responsables de las propiedades fundamentales del biodiésel.(Castellar et al., 2014).

La reacción de transesterificación, impulsada por un catalizador, no ocurre de manera instantánea ni en una sola etapa, sino que está compuesta por una serie de tres reacciones consecutivas y reversibles (Castellar et al., 2014). Estas etapas transforman gradualmente los triglicéridos en biodiésel (ésteres metílicos) y glicerina, de la siguiente manera:

1. Triglicérido + metanol \leftrightarrow éster metílico + diglicérido
2. Diglicérido + metanol \leftrightarrow éster metílico + monoglicérido
3. Monoglicérido + metanol \leftrightarrow éster metílico + glicerina

Cada una de estas reacciones requieren condiciones controladas para avanzar eficientemente hacia los productos deseados.

La reacción se desarrolla en dos fases esenciales (representadas en la figura 2): la primera corresponde al ataque nucleofílico, mientras que la segunda se denomina fase de eliminación. En este proceso, por cada mol de alcohol utilizado, se genera un mol de éster metílico.

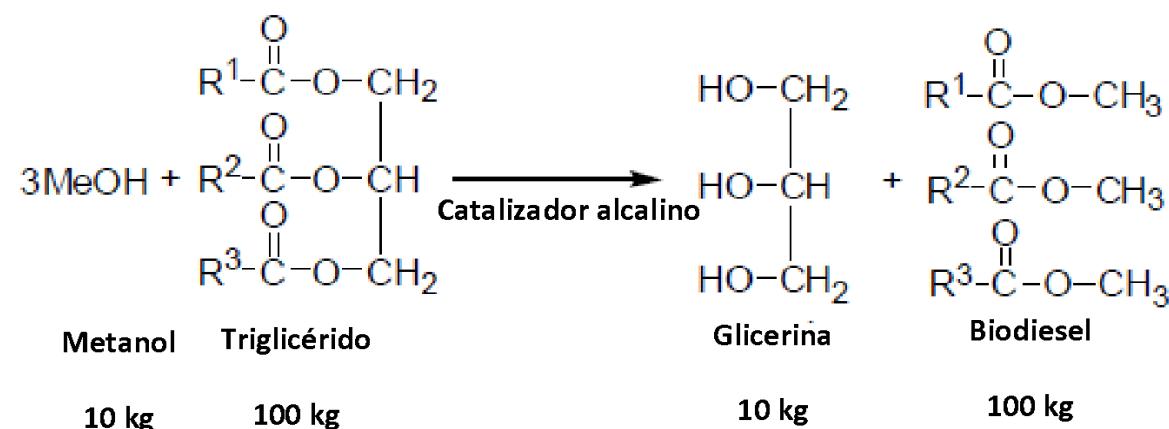
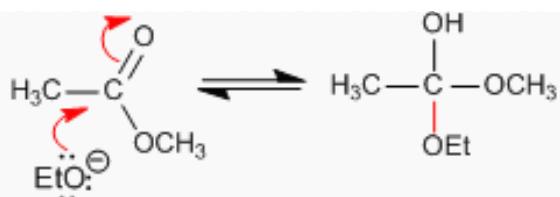


Figura 1. Reacción de transesterificación en la obtención de biodiésel.

Etapa 1. Ataque nucleofílico



Etapa 2. Eliminación

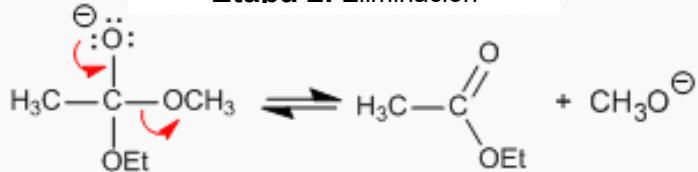


Figura 2. Mecanismos de reacción de transesterificación.

Dicha reacción de transesterificación, que se lleva a cabo por la presencia de un catalizador, no se produce toda a la vez, sino que está formada por un conjunto de tres reacciones reversibles y seguidas (Castellar et al., 2014), que esquemáticamente son:

1. Triglicérido + metanol \rightleftharpoons éster metílico + diglicérido
2. Diglicérido + metanol \rightleftharpoons éster metílico + monoglicérido
3. Monoglicérido + metanol \rightleftharpoons éster metílico + Glicerina

La reacción de transesterificación no ocurre de forma inmediata ni en un solo paso; está compuesta por tres etapas consecutivas y reversibles (Castellar et al., 2014):

1. En la primera, un triglicérido reacciona con metanol formando un éster metílico y un diglicérido.
2. Posteriormente, el diglicérido generado vuelve a reaccionar con metanol, produciendo otro éster metílico y un monoglicérido.
3. Finalmente, el monoglicérido interactúa con más metanol, originando un tercer éster metílico y glicerina como subproducto.

Para que esta transformación ocurra, es imprescindible la presencia de un catalizador. Entre los más utilizados se encuentran los ácidos homogéneos (como el sulfúrico, clorhídrico o fosfórico), ácidos heterogéneos (como zeolitas o resinas funcionalizadas), bases homogéneas (como el hidróxido de sodio o potasio), y bases heterogéneas (por ejemplo, óxidos de calcio o magnesio). También pueden emplearse catalizadores enzimáticos como las lipasas.

En la práctica industrial, los catalizadores más utilizados son las bases homogéneas, debido a su alta eficacia y condiciones de operación favorables. En contraste, los catalizadores ácidos requieren temperaturas más elevadas y tiempos de reacción más largos (Medina et al., 2015).

Sin embargo, al usar catalizadores básicos, es fundamental que el contenido de ácidos grasos libres en el aceite sea mínimo. De lo contrario, pueden producirse reacciones de saponificación en presencia de agua, dando lugar a la formación de jabones y disminuyendo la eficiencia y el rendimiento de la transesterificación (Castellar et al., 2014).

La única particularidad de los catalizadores básicos empleados es que obligan a que los triglicéridos tengan la menor cantidad posible de ácidos grasos libres para que con ellos no se formen jabones (por reacción de saponificación) bajo la presencia imprescindible del agua que pueda llevar el aceite, disminuyendo la cantidad de éster metílico producido y, por tanto, el rendimiento de la reacción de transesterificación (Castellar et al., 2014).

El proceso de fabricación tiene dos etapas: pretratamiento y transesterificación. En la etapa de pretratamiento el aceite se somete a procesos fisicoquímicos con objeto de eliminar los componentes perjudiciales para la reacción de transesterificación y garantizar la calidad final del biodiesel. Así, sufre un proceso de desgomado, otro de blanqueo y, finalmente, un proceso de desodorización. En la transesterificación se lleva a cabo la reacción química entre los triglicéridos y el metanol para la obtención del biodiesel. En la reacción se obtiene, como subproducto, la glicerina (Carlos & Díaz, 2018).

2.5. Materias primas para la transesterificación

2.5.1. Ácidos grasos

Existen diversas materias primas que pueden emplearse para la elaboración de biodiésel, y cada una presenta un perfil único de ácidos grasos. Estos perfiles tienen un impacto directo en las propiedades del combustible. Por ejemplo, un alto contenido de ácidos grasos saturados mejora la resistencia a la oxidación y eleva el número de cetano, pero también eleva los puntos de obstrucción del filtro a bajas temperaturas y el punto de nube. Estas variaciones en los ácidos grasos son un factor clave para seleccionar las materias primas más adecuadas, tanto en términos de producción como de calidad del biodiésel. Los ácidos grasos más comunes en aceites vegetales suelen tener cadenas de 16 a 18 carbonos, destacando el ácido palmítico (16:0), esteárico (18:0), oleico (18:1), linoleico (18:2) y linolénico (18:3) (Arrossio et al., 2020).

Aceite	Composición de ácidos grasos (% en peso)								Referencia	
	Saturado			Monoinsaturado		Poliinsaturado				
	C14:0	C16:0	C:18:0	C18:1 cis-9	C:18:1 ⁺	C18:2	C18:3	Otros		
Ricinus	-	1.1	1	3.3	87.7	4.7	0.7	1.5	Mutlu y Meier, (2010)	
Jatrofa	-	12.8	6.2	39.94	-	45.4	-	<1.0	Sanghamitra et al., (2014)	
Soya	-	11.46	3.08	23.3	-	53.32	31	8.53	Rajkumari y Rokhum, (2020)	
Girasol	0.08	8.03	3.26	29.27	-	59.32	-	0.04	Rial et al., (2020)	
Palmera	0	46.8	3.8	37.6	-	10.5	-	1.3	Avramovic et al., (2010)	
Canola	-	3.9	1.1	64.4	-	20.4	9.6	0.6	Da Rós et al., (2013)	
									Batista et al., (2014)	

Tabla 2. Principales ácidos grasos en aceites vegetales usados en la producción de biodiesel. C14:0 (ácido margárico); C16:0 (ácido palmítico); C18:0 (ácido esteárico); C18:1 cis-9 (ácido oleico); C18:1 (ácido ricinoleico), C18:2 (ácido linoleico); C18:3 (ácido linolénico); * Ácido graso exclusivo presente en el aceite de ricino.

Los aceites vegetales utilizados en la síntesis de biodiésel provienen de distintas oleaginosas, cuyas especies varían en características agronómicas, contenido de aceite y composición lipídica. Además de la calidad del aceite, es crucial considerar

que el biodiésel cumpla con los estándares normativos, ya que esto asegura un producto final de calidad (Molero et al., 2022).

Entre las oleaginosas con mayor contenido de aceite por grano se encuentran el girasol, la colza, la jatropha, el ricino y el maní, con valores que oscilan entre 40% y 64%. En contraste, cultivos como la soya, palma y algodón tienen un contenido más bajo, entre el 15% y el 25%. Junto con este dato, también es relevante considerar la producción de aceite por hectárea y el tiempo que tarda cada cultivo en completarse (Medina et al., 2015; Molero et al., 2022).

En la tabla 2 se puede apreciar, por ejemplo, las oleaginosas como la soya, el girasol y canola, los cuales compiten con la industria alimenticia. Por su parte el ricino, presenta un rendimiento cercano al 50% y especialmente presenta 18 átomos de carbono y es la única oleaginosa de la tabla que presenta 10 insaturaciones (Mutlu y Meier, 2010).

2.6. Usos comunes de la higuerilla

Por sus características químicas el aceite obtenido a partir de la planta de higuerilla es más versátil que otros aceites, lo que permite ser usado como precursor de diferentes productos de la industria química. En la actualidad el aceite de higuerilla es usado en diversas industrias entre las que se encuentran: la industria de plásticos. Según, Sánchez et al., (2016), este aceite tiene potencial para ser utilizado como materia prima hidrocarbonada en la obtención de polímeros como poliuretano, poliamidas, resinas epóxicas entre otros. El aceite de higuerilla tiene la ventaja de ser generado a partir de una planta de cultivo anual, que es competitiva en costos y además no compite con la seguridad alimentaria al no ser comestible, tal como ocurre en la obtención de estos productos a partir de aceite de palma, colza o soya (Sánchez et al., 2016).

El aceite de ricino también es utilizado en la industria cosmética y farmacéutica, para la fabricación de labiales, tónicos capilares, champús, brillos, emulsificantes, desodorantes, ceras, anticaspa, laxante, purgantes, catártico y emoliente; al igual

que en la industria de pinturas, tintes y para el procesamiento de textiles (Rosas et al., 2018).

2.6.1. Uso de la higuerilla en la obtención de biodiésel

El biodiésel se reconoce como un combustible alternativo renovable, biodegradable y respetuoso con el medio ambiente, que tiene el potencial de reemplazar de forma progresiva y eficaz al diésel de origen fósil. A diferencia de este último, el biodiésel no contiene azufre y no es corrosivo, lo que representa una ventaja significativa desde el punto de vista ambiental (Malode et al., 2021).

Particularmente, el biodiésel producido a partir del aceite de ricino —obtenido de las semillas de higuerilla— destaca por su excelente capacidad lubricante, atribuida a la elevada presencia de ácido ricinoleico, su principal ácido graso. Este atributo puede traducirse en una mayor protección y durabilidad de los motores, en comparación con otros biodiésoles provenientes de diferentes materias primas. Además, la preparación previa del aceite vegetal es clave para optimizar la reacción de transesterificación y alcanzar una alta eficiencia en la conversión a biodiésel (Osorio et al., 2020).

En Argentina, se desarrolló un biocombustible derivado del aceite de ricino con aplicaciones prometedoras en la aviación. Pruebas realizadas en condiciones extremas en la Base Antártica Marambio demostraron que este biodiésel posee mejor resistencia al frío que otras variantes vegetales, superando desafíos como el punto de niebla y la temperatura de cristalización. Dado que los combustibles aeronáuticos deben soportar temperaturas cercanas a los -50 °C a gran altitud, este biodiésel mostró un desempeño favorable en esos entornos (Sánchez et al., 2016).

Tabla 3. Transesterificación alcalina utilizada en la producción de biodiesel a partir de aceite de ricino.

Metodo	Condiciones				Rendimiento	Características del biodiesel	Referencias
	Relación aceite: alcohol	Catalizador	Temperatura	Tiempo reacción			
Transesterificación alcalina	1:12 (Aceite: Metanol)	Hidróxido de potasio 1.25%	60°C	60 min	94.90%	Alta densidad y punto de inflamación Bajo contenido de azufre Color amarillo	Elango et al., 2019
Transesterificación alcalina	1:5.4 (Aceite: Metanol)	Hidróxido de potasio 0.73%	64 °C	2.5 h	97.80%		Meneghetti et al., 2006
Transesterificación alcalina	1:8.24 (Aceite: Metanol)	Hidróxido de potasio 1.45%	35.5 °C	40 min	93.20%	Bajo índice de acidez	Días et al., 2013
Transesterificación alcalina	0.29:1 (Aceite: Etanol)	Hidróxido de potasio 1%	62.5 °C	3.7 h	85%	Alta densidad y punto de inflamación	Bateni et al., 2019
Transesterificación alcalina	1:6 (Aceite: Metanol)	Hidróxido de potasio 1%	55-65 °C	2 - 8 h	43.3-74.1%	Bajo índice de acidez Alto punto de inflamacion7	Días et al., 2013

2.7. Catalizadores

La reacción de transesterificación requiere el uso de catalizadores, que van desde ácidos homogéneos (ácido sulfúrico, ácido clorhídrico o ácido fosfórico) hasta ácidos heterogéneos (como zeolitas, resinas sulfónicas, etc.), como se muestra en la tabla 4. Sin embargo, los más recurridos son los catalizadores básicos, que pueden ser homogéneos (como hidróxido sódico o potásico) o básicos heterogéneos (por lo general óxidos de metales). Incluso se ha reportado el uso de catalizadores enzimáticos del tipo lipasas (Parangi & Mishra, 2020; Ameen et al., 2022).

Tabla 4. Tipos de catalizadores utilizados en la obtención de biodiésel.

Tipo de catalizadores	Ejemplo de catalizadores	Referencias
Ácidos homogéneos	H ₂ SO ₄ , HCl, H ₃ PO ₄	Antolin et al., 2002
Ácidos heterogéneos	Zeolitas, resinas sulfónicas, SO ₄ /ZRO ₂ TiO ₂ y catalizadores a base de carbono	Shu et al., 2016
Básicos homogéneos	KOH y NaOH	Leung et al., 2016
Básicos heterogéneos	MgO, CaO y Na/NAOH/Al ₂ O ₃	Abd et al., 2021
Enzimáticos	Lipasa, <i>Cándida, Penicillium y pseudomonas</i>	Luo et al., 2016

Los catalizadores heterogéneos tienen más ventajas que los homogéneos en términos de reutilización, ya que requieren menos pasos del proceso para la separación y purificación del producto, producen glicerol de alta pureza y permiten una fácil recuperación del catalizador. Estas ventajas tienen implicaciones económicas, lo que hace que los catalizadores heterogéneos sean una buena opción para reducir el costo unitario de la producción de biodiésel. Nuevamente, entre los catalizadores heterogéneos, los catalizadores ácidos heterogéneos tienen una ventaja económica adicional de catalizar tipos de materia prima barata, aquellos con mayor contenido de ácidos grasos libres (Gebremariam, 2018).

Hay una serie de alternativas de catalizador preparado a partir de desechos y materiales baratos. Tales materiales baratos incluyen cáscara de huevo, cáscara de residuos de vieira, cáscaras de crustáceo, biocarbón de cáscara de coco, lignina Kraft y azúcar pirolizada. Este tipo de catalizadores son baratos y la mayoría de ellos son reutilizables. El menor costo y los catalizadores reutilizables traerían considerables ventajas económicas al reducir el costo de fabricación y mejorar el rendimiento por unidad de tiempo (Gebremariam, 2018).

2.8. Alcoholes

La transesterificación, también conocida como alcohólisis, es una reacción química mediante la cual los triglicéridos presentes en los aceites vegetales reaccionan con

un alcohol, usualmente de bajo peso molecular como el metanol o etanol, aunque también puede emplearse propanol (Ramalingam et al., 2020; Ganesan et al., 2021).

El producto de esta reacción depende del tipo de alcohol utilizado: si se emplea metanol se generan ésteres metílicos, mientras que con etanol se obtienen ésteres etílicos (López et al., 2015). De todos ellos, el metanol es el más usado, debido a su bajo costo, capacidad de reaccionar a temperaturas moderadas, y facilidad para disolver catalizadores alcalinos (Ramalingam et al., 2020; Gautam et al., 2022).

Aunque los ésteres derivados de alcoholes ramificados presentan un número de cetano más alto —lo cual mejora su calidad como combustible—, el elevado precio de estos alcoholes y la necesidad de modificar el proceso los vuelve poco viables para la producción de biodiésel. El uso de un exceso de alcohol, por ejemplo al 100%, incrementa la velocidad de reacción y mejora el rendimiento de los ésteres metílicos. Sin embargo, existe una limitación: en proporciones molares superiores a 3:1, el alcohol no se mezcla bien con los triglicéridos, lo que da lugar a un sistema trifásico al inicio de la reacción cuando se usa un catalizador sólido. Esto dificulta el contacto efectivo entre los componentes y ralentiza la reacción. Aun así, un exceso de alcohol ayuda a empujar la reacción hacia la producción de biodiésel. Por tanto, es necesario encontrar un equilibrio entre una buena mezcla inicial de fases y una alta conversión del producto final (Ramalingam et al., 2020; Gautam et al., 2022).

2.9. El proceso, en síntesis

La idea central en este proceso es que una cantidad catalítica de óxido o hidróxido puede favorecer la reacción de transesterificación de un aceite. Operativamente consiste en preparar una solución diluida de hidróxido en alcohol (previendo una relación de alcohol - aceite de 4:1, como mínimo). La solución se mezcla con el aceite y se eleva la temperatura entre 60-80°C durante un tiempo predeterminado (mínimo 60 minutos), bajo agitación comprendida entre 500 y 600 rpm. Luego dejar decantar por 10-12 horas para separar el biodiésel y la glicerina. Se procede a la

recuperación del alcohol y al lavado del biodiésel (Ulu et al., 2022). En la figura 3 se esquematiza este proceso:

Como se aprecia en la figura 3, se puede recuperar en parte el alcohol utilizado, mediante una destilación o utilizando un rotavapor. Cuando se utiliza el metanol se han reportado recuperaciones entre el 60-80%, en tanto utilizando etanol, la recuperación es mayor, entre 70-90% (Zabed et al., 2017).

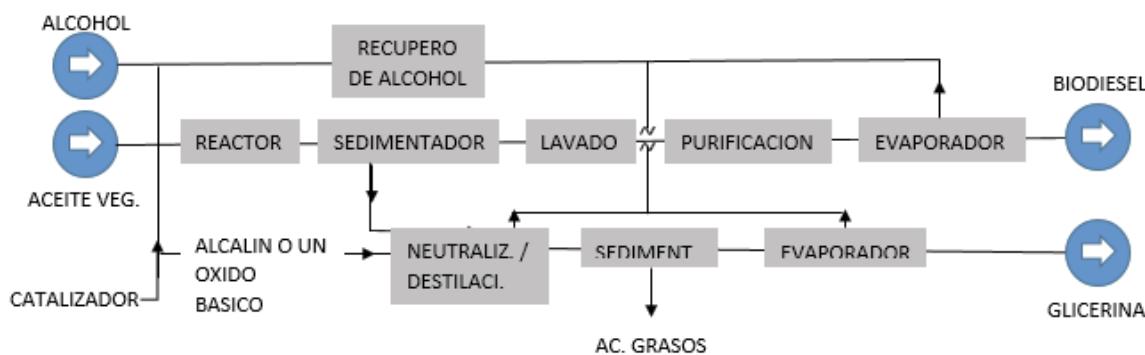


Figura 3. Esquematización del proceso optimizado de la obtención de biodiésel, partiendo de aceites vegetales.

2.10. Características y propiedades de calidad del biodiesel.

Se ha observado que en los biocombustibles las características cambian dependiendo de la materia orgánica que se esté utilizando para la obtención de biodiésel. Estas influyen directamente en el perfil de composición, un ejemplo de estas características es: punto de ebullición, poder calorífico, número de cetano, densidad (Singh et al., 2019; Singh et al., 2021).

2.10.1. Punto de ebullición

El punto de ebullición es cuando la presión de vapor del elemento es igual a la presión circundante a la temperatura correspondiente, aunque también puede comportarse como una medida de la volatilidad total del elemento de ebullición esta principalmente determinado por tipo de enlace presente entre las moléculas del elemento (Singh et al., 2019; Singh et al., 2021).

2.10.2. Poder calorífico

Este parámetro indica la cantidad de energía que se libera cuando se quema la unidad de cantidad de combustible. Cabe mencionar que el diésel convencional tiene un poder calorífico mayor al biodiésel esto dado por su alto contenido de oxígeno (Singh et al, 2019; Singh et al., 2021).

