

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



“Extracción y purificación de aceite de higuera y jatropha para la producción de biodiesel por método alcalino”

Presenta

Luz Bibiana Sánchez Pérez

Director de tesis

Dr. Marcos Alberto Coronado Ortega

Codirector de tesis

Dr. Conrado García González

Mexicali, Baja California

26 de junio de 2019

Contenido

1.	Introducción	11
1.1	Justificación	11
1.2	Objetivo	13
	Objetivo general	13
	Alcances del objetivo	13
2.	Marco teórico	14
2.1	Biocombustibles –Biodiesel.....	14
2.2	Antecedentes del biodiesel	16
2.3	Calidad del biodiesel	17
2.4	Estado de los bioenergéticos en México.....	20
2.5	Higuerilla (<i>Ricinus Communis L.</i>)	23
2.6	Antecedentes de la higuerilla en México	25
2.7	Producción de higuerilla en México y el mundo	26
2.8	<i>Jatropha Curcas (Jatropha Curcas L.)</i>	27
2.9	Antecedentes de la jatropha en México	29
2.10	Producción de jatropha en México y el mundo	30
2.11	Tipos de extracción de aceite.....	31
2.12	Purificación del aceite	32
2.13	Neutralizado y Esterificación.....	33
2.14	Reacción de transesterificación	34
2.15	Lavado del biodiesel.....	35
2.16	Caracterización de aceites.....	36
3.	Metodología	39
3.1	Caracterización de las semillas de higuerilla y jatropha	39
3.1.1	Dimensiones y peso de las semillas	39
3.1.2	Contenido de albumen en la semilla de jatropha	39
3.1.3	Contenido de humedad de las semillas de higuerilla y jatropha	40
3.1.4	Poder calorífico de la cáscara de las semillas de higuerilla y jatropha	40
3.2	Extracción de los aceites	41
3.2.1	Extracción mecánica de los aceites	41
3.2.2	Extracción por solventes	45

3.3	Remoción de impurezas de los aceites de higuera y jatropha extraídos por prensado	47
3.4	Caracterización de los aceites	48
3.4.1	Índice de acidez	48
3.4.2	Punto de nube	48
3.4.3	Punto de fluidez	48
3.4.4	Viscosidad dinámica	49
3.4.5	Cromatografía de gases	50
3.5	Desgomado de los aceites	50
3.6	Esterificación del aceite de jatropha	52
3.7	Biodiesel de aceite de higuera y jatropha	54
3.7.1	Transesterificación del aceite de higuera y jatropha	54
3.7.2	Lavado de biodiesel	56
3.8	Caracterización del biodiesel de higuera y jatropha	56
3.8.1	Índice de acidez	56
3.8.2	Punto de nube	56
3.8.3	Punto de fluidez	56
3.8.4	Viscosidad dinámica del biodiesel de higuera y jatropha	57
3.9	Simulación en ASPEN PLUS®	57
3.9.1	Descripción del proceso de simulación	59
3.9.2	Propiedades físicas	61
3.9.3	Reacción química	62
4.	Discusión de resultados	63
4.1	Caracterización física de las semillas de higuera y jatropha	63
4.1.1	Dimensiones y peso de las semillas	63
4.1.2	Contenido de albumen en la semilla de jatropha	65
4.1.3	Contenido de humedad de las semillas de higuera y jatropha	66
4.1.4	Poder calorífico de la cáscara de la semilla de higuera y jatropha	67
4.2	Extracción de aceites de higuera y jatropha	68
4.2.1	Extracción mecánica de los aceites	68
4.2.2	Extracción por solventes de los aceites de higuera y jatropha	71
4.3	Remoción de impurezas de los aceites de higuera y jatropha	72
4.4	Caracterización de los aceites	73
4.4.1	Índice de acidez	73
4.4.2	Punto de nube	74
4.4.3	Punto de fluidez	75

4.4.4	Viscosidad dinámica	76
4.4.5	Cromatografía de gases.....	79
4.5	Desgomado del aceite de higuera.....	84
4.6	Esterificación del aceite de jatropha.....	85
4.7	Biodiesel de aceite de higuera y jatropha	87
4.7.1	Transesterificación del aceite de higuera y jatropha	87
4.7.2	Lavado del biodiesel de aceite higuera y jatropha.....	88
4.8	Caracterización de biodiesel de aceite higuera y jatropha	89
4.8.1	Índice de acidez.....	89
4.8.2	Punto de nube.....	90
4.8.3	Punto de fluidez	91
4.8.4	Viscosidad dinámica de biodiesel de higuera y jatropha	92
4.9	Simulación en ASPEN PLUS®	95
5.	Conclusiones.....	97
6.	Recomendaciones.....	98
7.	Referencias.....	99
8.	Anexos.....	106

Índice de tablas

Tabla 1.	Estándares de biodiesel.....	18
Tabla 2.	Parámetros de la norma ASTM D6751 para biodiesel [12].	19
Tabla 3.	Producción potencial de biocombustibles en 2016,	21
Tabla 4.	Análisis de producción potencial de biocombustibles de 2016 en millones de litros (MMI).	22
Tabla 5.	Análisis de producción potencial de biocombustibles de 2030.....	22
Tabla 6.	Producción potencial de biocombustibles en 2030.	22
Tabla 7.	Características aceite de Ricino.....	24
Tabla 8.	Producción de higuera en México.....	26
Tabla 9.	Composición de ácidos grasos del aceite de jatropha.	29
Tabla 10.	Producción de jatropha curcas en México.....	30
Tabla 11.	Niveles de los factores del diseño de experimentos.	43
Tabla 12.	Diseño de experimentos para la semilla de jatropha.	44
Tabla 13.	Condiciones de desgomado para aceite de higuera.....	51
Tabla 14.	Condiciones de esterificación para aceite de jatropha.....	52
Tabla 15.	Condiciones de transesterificación para aceite de higuera.....	54
Tabla 16.	Condiciones de transesterificación para aceite de jatropha.....	54
Tabla 17.	Componentes utilizados en la simulación en ASPEN PLUS®.....	58
Tabla 18.	Unidades utilizadas en ASPEN PLUS®.....	60

Tabla 19. Mediciones de la muestra de semillas de higuierilla.	63
Tabla 20. Mediciones de la muestra de semillas de jatropa.	64
Tabla 21. Dimensiones promedio de semilla de higuierilla.	64
Tabla 22. Dimensiones promedio de semilla de jatropa.	64
Tabla 23. Porcentaje de albumen de semillas de jatropa.....	65
Tabla 24. Porcentaje de humedad de semillas de higuierilla.....	66
Tabla 25. Porcentaje de humedad de semillas de jatropa.....	66
Tabla 26. Poder calorífico de la cáscara de higuierilla.....	67
Tabla 27. Poder calorífico de la cáscara de jatropa.....	67
Tabla 28. Comparación del poder calorífico obtenido contra el reportado de la cascara de higuierilla.	68
Tabla 29. Comparación del poder calorífico obtenido contra el reportado de la cascara de jatropa.	68
Tabla 30. Resultados del diseño de experimentos para la extracción de aceite de jatropa.	68
Tabla 31. Tabla ANOVA: modelo factorial con 3 factores.	69
Tabla 32. Rendimientos de extracción de aceite de jatropa.	71
Tabla 33. Porcentaje de extracciones de aceite de higuierilla por soxhlet.	71
Tabla 34. Porcentaje de extracción de aceite de jatropa por soxhlet.....	72
Tabla 35. Porcentaje de impurezas retiradas mediante filtración al vacío (aceite de higuierilla).	72
Tabla 36. Porcentaje de impurezas retiradas mediante filtración al vacío (aceite de jatropa).....	73
Tabla 37. Índice de acidez de aceite crudo de higuierilla.....	73
Tabla 38. Índice de acidez de aceite crudo de jatropa.....	74
Tabla 39. Punto de nube de aceite de higuierilla.....	74
Tabla 40. Punto de nube de aceite de jatropa.....	74
Tabla 41. Punto de fluidez de aceite de higuierilla.	75
Tabla 42. Punto de fluidez de aceite de jatropa.....	75
Tabla 43. Perfil de viscosidad vs temperatura del aceite de higuierilla.	76
Tabla 44. Perfil de viscosidad vs temperatura del aceite de jatropa.....	78
Tabla 45. Composición de ácidos grasos de aceite de higuierilla filtrado.	81
Tabla 46. Composición de ácidos grasos de aceite de jatropa.	82
Tabla 47. Resultados de desgomado para aceite de higuierilla.	84
Tabla 48. Resultados de esterificación de aceite de jatropa.	86
Tabla 49. Porcentaje de conversión de la reacción de transesterificación para aceite de higuierilla.	87
Tabla 50. Porcentaje de conversión de la reacción de transesterificación para aceite de jatropa....	87
Tabla 51. Índice de acidez antes y después de la reacción de transesterificación de higuierilla.	89
Tabla 52. Índice de acidez antes y después de la reacción de transesterificación de jatropa.	90
Tabla 53. Punto de nube de biodiesel a partir de aceite de higuierilla.	90
Tabla 54. Punto de nube de biodiesel a partir de aceite de jatropa.	91
Tabla 55. Punto de fluidez de biodiesel a partir de aceite de higuierilla.....	91
Tabla 56. Punto de fluidez de biodiesel a partir de aceite de higuierilla.....	92
Tabla 57. Perfil de viscosidad de biodiesel de aceite de higuierilla.	92
Tabla 58. Perfil de viscosidad de biodiesel de jatropa.	93
Tabla 59. Corrientes de entrada y salida de simulación en ASPEN PLUS®.....	95
Tabla 60. Corrientes de entrada y salida de simulación en ASPEN PLUS®.....	96
Tabla 61. Resultados finales de la simulación.	96

Índice de figuras

Figura 1. Estructura del éster metílico de ácido graso.	15
Figura 2. Principales hidrocarburos para transporte vendidos en México.	20
Figura 3. Planta de higuera.	23
Figura 4. Estructura del ácido ricinoleico ($C_{18}H_{34}O_3$).	25
Figura 5. Regiones potenciales para el cultivo de higuera y jatropha, recuperada de Bioenergéticos higuera, jatropha curcas, sorgo dulce mexicanos [3].	27
Figura 6. Planta de Jatropha.	28
Figura 7. Estructura del ácido oleico ($C_{18}H_{34}O_2$).	29
Figura 8. Estados de México con presencia de jatropha curcas tóxica y no tóxica.	30
Figura 9. Reacción de un ácido graso libre y una base para la producción de jabón.	33
Figura 10. Reacción de esterificación ácida.	34
Figura 11. Reacción de transesterificación para la obtención de biodiesel.	35
Figura 12. Medición de semilla de jatropha.	39
Figura 13. Medición de semilla de higuera.	39
Figura 14. Contenido de albumen de semilla de jatropha.	40
Figura 15. Calorímetro marca IKA WERKE C2000.	41
Figura 16. Prensa marca KOMET-CA59G.	42
Figura 17. Extracción de aceite de higuera.	42
Figura 18. Extracción de aceite de jatropha.	45
Figura 19. Montaje de Soxhlet para extracción de aceites.	46
Figura 20. Equipo montado para la filtración del aceite.	47
Figura 21. Determinación del punto de fluidez.	49
Figura 22. Viscosímetro marca BROOKFIELD CAP 2000+.	49
Figura 23. Proceso de esterificación.	53
Figura 24. Biodiesel de aceite de higuera.	55
Figura 25. Biodiesel de aceite de jatropha.	55
Figura 26. Diagrama de flujo en Aspen Plus®.	61
Figura 27. Diagrama para seleccionar el método.	62
Figura 28. Gráficas de residuos para la variable de respuesta.	70
Figura 29. Viscosidad de aceite de higuera a diferentes temperaturas.	77
Figura 30. Viscosidad de aceite de jatropha a diferentes temperaturas.	78
Figura 31. Comparación de la viscosidad de aceite de higuera y jatropha.	79
Figura 32. Cromatografía 1 de aceite de higuera filtrado.	80
Figura 33. Cromatografía 2 de aceite de higuera filtrado.	80
Figura 34. Cromatografía 3 de aceite de higuera filtrado.	81
Figura 35. Cromatografía 1 de aceite de jatropha.	83
Figura 36. Cromatografía 2 de aceite de jatropha.	83
Figura 37. Cromatografía 3 de aceite de jatropha.	84
Figura 38. Porcentaje de gomas retiradas de aceite de higuera.	85
Figura 39. Reducción del porcentaje de ácidos grasos libres (%AGL).	86
Figura 40. Lavado de biodiesel de aceite de higuera.	88
Figura 41. Secado de biodiesel de aceite de higuera.	88
Figura 42. Proceso de lavado y secado de biodiesel de aceite de jatropha.	89
Figura 43. Viscosidad de biodiesel de higuera a diferentes temperaturas.	93
Figura 44. Viscosidad de biodiesel de jatropha a diferentes temperaturas.	94
Figura 45. Comparación de viscosidades de biodiesel de higuera y jatropha.	94

Agradecimientos

*

Primero que nada, quiero agradecerle a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto de mi vida.

