

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA



Obtención de biodiésel por medio de transesterificación a partir de la cera líquida de semilla de jojoba (*Simmondsia chinensis*)

Tesis que para obtener el título de:

MAESTRA EN CIENCIAS

Presenta:

Ing. Catalina Ayala Ruiz

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Gerardo César Díaz Trujillo

CO-DIRECTORA DE TESIS:

Dra. María Cristina Castañon Bautista

Tijuana, B.C., Noviembre de 2021

Universidad Autónoma de Baja California
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA
COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

Folio No. 320
Tijuana, B.C., a 14 de octubre del 2021

C. Catalina Ayala Ruiz
Pasante de: Maestría en Ciencias
Presente.-

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la
Opción: TESIS


Es propuesto, por los C. Dr. Gerardo César Díaz Trujillo y
Dra. María Cristina Castañón Bautista


Quienes serán los responsables de la calidad del trabajo que usted presente,
referido al tema: "OBTENCIÓN DE BIODIESEL POR MEDIO DE
TRANSESTERIFICACIÓN A PARTIR DE LA CERA LÍQUIDA DE SEMILLA DE JOJOBA
(SIMMONDSIA CHINENSIS)", el cual deberá usted desarrollar de
acuerdo con el siguiente orden:


- I. INTRODUCCIÓN
- II. JUSTIFICACIÓN
- III. ANTECEDENTES
- IV. OBJETIVO GENERAL
- V. METODOLOGÍA
- VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
- VII. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN
- VIII. BIBLIOGRAFÍA




FACULTAD DE CIENCIAS
QUÍMICA E INGENIERÍA
CAMPUS TIJUANA


Dra. Ana Alejandra Ramirez Rodriguez
Sub-Directora


Dr. Gerardo César Díaz Trujillo
Director de Tesis


Dra. María Cristina Castañón Bautista
Co-Directora de Tesis


M.C. Roberto Alejandro Reyes Martínez
Director Provisional

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS.....	5
INDICE DE TABLAS.....	7
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	7
RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
JUSTIFICACIÓN.....	9
1. ANTECEDENTES.....	11
1.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL.....	11
1.2 BIOENERGÍA.....	13
1.3 BIODIÉSEL.....	15
1.3.1 Producción mundial de biodiesel.....	17
1.3.2 Principales fuentes de aceite para biodiesel.....	19
1.3.3 Obtención de biodiésel.....	24
1.3.4 Catalizadores utilizados para la obtención de biodiésel.....	26
1.3.5 Producción de biodiésel a partir de aceites vegetales.....	29
1.4 DESCRIPCIÓN <i>SIMMONDSIA CHINENSIS</i>	31
1.4.1 Origen.....	32
1.4.2 Estatus.....	32
1.4.3 Hábitat.....	33
1.4.4 Importancia ecológica.....	33
1.4.5 Tipos de vegetación.....	33
1.4.6 Zonas Ecológicas.....	33
1.5 DESCRIPCIÓN DE LA CERA LÍQUIDA DE <i>SIMMONDSIA CHINENSIS</i>	33
1.6 OBTENCIÓN DE LOS ACEITES VEGETALES.....	34
1.7 EXTRACCIÓN DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA.....	35

1.7.1 Rendimiento de extracción de aceites y grasas	37
1.8 CARACTERIZACIÓN DE GRASAS Y ACEITES.....	37
1.8.1 Caracterización de la cera líquida de Jojoba <i>Simmondsia chinensis</i>	38
1.8.2 Técnicas de caracterización útiles para grasas y aceites.....	39
1.9 BIODIÉSEL A PARTIR DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA.....	40
1.10 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL.....	41
1.10.2 Especificaciones emitidas de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales para la calidad de Biodiesel	44
2. OBJETIVO GENERAL	48
2.2 OBJETIVOS PARTICULARES	48
3. METAS.....	49
4. IMPACTOS	50
5. METODOLOGÍA	51
5.1 RECOLECCIÓN DE LA SEMILLA DE JOJOBA	51
5.1.1 Observaciones y resultados de la recolección de semilla de Jojoba	52
5.2 EXTRACCIÓN DE LA CERA LIQUIDA DE JOJOBA	54
5.2.1 Extracción por maceración	58
5.2.2 Resultados y observaciones de la extracción de la cera líquida de jojoba	59
5.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA.....	60
5.3.1 Resultados de la obtención de biodiésel.....	61
5.4 CARACTERIZACIÓN DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA.....	64
5.5 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL OBTENIDO	65
Espectroscopia de infrarrojo.....	65
Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas	66
Resonancia magnética nuclear de protón de hidrogeno HRMN.....	68
6. DISCUSIONES.....	73

6.2 Recolección de semilla de Jojoba	74
6.3 Rendimiento de extracción	74
6.4 Espectroscopia de infrarrojo.....	74
6.5 Ácidos grasos y métil ésteres de ácidos grasos identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas.....	76
7. CONCLUSIONES.....	78
8. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN.....	81
9. BIBLIOGRAFÍA.....	83

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Desarrollo del mercado mundial de biodiésel [11]	18
---	-----------

Figura 2. Proceso para la obtención de biodiésel [14].....	25
Figura 3. Estructura de una molécula de triglicérido típica [13].....	30
Figura 4. Estructura química de la cera líquida de Jojoba [56]	36
Figura 5. Espectro de infrarrojo de la cera líquida de Jojoba [64]	38
Figura 6. Espectro IR de biodiésel con interferencia de vapor de agua [70].....	42
Figura 7. Trituración de semilla en mortero	54
Figura 8. Montaje del sistema soxhlet	55
Figura 9. Extracción continua.....	55
Figura 10. Secado y filtrado de extracto obtenido.....	55
Figura 11. recuperación de solvente mediante destilación.....	56
Figura 12.Secado y filtrado de producto obtenido	56
Figura 13.Diagrama de flujo de preparación de material vegetal.....	57
Figura 14. Obtención de cera líquida mediante solvente.....	57
Figura 15. Preparación de matraz bola	60
Figura 16. Síntesis de biodiésel con cera líquida de jojoba.....	61
Figura 17. Producto obtenido de la transesterificación de cera líquida de Jojoba catalizada con NaOH.....	61
Figura 18. Producto obtenido de la transesterificación de cera líquida de Jojoba catalizada con KOH.....	61
Figura 19. Metodología para la obtención de biodiésel a partir de cera líquida de Jojoba ..	62
Figura 20: Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5	64
Figura 21: Espectro de Infrarrojo obtenido de cera líquida de Jojoba obtenida.....	64
Figura 22. Espectros de infrarrojo obtenidos de las muestras de biodiesel obtenido.....	65
Figura 23. Espectro H RMN cera líquida de Jojoba.....	68
Figura 24. Espectro H RMN de biodiésel catalizado NaOH.....	69
Figura 25. Espectro H RMN de biodiésel catalizado KOH.....	69
Figura 26. Espectro H RMN de biodiésel catalizado NaOH-Zn	70
Figura 27. Espectro de H RMN obtenido de biodiésel catalizado NaOH-Zr	70
Figura 28. Espectro de H RMN obtenido de biodiésel catalizado NaOH-Ti	71
Figura 29. Métil éster de ácido 7-Hexadecenoico	71
Figura 31. Eicosen-1-ol,cis-9-	72

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los bioenergéticos con base en sus diferentes generaciones tecnológicas	13
Tabla 2. Potenciales de producción sostenible de biomasa para energía	14
Tabla 3. Variables típicas involucradas en la obtención de biodiésel	18
Tabla 4. Catalizadores empleados en la obtención de biodiésel.....	27
Tabla 5. Estructura química de los ácidos grasos más comunes	30
Tabla 6. Características de la cera líquida de Jojoba pura.....	38
Tabla 7. Especificaciones de la Norma ASTM D6751	41
Tabla 8. Relación de pesos obtenidos de la semilla de Jojoba en las diferentes áreas de recolección.....	53
Tabla 9. Resumen de material y equipo utilizado para la extracción de la cera líquida de Jojoba.....	58
Tabla 10. Resumen de la materia prima y reactivos utilizados para la obtención de la cera	58
Tabla 11. Relación tipo de enlace-región de la cera líquida de jojoba.....	65
Tabla 12. Relación tipo de enlace-región de muestras obtenidas de biodiésel	66
Tabla 13. Tiempos de retención de ácidos grasos identificados	67

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Flores de planta macho de Jojoba.....	31
Ilustración 2. Frutos de Jojoba secos	32
Ilustración 3. imágenes satelitales de Bosque de las Araucarias	51
Ilustración 4. Planta de Jojoba ubicada en bosque de las Araucarias.....	52
Ilustración 5. Semillas recolectadas sin descascarillar	54

RESUMEN

En este estudio se determinó si la cera líquida de Jojoba (*Simmondsia Chinensis*) obtenida de las semillas recolectadas de remanentes de vegetación nativa del área de Tijuana, Baja California; puede ser materia prima para la producción de biodiésel. Además de evaluar la conversión de ácidos grasos presentes en metil ésteres de ácidos grasos utilizando diversos catalizadores.

Se realizó una recolección de la semilla en la región, y se llevó a cabo en el laboratorio la extracción continua con aparato Soxhlet utilizando como solvente n-hexano. El extracto obtenido se sometió a separación con presión reducida, para recuperar la mezcla de ácidos grasos extraídos de la semilla.

El producto obtenido de la extracción de cera de las semillas se sometió a la reacción de transesterificación utilizando metanol, catalizando con NaOH, KOH y mezclas de NaOH/Zn (NO₃)₂·6H₂O; NaOH/ZrO (NO₃)₂ y NaOH /Ti [OCH(CH₃)₂]₄. Derivado de esta reacción se obtuvieron ocho ésteres metílicos de ácidos grasos, presentes en el aceite de las semillas de Jojoba, sobresaliendo el ácido 11-eicosenoico, 13 docosenoico y 9-octadecenoico, identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas.

Realizados estos experimentos se confirmó la similitud en composición con otros estudios realizados de biodiésel a partir de Jojoba y de otras especies oleaginosas, además de comparar con los estándares D6584 (determinación glicerina libre y glicerina total) y D7371 (Determinación de contenido de biodiesel en combustible fósil usando espectroscopia de infrarrojo), corroborando la ausencia de glicerina y los grupos funcionales mostrados en espectroscopia de infrarrojo; que corresponden al estándar D6751 que especifica las características que debe cumplir el combustible biodiésel, de esta forma concluyendo que el biodiesel obtenido de esta oleaginosa presenta potencialidad para su uso como biocombustible .

INTRODUCCIÓN

Mucho antes de que las sociedades modernas tuvieran a su alcance sistemas de energía basados en combustibles fósiles, la única manera de generar energía o transportarse era a base de fuentes renovables ya que representaban un aprovechamiento de los recursos con los que se contaba en aquel entonces. Ejemplo de ello es el viento que servía para impulsar barcos, la energía del agua para impulsar molinos y utilizar a los animales para realización de tareas agrícolas o de transporte.

El primer motor construido por Henry Ford operaba con alcohol de caña, lo que hoy en día conocemos como etanol. Cuando Rodolfo Diesel desarrollo el primer motor diésel utilizó un combustible derivado del aceite vegetal parecido al biodiesel.

Así pues, como no se contaba con la suficiente tecnología para aprovechar las fuentes fósiles del planeta, el desarrollo de estos motores impulsó con ello el desarrollo de la tecnología y la implementación de métodos para la extracción de combustibles fósiles y una mayor utilización de estos en los motores.

En la actualidad nos enfrentamos a otro reto, las fuentes de energía fósil hoy son causantes de uno de los efectos que más ha trastornado al planeta: El calentamiento global. Otro grave problema de esto es la dificultad que se está presentando en la extracción de petróleo, ya que los yacimientos de aguas profundas requieren una tecnología avanzada. Y el último reto es enfrentar el agotamiento de los combustibles fósiles en el futuro.

Pese a estas problemáticas, surge la alternativa de elaboración de biocombustibles a base del aceite obtenido de semillas oleaginosas, que con su uso prolongado pueden sustituir el uso del petróleo y además reducirían los gases de efecto invernadero. El biodiesel es una alternativa sustentable y energética de bajo impacto ambiental, con un subproducto generado en su preparación, que es la glicerina. Ésta, es popularmente utilizada en la industria cosmética para la elaboración de jabones, geles de baño y cremas cosméticas entre otros usos.

JUSTIFICACIÓN

Durante la última década se ha transformado la biomasa en biocombustibles mediante diferentes metodologías que incluyen el uso de catalizadores para acelerar la reacción en el caso de biodiesel. Los catalizadores usados mayoritariamente incluyen el hidróxido de sodio e hidróxido de potasio conocidos por ser catalizadores homogéneos, estos como su clasificación lo indica, forman una disolución en la reacción haciendo más engorrosa la forma de eliminación; es por ello que una alternativa podrían ser los catalizadores heterogéneos que pueden ser fácilmente extraídos una vez pasada la reacción y pueden tener rendimientos adecuados después de varios usos; sin embargo, se encuentran pocos avances en la utilización de otros catalizadores en la transformación de aceite/cera líquida de jojoba en biodiésel. Aunado a esto se presenta otra problemática con respecto al uso de las diferentes oleaginosas de las que se tiene disponibilidad; estas representan el uso de terrenos de cultivo que bien podrían ser destinados a la producción de alimentos; que se traduce a la transformación de estos en cultivos energéticos (destinados a la producción de biomasa destinada a biocombustibles). Una alternativa para solucionar el problema que representa producción de biomasa para su transformación en biocombustibles, es la utilización de especies oleaginosas con alto potencial energético que pudieran; incluso, resolver otras problemáticas tales como la desertificación en las zonas áridas y menor consumo de agua por hectárea cultivada. Estas alternativas representarían un balance energético favorable para el uso de especies oleaginosas nativas y su aprovechamiento sustentable. En el caso de la especie nativa *Simmondsia chinensis* del norte de Baja California, Sonora y sur de California, esta esta adaptada a las altas fluctuaciones de temperatura y pueden tolerar heladas y altas temperaturas, incluyendo que crece en diversos tipos de suelo tales como roca porosa a arcillas, suelo desértico, arena y en granito descompuesto. Dadas estas razones se propone el uso de la cera líquida de Jojoba (*Simmondsia chinensis*) para su transformación en biodiésel utilizando otras propuestas de catalizadores heterogéneos a los comúnmente utilizados para esta reacción como lo son los catalizadores homogéneos alcalinos (hidróxido de sodio e hidróxido de potasio).

1. ANTECEDENTES

1.1 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

La contaminación causada por la combustión de los combustibles fósiles en los sistemas de generación de energía eléctrica y mecánica es hoy en día una de las problemáticas ambientales más importantes. Se ha probado que las emisiones de la combustión, particularmente la de carros y camiones, están estrechamente relacionadas con serios daños al ambiente y a la salud humana. Aunado a eso es necesario considerar que las fuentes de combustible fósil están disminuyendo y su explotación se hace cada vez más difícil y por lo tanto costosa [1][2]. La bioenergía representa una solución sustentable para la generación de energía eléctrica y es una fuente de energía renovable derivada de la materia orgánica de origen animal y vegetal llamada biomasa. Las fuentes de energía basadas en esta son potencialmente neutrales en cuanto a la producción de dióxido de carbono [1].

Hablar de bioenergía implica considerar la viabilidad de una gama diversa de energéticos secundarios, que son producidos a partir de una biomasa. Existen bioenergéticos sólidos, líquidos y gaseosos, que tienen uso en la generación de calor, electricidad y el más conocido para la generación de energía motriz: es decir combustibles para el sector transporte [3].

Detrás de estas opciones de biocombustibles disponibles, se puede decir que a nivel internacional han sido cuatro las motivaciones centrales para su desarrollo: El pronóstico del fin de la era del petróleo, la estrategia de limitación de importaciones de petróleo de los países más avanzados el aprovechamiento de excedentes de granos en las naciones desarrolladas, el endurecimiento de la normatividad ambiental en materia de calidad del aire; han aumentado la necesidad de implementar estrategias que mitiguen el cambio climático. Estos factores están relacionados íntimamente con el sector transporte en cuando a la necesidad de sustituir combustibles fósiles por combustibles alternativos. Como se tiene conocimiento; este sector es un fuerte consumidor de los derivados del petróleo, principalmente gasolinas y diesel; en consecuencia también el sector transporte resulta en un emisor importante de gases de efecto invernadero [3].

Los combustibles derivados del petróleo suplen cerca del 96% de la demanda de energía mundial para transporte, se conoce que las reservas de este hidrocarburo están limitadas y

eventualmente tenderán a acabarse. El declive de las fuentes de energía fósil como el petróleo, carbón y gas natural, además de los elevados costos de la importación de estos recursos son problemas que se deben afrontar, principalmente para los países que no tienen abundancia de estos. Se estima que las reservas disponibles de combustibles fósiles pueden agotarse en un 80% entre 35 y 84 años dependiendo en que tan rápido sean usados. Basado en las estimaciones actuales y con la tendencia de uso, se espera que las reservas de petróleo duren al menos 44 años, eso sin considerar nuevos yacimientos que aún no hayan sido descubiertos y que signifique una prolongación en el abasto de combustibles por otros 20 a 40 años adicionales[1].

Los sistemas de energía renovable parecen ser una promesa para resolver todos estos problemas, garantizando a muchos países el abasto de energía segura y que sea amigable con el ambiente[1]. Hay muchas razones que despiertan el interés en biocombustibles, podemos citar las siguientes:

- Mitiga el cambio climático y reduce la dependencia de energía importada
- La producción de energía renovable sustituye a los combustibles fósiles, a pesar de ello su efectividad para remplazarlos aun es cuestionable.
- El compromiso de reducir los gases de efecto invernadero.
- El desarrollo de recursos locales: Apoyo de compañías con productores a pequeña escala.
- Significativos ahorros en transporte.

1.2 BIOENERGÍA

La bioenergía es la energía obtenida de la biomasa, esta es la materia constitutiva de los seres vivos, sus excretas y sus restos no vivos. Los biocombustibles son los obtenidos a partir de la biomasa y pueden ser o no transformados o procesados. Se distingue a los:

Biocombustibles sólidos (leña, carbón vegetal, residuos agrícolas, residuos forestales, pellets, briquetas): que pueden quemarse directamente o previa gasificación o pirólisis, para producir calor y electricidad.

Biocombustibles líquidos (bioetanol y biodiesel): obtenidos de cultivos energéticos como caña de azúcar y oleaginosas o aceite vegetal usado.

Biocombustibles gaseosos (biogás, biometano): obtenidos de los residuos municipales y estiércol [4][5].

Según el nivel de procesamiento y origen de la fuente, los biocombustibles se clasifican como de primera, segunda, tercera o cuarta generación [6]. Donde los primeros son a partir de biomasa derivada de materias primas aptas para alimentación, los segundos, a partir de productos lignocelulósicos derivados de residuos de la industria agrícola y maderera. Los de tercera generación es a partir de biomasa derivada de cultivos específicos, como microalgas y finalmente los de cuarta generación que son basados en ingeniería metabólica de microorganismos [6]. En la tabla 1 se presenta un resumen de la clasificación de los bioenergéticos.

Tabla 1. Clasificación de los bioenergéticos con base en sus diferentes generaciones tecnológicas

Bioenergéticos	Sólidos	Líquidos	Gaseosos
1ª generación	Leña, carbón vegetal, bagazo, pellets	Bioetanol, biodiesel, licor negro	Biogás, gas de síntesis
2ª generación	Biochar, torrefactos, torpellets	Etanol celulósico, syndiésel, aceite de pirolisis	—
3ª generación	—	Diésel de algas, etanol de algas	Biohidrógeno

[6]

La bioenergía presenta varias ventajas con respecto a otras fuentes de energía:

Es almacenable: la energía de la biomasa está almacenada en la materia orgánica. Por este motivo es una forma de energía que no tiene la intermitencia de otras renovables como la solar y la eólica, lo que le da ventajas para la generación de calor o electricidad [4].

Permite satisfacer la mayor parte de los usos finales: es la única energía renovable que puede sustituir a los combustibles fósiles en todas las aplicaciones y finalidades, porque permite producir calor, fuerza motriz, electricidad y biocarburantes líquidos [4].

Es ubicua: la biomasa se puede encontrar o cultivar en casi todas partes, y está disponible en forma concentrada como subproducto de procesos agroindustriales, residuos de actividades humanas y como estiércol de animales [4].

Es escalable: hay sistemas de aprovechamiento de biomasa y producción de bioenergía desde muy bajas (< 1 kW) hasta grandes potencias (> 300,000 kW); esto permite una amplia versatilidad para el desarrollo de sistemas de suministro energético a escalas locales y mayores[4].

Es comercialmente madura: muchas de las tecnologías para el uso energético de biomasa son rentables y están ampliamente desarrolladas a nivel comercial [4].

México tiene un potencial de recursos para aprovechamiento de estos en biocombustibles. En la tabla 2 se aprecian los recursos aprovechables.