2.10.3. Número de cetano

El número de cetano es una propiedad fundamental que influye directamente en el tiempo de retardo entre la inyección del combustible en el cilindro y su encendido espontáneo. Este retardo, conocido como fase de ignición, es más corto cuando el combustible posee un alto número de cetano, lo que indica una rápida capacidad de autoignición. En cambio, un valor bajo de cetano se asocia con una combustión incompleta, mayor formación de depósitos en el motor, incremento de emisiones contaminantes y una mayor propensión a la detonación.

En el caso del biodiésel, esta propiedad mejora según el nivel de saturación y la longitud de las cadenas de los ácidos grasos presentes en la materia prima utilizada. Gracias a su mayor contenido de oxígeno, el biodiésel generalmente presenta un número de cetano más elevado que otros combustibles, lo cual se traduce en una combustión más eficiente (Sakthivel et al., 2018; Singh et al., 2019; Singh et al., 2021).

2.10.4. Densidad

Es una de las características más significativas de los combustibles ya que esta nos ayuda a conocer la cantidad aproximada de combustible entregado por los sistemas de inyección en la combustión, el combustible de alta densidad contiene más masa en comparación con el combustible de baja densidad. Por lo tanto, la cantidad de energía y la relación aire-combustible (A/F) en la cámara de combustión se ven afectadas por la densidad del combustible. En comparación con el diésel de petróleo, los biodiesel tienen más densidad. El aumento del porcentaje de biodiésel

en la mezcla de combustible mejora la densidad de la mezcla. La densidad de biodiesel está influenciada por el grado de insaturación (Kalargaris et al, 2017; Sakthivel, et al., 2018, Singh et al, 2019; Singh et al., 2021).

2.10.5. Viscosidad cinética

La viscosidad es un parámetro que nos permite conocer la capacidad de flujo de un combustible y juega un papel importante en la penetración y atomización de la pulverización de combustible . El combustible biodiesel tiene mayor masa molecular y estructura química, por lo que la viscosidad del combustible biodiesel es mayor en comparación con el combustible fósil convencional. Un valor más alto de viscosidad crea una atomización inadecuada del combustible que provoca la deposición de suciedad y disminuye la eficiencia térmica. El valor más bajo de la viscosidad produce un tamaño más pequeño de la gota, lo que facilita el suministro de combustible a la cámara de combustión. La viscosidad del éster metílico se reduce mediante el método de transesterificación (Kalargaris et al., 2017; Singh et al., 2019; Singh et al., 2021).

2.11. Normativa de biocombustibles en México

En 2008 se aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de la Bioenergética (PDBL) para apoyar la producción de biocombustibles y su uso como aditivo para gasolinas y diésel. En general, esta Ley busca: (Sosa & Vázquez, 2021)

- Promover la producción de insumos para bioenergéticos a partir de actividades agrícolas, forestales y de algas, sin poner en peligro la seguridad alimentaria.
- Desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de la bioenergética para reactivar la agricultura, generando empleo y mejorando la calidad de vida de la población vulnerable.
- Coordinar acciones entre los gobiernos federal, estatal y local, y con los sectores social y empresarial.
- Contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero (GEI).

La norma ASTM D6751 fue establecida por la American Society for Testing Materials como estándar para los biocombustibles, y su primera publicación data del año 2002. Según lo mencionado en el libro La conversión termoquímica de biomasa en combustibles líquidos y productos químicos de Mark Crocker, la edición del año 2009 introdujo un nuevo requisito obligatorio: la prueba de filtración en frío conocida como CSFT (Cold Soak Filtration Test), diseñada para evaluar el comportamiento del biodiésel a bajas temperaturas (Crocker, 2010).

3. Planteamiento del problema

Las energías renovables más comunes y utilizadas por la humanidad son la hidráulica, la eólica, la solar y la proveniente de la biomasa. De estas, la biomasa destaca por su potencial en el sector del transporte, ya que permite la producción de combustibles como el etanol, metanol, biodiésel, biogás y combustibles sólidos (Efeovbokhan et al., 2015).

El aumento constante en la demanda energética debido a las diversas actividades humanas, el crecimiento poblacional, el agotamiento acelerado de las reservas petroleras, el aumento en el costo de los combustibles fósiles y la preocupación creciente por la contaminación ambiental han generado una crisis energética a nivel mundial. Esto ha impulsado a científicos e investigadores a buscar fuentes de energía que sean más eficientes, renovables, biodegradables y sostenibles, tanto en términos ambientales como económicos, como alternativas parciales o totales a los combustibles tradicionales (Bolonio et al., 2015; Piloto et al., 2016).

Ante la problemática ambiental que afecta no solo a México sino al mundo entero, se han intensificado las iniciativas relacionadas con la ecología industrial, la producción limpia y las emisiones cero. Por esta razón, muchas instituciones de educación superior enfocan sus esfuerzos en desarrollar nuevos métodos para producir biocombustibles que minimicen el impacto ambiental y ofrezcan beneficios adicionales, siendo este uno de sus principales desafíos.

4. Justificación

Dentro de un contexto de globalización, la humanidad moderna utiliza combustibles fósiles para satisfacer la mayoría de sus demandas energéticas, teniendo en cuenta que todas estas fuentes de combustibles fósiles son finitas y debido a la velocidad de consumo de los mismos las estadísticas prevén que pronto serán consumidas en su totalidad. Hablando de economía, el crecimiento de la misma siempre está acompañado por un aumento proporcional en el transporte. La gran demanda de energía en los países industrializados, así como en el sector doméstico, y los problemas de contaminación causados por el uso estandarizado de los combustibles fósiles cada vez más hacen necesario el desarrollo y la implementación de las fuentes de energía renovables de duración ilimitada y que generen bajos o nulos impactos ambientales, en comparación con las fuentes de energía tradicionales. El biodiésel ofrece varias ventajas importantes: es el único combustible alternativo que puede usarse en cualquier motor diésel convencional sin necesidad de modificarlo. Se puede emplear puro o mezclado en cualquier proporción con el diésel convencional. Además, su ciclo biológico reduce alrededor del 80% las emisiones de dióxido de carbono y casi elimina las de dióxido de azufre. En comparación con el diésel fósil, el biodiésel produce menos partículas y monóxido de carbono. Estudios realizados en Estados Unidos han demostrado que su uso disminuye hasta en un 90% el riesgo de cáncer. Contiene aproximadamente un 11% de oxígeno en peso, no tiene azufre, ayuda a prolongar la vida útil de los motores y ofrece mejores propiedades lubricantes que el diésel tradicional. Se plantea entonces lograr un proceso optimizado para la obtención de biodiesel, partiendo directamente de las semillas de *Ricinus communis* maceradas o molidas y no necesariamente del aceite previamente extraído, esta optimización permite simplificar el proceso además de que reduce el uso de solventes gasto de energía, reducción de tiempos.. Así mismo, probar y promover el uso de catalizadores básicos heterogéneos, económicos y amigables con el medio ambiente como la cal u otros similares y valorar la utilización de un alcohol menos tóxico que el metanol, en su caso el etanol u otro de bajo peso molecular, de manera tal de obtener rendimientos efectivos, y a su vez económicos y más ecológicos.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Optimizar el método de obtención de biodiésel a partir de un proceso de tecnología verde empleando directamente semillas de higuerilla de tres municipios del estado de Hidalgo y catalizadores básicos heterogéneos de bajo costo como alternativa de combustible limpio en la industria automotriz.

5.2. Objetivos específicos

1. Seleccionar tres semillas de higuerilla del tres diferentes municipios del estado de Hidalgo para la evaluación agrícola, etnobotánica y de porcentajes de contenido de aceite, así como estimar el rendimiento de obtención de biodiesel a partir de un proceso directamente de las semillas o *in situ*.
2. Seleccionar y evaluar tres alcoholes de bajo peso, así como tres catalizadores básico heterogéneos de bajo costo y amigables con el ambiente, además de que sean de un fácil acceso para llevar a cabo las reacciones de transesterificación con semillas de *Ricinus communis*.
3. Diseñar experimentos para la optimización del proceso de obtención de biodiésel, a partir de la metodología de parámetros de Taguchi, que nos permita optimizar el proceso en relación con cada especificación.
4. Realizar caracterización del biodiésel obtenido mediante la evaluación de parámetros con el fin de evaluar su calidad por medio de caracterización fisicoquímica, para determinar valores de acuerdo con parámetros ya reportados en las normas internacionales.

6. Hipótesis

Es posible obtener biodiésel a partir de semillas de higuerilla mediante un proceso verde y el empleo de al menos un catalizador básico heterogéneo y un alcohol de bajo peso molecular.

7. Metodología

7.1. Recolección de muestras de variedades de semillas de Higuerilla

Las muestras de las semillas de higuerillas fueron obtenidas en el Estado de Hidalgo, en los Municipios de Atotonilco el Grande, Tulancingo y Santiago Tulantepec (figura 5). Se realizaron muestras en los sitios de una manera aleatoria, lo cual permite obtener datos representativos sin sesgo, asegurando que cada planta del área de estudio tuviera la misma probabilidad de ser seleccionada, tomando muestras de plantas completas (raíz, tallo, hoja, espiga y granos), ver figura 4. Se realizó la colecta de racimos y semillas principalmente además de caracterizar geográficamente la zona de muestreo. La colecta de la semilla de higuerilla, se realizó de manera manual con el apoyo de tijeras podadoras y cuchillos. Se colocaron al sol los racimos de higuerilla, para secar la testa y romperla, de esta forma sacar la semilla, las cápsulas que no sean posibles romper al momento de secarse, se rompieron manualmente con el apoyo de unas pinzas de disección. Estas colectas se realizaron en los meses de noviembre del 2019 a mayo de 2020.

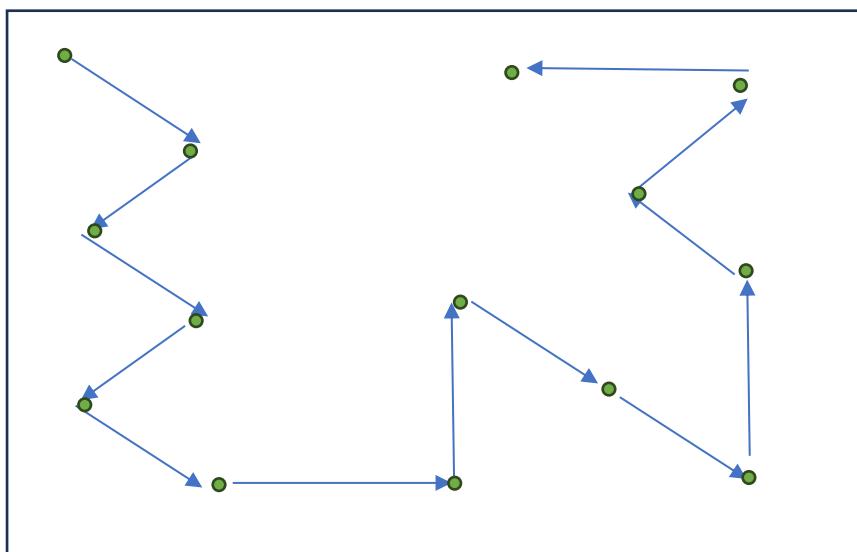


Figura 4. Forma general de recolección o toma de muestras de platas por municipio.

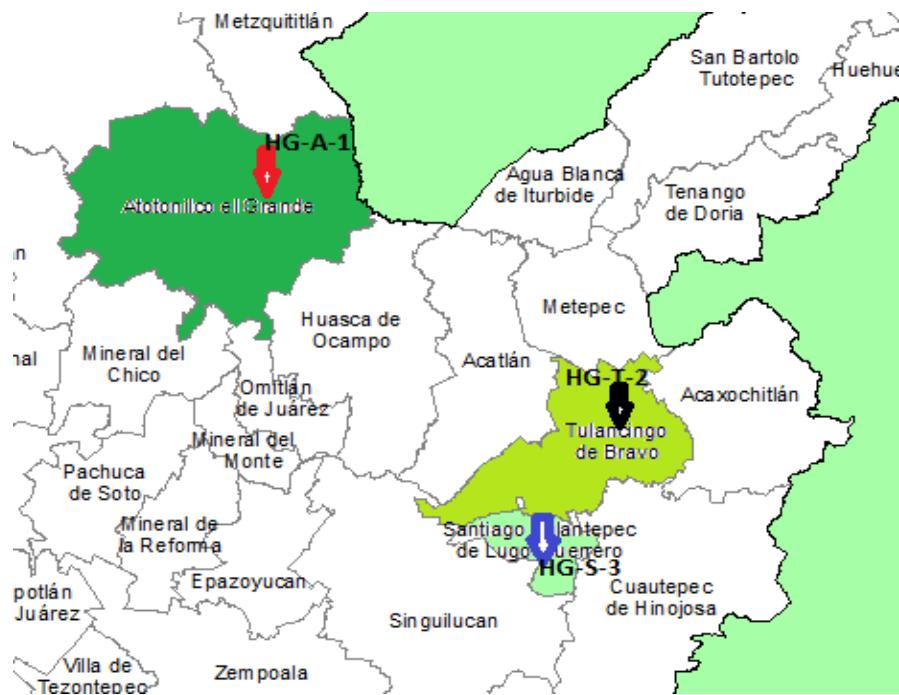


Figura 5. Mapa del Estado de Hidalgo donde se realizaron las colectas de semilla de higuerilla.

7.2. Análisis agrícola de *Ricinus communis*

7.2.1. Trabajos de campo y recolección de datos etnobotánicos

Siguiendo la metodología de entrevistas de tipo cerrado (Ávila et al., 2020) con 14 preguntas realizadas a cada encuestado, se entrevistaron a 435 personas de las cuales 201 son mujeres y 224 hombres. Las preguntas incluyeron: nombre o nombres comunes de la higuerilla, usos, época de floración y producción de semilla, origen (cultivada, silvestre, introducida, etc.). Los datos se recopilaron entre enero y febrero de 2022.

7.2.2. Procesamiento de encuestas y análisis estadístico

Para el análisis de datos se utilizó el paquete estadístico Past4. Se aplicaron pruebas estadísticas no paramétricas tales como índice de similitud de Jaccard y Sorencen.

Además de aplicar la Correlación de Pearson, Kendall y Spearman (Ávila et al., 2020), para evaluar la correlación entre cada uno de los usos de higuerilla.

7.3. Análisis Agronómico

Cada colecta se caracterizó con los siguientes parámetros: datos la planta (número, tamaño), hojas (longitud, número y color), racimo (número, tamaño, peso y color) y semilla (longitud y color), para poder determinar si existen diferentes variedades en el estado de Hidalgo. Este procedimiento se realizó para cada planta en cada sitio de muestreo.

Se realizó una caracterización varietal de acuerdo a la Guía de caracterización varietal de la UPOV-SAGARPA, la caracterización realizada se basa principalmente en aspectos morfológicos y fenotípicos observables en campo. Entre las características evaluadas en higuerilla se encuentran el color y forma de las hojas, la pigmentación del tallo, el color y tamaño de las inflorescencias, la forma y color de las semillas, así como la presencia o ausencia de glándulas en cápsulas y hojas. También se consideran rasgos del crecimiento como el hábito de la planta (erecta o ramificada), la altura, el número de ramas, y el tiempo hasta la floración o madurez. (UPOV, 2018).

7.4. Análisis Morfológico

Caracterización física de la semilla

En cada colecta, se midieron la altura, el ancho y el grosor de la semilla utilizando un vernier, tomando como muestra 20 semillas por colecta. También se determinó el peso promedio de la semilla, pesando un lote de 100 semillas de cada recolección. El color se evaluó de manera visual.

Las características de planta consideradas fueron altura de planta: longitud de racimos, peso de racimos, peso de 100 semillas y el rendimiento de grano, como lo establece (Goytia-Jiménez et al., (2011) y SAGARPA, (2014).

7.5. Caracterización de las materias primas

Las materias primas serán caracterizadas de la siguiente manera.

7.5.1. Determinación de humedad

Se colocaron tres cápsulas de porcelana a peso constante y se calentaron en un horno de laboratorio marca Felisa a una temperatura de 100-105 °C. Posteriormente, en cada crisol se pesaron entre 2 y 5 gramos de muestra (semillas por variedad y catalizadores por tipo). Las muestras fueron colocadas nuevamente en el horno durante un periodo de 4 horas, siguiendo la norma ASTM D 5142 – 02.

7.5.2. Determinación de cenizas

Se colocaron tres crisoles de porcelana a peso contante a una temperatura de 100-105°C en un horno de laboratorio marca Felisa, posteriormente en los crisoles se pesaron 2- 5 g de la muestra (semillas por variedad y catalizadores por tipo), enseguida con el apoyo de un mechero bunsen, un triángulo de porcelana y un soporte universal, se quemó la muestra hasta no haber desprendimiento de humos, a continuación se metió a una mufla marca vulcan-a130 a una temperatura de 550 °C por un periodo de 3 horas, para las semillas y de 900 °C para los catalizadores. (ASTM D3174).

7.5.3. Determinación de grasa

Esta extracción se llevó a cabo con el extractor “Extractor Extraction Unit E-186” de la marca BUCHI donde todo el proceso de extracción se controla mediante un panel de control que sigue un programa predefinido. Este programa consta de tres etapas individuales: extracción, enjuague y secado, las cuales se ejecutan automáticamente conforme a los parámetros establecidos. Previo al proceso de extracción los vasos a utilizar para la extracción se pusieron a peso constante. La semilla se maceró en un mortero utilizando 5 gramos por cada muestra, se colocaron 2 muestras por cada variedad de semilla colectada la semilla de higuerilla macerada se colocó en cartuchos de extracción de celulosa; en los vasos previamente puestos a peso constante, se agregaron 100 ml de hexano destilado,

por último, se colocaron en el extractor para el proceso de extracción por 4 horas (Silva et al., 2021).

7.5.4. Determinación de proteína.

Para la determinación de proteína, se preparó una solución de carbonato de calcio para la unidad de captura de gases, hidróxido de sodio al 32%, ácido bórico al 2%, ácido sulfúrico al 0.1 N. Para la digestión se pesaron 10 gr de sulfato de potasio, 0.2 gr de sulfato de cobre, 1.5 g de la muestra y 20 mL de ácido sulfúrico concentrado, se colocaron en el tubo de digestión, en seguida se posicionaron en el digestor previamente precalentado, los tubos se retiraron del digestor hasta observar un color verde esmeralda, posteriormente la muestra se colocó en el destilador Kjeldahl, colectando el líquido destilado, enseguida se procedió a titular con ácido sulfúrico al 0.1 N (Ayala et al., 2022).

7.6. Selección de alcoholes

Se seleccionaron metanol HPLC JT BAKER, etanol anhidro JT BAKER e isopropanol de la marca JT BAKER principalmente porque son alcoholes de bajo peso molecular, además de que son de fácil acceso y bajo costo. En el caso de metanol y etanol utilizados mayormente en investigaciones previas para la obtención de biodiésel, en el caso de isopropanol no existen reportes de su uso para la obtención de biodiésel.

7.7. Selección de catalizadores básicos heterogéneos

Se probaron tres tipos de catalizadores heterogéneos básicos: Ca(OH)2, MgCO3 y BaCO3. Los tres catalizadores a evaluar se obtuvieron de los productos ofrecidos en el mercado, el Ca(OH)2 de una marca comercial “Cal del Valle”, producida en el Valle del Mezquital en el estado de Hidalgo, en el caso de MgCO3 y BaCO3 se adquirieron en Química Suastes, S.A. de C.V. Los tres productos fueron de fácil acceso, además de que en el caso de Ca(OH)2 y MgCO3 ya han sido utilizados de manera previa en la transesterificación tradicional.

7.8. Caracterización del aceite de higuerilla

Los análisis fisicoquímicos elaborados al aceite de higuerilla fueron realizados siguiendo la metodología de la norma D445 (ASTM International, 2000): Densidad relativa, determinada por el método del picnómetro, índice de acidez o acidez total, viscosidad, medida con un viscosímetro convencional marca BROOKFIELD LV, RV.

7.8.1. Análisis por espectrofotometría infrarroja (FTIR)

Los análisis de FTIR se realizaron usando un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) NICOLET, modelo Protege 460 Magna en un rango de longitud de onda de 4000 cm⁻¹ a 400 cm⁻¹. Se realizaron al aceite extraído de las semillas colectadas y al biodiesel obtenido, para evaluar la pureza y autenticidad de aceite, así como su composición química (grupos hidroxilo, carbonilo, metilo y metileno) (Orozco, 2015).

7.8.2. Análisis por Resonancia Magnética (RMN-H1)

Se realizó un análisis de resonancia magnética nuclear ¹H a las muestras obtenidas del proceso de transesterificación *in situ*. Los espectros de RMN ¹H se obtuvieron en un espectrofotómetro JEOL Eclipse 400 a una frecuencia de ¹H 399.78 MHz, los desplazamientos están dados en ppm, utilizando como referencia la frecuencia del TMS para ¹H, lo cual nos permite conocer el grado de instauración y pureza de los aceites (Martínez et al., 2018).

7.9. Diseño experimental para obtención de biodiésel

El método de Taguchi es un tipo de diseño de experimentos que utiliza técnicas que implican bajos costos y que son aplicables a los problemas y requerimientos de la industria moderna (Taguchi, 2009; Penton, 2012; Hernández et al., 2017). El diseño experimental que se empleó siguió la metodología de parámetros de Taguchi, como se describe a continuación: elección de parámetros o variables a optimizar, elección de los Factores de Control, Señal y Ruido.