Agradezco a mis padres Jesús Sanchez y Luz María Perez por todo el amor, esfuerzo y trabajo que hicieron para que yo pudiera llegar hasta donde estoy ahora.

A mis hermanos por el apoyo incondicional y por siempre creer en mí. En especial a mi hermano menor Cayuy por la incontable ayuda que me brindó.

A mi novio José Jorge por sus consejos, apoyo y paciencia para poder concluir mi posgrado.

A mis directores de tesis el Dr. Marcos Coronado y el Dr. Conrado García por haberme recibido en el laboratorio de Biocombustibles del Instituto de Ingeniería y por ser durante estos dos años una guía y apoyo fundamentales para la culminación de esta investigación.

A mis compañeros de posgrado Carlos, Ramón, Laura y Ricardo por hacerme sentir bienvenida desde el primer día y por el apoyo para mi experimentación.

Al Instituto de Ingeniería y a la UABC por ser mi segundo hogar.

Y a todos los docentes que contribuyeron a mi formación y a mantener encendida esa llama por el aprendizaje y conocimientos nuevos.

Resumen

En el presente trabajo se presentan los resultados de los distintos procesos llevados a cabo para la obtención de biodiesel a partir de las semillas de higuierilla y jatropha, así como de las distintas pruebas utilizadas para la caracterización de este, de las semillas y de los aceites obtenidos.

Las pruebas para la caracterización de las semillas de higuierilla y de jatropha fueron: determinación de dimensiones físicas, contenido de humedad y para la semilla de jatropha se determinó su contenido de albumen y el poder calorífico de las cáscaras de ambas semillas.

Entre los procesos realizados, se encuentran las extracciones mecánicas de aceite de las semillas de higuierilla y jatropha, en donde se realizó un diseño de experimentos para determinar las mejores condiciones de extracción de la prensa para la obtención de aceite de jatropha, ya que en el caso de las semillas de higuierillas se contaba con las condiciones óptimas obtenidas a partir de un trabajo de investigación del Laboratorio de Biocombustibles. Una vez extraídos los aceites, las pruebas utilizadas para su caracterización fueron: índice de acidez, punto de nube, punto de fluidez, viscosidad dinámica y cromatografía de gases.

Para obtener un mejor rendimiento en la reacción de transesterificación, se realizó un pretratamiento a los aceites. Para el aceite de higuierilla el pretratamiento utilizado fue el desgomado con el fin de reducir las gomas que afectan su estabilidad oxidativa, y para el aceite de jatropha el pretratamiento que se utilizó fue la esterificación, con el fin de reducir su índice de acidez.

Una vez que fueron pretratado los aceites, se realizó la transesterificación utilizando metanol e hidróxido de sodio como catalizador, midiendo el porcentaje de conversión de los aceites. El biodiesel de aceite de higuierilla y jatropha obtenido fue lavado por el método de chorro de agua y posteriormente se realizaron las mismas pruebas de caracterización que a los aceites, las cuales fueron: índice de acidez, punto de nube, punto de fluidez y viscosidad dinámica, con el fin de compararlos con la norma ASTM D6571.

Finalmente, mediante el software Aspen Plus[®] se simuló la producción de biodiesel a partir del aceite de higuera, la cual puede ser utilizada también para la simulación de la producción de biodiesel a partir del aceite de jatropha realizando ligeras modificaciones al proceso.

Abstract

This work presents the results of the different processes carried out to obtain biodiesel from the seeds of castor and jatropha, as well as the different tests used to characterize it, seeds and oils obtained.

The tests for the characterization of the castor and jatropha seeds were: physical dimensions, moisture content and for the jatropha seed its albumen content was determined, the calorific power was determined for the husks of both seeds.

The mechanical extraction of oil from the seeds of castor and jatropha was performed, following an experimental design to determine the best extraction conditions for the press to obtain jatropha oil. In the case of the castor seeds it was not necessary since the optimal conditions were obtained from a previous research of the Biofuels Laboratory. Once the oils were extracted, the tests used for their characterization were: acid number, cloud point, pour point, dynamic viscosity and gas chromatography.

To obtain a better performance in the transesterification reaction, a pretreatment was made to the oils. For the castor oil, the pretreatment used was the degumming in order to reduce the gums that affect its oxidative stability, and for the jatropha oil the pretreatment used was esterification to reduce its acidity index.

Having both pretreated oils, the transesterification was performed using methanol and sodium hydroxide as catalyst, measuring the conversion percentage of the oils. The biodiesel from castor oil and jatropha was washed by the water jet method and subsequently the same characterization tests were carried out as the oils which were: acid number, cloud point, pour point and dynamic viscosity, in order to compare them with the ASTM D6571 standard.

Finally, with the Aspen Plus[®] software was simulated the production of biodiesel from castor oil, which can also be used to simulate the production of biodiesel from jatropha oil by making slight modifications to the process.

1. Introducción

1.1 Justificación

En la actualidad es evidente la importancia que se ha brindado a la producción de biocombustibles, debido a grandes oportunidades que se presenta en la industria de los combustibles como consecuencia del descenso de la producción de petróleo y el alza en sus precios. Un aspecto importante a tomar en cuenta en la producción de biodiesel, es la implementación de un proceso de producción acorde a la región, que se base en la disponibilidad de materia prima local para obtener un biocombustible a precio competitivo y de una calidad aceptable dentro de los parámetros que especifica la norma ASTM D6751, sin que compita con los cultivos destinados para alimentos.

El biodiesel tiene como ventajas ser el único combustible alternativo que funciona en cualquier motor diésel convencional con leves modificaciones técnicas, tales como el modificar conexiones y tuberías de goma y/o caucho del circuito de combustible, esto debido a que el biodiésel 100% tiene la particularidad de degradar la goma [1].

Puede ser utilizado puro o mezclado en cualquier proporción junto con diésel. El ciclo biológico en la producción y uso del biodiesel reduce aproximadamente en un 80% las emisiones de CO₂ y casi un 100% las de SO₂, contiene un 11% de oxígeno en peso, no contiene azufre, alarga la vida útil de los motores y posee mejores cualidades lubricantes que el combustible de diésel [2].

En México, se cosechan principalmente tres cultivos oleaginosos (plantas que permiten extraer aceite de sus semillas o frutos) que son la soya, la palma y el coco, pero hay otros cuyo aporte es mínimo, como la jatropha y la higuera. En este rubro, el potencial es realmente importante. De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER), la tendencia apunta a que la producción de oleaginosos en México siga por un camino creciente, dado que el área de pastizales que es susceptible de ser usado asciende aproximadamente a 13 millones de hectáreas [3].

El grupo bioenergético en México está constituido por los cultivos de higuera, jatropha y sorgo dulce [4].

La producción de biocombustibles en México depende de las importaciones de cultivos para la transformación en bioenergéticos, especialmente en el caso del biodiesel. Actualmente, se tienen cinco permisos de producción, 41 de comercialización y tres de transporte, para etanol anhidro y biodiesel. La importación de biodiesel proviene casi en su totalidad de Estados Unidos, de donde se importaron aproximadamente 11 millones de litros en 2016 [4].

Por lo cual esta investigación tiene como fin determinar las propiedades del biodiesel a partir de higuierilla y de jatropha, con el fin de compararlos entre sí y evaluarlos con base en los parámetros de aceptación de la norma ASTM D6751.

1.2 Objetivo

Objetivo general

Extraer y purificar aceite de higuera (*Ricinus Communis*) y de jatropha (*Jatropha Curcas L.*) para la producción de biodiesel por método alcalino.

Alcances del objetivo

- i) Obtener aceite de higuera y jatropha por método de extracción mecánica.
- ii) Caracterizar los aceites crudos obtenidos de la higuera y la jatropha.
- iii) Realizar un pretratamiento a los aceites resultantes.
- iv) Evaluar y comparar las propiedades fisicoquímicas de los aceites.
- v) Obtener biodiesel a través de la vía alcalina a partir de los aceites extraídos.
- vi) Purificar el biodiesel elaborado.
- vii) Caracterizar y comparar el biodiesel de higuera y de jatropha de acuerdo con la norma ASTM D6751.

2. Marco teórico

2.1 Biocombustibles –Biodiesel

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano a partir de materias producidas recientemente por seres vivos, a las cuales se les denomina “biomasa”. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad es liberar la energía contenida en sus componentes químicos mediante la combustión [5].

Los combustibles de origen renovable pueden ser utilizados en su totalidad o en mezclado a diferentes proporciones como aditivos de los carburantes convencionales, tales como el diésel y la gasolina.

Actualmente, para satisfacer la necesidad de combustibles para el transporte, se utilizan el bioetanol y el biodiesel, los cuales se catalogan como: primera, segunda o tercera generación, dependiendo del tipo de los insumos provenientes.

Los biocombustibles de primera generación, son producidos a partir de cultivos alimenticios. El bioetanol, puede provenir de alguno de los siguientes cultivos: maíz, caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha. El biodiesel puede producirse a partir de una gran variedad de semillas oleaginosas comestibles tales como el cártamo, la colza, el girasol y la soya.

Los biocombustibles de segunda generación se están desarrollando y derivan de sustancias vegetales no alimenticias como el aceite de palma, jatropha, higuera, grasas animales, aceites reciclados, los restos de cosecha y residuos agrícolas o municipales como los residuos orgánicos. Este tipo de biocombustibles son atractivos, ya que su obtención no compite con la generación agroalimentaria y no pone en riesgo la disponibilidad de alimentos para la población.

Los combustibles alternativos deben ser de fácil acceso, amigables con el medio ambiente y competitivos económicamente [6].

La razón principal por la que el biodiesel es adecuado como combustible alternativo al diésel es el índice de cetano. La calidad de ignición del diésel se indica por el índice de cetano. Este mide el retardo de ignición de un combustible, que es el tiempo entre el inicio de la inyección y el inicio de la combustión (ignición) del combustible. Los combustibles con un mayor índice de cetano tienen menores retardos de ignición, lo que proporciona más tiempo para completar el proceso de combustión del combustible. El hexadecano largo no ramificado es el estándar de alta calidad en la escala de cetano y se le ha asignado un número de cetano de 100. Por otro lado, los alcanos altamente ramificados son compuestos de baja calidad en la escala de cetano y tienen bajos índices de cetano. Los ésteres metílicos de ácidos grasos de cadena larga que conforman al biodiesel, son similares a los alcanos de cadena larga con un número de carbonos que oscila entre 14 y 22, como se muestra en la siguiente Figura 1 [7,8].

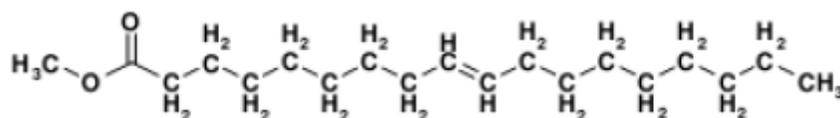


Figura 1. Estructura del éster metílico de ácido graso.

El biodiesel puro contiene oxígeno hasta un 10-12 % en peso, mientras que el diésel contiene no lo contiene. La presencia de oxígeno permite una combustión más completa en el motor, lo que reduce la emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y partículas (PM). Pero un mayor contenido de oxígeno aumenta las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x). El contenido de energía del diésel puede variar hasta un 15% y el contenido energético del biodiesel es mucho menos variable. La eficiencia térmica de un motor que funciona con biodiesel es generalmente mejor que la de un motor que funciona con diésel. [9].

2.2 Antecedentes del biodiesel

En la exposición de París en 1900, Rudolf Diesel presentó un motor diésel operado con aceite de cacahuete. El motor fue construido para operar con diésel y fue utilizado para funcionar con aceite vegetal sin ninguna modificación. A principios de 1900, los combustibles derivados del petróleo eran abundantes y baratos. Se diseñaron sistemas de inyección de combustible cada vez más sofisticados para hacer funcionar estos aceites derivados de combustibles fósiles.