Tabla 2. Potenciales de producción sostenible de biomasa para energía

Tipo y origen	Unidades	Cantidad	PJ/a	%
Madera de manejo de bosques nativos	MtMS/a	101	1515	42
Madera de plantaciones de <i>Eucalyptus</i>	MtMS/a	26	345	10
Residuos industriales de cultivos dedicados (bagazo y otros)	MtMS/a	29	431	12
Residuos agrícolas de cosechas	Mt/a	13	227	6
Residuos de cultivos alimenticios y forrajeros	MtMS/a	15	114	3

Residuos agrícolas de cosechas de cultivos dedicados	MtMS/a	8	86	2
Residuos industriales de la industria forestal	MtMS/a	3	63	2
Cania de azúcar para etanol	Mt/a	206	338	9
Sorgo grano para etanol	Mt/a	—	202	6
Aceite de palma aceitera para biodiésel	Mt/a	13	121	3
Jatropha curcas para biodiesel	Mt/a	4	57	2
Residuos del ganado para biogás	Mt/a	35	35	1
Residuos sólidos municipales para biogás	—	—	35	1
Total			3569	100

[4]

1.3 BIODIÉSEL

Desde una definición general, el biodiésel corresponde a un combustible renovable, derivado de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, obtenido a través de un proceso industrial relativamente simple de transesterificación del aceite vegetal o animal. Después del proceso y a diferencia del aceite que le dio origen, el biodiésel (éster metílico) tiene una viscosidad semejante a la del diésel derivado del petróleo y puede reemplazarlo en los usos más comunes[7] es un combustible biodegradable, no es tóxico, las emisiones derivadas de su combustión son bajas y es benéfico para el ambiente [8].

Para una definición técnica del biodiésel y de la mezcla de este, se puede tomar la utilizada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés). De acuerdo con esta institución:

Biodiésel, n. Es un combustible compuesto de ésteres mono-alcalinos de ácidos grasos de cadenas largas, derivados de aceites vegetales o grasas animales denominado B100 y que cumplen los requerimientos de la ASTM D 6751[7].

Biodiésel mezcla, n. Se refiere a una mezcla de biodiésel (como fue definido anteriormente) con el diésel derivado del petróleo y denominado BXX, donde XX representa el porcentaje

del volumen de biodiésel en la mezcla. Por ejemplo: B20 significa una mezcla con 20% de biodiésel y 80% de diésel derivado del petróleo[7].

En México; la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, define al biodiesel como un combustible que se obtiene por medio de transesterificación de aceites vegetales y grasas animales. La legislación Mexicana no menciona las mezclas diesel-biodiesel[9].

Dentro de las características del biodiesel podemos enlistar características deseables y características limitantes:

Deseables

- Es una fuente de energía limpia, renovable, de calidad y económicamente viable, que además contribuye a la conservación del medio ambiente, por lo que representa una alternativa a los combustibles fósiles[7].
- Se trata de un combustible biodegradable, cuyo uso disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y óxidos de azufre. También reduce entre 60% y 90% la cantidad de hidrocarburos totales no quemados[7].
- Puede ser producido económicamente en un amplio rango de lugares tanto rurales como urbanos y en diferentes escalas (pequeñas para autoconsumo o comerciales).
- Tiene un gran potencial para ser producido por aceites no comestibles[7].
- El contenido energético del etanol es de 67% con respecto a aquel de la gasolina, mientras que el del biodiesel es de 90% en relación con el del diésel proveniente del petróleo[7].

Limitantes

- El proceso de fabricación de biodiesel libera la glicerina, la cual todavía constituye un problema por su contenido tóxico (moderado) y contaminante[7].
- Aporta un 10% de óxidos nitrosos a la atmósfera (lluvia ácida) con respecto a los combustibles fósiles[7].
- Balance energético, un aspecto que todavía es debatido en el mundo es si el balance energético del biodiesel es positivo. En la jerga de la producción de combustibles, se entiende por balance energético la diferencia entre la energía que produce un

kilogramo de combustible (biodiesel en este caso) y la energía necesaria para producirlo, lo cual incluye extracción (cultivo en este caso), procesamiento, purificación del aceite (si se trata de aceite residual), transporte, refinado entre otros[7].

La transesterificación de triglicéridos es el procedimiento que más se emplea para la obtención de biodiesel. En esta los triglicéridos de un aceite o una grasa reaccionan con un alcohol en presencia de un catalizador para la formación de biodiesel y glicerina como subproducto de la reacción, esta reacción es reversible por ello se utiliza un exceso de alcohol con respecto a la estequiometría para desplazar el equilibrio hacia los productos [10].

1.3.1 Producción mundial de biodiesel

Aunque potencialmente se pueden usar múltiples fuentes alternativas, casi la totalidad del biodiesel que se produce actualmente proviene de los aceites de origen vegetal y en particular de tres cultivos: la palma, la soja y la colza. Estos tres cultivos proveen el 75% de la oferta mundial de aceite. El restante 25% se origina en cultivos como maní, algodón, oliva y girasol[7].

El biodiesel involucra el aceite vegetal y/o animal la reacción de este con un alcohol (mayormente utilizado metanol) y un catalizador que sirve como acelerador de la reacción, para de esta forma obtener como producto un porcentaje de biodiesel y otros subproductos derivados tales como la glicerina y la recuperación de los alcoholes utilizados que no hayan reaccionado [7]. En la tabla 3 se muestran las variables típicas involucradas en la obtención de biodiesel.

Tabla 3. Variables típicas involucradas en la obtención de biodiésel

Insumos		Productos
(87%) Aceite + (12%) Metanol + 1% Catalizador	→	(86%) Biodiésel + (9%) Glicerina + Etanol (4%) + (1%) Fertilizante

[7]

Dada la importancia que tienen la palma y la soja en la producción actual de biodiesel y por ser las dos fuentes principales de aceite vegetal a escala mundial, es importante documentar la evolución de la producción de aceite proveniente de ambos productos en el mundo [7].

En lo que respecta al aceite de soja, su producción creció al mismo ritmo del 5% que la producción total de aceite, mientras que la producción de aceite de palma lo hizo a un ritmo más acelerado del 8% anual durante el mismo periodo, lo que provocó que a partir del 2005 el volumen anual producido de aceite de palma fuera superior al de soja. La producción de aceite de colza, por su parte, creció al 4% anual, un punto porcentual por debajo del ritmo de crecimiento de la producción total de aceite[7].

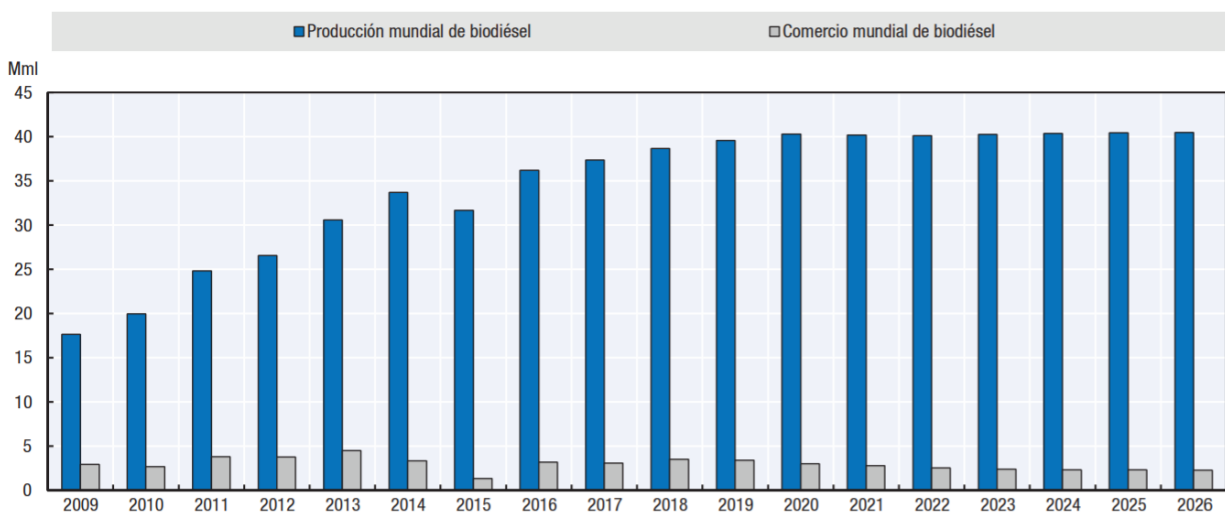


Figura 1. Desarrollo del mercado mundial de biodiésel [11]

Como bien se muestra en la figura 1, con base en el crecimiento de la producción mundial de biodiésel, se espera que en los próximos años la relación con respecto al comercio mundial de biodiésel se establezca a tal grado que se logre obtener una mayor rentabilidad [11]

1.3.2 Principales fuentes de aceite para biodiesel

Glycine max (soja). La soja tiene su origen en Asia hace aproximados 5000 años. Es un cultivo anual, cuya planta alcanza generalmente una altura de 80 centímetros y su ciclo vegetativo oscila de tres a siete meses. La semilla de soja se produce en vainas de 4 a 6 cm de longitud y cada una contiene de 3 a 4 granos de soja. Se desarrolla óptimamente en regiones cálidas y tropicales. Se adapta a una gran variedad de latitudes que van desde cero a 38 grados y los mayores rendimientos



[7]

en la cosecha se obtienen a menos de 1000 metros de altura. Se le considera la oleaginosa de mayor importancia en el mundo. Su alto valor económico radica en la calidad de su aceite y pasta proteica que son industrializados en otros productos de valor agregado. La pasta proteica de soja es considerada como la más nutritiva dentro de las proteínas de origen vegetal. En los últimos años se



[7]

ha incrementado el uso del aceite de soja para la producción de biodiesel[7].

Elaeis guineensis (palma aceitera o palma africana). Es una palmera tropical que crece en climas cálidos en la franja ecuatorial de la tierra y puede llegar a crecer hasta 8.3-20 m de altura. Se puede obtener aceite de dos fuentes: del fruto (aceite de palma) y de la almendra (aceite de almendra/palmiste). Ambos tienen propiedades físicas y



[7]

químicas diferentes. El ciclo de producción comienza en el tercer año y alcanza el máximo de producción entre los siete y diez años. Su aceite puede ser máximo de producción entre

los siete y diez años. Su aceite puede ser utilizado para diversos productos (aceites, margarinas, jabones, entre otros). Sin embargo, su demanda ha aumentado significativamente, ya que se puede emplear como materia prima para la producción de biodiesel a un buen costo y rendimiento. En América Latina, los principales productores son Colombia, Ecuador, Costa Rica, Honduras y Guatemala[7].

Cocos Nucifera L. (cocotero). Se puede clasificar en dos grupos: los gigantes y los enanos, de los cuales se crean los híbridos. Generalmente se cultiva en suelos muy pobres (arenas costeras) y en clima de calor y humedad. Es una planta perenne con un ciclo de producción que se alarga durante todo el año. La organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) estima 10.7 millones de hectáreas cosechadas, de las cuales el 83.5%



[7]

se encuentra en Asia[7].

Ricinus communis (tartado, higuerrilla, higuerrita, ricino). Es un árbol que sobrevive y puede



[7]

crecer en las tierras marginales, bajo condiciones de humedad subhúmedas y semiáridas. Hoy en día, el aceite de ricino se usa en más de 700 aplicaciones. Según el EMBRAPA (2005) el aceite de ricino es el mejor para producir

biodiesel por ser el único soluble en alcohol y que no requiere calor, con el consecuente gasto de energía que exigen otros aceites vegetales. Constituye la única fuente comercial de ácidos grasos hidroxilados, pues posee alrededor de un 85% de ácido ricinoleico [7].

Jatropha curcas L. (piñón manso, tempate). Proviene originalmente de México y Centroamérica. Es una oleaginosa perenne de forma arbustiva que crece más de dos metros de altura. Cada planta produce, a partir del primer año, alrededor de cuatro a cinco kilos de semilla, la cual tiene un rendimiento industrial de 38% aproximadamente. Se pueden sembrar



[7]

de 625 a 1100 plantas por hectárea. Posee un alto porcentaje de aceite en sus semillas. Otro factor que resulta atractivo de este cultivo es que no requiere de mucha mano de obra y cuidados, una vez establecido, ya que es un vegetal muy rustico y con bajos requerimientos en cuanto al abono y control de plagas y enfermedades, por lo que resultaría una alternativa para la

diversificación de la finca[7].

Helianthus annus L. (girasol). Es originario del oeste de Norte América, pero se adapta fácilmente a diferentes climas. Hoy se cultiva en los cinco continentes. El girasol se utiliza principalmente para la producción de aceite, pero también como ornamentales, alimentación de aves, entre otros. El ciclo promedio del girasol es de 100-150 días y la duración de la floración es de 7 a 10 días; ambos dependen de varios factores. El girasol es considerado de alta calidad por presentar un bajo porcentaje de ácidos grasos saturados y un alto porcentaje de ácidos grasos



[7]

insaturados[7].

Arachis hypogaea L. (maní, cacahuate, mandubí). Hierba compuesta de un pequeño tallo y de hojas trifoliadas y abundantes. Su raíz pivotante mide entre 30 y 50 cm. Después de la fecundación, se inclina hacia el suelo y su fruto (o vaina) se desarrolla en tierra. La vaina contiene de



[7]

dos a cuatro granos. Cada grano tiene un promedio de 50% de aceite y un 22%-30% de contenido proteínico[7].

Brassica napus (canola o colza). Es de los primeros cultivos aprovechados por el hombre. Se ha expandido con el pasar del tiempo desde India hasta Europa, ya que es de las pocas especies oleaginosas apta para ser cultivada en zonas templadas y frías. Se utilizó principalmente como aceite industrial y para iluminación. La canola se logra producir a finales de la década de los sesentas tras lograr la reducción del ácido erucico y glucosinolato, por eso se ha



[7]

utilizado el nombre *Canadian oil low acid* para identificar más fácilmente este producto diferenciado[7].

Carthamus tinctorius (cártamo, alazor). Proviene originalmente de India, pero se puede



[7]

adaptar a suelos poco fértiles, al igual que diferentes climas, lo cual permite su cultivo en varios países y zonas. La altura promedio es de 50-100 cm; sin embargo, las raíces pueden extenderse hasta los 2.4 m de profundidad, lo que permite utilizar un alto porcentaje del agua disponible del suelo. Existen dos variedades de cártamo, las que producen un aceite de alto porcentaje de ácido oleico y otras con alta

concentración de ácido linoleico. Ambos tipos contienen un bajo porcentaje de ácidos grasos saturados y alta calidad nutricional[7].

Mauritia flexuosa (aguaje, palmera buriti). El buriti se encuentra principalmente en la región



[7]

permite una producción media de 200 kg por planta entre diciembre y julio y 20 kg de aceite por planta al año. El estípite puede alcanzar los 35 m de altura[7].

Plukenetia vlvilis (Sacha inchi). Es una planta nativa de la Amazonia del Perú. Se cree que sus semillas pueden superar en calidad a todas las semillas oleaginosas utilizadas para la producción de aceites, por tener el más alto contenido de aceites, insaturados omega (92%), reductores del colesterol. Su harina contiene alta calidad de



[7]

proteína y vitaminas A, D y E. Es un excelente recurso para la producción de alimentos. El aceite y la harina tienen alta digestibilidad. Por sus grandes cualidades, el *sacha inchi* es de gran valor para la salud, por lo que su cultivo e industrialización son altamente prioritarios[7].

Gossypium spp. (algodón, algodón). Arbusto perenne, cultivado como una planta anual.



[7]

Es una planta tropical que requiere de un periodo seco durante su maduración y cosecha. Esta se puede adaptar a distintos suelos con un mínimo de ajustes. Su ciclo de cultivo varía entre 120 a 210 días según las condiciones. El porcentaje de aceite en los granos con liner es alrededor de 20%, lo que equivale a una producción de 450

kg de aceite por hectárea, lo cual depende de los factores. Dada su constitución de ácidos grasos, saturados e insaturados, tiene un excelente potencial para la producción de biodiésel[7].

Linum usitatissimum (linaza). Planta herbácea, que puede llegar a crecer hasta los 80 cm. Sus cinco semillas poseen muchos principios activos y contienen cinco veces más omega-3 que cualquier otro alimento vegetal. Aparte de su uso medicinal, el aceite de la linaza también tiene excelentes propiedades para producir biodiésel[7].



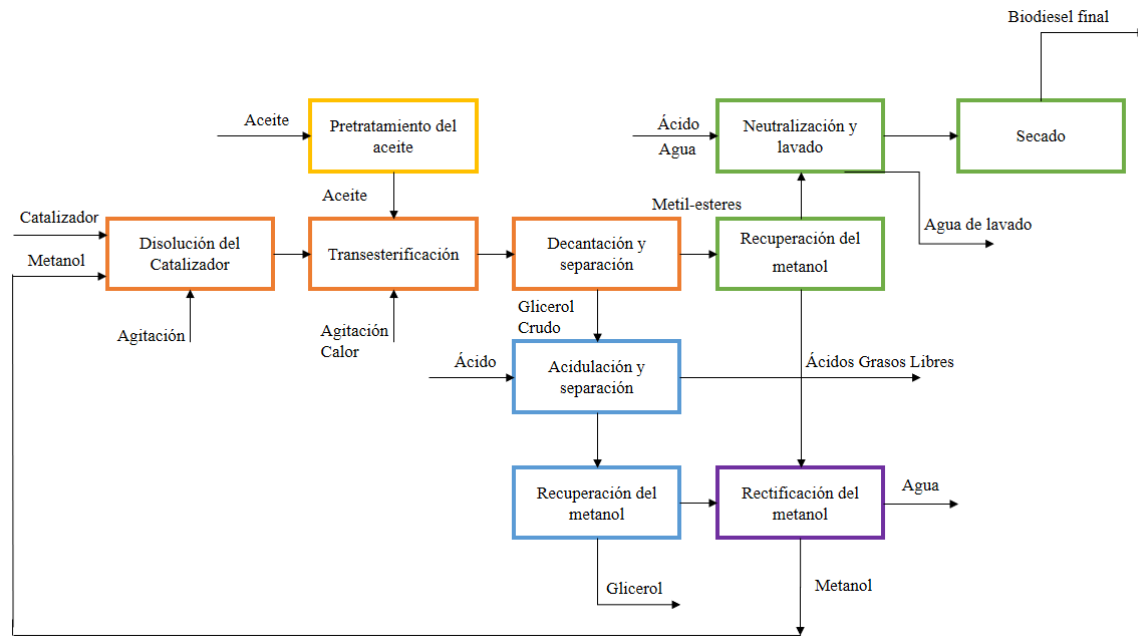
[7]

1.3.3 Obtención de biodiésel

El uso de aceites vegetales como combustibles alternativos a sido comprobado desde hace 100 años, cuando Rudolph Diesel quien fuera el creador del motor diésel; probó el funcionamiento de su primer motor de compresión usando como combustible aceite de cacahuete. En 1970 ciertos científicos descubrieron que la viscosidad de los aceites vegetales podría ser reducida con un simple proceso químico por el cual estos podrían funcionar como combustible diésel en una maquina más moderna [12]. Considerables esfuerzos han sido hechos para desarrollar derivados de aceites vegetales que tengan las propiedades químicas similares a los combustibles basados en hidrocarburos.

El biodiesel es un combustible alternativo a los basados en petróleo; derivado de los aceites vegetales, grasas animales y aceite usado de cocina incluyendo los triglicéridos. La producción de biodiesel es un área muy moderna tecnológicamente hablando; en la cual se pueden hacer diferentes investigaciones y que últimamente ha tenido mayor relevancia debido al incremento de los precios del petróleo y las ventajas sobre el medio ambiente que puede tener el uso de biodiesel en el sector transporte. La transesterificación es el método más común para obtener los mono alquil esterés de aceite vegetal y grasas, que hoy en día llamamos biodiesel y el cual es usado como combustible alterno[13].

En la figura 2, se muestra un diagrama con el proceso para la obtención de biodiesel: para poder llevar a cabo la reacción de transesterificación es necesario hacer una disolución del catalizador en el alcohol a utilizar [14]. Una vez hecha la disolución esta es vertida directamente al aceite que previamente ha sido pretratado, el cual está en un medio de agitación y calor, después de ello podemos obtener el producto de la reacción que se distingue por 2 fases una fase que se sedimenta en el recipiente (glicerol sin tratar) y la fase superior que es una mezcla de los metil-esterés con el alcohol utilizado y en menor cantidad, se puede encontrar el aceite que no logro reaccionar [14]. Este producto de la reacción es decantado y separado para rescatar el glicerol y el alcohol utilizado y obtener un producto final con la menor cantidad de impurezas. La fase que contiene los metil-esterés es sometida a lavado para finalmente obtener un producto más puro que se conoce como biodiesel [14].



Etapas del proceso:

- Pretatamiento del aceite
- Transesterificación
- Postratamiento del biodiesel
- Postratamiento del glicerol
- Reuso del metanol

Figura 2. Proceso para la obtención de biodiésel [14]

Desde la crisis del petróleo en 1970, el incremento de los precios y lo incierto de la disponibilidad del petróleo, además del aumento en la preocupación acerca del ambiente y el efecto de los gases de efecto invernadero durante las últimas décadas, ha reavivado el interés en el uso de aceites vegetales como sustitutos del combustible fósil. Estos aceites son comúnmente encontrados en varias fuentes, y los glicéridos presentes en ellos pueden ser considerados como alternativas viables ante los combustibles fósiles. Estas fuentes han demostrado tener buena potencia calorífica y cuando el gas del escape es expulsado no se encuentran grandes cantidades de azufre y compuestos aromáticos policíclicos. Debido al hecho de que los aceites vegetales son producidos de las plantas, en el momento de que son combustionados se convierten completamente en dióxido de carbono (CO₂) reciclable[13].

Los aceites vegetales pueden ser usados como combustibles en los motores diésel, pero sus viscosidades son mucho mayores que el combustible diésel derivado de hidrocarburos entonces requiere modificaciones en los motores[13].

1.3.4 Catalizadores utilizados para la obtención de biodiésel

La transesterificación de aceites vegetales se puede llevar a cabo con catalizadores homogéneos como NaOH, KOH o H₂SO₄, o con catalizadores heterogéneos como óxidos metálicos, carbonatos o enzimas, según la fase en que se encuentren respectivamente [15] [12]. Por su capacidad de actuar químicamente se clasifican también en ácidos y básicos[15].