Los factores de control considerados en esta optimización fueron: la temperatura se mantuvo constante a 60 °C y el tiempo de reacción de 2 horas, estos de acuerdo con lo recomendado por (Hernández et al., 2017). De esta manera, para el proceso de obtención de biodiésel se tomaron en cuenta cuatro factores de control, cada uno evaluado a tres niveles diferentes:

1. Relación alcohol/semilla (considerando los porcentajes de aceites por cada variedad de semilla)
2. Tipo de catalizador
3. Cantidad de catalizador
4. Tipo de alcohol

En la tabla 5 pueden observarse los niveles elegidos por cada factor de control, así como los tres niveles para el factor ruido que fueron estudiados.

Tabla 5. Factores y niveles en el diseño experimental de optimización.

Factores	Tipo de alcohol	Cantidad de catalizador	Relación alcohol-semillas	Tipo de catalizador	Ruido semilla (R)
Niveles	(A)	% peso (B)	(C)	(D)	
1	Metanol	1	4:1	Ca(OH) ₂	HG-A1
2	Etanol	1.5	6:1	MgCO ₃	HG-T2
3	Isopropanol	2	8:1	BaCO ₃	HG-S3

➤ Elección del Arreglo Ortogonal:

La selección del arreglo ortogonal para el proceso de transesterificación, con el objetivo de alcanzar el máximo rendimiento, se realizó considerando cuatro factores, cada uno con tres niveles. Se eligió el diseño que tuviera un número de grados de libertad igual al requerido por el sistema, pero que al mismo tiempo minimizara la cantidad de experimentos necesarios.

Este diseño se corresponde con un arreglo ortogonal del tipo L₉(3⁴), que implica la realización de 9 experimentos, a los tres niveles de ruido, es decir, resultan de ello

un total de 27 experiencias y respuestas. La matriz del diseño experimental se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Matriz del diseño experimental para la obtención de biodiésel.

	FACTORES DE CONTROL				FACTOR DE RUIDO		
	A	B	C	D	R ₁	R ₂	R ₃
1	1	1	1	1	1	2	3
2	1	2	2	2	4	5	6
3	1	3	3	3	7	8	9
4	2	1	2	3	10	11	12
5	2	2	3	1	13	14	15
6	2	3	1	2	16	17	18
7	3	1	3	2	19	20	21
8	3	2	1	3	22	23	24
9	3	3	2	1	25	26	27

A: Tipo de alcohol a utilizar; B: Cantidad de catalizar (% en peso); C: Relación alcohol/semilla; D: Tipo de catalizador y R: Variedad de semillas de higuerilla cultivada en el Estado de Hidalgo. Tomado de Méndez y Muñoz, (2019).

7.10. Caracterización del biodiésel obtenido

7.10.1. Color y apariencia

La prueba de color se realizó con base en la norma estadounidense ASTM D1500 (2013). El resultado se mide empleando una escala de colores. La prueba de apariencia consiste en hacer una revisión visual para identificar la presencia de agua o contaminación de partículas, esto según el procedimiento de la norma ASTM D4176 (2009).

7.10.2. Densidad

La densidad del biodiésel extraído se determina con la ayuda de un densímetro (Mettler Toledo, 30PX) empleando 50 mL de muestra, para lo cual es necesario retirar el exceso de disolvente en esta. (Flores, 2018)

7.10.3. Viscosidad cinemática

La viscosidad del biodiésel se determina con la ayuda de un viscosímetro, instrumento diseñado para medir la resistencia que presenta un líquido a fluir. Esta propiedad física es fundamental, ya que influye directamente en el rendimiento del combustible dentro del sistema de inyección del motor, afectando su atomización,

combustión y lubricación, para esto proceso de acuerdo a la metodología, se utilizaron 50 mL de muestra previamente calentada a 40 °C, para después tomar el dato (Flores, 2018)

7.10.4. Índice acidez

El índice de acidez indica la cantidad en miligramos de KOH necesaria para neutralizar los ácidos grasos libres en 1.0 g de aceite o grasa. Esta prueba se realizó de acuerdo a lo establecido en la NMX-F-101-SCFI-2012 (DOF, 2012). A 56.4 mL de muestra se añadieron 50 mL de alcohol etílico (95°). Posteriormente, la mezcla se titula empleando una solución de KOH 1N utilizando 1 mL de fenolftaleína como indicador. El índice de acidez se calculó utilizando la ecuación 1 y se expresa en mg de KOH. (Flores, 2018)

$$\text{Índice de acidez} = \frac{56.1 * N * V}{P} \quad \text{Ec. 1.}$$

56.1: equivalente químico de la potasa.

N: Normalidad de la solución de hidróxido de potasio.

V: cm³ de solución valorada de hidróxido de potasio gastados en la titulación de la muestra.

P: Masa de la muestra en g.

8. Resultados y Discusiones

8.1. Caracterización etnobotánica

Para poder llevar a cabo esta caracterización se realizó la aplicación de una encuesta etnobotánica. La cual nos permitió conocer el gran conocimiento que se tiene en las comunidades indígenas sobre la planta de higuerilla, así comprender la importancia que tiene, al no ser considerada solo como una maleza. La medicina tradicional se basa en el conocimiento profundo sobre la salud y las enfermedades que han desarrollado a lo largo del tiempo diversos pueblos indígenas y mestizos. Este saber está sustentado en su cosmovisión, la cual ha sido transmitida y preservada a lo largo de la historia. En este trabajo se evidenció con claridad la diferencia en la percepción del uso etnobotánico de la especie: mientras que en contextos urbanos es catalogada como una maleza sin valor, en las comunidades rurales de la región es reconocida como un recurso fitoterapéutico.

En la tabla 7 se colocan los principales usos que los habitantes de las zonas de colectas nos expresaron, al contrastar los reportes de la literatura sobre los compuestos bioactivos presentes en la higuerilla y los usos cotidianos en las comunidades. Los principales compuestos bioactivos reportados son: flavonoides, alcaloides, glicósidos, monoterpenos, compuestos fenólicos, ácidos grasos entre otros (Abomughaid et al., 2024). La planta exhibe propiedades hepatoprotectoras, antifiláricas, efectos antioxidantes, actividad antiasmática y acciones antimicrobianas. Además, las raíces de la planta se incorporan en varias formulaciones para tratar trastornos nerviosos y afecciones reumáticas como pleurodinia, lumbago y ciática. Las raíces también demuestran eliminación de radicales libres y propiedades antiinflamatorias, efectos antifertilidad y propiedades antidiabéticas. La presencia de compuestos fitoquímicos en el aceite de ricino como saponina, glucósido cianogénico, flavonoide, oxalato, fitato, alcaloide y tanino puede ser responsable de la actividad antimicrobiana del aceite (Franke et al., 2019; Abomughaid et al., 2024; Safdar y Qasim, 2024; Yeboah et al., 2021). Además, se ha reportado el uso de la semilla como plaguicida, especialmente para prevenir la

aparición de plagas en el almacenamiento de maíz. En los últimos años, también se ha implementado el uso de pasta de higuerilla desintoxicada como alimento.

Los usos más mencionados fueron los relacionados con la parte medicinal (para tratar el resfriado, cólicos menstruales, infección de heridas e indigestión) y como leña, resultando así el uso principal de la higuerilla en general en el estado de Hidalgo. A la fecha, se han caracterizado varios componentes aislados de la planta/semillas, dentro de los que destacan aceite de ricino, ricina, aglutinina, ricinina, nudiflorina y varios compuestos alergénicos. Entre los pueblos indígenas (p. ej., en Nepal), el uso de semillas de ricino se ha descrito como un anticonceptivo oral. En la medicina alternativa, el efecto promotor del golpe del aceite de ricino se conoce y explora como el llamado cóctel de golpe en obstetricia (Franke et al., 2019).

Tabla 7. Usos dados a la higuerilla de acuerdo a la información recabada en la encuesta

Uso	Parte utilizada	Forma de uso
Extracción de aceite	Semilla	Se utiliza para proceso de obtención de biodiesel.
Barreras vivas	Planta viva	Se colocan en la periferia de las parcelas, para la protección de los cultivos de vientos, erosión.
Plaguicida	Semilla	Se tritura la semilla previamente seca y el polvo se coloca a las semillas a conservar para evitar plagas en el almacén de maíz
Artesanías	Fruto, Racimos	Se realizan artesanías a partir del fruto seco.
Alimento animal	Flor, semilla	Pasta de higuerilla desintoxicada para realizar principalmente pellets.
Leña	Tallo, ramas	Se utilizan partes secas de la planta para su uso doméstico
Medicinal	Hojas, raíz	Para tratar el resfriado, cólicos menstruales, infección de heridas e indigestión, principalmente en infusión.

El aceite de ricino tiene múltiples aplicaciones en los sectores cosmético y farmacéutico, donde se emplea en la elaboración de productos como labiales, tónicos para el cabello, champús, brillos, desodorantes, ceras, tratamientos contra la caspa, así como en la formulación de laxantes, purgantes, catárticos y emolientes. Asimismo, se utiliza en la industria de pinturas, tintes y en el tratamiento de textiles, aunque en este último ámbito su aprovechamiento aún no ha sido desarrollado dentro de las comunidades (Rosas et al., 2018).

Correlación de spearman

En cuanto a la correlación de Spearman, esta se representa en una matriz que permite identificar la relación existente entre pares de variables. Los valores que se obtienen oscilan entre -1 y +1. Una correlación positiva indica que ambas variables aumentan o disminuyen en conjunto, mientras que una correlación negativa señala que al incrementarse una, la otra tiende a disminuir (Mondragón, 2014).

Se aplicaron tres diferentes correlaciones estadísticas con el fin de conocer la similitud entre los diferentes usos reportados. Se empleó la correlación del coeficiente de Spearman, para evaluar la correlación entre los diferentes usos, se encontró una correlación positiva entre barrera viva y biodiesel ($r=1$), artesanía y alimento animal ($r=1$), y para extracción aceite y barrera viva ($r=0.72$), estos tres pares de usos nos indican un grado alto de similitud, se puede observar en la intensidad de los colores, así como en el tamaño de la muestra.

Correlación de Kendall

Esta correlación se utiliza para variables cualitativas y que son de una escala de evaluación o medición ordinal (figura 7). Podemos evidenciar que si existe una correlación positiva entre los diferentes usos de higuerilla como fue evaluada con el rango de correlación no paramétrica de Kendall, los resultados fueron significativos para barrera viva y biodiésel ($Tau= 1 p= 0.05$), así como para artesanía y alimento animal ($Tau= 1 p= 0.05$). Y esto a su vez significa que, ante un incremento de una de las variables, la otra variable se verá afectada. Es decir, existe un impacto

positivo, con una correlación muy débil lo cual concuerda con lo indicado por Bolton y Faust, 2018.

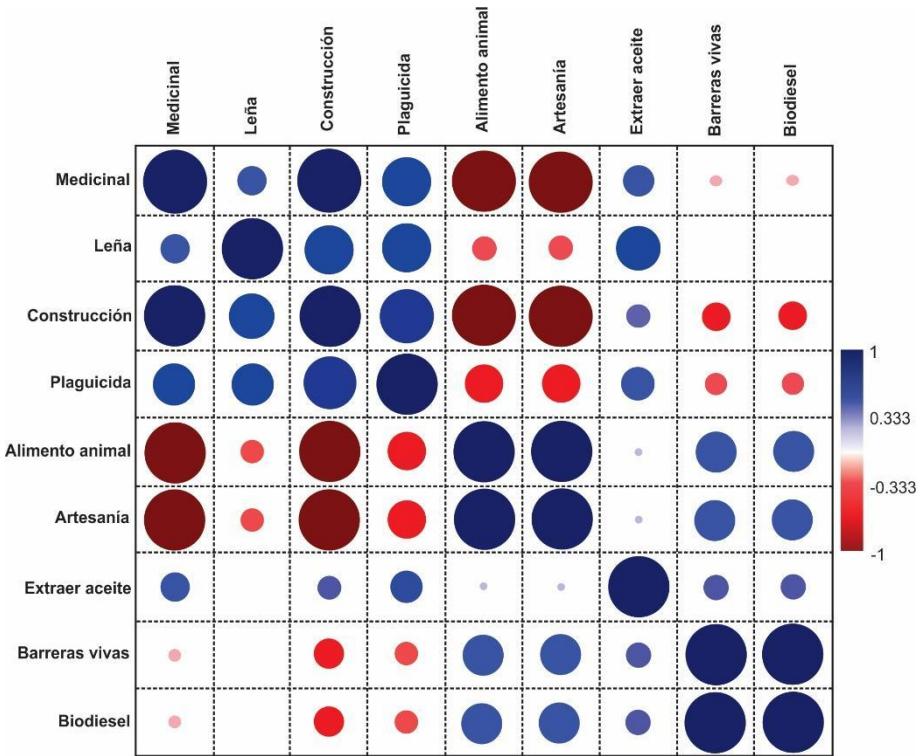


Figura 6. Matriz de la correlación del coeficiente de Spearman para usos de higuerilla

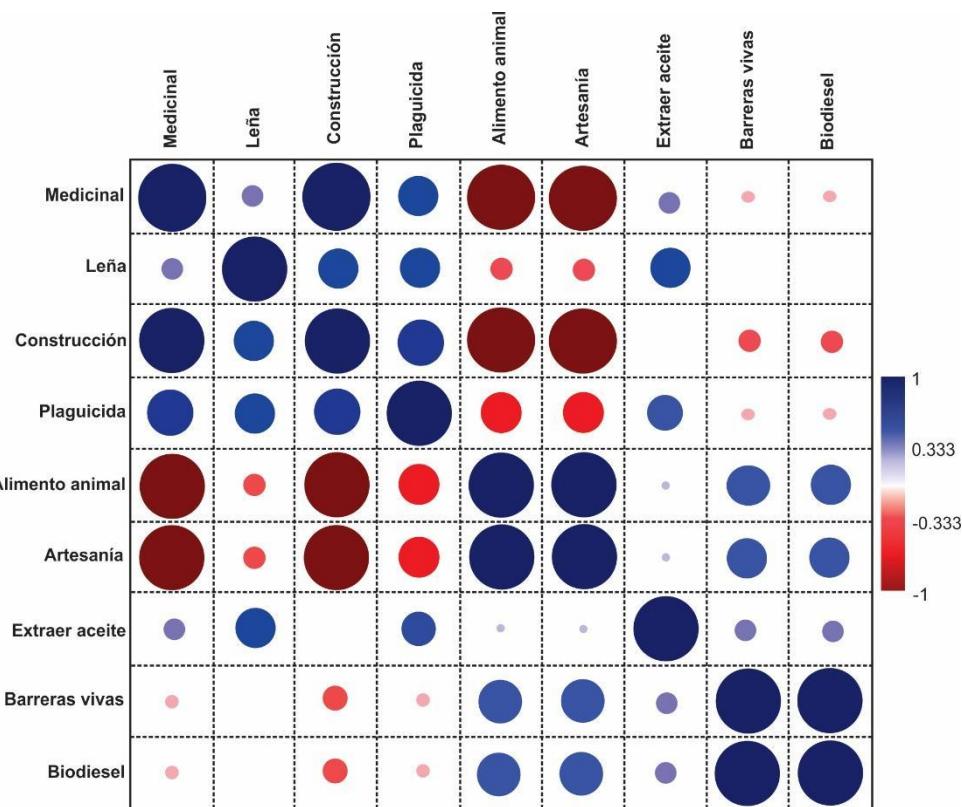


Figura 7. matriz de correlación no paramétrica de Kendall para usos de higuerilla

Correlación Lineal R de Pearson

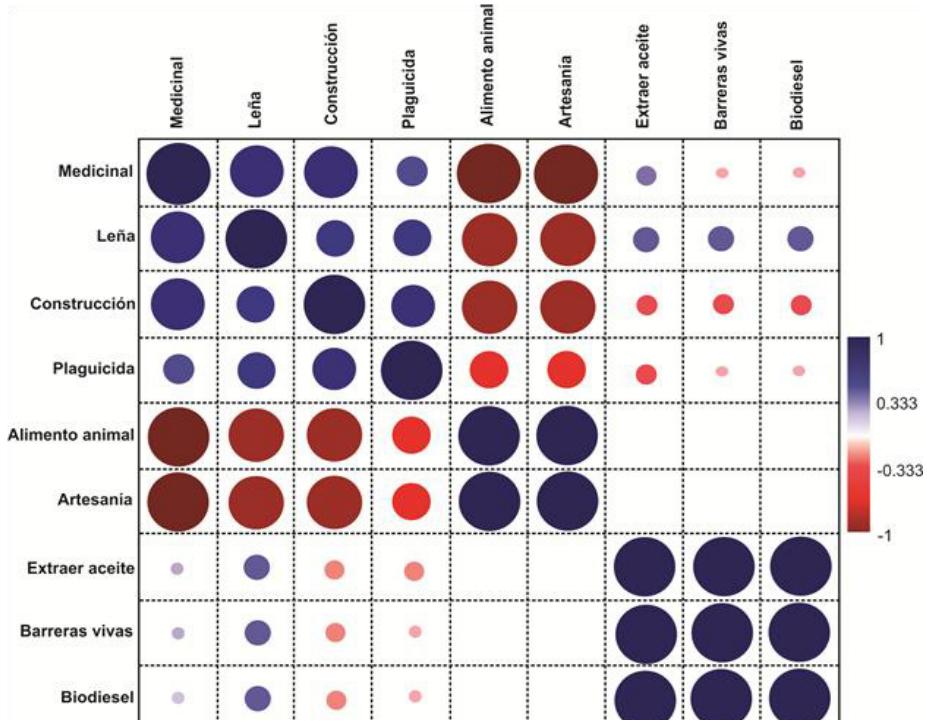


Figura 8. Matriz de correlación no paramétrica Lineal R de Pearson

De acuerdo con la interpretación de resultado de la prueba lineal de Pearson los valores cercanos a cero indican poca o ninguna de correlación lineal, en tanto que valores cercanos a uno indican un alto grado de correlación lineal (Falla, 2012).

En la matriz de la figura 8 se muestran los resultados de la relación con los diferentes usos por medio de la prueba lineal R de Pearson, los resultados fueron significativos para extracción de aceite, barrera viva y biodiésel ($Tau= 1$ $p= 0.05$), así como para artesanía y alimento animal ($Tau= 1$ $p= 0.05$), este último mostrando similitud al igual que en las otras dos correlaciones realizadas. Lo que nos indica que la intensidad de relación es mayor.

La aplicación de estas pruebas para la evaluación de la relación entre los diferentes usos del *Ricinus*, además de que resulta útil para reconocer la similitud y diferencia entre usos.

8.2. Caracterización agronómica y morfológica de *Ricinus communis*

Para esta investigación se realizó una colecta de semillas de *Ricinus communis*, presente de manera silvestre en el estado de Hidalgo, realizado colectas en tres municipios con diferentes condiciones ambientales las colectas de semillas se realizaron en Atotonilco el Grande (HG-A1), Tulancingo de Bravo (HG-T2), Santiago Tulantepec (HG-S3). Los individuos muestreados se encontraban solitarios o en poblaciones establecidas de forma espontánea a la orilla de carreteras, en patios, riberas de ríos o espacios abiertos entre 1604 y 2150 msnm, ya que normalmente es una planta que se desarrolla de manera silvestre, aunque en algunos sitios por razones de estudio, caso no presente en el estado, se pueden encontrar en cultivos establecidos como un sistema de producción.

En la tabla 8 se indican las comunidades donde se realizaron las colectas y algunos datos del lugar y de las muestras de las plantas de higuerilla consideradas; esto con el propósito de conocer las condiciones de relieve y ambientales principalmente ya que estas pueden tener efecto en el desarrollo de la planta. En relación con la altitud de los sitios en los que se realizaron las recolectas, ésta osciló de 1973 a 2163

msnm. Lo cual corresponde con lo mencionado por Correa (2014) y García et al. (2019) ya que indican que la planta tiene una buena producción y calidad de aceites en las diferentes alturas a las que encontramos las plantas y reporta presencia de la misma hasta los 2352 msnm.

Tabla 8. Características del sitio de colectas de higuerilla (*Ricinus communis*).

Colecta (Lugar)	Identificación	Altitud (msnm)	Latitud Norte	Longitud Oeste	Plantas por sitio	Ruderal
El Zoquital, Atotonilco el Grande	HG-A1	1973	20° 22' 20''	98° 43' 13''	50	Orilla carretera y campo de uso agrícola
Los Sabinos, Tulancingo de Bravo	HG-T2	2144	20° 07' 19''	98° 21' 53''	20	Orilla carretera, orilla de canal y campo de uso agrícola
San Miguel Huatengo, Santiago Tulantepec	HG-S3	2163	20° 03' 48''	98° 22' 53''	10	Orilla carretera y campo de uso agrícola

Los ejemplares recolectados se localizaron de forma aislada dentro de poblaciones que se habían establecido de manera natural. Estas se encontraban distribuidas en márgenes de carreteras, patios, riberas de ríos y áreas abiertas, en altitudes comprendidas entre los 1973 y 2163 metros sobre el nivel del mar. A pesar de que la ubicación geográfica es bastante similar, se observó que en Atotonilco el Grande se recolectó una gran población de plantas, mientras que en Santiago de Anaya se registró una menor cantidad. Esta diferencia se atribuye principalmente a las condiciones agrícolas de la zona.

En relación con la altitud de los sitios de muestreo confirman la gran adaptabilidad que tiene la higuerilla a crecer de manera silvestre. Este rango coincide con lo señalado por otros autores (Goytia et al., 2011, Vasco et al., 2017, Edwin Javier Barrios et al., 2018; García et al., 2019), quienes indican que la planta tiene una alta adaptabilidad a diferentes condiciones de altitud, reportando su presencia en zonas de 435 hasta los 2352 msnm de forma silvestre y con buena producción. Es importante destacar que las colectas se realizaron en las orillas de caminos, canales de riego y parcelas.