Con el paso de los años, esto ha significado que los vehículos evolucionaran para utilizar diésel más ligero en lugar de aceites vegetales más pesados. Hasta la crisis del petróleo de los años 70's no era económicamente viable hacer funcionar un motor con nada más que diésel fósil. Sin embargo, una vez que el precio del petróleo crudo aumentó, hubo un incentivo para la investigación de combustibles alternativos [10].

Ya se aceptaba que el aceite vegetal no modificado no era adecuado para los sistemas de inyección modernos. Por lo que el proceso de transesterificación se usaba para reducir la viscosidad del aceite, produciendo biodiesel (éster metílico de ácido graso). En 1983, en Austria, el Dr. Mittelbach desarrolló un proceso comercial para convertir el viejo aceite de cocina en biodiesel. Un punto importante, es que un motor diésel funciona adecuadamente con biodiesel, sin embargo, algunas partes de los sistemas de inyección de combustible pueden tener problemas de compatibilidad.

En los años 2000, cuando los precios del crudo comenzaron a subir de nuevo y con una nueva conciencia mundial sobre la contaminación y el calentamiento global, los biocombustibles volvieron a ser populares. El subsidio del gobierno a las industrias de biocombustibles se hizo común, especialmente en el primer mundo. Esto ha dado a la industria la seguridad económica necesaria para invertir en el desarrollo de los biocombustibles [7, 10].

2.3 Calidad del biodiesel

El principal criterio de calidad del biodiesel es la inclusión de sus propiedades físicas y químicas en los requisitos de la norma adecuada. Las normas de calidad para el biodiesel se actualizan continuamente, debido a la evolución de los motores de encendido por compresión, por los estándares de emisión cada vez más estrictos y por la reevaluación de la selección de las materias primas utilizadas para la producción de electricidad, producción de biodiesel, entre otros.

Las normas actuales para la regulación de la calidad del biodiesel en el mercado se basan en una variedad de factores que varían de una región a otra, incluyendo las características de las normas vigentes para el diésel, los tipos de diésel predominantes, los motores más comunes de la región, la normativa sobre emisiones que rige dichos motores, la fase de desarrollo y las propiedades climáticas de la región/país donde se produce y/o es utilizado, además del propósito y la motivación para el uso del biodiesel [11].

La Tabla 1 presenta una lista de los estándares de calidad de biodiesel más importantes en el mundo.

Tabla 1. Estándares de biodiesel.

País/Área	Especificaciones	Título
Europa	EN 14213	Heating fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) - Requirements and test methods
Europa	EN 14214	EN 14214 Automotive fuels - Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines - Requirements and test methods
Estados Unidos	ASTM D6751	ASTM D6751 - 11a Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels
Australia		Fuel Standard (Biodiesel) Determination 2003
Brasil	ANP 42	Brazilian Biodiesel Standard (Agência Nacional do Petróleo)
India	IS 15607	Bio-diesel (B 100) blend stock for diesel fuel – Specification
Japón	JASO M360	Automotive fuel - Fatty acid methyl ester (FAME) as blend stock
Sudáfrica	SANS 1935	Automotive biodiesel fuel

Algunos parámetros que debe cumplir el biodiesel con respecto a la norma ASTM D6751 se muestran en la Tabla 2 a continuación.

Tabla 2. Parámetros de la norma ASTM D6751 para biodiesel [12].

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 D93
Agua y sedimento		0.050	% volumen	D2709
Numero ácido		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	mm ² /s	D445
Numero de cetano	47			D613
Punto de turbidez	Reporte		° C	D2500
Filtrabilidad de 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 (µg/g)	en 14538
Calcio y magnesio, combinados		5	ppm (µg/g)	en 14538
Azufre (S15) Azufre (S500)		0.0015 0.05	% masa (ppm)	D5453
Contenido de fósforo		0.001	% masa	D4951
Temperatura destilación, Temperatura atmosférica equivalente, 90% recuperado		360	° C	D1160

2.4 Estado de los bioenergéticos en México

Dada la alta emisión de gases de efecto invernadero, se requiere cambiar a una nueva generación de combustibles limpios, para lo cual se consideraron cuatro cultivos con alto potencial: jatropha, higuera, sorgo dulce y aceite de palma. Actualmente, los hidrocarburos son la principal fuente de energía en México, donde el sector transporte consume 46% de la energía total. El sector transporte en México está identificado como el más contaminante pues emite 174 MtCO₂e (megatoneladas de dióxido de carbono), muy por arriba de lo que genera el sector industrial (115 MtCO₂e) o el sector agropecuario (80 MtCO₂e).

Los principales hidrocarburos vendidos para transporte en México se representan en la Figura 2 con una proyección al año 2030 [4].

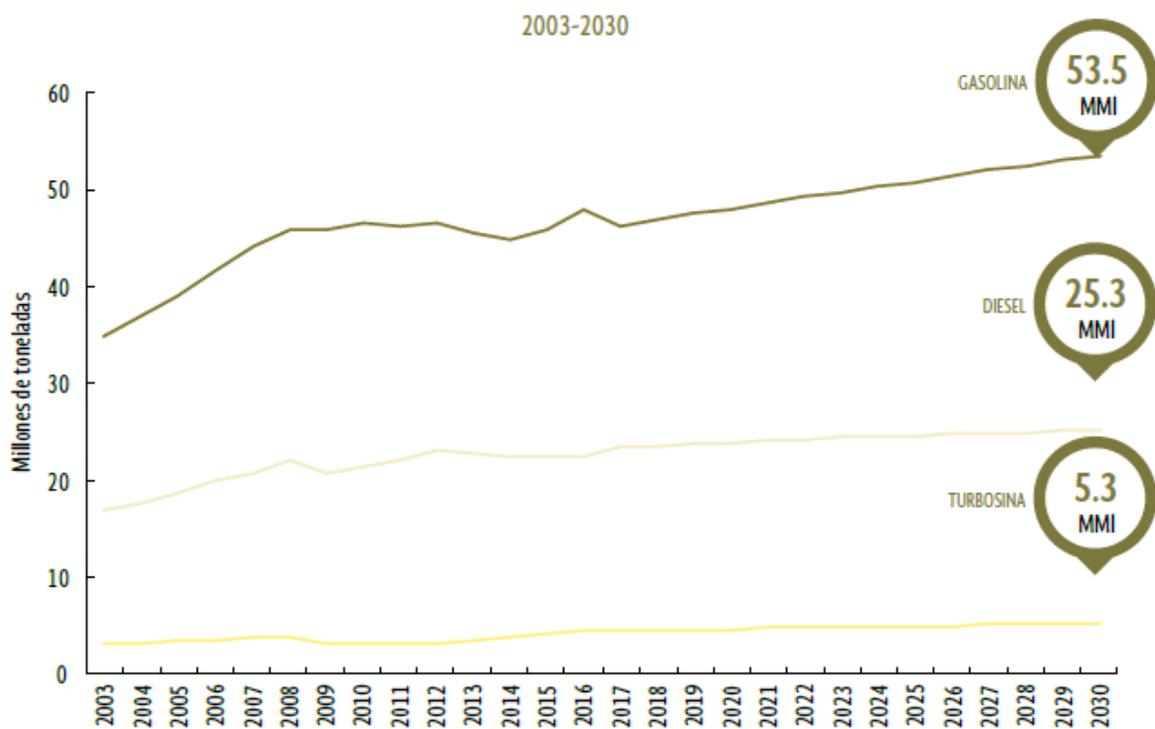


Figura 2. Principales hidrocarburos para transporte vendidos en México.

Con base en el Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero se estima que el sector transporte emitirá 28% del total de GEI (gases de efecto invernadero) para el

2030. En el 2016, México firmó junto con 192 países más, el Acuerdo de París con el propósito de reducir el impacto climático de los GEI en los próximos años, a través de la mitigación, la adaptación y la resiliencia. Cada país entregó una serie de compromisos voluntarios, conforme a sus capacidades, para reducir la generación de GEI. México se comprometió a reducir 22% de GEI para el 2030, y 51% de carbón negro (CN).

Con base en la Reforma Energética se han iniciado proyectos para desarrollar la producción de combustibles no fósiles a partir de sorgo dulce, higuera, jatropha, aceite de palma, entre otros, aunque con menor participación. En el estado de Oaxaca se inició la construcción de la primera planta para producir biodiesel de higuera; en Veracruz funcionan 6 empresas que podrán comercializar el etanol en las terminales de almacenamiento y reparto de PEMEX, en esa entidad, así como en San Luis Potosí y Tamaulipas.

De acuerdo con información reportada por SIAP, SENER, REMBIO y SAGARPA, se estima que en México existe gran potencial para producir biocombustibles a partir de la producción de sorgo dulce, higuera y jatropha, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Producción potencial de biocombustibles en 2016,

Cultivo	Tipo de biocombustible	Producción de biocombustibles en 2016 (millones de litros)	Producción de biocombustibles en barriles equivalentes de petróleo en 2016	Producción en 2016 expresada como toneladas equivalentes de petróleo
Sorgo dulce	Bioetanol	121.49	34,781.65	233,639.04
Jatropha	Biodiesel	0.03	6.36	43.58
Higuera	Biodiesel	4.26	797.65	5,463.26

México cuenta con el potencial para satisfacer el 16.93% de los requerimientos de hidrocarburos para el sector transporte, con base en sus cultivos bioenergéticos, de acuerdo con datos de 2016, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de producción potencial de biocombustibles de 2016 en millones de litros (MMI).

Consumo de hidrocarburos 2016 (gasolina, diésel, turbosina)	Producción potencial de biocombustibles (petróleo equivalente 2016) (bioetanol, biodiesel)
74.82 MMI	12.75 MMI

En el 2030, se estima que los requerimientos de hidrocarburos en México ascenderán a 84 millones de litros, lo cual equivale a un crecimiento acumulado de 12.31% de lo que generaría una emisión de 203 Mt CO₂ (ver Tabla 5). La Tabla 6 muestra la producción esperada para el 2030 de biocombustibles a partir de sorgo dulce, jatropha e higuera.

Tabla 5. Análisis de producción potencial de biocombustibles de 2030.

Consumo de hidrocarburos 2030 (gasolina, diésel, turbosina)	Producción potencial de biocombustibles (petróleo equivalente 2030) (bioetanol, biodiesel)
84.04 MMI	22.04 MMI

Tabla 6. Producción potencial de biocombustibles en 2030.

Cultivo	Tipo de biocombustible	Producción de biocombustibles en 2030 (millones de litros)	Producción de biocombustibles en barriles equivalentes de petróleo en 2030	Producción en 2030 expresada como toneladas equivalentes de petróleo
Sorgo dulce	Bioetanol	243.46	69,700.24	468,197.96
Jatropha	Biodiesel	0.1	19.15	131.15
Higuera	Biodiesel	9.08	1,699.91	11,643.08

Esto significa que en 2030 se tendrá la capacidad de mitigar 53.27 MtCO₂ mediante el uso de biocombustibles, los cuales podrán sustituir 26% de hidrocarburos tradicionales y representan una emisión de 149.73 MtCO₂ que equivalen a una reducción de 26.23% de GEI [4].

2.5 Higuera (*Ricinus Communis* L.)

La higuera (*Ricinus Communis* L.) pertenece a la familia Euphorbiaceae y es conocida como ricino, tártago, mamoneira, mamona, palma christi, higuera, castor, castor bean y castor oil plant. El género *Ricinus* es considerado monotípico, y la especie *R. Communis* es la única que incluye diversos tipos polimórficos [13].

Esta planta oleaginosa presenta capacidad de adaptación y actualmente es cultivada prácticamente en todas las regiones tropicales y subtropicales del mundo, aunque es típica de regiones semiáridas.

El cultivo de la higuera se ha extendido en el mundo y su aceite es el único en la naturaleza que es soluble en alcohol, es el más denso y viscoso de todos [14].

La planta higuera (*Ricinus Communis*) es una planta herbácea perenne y semi-leñosos de gran tamaño en forma de arbusto o pequeño árbol que alcanza los 5 m de altura y 4.5 m de ancho. Las flores femeninas se encuentran en la mitad superior de la espiga y tienen cápsulas en forma de huevo, de aproximadamente 2.5 cm de largo densamente cubierta de espinas flexibles suaves, cada cápsula contiene tres semillas las cuales son tóxicas, por lo que no son comestibles (ver Figura 3) [15].



Figura 3. Planta de higuera.