Para la transesterificación comúnmente se utilizan como catalizadores hidróxido de sodio e hidróxido de potasio, pero recientemente se ha buscado utilizar opciones diferentes a estos dos catalizadores [16].

Las opciones alternas a la utilización de estos catalizadores incluyen, algunos de tipo heterogéneos como lo es el uso de óxidos de tierras raras. Entre estos óxidos se presentan las posibilidades del uso de SrO y BaO, ya que presentan una solubilidad alta en el metanol [17].

Recientemente cerca del año 2010, se patentaron el uso de óxidos de metales alcalinotérreos, hidróxidos y carbonatos tales como MgO y CaCO₃ [17]. Otros como las hidrotalcitas Mg₆Al₂(OH)₁₆CO₃·4H₂O, MgO y CaO en γ - Al₂O₃ y perovskitas como CaTiO₃, CaMnO₃ y CaZrO₃ todos ellos con la finalidad de utilizarlos en la reacción de transesterificación para obtención de biodiesel a partir de ácidos grasos derivados de especies oleaginosas [17].

Otros estudios demuestran el uso de Zr para el mismo propósito pero con dificultades para la remoción de los iones de sulfato después de la reacción [18].

De igual forma teniendo de partida para la obtención de biodiesel; el aceite de soya, se han utilizado como catalizadores K₂O/CaO-ZnO encontrándose resultados favorables debido al dopaje de los compuestos de CaO y ZnO con K₂O y reportando una transformación de ácidos grasos en poco más del 80% debido a un aumento de la alcalinidad como consecuencia de la incorporación de K₂O [19].

En la tabla 4 se muestra un concentrado de la información recabada acerca de los catalizadores empleados en la obtención de biodiesel.

Tabla 4. Catalizadores empleados en la obtención de biodiésel

Especie oleaginosa utilizada	Tipo de catalizador	Formula química	Porcentaje de eficiencia	de Referencias
Soja	Acido heterogéneo	$\text{SO}_4^{2-} \cdot \text{ZnO}$	80.19 %	[20]
Soja	Acido heterogéneo	$\text{SO}_4^{2-} / \text{ZnO}$	75.5%	[20]
Soja	Alcalino homogéneo	NaOH	—	[21]
Soja	—	BMMI . InCl_4	—	[22]
Soja	Alcalino heterogéneo	$\text{K}_2\text{O}/\text{CaO}-\text{ZnO}$	80%	[19]
Aceite usado de cocina	Acido heterogéneo	$\text{TiO}_2/\text{PrSO}_3\text{H}$	98%	[23]
Palma	Acido heterogéneo	TiO_2-ZnO	92 %	[24]
Canola	Acido heterogéneo	TiO_2 soportado con potasio	—	[25]
Aceite usado de cocina	Acido heterogéneo	TiO_2 en nanocompuesto reducido de grafeno	98%	[26]
Palma	heterogéneo	$\text{ZnO}/\gamma-\text{Al}_2\text{O}_3$	68.48%	[27]
Palma	heterogéneo	ZnO Sol-Gel	49.78%	[27]
Palma	heterogéneo	ZnO/Faujasita Y	4.85%	[27]
Palma	heterogéneo	ZnO comercial	38.75%	[27]
Jojoba	Alcalino homogéneo	NaOH	—	[21]
Jojoba	Alcalino homogéneo	NaOH	84.5%	[28]
Jojoba	Alcalino homogéneo	KOH	61.3%	[28]
Jojoba	—	$(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{Sn} (\text{OOCCH}_3)_2$	92.6%	[28]
Jojoba	—	$(\text{C}_8\text{H}_{17})_2\text{Sn} (\text{OOCCH}_3)_2$	25.4%	[28]
Jojoba	—	$(\text{C}_4\text{H}_9)_2\text{SnO}$	22.0%	[28]
Jojoba	—	$(\text{C}_8\text{H}_{17})_2\text{SnO}$	23.3%	[28]
Jojoba	—	$(\text{C}_6\text{H}_5)_2\text{SnO}$	12.0%	[28]
Jojoba	—	$((\text{C}_4\text{H}_9)\text{Sn}(\text{OH})_2\text{Cl})$	2.15%	[28]

Jojoba	—	$((C_4H_9)Sn(=O)OH_xH_2O)$	1.05%	[28]
<i>Citrullus vulgaris</i>	homogéneo alcalino	NaOH	70%	[29]
Mostaza negra	Homogéneo alcalino	KOH	97%	[30]
Semilla de mango	homogéneo alcalino	NaOH	92.67%	[31]
<i>Madhuca longifolia</i>	homogéneo, alcalino y ácido	H ₂ SO ₄ , KOH	—	[32]
Neem	homogéneo ácido	H ₂ SO ₄	77%	[33]
Aceite residual	Nanocatalizador alcalino heterogéneo	CaO derivado de cascara de huevo	86.41%	[34]
Girasol	Nanocatalizador heterogéneo	MgO/MgFe ₂ O ₄	92.2%	[35]
<i>Mesua ferrea</i>	Nanocatalizador heterogéneo	Co dopado con ZnO	98.03%	[36]
Aceite de castor	Nanocatalizador heterogéneo	Ni dopado con ZnO	95.2%	[37]
Agua de desecho de cultivo de microalgas	Nanocatalizador heterogéneo	Nanocompuesto de sulfato óxido ferrico-alumina	87.6%	[38]
Especies derivadas de Ulva	Nanocatalizador	Mn ₂ ZnO ₄	Dentro del rango de 70% a 73%	[39]
<i>Nannochloropsis</i>	Nanocatalizador heterogéneo	Ca (OCH ₃) ₂	99%	[40]
<i>Neochloris oleabundans</i>	Nanocatalizador	Nanopartículas de Fe ₂ O ₃ sintetizadas a partir de extracto de Hibiscus rosasinensis	81% mucho mayor a los obtenidos catalizando con HCl y NaOH	[41]
Algodón	heterogéneo	ZrO ₂ SO ₄ ₂	98.76%	[42]
Algodón	heterogéneo	Zr-Ce	93.66%	[42]
Algodón	heterogéneo	Zr-Ti	97.62%	[42]
Algodón	heterogéneo	ZrO ₂	59.78%	[42]

1.3.5 Producción de biodiésel a partir de aceites vegetales

En los años 30 y 40 los aceites vegetales fueron usados ocasionalmente como combustibles para motores diésel, pero usualmente solo se hacía cuando se presentaban situaciones de emergencia. En 1940 se realizaron las primeras pruebas con metil y étil ésteres de aceites vegetales en Francia y al mismo tiempo científicos en Bélgica usaron etil esterres de aceite de palma como combustible para autobuses. Realmente no se realizaron mayores avances hasta finales de 1970 y principios de 1980, cuando la preocupación por los altos precios del petróleo motivó una intensa experimentación con grasas y aceites como combustibles alternativos. El biodiesel comenzó a ser producido a principios de los años 90 y desde esa fecha la producción ha ido aumentando continuamente. En la unión europea (EU), el biodiesel comenzó a ser promovido en los años 80 como solución para prevenir el declive de las áreas rurales y para responder a los incrementos de la demanda de energía. A pesar de todo solo comenzó a ser ampliamente desarrollado en la segunda mitad de los años 90[13].

La producción de biodiesel es una moderna y tecnológica área para investigadores dada la relevancia que ha ganado debido al aumento de los precios del petróleo y las ventajas ambientales. La transesterificación no es un proceso nuevo, fue conducida tempranamente en 1853 por dos científicos E. Duffy y J. Patrick. Desde ese tiempo muchos estudios han sido desarrollados usando diferentes aceites como el aceite de semilla de algodón, soya, usado de cocina, colza, girasol, colza de invierno, residual, diferentes alcoholes como el metanol, etanol, butanol, así como diferentes catalizadores, homogéneos como el hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, ácido sulfúrico y fluidos supercríticos o enzimas como las lipasas[13].

La transesterificación es un término general que se utiliza para designar a las reacciones orgánicas en las cuales se produce un intercambio o sustitución del grupo acilo o alquilo de un éster [43] .

Los aceites vegetales, también conocidos como triglicéridos, tienen una estructura como la que se muestra en la 3, compuesta por 98% de triglicéridos y pequeñas cantidades de mono y diglicéridos. Los triglicéridos son esterres de tres ácidos grasos y un glicerol; estos contienen una cantidad substancial de oxígeno en su estructura.

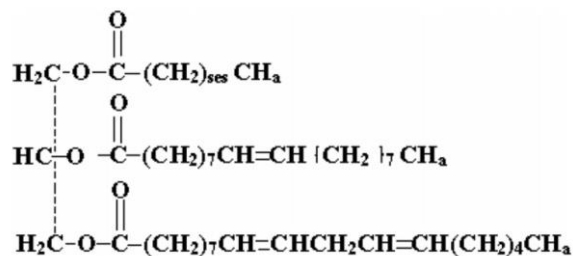


Figura 3. Estructura de una molécula de triglicérido típica [13]

Los ácidos grasos varían en la longitud de sus cadenas de carbono y el número de enlaces dobles. Diferentes tipos de aceites vegetales tienen diferentes tipos de ácidos grasos. En la tabla 5 se muestra la fórmula empírica y la estructura de varios ácidos grasos presentes en los aceites vegetales [13].

Tabla 5. Estructura química de los ácidos grasos más comunes

Nombre del ácido graso	Nombre químico del ácido graso	Estructura	Fórmula
Láurico	Dodecanoico	12:0	C ₁₂ H ₂₄ O ₂
Mirístico	Tetradecanoico	14:0	C ₁₄ H ₂₈ O ₂
Palmítico	Hexadecanoico	16:0	C ₁₆ H ₃₂ O ₂
Estearico	Octadecanoico	18:0	C ₁₈ H ₃₆ O ₂
Araquídico	Eicosanoico	20:0	C ₂₀ H ₄₀ O ₂
Behénico	Docosanoico	22:0	C ₂₂ H ₄₄ O ₂
Lignocérico	Tetracosanoico	24:0	C ₂₄ H ₄₈ O ₂
Oleico	Cis-9-Octadecenoico	18:1	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
Linoleico	Cis-9, cis-12-Octadecadienoico	18:2	C ₁₈ H ₃₂ O ₂
Linolénico	Cis-9, cis-12, cis-15-Octadecatrienoico	18:3	C ₁₈ H ₃₀ O ₂
Erucidico	Cis-13-Docosenoico	22:1	C ₃₂ H ₄₂ O ₂

[13]

Las desventajas de los aceites vegetales como combustible en los motores diésel son: Alta viscosidad, baja volatilidad y la reactividad de las cadenas insaturadas de hidrocarburos. Los aceites vegetales tienen sus propias ventajas: primero que nada, están disponibles casi en todo el mundo, son considerados renovables ya que pueden ser plantados año tras año y

finalmente son considerados combustibles amigables con el ambiente, ya que prácticamente no contienen azufre en su estructura[13].

1.4 DESCRIPCIÓN *SIMMONDSIA CHINENSIS*

En México mejor conocida como Jojoba. Arbusto erecto, postrado o rastrero perennifolio, de 0.5 a 3 m (hasta 5 m) de altura. Su follaje se desarrolla siguiendo una estructura de esfera truncada. Hojas opuestas, oblongas, pubescentes, azul-grisáceo, gruesas y de consistencia coriáceas, cubiertas de cera, de 2 a 5 cm de largo por 1 a 2 cm de ancho. Tiene ramas rígidas que poseen ramitas finamente pubescentes. La corteza en los crecimientos jóvenes presenta un color verde pálido o verde azulado. Al madurar la corteza se adelgaza quedando así en los tallos viejos. Flores apétalas unisexuales en diferentes individuos. Flores pistiladas pequeñas y axilares, de color verde pálido; las flores estaminadas se encuentran en racimos redondeados de color amarillo pálido y son más pequeñas que las pistiladas en la ilustración 1 se aprecian las flores de la planta macho de Jojoba. Los frutos contienen una capsula dehiscente, (Ilustración 2) conteniendo de 1 a 3 óvulos adheridos a la placenta en el ápice de la capsula. Varían notablemente en tamaño, forma y color, pueden ser relativamente cortas y redondas, largas y agudas, grandes o chicas, ovales o elípticas[44].



Ilustración I. Flores de planta macho de Jojoba

Las semillas son de color café oscuro variando en tamaño y forma. Presentan muy poco endospermo, están formadas prácticamente de los cotiledones. La época de su maduración está determinada por factores genéticos y ambientales. Presentan polimorfismo, como una estrategia adaptativa importante ante lo impredecible del medio ambiente del desierto[44].

Su raíz tiene un sistema radical consistente en unas pocas raíces pivotantes principales que crecen derechas hacia abajo (pueden penetrar hasta 10 m de profundidad) con muy pocas raíces fibrosas a los lados, en los primeros 60 cm del suelo. Son plantas dioicas, en ocasiones se pueden presentar flores hermafroditas pero su ovario no llega a desarrollarse. En casos muy especiales se pueden encontrar plantas monoicas[44].



Ilustración II. Frutos de Jojoba secos

1.4.1 Origen

Es originaria de México. Se encuentra principalmente en el noroeste de México, en donde se cuenta con el 70% del total del área de su distribución además de encontrarse entre las regiones montañosas de Arizona y el sur de California. Se le ha introducido a Chile, Argentina, Brasil, Costa Rica, Venezuela, Kenia, Sudan, Israel, Alemania, Australia, Dinamarca, Egipto, Hawai, India, Irán, Japón, Libia y Tailandia[44].

1.4.2 Estatus

Nativa del desierto de Sonora al noroeste de México y las regiones vecinas, suroeste de Arizona y sur de California (Estados Unidos). Las poblaciones nativas se encuentran entre los 23 y 34 ° Latitud norte. Se le cultiva en Arizona y en algunas partes del norte de México, por sus semillas que contienen un aceite de gran valor comercial. Se le encuentra silvestre, es una especie endémica de la región del desierto Sonorense y de las regiones semisecas adyacentes[44].

1.4.3 Hábitat

Prospera en las zonas de más baja precipitación de México, en pendientes de montaña y valles. Las poblaciones más grandes y con mejor crecimiento están en zonas con precipitaciones de 200 a 450 mm anuales y libres de heladas, es decir con temperaturas que raramente caen por debajo de los -3.5°C por pocas horas en la noche. También se le encuentra en zonas con precipitación inferior a los 120 mm. No crece en sitios en donde hay lluvias torrenciales que pueden anegar el suelo. Está bien adaptada a las altas fluctuaciones de temperatura que varían de 30 a 40°C . Pueden tolerar heladas de hasta 6°C y altas temperaturas de hasta 50°C . Crece en una diversidad de suelos, de roca porosa a arcillas, desde levemente acidas a alcalinas, en suelo desértico, preferentemente con buen drenaje y aireado, derivado de material granítico [45], por lo general con pH neutro en arena y en granito descompuesto, y más lentamente en arcilloso pesado como el adobe. En poblaciones cercanas al mar, se agrupan muchos individuos en los lugares con mayor exposición a los vientos marinos. Suelos: arenoso-rocoso, amarillo arenoso, pedregoso y de textura media[44].

1.4.4 Importancia ecológica

Especie primaria, planta heliófila. Llega a ser un arbusto dominante en las comunidades vegetales costeras del desierto de Sonora y de la península de Baja California[44].

1.4.5 Tipos de vegetación

Matorral xerófilo (matorral espinoso) y vegetación costera[44].

1.4.6 Zonas Ecológicas

Se le puede encontrar en las zonas ecológicas Árida y semiárida[44].

1.5 DESCRIPCIÓN DE LA CERA LÍQUIDA DE *SIMMONDSIA CHINENSIS*

El aceite de jojoba está compuesto de una mezcla de alcoholes y ácidos monoinsaturados de cadenas de carbono largas (C_{20} y C_{22}) y cuya particularidad es que esta parte de alcoholes y ácidos se encuentran unidos por doble enlace a cada lado del éster, es decir no se trata de un triglicérido sino de una cera [46]. Su composición y estructura es única debido a que tiene

casi una completa ausencia de glicerina [47]. Dentro de las particularidades que se asocian a esta cera es que se utiliza en la medicina tradicional , para curar enfermedades tales como quemaduras de sol, cólicos renales, pérdida de cabello, piel seca, obesidad, dolor de cabeza y dolor de garganta [48] [47] [49].

Esta cera es una fuente única de alcoholes de cadena larga monoinsaturados tales como 11-eicosenol, 13-docosenol y 15-tetracosenol, este tipo de alcoholes están clasificados como productos de alto valor añadido. Está formada por una mezcla de esterres, que confieren al aceite muchas propiedades tales como su adaptación a la sulfuración, una constante dieléctrica elevada y una facilidad para hidrogenación, que la hacen apta para diferentes aplicaciones industriales [47].

Otra de las aplicaciones que cabe destacar de la cera líquida de jojoba, es que tiene posibilidad de utilizarla como materia prima para la obtención de biodiesel utilizando metanol e hidróxido de sodio [50]. Se ha encontrado que ya se ha estudiado esta cera como un combustible alternativo, algunos de estos estudios han evaluado el trabajo y las emisiones del uso de este combustible en motores diésel, usando también mezclas de biodiesel a partir de cera líquida de jojoba y diésel convencional [50] [51][52].

1.6 OBTENCIÓN DE LOS ACEITES VEGETALES

Los procesos productivos empleados actualmente para la obtención de aceites vegetales implican fuertes agresiones al medio ambiente, fundamentalmente dadas por la emisión de solventes orgánicos a la atmósfera, siendo el más empleado en esta industria el hexano, reconocido contaminante atmosférico[53].

En las semillas oleaginosas el aceite se encuentra contenido en vacuolas intracelulares cuyas paredes están formadas por polisacáridos del tipo celulósico. En el tejido celular también se encuentra presente la pectina, responsable de la coherencia e integridad de la estructura, además de otras proteínas, siendo la presencia de estas sustancias variable al depender del tipo de planta de que se trate. El aceite vegetal se encuentra unido a estas macromoléculas y los procesos convencionales de extracción se basan en la extrusión de la semilla o fruto oleaginoso que lo contiene[53].

Los procesos de obtención de grasas vegetales de forma tradicional se clasifican en mecánicos, químicos o aquellos que incluyen una combinación de los dos. De forma general, incluyen las siguientes etapas: limpieza para eliminar materias extrañas, secado para disminuir la humedad de la semilla, pelado de la semilla, tratamiento térmico para facilitar la extracción del aceite, extracción por prensado (métodos mecánicos) y/o por solvente (métodos químicos) del aceite contenido en las semillas. La separación del aceite de la mezcla resultante (conocida como miscela), compuesta además por solventes e impurezas, se realiza a través de posteriores procesos de evaporación y condensación del solvente, con vistas a su reutilización posterior[53].

La refinación, destilación y desodorización del aceite crudo completan este proceso, haciendo el producto apto para el consumo humano. Como residuo del proceso de extracción queda una torta (tostado) con alto contenido proteico, que es también desolventizada y empleada en la alimentación animal[53].

Los métodos de extracción con disolventes volátiles involucran incorporar la muestra seca y molida en contacto con disolventes orgánicos, que pueden ser el alcohol y cloroformo, entre otros. Estos disolventes solubilizan y extraen además de aceites esenciales, sustancias como grasas y ceras. Este procedimiento se utiliza a escala laboratorio, debido que a nivel industrial resulta un proceso costoso por el valor comercial de los disolventes y por el riesgo que implica el manejar estos disolventes ya que estos en su mayoría pueden ser explosivos e incendiarios [54].

Los métodos más usados a nivel laboratorio son extracción por reflujo y mediante equipo Soxhlet. Otro tipo de extracción por disolventes, mayormente usada a nivel laboratorio, es la maceración o extracción alcohólica, en la cual la materia orgánica reposa en soluciones de alcohol por periodos de tiempo definidos. Los aceites son recuperados evaporando el alcohol, generalmente en rotavapores [54]

1.7 EXTRACCIÓN DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA

La semilla de jojoba contiene una cera líquida, a partir del descubrimiento de esta, se empezaron a patentar métodos para su utilización en productos como aceites lubricantes

se ha analizado el efecto de diferentes solventes, como el alcohol isopropílico, tetracloruro de carbono, benceno, heptano y hexano [55].

1.7.1 Rendimiento de extracción de aceites y grasas

Para cuantificar la cantidad de aceite y grasas obtenidas de un proceso de extracción; es necesario evaluar la cantidad de aceite obtenida en comparación a la cantidad total de materia seca o semilla de la cual se realiza extracción. El porcentaje de aceite extraído se calcula mediante la ecuación 1 [58][59]:

Ecuación 1: Porcentaje de aceite extraído

$$\% \text{ Aceite extraído} = \frac{\text{peso en gramos de aceite}}{\text{Peso en gramos del material vegetal}} \times 100\%$$

1.8 CARACTERIZACIÓN DE GRASAS Y ACEITES

Dentro de la caracterización de grasas y aceites, se vuelve imprescindible evaluar las propiedades físicas y químicas de estos. Estas técnicas incluyen la determinación del contenido de ácidos grasos libres, expresándolo como el porcentaje de ácido oleico; el índice de acidez, índice de saponificación, índice de yodo, índice de peróxido, fosforo y contenido de humedad, de esta manera se evalúa la degradación y viabilidad del aceite o grasa para la producción de biodiesel [60] [61] [59]. Se incluyen además determinaciones de las propiedades físicas del aceite, que incluyen densidad y viscosidad, índice de refracción, punto de fusión y color [61] [60] [62][63] .

Los aceites y grasas pueden evaluarse para determinar contenido de ácidos grasos utilizando cromatografía gas-liquido [63] [62] [59].