La tabla 9 presenta los datos correspondientes a la colecta de las muestras de plantas de higuerilla analizadas. Las características observadas pueden contrastarse con las guías oficiales para la descripción varietal de esta especie (Goytia et al., 2013; SAGARPA-SNICS, 2014; 2018), lo que permite identificar rasgos distintivos y determinar si existen diferencias significativas entre las colectas, facilitando así la clasificación varietal de las mismas.

Dentro de los resultados encontrados se puede observar que para la altura de planta los datos oscilan entre los 200 a 350 cm, los cuales corresponden con lo que reportan Correa, (2014), De la Cruz, (2019), ya que ellos reportaron alturas de higuerilla que oscilaron entre los 90 y 230 cm en 15 genotipos evaluados por lo tanto los valores observados en este estudio se encuentran dentro del rango de alturas reportadas en otras investigaciones

Tabla 9. Caracterización de colectas en base a planta, hoja, racimo y semilla.

Colecta	Planta			Hojas			Racimos			Semilla			
	Altura (cm)	Número	Ancho (cm)	Largo (cm)	Tamaño	Color	Numero	Tamaño (cm)	Peso (gramos)	Color	Color	Tamaño (mm)	Ancho (mm)
HG-A-1	250 ^b	116 ^c	23.7 ^b	27 ^b	25.3	Verde purpureo	48 ^c	70 ^c	1500 ^d	Púrpura	Gris oscuro	11 ^b	6 ^a
HG-T-2	350 ^d	86 ^b	35 ^c	32 ^c	33.5	Verde oscuro	44 ^c	55 ^b	1000 ^c	Verde azulado	Gris oscuro	10 ^{ab}	8 ^b
HG-S-3	200 ^a	52 ^a	17 ^a	20 ^a	18.5	Verde medio	35 ^b	35 ^a	700 ^{ab}	Verde Rojizo	Marrón medio	9 ^a	8 ^b

a, b, c, d. Letras diferentes en columnas, indican diferencias significativas (p<0.05)

Estos parámetros se ven influenciados por las condiciones climáticas, especialmente por la temperatura y la precipitación en las distintas zonas de muestreo. Se ha observado que la higuerilla presenta un crecimiento limitado en regiones de bajas temperaturas, mientras que en ambientes más cálidos y con mayor humedad, su desarrollo es más vigoroso. En este sentido, Osorno (1986) identificó una correlación positiva entre la temperatura y el crecimiento de esta planta, señalando que el rango óptimo para su desarrollo se encuentra entre los 20 °C y 30 °C.

8.2.1. Caracterización varietal de *Ricinus communis*

En México se ha identificado una notable diversidad genética en el ricino (Pecina Quintero et al., 2013), lo cual resalta la relevancia de evaluar los genotipos silvestres presentes (Goytia et al., 2011). Muchos de estos genotipos recolectados en el país presentan un carácter perenne, lo que permite realizar cosechas de forma continua, representando una alternativa productiva viable como cultivo. Esto contrasta con los genotipos de ciclo anual, que requieren resiembra en cada temporada (Barrios et al., 2018).

En el análisis varietal de acuerdo a las directrices morfológicas observadas en las colectas se puede determinar que de acuerdo con la UPOV, 2018 (Unión Internacional Para La Protección De Las Obtenciones Vegetales), dos de las tres muestras colectadas presentan un tamaño medio, la variedad que difiere en esta clasificación es HG-T2 la cual se considera alta, teniendo estos resultados de acuerdo a las directrices de la UPOV se da como variedades de referencia, variedad Reyna para los de talla mediana y Galit para el caso de la HG-T2.

Para el parámetro hojas se realizó el conteo promedio de hojas por planta, el ancho, largo y el parámetro color, este último siendo un parámetro importante en la identificación varietal. El número de hojas fue variable este osciló entre las 47 a 116, lo que nos muestra una diferencia amplia pudiendo estar relacionada principalmente por la altura de las plantas, así como por condiciones ambientales.

El ancho y largo de la hoja nos permite conocer el tamaño de la hoja, ya que de acuerdo con SNICS, 2014, al realizar la suma de estos y calculando el promedio de estas medidas se obtiene el tamaño de hoja. El dato tamaño nos permite conocer la variedad de referencia de acuerdo con la UPOV, 2018 para el caso de las colectas del presente estudio el tamaño de hoja oscila entre 18.5 cm a 33.5 cm, tomando en cuenta los datos de cada colecta se observa que para HG-S3 su hoja es de tamaño mediana, mientras que para HG-A1 el tamaño es grande, por consiguiente la HG-T2 se considera muy grande, lo que nos da como variedades referencia RINCON; IBEA 205 para el primer grupo, Galit y Tamar para el segundo y LA NEGRA y LA ROJA para la variedad de Tulancingo. Otro parámetro medido fue el color de hoja el cual es diferente para cada una de ellas para el caso de HG-A1 se tiene que es verde purpureo lo que revisando las directrices de la UPOV nos da referencia a IBEA 209, para el caso de HG-T2 el color es verde oscuro lo que nos lleva a la variedad Tamar; en el caso de HG-S3 el color observado es verde medio y nos da la referencia Galit.

Realizando la caracterización por medio de los racimos siguiendo las directrices de la UPOV el tamaño y color son importantes para poder dar una variedad ejemplo de acuerdo a los caracteres en el caso de las plantas estudiadas tenemos que para HG-A1 el color del racimo o inflorescencia es púrpura la referencia varietal seria IBEA 350, para HG-T2 que es verde azulado la variedad ejemplo que se mencionan son: Galit y Tamar, HG-S3 es verde rojizo teniendo como referencia a la variedad Limor, En referencia al tamaño se consideran largos dando como referencia la variedad IBEA 205.

La semilla fue otro de los parámetros analizados a partir de las directrices de la UPOV y parámetros del SNICS; los datos obtenidos de acuerdo a la observación realizada se tienen que existen tres diferentes colores primarios en las semillas que es gris oscuro, gris claro y marrón medio, lo que nos da variedades de referencia IBEA 401, Puesto y IBEA 95, respectivamente. Al considerar el tamaño de la semilla a partir de las medidas obtenidas de ancho y largo se puede deducir de acuerdo

con las directrices que es una semilla de tamaño medio lo que nos da como variedad de referencia a la variedad Lagos.

Tabla 10. Variedades de referencia para las características de *Ricinus communis* colectado.

Parámetro	Variable	% de aceite	Clasificación UPOV-SNICS	Variedad de referencia o ejemplo*
HG-A1	Planta	50.55	Altura	Media
	Hoja		Tamaño	Grande
			Color	Verde purpureo
	Racimo		Color	Purpura
		36.67	Tamaño	Largo
	Semilla		Color	Gris oscuro
			Tamaño	Media
				Alta
HG-T2	Planta	36.67	Altura	Reyna
	Hoja		Tamaño	Galit, Tamar
			Color	Ibea 209
	Racimo		Color	Ibea 350
			Tamaño	Ibea 205
	Semilla		Color	Ibea 401
			Tamaño	Lagos
				Galit
HG-S3	Planta	29.19	Tamaño	La Negra, La Roja
	Hoja		Color	Tamar
			Color	Galit y Tamar
	Racimo		Tamaño	Ibea 205
			Color	Ibea 401
	Semilla		Tamaño	Lagos
				Reyna
				Rincon, Ibea 205

*Fuente: UPOV-SNICS, 2018.

Después de analizar los resultados y comparar con las directrices de la UPOV y el SNICS se puede observar en la tabla 9 que las características de nuestras colectas hacen referencia a diferentes variedades ejemplo, aunque vale la pena resaltar que para el caso de HG-T2 las variedades de referencia Galit, para altura de planta y color de racimo y Tamar para el color de hoja y racimo, así mismo para HG-S3 donde en tamaño de la hoja y tamaño del racimo en las colectas sus características apuntan a IBEA 205, por ultimo para el caso de HG-T2, Galit aparece como variedad de referencia para las variables de color y tamaño de hoja.

Con el análisis de caracterización realizada, de acuerdo con la tabla 10, se tienen tres diferentes variedades analizadas y donde se muestra que la variedad diferente es HG-A1 incluso con la cantidad de aceite esto considerando los resultados obtenidos para HG-T2 y HG-S3.

8.2.2. Caracterización de semilla de *Ricinus communis*

8.2.2.1. Caracterización física

En la tabla 11 se muestran datos de la caracterización física de las muestras de semilla se analizaron 100 semillas, evaluando su peso, longitud (largo, ancho y grosor) y color.

Tabla 11. Caracterización física de semilla de higuerilla (*Ricinus communis*).

Muestra	Peso de 100 semillas (g)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Grosor (mm)	Color
HG-A1	27.88 (± 1.36)	11.07 (± 0.79)	6.02 (± 0.66)	4.50 (± 0.27)	Café claro/gris
HG-T2	21.82 (± 1.644)	10.86 (± 1.73)	7.92 (± 0.51)	4.47 (± 1.46)	Gris plateado
HG-S3	18.28 (± 1.55)	9.07 (± 0.52)	8.48 (± 0.33)	4.07 (± 0.16)	Gris plateado

En lo que refiere al tamaño de semilla se observaron variaciones en el tamaño, la semilla de HG-A1 muestra dimensiones mayores con respecto a las otras dos muestras. Esto igual sucede con el peso estos datos se relacionan con lo reportado por García et al. (2019) que reportó datos en accesiones de San Luis Potosí donde reporta datos de peso que van desde los 9.2 g hasta los 46.1 g, dimensiones de largo de 9.1 mm a 15.7 mm, ancho 5.2 mm a 8.2 mm y grosor de 3.8 a 5.7 mm, lo que se relaciona con los datos obtenidos en muestras, lo que nos indica que al cambio en la zona de desarrollo modifica estos estándares de longitud y peso (Solís et al. , 2016; Llaven, 2019; Hernández et al., 2019; Rosales et al., 2023). Rosales et al. (2023), menciona que estas diferencias están relacionadas con el desarrollo de las plantas, mayor disponibilidad de agua y nutrientes, rápida adaptación al medio ambiente, y condiciones que estimulen un mayor periodo de crecimiento y acumulación de tejido foliar, lo que puede favorecer la producción de semillas más grandes.

8.2.2.2. Análisis proximal

En la tabla 12 se presentan los resultados del análisis proximal de la semilla de higuerilla, los cuales son datos importantes a conocer para poder determinar el uso

que se le puede dar a la semilla de acuerdo a las características que esta reúne. Uno de los parámetros medidos fue la cantidad de aceite contenido en la semilla ya que esto nos determina el contenido de ácidos grasos libres, la humedad en las materias primas, son parámetros fundamentales para determinar la viabilidad del proceso de transesterificación de aceites vegetales. Para llevar la reacción catalizada se necesita un valor cenizas en ácidos grasos inferior al 3% y de humedad inferior al 5%, a lo que también, se llevó a cabo la evaluación de la cantidad de cenizas, esto debido a que valores mayores pueden complicar la actividad del catalizador y reducir el rendimiento de la reacción.

Tabla 12. Análisis proximal de semilla de higuerilla.

Muestra	Aceite (%)	Humedad (%)	Cenizas (%)	Proteínas (%)	Carbohidratos
HG-A1	50.55 (± 3.60)	3.08 (± 0.04)	3.47 (± 0.32)	15.45 (± 0.24)	30.53 (± 1.32)
HG-T2	36.67 (± 2.09)	3.26 (± 0.06)	3.41 (± 0.07)	14.89 (± 0.29)	45.03 (± 0.74)
HG-S3	29.19 (± 2.09)	3.50 (± 0.05)	2.26 (± 0.08)	14.12 (± 0.17)	53.94 (± 0.74)

Con respecto a los valores de contenido de aceite se reportan diversos valores los cuales tales como: 41-51% (Vasco, 2017), 12.20 - 64.84% (Goytia et al., 2011), 21.3-43.7%, 48.38% (Ayala & Pinos, 2021), 54% (Panhwar et al., 2016). Estos valores están directamente relacionados con la variedad utilizada y sus condiciones de cultivo.

Los resultados obtenidos en los contenidos de humedad y cenizas en las materias primas, son los que se muestran en la tabla 12. Las variedades de Atotonilco el Grande (HG-A1) y Tulancingo (HG-T2), mostraron como promedio, valores de cenizas ligeramente superiores a 3%; la variedad Santiago (HG-S3) <3%. En todos los casos para las materias primas las humedades fueron menores de 5%.

Los resultados encontrados en contenidos de cenizas son similares a los que reporta Vasco et al., 2017 (2.24-3.41%) en doce variedades evaluadas de San Luis Potosí, Aguascalientes, Zacateca y Jalisco. Sin embargo, los contenidos de humedad fueron 1.2 veces menores que los reportados por estos autores. Perdomo

et al. (2013) por su parte reportó resultados de 3.89% de humedad, ligeramente mayores a los reportados en este trabajo, este factor es de suma importancia debido a que influye en el proceso de obtención del biodiesel ya que un contenido elevado puede traer consigo la hidrolisis de triglicéridos, provocando que los ácidos grasos libres generados intervengan en la transesterificación y a su vez de paso a la formación de jabones, generando una disminución del rendimiento del biodiesel (Hernández et al., 2022). Los valores de proteína y de contenido de carbohidrato están estrechamente relacionados con los usos que se le podrían dar a la semilla como lo es para la nutrición de animales, aunque se debe de tomar en cuenta que su uso para este fin previamente debe de desintoxicarse la semilla, en lo que respecta los valores obtenidos oscilan entre los 14.12% a 15.45% para contenido de proteína, los cuales concuerda con Vasco et al., (2017) quien reporta porcentaje de proteína en un estudio realizado, a 12 accesiones, que oscilan entre los 12.8% a 16.04%.

8.3. Caracterización de aceite de *Ricinus communis*

Los resultados de la caracterización del aceite extraído también se muestran en la tabla 13. Se obtuvo una viscosidad cinemática promedio de 231 cSt. La viscosidad del biodiésel es aproximadamente un orden de magnitud menor que la del aceite o grasa de partida. Este resultado es similar al informado por Ijaz et al. (2016). Se obtuvo un índice de acidez total (TAN) en promedio de 1.016 mg KOH/g, resultado que corresponde a los reportados por Cuéllar et al. (2016) quienes en 12 especies diferentes de *Ricinus communis* en México, obtuvieron valores en un amplio intervalo entre 0.3 a 2.5 mg KOH/g. La densidad promedio (0.934 g/cm³) del aceite fue similar a los valores reportados entre 0.86 y 0.96 g/cm³ (Cuellar et al., 2016; García et al., 2018). La temperatura de ignición que se obtuvo fue en promedio 219 °C, valor muy similar al reportado por Keera et al., (2018).

La espectrometría FTIR identifica la presencia de los principales grupos funcionales en la muestra de aceite vegetal de origen (Oliveira et al., 2009). A continuación, en la figura 9, se observan los espectros del aceite obtenido de las semillas de ricino para cada una de las tres variedades recolectadas. No hubo diferencias entre los

aceites de estas tres variedades, sólo en el porcentaje de rendimiento en cada una de ellas. Las bandas observadas a 3008, 1241 y 725 cm⁻¹ se asocian con las vibraciones de estiramiento, balanceo y flexión fuera del plano del enlace C=C en configuración cis, respectivamente. La señal en 1746 cm⁻¹ corresponde al estiramiento del grupo carbonilo (C=O), mientras que la banda en 1463 cm⁻¹ se atribuye a la deformación del grupo metoxi (O-CH₃) característico de los ésteres metílicos. Por su parte, la absorción en 1166 cm⁻¹ está relacionada con el estiramiento del enlace C-O en los ésteres metílicos. Dado que los triglicéridos y los ésteres metílicos del aceite de ricino presentan estructuras químicas similares, las bandas detectadas reflejan la presencia conjunta de ambos compuestos en la muestra extraída (García et al., 2009).

Tabla 13. Rendimiento y caracterización de aceite de higuerilla

Muestra	Rendimiento (%)	Viscosidad cinemática (cSt)	T.A.N (mg KOH/g)	Densidad (g/cm ³)	Punto de ignición (°C)
HG-A1	50.55 (±3.60)	245.08 (±1.45)	1.045 (±0.57)	0.938 (±0.005)	227 (± 1.000)
HG-T2	36.67 (±2.09)	229.00 (±1.29)	0.908 (±0.60)	0.938 (±0.009)	213 (± 1.000)
HG-T3	29.19 (±2.09)	221.63 (±1.53)	1.016 (±0.64)	0.937 (±0.017)	217(± 3.000)

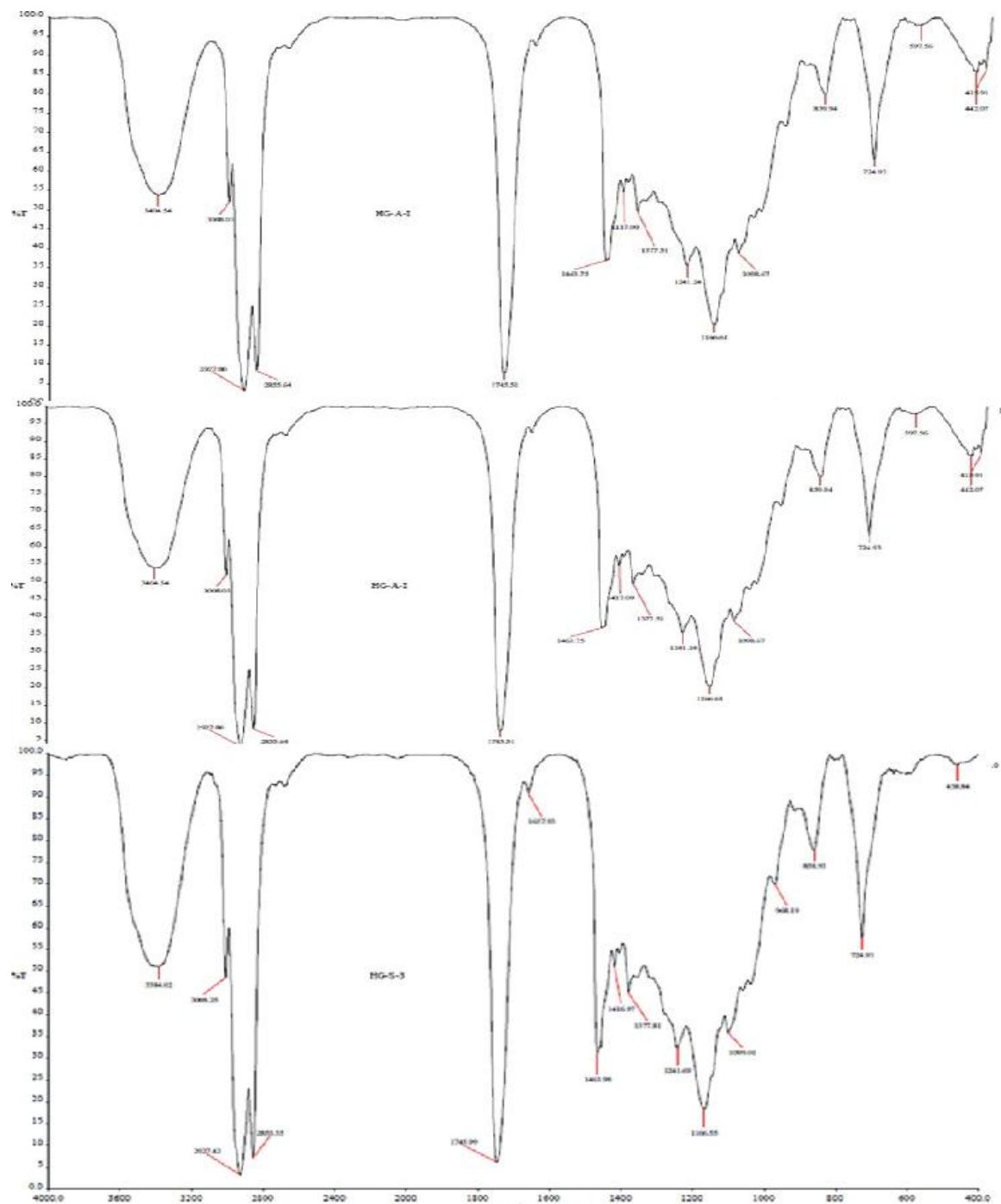


Figura 9. Espectros FTIR del aceite de ricino de las colectas realizadas

A: Aceite obtenido a partir de semilla de colecta HG-A1.; **B:** Aceite obtenido a partir de semilla de colecta HG-T2.; **C:** Aceite obtenido a partir de semilla de colecta HG-S3.

8.4. Obtención de biodiésel

8.4.1. Rendimiento del proceso de transesterificación a partir de semilla de higuerilla.

Se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey de los datos obtenidos de las 9 combinaciones de los experimentos el análisis se realizó tanto para el porcentaje de rendimiento (semilla-biodiesel) como para porcentaje de rendimiento (aceite-biodiésel), donde **a** representa a los valores más altos, **b** los intermedios y **c** los más bajos, realizando estos últimos de manera calculada.

Tabla 14. Rendimientos en porcentaje de semilla de higuerilla en el proceso de transesterificación.