El aceite de higuera, que se extrae de las semillas de la planta Higuera (*Ricinus Communis*), en porcentajes cercanos al 50% ha sido también utilizado en farmacología y cosmetología. Esta planta es una candidata idónea para la obtención de biodiesel en la región debido a su fácil cultivo, su bajo costo y que además presenta gran cantidad de aceite en su semilla, en la Tabla 7 se presentan las características de su aceite como sus componentes principales en los cuales destaca el ácido ricinoleico (ver Figura 4) [16 y 17].

Los motivos antes mencionados fueron considerados para la creación de cultivos dedicados exclusivamente a higuera de manera comercial en el Valle de Mexicali, para la obtención de biodiesel; así lo dio a conocer el delegado de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) en Baja California, Ing. Guillermo Aldrete Haas [18].

Tabla 7. Características aceite de Ricino.

Sinónimos	Aceite de castor, Castor Oil, Aceite de Palma Christi.	
Descripción	Líquido viscoso transparente, incoloro o amarillo pálido, de ligero olor característico.	
Categoría Terapéutica	Excipientes	
Composición	Triglicéridos de ácidos grasos, principalmente:	
	Ricinoleico	87%
	Oleico	7%
	Linoleico	3%
	Palmítico	2%
	Esteárico	1%
Parámetros Físico-Químicos	Dihidroxiesteárico	Trazas
	Índice de refracción	1.477-1.481
	Solubilidad:	
	Etanol absoluto	Soluble
	Cloroformo	Soluble
	Eter	Soluble
	Ácido acético	Soluble
	Índice de yodo	82-90
	Índice de peróxido:	Mayor a 5
	Índice de hidróxido	Menor a 150
	Índice de acidez	Mayor a 2
Materia	Mayor a 0.8% p/p	

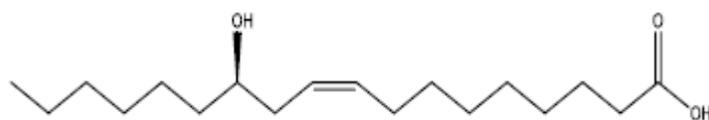


Figura 4. Estructura del ácido ricinoleico ($C_{18}H_{34}O_3$).

2.6 Antecedentes de la higuera en México

La higuera en México no se ha establecido como cultivo de importancia. La primera investigación con higuera en México se realizó en 1962 por el Dr. Raúl Robles en el Campo Experimental de Río Bravo, Tamaulipas del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), evaluando cuatro variedades enanas, donde encontraron que los mejores rendimientos se lograron con Lynn (1908 kg/ha) y Hale (1888 kg/ha). En el sur de Jalisco (González, 2009) se evaluaron variedades e híbridos comerciales disponibles en el mercado; y el mejor rendimiento fue de 2,994 kg/ha y 52.34% de aceite con el híbrido CSR-6.2. En Chiapas, México Grajales et al., 2009, evaluaron 20 colectas de *Ricinus Communis*, donde reportan genotipos que produjeron de 1,440 a 2,500 kg/ha de grano seco. El INIFAP cuenta con colectas de higuera de los Estados de Jalisco, Chiapas, Guanajuato, Veracruz, Oaxaca y Michoacán, las que constituyen la base para la obtención de materiales élite y su evaluación en diferentes regiones del país [19].

En Baja California, se encuentra la planta higuera (*Ricinus Communis*), la cual es una planta considerada como invasiva en México [3].

2.7 Producción de higuera en México y el mundo

En la Tabla 8, se reportan los datos sobre la producción de higuera en México, por la FAOSTAT (The FAO Statistical Database).

Tabla 8. Producción de higuera en México.

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Superficie de cultivo (ha)	7	5	48	0	0	1,018	6,622
Producción (ton)	4	4	33	0	0	1,819	9,322

Los países productores más importantes son: India con 840,000 ha, China 210,000 ha, Brasil 159,205 ha, Paraguay 11,000 ha y una producción de semilla de 1,098,000 t, 190,000 t, 90,384 t, 13,000 t, respectivamente (FAOSTAT, 2010). Generalmente la producción de higuera está enfocada en la producción de aceite para la industria química y de cosméticos, además de mostrar un enorme potencial para la producción de bioenergéticos (tanto biodiesel como etanol) [14,20].

México cuenta con áreas históricamente productoras y con áreas con nivel alto y medio de potencial productivo para el cultivo de higuera y *jatropha*, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Regiones potenciales para el cultivo de higuera y jatropha, recuperada de Bioenergéticos higuera, jatropha curcas, sorgo dulce mexicanos [3].

2.8 *Jatropha Curcas (Jatropha Curcas L.)*

La *Jatropha Curcas L.* es un arbusto de 5 a 7 m de alto, perteneciente a la familia *Euphorbiaceae* con más de 3.500 especies agrupadas en 210 géneros. Esta familia se conoce por la producción de fitotoxinas y sabia blanca lechosa, además de sus propiedades purgativas. Históricamente, es originaria de América Central y México, pero actualmente crece en áreas tropicales alrededor del mundo. Es una planta resistente a la sequía, altas y bajas temperaturas, se adapta a condiciones de suelo árido y semiáridos y puede crecer con condiciones moderadas de sodio, sal, suelos degradados y erosionados [21].

La *jatropha* desarrolla curcina, una proteína tóxica similar a la ricina. Algunas variedades menos tóxicas se encuentran en México y Guatemala [22].

La *jatropha* (ver Figura 6) se encuentra ampliamente difundida por Centroamérica, el Caribe, Sudamérica, Asia y África. Según Heller, fue llevada a las islas Cabo Verde antes de 1800

por marineros portugueses. En este lugar se producían cantidades significativas de semilla de *Jatropha*, que fue exportada durante la primera mitad del siglo XX.



Figura 6. Planta de Jatropha.

Sin embargo, hoy en día la producción en dicho lugar es prácticamente nula. Se especula que también fueron portugueses quienes difundieron la *Jatropha* por toda la zona tropical del viejo mundo, presumible durante el siglo XVIII. Históricamente, se confunde la *Jatropha* con la higuera. Se hace referencia a la *Jatropha* en la literatura del siglo XIX con el nombre “Castor oil plant”, aunque “Castor oil” es en estricto rigor el aceite de la higuera (*Ricinus Communis*) [22].

El contenido de aceite de las semillas oscila entre el 28% y el 42%. La estructura del aceite de *Jatropha* contiene principalmente los ácidos oleico, linoleico y ácido palmítico. El ácido oleico (ver Figura 7) se encuentra en mayor porcentaje de composición con 42.1% seguido por el ácido linoleico con 34.4% (ver Tabla 9). Por lo tanto, el aceite de semilla de *Jatropha* puede ser clasificado como aceite oleico-linoleico. Este aceite tiene características de flujo deficientes y puede solidificarse a bajas temperaturas, aunque puede funcionar satisfactoriamente en climas cálidos. El aceite de *Jatropha* es una materia prima potencial para la producción de biodiesel, pero la calidad del combustible se verá afectada por la composición del aceite, como el ácido linolénico y el ácido linoleico. El aceite de *Jatropha* también tiene un alto contenido de ácidos grasos libres [7].

Tabla 9. Composición de ácidos grasos del aceite de *jatropha*.

Ácido graso	Composición (%)
Oleico	42.1
Linoleico	34.4
Palmítico	15
Esteárico	7.2
Palmitoleico	0.9
Linolénico	0.2
Ácido araquidónico	0.2

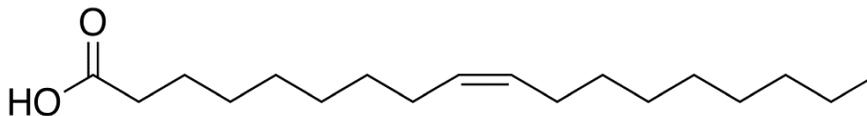


Figura 7. Estructura del ácido oleico ($C_{18}H_{34}O_2$).

2.9 Antecedentes de la *jatropha* en México

Se llevó a cabo un estudio de potencial productivo, realizado por investigadores del INIFAP, y los resultados muestran que en el país existen más de seis millones de hectáreas con potencial alto y medio, aptas para el establecimiento de plantaciones del Piñón tropical; de las cuales alrededor de 2.6 millones son óptimas, en terrenos con altitud inferior a 900 msnm o más, temperatura de 18 a 28°C y precipitación de 600 a 1,200 mm. Los Estados de la República Mexicana que registraron mayor superficie, apropiada para cultivar el piñón, son: Sinaloa, Tamaulipas, Guerrero, Chiapas y Michoacán [23].

2.10 Producción de jatropha en México y el mundo

La Figura 8 muestra los estados de la República Mexicana con presencia de la variación de *Jatropha Curcas L.* tóxica y no tóxica.



Figura 8. Estados de México con presencia de *jatropha curcas* tóxica y no tóxica.

El Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) reporta la siguiente información sobre la producción de *jatropha* durante los últimos 5 años (ver Tabla 10) [24].

Tabla 10. Producción de *jatropha curcas* en México.

Año	2013	2014	2015	2016	2017
Superficie de cultivo (ha)	1,431.30	1,434.30	1,474.44	1,428.14	1,615
Producción (ton)	1,718.78	1,625.76	1,518.70	1,587.18	1,809.60

2.11 Tipos de extracción de aceite

Los tipos de extracción de aceites vegetales para la obtención de biodiesel, se pueden dividir en mecánicos y químicos donde destacan los siguientes:

-Extracción por expresión o prensado

La extracción por prensado consiste en la separación de los líquidos contenidos en productos sólidos mediante la aplicación de fuerzas de compresión, de modo que las gotas de aceite desgarran y rompen las paredes de las células y salen al exterior [25].

-Extracción por disolventes

En la extracción por disolventes conocida como sólido-líquido, el soluto contenido en fase sólida se separa por contacto con el disolvente líquido. La extracción por disolvente se puede realizar de tres maneras: por percolación, por inmersión y mixto, es decir percolación-inmersión.

La percolación se lleva a cabo mediante una lluvia del disolvente de manera tal que llegue a toda la masa, pero sin llenar todos los espacios vacíos existentes entre las semillas. En este sistema el disolvente envuelve a todas las partículas de la materia prima con una película del líquido en continuo cambio.

Mediante inmersión, la semilla va inmersa completamente en el disolvente. Durante la inmersión, la velocidad de cambio del disolvente sobre la superficie de las partículas es necesariamente lenta, incluso si circula rápidamente.

La percolación-inmersión, llamado también “extracción por medio de gases condensables” ha sido preconizado como la de máxima eficacia, porque aprovecha más el poder disolvente del líquido. Los disolventes más comunes son el éter de petróleo, hexano, sulfuro de carbono (este último presenta el peligro de inflamabilidad), hidrocarburos clorados: por ejemplo, tetracloruro de carbono [25].

2.12 Purificación del aceite

Las impurezas en los aceites vegetales típicamente se extraen en cuatro etapas diferenciadas: desgomado, refinado, blanqueo y desodorizado.

El desgomado, se refiere a la separación de los fosfátidos hidratables y de otras impurezas, tales como metales de los aceites vegetales. Los aceites vegetales crudos contienen fosfátidos tanto hidratables (HPs) como no hidratables (NHPs). El desgomado simple, comprende mezclar agua blanda con el aceite vegetal y separar la mezcla resultante en un componente aceite y un componente de fosfátidos hidratados insolubles en aceite (con frecuencia denominado “goma húmeda” o “lecitina húmeda”) [26].

El refinado también conocido como neutralización o desacidificación, extrae principalmente los fosfátidos no hidratables, los jabones creados a partir de la neutralización de los ácidos grasos libres y otras impurezas tales como los metales, elimina los ácidos grasos libres con un ligero exceso de solución de hidróxido de sodio [26, 27].

Esencialmente implica eliminar los ácidos grasos libres (AGL) y los fosfátidos del aceite vegetal. La mayoría de las operaciones de refinado lo utilizan con álcali (también denominado refinado cáustico) o el refinado físico (también denominado refinado con vapor). De estos dos tipos de refinado, predomina el refinado con álcali [26, 27].

El blanqueo sirve para descomponer los peróxidos y eliminar los productos de oxidación, fosfátidos residuales y jabones residuales utilizando materiales de blanqueo como tierras neutras (denominadas comúnmente arcilla natural o tierra de Fuller), tierra activada con ácido, carbono activado y silicatos, donde el material suspendido en el aceite se adsorbe sobre las partículas de las tierras de blanqueo a diferentes velocidades.