Otra técnica utilizada para la caracterización de grasas y aceites es la espectroscopia de infrarrojo [64].

1.8.1 Caracterización de la cera líquida de Jojoba *Simmondsia chinensis*

Las propiedades físicas se pueden revisar en la tabla 6 que se muestra a continuación [64]

Tabla 6. Características de la cera líquida de Jojoba pura

Olor	Graso
Apariencia	Clara-turbia
índice de refracción (25 c)	1.465
peso específico (25 c)	0.863
punto de fusión (c)	6.8-7.0
punto de ebullición (c)	398
viscosidad (25 c), mm ² /s	58-60

[64]

Se encontró que la cera líquida de jojoba en su espectro de infrarrojo, presenta bandas características de hidrocarburos alifáticos entre las zonas de 3011-2853 cm⁻¹ donde se observa vibraciones de estiramiento, 1456 cm⁻¹ vibraciones de flexión y en 1372 cm⁻¹ vibraciones de balanceo [64]. También se observan bandas específicas de esterés a 1748 y 1164 cm⁻¹, y de hidrocarburos insaturados a 1648 cm⁻¹ [64]. En la figura 5 se presenta el espectro de infrarrojo de la cera líquida de Jojoba.

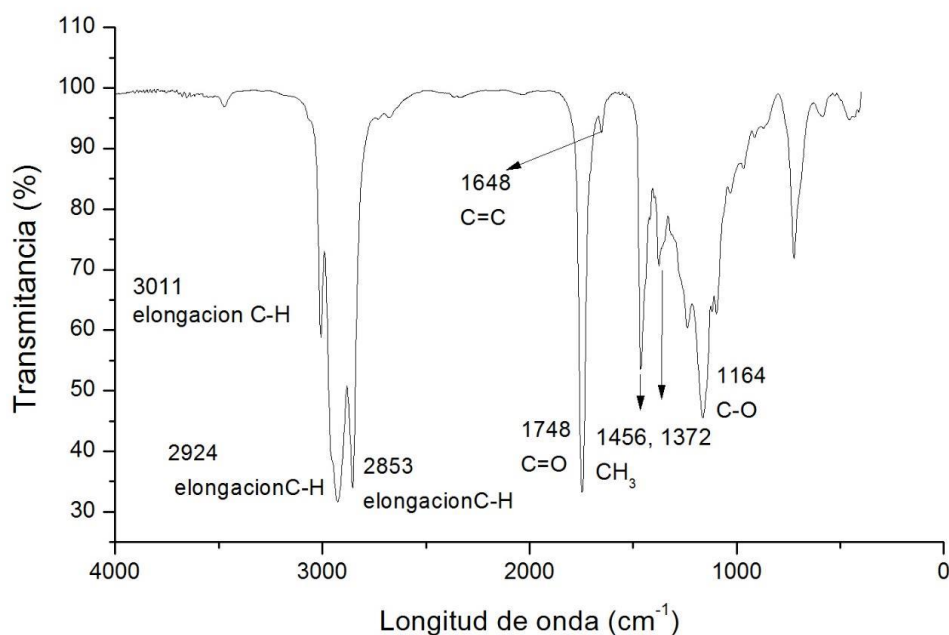


Figura 5. Espectro de infrarrojo de la cera líquida de Jojoba [64]

1.8.2 Técnicas de caracterización útiles para grasas y aceites

Para determinar la composición de la cera líquida de jojoba es necesario realizar caracterización química que nos permita identificar con certeza la presencia y composición de ácidos grasos, la composición de estos en cuanto a estructura molecular, identificaciones que incluyen técnicas cualitativas y cuantitativas, todo esto con la finalidad de verificar el porcentaje de ácidos grasos y la longitud de su cadena hidrocarbonada esto último de gran importancia para marcar un panorama en la conversión de estos ácidos grasos en biodiesel.

Las técnicas propuestas incluyen técnicas de espectroscopia atómica, molecular y métodos de separación, que de igual forma se pueden utilizar para la caracterización del biodiesel obtenido [65].

Espectroscopia atómica

Espectrometría de masas atómica: Es una herramienta para identificar los elementos presentes en una muestra y determinar las concentraciones de estos. Tiene varias ventajas que incluyen espectros más sencillos y de fácil interpretación [66][65].

Espectroscopia molecular

Espectrometría de absorción molecular ultravioleta/visible: Con esta técnica se aplica la absorción de la radiación electromagnética de la región de longitudes de onda comprendidas entre 160 y 78 nm. Esto nos permite identificar cuantitativamente una gran variedad de especies tanto inorgánicas como orgánicas, se puede afirmar que es uno de los métodos más utilizados entre las técnicas de análisis cuantitativo. Este tipo de espectroscopia permite detectar grupos funcionales, ya que ciertos grupos absorben en regiones del espectro ultravioleta y visible [65].

Espectrometría de infrarrojo: Es una herramienta que se aplica para la determinación cualitativa y cuantitativa de especies moleculares de todo tipo. Las aplicaciones de esta técnica se dividen en 3 grandes categorías relacionadas con las tres regiones espectrales del infrarrojo. La región más utilizada es la región del infrarrojo medio que se extiende entre aproximadamente 670 y 4000 cm^{-1} . esta técnica al igual que la anterior nos permite identificar con mayor certeza los grupos funcionales de especies orgánicas [65][66] [67].

Métodos de separación

Cromatografía: Es un método para la separación de especies químicas estrechamente relacionadas entre sí, se puede emplear también para la identificación cualitativa y para la determinación cuantitativa de las especies separadas [65].

cromatografía de gases: En este método, la muestra se volatiliza y se inyecta en la cabeza de una columna cromatográfica. La elución se produce por el flujo de una fase móvil de un gas inerte. Existen dos tipos de cromatografía de gases: la cromatografía gas-sólido y la cromatografía gas-líquido [65] [67].

En la cromatografía gas-sólido se produce la retención de los analitos en una fase estacionaria sólida como consecuencia de la adsorción física. Esta técnica ha tenido una aplicación limitada debido a la retención semipermanente de las moléculas activas o polares y a la obtención de picos de elución con colas muy significativas, entonces esta técnica no ha encontrado una gran aplicación [65].

Cromatografía gas-líquido (GLC): se basa en la distribución del analito entre una fase móvil gaseosa y una fase líquida inmovilizada sobre la superficie de un sólido inerte [65]. Desempeña dos papeles importantes, primero como herramienta de separación y el segundo proporcionar un medio para llevar a cabo un análisis [65]; en este caso podrían bien dar indicios de la cantidad de ácidos grasos distintos en un muestra de aceite por ejemplo.

Cromatografía de gases/espectrometría de masas (GC/MS): Se trata de una combinación de métodos o acoplamiento que permite una mayor eficacia en la detección y determinación de diferentes compuestos dentro de mezclas complejas. Se utilizan para la identificación de cientos de componentes que están presentes en sistemas naturales y biológicos [65].

1.9 BIODIÉSEL A PARTIR DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA

Para obtener biodiesel a partir de la cera líquida de Jojoba o de cualquier otro aceite se requiere un alcohol y un catalizador. La cera de jojoba es un éster, pero las propiedades no son adecuadas para competir con los estándares de biodiesel tales como el estándar europeo EN 14214. Entonces para mejorar esas propiedades es necesario que los alcoholes presentes en la cera de jojoba sean cambiados por un alcohol de peso molecular más bajo, normalmente

metanol o etanol, para poder ser transformados en metil/étil ésteres de ácidos grasos por sus siglas en ingles FAME/FAEE [68].

1.10 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL

Debido a la variedad de materias primas utilizadas para la obtención de biodiesel; hablando específicamente del aceite de procedencia, se tendrá un producto final con características diversas en comparación a otros que utilicen como materia prima otro tipo de aceite. Todo esto está relacionado directamente con el perfil de ácidos grasos de los aceites y por lo tanto los ácidos grasos que se transformen en esterres del biodiesel obtenido; en conclusión se tendrían combustibles con diferentes propiedades dependiendo el tipo de aceite [69]. Debido a esto la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales ASTM por sus siglas en ingles ha establecido los lineamientos para garantizar la calidad de biodiesel mediante varias especificaciones que hacen alusión a la calidad de este combustible, garantizando la óptima operación de los equipos en los que será utilizado este combustible [69].

En la tabla 7 se especifican las propiedades que debe cumplir según la Norma ASTM para biodiesel D6751-09.

Tabla 7. Especificaciones de la Norma ASTM D6751

Propiedad	Límite		Unidad	Método de prueba
	Min	Max		
Punto de inflamación	93		C	D93
Control de alcohol Debe cumplir con una de las siguientes: 1. Contenido de metanol 2. Punto de inflamación	130	0,2	Masa % C	En 14110 D 93
Agua y sedimento		0,050	% volumen	D2709
Numero acido		0,50	Mg KOH / g	D664
Ceniza sulfatada		0,020	% masa	D874
Corrosión lámina de cobre		No. 3		D130
Residuo de carbono		0,050	% masa	D4530
Viscosidad cinemática	1.9	6,0	Mm2 /s	D445

Numero de cetano	47			D613
Punto de turbidez	Reporte		C	D2500
Filtrabilidad e impregnado en frio		360	Segundos	Anexo A1
Estabilidad de oxidación	3		horas	En 14112
Glicerina libre		0,020	% masa	D6584
Glicerina total		0,240	% masa	D6584
Sodio y potasio, combinados		5	Ppm (g/g)	En 14538
Calcio y magnesio, combinados		5	Ppm (g/g)	En 14538
Azufre		0,0015	% masa	D5453
		0,05	(ppm)	
Contenido de fosforo		0,001	% masa	D4951
Temperatura destilación		360	C	D1160

[69]

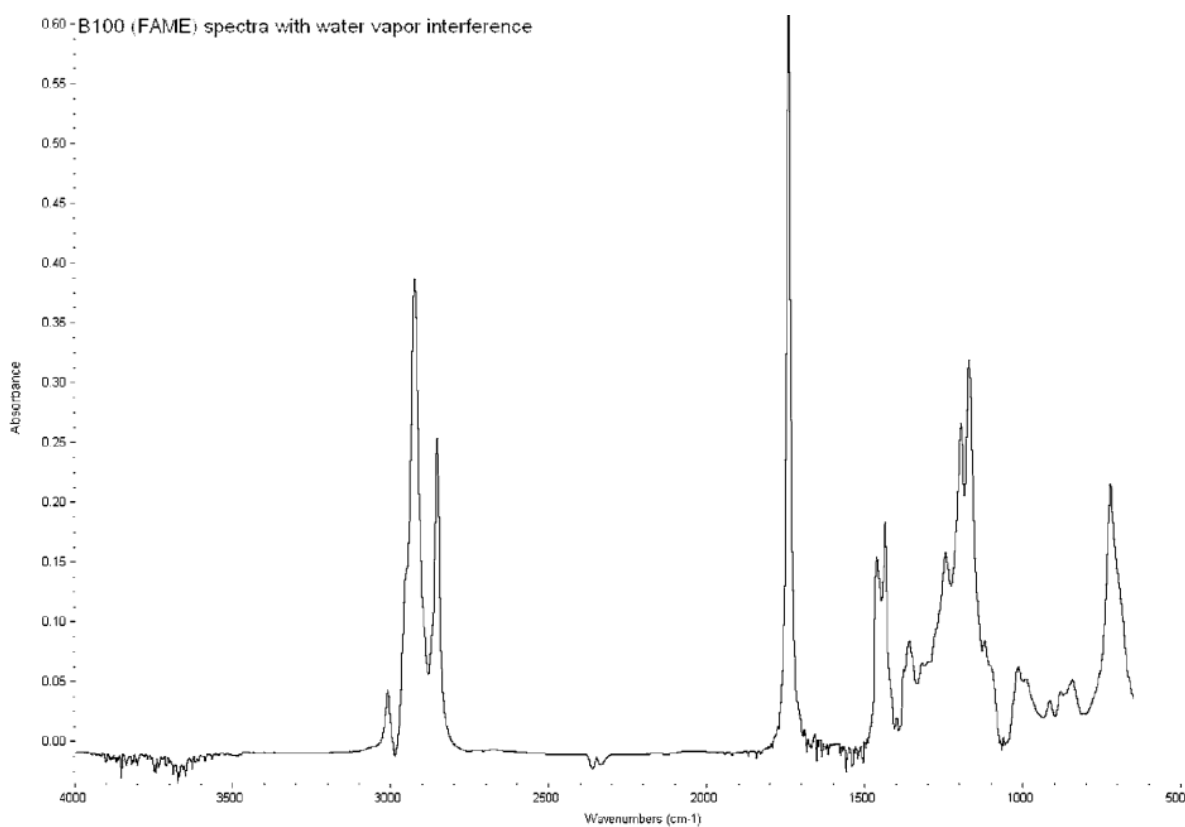


Figura 6. Espectro IR de biodiésel con interferencia de vapor de agua [70]

Espectroscopia de infrarrojo en la caracterización de muestras de biodiesel

El producto principal de la transesterificación de aceite puede ser caracterizado por medio de la espectroscopia de infrarrojo, de esta manera puede confirmarse la presencia de metil-ésteres, así como la presencia notable de alcanos posiblemente presentes en el diésel [71] En la figura 6 se puede apreciar un espectro IR de biodiésel con interferencia de vapor de agua.

En la estructura química de biodiésel la parte alifática es similar a la larga cadena de carbono del diésel del petróleo [72]. En la caracterización de una muestra de biodiésel a partir de aceite de maíz obtenido de frituras, los átomos de hidrogeno alifáticos son indicados en la región de 2924 cm^{-1} y 2854 cm^{-1} [72]. Una banda intensa del alargamiento C=O para el éster metílico o metil éster aparece en la región aproximada a 1740 cm^{-1} [72][73]. Se deben esperar las señales C-O en los rangos de 1260 cm^{-1} , 1203 cm^{-1} , y 1177 cm^{-1} . Señales observadas dentro de 2200 cm^{-1} – 2400 cm^{-1} corresponden al modo de alargamientos de los grupos OH de glicerol [72]. A su vez se encuentra que el biodiesel al igual que el aceite vegetal absorbe en la región de 2750 cm^{-1} – 3000 cm^{-1} correspondiente a los modos de vibración de -CH₂ y -CH₃ [71], que son reconocidos como las cadenas alifáticas en este caso de los ácidos grasos[73].

Los ésteres tienen dos fuertes bandas de absorción características derivadas del grupo carbonilo (C = O) alrededor de 1750-1730 cm^{-1} y el del grupo C-O en 1300-1000 cm^{-1} . Las vibraciones de estiramiento de CH₃, CH₂ y CH aparecen en 2980-2950, 2950-2850 y 3050-3000 cm^{-1} , mientras que las vibraciones de flexión (CH₂) de estos grupos aparecen en 1475-1350, 1350-1150 y 722 cm^{-1} , respectivamente [74].

1.10.2 Especificaciones emitidas de la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales para la calidad de Biodiesel

Como bien se mencionó en el apartado anterior; la calidad de biodiesel obtenido dependerá de la materia prima de procedencia, entiéndase que esa materia prima es el aceite que se utilizara en dicha reacción, este podrá provenir de alguna especie oleaginosa o ser aceite de origen residual (utilizado para fritura en la industria alimenticia) por tanto los ácidos grasos de procedencia y la transformación de estos en ésteres será variada [75]. Esta variedad hace necesario cumplir con especificaciones técnicas de calidad, para el uso de este biocombustible y la ASTM se encarga de establecer estos lineamientos.

Entonces, ¿Cuáles son las especificaciones de la sociedad Americana de Pruebas y Materiales para la calidad de biodiesel? El estándar D 6751 que es la especificación estándar para la mezcla de combustible biodiesel (B100) para destilado medio, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 7 [76].

En la tabla 7 se muestra un desglose de los límites permitidos de las diversas especificaciones, a continuación de desglosa cada uno de los lineamientos.

Punto de Inflamación: Este es usado como mecanismo para limitar el nivel remanente de alcohol que no reacciona y se encuentra presente en el producto final, también es importante en la conexión con los requerimientos legales y las medidas de seguridad involucradas en el manejo y almacenamiento del combustible. Esta información y el método se presenta D 93 Método de prueba estándar para medir punto de inflamación mediante el equipo Pensky-Martens de copa cerrada [77].

Viscosidad: Para algunos motores puede ser ventajoso especificar un punto mínimo de viscosidad debido a la pérdida de potencia debido a la bomba de inyección. Por otro lado un nivel máximo permitido de viscosidad, está limitado a consideraciones debidas al diseño y medida del motor y las características del sistema de inyección; la especificación D 975 estándar para combustibles diesel establece los límites de viscosidad[78] .

Ceniza sulfatada: Materiales formadores de ceniza pueden estar presentes en el biodiesel en 3 formas, como sólidos abrasivos, jabones metálicos solubles y catalizadores no removidos.

Estos pueden contribuir en generar depósitos en diferentes conectores de toda la maquinaria. Las especificaciones se muestran en El método de prueba estándar para ceniza sulfatada de aceites lubricantes y aditivos D 874 [79].

Azufre: El efecto del contenido de azufre en el motor aparecerá en importancia y dependerá de las condiciones de operación. Un combustible de azufre puede incluso afectar los sistemas de control de emisiones, así pues, los límites de azufre emitidos fueron impuestos por razones ambientales. La mezcla B100 es por lo tanto libre de azufre; estos lineamientos se presentan en el Método de prueba estándar para la determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros, combustibles de motor y aceites de motor usando Fluorescencia ultravioleta D 5453[80].

Corrosión lámina de cobre: Esta prueba sirve para cuantificar las dificultades que se pueden presentar en el sistema de combustible con las partes de cobre o bronce. La presencia de mezclas de ácido o azufre contenidas pueden ocasionar esa corrosión [81].

Numero de cetano: Es una medición de la calidad de la ignición del combustible. Los requerimientos del número de cetano dependen del diseño del motor, tamaño, naturaleza de la velocidad y variaciones de carga, incluyendo las condiciones atmosféricas [82] [83] [84].

Punto de turbidez: Es importante ya que define la temperatura a la que aparece cierta turbidez o una formación de cristales en el combustible bajo condiciones de prueba establecidas, esto generalmente se relaciona con la temperatura a la cual los cristales comienzan a precipitarse en el combustible en uso. El biodiesel tiene un punto de turbidez mas alto que el petrodiesel, el punto de turbidez de este y su impacto en las propiedades de la mezcla resultante deben ser monitoreadas para garantizar un funcionamiento adecuado en climas fríos D 2500 [85].

Residuo de carbono: Es una medida de la tendencia del combustible a generar depósitos de carbono. Esta medida no se correlaciona directamente con los depósitos en el motor, pero puede servir para hacer una aproximación de dichos depósitos. Aunque el biodiesel esta en los rangos de los combustibles destilados, la gran parte del biodiesel hierve aproximadamente a la misma temperatura y por lo tanto es difícil dejar un 10% residual del combustible en la destilación. Por lo tanto, se utiliza una muestra del 100% para reemplazar el 10% residual esto se puede verificar en el método de prueba D 4530[86] .

índice de acidez: Se utiliza para determinar el nivel de ácidos grasos libres o ácidos en proceso, que pueden estar presentes en el biodiesel. Se ha demostrado que un alto índice de acidez en este puede aumentar los depósitos del sistema de abastecimiento de combustible y puede aumentar la probabilidad de corrosión [87].

Glicerina libre: Se utiliza para determinar el nivel de glicerina en el combustible. Altos niveles de glicerina pueden causar depósitos en los inyectores, así como sistemas de combustible obstruidos, y resultar en una acumulación de glicerina en el fondo de los sistemas de almacenamiento de combustible [88].

Glicerina total: Se utiliza para determinar el nivel de glicerina en el combustible e incluye la glicerina libre y la porción de glicerina de cualquier aceite o grasa que no haya reaccionado o que haya reaccionado parcialmente. Los bajos niveles de glicerina total, aseguran una alta conversión del aceite o la grasa en sus mono-alquil esterés. Los altos niveles de mono, di y triglicéridos (aceite que no haya reaccionado o que haya reaccionado parcialmente) pueden causar depósitos en el inyector y pueden afectar negativamente el funcionamiento en los climas fríos, debido que estos tenderán a solidificarse y por lo tanto presentarse un taponamiento en el filtro[88].

Contenido de fosforo: El fosforo puede dañar los convertidores catalíticos utilizados en los sistemas de control de emisiones y por tanto su nivel debe mantenerse bajo. Los convertidores catalíticos se están volviendo más comunes en los equipos diesel a medida que se ajustan a los estándares de emisiones, entonces bajos niveles de fosforo serán de creciente importancia. Se ha demostrado que el biodiesel producido a partir de fuentes estadounidenses tiene bajo contenido de fosforo (por debajo de 1 ppm) y la especificación permite un valor máximo de 10 ppm el cual tampoco resulta problemático. Biodiesel de otras fuentes pueden o no contener niveles más altos de fosforo y esta especificación se agregó para garantizar que el biodiesel, independientemente de la fuente de procedencia tenga un bajo contenido de fosforo[89].

Temperatura de destilación: El biodiesel exhibe un punto de ebullición más bajo que la curva de destilación. Las cadenas de carbono de los ácidos grasos presentes en los aceites y grasas crudos de los cuales el biodiesel es producido se componen principalmente de hidrocarburos de cadena lineal con 16 a 18 átomos de carbono, estos tienen temperaturas de ebullición

similares. El punto de ebullición de este combustible en condiciones atmosféricas normales generalmente oscila entre los 330 y 357 °C, por lo tanto, para la especificación del estándar el valor de 360 °C no resulta problemático. Esta especificación se agregó como precaución adicional para lograr garantizar que el combustible que se tenga no resulte adulterado con contaminantes con un alto punto de ebullición[90].