	Factores de control				porcentaje de Rendimiento		
	Alcohol	Catalizador (g)	Relación alcohol-semillas	Tipo de catalizador	HG-A1 Atotonilco	HG-T2 Tulancingo	HG-S3 Santiago
1	Metanol	1.0	4:1	Ca(OH) ₂	20.00 b	26.10 a	13.21 c
2	Metanol	1.5	6:1	MgCO ₃	30.17 c	33.48 b	36.67 a
3	Metanol	2.0	8:1	BaCO ₃	29.44 b	41.07 a	21.55 c
4	Etanol	1.0	6:1	BaCO ₃	36.19 b	41.12 a	18.00 c
5	Etanol	1.5	8:1	Ca(OH) ₂	30.66 a	29.92 b	30.04 b
6	Etanol	2.0	4:1	MgCO ₃	33.64 a	31.11 c	31.73 b
7	Isopropanol	1.0	8:1	MgCO ₃	35.51 a	31.71 c	32.74 b
8	Isopropanol	1.5	4:1	BaCO ₃	38.30 a	32.13 c	32.60 b
9	Isopropanol	2.0	6:1	Ca(OH) ₂	34.45 b	41.23 a	29.98 c

De acuerdo con la tabla 14, donde nos muestra los rendimientos del proceso de transesterificación directa, partiendo de 50 gramos de semilla los rendimientos oscilaron de 13.21 % hasta 41.12 %. Donde se puede observar que los rendimientos más altos son para HG-T2 debido a que más de la mitad de sus experimentos presentan un porcentaje de extracción por arriba de los 30 %, y destacan dentro de estos resultados la combinación, Isopropanol, 2.0 g de catalizador, relación alcohol: semilla 6:1 y como catalizador Ca(OH)₂, al igual que Etanol, 1.0 g de catalizador, relación alcohol: semilla 6:1 y BaCO₃ como catalizador; después de analizar estos

rendimientos resulta novedoso que el uso de BaCO₃ como catalizador tenga rendimientos tan altos, debido a no se encuentran reportes del uso como catalizador heterogéneo.

Martínez et al., (2018) menciona que los rendimientos de biodiesel para la extracción directa de semilla usando catalizadores heterogéneos es más baja, los valores que se reportan son de entre 58% a 66%, en nuestros resultados observamos valores de rendimiento de entre el 18% a 41.23 %, lo cual está cerca de los valores reportado. De acuerdo a la comparación de medias los rendimientos entre cada experimento son diferentes significativamente esto puede estar determinado por la cantidad de aceite que puede producir cada semilla, lo cual se ve principalmente influenciado por la zona de colecta.

Tabla 15. Calculo teórico de rendimiento de biodiesel a partir del aceite (HG-A1, HG-T2, HG-S3)

FACTORES DE CONTROL				Porcentaje de Rendimiento			
	Alcohol	Catalizador (gramos)	Relación alcohol-semillas	Tipo de catalizador	HG-A1 Atotonilco	HG-T2 Tulancingo	HG-S3 Santiago
1	Metanol	1.0	4:1	Ca(OH) ₂	41.49 b	63.09 a	40.24 c
2	Metanol	1.5	6:1	MgCO ₃	62.59 c	80.91 b	99.57 a
3	Metanol	2.0	8:1	BaCO ₃	61.08 c	99.26 a	65.66 b
4	Etanol	1.0	6:1	BaCO ₃	75.07 b	99.40 a	54.85 c
5	Etanol	1.5	8:1	Ca(OH) ₂	63.61 c	72.32 b	91.55 a
6	Etanol	2.0	4:1	MgCO ₃	69.79 c	75.20 b	96.70 a
7	Isopropanol	1.0	8:1	MgCO ₃	73.67 c	76.65 b	99.79 a
8	Isopropanol	1.5	4:1	BaCO ₃	79.46 b	77.67 c	99.34 a
9	Isopropanol	2.0	6:1	Ca(OH) ₂	71.46 c	99.64 a	91.36 b

Se realizó un cálculo matemático del rendimiento a partir de los rendimientos de aceites obtenidos previamente, con el fin de conocer un rendimiento aproximado en un proceso de obtención de biodiesel convencional.

Para el caso de los porcentajes de rendimientos aceite-biodiesel calculado, se puede observar que los mejores (más altos) se presentan en la semilla HG-S3,

donde 6 de los experimentos presentan porcentaje de rendimiento mayores a 90%. Esto coincide con lo reportado por Martínez et al., (2018) donde presenta rendimientos de hasta el 99. Ellos mencionan que los factores que determinan los rendimientos en el proceso son el tipo de solvente y catalizador utilizado. Por otro lado, Sahand & Abdulsalam, (2023), obtienen rendimientos de 93.5%, lo que nos indican que nuestros valores calculados oscilan dentro de los rangos reportados.

8.4.2. Análisis de rendimiento entre las muestras de higuerilla

Derivado del proceso de optimización de la producción de biodiésel y partiendo directamente de las propias semillas de ricino, parcialmente trituradas para encontrar una mayor superficie de contacto y no del aceite previamente extraído, los resultados se muestran en las tablas 14 y 15 (% rendimiento semilla-bodiésel). La tabla 15 muestra los porcentajes de rendimiento del contenido de aceite extraído de las semillas. Se observa que, el mayor porcentaje de rendimiento se obtuvo con la variedad HG-A1, HG-T2, HG-S3 de semilla directa (33.2%, 30.6%, 24.7%, respectivamente). Por otro lado, al analizar los rendimientos de extracciones de petróleo anteriores, el orden fue HG-T2, HG-A1, HG-S3 (73.9%, 68.9%, 63.4%, respectivamente). Según las corridas experimentales individuales, los mejores resultados de eficiencia se lograron con la variedad HG-A-1 en el experimento 3, mientras que con la variedad HG-T2 fue en el experimento 2, y finalmente con la variedad HG-S3. en el experimento 5.

A partir del análisis de varianza (ANOVA), fue posible evaluar las contribuciones de los factores y niveles. Para el tipo de catalizador, partiendo directamente de semillas, una incidencia es 10 veces mayor (29.23%) que partiendo del aceite anterior (2.67%). Esto puede deberse a que la adición de catalizadores heterogéneos al medio de reacción ha demostrado que es posible transformar directamente el 90% de los pericarpios almendrados de las semillas en un producto líquido acuoso con un alto contenido en alcoholes (75% por masa), tanto polihídricos como glicitoles, de importante aplicación industrial y precursores de biocombustibles (Campos et al., 2020).

8.5. Caracterización química de biodiésel de *Ricinus communis*

8.5.1. Cromatografía de capa fina

En la figura 10 se muestran las placas de cromatografía de capa fina, en donde en cada placa se compara en la materia prima (1), la muestra de semilla HG-A1 (2), HG-T2 (3) y HG-S3 (4) respectivamente, esto por las 9 diferentes combinaciones resultantes, donde se comparan los desplazamientos de las muestras con la materia prima.

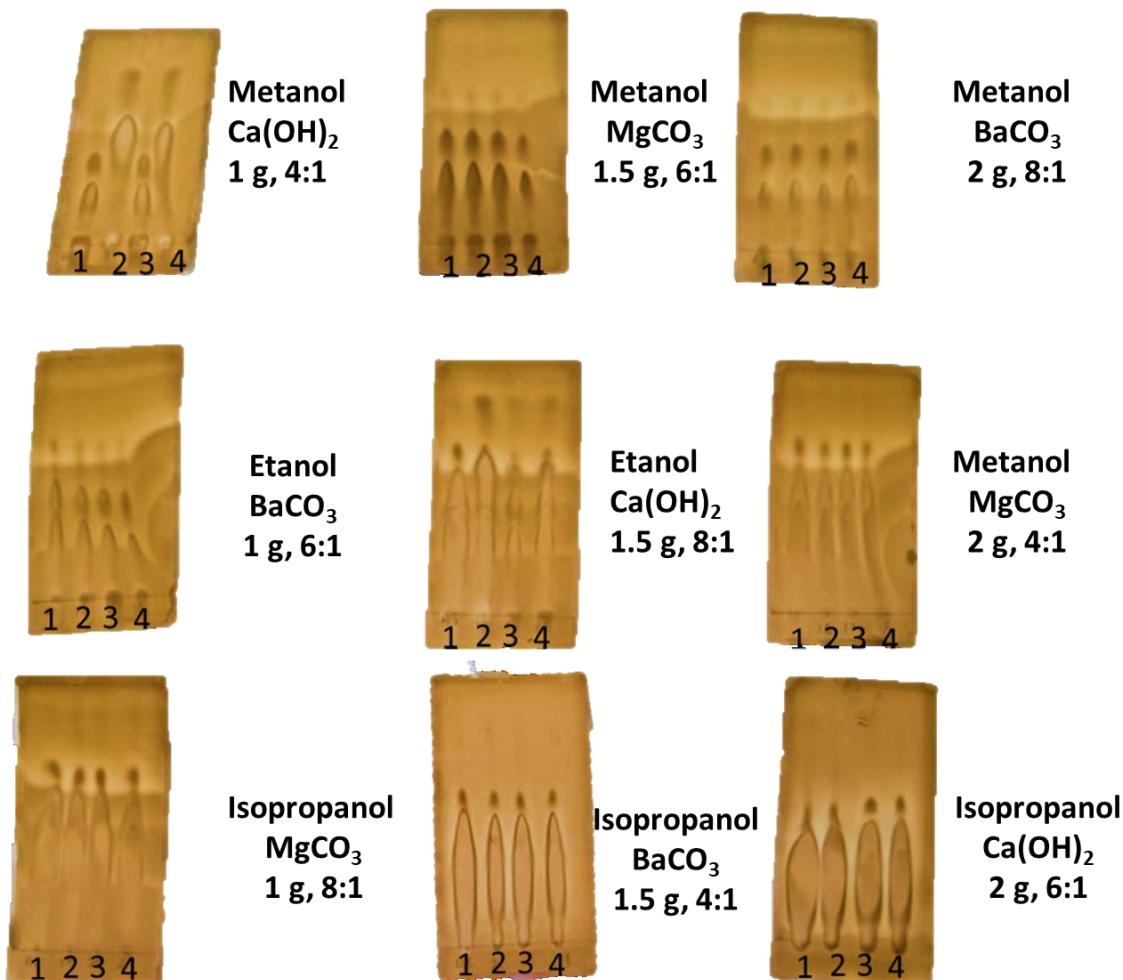


Figura 10. Placas de cromatografía de capa fina, comparación materia prima y muestra obtenida de las tres variedades de semilla evaluadas. En cada una de las placas se evalúan: (1) aceite, (2) HG-A1, (3) HG-T2, (4) HG-S3.

La cromatografía en capa fina (TLC), (ver figura 10) en la que se observó de acuerdo a la distancia recorrida por el disolvente (Hexano: Acetato de etilo en una proporción 4:1), al revelarlo con permanganato de potasio se puede observar que de las 9 placas donde se comparó el recorrido de la materia prima (aceite de higuerilla) con la muestra de cada semilla evaluada. Las muestras son las obtenidas a las 2 horas de reacción, se observa que de las 9 placas solo en la primera (Metanol, 1 g, 4:1, Ca(OH)_2) el desplazamiento de las muestras de semilla y la de la materia prima (1er punto) son diferentes. Esto coincide lo publicado por Tobergte, (2013), Vallejo-Rosero, et al. (2021), donde mencionan que si dos muestras corren igual en placa podrían ser idénticas o si, por el contrario, corren distinto entonces no son la misma sustancia. Por el contrario, se puede observar que las 8 placas restantes no muestran diferencia con respecto al recorrido de la muestra.

Así mismo se observa un ligero desplazamiento en la placa número 5 (Etanol, 1.5 g, 8:1, Ca(OH)_2), razón por la cual se realizó una prueba del proceso de transesterificación hasta 10 horas, donde se observó un desplazamiento diferente de las muestras con respecto a la materia prima pero que nos indica que no se realizó una rección completa.

8.5.2. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier de biodiésel de *Ricinus communis*

La figura 11 muestra el espectro FTIR del biodiésel que se obtuvo. Se constato que se llevó a cabo el proceso de transesterificación. Así, la banda que aparece en 1361 cm^{-1} correspondiente a la presencia de las vibraciones de flexión del grupo CH_2 , aparece desplazada en números de onda inferiores con respecto al aceite original (aparece en 1377 cm^{-1}). Lo mismo ocurre con la banda que aparece en 1742 cm^{-1} , que en el aceite aparece en 1747 cm^{-1} y es representativa de la sección carbonilo del éster C=O . También aparecen las bandas 1198 , 1173 y 1121 cm^{-1} , debido al estiramiento de los grupos C-O y $-\text{O-CH}_2-\text{C}$. Finalmente podemos señalar el desplazamiento a un número de onda superior de la banda que se refleja en 2943 cm^{-1} , que corresponde al estiramiento del grupo $-\text{CH}_2$ y que aparece en 2939 cm^{-1} en el petróleo original. El biodiesel se obtuvo mediante transesterificación del aceite

con metanol (metanolisis) utilizando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como catalizador heterogéneo, aprovechando su insolubilidad en el medio, coincide con lo publicado por Tejada et al. (2013).

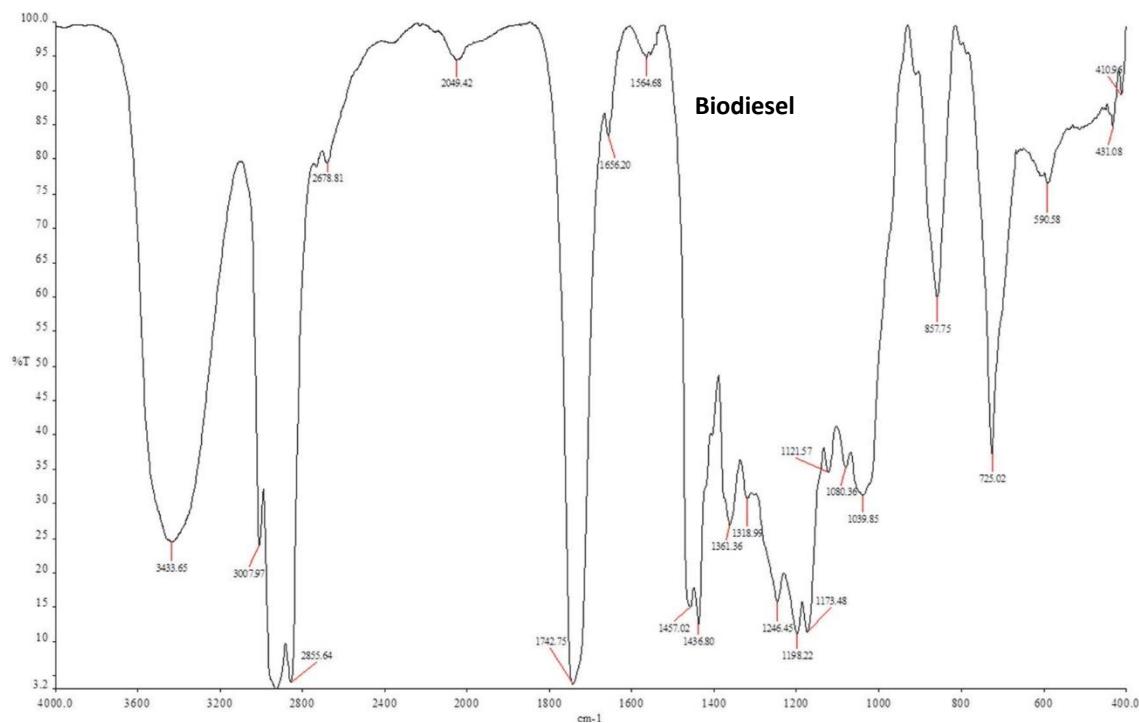


Figura 11. Espectro FTIR biodiésel de *Ricinus communis*.

8.5.3. Resonancia Magnética (RMN 1H) de biodiesel

Como parte de la caracterización de las muestras obtenidas a partir del proceso de transesterificación se realizó un análisis por medio de espectro de resonancia magnética nuclear ^1H el aceite de higuerilla y de tres de los productos obtenidos del proceso de transesterificación los cuales fueron: HG-A1-Metanol- $\text{Ca}(\text{OH})_2$, HG-T2-Etanol- $\text{Ba}(\text{CO}_3)$ y HG-S3-Isopropanol $\text{Mg}(\text{CO}_3)$,

Ésta se divide en métodos fisicoquímicos y espectroscópicos dentro de estas se encuentra la resonancia magnética nuclear ^1H , ya que esta nos proporciona información acerca de ácidos grasos, insaturaciones, así como cuantificar el porcentaje de triglicéridos, tanto de materia prima y los productos resultantes (biodiesel) (Morales, 2017).

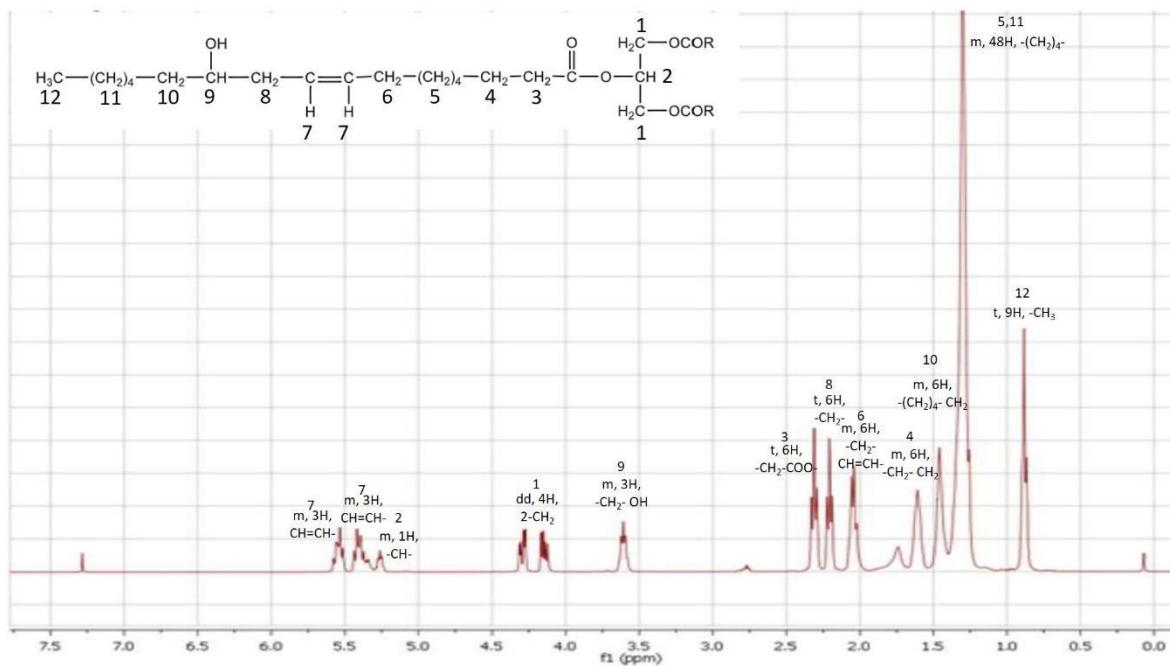


Figura 12. Espectros de RMN H. Aceite de Higuerilla (*Ricinus communis*).

En la figura 12 se presenta el espectro de Resonancia Magnética Nuclear de protón (RMN de ^1H) de aceite de ricino el cual revela las siguientes señales características en el desplazamiento químico respectivo δ (ppm): 5.54–5.57 (m,3H, -CH=CH-), 5.41–5.44 (m,3H, -CH=CH-), 5.26 (m,1H, -CH-), 4.22 (dd,4H, 2-CH₂-O y -CH-O), 3.62 (m,3H, -CH₂-OH), 2.30–2.32 (t,3H,-CH₂-COO-), 2.21–2.20 (t,6H, -CH₂-CH₂), 2.05 (m,6H, -CH₂-CH=CH-), 1.63 (m,6H, CH₂-C-C=O), 1.47–1.30 (m,48H, -(CH₂)₄-, 0.89 (t,9H, -CH₃).

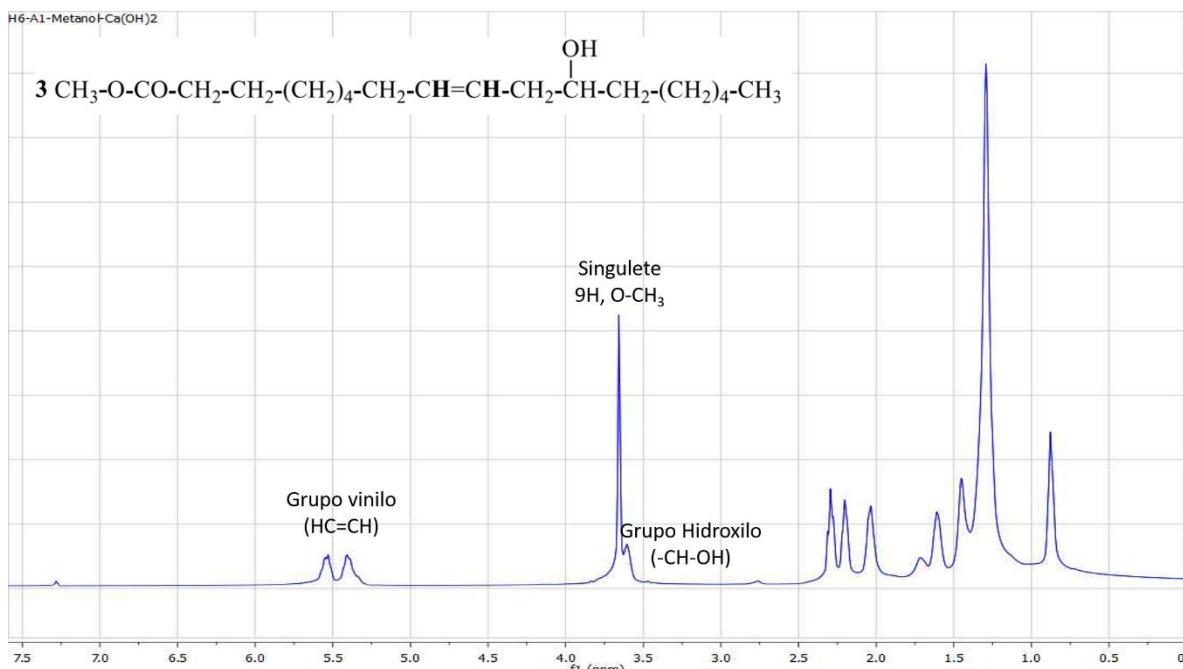


Figura 13. Espectros de RMN 1H, Hg-A1 (colección obtenida de la semilla de Atotonilco el Grande) Metanol $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En el caso del espectro de RMN 1H de la muestra Hg-A1 Metanol $\text{Ca}(\text{OH})_2$ muestra señales características similares al del aceite de ricino debido a un tipo similar de columna vertebral (figura 13). Pero también se notan algunas diferencias definidas en el sentido de que la señal a 4.22 ppm que representa los protones de glicérido en el espectro de RMN 1H del aceite de ricino ha desaparecido por completo. Por otro lado, ha aparecido una señal singulete aguda a 3.67 ppm asignada como protón metoxi lo cual coincide con lo reportado por López et al. (2011); Zhang, et al. (2015); Ba, et al. (2016); Martínez et al. (2017) y que mencionan que de acuerdo con las señales mencionadas dan confirmación sobre la formación de ésteres metílicos de ácidos grasos o biodiésel de higuerilla. De acuerdo con Martínez et al. (2018) reporta que la transformación del aceite de higuerilla a biodiesel se puede determinar por la señal que surge en la región de 3.66 ppm se atribuyó a los protones del éster metílico, además de la desaparición de las señales de 4.24-4.05 ppm correspondiente al aceite. Las señales observadas desde 5.59-5.54 ppm hasta 5.42-5.34 ppm representan los protones del grupo vinilo ($\text{HC}=\text{CH}$) contenidos en los ácidos grasos insaturados. Los ésteres metílicos de ácidos grasos de las semillas

de *Ricinus communis* están compuestos por cadenas de ricinoleato de metilo. El espectro muestra las señales del grupo hidroxilo (-CH-OH) que se observa a 3.65-3.59 ppm.