El desodorizado, generalmente comprende pasar vapor a través del aceite refinado a temperatura elevada y bajo condiciones de casi vacío, con el fin de vaporizar y eliminar los componentes volátiles desagradables [26].

2.13 Neutralizado y Esterificación

Aceites con un contenido de hasta 5% de ácidos grasos libres pueden ser procesados con catálisis alcalina añadiendo mayor cantidad de catalizador para compensar las pérdidas en el jabón. El jabón que se produce es eliminado en el glicerol y/o durante el proceso de lavado con agua, y la única desventaja de este proceso es la pérdida de materia prima en jabones en lugar de biodiesel. Aceites con más del 5% de AGL no pueden ser transesterificados por catálisis alcalina, porque los jabones inhibirían la separación del biodiesel de la glicerina y además llevarían a la formación de emulsiones durante el lavado. Para superar este problema existen dos alternativas, la neutralización del aceite o la esterificación ácida de los ácidos grasos libres.

La neutralización consiste en hacer reaccionar el aceite con una sustancia alcalina como el hidróxido de sodio para eliminar los ácidos grasos libres, responsables de su acidez. El aceite se calienta a 85°C (en caso de aceites muy ácidos a 65°C) y se aplica hidróxido de sodio diluido en una cantidad tal que neutralice los ácidos en el aceite y con un exceso que favorezca la separación de los jabones y evite la formación de emulsiones. Este exceso puede variar entre 10% y 30% para aceites de baja acidez (hasta 1%) y entre 30% y 50% para aceites de alta acidez [28].

Cuando una base como el hidróxido de sodio reacciona con los AGL, el resultado es un jabón (ver Figura 9):



Figura 9. Reacción de un ácido graso libre y una base para la producción de jabón.

Este jabón se separa luego centrifugando la mezcla de grasa y jabón. Después, el aceite o grasa se lava con agua una o dos veces para eliminar las últimas trazas de jabón y se centrifuga nuevamente. Finalmente, el material refinado se seca en un secador de vacío para eliminar el agua residual. Aunque la finalidad del tratamiento con álcalis es la eliminación de los ácidos grasos libres, este proceso puede dar lugar también a una reducción significativa del contenido de fosfolípidos.

Existen asimismo procesos de neutralización en frío, con los que los aceites que contienen ceras (como el de girasol) pueden ser al mismo tiempo neutralizados y winterizados. Este proceso previene la formación de sólidos en el biodiesel a bajas temperaturas [28].

La esterificación ácida es otra manera de deshacerse de los ácidos grasos libres en el aceite, pero permite, al contrario de la neutralización, reaprovecharlos para producir biodiesel también a partir de ellos. Esta reacción funciona de la manera siguiente (ver Figura 10):

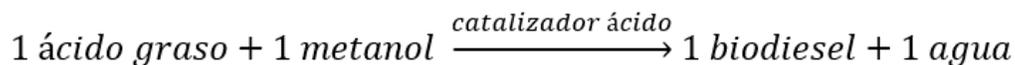


Figura 10. Reacción de esterificación ácida.

Al aceite caliente se agrega metanol en cantidad adecuada para reaccionar con los AGL, utilizando ácido sulfúrico como catalizador. Luego de la reacción, se separa el agua mediante decantación o centrifugación, y lo que queda es una mezcla de aceite (triglicéridos) y biodiesel con menos de 1% de ácidos grasos libres. Con esta mezcla ya se puede realizar una transesterificación alcalina tal como se describirá en la siguiente sección.

Una de las dificultades de este proceso es la presencia de agua. La acumulación de agua que se va produciendo durante la esterificación puede llegar a detener la reacción antes de que sea completa. Para solucionar este problema es necesario trabajar en dos o más etapas para ir separando el agua antes de continuar la esterificación [28].

2.14 Reacción de transesterificación

La manera más común de sintetizar biodiesel es mediante una reacción de transesterificación, en la cual un triglicérido reacciona con un alcohol (metanol, etanol, propanol o butanol) en presencia de un catalizador (hidróxido de sodio o hidróxido de potasio) Debido a la naturaleza reversible de esta reacción, es recomendable emplear exceso de alcohol para favorecer el equilibrio hacia la formación de biodiesel y glicerina como subproducto.

La reacción de transesterificación (ver Figura 11) puede ser promovida utilizando un catalizador tanto homogéneo como heterogéneo. Las vías catalíticas homogéneas más comunes son la alcalina y la ácida, existiendo también la enzimática. Numerosos autores coinciden en que los mejores resultados se obtienen con catálisis alcalina, empleando hidróxido de potasio o hidróxido de sodio como catalizador, ya que la reacción puede ser llevada a cabo a bajas temperaturas y en tiempos cortos. La mayoría de los medianos y grandes productores de biodiesel optan por esta vía, en reactores tipo batch o discontinuos [29].

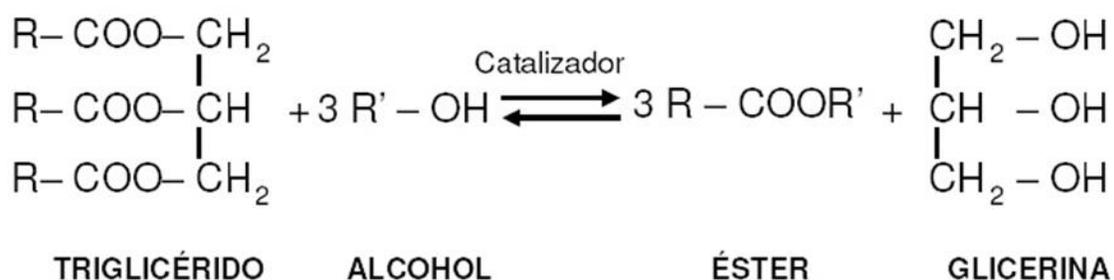


Figura 11. Reacción de transesterificación para la obtención de biodiesel.

Después de la reacción de transesterificación, ocurre una separación espontánea de fases debido a su inmiscibilidad; entre ellas el glicerol (fase inferior), el cual debe ser retirado y se puede hacer por simple decantación o centrifugado.

2.15 Lavado del biodiesel

Después de retirar la glicerina, la fase de biodiesel debe lavarse para remover impurezas. En la industria, el metanol es recuperado por calentamiento de la fase éster. Las trazas de glicerol y catalizador pueden ser eliminadas por lavados con agua acidulada o agua pura hasta neutralizar. Los ácidos grasos libres pueden ser recuperados de la fase éster por destilación, aprovechando el hecho de que los ésteres metílicos de ácidos grasos por lo general destilan a 30-50°C menos que los AGL (ácidos grasos libres), sin embargo, esto eleva demasiado los costos de obtención. Otra alternativa es hacer pasar los metilésteres a

través de materiales adsorbentes como la sílica gel o silicatos de magnesio sintetizados, así como también se acostumbra usar sulfato ácido de sodio [30].

Una vez lavado el biodiesel, éste debe ser secado a 110°C con una agitación suave para eliminar el agua remanente. El agua puede presentarse disuelta en el biodiesel o en forma de gotas en la superficie. La normativa de calidad permite una cantidad de agua máxima de 500 ppm. Sin embargo, el biodiesel debe mantenerse seco [30].

2.16 Caracterización de aceites

Existen varios índices que se utilizan para la caracterización fisicoquímica de los aceites. A continuación, se mencionan los siguientes:

- Índice de Refracción

El índice de refracción es una medida que determina la reducción de la velocidad de la luz al propagarse por un medio homogéneo. De forma más precisa, el índice de refracción es el cambio de la fase por unidad de longitud. Este parámetro está relacionado con la estimación de la pureza de sustancias. Se puede determinar a través de un intervalo [31].

- Índice de Saponificación

El índice de saponificación de un aceite es el número de miligramos de hidróxido de potasio (KOH) necesarios para saponificar completamente 1 g de aceite. Dado que los aceites están formados por triglicéridos principalmente, y que cada triglicérido necesita 3 moléculas de KOH para saponificarse, este índice puede ser usado para estimar aproximadamente el peso molecular promedio del aceite estudiado.

La saponificación es capaz de consumir el catalizador necesario para la transesterificación, y los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiesel [31].

- Índice de acidez

El índice de acidez (IA) es el número de miligramos de KOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1 g de aceite. Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución

estándar de KOH. Un valor elevado para esta índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha experimentado un alto grado de hidrólisis. Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que predomine en la grasa en cuestión.

Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiesel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH o KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a la obtención de un menor rendimiento en la producción de biodiesel.

Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0.2% como ácido oleico para ser aptos para su uso en alimentación [31].

- Índice de Yodo

El índice de yodo es el número de miliequivalentes o partes de yodo absorbido por 100 partes de peso de sustancia. Este valor indica el número de insaturaciones de los ácidos grasos en el aceite. Un aceite totalmente saturado poseerá un índice de yodo igual a cero, mientras que a mayor cantidad de insaturaciones se fijará en ellos una cantidad proporcional de yodo, incrementándose este índice. El grado de insaturación del aceite es importante, en primer lugar, porque está relacionado con el punto de fusión del mismo. A mayor cantidad de insaturaciones, el punto de fusión del aceite será menor.

Sin embargo, como los aceites naturales, están compuestos por diversos ácidos grasos (saturados e insaturados) con distintos puntos de fusión, ellos solidifican en realidad en un intervalo amplio de temperaturas. Dado que las insaturaciones de los ácidos grasos se mantienen luego de la transesterificación, el punto de fusión del biodiesel está relacionado al del aceite de procedencia. En segundo lugar, a mayor grado de insaturación (mayor índice de yodo) del aceite se obtendrá un biodiesel con menor índice de cetano, propiedad importante para la calidad de la combustión en el motor [31].

Los aceites vegetales pueden dividirse de acuerdo con el índice de yodo en cuatro grandes grupos:

- Aceites saturados: índices de yodo de 5 a 50. Ejemplo: Lóricos: copra, palmito, babasú (etc.); Palmíticos: palma; Esteáricos: karité.

- Aceites monoinsaturados: índices de yodo de 50 a 100. Ejemplo: Oleicos: aceituna, cacahuete, colza, sésamo, jatropha.
- Aceites biinsaturados: índices de yodo de 100 a 150. Ejemplo: Linoleico: girasol, algodón, maíz, soja.
- Aceites triinsaturados: índices de yodo mayores que 150.

- Índice de peróxido

La determinación del índice de peróxido es una de las técnicas para determinar el estado de conservación del alimento a través de la determinación de peróxidos como producto resultante primario de la oxidación del aceite, los cuales destruyen vitaminas liposolubles: A, D, E, caroteno y parte de los ácidos grasos esenciales y paraliza la biosíntesis de vitamina K. Para determinar el índice de peróxido, se usan dos métodos, el método tradicional a través de una titulación con base en tiosulfato sódico ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) y el método por fotometría [31].

3. Metodología

3.1 Caracterización de las semillas de higuera y jatropa

3.1.1 Dimensiones y peso de las semillas

Se seleccionó una muestra de 30 semillas de jatropa y otra igual de semilla de higuera. Para determinar las dimensiones de cada semilla, se midieron como se muestran en las siguientes figuras utilizando un vernier de precisión (ver Figuras 12 y 13).



Figura 12. Medición de semilla de jatropa.

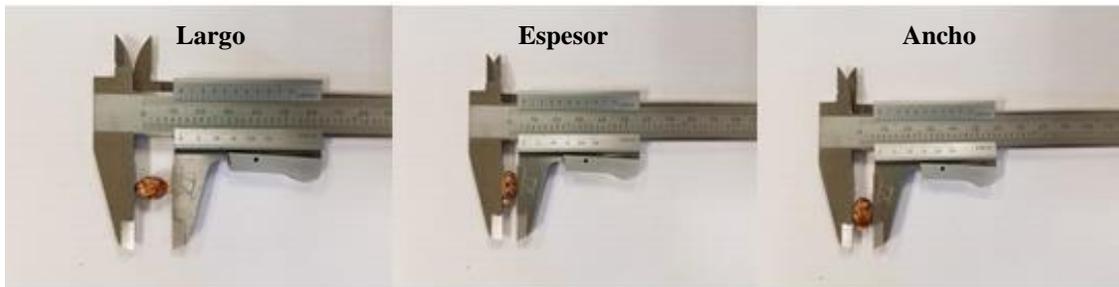


Figura 13. Medición de semilla de higuera.