Agua y sedimento: Es un método para determinar el volumen de agua y sedimento en los combustibles destilados que tienen viscosidades rondando entre 1.0 mm²/s y densidades en el rango de 770 a 900 kg/m³. Cantidades significativas de agua y sedimento presentes en algún combustible pueden causar problemas directos en el quemador o en el motor. Si hay algún acumulamiento de sedimento en los tanques de almacenamiento del combustible; se puede presentar una obstrucción del flujo del tanque al combustor [91].

Viscosidad: se especifica que es un procedimiento para determinar la viscosidad cinemática ν , de los productos líquidos derivados del petróleo tanto transparentes como opacos mediante la medición del tiempo que tarda un volumen de líquido en caer mediante gravedad a través de un viscosímetro calibrado. La viscosidad dinámica η se obtendrá multiplicando la viscosidad cinemática, ν , por la densidad, ρ , del líquido. Debido a que muchos productos del petróleo y otros materiales no procedentes del petróleo son usados como lubricantes, entonces el correcto funcionamiento del equipo en el que se empleen estos, depende de una viscosidad adecuada. Además la viscosidad de los combustibles está relacionada con el almacenamiento de estos [92].

2. OBJETIVO GENERAL

Extraer la cera líquida de la semilla de Jojoba (*Simmondsia chinensis*) recolectada de la región, con la finalidad de obtener biodiésel por medio de síntesis de transesterificación.

Caracterizar la cera líquida de Jojoba (*Simmondsia chinensis*) y los métil ésteres de ácidos grasos producto de su transesterificación, mediante las técnicas de espectroscopia de infrarrojo, cromatografía de gases acoplada a espectroscopia de masas y resonancia magnética nuclear de protón con el fin de proponer una alternativa de uso de la jojoba como materia prima para producción de biodiesel.

2.2 OBJETIVOS PARTICULARES

Recolectar la semilla de jojoba en las zonas de remanentes de vegetación nativa de Tijuana.

Obtener la cera líquida de Jojoba utilizando n- hexano como solvente, mediante extracción continua en medio caliente con aparato Soxhlet.

Caracterizar mediante técnica de Espectroscopia de Infrarrojo, Cromatografía de Gases acoplada a Espectroscopia de Masas y Resonancia Magnética Nuclear de Protón, la cera líquida obtenida.

Obtener biodiésel a partir de la cera líquida de jojoba obtenida; utilizando CH_3OH y como catalizadores NaOH , KOH y mezclas $\text{NaOH/Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaOH/ZrO}(\text{NO}_3)_2$ y $\text{NaOH/Ti}[\text{OCH}(\text{CH}_3)_2]_4$.

Caracterizar las muestras de biodiésel obtenido por medio de las técnicas de caracterización de Espectroscopia de Infrarrojo, Cromatografía de Gases acoplada a Espectroscopia de Masas y Resonancia Magnética Nuclear de Protón.

Comparar los resultados obtenidos de la caracterización de la cera líquida y del biodiésel obtenido con los resultados esperados por los estándares D6584 (Glicerina y glicerina total) y D7371 (Contenido de biodiésel en combustible fósil por espectroscopia de infrarrojo) de la ASTM que establece las características idóneas de este biocombustible.

Con base en los resultados obtenidos de las caracterizaciones de la cera y del biodiesel obtenido, concluir si se recomienda someter a reacción a la cera líquida de jojoba.

3. METAS

- Acceder a la información científica necesaria para recabar los antecedentes del trabajo de tesis.
- Aprovechar la materia prima disponible en la región para el cumplimiento de la actividad de investigación.
- Establecer una metodología concreta para la extracción eficaz de cera líquida de Jojoba.
- Establecer una metodología para la síntesis de biodiesel a partir de cera líquida de Jojoba.
- Proponer catalizadores heterogéneos no convencionales en la reacción de transesterificación con cera líquida de Jojoba.
- Obtener los productos derivados de la extracción y reacción de síntesis para su posterior caracterización química.
- Establecer las técnicas de caracterización más adecuadas para el manejo de las muestras obtenidas de cera líquida y biodiésel obtenido.
- Con base en la investigación concluir y proponer diversas líneas de investigación a futuro, en corto mediano y largo plazo.

4. IMPACTOS

Científicos:

Realizando una revisión bibliográfica es posible percatarse que a pesar de que la materia prima propuesta en este trabajo de tesis (Jojoba) es una especie nativa y contiene una cera líquida que puede ser potencialmente utilizada como materia prima para la obtención de biodiésel; no se encuentra información que muestre evidencia de la utilización de los catalizadores propuestos en este trabajo. Esto representa la generación de conocimiento científico de referencia para futuras investigaciones con la misma especie, factor que sin duda beneficiará y enriquecerá el quehacer científico en el área de biocombustibles.

Tecnológicos:

Emplear catalizadores heterogéneos como los que se proponen (derivados de los elementos Zn, Zr y Ti) representan la posibilidad de recuperar casi en su totalidad el catalizador empleado y volverlo a integrar en el proceso para su posterior utilización. Si esto se traduce a escala comercial implicaría un ajuste tecnológico en los procesos de producción que beneficiaría a la producción a gran escala del combustible.

Ambientales:

El biodiésel es un biocombustible cuya materia prima es una oleaginosa, las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la combustión por su utilización en motores diesel son menores que el uso de combustibles de origen fósil, por lo tanto, representa una disminución considerable de contaminación atmosférica.

Sociales y económicos:

Esta comprobado que la especie de Jojoba presenta buena adaptabilidad a cualquier tipo de sustrato incluyendo aquellos con déficit de nutrientes, pudiéndose afirmar que prácticamente se puede cultivar en cualquier terreno árido, esta afirmación conduce a plantearnos la posibilidad de que sea un área de interés para inversionistas o incluso población aledaña a zonas áridas que tienen terrenos que pueden ser utilizados para el cultivo de esta especie. Representando esto beneficios a la sociedad y económicos.

5. METODOLOGÍA

5.1 RECOLECCIÓN DE LA SEMILLA DE JOJOBA

Se obtuvieron semillas de Jojoba de la zona de remanente de vegetación nativa de la Mesa de Otay en Tijuana, la ladera de calzada Cetys y el Cañón del Sainz. Las semillas se obtuvieron en los meses de agosto y septiembre del año 2019; como se recomienda, para efectuar la recolección en el interior de la península de Baja California [44]; cuya disposición geográfica corresponde a Tijuana.

La ubicación exacta del primer lugar de recolección en la Mesa de Otay corresponde al emplazamiento de **Bosque De Las Araucarias** que está situado dentro de la localidad de Tijuana, en el Municipio de Tijuana en el estado de Baja California (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Está situado exactamente a 18.49 km hacia el noroeste del centro geográfico del municipio de Tijuana y a 2.7 km hacia el norte del centro de la ciudad (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).



Ilustración III. imágenes satelitales de Bosque de las Araucarias

El procedimiento de recolección se llevó a cabo mediante recorrido por la zona e identificación de las plantas hembra que poseen el fruto, las cuales se pueden identificar en temporada de recolección de agosto a septiembre por poseer el fruto seco; estas características se pueden identificar en la ilustración 3, las plantas macho no poseen fruto y tienen un racimo de flores pequeñas pistiladas[44].

Se recolectaron de forma manual, teniendo especial cuidado en no lastimar y/o arrancar las ramas y hojas de la planta.

Se identificaron semillas depositadas en suelo y directamente en las ramas aun dentro del fruto deshidratado; dispuestas a caer.

Las semillas depositadas en suelo se tomaron de manera manual con arrastre de la palma a ras del suelo para evitar daños a la planta.



Ilustración IV. Planta de Jojoba ubicada en bosque de las Araucarias

5.1.1 Observaciones y resultados de la recolección de semilla de Jojoba

Las semillas fueron recolectadas teniendo especial cuidado en no dañar las ramas de las plantas. Se recolectaron semillas en 3 zonas diferentes de Tijuana: Mesa de Otay, Ladera de Calzada Cetys y Cañón del Sainz en los meses de agosto y septiembre del año 2019; Así mismo hubo donación de semilla de dos áreas distintas.

Dentro de los aspectos a destacar, cabe mencionar que se identificaron diferentes zonas en Tijuana donde existe este tipo de vegetación de Matorral xerófilo el cual esta asociado a la Jojoba [44] ; en la cual hay plantas de Jojoba que rondan entre 0.50 m a 3 m aproximados.

Las semillas se recolectaron indistintamente entre los frutos secos de las ramas y las semillas depositadas en el suelo que ya habían caído por efecto de la gravedad.

Se observo que las semillas varían en tamaño con respecto a la altura de la planta, posiblemente esté relacionado con la longevidad de la planta y la cantidad de plantas polinizantes que tiene en su perímetro; así como la forma en la que estén distribuidas con respecto a la dirección de los vientos predominantes de las diferentes zonas en las que fueron recolectadas.

Las semillas recolectadas en la Mesa de Otay fueron descascarilladas en el momento de la recolección; en las siguientes recolecciones realizadas en calzada Cetys y en Cañón del Sainz se obtuvo todo el fruto seco como se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la**

referencia. y posteriormente se descascarillo en laboratorio. Todo lo anterior con el fin de aprovechar de manera eficiente el tiempo de recolección y por ende obtener una mayor cantidad de semilla.

El peso de total de las semillas recolectadas por zona se presenta en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.;** estas fueron pesadas en balanza analítica HR 120, con capacidad de 120g, resolución 0.0001g, serie orion, marca A&D, el pesaje se realizó por etapas en las cuales se tomaron pequeñas cantidades de semilla que no sobrepasasen los 120 g, posándolas sobre una caja elaborada a partir de una hoja tamaño carta de papel capuchino, dicha caja fue pesada antes de comenzar el procedimiento y se calibro con ella el peso en 0g ; posteriormente al pesaje, se realizó la sumatoria de los pesos obtenidos en gramos de cada etapa.

La cantidad de semilla total recolectada no está en función del número de arbustos reconocidos en las diferentes áreas de recolección, si no en función del tiempo que se dedicó a cada una de las recolecciones, la facilidad de transitar el terreno (Ladera Calzada Cetys), el descascarillado en campo (que después se evitó hacerlo en cañón del Sainz) y la seguridad personal en las zonas vulnerables (principalmente en Bosque de las Araucarias).

Tabla 8. Relación de pesos obtenidos de la semilla de Jojoba en las diferentes áreas de recolección

Área de recolección	Cantidad (kg)
Cañón del Sainz “Panteón Colinas del descanso”	1.80
Mesa Otay “Bosque de las Araucarias”	0.30
Ladera Calzada Cetys	0.24
Valle de las Palmas (Donación)	0.06
Valle de las Palmas “UABC FCITEC” Recolectadas en el año 2017 (Donación)	0.48
<u>TOTAL</u>	<u>2.8</u>

El total aproximado de semilla recolectada y donada suma 2 kg con 800 g.



Ilustración V. Semillas recolectadas sin descascarillar

5.2 EXTRACCIÓN DE LA CERA LIQUIDA DE JOJOBA

La extracción se realizó mediante la técnica de penetración de solvente, con sistema soxhlet.

Previamente a la extracción se sometió a una desactivación enzimática de la semilla, sometiendo a calentamiento por 24 horas en horno a una temperatura de 40 grados en escala Celsius. Posteriormente; pasadas las 24 horas la semilla fue retirada del horno y triturada con mortero y se introdujo en el horno nuevamente, pero a una temperatura de 60 grados en escala Celsius por 4 horas.



Figura 7. Trituración de semilla en mortero

Una vez terminado el proceso de desactivación, la semilla fue pasada a extracción continua con sistema soxhlet en una relación 1:10 masa/volumen de Hexano de uso de laboratorio, por 5 horas.

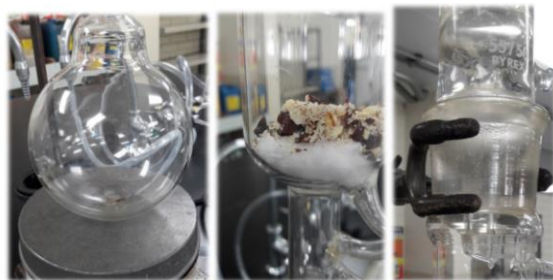


Figura 8. Montaje del sistema soxhlet

Pasadas las 5 horas la mezcla de cera líquida/solvente se sometió a una rota evaporación para eliminación del solvente y recuperación de la cera. El tiempo promedio de esta operación fue de aproximadamente 1 hora. En la tabla 6 se presenta el material y equipo utilizado para esta metodología.



Figura 9. Extracción continua

Filtración, este procedimiento elimina residuos de material vegetal derivado de la trituración.



Figura 10. Secado y filtrado de extracto obtenido



Figura 11. recuperación de solvente mediante destilación

Debido a los inconvenientes para tener acceso a rota evaporador, se decidió realizar destilación utilizando un condensador para recuperación del hexano, sin elevar las temperaturas a más de 100 grados Celsius y teniendo en constante rotación el extracto para evitar sobrecalentamiento.

El hexano recuperado se utilizó nuevamente en otra extracción continua (alrededor de 100 ml).



Figura 12. Secado y filtrado de producto obtenido

Una vez separado el aceite del solvente (hexano) se agregó una pequeña porción con espátula de hidróxido de calcio anhidro para eliminar humedad se agito vigorosamente y se pasó por filtrado con papel Whatman de 110 mm, obteniendo así aceite sin impurezas.

Se realizo el mismo procedimiento para extracción de la cera liquida; utilizando como solvente alcohol isopropílico; tomando en cuenta que se reportan mejores rendimientos de extracción utilizando este solvente con semillas de Jojoba.

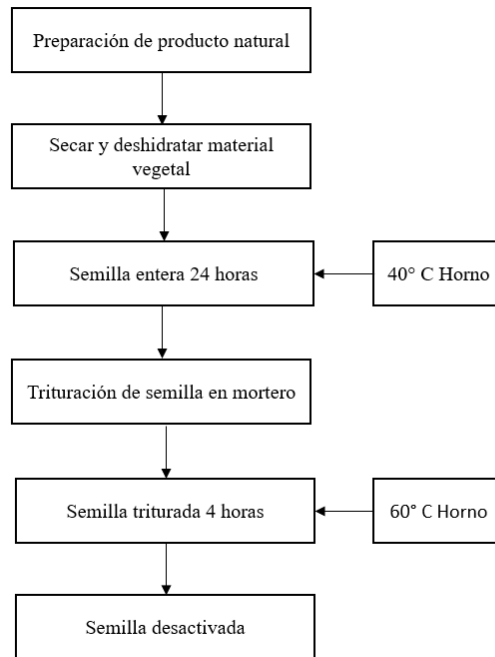


Figura 13. Diagrama de flujo de preparación de material vegetal

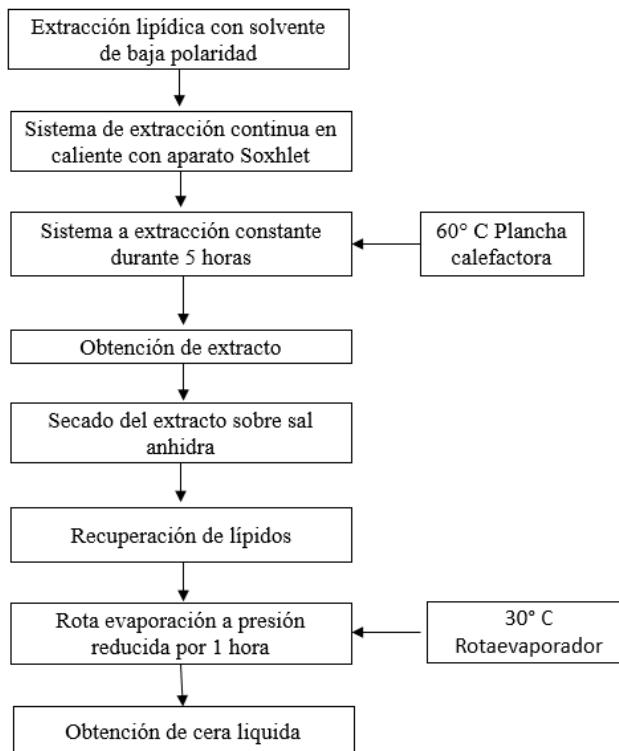


Figura 14. Obtención de cera líquida mediante solvente

Material y equipo

Tabla 9. Resumen de material y equipo utilizado para la extracción de la cera líquida de Jojoba

Equipo	Material
Plancha calefactora con agitación magnética	Soxhlet
Rotavapor con sistema de vacío	Condensador de bulbo
	Matraz bola fondo plano de 500 ml
	Mangueras
	Vaso de precipitado de 600 ml
	Probeta graduada 100 ml

Materia prima y reactivos, se presenta en la tabla 7 los reactivos utilizados para la extracción de la cera líquida de Jojoba.

Tabla 10. Resumen de la materia prima y reactivos utilizados para la obtención de la cera

Semilla de Jojoba
Hexano
Alcohol Isopropílico
Sulfato de magnesio Anhidro

5.2.1 Extracción por maceración

Las semillas fueron sometidas al mismo procedimiento de desactivación enzimática mediante temperatura. Posteriormente fueron trituradas y vertidas en un matraz bola con fondo plano y vertido aproximadamente 300 ml de hexano. El sistema se sometió a reflujo y agitación continua durante 8 horas. Este procedimiento se realizó únicamente con hexano.

5.2.2 Resultados y observaciones de la extracción de la cera líquida de jojoba

Se obtuvieron resultados del rendimiento de la extracción, mediante una comparación de la cantidad de masa usada de semilla, antes de la extracción y después de la extracción cuando la masa se encontraba completamente seca.

En el caso de la extracción con alcohol isopropílico se obtuvieron resultados desfavorables al momento de realizar la rota evaporación, ya que se formó una emulsión que se visualizó como una posible mezcla de componentes orgánicos con una cantidad imperceptible de cera líquida. Debido a ello se concluyó no utilizar este solvente y continuar con la utilización de hexano; que se considera el mejor solvente para extracción de grasas únicamente.

La naturaleza del alcohol isopropílico es completamente polar, para extracción con solventes se recomienda utilizar solventes que tengan afinidad, naturaleza del compuesto de interés (polar o no polar) y por lo tanto el solvente debe seleccionarse de la misma forma. Si tenemos un compuesto polar, se requiere un solvente polar, por ende, si se tiene un compuesto de interés con baja polaridad o apolar se utiliza entonces un solvente apolar.

La naturaleza de los compuestos lipídicos es apolar debido a esa cadena hidrocarbonada larga que presentan, por lo tanto, lo más recomendable para extraer un compuesto con estas características es usar un solvente con menor polaridad (hexano, éter de petróleo etc.)

En conclusión, el alcohol isopropílico se descartó completamente, la cantidad de grasa obtenida o cera fue bastante baja en comparación a la extraída con n-hexano (era de esperarse porque un solvente polar difícilmente se llevaría en su totalidad un compuesto más apolar como lo son las grasas) la mezcla terrosa que se formó fue debido a que esa naturaleza más polar extrajo todos los compuestos con afinidad polar incluso los pigmentos de la película de la semilla.

Con la extracción por maceración se pretende dar otra opción de extracción alternativa a la metodología de extracción continua a reflujo con Soxhlet.

El rendimiento global obtenido de la extracción del aceite/cera líquida de jojoba con extracción a reflujo con Soxhlet y maceración, de acuerdo a la ecuación 1 fue de 48% considerando que la semilla contiene un 65% aproximado de su peso en cera líquida.

5.3 OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA

Se realizó un primer ensayo con las proporciones propuestas por L. Canoira, R. et al 2006 disminuyendo el volumen a 20 ml de aceite, 10 ml de metanol y 1% del peso del aceite de catalizador; en el primer ensayo se utilizó NaOH.

Primeramente se determinó el volumen de aceite (20 ml) y se vertieron a un matraz bola con capacidad de 500 ml marca PIREX boca 24/40.



Figura 15. Preparación de matraz bola

Posteriormente se realizó el mismo procedimiento con metanol con un volumen distinto (10 ml).

En balanza analítica se pesaron 0.1887 g de NaOH y se vertieron al matraz bola, introduciendo un agitador magnético para posteriormente pasar esto a la plancha calefactora.

Se colocó un condensador de columna marca PIREX conector 24/40 en la boca del matraz bola.

La mezcla se puso a calentamiento alrededor de 60 grados celsius y a agitación constante de 700 rpm en un lapso de 1 hora; a su vez conectado el condensador para evitar que el metanol se escapara al ambiente.



Figura 16. Síntesis de biodiésel con cera líquida de jojoba

5.3.1 Resultados de la obtención de biodiésel

Una vez el producto obtenido fue neutralizado y secado, se filtró. Obteniendo las fases que se muestran en la figura.

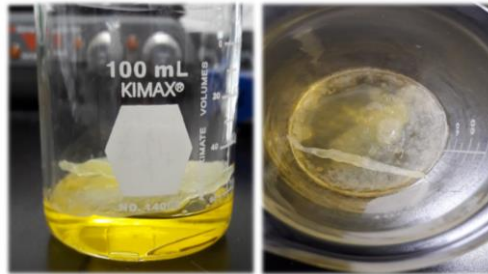


Figura 17. Producto obtenido de la transesterificación de cera líquida de Jojoba catalizada con NaOH

Como primeras observaciones se puede notar una película gelificada en suspensión encima de dos visibles fases, (se aprecia una especie de burbuja que descartamos sea agua debido al secado con sulfato de magnesio anhidro y su posterior filtrado). Esta muestra corresponde a la realizada con NaOH como catalizador.