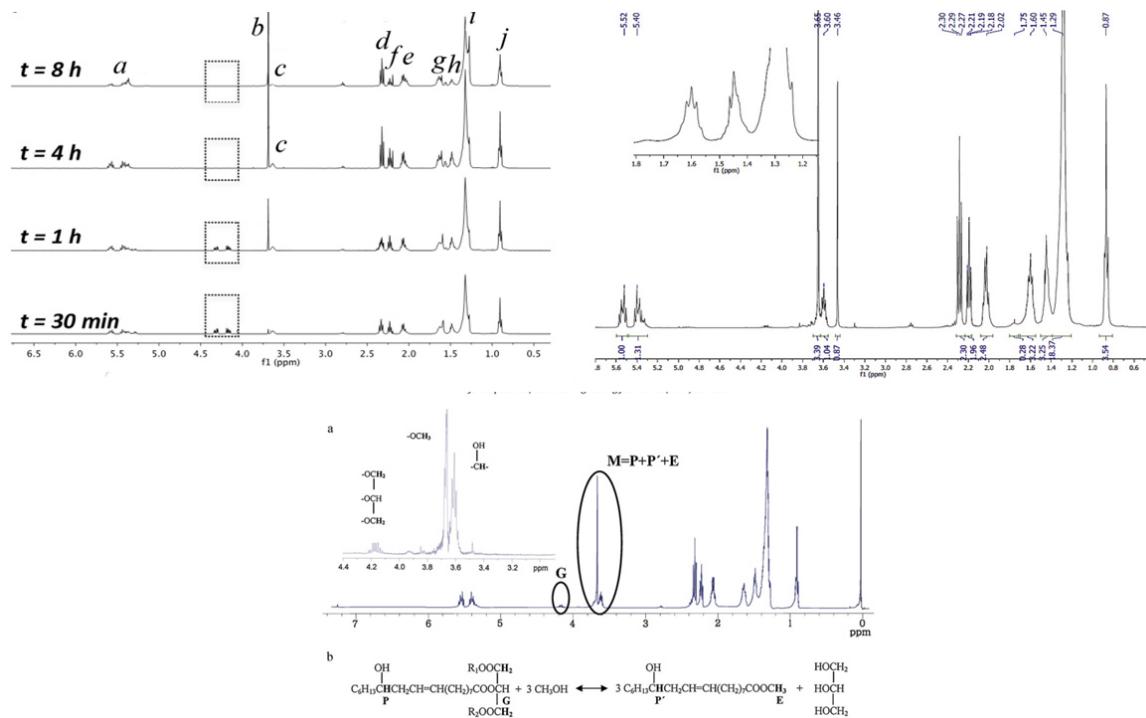


Figura 14. Espectros de RMN 1H en biodiésel de higuerilla, de investigaciones previas.

Para el caso de los espectros 15 y 16 la transformación no se dio de manera completa por lo que se considera que el biodiésel obtenido de estas dos reacciones es de una pureza y calidad baja este de acuerdo con Martínez, et al. (2018) el cual menciona que una reacción de transesterificación completa debe producir solo ésteres metílicos y glicerol (no se muestra en los espectros porque el glicerol es insoluble en CDCl₃ y, por lo tanto, no se detecta), mientras que una transesterificación incompleta produciría monoglicéridos, diglicéridos u otros productos intermedios relacionados y cualquier triglicérido sin reaccionar, el producto obtenido sería de baja calidad y pureza.

La obtención de biodiésel se encuentra relacionada con las materias primas alcohol, catalizador, así como las condiciones temperatura y tiempo de reacción además del número de carbonos de la cadena y que esto puede facilitar o dificultar el ataque

del solvente sobre la molécula de triglicérido y esto a su vez favorezca la reacción de transesterificación (Vijaya-Lakshmi, et al (2011); Vyas, et al (2019)).

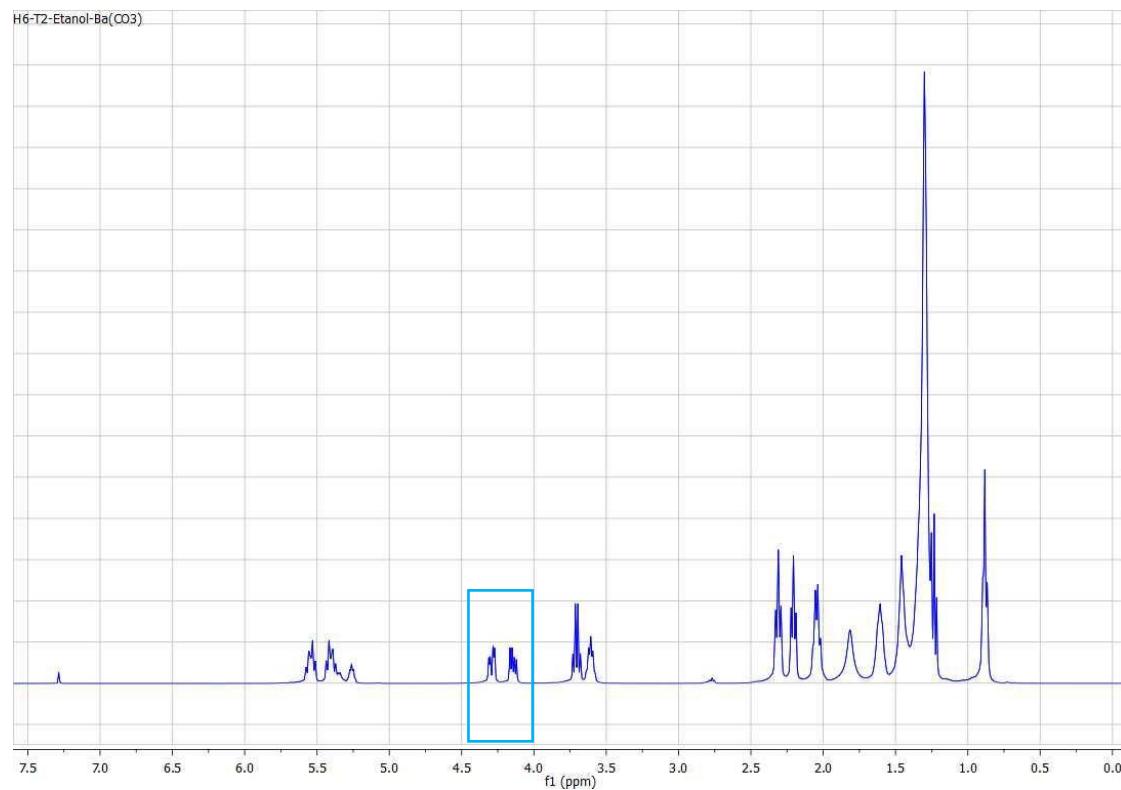


Figura 15. Espectros de RMN H, Hg-T2, Etanol BaCO₃.

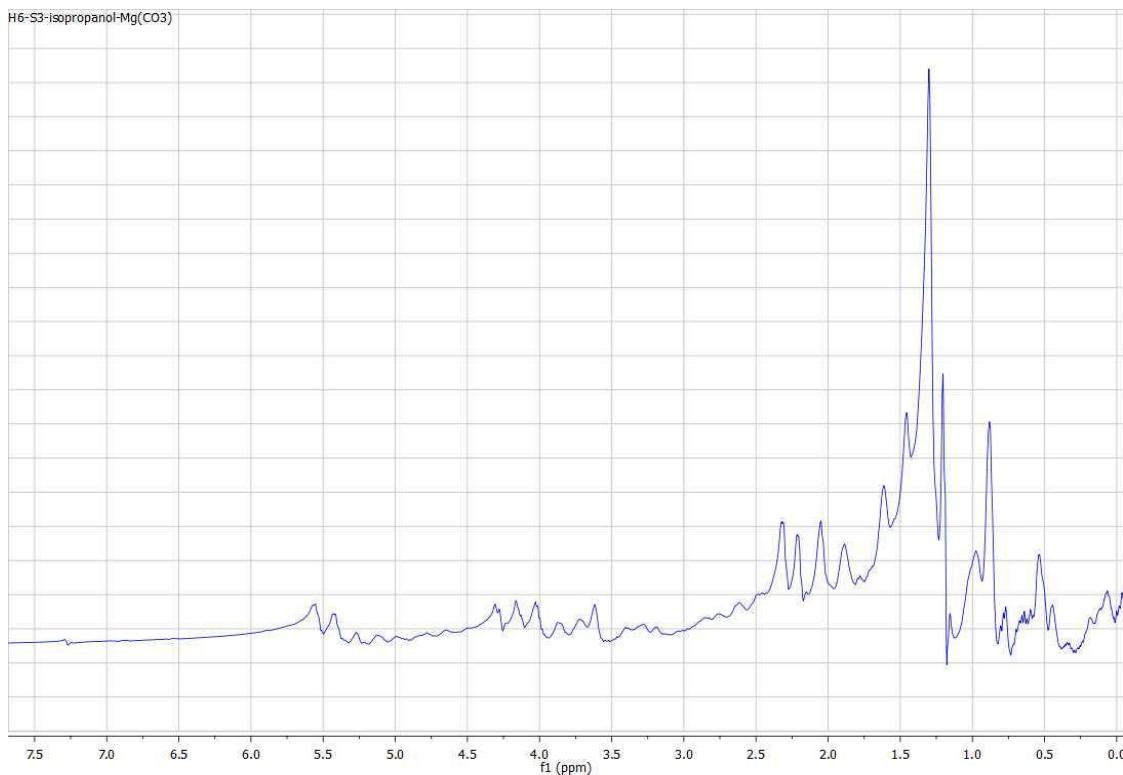


Figura 16. Espectros de RMN H, Hg-S3 Isopropanol MgCO₃.

8.5.4. Análisis térmico de biodiésel

Los análisis térmicos realizados se muestran en la figura 17 y se comparan los Análisis Termogravimétrico (TGA) y DTGA para el aceite de ricino, la cal utilizada como catalizador y el biodiésel obtenido por transesterificación. El termograma de la muestra de aceite de ricino extraída se indica en azul. Se observa que la temperatura de degradación para esto es 396°C (temperatura máxima media). Se puede ver un termograma muy homogéneo sin ningún otro tipo de señal abrupta, lo que indica la ausencia de impurezas o compuestos volátiles residuales, lo que da como resultado una estabilidad térmica del biocombustible. Esta temperatura se comporta de manera similar a la reportada por Ortiz et al. (2016) para un aceite de palma (404°C) y Farag et al. (2012) para un aceite de soja (400°C).

Para el biodiésel (línea roja) se observa una temperatura de degradación de 262°C (temperatura máxima media). La mayoría de los trabajos reportados en la obtención de biodiésel, indican esta temperatura en un rango variable entre 245°C y 265°C. Así, por ejemplo, Farag et al. (2012) lo indican a 247°C, Ortiz et al. (2016) lo indican

a 253°C, al igual que Dwivedi y Pal (2015) y Elkady et al. (2015). La línea negra corresponde al catalizador Ca(OH)_2 .

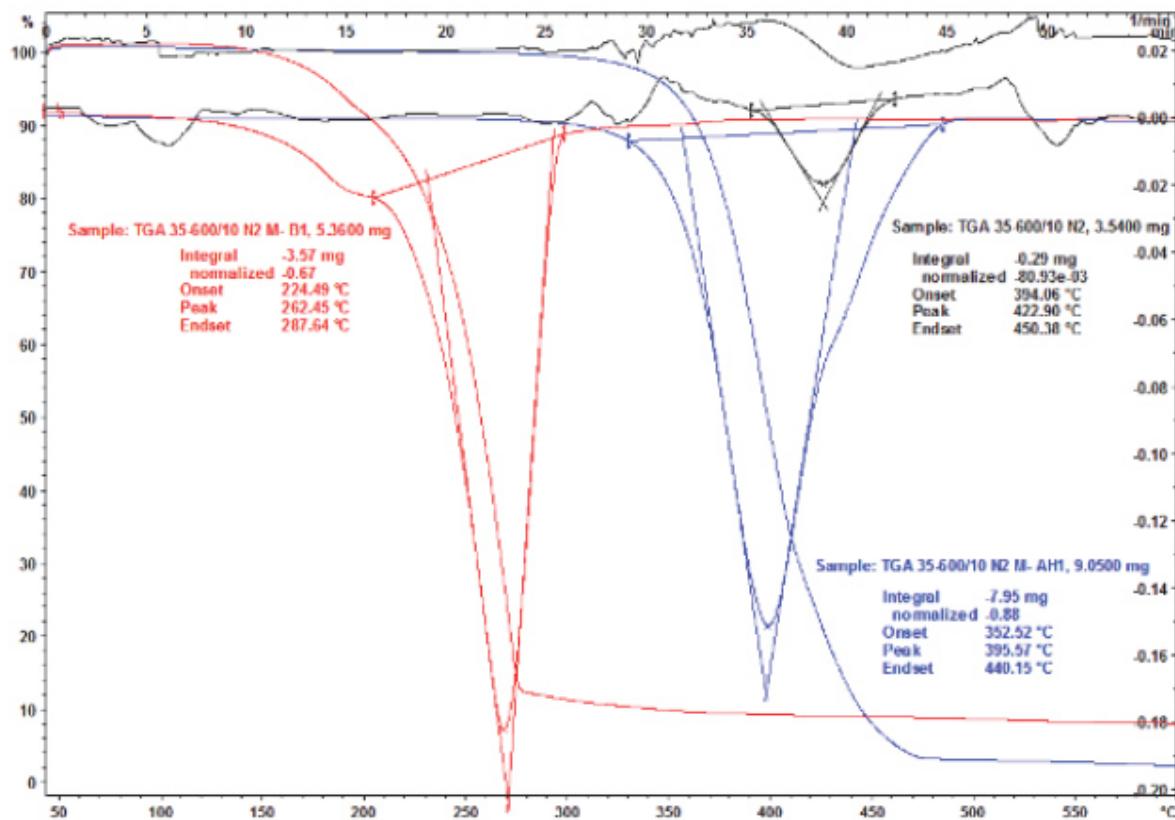


Figura 17. Análisis térmico de las materias primas y del biodiesel obtenido.

Aceite de higuerilla
 Biodiesel de higuerilla.

8.5.5. Caracterización fisicoquímica de biodiésel

En la tabla 16 se pueden observar los resultados obtenidos para los parámetros de fisicoquímicos evaluados como son densidad, viscosidad, índice de acidez y pH, además de que se realiza una comparación con resultados obtenidos en otras investigaciones.

Para densidad los valores encontrados están muy por encima de los parámetros dictaminados por las normas internacionales. Mallah y Sahito, (2020); Garzón et al., (2023) reportan valores que oscilan entre los 910 kg/cm^3 a 926 kg/cm^3 los cuales tienen una similitud con los valores obtenidos de las muestras que caracterizamos, mientras tanto como se mencionó anteriormente algunas investigaciones reportan

valores más altos como los reportados por Osorio et al., (2020) ellos reportan que sus valores encontrados se encuentran entre 920 kg/cm³ a 960 kg/cm³. Con base en esto, Fadhil, Al-tikrity y Albadre, (2017) y Osorio et al., (2020), mencionan que derivado de la naturaleza del aceite se la semilla de higuerilla, así como el grupo hidroxilo en el carbono 12 presente en el ácido ricinoleico, compuesto con mayor frecuencia en el aceite de higuerilla, el biodiésel que se produce tiene valores de densidad altos.

Para viscosidad al igual que densidad los valores encontrados oscilan entre 11.9 a 16.49 mm/s² valores que está muy por encima de la norma ASTM 6751 que tiene un límite más alto que las normas europeas, esto nos dice que al igual que la densidad se debe a la naturaleza del aceite, así como a su composición en más del 93% de ácido ricinoleico de acuerdo con lo mencionado por Fadhil, Al-tikrity y Albadre, (2017) y Osorio et al., (2020). Azad et al, 2016; Fadhi, al-tikrity y Albadree, 2017; Valente et al., 2017, reportan valores de 14.5 mm/s² para viscosidad de biodiésel de higuerilla, este valor oscila entre los valores obtenidos para las muestras de biodiésel obtenido los cuales oscilan entre 11.9 mm/s² a 16.49 mm/s².

El índice de acidez representa la cantidad de ácidos grasos libres presentes en una muestra, originados por la hidrólisis o degradación lipolítica de algunos triglicéridos. Este parámetro se expresa como la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesaria para neutralizar los ácidos grasos en un gramo de grasa. De acuerdo con las normas internacionales, este valor no debe exceder los 0.5 mg KOH/g. En el análisis realizado, las muestras mostraron índices de acidez dentro del límite establecido, con valores que oscilaron entre 0.40 y 0.49 mg KOH/g.

En la tabla 17 se mencionan de igual manera algunos trabajos de caracterización fisicoquímica realizado en biodiésel de higuerilla obtenido de manera tradicional donde se muestran resultados similares a los obtenidos en las muestras de biodiésel obtenidas a partir del proceso directo de extracción, se puede observar principalmente que la densidad y viscosidad tiene valores más altos al igual que las muestras de las colectadas y evaluadas en esta investigación Fadhil, Al-tikrity y Albadre, (2017) y Osorio et al., (2020), mencionan que la densidad y viscosidad sea

más alta se debe al peso molecular de los ésteres derivados del ácido ricinoleico compuesto presente en más del 87% del aceite de ricino.

Tabla 16. Resultados de parámetros fisicoquímicos para biodiesel de higuerilla y comparación con resultados utilizando otras materias primas.

Materia Prima	Densidad kg/cm ³	Viscosidad mm ² /s	Índice de acidez mg de KOH/g	pH	Referencias
¹ HG-T	922±5	16±0.07	0.48±0.03	7±0.15	
² HG-A	910±2	12±0.3	0.43±0.03	7±0.18	
³ HG-S	903±5	13±0.4	0.43±0.03	7±0.17	
<i>Jatropha curcas L</i>	938	3.55	0.4	*	García et al. (2017)
<i>Macrocystis pyrifera</i>	890	2.33	0.34		Amaya (2018)
<i>Jatropha curcas L</i>	890	5.39	*	6	Hernández et al. (2018)
<i>Helianthus annuus</i>	913	5.8		7	Sánchez et al. (2018)
<i>Cocos nufira</i>	870		0.05		Duarte et al. (2020)
<i>Moringa olifeíra</i>	910		1.36	6	Ferrer et al. (2021)
<i>Bactris guineensis</i>	900		0.36	6	Madrid et al. (2021)

¹Semilla colectada en Tulancingo, ²Semilla colectada en Atotonilco, ³Semilla colectada en Santiago Tulantepec

La tabla 17, además de los resultados obtenidos nos muestra una comparación del biodiesel obtenido a partir de higuerilla y con otra materia prima, donde se muestran que como ya se había mencionado algunos valores están por encima de los parámetros, pero se encuentran dentro de lo reportado para higuerilla en otras investigaciones, igual se puede destacar que en el caso de la higuerilla es un cultivo que no tiene ningún uso primario como los demás que son principalmente utilizados para la alimentación humana.

Tabla 17. Trabajos de caracterización fisicoquímica de biodiesel obtenido a partir de higuerilla (*Ricinus communis*).

Materia Prima	Densidad kg/cm ³	Viscosidad mm ² /s	Índice de acidez mg de KOH/g	pH	Referencias
<i>R. communis</i>	900	14.7	0.3	7.2	Diaz (2015)
	947	14.5	0.08	-	Fadhil, Al-tikriti & Albadre (2017)
	947	14.5	-	4.5	Valente et al. (2017)
	946	15.4	0.63	7	Keera et al. (2018)
	966	14	1.004	6	González (2019)
	900	14.7	0.3	-	Vázquez et al. (2020)
	869	3.98	-	-	Ahmad et al. (2022)
	937	14.9	0.48 a 0.77	-	Fuentes et al. (2022)
	857	5.42	0.35	-	Gebrehiwot & Zelelew (2022)
	917	14.29	0.56	7	Garzón et al. (2023)

Se ha demostrado de acuerdo con investigadores como Garzón et al. (2023) y Zheng y Cho (2023), que la combinación de biodiesel con diésel convencional en mezclas que van desde B5, B20, B40, B60, en los cuales el número es el porcentaje de diésel convencional utilizando mostrando que con solo la mezcla de 5% de diésel convencional los parámetros se reducen de acuerdo con las normas.