3.1.2 Contenido de albumen en la semilla de jatropa

Para determinar el contenido de albumen en la semilla de la jatropa, se seleccionaron aleatoriamente 30 semillas, cada una se pesó utilizando una balanza OAHUS con resolución de 0.0001 g, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Contenido de albumen de semilla de jatropha.

En el caso de la semilla de higuera no se pudo realizar la medición de contenido de albumen debido a que las semillas con las que se trabajó ya se encontraban sin la cáscara.

3.1.3 Contenido de humedad de las semillas de higuera y jatropha

Para determinar el contenido de humedad de las semillas de higuera y jatropha, se colocaron crisoles a peso constante a una temperatura de 105 °C en un horno marca Lindberg-Blue M, posteriormente se pesaron muestras de 5 g de semilla de higuera y jatropha en los crisoles y se dejaron secar durante 4 horas [32].

El contenido de humedad de las semillas se obtuvo utilizando la siguiente ecuación.

$$\% \text{ de humedad} = \frac{M_1 - M_2}{m} * 100$$

Donde

M_1 = Peso de crisol más muestra (g)

M_2 = Peso final de crisol más muestra seca (g)

m = Peso de la muestra (g)

3.1.4 Poder calorífico de la cáscara de las semillas de higuera y jatropha

Se determinó el poder calorífico de la cáscara de higuera y jatropha utilizando un calorímetro marca IKA WERKE C2000 (ver Figura 15), realizando las pruebas por triplicado.



Figura 15. Calorímetro marca IKA WERKE C2000.

3.2 Extracción de los aceites

3.2.1 Extracción mecánica de los aceites

La extracción del aceite de las semillas de higuera y jatropha se realizó a través de un prensado mecánico, con el fin de aportar parámetros de funcionamiento que puedan utilizarse en extracciones futuras. Se utilizó la prensa de marca KOMET –CA59G (ver Figura 16), de capacidad de procesamiento de 1.5 kg/h, con rangos de temperatura de operación de 25°C a 140°C, con boquillas de 4,5,6,8 y 10 mm. Se seleccionó la extracción mecánica sobre la extracción química debido a ventajas que presenta, tales como: máquinas fiables de funcionamiento sencillo, la extracción mecánica es preferida para plantas pequeñas debido a la baja inversión requerida, y el minimizar el uso de solventes químicos ya que se busca ser lo más amigable con el medio ambiente.



Figura 16. Prensa marca KOMET-CA59G.

La extracción de aceites se realizó utilizando las semillas enteras, con muestras de 300 g.

Para la extracción de aceite de higuera se utilizaron parámetros que se han reportado anteriormente para esta misma semilla. Los cuales indican que las condiciones de operación óptimas para este tipo y marca de prensa son: velocidad 1, boquilla # 6 y 90°C [33].

Se colocó la boquilla #6, se ajustó la velocidad a 1 y se programó el controlador a 95°C con el fin de que al introducir las semillas en la prensa la temperatura en la boquilla fuera de 90°C, una vez colocadas las semillas se encendió la prensa. Se ingresaron las semillas a la tolva de alimentación, se continuó la adición de semillas para mantener el flujo de salida de la torta constante y así evitar obstrucciones.



Figura 17. Extracción de aceite de higuera

El aceite extraído fue recolectado inmediatamente y se dejó sedimentar 24 horas, para después ser filtrado al vacío.

En el caso de la semilla de jatropha, se realizó un diseño de experimentos para determinar las mejores condiciones de extracción en la prensa, donde se estudió el efecto de las condiciones del proceso que afectan el rendimiento de aceite. Las variables estudiadas fueron: diámetro de la boquilla de salida, velocidad rotación y la temperatura en la zona de compresión.

De acuerdo con los resultados de ensayos a condiciones específicas de temperatura y velocidad, se determinó que para mantener el flujo constante sin generar obstrucción a la salida de la torta empleando la semilla entera, se requieren tamaños de boquilla mayores a la #8 (ver Figura 17).

Se diseñó el experimento factorial 3^2 , el número total de ensayos fue de 8, sin réplicas debido a la poca disposición de materia prima para el estudio. Las condiciones de los factores fueron las mostradas en la Tabla 11:

Tabla 11. Niveles de los factores del diseño de experimentos.

FACTOR	NIVEL	
	1	2
A) VELOCIDAD	1	1.5
B) BOQUILLA	#8	#10
C) TEMPERATURA	95°C	100°C

El diseño de experimentos se muestra en la Tabla 12.

Tabla 12. Diseño de experimentos para la semilla de jatropha.

Prueba	T (°C)	V	B (mm)
1	95	1	8
2	95	1	10
3	95	1.5	8
4	95	1.5	10
5	100	1	8
6	100	1	10
7	100	1.5	8
8	100	1.5	10

Se introdujeron 500 g de semillas en la tolva de alimentación y se continuó adicionando cuantas veces fueran necesarias, para mantener un nivel constante de semilla en la tolva y un flujo constante de torta a la salida.

Se midieron y registraron las siguientes variables: el peso del aceite y el peso de la torta. El aceite extraído fue recolectado y filtrado inmediatamente a la salida de la prensa, como se muestra en la Figura 18.

Al finalizar cada extracción, se dejó sedimentar el aceite crudo obtenido por 24 horas. Después, se filtró al vacío.



Figura 18. Extracción de aceite de jatropha.

El rendimiento del aceite extraído se calculó utilizando la siguiente ecuación.

$$\text{rendimiento del aceite} = \frac{M_a}{M_s} * 100 \text{ [34]}$$

Donde

M_a = Masa de aceite extraído (g)

M_s = Masa de semillas procesadas (g)

3.2.2 Extracción por solventes

Se realizó la extracción por solventes para obtener una comparación de rendimiento de extracción entre la extracción por prensado y la extracción química de los aceites. La cual se llevó a cabo a través del método Soxhlet, la cual consiste en una extracción sólido-líquido, donde se utilizó hexano como solvente para ambos aceites.

Para la extracción de aceite de jatropha se utilizó una relación masa/volumen de 1:8.33, el autor menciona tiempos entre 5 y 10 horas por extracción, en este caso se utilizó un tiempo de 5 horas y las extracciones se realizaron por triplicado [35].

En el caso de la higuera, se utilizó una relación masa/volumen de 1:6.66 con un tiempo de extracción de 6 horas, las extracciones se realizaron por triplicado [36].

El montaje del equipo Soxhlet se muestra en la Figura 19, el cual fue el mismo para las 2 semillas diferentes.



Figura 19. Montaje de Soxhlet para extracción de aceites.

Al finalizar las extracciones para ambos tipos de aceite, la micela de aceite-hexano pasó a un roto evaporador para recuperar el hexano. A continuación, se transfirió el aceite a un vial previamente pesado y se dejó en la campana de extracción para evaporar el hexano sobrante. El aceite se dejó 2 días en la campana de extracción para asegurar la completa evaporación del hexano. El vial con el aceite se pesó en la báscula de precisión marca OHAUS, para determinar el porcentaje de extracción de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$\text{Porcentaje de extracción} = \frac{P-p}{M} * 100 \text{ [37]}$$

Donde

P= Masa del vial con aceite (g)

p= Masa del vial sin aceite (g)

M= Masa de la muestra (g)

3.3 Remoción de impurezas de los aceites de higuera y jatropha extraídos por prensado

Se realizó el filtrado de los aceites montando el equipo como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Equipo montado para la filtración del aceite.

El equipo utilizado fue: matraz Kitasato, embudo buchner, bomba de vacío y papel filtro Whatman #2, la filtración para el aceite de jatropha tomo una duración de 30 minutos, mientras que para el aceite de higuera la filtración no fue satisfactoria con el mismo tipo de papel filtro.

El bajo porcentaje de impurezas retiradas del aceite de higuera se debió a la gran viscosidad del aceite. Por lo que se optó por someterlo a 2 centrifugaciones, la primera a 4,700 rpm durante 30 minutos y la segunda a 1,500 rpm durante 15 minutos.

3.4 Caracterización de los aceites

3.4.1 Índice de acidez

La determinación del índice de acidez se llevó a cabo de acuerdo con la norma ASTM D-974 la cual está expresada con la siguiente ecuación.

$$Av = \frac{56.1 * N * Vgastado}{m}$$

Donde:

Av = índice de acidez

N = Normalidad de KOH

Vgastado = Gasto de KOH (mL)

m = Peso de la muestra (g)

3.4.2 Punto de nube

Es la temperatura a la que la parafina u otras sustancias sólidas comienzan a cristalizarse. [38]. El punto de nube fue determinado de acuerdo con la norma ASTM D 5551. Las pruebas se realizaron por triplicado.

3.4.3 Punto de fluidez

El punto de fluidez se define como la temperatura mínima a la cual el líquido todavía puede fluir. El punto de fluidez se midió de acuerdo con la norma ASTM D 97. Las pruebas se realizaron por triplicado (ver Figura 21).



Figura 21. Determinación del punto de fluidez.

3.4.4 Viscosidad dinámica

La viscosidad dinámica es un indicador de la resistencia de un volumen líquido a fluir, debida al rozamiento entre sus moléculas. Se define como el cociente entre la tensión cortante aplicada y la velocidad relativa conseguida por unidad de espesor de película [39].

En el Sistema Internacional se mide en Pascales segundo, pero la unidad más utilizada es el centipoise (cps).

La viscosidad se determinó utilizando un viscosímetro marca BROOKFIELD CAP 2000+ (ver Figura 22).



Figura 22. Viscosímetro marca BROOKFIELD CAP 2000+.

Se colocó la muestra de aceite en la placa acoplada, utilizando para el aceite de higuera el cono #6, para el aceite de jatropha se utilizó el cono #1. La medición de viscosidad se realizó en un rango de temperatura desde los 50 hasta los 100°C. Las mediciones se realizaron por triplicado.

3.4.5 Cromatografía de gases

Los análisis se realizaron mediante un cromatógrafo Agilent 7890A GC acoplado a un detector de masas 5975C Agilent Technologies, equipado con una columna capilar HP-5MS (30 m x 0,25 mm x 0,25 micrómetros) de Agilent Technologies, Inc. Se utilizó un muestreador automático Agilent Technologies 7693 para inyectar 1 µL de muestra de solución. La energía de ionización fue de 70 eV con un intervalo de masa del 30 al 800 m/z. La temperatura inicial de la columna fue de 125°C, se mantuvo durante 0.5 min, rampa de 25°C / min a 150°C, se mantuvo durante 2 min, luego hasta 200°C con una velocidad de 50°C / min. La temperatura del inyector se fijó en 255°C y el detector a 270°C. La velocidad de flujo del gas portador (helio) fue de 1.0 mL/min inyectado con una dilución de gas de 1:50. La identificación de los componentes individuales se basó en la comparación con la biblioteca de espectros de masas NIST98. Todas las determinaciones se llevaron a cabo por triplicado.

3.5 Desgomado de los aceites

Se llevó a cabo el desgomado con agua el cual es un proceso relativamente simple y económico para eliminar la mayor cantidad posible de gomas. En este proceso, el aceite se calienta a aproximadamente 50°C – 70°C. Luego se agrega agua y la mezcla resultante se agita bien y se deja reposar durante 30 minutos, tiempo durante el cual, los fosfátidos presentes en el aceite crudo se hidratan y, por lo tanto, se vuelven insolubles en aceite. Los fosfátidos hidratados se pueden eliminar por decantación o centrifugación. El desgomado con agua permite eliminar incluso pequeñas cantidades de fosfátidos no hidratables junto con los fosfátidos hidratables [40].

Para el desgomado del aceite de higuera, se realizaron pruebas a diferentes condiciones para obtener los mejores resultados de remoción de gomas.

Se realizaron pruebas con volúmenes pequeños, donde el aceite se calentó una temperatura específica e inmediatamente alcanzada la temperatura, se le agregó un porcentaje de agua destilada basado en el peso del aceite, dejando la mezcla con agitación constante durante 30 minutos, controlando la temperatura.

Las pruebas realizadas se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de desgomado para aceite de higuera.

Prueba	Peso aceite (g)	Cantidad Agua (g)	% de agua	Temp. De reacción
1	11.390	0.342	3%	50°C
2	10.022	0.401	4%	50°C
3	9.998	0.500	5%	50°C
4	6.613	0.198	3%	60°C
5	6.947	20.278	4%	60°C
6	6.388	0.319	5%	60°C

Para el aceite de jatropha no se realizó el proceso de desgomado debido a que este contaba con un alto nivel de acidez por lo cual el tratamiento que se realizó para el aceite fue la esterificación.