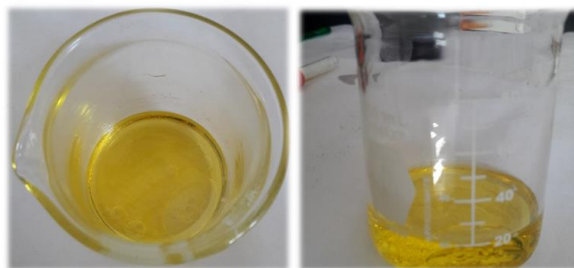


Figura 18. Producto obtenido de la transesterificación de cera líquida de Jojoba catalizada con KOH

La muestra obtenida siguiente fue catalizada con KOH, una vez secado y filtrado el producto se pueden observar dos fases presentes, la diferencia entre la muestra obtenida con NaOH como catalizador y esta es que no se presentó una película gelificada en la parte superior del producto.

En la figura 19 se presenta la descripción del procedimiento utilizado de referencia.

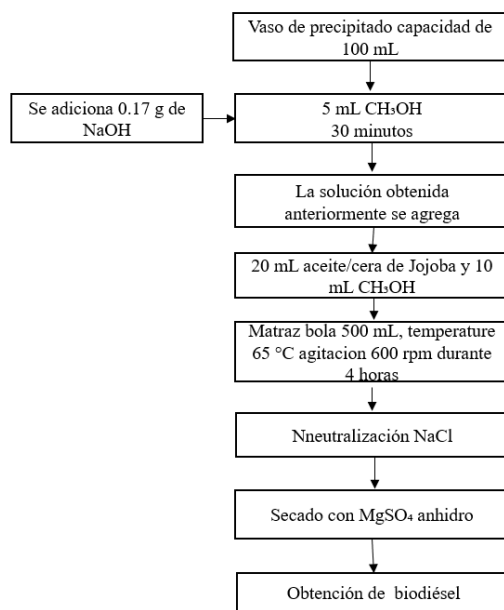


Figura 19. Metodología para la obtención de biodiésel a partir de cera líquida de Jojoba

El procedimiento descrito en la figura 19 se repitió utilizando como catalizador al 100% KOH adicionando 0.18 g de este.

Además, se realizaron 3 ensayos más respetando las mismas condiciones utilizando mezclas de 90%/10% de NaOH/Zn (NO₃). 6H₂O, NaOH/ZrO (NO₃)₂ y NaOH/Ti [OCH(CH₃)₂]₄, adicionando en cada uno de los casos lo siguiente:

1. 0.0506 g de NaOH y 0.95 mL Ti [OCH(CH₃)₂]₄.
2. 0.1223 g de NaOH y 0.0626 g Zn (NO₃). 6H₂O.
3. 0.1233 g de NaOH y 0.0745 g ZrO (NO₃)₂.

Ninguna de las 3 muestras mencionadas presento una separación notoria de fases y mantuvo la coloración inicial de la cera líquida de jojoba, todas fueron secadas con MgSO_4 anhidro y filtradas con papel Whatman.

5.4 CARACTERIZACIÓN DE LA CERA LÍQUIDA DE JOJOBA

Se analizó la muestra de cera líquida obtenida por espectroscopia de infrarrojo, con el equipo disponible en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de UABC, Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5 figura 20.



Figura 20: Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5

Con el apoyo del software OMNIC y Origin 85 se obtuvo el siguiente espectro figura 21.

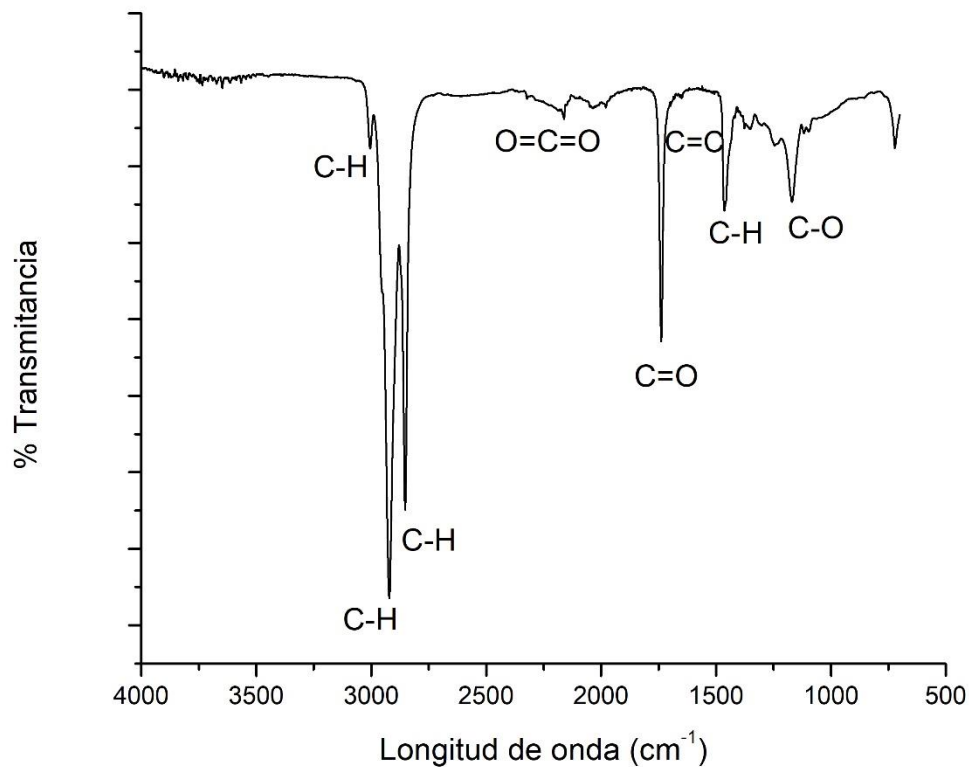


Figura 21: Espectro de Infrarrojo obtenido de cera líquida de Jojoba obtenida

Tabla 11. Relación tipo de enlace-región de la cera líquida de jojoba

Cera líquida de jojoba	
Enlace	ν (cm^{-1})
Cadenas Alifáticas CH	3000 – 2800
Carbonilo C=O	1738
C=C	1648
C-H	1464
C-O	1164

5.5 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIÉSEL OBTENIDO

Espectroscopia de infrarrojo

Se analizaron las muestras obtenidas de biodiesel por espectroscopia de infrarrojo, con el equipo disponible en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de UABC, Espectrómetro FT-IR Modelo Nicolet is5 figura 20.

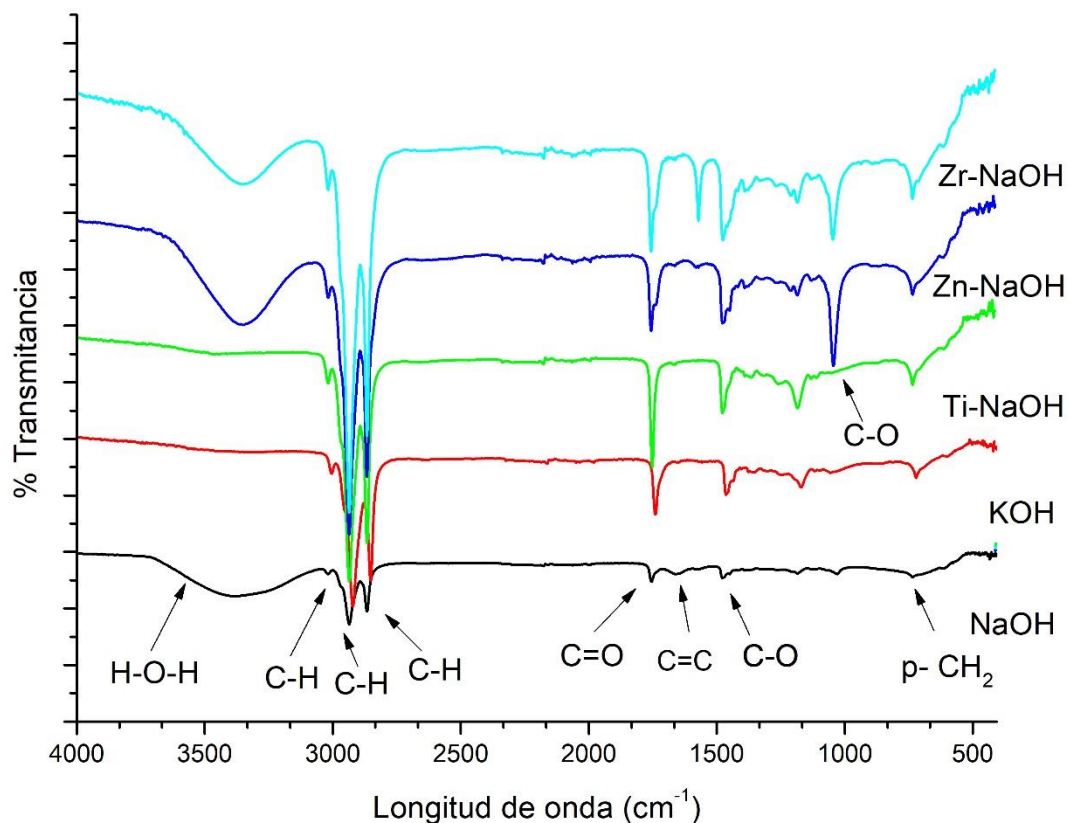


Figura 22. Espectros de infrarrojo obtenidos de las muestras de biodiésel obtenido

Tabla 12. Relación tipo de enlace-región de muestras obtenidas de biodiésel

Enlace	ν (cm^{-1})
Cadenas Alifáticas CH_3 , CH_2 y CH	3000 - 2800
Carbonilo $\text{C}=\text{O}$	1737-1742
$\text{C}=\text{C}$	1642-1649
$\text{OC}-\text{CH}_3$	1456-1465
Vibración de Flexión $\text{p}-\text{CH}_2$	1167-1174
$\text{C}-\text{O}$	1015-1033
Vibración de Flexión $\text{p}-\text{CH}_2$	714-726

Los grupos funcionales característicos del aceite y del biodiesel se encuentran las cadenas alifáticas el enlace carbonilo y los enlaces $\text{OC}-\text{CH}_3$.

Cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas

El equipo que se utilizó fue un Cromatógrafo de Gases Thermo-Scientific modelo TRACE 1310 acoplado a un espectrómetro de masas de cuadrupolo sencillo Thermo-Scientific modelo ISQ LT. El cromatógrafo equipado con una columna capilar TG-SQC (30m x 0.25 mm x 0.25 μm). Se inyectaron 3 μL de la solución de la muestra utilizando un auto muestreador modelo AI/AS 1310 Thermo-Scientific. La temperatura inicial de la columna fue de 120 °C, calentándose gradualmente hasta 180 °C a una velocidad de 6 °C/min, luego hasta 250°C a una velocidad de 4°C/min, manteniéndose a esa temperatura durante 5 minutos. El puerto de inyección se encontraba a una temperatura de 120 °C. El flujo del gas acarreador (helio) fue de 1.0 mL/min e inyectado con una dilución de 1:100.

Se analizaron las muestras de biodiesel obtenido obteniéndose los siguientes resultados listados en la tabla 13.

Tabla 13. Tiempos de retención de ácidos grasos identificados

Muestra	Tiempos de retención de los compuestos identificados											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
NaOH	17.56	---	21.41	24.44	25.05	27.99	28.61	20.67	---	---	---	---
KOH	17.56	20.69	21.43	24.45	25.06	27.98	28.60	---	---	---	---	---
Zn-NaOH	---	20.65	21.38	24.41	25.04	27.98	28.61	---	17.55	---	---	---
Zr-NaOH	---	20.69	21.43	24.45	25.06	27.99	28.61	---	17.56	---	---	---
Ti-NaOH	17.55	---	21.34	---	25.02	---	---	---	---	17.55	21.34	21.34

Los compuestos identificados fueron los siguientes:

Compuesto A: 7-Hexadecenoic acid, methyl ester, (Z)-

Compuesto B: Eicosen-1-ol, cis-9-

Compuesto C: cis-11-Eicosenoic acid, methyl ester

Compuesto D: Eicosen-1-ol, cis-9-

Compuesto E: Methyl 11-docosenoate

Compuesto F: Eicosen-1-ol, cis-9-

Compuesto G: 15-Tetracosenoic acid, methyl ester

Compuesto H: (Z)6-Pentadecen-1-ol

Compuesto I: 11-Octadecenoic acid, methyl ester

Compuesto J: trans-13-Octadecenoic acid, methyl ester

Compuesto K: Methyl 9-eicosenoate

Compuesto L: Methyl 13-eicosenoate

Se pueden identificar metil ester de 5 ácidos grasos diferentes en las muestras de biodiesel obtenido.

Resonancia magnética nuclear de protón de hidrogeno HRMN

El Equipo utilizado de Espectrómetro ^1H NMR fue Spinsolve Education con imán permanente. Especificaciones: Frecuencia de 43 MHz de Protón; núcleo ^1H y 11 de MHz de Carbón; núcleo ^{13}C , Resolución de 50 % ancho de línea 0.7 Hz. (16 ppb)

Temperatura de 28.5 °C y utilizando un tubo de muestra de 5 mm WG-1000-7 W/Mad Lab Glass NE de 7-8 cm de Longitud y capacidad 300 micro litros de muestra. La calibración fue con una solución de 10% de H₂O - 90% de D₂O.

Se obtuvo el siguiente espectro de cera líquida de Jojoba:

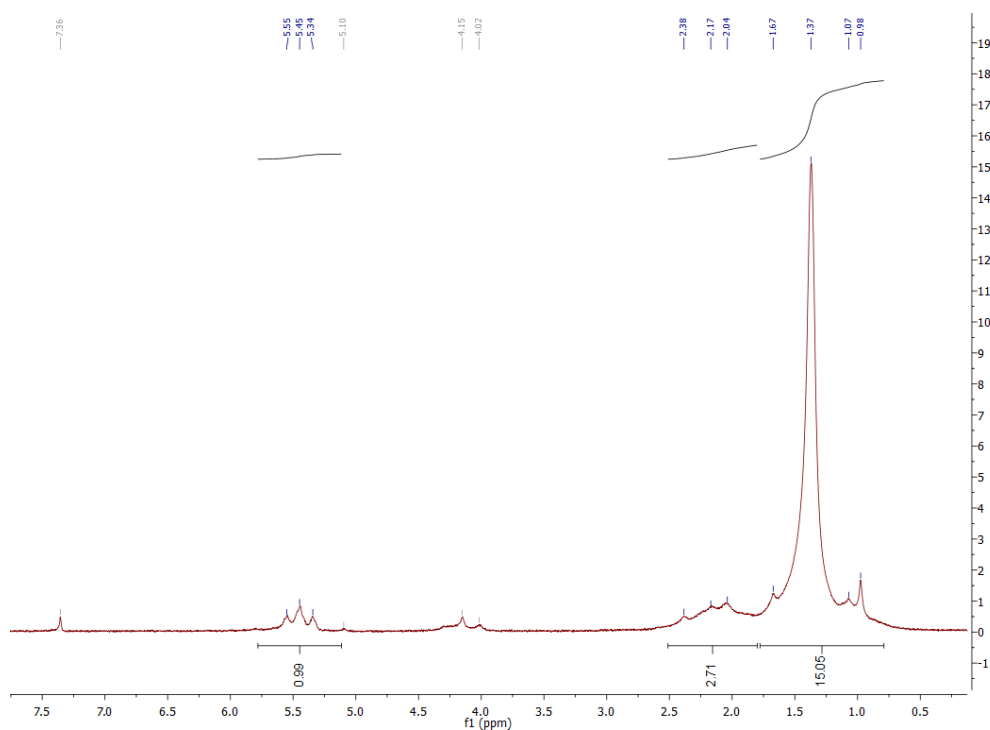


Figura 23. Espectro H RMN cera líquida de Jojoba

Se observan las señales en las regiones 1 y 2 ppm de los hidrógenos correspondientes a las cadenas hidrocarbonadas de los ácidos grasos de Jojoba.

En cuanto a las muestras obtenidas de biodiesel se obtuvieron los siguientes espectros:

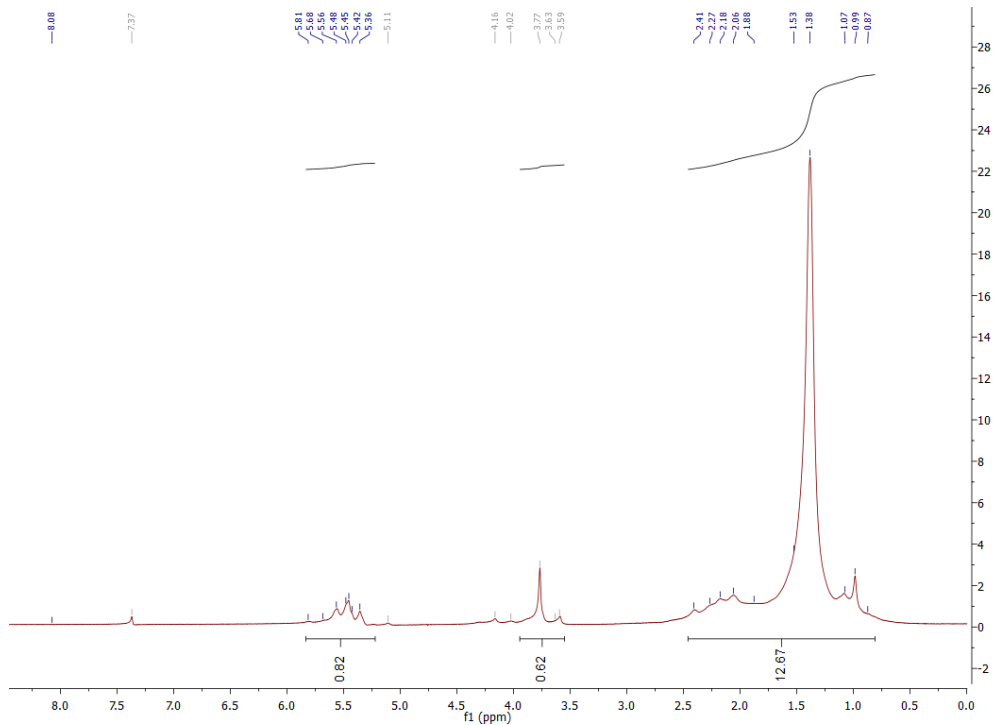


Figura 24. Espectro H RMN de biodiésel catalizado NaOH

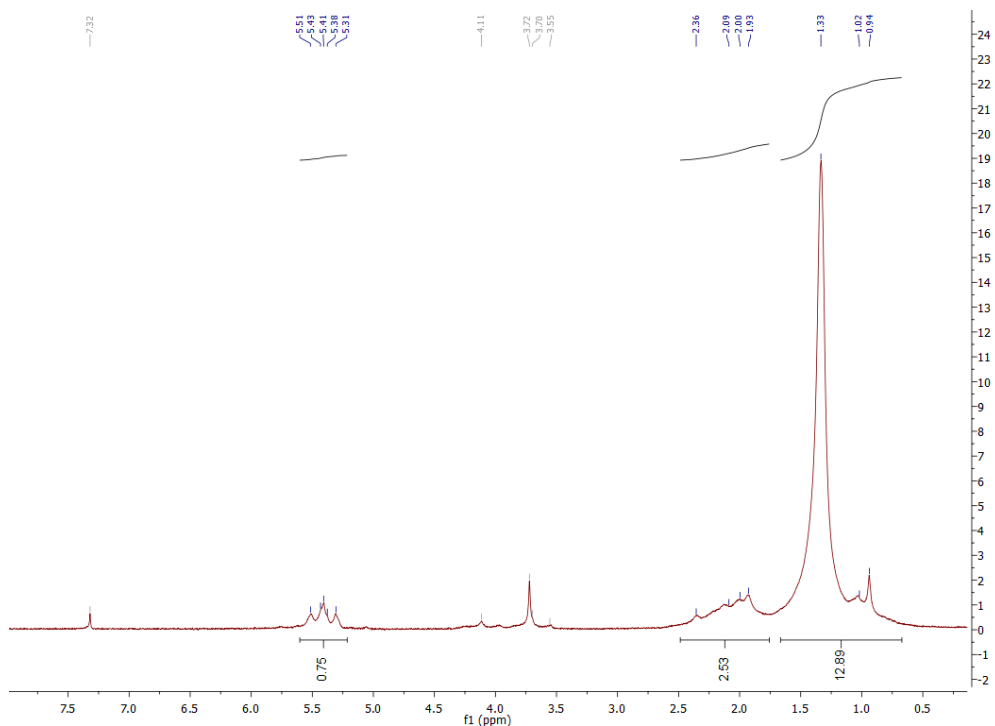


Figura 25. Espectro H RMN de biodiésel catalizado KOH

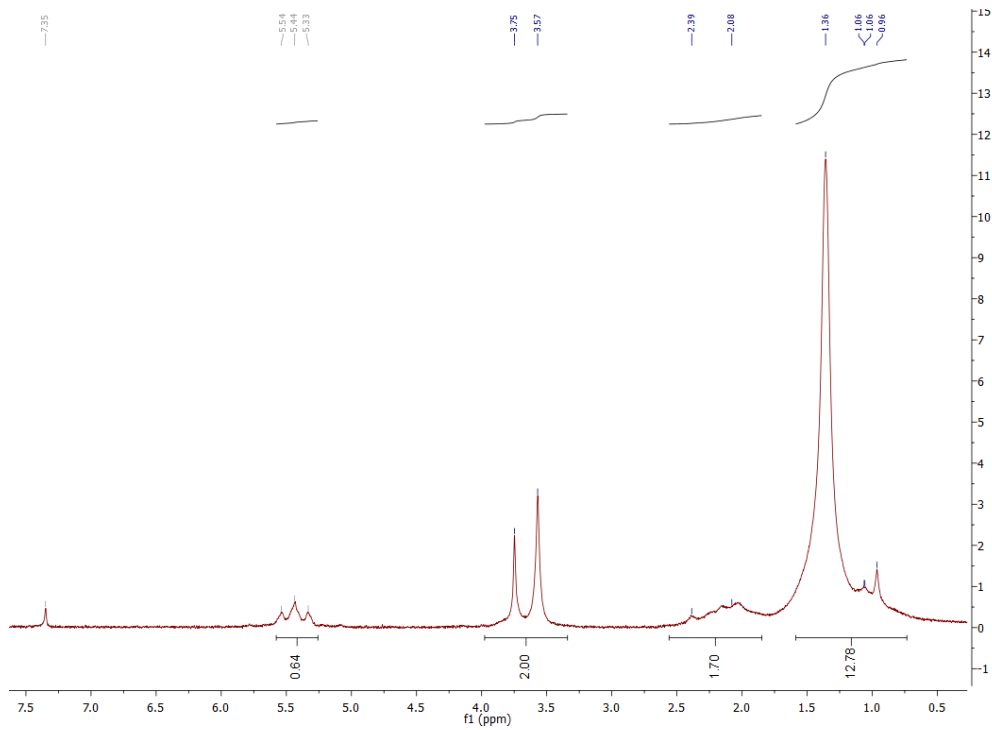


Figura 26. Espectro H RMN de biodiésel catalizado NaOH-Zn

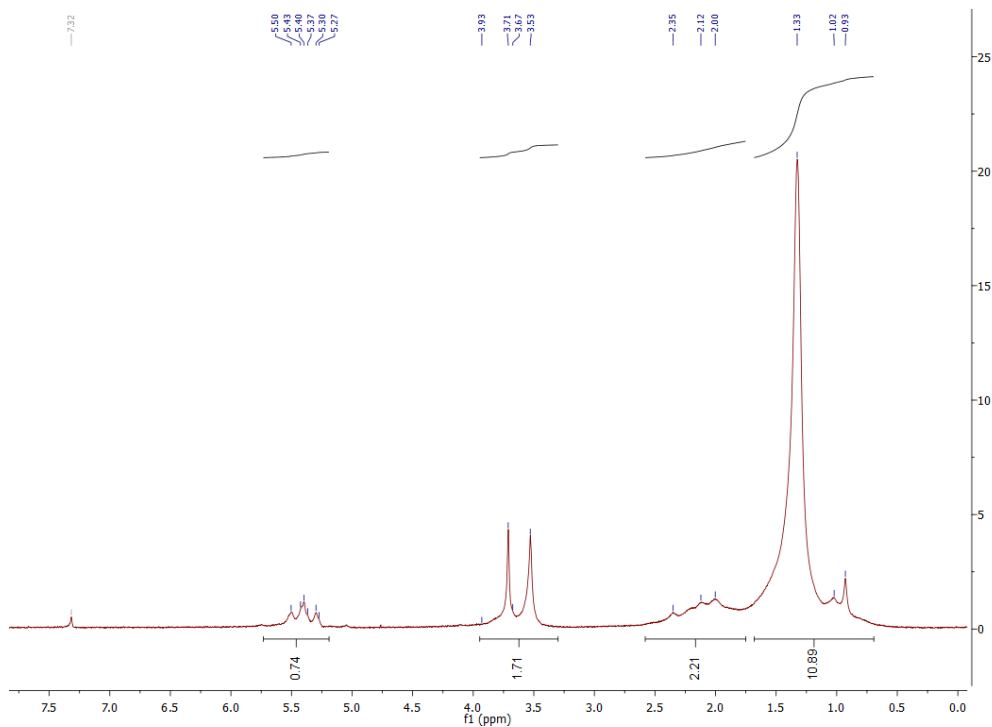


Figura 27. Espectro de H RMN obtenido de biodiésel catalizado NaOH-Zr

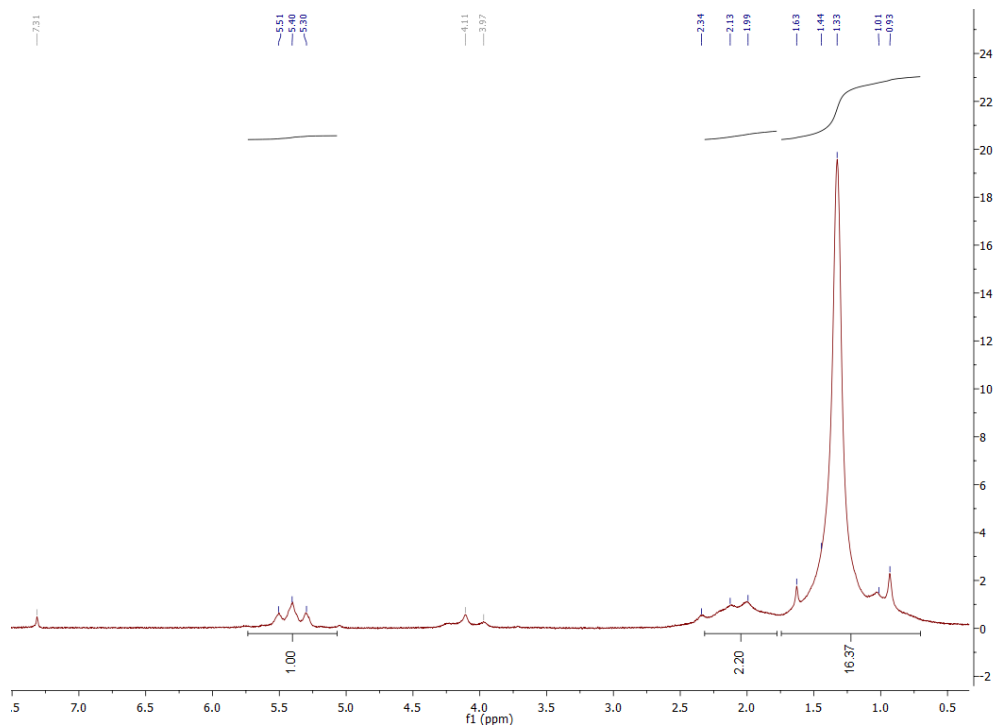


Figura 28. Espectro de H RMN obtenido de biodiésel catalizado NaOH-Ti

Se puede apreciar al igual que las señales obtenidas en el espectro del aceite, que en la región entre 1 y 2 ppm se encuentran los hidrógenos correspondientes a las cadenas hidrocarbonadas. Además de encontrarse la señal correspondiente al metilo del grupo éster en la región entre 3.5 y 4 ppm.



Figura 29. Métil éster de ácido 7-Hexadecenoico

En la figura 29 podemos apreciar la estructura de uno de los métil ésteres de ácido graso obtenido y corroborado por cromatografía de gases, podemos apreciar que la estructura de los metil ester de ácidos grasos será la misma, así pues, las señales de los protones de hidrogeno presentes en la estructura se presentaran en regiones similares.

Dado que en todas las muestras se presentaron ácidos grasos, podemos corroborar las señales, primero en la región de campo alto 1-2 ppm, altamente protegidos los hidrógenos correspondientes a la cadena hidrocarbonada (se puede notar la integración en la parte inferior de los espectros que representa la cantidad de hidrógenos detectados), se presentan

en todas las muestras un multiplete en esa región dando lugar al acoplamiento de esos debido a la proximidad que tiene con los hidrógenos vecinos, ese acoplamiento muy probable en la región del doble enlace, entre los metilenos de la cadena hidrocarbonada.

De igual manera se aprecia en la región de campo alto 2-3 ppm la posible señal de metileno (CH_2) cercano a enlace carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). Entre 3.5 y 4 ppm se esperarían las señales del grupo metilo (CH_3) unido al éster, precisamente más desprotegido por la acción electroattractora que le ejerce el estar enlazado a oxígeno.



Figura 30. Eicosen-1-ol,cis-9-

En la figura 31 se presenta la estructura de uno de los alcoholes detectados en las muestras de biodiesel obtenido y que también tienen efecto en las señales obtenidas en H RMN, se presentaran de igual manera la cadena hidrocarbonada ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2$) del alcohol graso presentado, pero se encontrara ligeramente desprotegido por acción del enlace a oxígeno así los metilenos (CH_2) más cercanos al grupo funcional hidroxilo (OH) se desplazarán más a campo alto.

6. DISCUSIONES

6.1 Características químicas de la cera líquida de Jojoba

En la figura 3 de la página 25 se muestra la estructura química de la cera líquida de Jojoba, como bien se sabe las ceras son ésteres de alcoholes monohidroxílicos de cadena larga que también son llamados alcoholes grasos, así pues, está compuesta por un único ácido graso esterificado con un alcohol. El hecho de que sean ésteres de un único ácido graso esterificado con un alcohol no significa que toda la cera tenga un solo tipo; se trata más bien de una mezcla de estas ceras. Como se muestra en la figura 2 los símbolos m y n determinan la cadena hidrocarbonada o alifática tanto del alcohol como del ácido graso involucrado; respectivamente. Entonces estas cadenas pueden ser de 7, 9, 11 o 13 átomos de carbono en el caso de la parte alcohólica del compuesto y los ácidos grasos presentes pueden ser de 8, 10, 12, o 14 átomos de carbono. En el caso de los ácidos grasos, se presentan en número par porque a partir de 2 átomos de carbono ocurre la biosíntesis de varios ácidos grasos en el organismo de diversos seres vivos.

Teniendo esto como referencia, comparando la figura 2 con la figura 1 veremos que en el caso de los triacilgliceroles se trata de un alcohol graso conocido mayormente como glicerol, esterificado con tres ácidos grasos completamente distintos, estos pueden ser tanto saturados como presentar insaturaciones aquí radica la diferencia entre la cera líquida de jojoba y los aceites obtenidos de otras especies de plantas. Las insaturaciones son debidas a dobles enlaces entre átomos de carbono que le confieren un carácter más líquido al aceite a temperatura ambiente. Las ceras obtenidas en la naturaleza difícilmente se encuentran en estado líquido, esto se debe a el carácter de sus enlaces y al no presentar insaturaciones le confiere una mayor atracción entre su estructura solidificándola. Pero la obtenida en la semilla de jojoba presenta dos dobles enlaces en la parte del ácido carboxílico y en la parte hidroxílica dándole un carácter líquido a temperatura ambiente.

6.2 Recolección de semilla de Jojoba

Las semillas fueron recolectadas en los meses de agosto y septiembre del año 2019, en las áreas de Tijuana que presentaban el tipo de vegetación de Matorral xerófilo, asociado a la jojoba. Se destaca la presencia aun de remanentes de vegetación nativa en la zona de Tijuana con potencial de aprovechamiento.

Debido a que la recolección de semilla estuvo condicionada a diversos factores externos humanos, no se puede destacar la potencialidad de uso como materia prima para elaboración de biodiesel, sin embargo, se destaca ampliamente el hecho de estas fuentes y la facilidad de recolección en los periodos de agosto y septiembre en la zona.

6.3 Rendimiento de extracción

Para efectos de este trabajo de tesis no se plantea el hecho de proponer una metodología idónea para la extracción de esta cera. Aun así, se efectúa el cálculo del rendimiento de extracción considerando el uso de metodología de extracción continua con aparato soxhlet y maceración que se describen en este trabajo de tesis. Los resultados globales de rendimiento que se obtuvieron con esta metodología y considerando claramente un porcentaje de aceite en semilla de 65% se obtiene como rendimiento 48% de extracción. Otras metodologías descritas en la bibliografía tales como la extracción mediante prensado en frío arrojan porcentajes de rendimiento más elevado; estos procedimientos bien pueden ser realizados en trabajos posteriores para comparar metodologías y rendimientos con el fin de concluir cual es el más adecuado para extraer esta cera.

6.4 Espectroscopia de infrarrojo

En cuanto a los resultados de espectroscopia infrarroja obtenidos de la cera líquida de jojoba, se desglosan en la tabla las señales obtenidas además de que se especifican dichas señales en el espectro mostrado en la sección de resultados y observaciones de la página.

Se observó que presenta bandas características de hidrocarburos alifáticos entre 3000-2800 cm^{-1} , estas son señales características que denotan la presencia de los enlaces C-H presentes en los ácidos grasos. También se muestran bandas específicas para ésteres a 1738

correspondiente al carbonilo y 1164 cm^{-1} al enlace C-O característico del éster, así como hidrocarburos insaturados C=C a 1648 cm^{-1} [64] .

Por otra parte se muestran los resultados obtenidos de la caracterización del biodiesel obtenido con dicho aceite, en el multigráfico de la página junto con las tablas identificadas con las señales comprobables específicas del biodiesel.

Los átomos de hidrogeno alifáticos son indicados en la región de 2924 cm^{-1} y 2854 cm^{-1} [72] se presentan en todas las muestras, comprobando la presencia de los ácidos grasos presumiblemente transformados en metil ésteres de ácidos grasos. Una banda intensa del alargamiento C=O para el éster metílico o metil éster aparece en la región aproximada a 1740 cm^{-1} [72][73] al igual que las señales de carbonos alifáticos esta se presenta y comprueba en todas las muestras evidenciando una posible conversión de estos ácidos grasos en ésteres metílicos. Se presumen las señales C-O en los rangos de 1260 cm^{-1} , 1203 cm^{-1} , y 1177 cm^{-1} .

Señales observadas dentro de 2200 cm^{-1} – 2400 cm^{-1} corresponden al modo de alargamientos de los grupos OH de glicerol [72] estas señales no se presentan en ninguna de las muestras dándonos un indicio para descartar como subproducto de la reacción glicerina y comprobando la característica de cera y no de triglicérido de los lípidos obtenidos de la Jojoba. A su vez se encuentra que el biodiesel al igual que el aceite vegetal absorbe en la región de 2750 cm^{-1} – 3000 cm^{-1} correspondiente a los modos de vibración de -CH₂ y -CH₃ [71], que son reconocidos como las cadenas alifáticas en este caso de los ácidos grasos[73] al igual que las señales anteriores están se identifican fácilmente en todas las muestras y están indicadas en la figura.

Los ésteres tienen dos fuertes bandas de absorción características derivadas del grupo carbonilo (C = O) alrededor de $1750\text{--}1730\text{ cm}^{-1}$ y el del grupo C-O en $1300\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$. Las vibraciones de estiramiento de CH₃, CH₂ y CH aparecen en $2980\text{--}2950$, $2950\text{--}2850$ y $3050\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$, mientras que las vibraciones de flexión (CH₂) de estos grupos aparecen en 1475--

1350, 1350-1150 y 722cm⁻¹, respectivamente [74] Dichas características se presentan en las 5 muestras de biodiesel obtenido y también del aceite de jojoba obtenido.

6.5 Ácidos grasos y métil ésteres de ácidos grasos identificados mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas

Para efectos de este trabajo de tesis se utilizaron los datos de ácidos grasos descritos en la bibliografía, los resultados mencionados de la conversión de ácidos grasos en metil esteres son los obtenidos experimentalmente y se mencionan en el apartado de resultados de cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas.

El ácido gondoico o cis-11 Eicosenoico se describe como el ácido graso característico de la cera líquida de jojoba encontrándose en proporción mayoritaria en su composición (hasta un 59.5%) [21]. Se comprueba en este estudio la conversión de este ácido graso a su metil éster; metil éster de ácido cis-11 eicosenoico, cuyo compuesto se identificó en las 5 muestras de biodiesel obtenido.

Se encontró también el ácido graso conocido comúnmente como erucico o trans-13 ácido octadecenoico, se identificó como como metil éster de ácido trans-13-octadecenoico, únicamente en la muestra catalizada con Ti-NaOH. Otro de los ácidos grasos que se presentan con mayor proporción en la cera líquida de jojoba en comparación a los minoritarios es el ácido oleico, se identifican el metil éster de ácido 11-octadecenoico en las muestras catalizadas con Zn-NaOH y Zr-NaOH.

Se identifican en las muestras 12 compuestos diferentes que incluyen los metil esteres de ácidos grasos y los alcoholes característicos de este aceite.

Los ácidos grasos convertidos a metil esteres, identificados son los siguientes:

- Ácido 7- Hexadecenoico
- Ácido cis-11-Eicosenoico
- 11-docosenoato
- Ácido 15- Tetracosenoico

- Ácido 11- octadecenoico
- Ácido trans-13- octadecenoico
- 9-eicosenoato
- 13-eicosenoato

Se descarta la presencia de glicerina, lo cual corrobora junto a los datos arrojados en espectroscopia de infrarrojo, que estructuralmente el llamado aceite de jojoba es realmente una cera en estado líquido y no se trata por tanto de un triglicérido.

7. CONCLUSIONES

Con base en los resultados recabados durante el procedimiento experimental, puede concluirse, que la materia prima para la obtención de biodiesel a partir de cera-aceite de semilla de jojoba (semilla de jojoba), se puede obtener en zonas cercanas de Tijuana, Baja California y la recolección de la semilla no presenta mayor complicación, dado que solo es esperar la temporada de floración y recolectar la semilla cuando ésta ya esté en el suelo, o bien tomarla directamente de la planta, en los remanentes de vegetación nativa del área de Tijuana se recomienda realizar la recolección en los meses de agosto a septiembre.

Para fines de este trabajo experimental, no se buscaba encontrar la metodología mayormente eficiente para extraer grasas de semillas, sin embargo, se estudiaron procedimientos de extracción continua a reflujo con aparato soxhlet y utilizando como solvente n-hexano, debido a que es el más recomendado para la extracción de aceite, obteniéndose un rendimiento global de 48% de extracción, en este trabajo de tesis. Si lo que se busca es obtener mejores rendimientos de extracción se recomienda revisar otras metodologías y probarlas comparando con la metodología propuesta en esta tesis.

A pesar de ello se obtuvo la cantidad suficiente de cera para realizar los posteriores procedimientos.

La cera líquida obtenida fue caracterizada mediante la técnica de espectroscopia de infrarrojo y resonancia magnética nuclear de protón. Se identifican claramente grupos funcionales característicos de la cera de jojoba y las señales de protón características de las cadenas hidrocarbonadas de los ácidos grasos, descritas en la sección de resultados.

El producto de la transesterificación se caracterizó y se pudo confirmar que las cinco muestras presentan los grupos funcionales característicos del biodiesel, identificados en los espectros IR, dichas señales características de las cadenas hidrocarbonadas y el metilo del grupo éster se identifican en los espectros de resonancia de protón de (¹H-RMN), para finalmente corroborar con la identificación de ocho diferentes metil ésteres de ácidos grasos identificados en la bibliografía. Con base en esto se concluye la existencia de conversión de ácidos grasos presentes en la cera líquida de jojoba en metil ésteres y de esta manera se

confirma la correcta identificación de ellos con las técnicas de espectroscopia de infrarrojo y resonancia magnética nuclear.

Gracias a los resultados obtenidos en cromatografía de gases, dentro de los compuestos identificados no se detecta glicerina lo que confiere a que el biodiésel obtenido, cumple con el estándar D6584 que establece los límites de contenido de glicerina en biodiésel.

Aunque bien no se pudo calcular el rendimiento real de la reacción debido a la falta de comparativa con respecto a los ácidos grasos presentes en la cera líquida obtenida, de manera teórica se calculo el porcentaje de incidencia de conversión de ácidos grasos en metil ésteres de ácidos grasos, encontrándose que se identificaron un ácido graso más convertido en metil éster en la muestra catalizada con Ti-NaOH infiriendo que dicho catalizador tendría potencial para su uso a futuro, además de destacar que de los seis ácidos graso identificados en la muestra, tres de ellos no se presentan en ninguna de las cuatro muestras restantes, concluyendo que este catalizador actuó en los tres últimos compuestos identificados que son de 20 a 24 átomos de carbono (ácidos grasos de cadena larga) lo cual los hace idóneos para la utilización como biocombustibles.

Aunque se describa al aceite de jojoba como una cera y por lo tanto sea ya un éster, no significa que pueda usarse directamente en un motor diésel, las características de operación no son las idóneas que establecen los estándares internacionales [68], sin embargo para efectos de este trabajo se pudo comparar con los estándares ASTM D6584, descartando la presencia de glicerina, la cual genera problemáticas en la operación del motor, lo que significaría que ganaría mayor interés para su uso como biodiésel.

Este trabajo presenta resultados con diversos catalizadores, aunque bien no se puede confirmar el rendimiento de reacción, si se puede confirmar la conversión de esos ácidos grasos en biodiésel, concluyendo que la reacción si se lleva a cabo con todos los catalizadores planteados y que el que el catalizador que incluía Ti, presenta una mayor variedad de metil ésteres de ácidos grasos del aceite de Jojoba que arroja hasta cinco ácidos grasos diferentes que reporta la literatura, y que se encuentran convertidos a su forma metilada (Biodiésel).

Debido a la disponibilidad de reactivos y materias primas, la forma en la que se utilizaron los catalizadores fue en forma homogénea, pero dados los resultados, se recomienda probar con

partículas de TiO_2 como catalizador para la reacción y que reportan rendimientos de reacción que superan porcentajes de 90 y que no han sido reportados con el uso de aceite de Jojoba, todo esto debido a los ácidos grasos identificados en la muestra catalizada con Ti.

8. FUTURAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Con las cualidades de este aceite se pueden enlistar una infinidad de aplicaciones que pueden ser investigadas a profundidad y que tal vez no bastarían para terminar de enmarcar las grandes promesas que nos ofrece esta especie. Como ya se mencionó anteriormente, este aceite-cera cuenta con muchas ventajas que lo hacen atractivo para diversas aplicaciones. Así que el campo de investigación a futuro aun es amplio.