9. Conclusiones y perspectivas

9.1. Conclusiones

Se realizó una colecta de semillas higuerilla de tres municipios del estado de Hidalgo, cada uno con diferentes condiciones ambientales, encontrando entre ellas diferencias principalmente de rendimiento en aceite donde de la que mayor cantidad se obtuvo fue la obtenida en el municipio de Atotonilco el Grande (HG-A1) el cual es un municipio que se encuentra en un ambiente de transición ambiental entre la zona templada y zona seca, donde de acuerdo con reportes de investigaciones concluyen que la producción de aceite es mayor en zonas con límites de hídricos y altas temperaturas. Aunque la cantidad de aceite no influye en el rendimiento de biodiésel se obtuvo un rendimiento medio de acuerdo con las otras dos semillas (HG-T2 y HG-S3). Además de que la evaluación etnobotánica nos permitió conocer los usos y conocimientos principalmente ancestrales que las comunidades tienen sobre la higuerilla como lo es su uso como preventivo para el control de la fiebre principalmente.

De acuerdo con los alcoholes analizados para la obtención de biodiesel el metanol fue el que presentó el mejor comportamiento con respecto a la transesterificación directa esto principalmente se observó en los resultados donde de acuerdo con la caracterización de las muestras obtenidas las mezclas donde se utilizó metanol como solvente se llevó a cabo la reacción de conversión de materia prima (aceite) a biodiesel, caso contrario el etanol e isopropanol donde la reacción no se llevó o bien se llevó de manera parcial.

El diseño de optimización de Taguchi arrojó que se tenían que realizar 9 combinaciones diferentes con cada una de las muestras de semilla, lo que nos dio como resultado la aplicación de 27 experimentos diferentes para la obtención de biodiésel, obteniendo resultados favorables en solo 3 experimentos de los 27, los en los que se utilizó metanol y Ca (OH)₂ como solvente.

De acuerdo a los caracteres evaluados se puede observar que en el caso de a densidad y viscosidad cinemática los valores obtenidos son mayores notablemente

con respecto a los parámetros establecidos por normas americanas y europeas y sobre los valores establecidos en la ficha técnica de biodiésel de México, estos valores altos están principalmente justificados por el origen de la materia prima *Ricinus communis* la cual tiene un presencia de ácido ricinoleico mayor a 80% con respecto a los otros componentes del aceite, lo que provoca estos números altos.

De todo este estudio se concluyó que es viable la obtención de biodiésel como biocombustible a partir de semillas de ricino maceradas y directamente, sin extracción previa de aceite con el consiguiente ahorro de n-hexano. La obtención de biodiésel directamente de semilla es una alternativa novedosa que permite que el proceso sea sostenible, limpio y eficiente además de que tiene menor impacto ambiental por no usar hexano, ni hidróxido de sodio. El tipo de catalizador, así como el solvente utilizado influyen en los rendimientos como se menciona en investigaciones previas donde se indica que los rendimientos se pueden ver afectados de acuerdo al tipo de alcohol y catalizador utilizado, de acuerdo con esto, los rendimientos obtenidos son aceptables ya que se acercan a lo reportado.

9.2. Perspectivas

A nivel mundial el uso de biodiesel es una alternativa viable para reducir de combustibles de origen fósil principalmente por su origen lo cual disminuye la emisión de contaminantes. Si bien es cierto es un tema que se ha investigado desde hace mucho tiempo la obtención de este está basado principalmente en cultivos utilizados para la alimentación humana lo cual representa un problema.

Es por eso que la higuerilla (*Ricinus communis*) una planta de origen silvestre y que no presenta algún uso principal, gracias a sus bondades como su adaptación a diversas condiciones edafoclimáticas lo potencia como una alternativa tecnológica importante para su aprovechamiento en las diversas regiones del estado de Hidalgo y del país.

El proceso de obtención de biodiesel es una reacción que requiere de una gran diversidad de solventes químicos y un alto uso de energía lo que representa a su vez un costo muy alto, esto principalmente por los procesos que se deben de llevar

a cabo principalmente la obtención de aceite y posteriormente la transesterificación para la obtención del biocombustible, el proceso de *transesterificación in situ* o obtención directa resulta una alternativa viable debido a la reducción del uso de solvente así como el tiempo del proceso de transesterificación, ya que este proceso no se requiere el proceso de obtención de aceite previo.

Otra cosa importante es el uso de un catalizador de fácil acceso para el proceso de *transesterificación in situ* como lo es el Ca(OH)_2 o cal y el cual es de vital importancia para el optimo desarrollo de la reacción.

Por todo esto el proceso de obtención de biodiesel por *transesterificación in situ* resulta una opción de fácil adaptación y se convierte en una alternativa para el aprovechamiento de un recurso forestal como la higuerilla en las comunidades marginadas principalmente, este proceso puede ser una opción viable para poder llevar a campo en investigaciones posteriores y realizar una prueba piloto para una producción masiva.

Algo muy importante, que se pudo utilizar para próximas investigaciones toda vez que se realice un análisis de contaminantes de los residuos de la transesterificación, se pueden utilizar los residuos de la mezcla del proceso de obtención de biodiesel para la elaboración de pellets para la alimentación de ganado caprino, debido a que el uso de la cal permite la eliminación de las toxinas de la semilla, provocando con esto que esta masa sobrante pueda tener un segundo uso.

10. Referencias

Abomughaid, M. M., Teibo, J. O., Akinfe, O. A., Adewolu, A. M., Teibo, T. K. A., Afifi, M. & Batiha, G. E. S. (2024). A phytochemical and pharmacological review of *Ricinus communis* L. *Discover Applied Sciences*, 6(6), 315. 10.1007/s42452-024-05964-5.

Acheampong, M., Ertem, F. C., Kappler, B., Neubauer, P. (2017). In pursuit of Sustainable Development Goal (SDG) number 7: Will biofuels be reliable? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 927–937. doi:10.1016/j.rser.2016.11.074

Ahmad, M., Zafar, M., Yousaf, Z., Ullah, SA, Sultana, S. y Bibi, F. (2022). Identification of novel, non-edible oil seeds via scanning electron microscopy as potential feedstock for green synthesis of biodiesel. *Microscopy Research and Technique* , 85 (2), 708-720. <https://doi.org/10.1002/jemt.23942>

Alves, C. T., Peters, M. A., Onwudili, J. A. (2022). Application of thermogravimetric analysis method for the characterization of products from triglycerides during biodiesel production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 168, 105766. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105766>

Ameen, M., Ahmad, M., Zafar, M., Munir, M., Mujtaba, M.M. Sultana, S.; Rozina, El-Khatib, S.E., Soudagar, M.E.M. & Kalam, M.A. (2022) Prospects of Catalysis for Process Sustainability of Eco-Green Biodiesel Synthesis via Transesterification: A State-Of-The-Art Review. *Sustainability*: 14, 7032. <https://doi.org/10.3390/su14127032>

American Society for Testing and Materials D 2216-98 - Test method for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass

Anywar, G. (2020). Historical use of toxic plants. *Poisonous Plants and Phytochemicals in Drug Discovery*, 1 ,17. <https://doi.org/10.1002/9781119650034.ch1>

AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). 2002. *Official methods of analysis of Association of Official Analytical Chemists International*. Washington, USA.

Armendáriz Velázquez V., J. (2012). Caracterización fenotípica y molecular de genotipos de higuerilla (*Ricinus communis* L.) para la producción de biodiesel. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía.

Arrossio, J., Cardoso, A., Serqueira, M. (2020). Producción de ácidos grasos fraccionados a partir de aceite de soja reciclado (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ingeniería; Argentina).

Avendaño A., C.H., Izapa C., R., Jiménez R. 2018. Manual gráfico para la descripción varietal de la higuerilla (*Ricinus communis* L.). SNICS-Sagarpa, INIFAP, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 108 p.

Ávila, H. F., González, M. M., Licea, S. M. (2020). La entrevista y la encuesta: ¿métodos o técnicas de indagación empírica? *Didáctica y Educación* ISSN 2224-2643, 11(3), 62-79.

Ayala, B. S. T., Pinos, A. A. R., Lozada, D. F. G., Huilcapi, A. G. F. (2022). Variables óptimas para la extracción de Aceite de Higuerilla (*Ricinus Communis* L.). *Dominio de las Ciencias*, 8(3), 291-304. <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v7i4>

Azad, A. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Sharma, S. C., Mofijur, M., Bhuiya, M. M. K. (2016). Prospects, feedstocks and challenges of biodiesel production from beauty leaf oil and castor oil: A nonedible oil sources in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 302-318.

Ba, S., Zhang, H., Lee, Y.J., Ng, C.W., Li, T. (2016). Chemical modifications of ricinolein in castor oil and methyl ricinoleate for viscosity reduction to facilitate their use as biodiesels. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 118:651–7. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201500120>

Baque, G., Intriago, A., García, S., Burgos, G., García, G. (2023). Epoxidación de aceite de higuerilla (*Ricinus communis*) de la provincia de manabí-ecuador. *infoANALÍTICA*, 11(1), 9-30. <https://doi.org/10.26807/ia.v11i1.244>

Barbosa, C.; Ramírez, L. N.; Morales, N. (2014). Obtención de Biodiesel (etil-éster) Mediante Catálisis Básica a Nivel Planta Piloto Derivado de Aceites Usados de la Industria Alimenticia. *Publicaciones e Investigación* ISSN: 1900-6608 Volumen 8, 99-116.

Barrios G., E. J., Canul K., J., Hernández A., M. G., Solís B., J. L. (2018). Evaluación de dos ciclos de higuerilla en Morelos, México: siembra y rebrote. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* volumen 9 número 8, 1663-1673.7. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i8.679>

Bello, P. L.A.; Solorza, F. J.; Arenas, O. M. L.; Jiménez, A. A. and Velázquez, del V. M. 2001. Chemical composition of okenia hypogaea seed (Schl. & Cham). *Agrociencia*. 35(4):459-468. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235410>

Bolonio, D., Llamas, A., Rodríguez-Fernández, J., Al-Lal, A. M., Canoira, L., Lapuerta, M. (2015). Estimation of Cold Flow Performance and Oxidation Stability of Fatty Acid Ethyl Esters from Lipids Obtained from *Escherichia coli*. *American Chemical Society pubacsorg/Energy Fuels*; 29:2493-2502. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00141>

Bolton, R. y Faust, K. (2018). Pensando en papas: Una investigación cognitiva en la antropología agrícola. *Alteritas. Revista de Estudios Socioculturales Andino Amazónicos* (8):115–128. <https://doi.org/10.51440/unsch.revistaalteritas.2018.8.158>

Brahma, S., Nath, B., Basumatary, B., Das, B., Saikia, P., Patir, K., Basumatary, S. (2022). Biodiesel production from mixed oils: a sustainable approach towards industrial biofuel production. *Chemical Engineering Journal Advances*, 100284. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2022.100284>

Bueno, A. V., Pereira, M. P. B., de Oliveira Pontes, J. V., de Luna, F. M. T., Cavalcante Jr, C. L. (2017). Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Applied Thermal Engineering*, 125, 559-566. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.114>

Cabello, C., Rincón, S., y Zepeda, A. (2016). Catalizadores heterogéneos utilizados para la obtención de biodiesel. AFINIDAD LXXIV, 577, 51-59.

Cabrales, R., Marrugo, J., Castro, J. (2014). Rendimientos en semilla y calidad de los aceites del cultivo de Higuerilla (*Ricinus Communis L.*) en el valle del Sinú, departamento de Córdoba. Montería. Fondo editorial–universidad de Córdoba.

Campos M., J. M., Chica L., A., Dómine, M. E., García M., T., Pawelec, B., Pinilla I., J.L., Rojas M., S., Serra A., J. M. & Suelves L., I. (2020). Biocombustibles. *Boletín del Grupo Español del Carbón*. 58, 38- 44. <http://hdl.handle.net/10261/226100>

Carlos H., S., & Díaz J., M. D. L. V. (2018). Evaluación de un proceso industrial de producción de biodiésel mediante análisis de ciclo de vida. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 34(3),453-465. <https://doi.org/10.20937/rica.2018.34.03.08>

Castellar, G., Angulo, E. R., Cardozo, B. M. (2014). Transesterification vegetable oils using Heterogeneous catalysts”, Prospect, 12 (2), 90-104. <https://doi.org/10.15665/rp.v12i2.293>.

Chalita, R., Casalins, O., Harold, M., Jiménez, M. (2007). Producción experimental de biodiesel a partir de la reacción de transesterificación catalítica del aceite de ricino. I Congreso Internacional de Materiales, Energía y Medio Ambiente (CIMEM). Barranquilla, Colombia. Universidad Autónoma del Caribe.

Conceição, M. M., Candeia, R. A., Silva, L. C., Bezerra, A. F., Fernandes, V. J., Souza, A. G. (2007). Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11(5), pp. 964-975. doi: 10.1016/j.rser.2005.10.001.

Cornejo Martínez, M. F., Estrada Urbano, O. (2012). Caracterización de aceite de higuerilla (*Ricinus communis*) de dos variedades silvestres para la producción de biodiesel en la región del Valle de Mezquital, Hidalgo. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S. C.

Correa, M. L. (2014). Análisis comparativo de características físicas y Fitoquímicas del aceite de ricino generado en semillas de eco tipos autóctonos de higuerilla (*Ricinus communis*), en Tungurahua y Manabí. Trabajo de grado. Universidad técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos. Ecuador.

Cortés S., M. D., Gata-Montero, E. M., Pipió-Ternero, A., Rodríguez-Rivas, Á., & Sánchez-Santos, J. M. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 35.

Cuellar-Sanchez, Carrillo-Gonzalez, R., Delgado-Alvarado, A., & Gonzalez-Chavez M. del, C. (2016). Agroproductive properties of *Ricinus communis* L. and physical-chemical characterization of its oil. *Agro productividad* 9(3), 73-78. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/738>

Dahman, Y., Syed, K., Begum, S., Roy, P., & Mohtasebi, B. (2019). Biofuels: Their characteristics and analysis. In *Biomass, biopolymer-based materials, and bioenergy* (pp. 277-325). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102426-3.00014-X>

De la Cruz, L. (2019). Propagación de zacate estrella (*Cynodon nlemfuensis*) e higuerilla (*Ricinus communis*) para reforestación del Talud de Polvos de la compañía minera Autlán. Tesis para optar al título de Técnico Superior Universitario en Agrobiotecnología. Universidad Tecnológica de la Huasteca Hidalguense. Huejutla de Reyes-Méjico. Pp 11.

Delgado S., F. (2006). La higuerilla, petróleo verde. Recuperado de http://www.rds.org.co/experiencias.htm?AA_SL_Session=b9f7bb35bae354ad0911b1b429d2a675&x=313145.

Demirbas, A. (2008) Biofuels Sources, Biofuel Policy, Biofuel Economy and Global Biofuel Projections. *Energy Conversion and Management*, 49, 2106-2116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.02.020>

Díaz B., L., Gómez H., K., Vega L., E. T., Ruiz G., M. A., Maldonado, L. & Hernández, E. (2018). Thermogravimetric approach for assessing the oxidation level of a biodiesel sample. *Química Nova*: , Vol. 41, No. 5, 492-496. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170199>

Diaz, Y. C. E., Brachna, D. O., Hryczyński, E., Sánchez, C. N., López, W. G. y Nasif-Ricardo, H. (2009). Caracterización del aceite de tertaro para la obtención de biodiesel. Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. Pag 6-7

Dinis, A. C. (2012). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. España. Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química y Química Física.

Dwivedi, G., & Sharma, M. P. (2016). Experimental investigation on thermal stability of Pongamia Biodiesel by thermogravimetric analysis. *Egyptian J. Petroleum*, 25(1), 33-38. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.008>

Efeovbokhan, V. E., Hymore, F. K., Raji. D., Sanni, S. E. (2015). Alternative Solvents for Moringa oleifera Seeds Extraction. *Journal of Applied Sciences*. 2015; 15(8):11. doi: 10.3923/jas.2015.1073.1082

Elkady, M. F., Zaatout, A., & Balbaa, O. (2015). Production of biodiesel from waste vegetable oil via KM micromixer. *J. Chem.*, 2015(), 1-9. <https://doi.org/10.1155/2015/630168>

Fadhil, A. B., Al-Tikrity, E. T., Albadree, M. A. (2017). Biodiesel production from mixed non-edible oils, castor seed oil and waste fish oil. *Fuel*, 210, 721-728. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.009>

Falasca, S. L.; Ulberich, A. C. and Ulberich, E. 2012. Developing an agro-climatic zoning model to determine potential production areas for castor bean (*Ricinus communis*

L.). *Industrial Crops and Products*. 40:185-191.

<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.044>

Fallas, J. (2012). Correlación lineal. Midiendo la relación entre dos variables, 1-30.

Farag, H. A., El-Maghraby, A., & Taha, N. A. (2012). Transesterification of esterified mixed oil for biodiesel production. *International Journal of Chemical and Biochemical Sciences*, 2, 105-114.

Fernández, Y., Floiran, O., Maurelys, E., Villalobos, M., Garcia, A. (2014). Construcción de un reactor discontinuo para la obtención de biodiesel a partir del aceite de *Ricinus communis*. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 5(2), 51-61. ISSN: 0718-8706.

Flores A., J. A. (2018). Estudio del potencial de plantas silvestres como biocombustibles. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Tlaxcala. 82 p

Franke, H., Scholl, R. y Aigner, A. Ricina y *Ricinus communis* en farmacología y toxicología: desde su uso antiguo y el «Papyrus Ebers» hasta las perspectivas modernas y la «planta venenosa del año 2018». *Naunyn-Schmiedeberg's Archives of Pharmacology* 392 , 1181–1208 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00210-019-01691-6>

Ganesan, R., Manigandan, S., Shanmugam, S., Chandramohan, V.P., Sindhu, R., Kim, S.H., Brindhadevi, K. y Pugazhendhi, A. (2021). Un examen detallado del panorama de los catalizadores en la síntesis de biodiesel. *Ciencia del Medio Ambiente Total* , 777 , 145683.

García H., E. J., Cedillo M., I., Gómez G., A., Hernández R., I., Amante O., A. & Rossel K., E. D. (2019). Recolecta, establecimiento y caracterización de semilla de higuerilla (*Ricinus communis* L.) en el altiplano centro-norte de México. *AGRO Productividad*, 12(3), 89-97. <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1126>

García H., E. J., Cedillo M., I., Gómez G., A., Hernández R., I., Amante O., A. & Rossel K., E. D. (2019). Recolecta, establecimiento y caracterización de semilla de higuerilla (*Ricinus communis* L.) en el altiplano centro-norte de México. *AGRO Productividad*, 12(3), 89-97. <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1126>

García H., E. J., Olivares R., A., Amante O., A., Hernández R., I., Rössel K., E. D., Pimentel L., J., Delgadillo R., O, Gómez G., A. (2019). Evaluation of Higuerilla collectors

(*Ricinus communis* L.) from the central-northern Altiplano of Mexico. *Agroproductividad*, 12(1). <https://doi.org/10.32854/agrop.v0i0.1334>

Garzón, V., Flores, C., García, S., Cevallos, R. y García, G.(2023). Transesterificación de aceite de higuerilla (*Ricinus Communis*) de la provincia de Manabí-Ecuador. MQR Investigar, 7(1), 2561-2581.<https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.1.2023.2561-2581>

Gautam, R., Chauhan, B. S., Lim, H. C. (2022). Influence of variation of injection angle on the combustion, performance and emissions characteristics of jatropha ethyl ester. *Energy*, 254, 124436. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124436>

Gebremariam, S. N., & Marchetti, J. M. (2018). Biodiesel production through sulfuric acid catalyzed transesterification of acidic oil: Techno economic feasibility of different process alternatives. *Energy Convers. Manag.*, 174, 639-648. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.078>

Georgogianni K.G., Kontominas M.G., Pomonis P.J., Avlonitis D., Gergis V., (2008), *Fuel Processing Technology*, 89, 503–509. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.10.004>

Giwa, S. & Ogunbona, C. (2014). Sweet almond (*Prunus amygdalus* "dulcis") seeds as a potential feedstock for Nigerian Biodiesel Automotive Project. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 9(1):9. <https://doi.org/10.4136/amb- agua.1272>

Gómez M., R., Gómez M., R., Martínez C., E., y Zarazúa D., M.A. (2014). Tecnología de producción de higuerilla en el Estado de Hidalgo. INIFAP. Centro de Investigación Regional Centro. Campo Experimental de Hidalgo. Folleto Técnico No. 2. Pachuca, Hidalgo.

Gómez M., R., Martínez C., E. & Zarazúa D., M. A. (2014). Tecnología de producción de higuerilla en el Estado de Hidalgo. Edit. Fundación Hidalgo Produce.

Goytia J., M. A., Gallegos G., C.H., & Núñez C., C.A. (2017). Relación entre variables climáticas con la morfología y contenido de aceite de semillas de higuerilla (*Ricinus communis* L.) de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1),41-48. doi: 10.5154/r.rchscfa.2010.08.048

Goytia J., M. A., Gallegos G., R., Sánchez H., R.F. & Ramírez, M.E. (2013). Manual gráfico para la descripción varietal de la higuerilla (*Ricinus communis* L.). Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 79 p.