3.6 Esterificación del aceite de jatropha

En el caso del aceite de jatropha, se realizó la esterificación debido al elevado índice de acidez que presentó, donde los tiempos de reacción se realizaron a 1 hora. Los reactivos utilizados fueron metanol y ácido sulfúrico como catalizador.

Se pesó el aceite en un vaso de precipitados y se calentó a la temperatura de reacción de la prueba. Al mismo tiempo, se pesó el porcentaje de metanol con base en el peso del aceite, y se precalentó a 50°C, adicionándole el ácido sulfúrico al porcentaje indicado de la prueba.

Posteriormente se agregó la mezcla de metanol y ácido sulfúrico al aceite, con agitación constante.

Las condiciones de las pruebas realizadas se muestran en la Tabla 14.

Tabla 14. Condiciones de esterificación para aceite de jatropha.

Prueba	Peso aceite (g)	% de MeOH	Cantidad H ₂ SO ₄	Temp. de reacción	Cantidad H ₂ SO ₄ (0.5%) ml	Peso MeOH (g)
1	22.30	60%	1.0%	60°C	0.12	13.52
2	10.99	60%	0.5%	50°C	0.03	6.65
3	10.10	60%	0.5%	65°C	0.03	6.06
4	10.76	70%	0.5%	65°C	0.03	7.53
5	90.43	60%	0.5%	60°C	0.25	54.26

Después de la reacción, la mezcla se pasó a un embudo de separación y se dejó reposar 2 horas para dejar que las fases de aceite y metanol-agua se separaran completamente. El aceite resultante se secó con agitación vigorosa a 110°C durante 10 minutos para eliminar el agua que quedó en el aceite. El metanol de la reacción se recuperó mediante un roto evaporador a 55°C y 160 rpm (ver Figura 23).



Figura 23. Proceso de esterificación.

3.7 Biodiesel de aceite de higuera y jatropha

3.7.1 Transesterificación del aceite de higuera y jatropha

Se llevó a cabo la reacción de transesterificación, utilizando metanol e hidróxido de sodio como catalizador, en ambos aceites.

Las condiciones utilizadas para cada tipo de aceite, se muestran en las Tablas 15 y 16.

Tabla 15. Condiciones de transesterificación para aceite de higuera.

Condiciones	Higuera [41]
Alcohol	Metanol
Relación aceite/alcohol	1:6
Catalizador	NaOH
Cantidad de catalizador (% en masa respecto al aceite)	1%
Temperatura de reacción	60°C
Tiempo de reacción	30 minutos

Tabla 16 Condiciones de transesterificación para aceite de jatropha.

Condiciones	Jatropha [42]
Alcohol	Metanol
Relación aceite/alcohol	1:6
Catalizador	NaOH
Cantidad de catalizador (% en masa respecto al aceite)	1%
Temperatura de reacción	60°C
Tiempo de reacción	120 minutos

En el caso del aceite de higuerilla se utilizaron 150 ml de aceite previamente desgomado para la reacción (ver Figura 24).

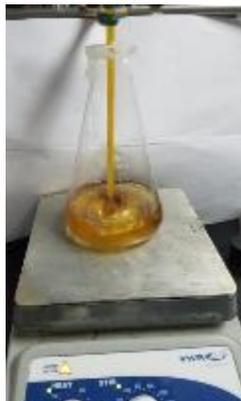


Figura 24. Biodiesel de aceite de higuerilla.

En el caso del aceite de jatropha fueron necesarios 100 ml de aceite esterificado (ver Figura 25).



Figura 25. Biodiesel de aceite de jatropha.

3.7.2 Lavado de biodiesel

El biodiesel de aceite de higuera y jatropha se lavaron mediante el método de lavado por chorro de agua para perturbar lo menos posible al biodiesel y evitar así emulsiones. El lavado se llevó a cabo con agua destilada calentada a 50°C y una relación de agua-biodiesel de 3:1. La cantidad de lavados para cada biodiesel necesaria fue dependiendo de qué tan limpia resultará el agua residual, esta medición se determinó mediante una examinación visual del agua [43].

El biodiesel se secó a 110°C por 10 minutos con agitación constante, para eliminar el agua del aceite y se almacenó en un ambiente seco.

3.8 Caracterización del biodiesel de higuera y jatropha

3.8.1 Índice de acidez

Se realizó la medición del índice de acidez al biodiesel de higuera y jatropha de acuerdo con la norma ASTM D-974 al igual como se indica en el apartado 3.4.1

3.8.2 Punto de nube

La medición del punto de nube para los 2 tipos de biodiesel se llevó a cabo como lo indica la norma ASTM D-5551, al igual que en el punto 3.4.2

3.8.3 Punto de fluidez

El punto de fluidez se determinó como lo indica la norma ASTM D-97, como se menciona en el apartado 3.4.3

3.8.4 Viscosidad dinámica del biodiesel de higuera y jatropha

La viscosidad del biodiesel se determinó utilizando el viscosímetro marca BROOKFIELD CAP 2000+. Se colocó la muestra de biodiesel en la placa acoplada, utilizando para los dos tipos de biodiesel el cono #2. La medición de viscosidad se realizó en un rango de temperatura desde los 50 hasta los 100°C al igual que las mediciones del aceite. Las mediciones se realizaron por triplicado.

3.9 Simulación en ASPEN PLUS®

La producción y purificación de biodiesel es un proceso estándar con algunas modificaciones en la etapa de lavado y etapas de separación que varían en cada planta de producción.

Se simuló la producción y purificación del biodiesel a partir de la obtención del aceite de higuera para mostrar el proceso de producción de biodiesel.

Las etapas de la simulación fueron las siguientes:

- Desgomado del aceite.
- Neutralización del aceite.
- Reacción de transesterificación con metanol para la producción de biodiesel.
- Recuperación de alcohol a partir de la etapa de reacción.
- Lavado del biodiesel.

Los componentes de la Tabla 17 fueron necesarios para la realización de la simulación.

Tabla 17. Componentes utilizados en la simulación en ASPEN PLUS®.

ID	Tipo	Nombre del componente	Fórmula
ACEITE	Conventional	RICINOLEIC-ACID	$C_{18}H_{34}O_3$
METHANOL	Conventional	METHANOL	CH_4O
FAME	Conventional	METHYL-OLEATE	$C_{19}H_{36}O_2$
GLYCERIN	Conventional	GLYCEROL	$C_3H_8O_3$
WATER	Conventional	WATER	H_2O
JABON	Conventional	CH(OH)2COONA	$C_2O_4H_3NA$
NAOH	Conventional	POTASSIUM- HIDROXIDE	KOH
FOSFOLI	Conventional	N-BUTYL-STEARATE	$C_{22}H_{44}O_2$

El aceite de higuerilla es una mezcla de varios ácidos grasos. Para esta simulación se considera al ÁCIDO RICINOLEICO como único componente del ACEITE ya que es el que está en mayor proporción, ya que representado alrededor del 87% del aceite de higuerilla [17].

La simulación se puede adaptar para otro tipo de aceite, cambiando el componente ACEITE, así como las condiciones de entrada de los componentes a reaccionar.

El componente NAOH se utiliza en la fase de neutralización y como catalizador en la fase de reacción, debido a diferencias en la base de datos del simulador se opta por utilizar KOH con fines demostrativos.

3.9.1 Descripción del proceso de simulación

La cinética y la selectividad para la reacción de transesterificación se obtuvieron de los datos reportados experimentalmente en la literatura [44,45,46,47,48].

Para el modelo, el primer paso fue el desgomado que está representado por la unidad MIX-DESG donde se mezclan el agua con el aceite. Se añadió al aceite 3% en peso de agua. Las corrientes entran al mezclador a 25°C y 1 atm, calentándose hasta 60°C, para la corriente *ACEITE* se consideró un contenido de fosfolípidos del 5%.

En el segundo paso de la simulación la corriente de salida del MIX-DESG entra en el separador (DEGUM) donde se produce la separación de aceite (*OILDEGUM*) y fosfolípidos (*DIRTYWAT*). Posteriormente la corriente de aceite desgomado se mezcla con *NAOH* a 1 atm. La cantidad de *NAOH* se determinó en función del contenido de AGL (ácidos grasos libres) del aceite. La corriente de salida de MIX-NEUT entra en un separador donde se separan el aceite neutralizado (*NEUT-OIL*) y el jabón (*JABON*) que resulta de la mezcla. La corriente *NEUT-OIL* se conecta al reactor, siendo las condiciones de funcionamiento a 60°C y 1 atm.

La cantidad de metanol (*METHOL*) utilizada se basa en la relación molar 6:1 de alcohol-aceite y la cantidad de catalizador (*NAOH2*) fue del 1% m/m con respecto al aceite. La corriente de salida (*ALCOHOL*) del MIX1 está conectada al reactor TRANST.

Se utilizó un reactor (TRANST) en ASPEN Plus® para funcionar a 60°C y 2 atm. La conversión de aceite a biodiesel se especificó como una conversión del 95%, dando como productos de la reacción glicerina y estere metílico de ácidos grasos. La corriente de alimentación *ACEITE* al reactor se precalentó a 60°C, y se alimentó al reactor junto con el flujo de metanol de la corriente de alimentación *ALCOHOL*. El catalizador de NaOH utilizado para esta reacción de transesterificación se añadió y se mezcló con el metanol (*ALCOHOL*) en un mezclador (MIX1). Se usó una columna de destilación rigurosa para simular la separación al vacío del exceso de metanol (*MEOH*) de los productos FAME y glicerina (*FAME-GLY*).

Desafortunadamente, la separación completa de biodiesel de la glicerina, metanol y NaOH es imposible. La unidad LAVADO se utilizó para eliminar la glicerina del producto FAME en la corriente *FAME-GLY*.

Este modelo de proceso de simulación incluye las unidades que se muestran en la Tabla 18:

Tabla 18. Unidades utilizadas en ASPEN PLUS®.

Unidad	Función
TRANST	Reaccionar el aceite con alcohol en presencia de catalizador para obtener biodiesel y glicerol
T-MEOH	Recuperar el exceso de metanol
LAVADO	Separar el éster metílico de ácidos grasos (FAME) del glicerol
MIX1	Mezclar alcohol con catalizador
MIX-DESG	Mezclar el aceite con agua
MIX-NEUT	Mezclar el aceite desgomado con NaOH
DEGUM	Eliminar los fosfolípidos del aceite mediante la hidratación de los mismos.
NEUTRAL	Neutralizar los ácidos grasos libres en el aceite con NaOH para la conversión de los ácidos en jabón.

En el siguiente diagrama de flujo (ver Figura 26) de la simulación en Aspen Plus®, se observan las corrientes del proceso que representan los flujos de material que entran y salen además del proceso para la obtención de biodiesel.

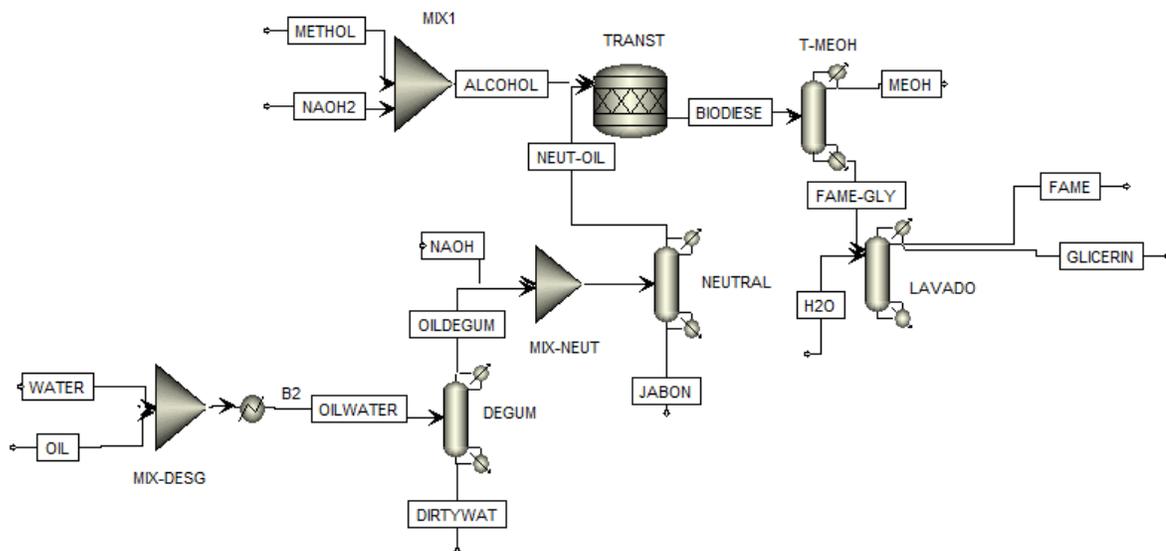


Figura 26. Diagrama de flujo en Aspen Plus®.