Como futuras líneas de investigación a corto plazo se pueden enlistar las siguientes:

- Realizar la extracción experimental del aceite-cera de las semillas de Jojoba de la región, mediante otras metodologías tales como prensado en frio y utilizando otros solventes diferentes a n-hexano.
- Elaboración experimental de biodiesel a partir de aceite-cera de Jojoba de la región y compararlos con los resultados obtenidos en este estudio y en otros realizados con esta especie.
- Utilizar otras técnicas de caracterización de biodiesel a partir de esta especie.
- Desarrollar una metodología de obtención de biodiesel a partir de aceite-cera de Jojoba utilizando los principios químicos de la reacción de transesterificación, desde la perspectiva química verde, para obtener mejores resultados y compararlos con este estudio.
- Estudiar la viabilidad económica, ambiental y social de un posible cultivo comercial de Jojoba en la región.
- Realizar un estudio de monitoreo de las plantaciones nativas de la región con la finalidad de registrar las variables ambientales que afectan la productividad de las plantas, registrar su ubicación, producción y la condición de las semillas obtenidas.

- Realizar un estudio energético, económico, ambiental y social del proceso completo de obtención de biodiesel a partir de un cultivo energético de Jojoba.
- Cuantificar y comparar las emisiones de gases de combustión con la utilización de biodiesel a partir de aceite de Jojoba en un motor diésel.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Russo, M. Dassisti, V. Lawlor, and A. G. Olabi, “State of the art of biofuels from pure plant oil,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6. pp. 4056–4070, Aug-2012.
- [2] S. S. Fernández and J. R. Jusmet, “Agotamiento de los combustibles fósiles y emisiones de CO₂: Algunos posibles escenarios futuros de emisiones,” *Rev. Galega Econ.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–19, 2010.
- [3] A. Álvarez Bejar, N. L. Montes Delgado, A. Jazcilevich Diamant, J. Manríquez García, G. C. Delgado Ramos, and L. R. De Diego Correa, “Biocombustibles en México,” *Unam*, 2015.
- [4] O. Masera Cerutti *et al.*, “La bioenergía en México, Situación actual y perspectivas,” 2011.
- [5] A. Demirbas, “Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 8, pp. 2106–2116, 2008.
- [6] V. A. Alder, “Biocombustibles Y Microalgas Marinas,” *Cienc. Invest.*, vol. 68, no. 1, pp. 29–40, 2018.
- [7] I. I. de C. para la A. IICA, “Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas,” 2010.
- [8] F. Ma and M. A. Hanna, “Biodiesel production: a review,” *Bioresour. Technol.*, vol. 70, no. 1, pp. 1–15, 1999.
- [9] C. De Diputados *et al.*, “Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos.”
- [10] A. C. Alba Rubio, “Nuevos procesos para la obtención de biodiésel a partir de catalizadores ácidos y básicos,” 2011.
- [11] OCDE/FAO, “Situación del mercado de biocombustibles,” *OCDE-FAO Perspect. Agrícolas 2017-2026*, 2017.

- [12] A. Felipe, R. González, E. Girón, H. Gerardo, and T. Castañeda, “Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales : una revisión - catálisis enzimática Operation variables in transesterification of vegetable oil : an enzymatic catalysis review,” vol. 30, no. 1, pp. 17–21, 2010.
- [13] M. Balat and H. Balat, “A critical review of bio-diesel as a vehicular fuel,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2727–2741, Oct. 2008.
- [14] P. Castro, J. Coello, and L. Castillo, *Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú*. 2007.
- [15] C. Cabello, S. Rincon, and A. Zeped, “Types of heterogeneous catalysts used for biodiesel production,” *Afinidad*, vol. 74, no. 577, pp. 51–59, 2017.
- [16] P. C. Narváez Rincón, Sánchez Francisco José, J. A. Torres, and L. F. Ponde de León, “Producción de ésteres metílicos de ácidos grasos variables asociadas al proceso de transformación.,” *Ing. e Investig.*, vol. 24, no. 002, pp. 41–50, 2004.
- [17] B. M. E. Russbuedt and W. F. Hoelderich, “New rare earth oxide catalysts for the transesterification of triglycerides with methanol resulting in biodiesel and pure glycerol,” *J. Catal.*, vol. 271, no. 2, pp. 290–304, 2010.
- [18] K. Suwannakarn, E. Lotero, J. G. Goodwin, and C. Lu, “Stability of sulfated zirconia and the nature of the catalytically active species in the transesterification of triglycerides,” *J. Catal.*, vol. 255, no. 2, pp. 279–286, 2008.
- [19] I. Istadi, S. A. Prasetyo, and T. S. Nugroho, “Characterization of K₂O/CaO-ZnO Catalyst for Transesterification of Soybean Oil to Biodiesel,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 23, no. Ictcred 2014, pp. 394–399, 2015.
- [20] I. Istadi, D. D. Anggoro, L. Buchori, D. A. Rahmawati, and D. Intaningrum, “Active Acid Catalyst of Sulphated Zinc Oxide for Transesterification of Soybean Oil with Methanol to Biodiesel,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 23, no. Ictcred 2014, pp. 385–393, 2015.
- [21] S. N. Shah, B. K. Sharma, B. R. Moser, and S. Z. Erhan, “Preparation and evaluation of jojoba oil methyl esters as biodiesel and as a blend component in ultra-low sulfur

- diesel fuel,” *Bioenergy Res.*, vol. 3, no. 2, pp. 214–223, 2010.
- [22] B. A. DaSilveira Neto *et al.*, “1-n-Butyl-3-methylimidazolium tetrachloro-indate (BMI $\dot{\text{I}}\text{InCl}_4$) as a media for the synthesis of biodiesel from vegetable oils,” *J. Catal.*, vol. 249, no. 2, pp. 154–161, 2007.
- [23] J. Gardy, A. Hassanpour, X. Lai, M. H. Ahmed, and M. Rehan, “Biodiesel production from used cooking oil using a novel surface functionalised TiO₂ nano-catalyst,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 207, pp. 297–310, 2017.
- [24] R. Madhuvilakku and S. Piraman, “Biodiesel synthesis by TiO₂-ZnO mixed oxide nanocatalyst catalyzed palm oil transesterification process,” *Bioresour. Technol.*, vol. 150, pp. 55–59, 2013.
- [25] D. Salinas, P. Araya, and S. Guerrero, “Study of potassium-supported TiO₂ catalysts for the production of biodiesel,” *Appl. Catal. B Environ.*, vol. 117–118, pp. 260–267, 2012.
- [26] M. J. Borah, A. Devi, R. A. Saikia, and D. Deka, “Biodiesel production from waste cooking oil catalyzed by in-situ decorated TiO₂ on reduced graphene oxide nanocomposite,” *Energy*, vol. 158, pp. 881–889, 2018.
- [27] D. B. Diaz *et al.*, “Evaluación de catalizadores de óxido de zinc y su actividad catalítica en la reacción de transesterificación para la producción de biodiésel,” *Afinidad Rev. química teórica y Apl.*, vol. 65, no. 536, pp. 299–306, 2008.
- [28] M. Shah, S. Ali, M. Tariq, N. Khalid, F. Ahmad, and M. A. Khan, “Catalytic conversion of jojoba oil into biodiesel by organotin catalysts, spectroscopic and chromatographic characterization,” *Fuel*, vol. 118, pp. 392–397, 2014.
- [29] J. K. Efavi *et al.*, “The effect of NaOH catalyst concentration and extraction time on the yield and properties of Citrullus vulgaris seed oil as a potential biodiesel feed stock,” *South African J. Chem. Eng.*, vol. 25, pp. 98–102, 2018.
- [30] V. Aslan and T. Eryilmaz, “Polynomial regression method for optimization of biodiesel production from black mustard (*Brassica nigra* L.) seed oil using methanol, ethanol, NaOH, and KOH,” *Energy*, vol. 209, p. 118386, 2020.

- [31] R. Ganesan *et al.*, “A detailed scrutinize on panorama of catalysts in biodiesel synthesis,” *Sci. Total Environ.*, vol. 777, p. 145683, 2021.
- [32] A. Saravanan, M. Murugan, M. Sreenivasa Reddy, and S. Parida, “Performance and emission characteristics of variable compression ratio CI engine fueled with dual biodiesel blends of Rapeseed and Mahua,” *Fuel*, vol. 263, no. July 2019, p. 116751, 2020.
- [33] S. M. Joshi, P. R. Gogate, and S. Suresh Kumar, “Intensification of esterification of karanja oil for production of biodiesel using ultrasound assisted approach with optimization using response surface methodology,” *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 124, no. December 2017, pp. 186–198, 2018.
- [34] P. R. Pandit and M. H. Fulekar, “Egg shell waste as heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production: Optimized by response surface methodology,” *J. Environ. Manage.*, vol. 198, pp. 319–329, 2017.
- [35] S. Alaei, M. Haghghi, J. Toghiani, and B. Rahmani Vahid, “Magnetic and reusable MgO/MgFe₂O₄ nanocatalyst for biodiesel production from sunflower oil: Influence of fuel ratio in combustion synthesis on catalytic properties and performance,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 117, no. March, pp. 322–332, 2018.
- [36] M. J. Borah, A. Devi, R. Borah, and D. Deka, “Synthesis and application of Co doped ZnO as heterogeneous nanocatalyst for biodiesel production from non-edible oil,” *Renew. Energy*, vol. 133, pp. 512–519, 2019.
- [37] G. Baskar, I. Aberna Ebenezer Selvakumari, and R. Aiswarya, “Biodiesel production from castor oil using heterogeneous Ni doped ZnO nanocatalyst,” *Bioresour. Technol.*, vol. 250, no. November 2017, pp. 793–798, 2018.
- [38] E. Safakish, H. Nayebzadeh, N. Saghatoleslami, and S. Kazemifard, “Comprehensive assessment of the preparation conditions of a separable magnetic nanocatalyst for biodiesel production from algae,” *Algal Res.*, vol. 49, no. January, p. 101949, 2020.
- [39] G. Sivaprakash *et al.*, “Biodiesel production from *Ulva linza*, *Ulva tubulosa*, *Ulva*

fasciata, *Ulva rigida*, *Ulva reticulata* by using Mn_2ZnO_4 heterogeneous nanocatalysts,” *Fuel*, vol. 255, no. June, p. 115744, 2019.

- [40] S. H. Teo, A. Islam, and Y. H. Taufiq-Yap, “Algae derived biodiesel using nanocatalytic transesterification process,” *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 111, pp. 362–370, 2016.
- [41] S. Banerjee, S. Rout, S. Banerjee, A. Atta, and D. Das, “ Fe_2O_3 nanocatalyst aided transesterification for biodiesel production from lipid-intact wet microalgal biomass: A biorefinery approach,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 195, no. March, pp. 844–853, 2019.
- [42] W. G. Morales *et al.*, “Catálisis heterogénea en la obtención de biodiesel,” *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 16, no. September, 2012.
- [43] F. Torossi Baudino, “Reacciones en contexto: la transesterificación en la producción de biodiésel a partir de aceite de fritura usado,” *An. la Real Soc. Española Química*, no. 3, pp. 43–49, 2006.
- [44] G. D. Vázquez-Yanes C., A.I. Batis Muñoz, M.I. Alcocer Silva, M and C. S. Dirzo, “Árboles y arbustos potencialmente valiosos para la restauración ecológica y la reforestación,” 1999.
- [45] A. Sandouqa and Z. Al-Hamamre, “Energy analysis of biodiesel production from jojoba seed oil,” *Renew. Energy*, vol. 130, pp. 831–842, 2019.
- [46] Z. Al-Hamamre and A. Al-Salaymeh, “Physical properties of (jojoba oil + biodiesel), (jojoba oil + diesel) and (biodiesel + diesel) blends,” *Fuel*, vol. 123, pp. 175–188, 2014.
- [47] M. Sánchez, M. R. Avhad, J. M. Marchetti, M. Martínez, and J. Aracil, “Jojoba oil: A state of the art review and future prospects,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 129, pp. 293–304, 2016.
- [48] R. R. Habashy, A. B. Abdel-Naim, A. E. Khalifa, and M. M. Al-Azizi, “Anti-inflammatory effects of jojoba liquid wax in experimental models,” *Pharmacol. Res.*, vol. 51, no. 2, pp. 95–105, 2005.

- [49] A. J. Alonso-Castro, F. Domínguez, J. R. Zapata-Morales, and C. Carranza-Álvarez, “Plants used in the traditional medicine of Mesoamerica (Mexico and Central America) and the Caribbean for the treatment of obesity,” *J. Ethnopharmacol.*, vol. 175, pp. 335–345, 2015.
- [50] M. I. Al-Widyan and M. A. Al-Muhtaseb, “Experimental investigation of jojoba as a renewable energy source,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 8, pp. 1702–1707, 2010.
- [51] A. I. EL-Seesy, H. Hassan, and H. Kosaka, “Improving the performance of a diesel engine operated with jojoba biodiesel-diesel-n-butanol ternary blends,” *Energy Procedia*, vol. 156, no. September 2018, pp. 33–37, 2019.
- [52] H. E. Saleh and M. Y. E. Selim, “Improving the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled by jojoba methyl ester-diesel-ethanol ternary blends,” *Fuel*, vol. 207, pp. 690–701, 2017.
- [53] G. Alba Pons, “Aceites vegetales, hacia una producción sostenible,” 2015.
- [54] H. . Peredo-Luna, E. Palou-García, and A. López-Malo, “Métodos de extracción de aceites,” *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, vol. 3, no. 1. pp. 24–32, 2009.
- [55] A. Alcaraz Meléndez Lilia, V. Z. Diego, R. C. Sergio Manuel, R. Á. Margarito, M. S. Rigoberto, and Orduño Cruz, *Diagnóstico de la Jojoba (Simmondsia chinensis) (Link) C.K. Schneider, en México*. 2011.
- [56] L. Canoira, R. Alcántara, M. Jesús García-Martínez, and J. Carrasco, “Biodiesel from Jojoba oil-wax: Transesterification with methanol and properties as a fuel,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 30, no. 1, pp. 76–81, 2006.
- [57] S. Agarwal, D. Arya, and S. Khan, “Comparative fatty acid and trace elemental analysis identified the best raw material of jojoba (*Simmondsia chinensis*) for commercial applications,” *Ann. Agric. Sci.*, vol. 63, no. 1, pp. 37–45, 2018.
- [58] C. Granados, X. Yáñez, and D. Acevedo, “Evaluación de la actividad antioxidante del aceite esencial foliar de *myrcianthes leucoxylla* de Norte de Santander (Colombia),” *Inf. Tecnol.*, vol. 25, no. 3, pp. 11–16, 2014.

- [59] C. E. Londoño, Peggy; Mieres-Pitre, Alberto; Hernández, “Extracción y caracterización del aceite crudo de la almendra de durazno,” *Av. en Ciencias e Ing.*, vol. 3, no. 4, pp. 37–46, 2012.
- [60] V. G. Tacias Pascacio, A. Rosales Quintero, and B. Torrestiana Sánchez, “Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: Un caso de estudio,” *Rev. Int. Contam. Ambient.*, vol. 32, no. 3, pp. 303–313, 2016.
- [61] A. A. P. Jennifer J. Lafont, Manuel S. Páez, “Extracción y caracterización Físicoquímica del aceite de la semilla del Marañón,” *Biotecnol. Apl.*, vol. 28, no. 2, pp. 60–76, 2011.
- [62] M. Ortega Nieblas and L. Vázquez Moreno, “Caracterización físicoquímica del aceite crudo y refinado de la semilla de *Proboscidea parviflora* (Uña de gato),” *Grasas y Aceites*, vol. 44, no. 1, pp. 30–34, 1993.
- [63] L. Tejeda-Benítez, D. Henao-Argumedo, M. Alvear-Alayón, and C. R. Castillo-Saldarriaga, “Caracterización y perfil lipídico de aceites de microalgas,” *Rev. Fac. Ing.*, vol. 24, no. 39, p. 43, 2015.
- [64] S. Vaillant Sánchez, “Investigación sobre el uso del aceite de jojoba como plastificante natural para el procesamiento de elastómeros,” 2018.
- [65] D. A. Skoog, F. J. Holler, and T. A. Nieman, *Principios de análisis instrumental*. 2018.
- [66] D. L. Pavia, G. M. Lampman, and Georg S. Kriz, *Introduction to spectroscopy*. 2001.
- [67] M. Tariq *et al.*, “Identification, FT-IR, NMR (1H and 13C) and GC/MS studies of fatty acid methyl esters in biodiesel from rocket seed oil,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 92, no. 3, pp. 336–341, 2011.
- [68] M. L. Schei, “Production of Biodiesel from Jojoba Oil with Calcium Glyceroxide as Catalyst,” 2017.

- [69] G. Knothe, "Calidad del combustible biodiésel y la norma astm," *Palmas*, vol. 31, pp. 162–171, 2010.
- [70] ASTM Standard D7371, "Standard Test Method for Determination of Biodiesel (Fatty Acid Methyl Esters) Content in Diesel Fuel Oil Using Mid Infrared Spectroscopy (FTIR-ATR-PLS Method)," *West Conshohocken, PA ASTM Int. 1991*, <www.astm.org>., pp. 1–10, 2014.
- [71] J. Medina-Valtierra, G. Camarillo Martínez, and J. Ramírez-Ortiz, "Método para monitorear el rendimiento y contenido de metil-ésteres en el biodiesel usando la espectroscopia vibracional IR," *Acta Univ.*, vol. 21, no. 1144, pp. 27–32, 2011.
- [72] J. Ramírez-ortiz *et al.*, "Obtención de biodiesel con aceite de maíz usado en frituras y metacaolinita como catalizador," *Acta Univ.*, vol. 21, no. 1801, pp. 19–26, 2011.
- [73] L. González-Delgado, Ángel Darío Antonia, P. Rincón, K. Johanna, S. Ortíz, and Y. E. Álvarez, "Evaluación de rutas de obtención de lípidos y monosacáridos de biomasa de microalgas bajo el concepto de biorefinería Evaluation of lipid and monosaccharide obtaining routes of microalgae biomass under the biorefinery concept," *Rev. ION*, vol. 24, no. 2, pp. 13–21, 2011.
- [74] A. Urribarrí *et al.*, "Evaluación del potencial de la borra de café como materia prima para la producción de biodiesel," *Multiciencias*, vol. 14, no. 2, pp. 129–139, 2014.
- [75] S. Mishra, K. R. Bukkarapu, and A. Krishnasamy, "A composition based approach to predict density, viscosity and surface tension of biodiesel fuels," *Fuel*, vol. 285, no. September 2020, p. 119056, 2021.
- [76] ASTM International, "Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels D6751-20a," *ASTM Int.*, vol. i, pp. 1–11, 2020.
- [77] ASTM International, "Standard Test Methods for Flash Point by Pensky-Martens Closed Cup Tester D93-20," *ASTM Int.*, vol. i, pp. 1–16, 2020.
- [78] ASTM International, "Standard Specification for Diesel Fuel Oils D975-20c," *ASTM Int.*, vol. i, pp. 1–19, 2020.

- [79] ASTM International, “Standard Test Method for Sulfated Ash from Lubricating Oils and Additives D874-13a,” *ASTM Int.*, pp. 1–5, 2018.
- [80] ASTM International, “Standard Test Method for Determination of Total Sulfur in Light Hydrocarbons, Motor Fuels and Oils by Ultraviolet Fluorescence D5453-19a,” *ASTM Int.*, pp. 1–9, 2019.
- [81] ASTM International, “Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test D130-19,” *ASTM Int.*, pp. 1–9, 2019.
- [82] ASTM International, “Standard Test Methods for Calculated Cetane Index of Distillate Fuels D976-06,” *ASTM Int.*, vol. 91, pp. 1–3, 2016.
- [83] ASTM International, “Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equation D4737-10,” *ASTM Int.*, pp. 1–4, 2016.
- [84] ASTM International, “Standard Test Method for Cetane Number of Diesel Fuel Oil D613-18a,” *ASTM Int.*, pp. 1–16, 2012.
- [85] ASTM International, “Standard Test Method for Cloud Point of Petroleum Products and Liquid Fuels D2500-17a,” *ASTM Int.*, pp. 1–4, 2017.
- [86] ASTM International, “Standard Test Method for Determination of Carbon Residue (Micro Method) D4530-15,” *ASTM Int.*, pp. 1–7, 2020.
- [87] ASTM International, “Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration D664-18e2,” *ASTM Int.*, vol. i, pp. 1–7, 2018.
- [88] ASTM International, “Test Method for Determination of Free and Total Glycerin in B-100 Biodiesel Methyl Esters By Gas Chromatography D6584-17,” *ASTM Int.*, pp. 1–5, 2017.
- [89] ASTM International, “Standard Test Method for Determination of Additive Elements in Lubricating Oils by Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry D4951-14,” *ASTM Int.*, pp. 1–7, 2019.
- [90] ASTM International, “Standard Test Method for Distillation of Petroleum Products at Reduced Pressure D1160-18,” *ASTM Int.*, pp. 1–18, 2018.

- [91] ASTM International, “Standard Test Method for Water and Sediment in Middle Distillate Fuels by Centrifuge D2709-16,” *ASTM Int.*, pp. 1–3, 2016.
- [92] ASTM International, “Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (the Calculation of Dynamic Viscosity) D445-19a,” *ASTM Int.*, pp. 1–10, 2019.
- [93] A. Guerrero-Peña *et al.*, “Optimización de la síntesis de biodiésel a partir del aceite crudo de palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq),” *Agrociencia*, vol. 47, no. 7, pp. 649–659, 2013.