Goytia J., M.A., Gallegos G., R., Gallegos C., R., Barrales D., S., Zarate B., R., Macías C., U.A., Jiménez R., E., Benigno C., P., Vázquez R., J., García G., O., Méndez F., E.I., y Nolasco J., U. (2015). Paquete tecnológico para la producción de higuerilla (*Ricinus communis* L.) en Valles Centrales de Oaxaca. Universidad Autónoma de Chapingo. México. 119 p.

Goytia, J. M. A.; Gallegos, G. C. H. & Núñez, C. C. A. (2019). Relación entre variables climáticas con la morfología y contenido de aceite de semillas de higuerilla (*Ricinus communis* L.) de Chiapas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente* 17(1):41-48. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.048>

Goytia, J. M., Gallegos, G. C., & Nunez, C. C. (2011). Relación entre variables climáticas con la morfología y contenido de aceite de semillas de Higuerilla (*Ricinus communis* L.) de Chiapas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(1), 41-48. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.048>

Hernández, A. B., García, L. A., Guillón, M. P., Monte oliva, E. (2017). El método de Taguchi aplicado a la calidad de diseño de un banco de extracción de gases de sellos mecánicos. Conference Paper. XXX ENDIO y XXVIII EPIO, Universidad de Córdoba, Argentina. <https://www.researchgate.net/publication/318015024>.

Hernández, J. V., & Morejón, V. M. M. 2022 Capítulo 6 Gestión eficiente de las tecnologías de suministro de energía eléctrica en la industria textil. Mantenimiento, modo de falla y cogeneración. *Administración y gestión de la energía: casos y experiencias de éxito*, 131.

Ijaz, M., Bahtti, K. H., Anwar, Z., Dogar, U. F., & Irshad, M. (2016). Production, optimization and quality assessment of biodiesel from *Ricinus communis* L. oil. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 9(2), 180-184. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.12.005>

INIFAP (2021). Informe anual de actividades. Junta de Gobierno. Publicación Especial Núm. 8. ISBN 978-607-425-775-5.

Kalargaris, I., Tian, G., Gu, S. (2017). Combustion, performance and emission analysis of a DI diesel engine using plastic pyrolysis oil. *Fuel Processing Technology*, 157, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.11.016>

Kallamadi, P. R., Nadigatla, V. G. R., & Mulpuri, S. (2015). Molecular diversity in castor (*Ricinus communis* L.). *Industrial crops and products*, 66, 271-281. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.061>

Keera, S. T., El Sabagh, S. M., & Taman, A. R. (2018). Castor oil biodiesel production and optimization. *Egypt. J. Pet.*, 27(4), 979- 984. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.02.007>

Kim, E.J., Kim, S., Choi, HG. et al. Co-production of biodiesel and bioethanol using psychrophilic microalga *Chlamydomonas* sp. KNM0029C isolated from Arctic sea ice. *Biotechnol Biofuels* 13, 20 (2020). <https://doi.org/10.1186/s13068-020-1660-z>

Liew, W. H., Hassim, M. H., & Ng, D. K. S. (2014). Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production. *Journal of Cleaner Production*, 71, 11–29. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.006

Llaven V., G., Borbon G., A., Ochoa E., X. M., Antuna G., O., Hernandez H., A., & Coyac R., J. L. (2019). Productividad de higuerilla (*Ricinus communis* L.) en el norte de Sinaloa. *Revista Mexicana de Ciencias Agricolas*, 10(5), 1011-1022. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i5.1790>

López G., M., Martín A., D., Alba R., A., Mariscal, R. & Ojeda, M. (2009). Transesterification of triglycerides by CaO: Increase of the reaction rate by biodiesel addition. *Energy Fuels* 23, pp. 2259-2263. <https://doi.org/10.1021/ef800983m>

López, L.; Bocanegra, J. & Malagón R., D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Ing. Univ.*, vol. 19, no. 1, pp. 155-172.

Loredo, S.; Espinosa, V.; Goytia, M.; Díaz, L.; Soto, M. and Marrone. 2012. Fatty acid methyl ester profile from lupinus in the identification of sweet and bitter species from this gender with oil of *Lupinus uncinatus* Schlecht seeds. *Journal of Nutrition & Food Sciences*. 2(8):1-4. Doi: 10.4172/2155-9600.1000158

Mallah, T. A., Sahito, A. R. (2020). Optimization of castor and neem biodiesel blends and development of empirical models to predicts its characteristics. *Fuel*, 262, 116341. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116341>

Malode, S. J., Prabhu, K. K., Mascarenhas, R. J., Shetti, N. P., Aminabhavi, T. M. (2021). Recent advances and viability in biofuel production. *Energy Conversion and Management: X*, 10, 100070. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100070>

Martínez A., Mijangos G.E., Romero-Ibarra I.C., Hernández-Altamirano R., Mena C., V.Y., Gutiérrez, S. (2018). A novel green one-pot synthesis of biodiesel from Ricinus communis seeds by basic heterogeneous catalysis, *Journal of Cleaner Production*, 196, 340-349. <https://doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.241>.

Martínez Ortega, R. M., Tuya Pendás, L. C., Martínez Ortega, M., Pérez Abreu, A., & Cánovas, A. M. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729519X2009000200017&lng=es&tlang=en.

Martínez V., B. B., Hernández C., M., Solís B., J. L., Zamarripa C., A. (2012). Calidad agroindustrial del aceite de higuerilla (Ricinus communis L.) para la producción de bioenergéticos en México. V Congreso Brasileiro de Mamona. II Simposio Internacional de Oleaginosas Energéticas I Fórum Capixaba de Pinhão Manso. Guarapera (ES). p. 2.

Medina V., M., Ospino R., Y. & Tejeda B., L. (2015). Esterificación y transesterificación de aceites residuales para obtener biodiesel. *Luna Azul*; 40, 25-34. Doi: 10.17151/10.17151/luaz.2015.40.3

Méndez, F. & Muñoz, J. L. R. (2019). Estudio de las emisiones de carbono en el proceso de fresado. Tesis de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería,

Mishra, S., Bukkarapu, K. R. & Krishnaswamy, A. (2021). A composition-based approach to predict density, viscosity and surface tension of biodiesel fuels. *Fuel*, 285, 119056. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119056>

Mofijur, M., Masjuki, H. H., Kalam, M. A., Atabani, A. E., Shahabuddin, M. & Palash, S. M. (2013). Effect of biodiesel from various feedstocks on combustion characteristics, engine durability and materials compatibility: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 20; 28:15. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.051>

Molero, H., Moyano, K. & Arias, D. (2022). Evaluación de las propiedades catalíticas de diversos materiales en la producción de biodiesel. *Journal of Science and Research: Revista Ciencia e Investigación*, 7(2), 10.

Mondragón, M. (2014). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Movimiento científico*, 8 (1), 98-104. Doi: 10.33881/2011-7191.mct.08111

Morales Téllez, M. (2017). Producción de biodiesel asistido por dispersión de alta trasquilación, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Moreira, E. (2012). Principales características de las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel: la influencia del contenido y la concentración de los ácidos grasos. INGENIUM. Revista de la Facultad de Ingeniería. 13 (25), 53-61.

Mosquera, A. J. D.; vasco, L. J. F.; Acosta, O. A.A.; Hernández, R. I.; Ventura, R. E.; Gutiérrez, C. E. & Rodríguez, G. M. (2016). Optimization of castor seed oil extraction process using response surface methodology. Ingeniería e Investigación. 36(3):82-88. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64348899011>

Mutlu, H., & Meier, M. A. (2010). Castor oil as a renewable resource for the hemical industry. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112(1), 10-30. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200900138>

Niju, S., Meera, K. M., Begum, S. & Anantharaman, N. (2014). Modification of egg shell and its application in biodiesel production. Journal of Saudi Chemical Society, 18:702-706. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2014.02.010>

Oliveira, J. S., Leite, P. M., de Souza, L. B., Mello, V.c. M., Silva, E. C., Rubim, J. C.,... Suarez, P. A. (2009). Characteristics and composition of Jatropha gossypiifolia and Jatropha curcas L. oils and application for biodiesel production. Biomass Bioenergy, 33(3), 449-453. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.006>

Origlia, E., Casuscelli, S., & Cánepa, A.L. (2019). Synthesis of materials as catalysts in the epoxidation of FAME's obtained from castor oil. *Conicet*, 71-75. <https://doi.org/10.33414/AJEA.4.373.2019>

Orozco, F. D. A., (2015) Biodiesel: estudios analíticos de métodos de análisis para el control de calidad. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur. Buenos Aires, Argentina. pp. 63-96.

Ortiz Tapia, M. C., Garcia Alamilla, P., Lagunes Galvez, L. M., Arregoitia Quezada, M. I., Garcia Alamilla, R., & Leon Chavez, M. A. (2016). Obtencion de biodiesel a partir de

aceite crudo de palma (*Elaeis guineensis* Jacq.). Aplicacion del metodo de ruta ascendente. *Acta Universitaria*, 26(5), 3-10. <https://doi.org/10.15174/au.2016.910>

Osorio G., C. S., Gómez F., N., Sandoval S., F., Saini, R., Brar, S. K., & Ramírez, A. A. (2020). Production of biodiesel from castor oil: A review. *Energies*, 13(10), 2467. <https://doi.org/10.3390/en13102467>

Osorno G., G.A. (1986). Algunos aspectos de la higuerilla en Colombia. Seminario. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Pandey, S., Narayanan, I., Selvaraj, R., Varadavenkatesan, T., & Vinayagam, R. (2024). Biodiesel production from microalgae: a comprehensive review on influential factors, transesterification processes, and challenges. *Fuel*, 367, 131547. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131547>

Panhwar, T., Ahmed, S., Waheed, A., Ahmed, A., Naz, F., Hussain, Z., Sattar, A., y Hussain, S. (2016). Characteristics and composition of a High oil Yielding Castor Variety from Pakistan. *Jos of Oleo Science*, 65(6), 471-476. <https://doi.org/10.5650/jos.ess15208>

Parangi, T., & Mishra, M. K. (2020). Solid acid catalysts for biodiesel production. *Comments on Inorganic Chemistry*, 40(4), 176-216. <https://doi.org/10.1080/02603594.2020.1755273>

Penton, A. E. (2012). Application of the orthogonal arrays in the design of the Cases of test of Software. *Revista Avanzada Científica*, 15 (2), 1-12.

Perdomo, F.A.; Acosta, O. A. A.; Herrera, G.; Vasco, L. J. F.; Mosquera, A. J. D.; Millán, M. B. and Rodríguez, G. M. E. (2013). Physicochemical characterization of seven Mexican *Ricinus communis* L. seeds oil contents. *Biomass and Bioenergy*. 48:17-24. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.020>

Pérez S., A., Coronado, M. A., Montero, G., García, C., Ayala, R., Campbell, H. E. (2015). Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diésel-biodiesel. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol. XVI (1): 83-92

Piloto R., R., Domínguez, Y. D., Espinosa, E. A. M. & Ramos, P. R. (2016). Biodiesel a partir de desechos de la industria de refinación de aceites vegetales. ISBN 978-959-261-496-30.

Portillo M., L., Rodríguez M., N., Rodríguez O., A., Gómez M., R. & Pérez R., A. (2017). Manejo de higuerilla (*Ricinus communis* L.) para el Valle del Mezquital, Hidalgo. Ed. Universidad Politécnica de Francisco I. Madero. ISBN 978-607-9260-15-6.

Rahman, M. M., Hassan, M. H., Kalam, M. A., Atabani, A. E., Memon, L. A., Rahman, S. M. A. (2013). Performance and emission analysis of Jatropha curcas and Moringa oleifera methyl ester fuel blends in a multi-cylinder diesel engine. *Journal of Cleaner Production*; 65:14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.034>

Ramalingam, S., Murugesan, E., Ganesan, P., Rajendiran, S. (2020). Characteristics analysis of julifora biodiesel derived from different production methods. *Fuel*, 280, 118579. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118579>

Ramos, M. J., Fernández, C. M., Casas, A., Rodríguez, L., Pérez, A. (2019). Influence of fatty acid composition of raw materials on biodiesel properties. *Bioresource Technology*, 100(1), pp. 261-268. doi: 10.1016/j.biortech.2008.06.039.

Renzaho, A. M. N., Kamara, J. K., Toole, M. (2017). Biofuel production and its impact on food security in low- and middle-income countries: Implications for the post-2015 sustainable development goals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 503–516. doi:10.1016/j.rser.2017.04.072

Rivera B., P. A. & Hernández L., J. (2016). Evaluación del rendimiento y calidad del aceite de siete variedades de *Ricinus communis* *Agronomía Mesoamericana*, 27(1) 183-189. <https://doi.org/10.15517/am.v27i1.21898>

Rivera, Y., Gutiérrez, C., Gómez, R., Matute, M., & Izaguirre, C. (2014). Cuantificación del deterioro de aceites vegetales usados en procesos de frituras en establecimientos ubicados en el Municipio Libertador del Estado Mérida Ciencia e Ingeniería. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 3(35), 157-164. <http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/cienciaeingenieria/article/view/5238/6753>

Rodríguez, D. A. R., Ávila, J. M. R., Romero, D. H. M. (2016). Obtención de biodiésel a partir de mezclas de aceite de cocina usado y aceite de higuerilla por transesterificación. *Jóvenes en la Ciencia*, 2(1), 1850-1854.

Rondón M., M., Díaz D., Y., Fernández S., E., Tabio G., D., Piloto R., R. & Rodríguez M., S. (2017). Obtención de biodiesel a partir de aceites de origen vegetal, "Moringa oleífera". Monografía para obtener el título de Ingeniero Químico.

Rosales S., R., Arellano A., S., Nava B., C. A., Jiménez O., R., Espinoza, S. S., Borja-Bravo, M. & Martínez-R., E. (2023). Productividad y calidad del grano de higuerilla cultivada en el Centro-Norte de México. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 10(2). <https://doi.org/10.19136/era.a10n2.3223>

Rosas B., A., Aguilar O., A., Cornejo C., I., Rizo F., Z., Córdova de la C., S. E., Ramos F., L. G., & Esparza C., J. D. J. (2018). Análisis de las cadenas de suministro de bioetanol y biodiesel en México: Estudio de caso. *Nova scientia*, 10(20), 13-29. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1145>

Rosas B., A., Aguilar O., A., Cornejo C., I., Rizo F., Z., Córdova de la C., S. E., Ramos F., L. G., Esparza C., J. D. J. (2018). Análisis de las cadenas de suministro de bioetanol y biodiesel en México: Estudio de caso. *Nova scientia*, 10(20), 13-29. <https://doi.org/10.21640/ns.v10i20.1145>

Ruan, R., Zhang, Y., Chen, P., Liu, S., Fan, L., Zhou, N., ... Li, B. (2019). Biofuels: Introduction. *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, 3–43. doi:10.1016/b978-0-12-816856-1.00001-4

Safdar, A., Bibi, R., Ilyas, I., Irum, S., Fatima, S., Sikandar, R., & Qasim, M. (2024). Botany, ethnopharmacology, phytochemistry and toxicology of *Ricinus communis* L. A comprehensive. *Journal of Xi'an Shiyou University, Natural Science Edition*, 20 , 284-320.

SAGARPA. (2017). Bioenergéticos Mexicanos: Higuerilla, *Jatropha curcas*, Sorgo Dulce. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Planeación Agrícola Nacional 2017-2030. México. 30 p.

SAGARPA-SNICS. (2014). Guía técnica para la descripción varietal de higuerilla (*Ricinus communis* L.). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas. Tlalnepantla, Edo. de México. 29 p.

Sahand, M., and R. Abdulsalam. 2023. Production, characterization, and emission characteristics of biodiesel derived from castor (*Ricinus communis*) and black mustard (*Brassica nigra*) seeds. *Petroleum Science and Technology* 1–17. doi:10.1080/10916466.2023.2180037.

Sakthivel, R., Ramesh, K., Purnachandran, R., Shameer, P. M. (2018). A review on the properties, performance and emission aspects of the third-generation biodiesels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2970-2992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.037>

Sánchez, M. I., Castañeda, R. D., Castañeda, M. J. (2016). Usos y potencialidad de la Higuerilla (*Ricinus communis*) en sistemas agroforestales en Colombia. *PUBVET*, 10(6), 507-512. <https://doi.org/10.22256/pubvet.v10n6.507-512>

Sandoval S., F., Méndez C., C., Solano R., I., Cuevas S., C., Cortés M., N. & Hernández O., L. R. (2014). Proceso para la obtención de Biodiesel de Higuerilla. *Innovación Sustentabilidad Tecnológica* | Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Año 1, No. 1, 33-39.

Sarin, R., Sharma, M., Sinharay, R., Malhotra, R. (2007). Jatropha– Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. *Fuel*, 86(10-11), pp. 1365-1371. doi: 10.1016/j.fuel.2006.11.040.

Scholz, V., Da Silva, J. N. (2008). Prospects and risks of the use of castor oil as a fuel. *Biomass and bioenergy*, 32(2), 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.08.004>

Silva, T. J., Barrera-Arellano, D., & Ribeiro, A. P. B. (2021). Margarines: Historical approach, technological aspects, nutritional profile, and global trends. *Food Research International*, 147, 110486. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110486>

Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Inda, C. S., Sharma, S., Sharma, P. K., & Jhalani, A. (2021). A comprehensive review of physicochemical properties, production process, performance and emissions characteristics of 2nd generation biodiesel feedstock: *Jatropha curcas*. *Fuel*, 285, 119110. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119110>

Singh, D., Sharma, D., Soni, S. L., Sharma, S., & Kumari, D. (2019). Chemical compositions, properties, and standards for different generation biodiesels: A review. *Fuel*, 253, 60–71. doi:10.1016/j.fuel.2019.04.174

Solís, B. J. L.; Muñoz, O. A.; Escalante, E. J. A. S. y Zamarripa, C. A. (2016). Crecimiento de variedades y componentes del rendimiento de higuerilla (*Ricinus communis* L.) en Montecillo, Texcoco, Estado de México. *Agrícolas*. 7(2):311-323. <https://doi.org/10.29312/remexca.v7i2.346>

Sosa R., F. S., & Vázquez A., J. (2021). The biodiesel market in Mexico: Challenges and perspectives to overcome in Latin-American countries. *Energy Conversion and Management: X*, 12, 100149. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100149>

Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuels. (2008). Report no. D6751-08, ASTM

Standard specification for diesel fuel oils. 2008. Report no. ASTM -08a. ASTM.

Taguchi, G. (2009). Filosofías de la aplicación de las Técnicas de Calidad. Consultado 5 de Sep. 2018, disponible <http://www.mitecnologico.com/Main/FilosofiaDeGenichiTaguchi>

Tejada Tovar, C., Tejeda Benitez, L., Villabona Ortiz, A., & Monroy Rodriguez, L. (2013). Obtencion de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. 36, 10-25. *Revista Luna Azul*. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321728584002.pdf>

Thapa, S., Indrawan, N., y Bhoi, P. (2018). An overview on fuel properties and prospects of Jatropha biodiesel as fuel for engines. *Environmental Technology & Innovation*, 9(1), 210-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.12.003>

Tobergte, D. R., Curtis, S. (2013). Conceptos Fundamentales De Cromatografía. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 1-31.

Ulu, A., Yildiz, G., Özkol, Ü., Rodríguez, A. D. (2022). Experimental investigation of spray characteristics of ethyl esters in a constant volume chamber. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-18. Doi: 10.1007/s13399-022-02476-3

UPOV. 2018. Documento conexo a la introducción general al examen de la distinción, la homogeneidad y la estabilidad y a la elaboración de descripciones armonizadas de las obtenciones vegetales. Documento TG/RICIN(proj.5) . Elaboración de las Directrices de Examen. Ginebra, Suiza. 29 p.

Vallejo -Rosero, Y., ; Barrios -Correa, L. y Anaya -G.il, J. 2021. La cromatografía en capa fina: una alternativa vigente en la industria farmacéutica. *Revista de Química*, 35(2), 19-25. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/23788>

Van Gerpen, Jon H. (2014). Iowa State University. "Determining the influence of contaminants on biodiesel properties"

Vasco L., José F., Hernández R., I., Méndez G., S. de J., Ventura R., E. J., Cuellar N., M. L. & Mosquera A., José D. (2017). Relación entre la composición química de la semilla y la calidad de aceite de doce accesiones de *Ricinus communis* L. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8 (6), 1343-1356. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i6.299>

Vibrans, H. (2009). <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/euphorbiaceae/ricinus-communis/fichas/ficha.htm>. Malezas de México. 19 de agosto de 2025.

Vyas, A.P., Subrahmanyam, N., Patel, P.A. (2019). Production of biodiesel through transesterification of Jatropha oil using KNO₃/Al₂O₃ solid catalyst. *Fuel.*, 88: 625-628. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.10.033>

Yeboah, A., Ying, S., Lu, J., Xie, Y., Amoanimaa, H., Boateng, K., Chen, M. y Yin, X. (2021). Castor oil (*Ricinus communis*): a review on the chemical composition and physicochemical properties. *Food Science and Technology*, 41(2). <https://doi.org/10.1590/fst.19620>

Yusuf, A., Mamza, P., Ahmed, A., y Agunwa, U. (2015). Extraction and characterization of castor seed oil from wild *Ricinus communis* L. *International Journal of Science, Environment and Technology*, 5(4), 1392-1404.

Zabed, H., Sahu, J. N., Suely, A., Boyce, A. N., Faruq, G. (2017). Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 71, 475-501. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>

Zhang, J., Tang J., J., Zhang J., X. (2015). Polyols prepared from ring-opening epoxidized soybean oil by a castor oil-based fatty diol. *International Journal of Polymer Science* 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/529235>

Zheng, F., & Cho, H. M. (2024). The effect of different mixing proportions and different operating conditions of biodiesel blended fuel on emissions and performance of compression ignition engines. *Energies*, 17(2), 344. <https://doi.org/10.3390/en17020344>