3.9.2 Propiedades físicas

El método termodinámico utilizado en esta simulación es NRTL-RK (dos Redlich-Kwong líquidos no aleatorios). El método termodinámico NRTL- RK utiliza:

- El modelo de coeficiente de actividad NRTL para la fase líquida
- La ecuación de estado de Redlich-Kwong para la fase de vapor
- El modelo Rackett para volumen molar líquido
- Ley de Henry para componentes supercríticos

El siguiente diagrama (ver Figura 27) muestra la metodología seguida para seleccionar el método más apropiado para el proceso.

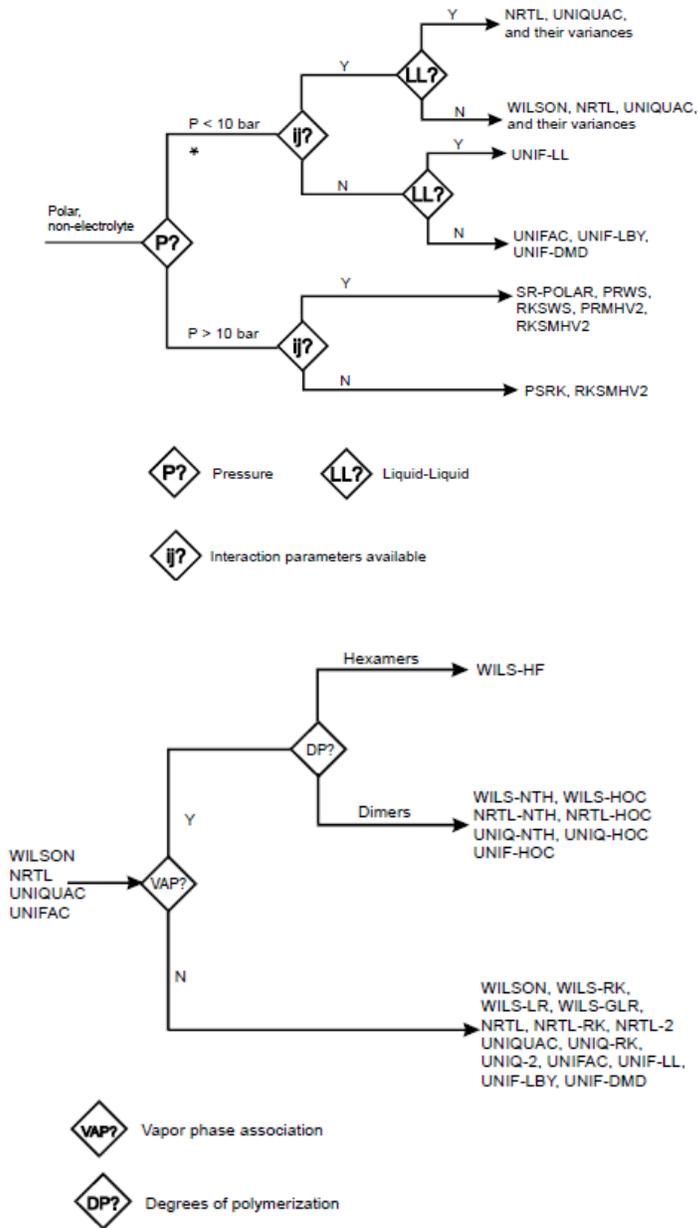
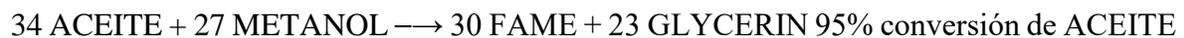


Figura 27. Diagrama para seleccionar el método.

3.9.3 Reacción química

La reacción modelada es:

Transesterificación



4. Discusión de resultados

4.1 Caracterización física de las semillas de higuera y jatropha

4.1.1 Dimensiones y peso de las semillas

Los resultados de las mediciones de la semilla de higuera y jatropha se muestran en las Tablas 19 y 20 respectivamente. Se determinaron las mediciones promedio de cada semilla con su respectiva desviación estándar.

Tabla 19. Mediciones de la muestra de semillas de higuera.

Núm. de semilla	Largo (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)
1	14.25	9.30	6.35	0.3473
2	13.75	9.15	6.50	0.3564
3	13.10	8.35	6.10	0.3432
4	12.95	8.65	6.10	0.3071
5	12.50	9.00	6.15	0.3957
6	13.05	9.20	6.70	0.3741
7	13.70	9.15	6.50	0.3515
8	12.20	8.20	6.00	0.4052
9	12.85	9.00	6.35	0.4009
10	14.15	9.10	6.65	0.2979
11	12.85	8.80	6.15	0.3355
12	13.65	9.15	6.30	0.4337
13	9.95	7.70	5.25	0.2832
14	12.10	8.10	6.00	0.3435
15	12.70	8.45	6.00	0.3509
16	13.70	9.15	6.60	0.4307
17	12.50	8.55	6.45	0.3108
18	13.15	8.55	6.35	0.3610
19	12.95	8.65	6.05	0.3092
20	13.10	9.00	6.45	0.3476
21	12.60	8.60	6.00	0.3342
22	12.65	8.60	6.35	0.3314
23	12.55	9.10	6.65	0.3433
24	13.60	9.45	6.50	0.3891
25	11.95	8.45	6.10	0.4226
26	12.85	8.70	6.10	0.3420
27	12.70	8.85	6.20	0.3774
28	12.10	8.20	5.90	0.3590
29	12.90	8.90	6.85	0.3985
30	12.20	8.45	6.30	0.3649

Tabla 20. Mediciones de la muestra de semillas de jatropha.

Núm. de semilla	Largo (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)	Núm. de semilla	Largo (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)
1	16.80	10.30	7.90	0.5454	16	18.30	11.30	8.50	0.697
2	16.40	10.35	6.60	0.6163	17	16.60	10.85	8.00	0.2794
3	18.15	10.60	8.10	0.5079	18	18.15	10.70	8.25	0.6422
4	17.70	10.65	8.80	0.6339	19	16.60	11.25	7.95	0.5962
5	17.85	10.90	8.40	0.4681	20	18.90	11.15	8.85	0.3783
6	17.95	10.25	7.70	0.7584	21	17.50	11.30	8.60	0.3057
7	17.00	11.10	8.40	0.6121	22	18.35	11.15	8.60	0.5079
8	17.20	8.50	7.20	0.5489	23	18.20	9.90	8.40	0.5129
9	18.10	11.10	8.10	0.5514	24	17.35	11.05	8.55	0.5566
10	18.10	10.80	8.10	0.7916	25	16.80	9.95	7.65	0.6295
11	16.10	10.50	8.20	0.5503	26	17.10	10.95	8.55	0.7082
12	15.35	9.70	7.25	0.6058	27	15.90	10.50	8.30	0.6878
13	18.35	11.45	8.95	0.438	28	17.90	10.90	8.85	0.6224
14	16.25	10.30	8.20	0.7597	29	16.55	10.80	8.20	0.4505
15	16.40	11.65	8.85	0.8065	30	17.90	10.75	8.80	0.5843

Las dimensiones y peso promedio de la semilla de higuera y jatropha se reportan en las Tablas 21 y 22. Se aprecia que la semilla de jatropha presenta mayores dimensiones con respecto a la semilla de higuera.

Tabla 21. Dimensiones promedio de semilla de higuera.

	Largo (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)
Higuera	12.84±0.810	8.75±0.407	6.26±0.312	0.358±0.386

Tabla 22. Dimensiones promedio de semilla de jatropha.

	Largo (mm)	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Peso (g)
Jatropha	17.32±0.891	10.68±0.624	8.22±0.543	0.573±0.133

4.1.2 Contenido de albumen en la semilla de jatropha

El peso de albumen de la muestra de semillas de jatropha se observa en la siguiente tabla (ver Tabla 23).

Tabla 23. Porcentaje de albumen de semillas de jatropha.

Núm. de semilla	Peso semilla (g)	Peso albumen (g)	% de albumen
1	0.5454	0.2932	53.76
2	0.6163	0.3834	62.21
3	0.5079	0.2608	51.35
4	0.6339	0.3943	62.20
5	0.4681	0.2499	53.39
6	0.7584	0.5040	66.46
7	0.6121	0.3597	58.76
8	0.5489	0.3455	62.94
9	0.5514	0.3195	57.94
10	0.7916	0.5092	64.33
11	0.5503	0.3413	62.02
12	0.6058	0.3986	65.80
13	0.4380	0.2405	54.91
14	0.7597	0.5011	65.96
15	0.8065	0.5308	65.82
16	0.6970	0.4108	58.94
17	0.2794	0.1070	38.30
18	0.6422	0.4169	64.92
19	0.5962	0.3776	63.33
20	0.3783	0.2208	58.37
21	0.3057	0.1505	49.23
22	0.5079	0.3048	60.01
23	0.5129	0.2762	53.85
24	0.5566	0.3000	53.90
25	0.6295	0.4232	67.23
26	0.7082	0.4361	61.58
27	0.6878	0.4635	67.39
28	0.6224	0.398	63.95
29	0.4505	0.2217	49.21
30	0.5843	0.3659	62.62

Con los datos anteriores del peso de albumen de las semillas de jatropha, se puede resumir que la fracción porcentual de albumen de una semilla de jatropha es de 59.36%, comparada con la reportada de 62%-62.80% [49].

4.1.3 Contenido de humedad de las semillas de higuera y jatropha

Las variaciones en el contenido de humedad de las semillas comparándolo con distintos autores puede deberse a las diferentes condiciones climáticas y zonas geográficas de estas. No obstante, las semillas de higuera y jatropha muestran un contenido de humedad bajo (< 6%) [50], por lo que las hace menos susceptibles al deterioro causado por microorganismos pudiendo así, almacenarlas por periodos de tiempo determinados sin afectar su viabilidad.

El resultado del contenido de humedad de las semillas de higuera y jatropha se puede observar en las Tablas 24 y 25.

Tabla 24. Porcentaje de humedad de semillas de higuera

% Humedad higuera obtenida	% Humedad higuera reportado
3.74	4.1 [32]
	1.84-5.4 [51]

Tabla 25. Porcentaje de humedad de semillas de jatropha

% Humedad jatropha obtenida	% Humedad jatropha reportado
4.7	4.92, 5.58 [49]
	6.5, 7.2 [52]
	4.75-19.57 [53]

4.1.4 Poder calorífico de la cáscara de la semilla de higuera y jatropha

Las cáscaras de las semillas muchas veces son un subproducto en la generación de biodiesel que pueden utilizarse para la generación de energía.

Las mediciones del poder calorífico de la cáscara se hicieron por triplicado. Los resultados se muestran en las Tablas 26 y 27.

Tabla 26. Poder calorífico de la cáscara de higuera.

Núm. de muestra	Peso muestra	Poder calorífico
1	0.5,156 g	13,495 J/g
2	0.5,220 g	13,441 J/g
3	0.5,279 g	13,640 J/g

Tabla 27. Poder calorífico de la cáscara de jatropha.

Núm. de muestra	Peso muestra	Poder calorífico
1	0.5,127 g	16,090 J/g
2	0.5,174 g	16,032 J/g
3	0.5,157 g	16,073 J/g

Con base en los resultados de las pruebas, se determinó que el poder calorífico promedio de la cáscara de higuera es de 13,525.33 J/g con una desviación estándar de 102.90 J/g. El caso de la cáscara de la semilla de jatropha es de 16,065 J/g con una desviación estándar de 29.81 J/g. Siendo los valores obtenidos menores a los encontrados en la literatura reportada como se muestra en las Tablas 28 y 29, esto pudiendo ser causado por factores como las diferentes zonas geográficas a las que pertenecen las semillas, así como el estado del cultivo por las diferentes condiciones climáticas.

Tabla 28. Comparación del poder calorífico obtenido contra el reportado de la cascara de higuierilla.

Cáscara	Poder calorífico promedio obtenido	Poder calorífico reportado
Higuierilla	13,525.33 J/g	15,963.43 J/g [54]

Tabla 29. Comparación del poder calorífico obtenido contra el reportado de la cascara de jatropa.

Cáscara	Poder calorífico promedio obtenido	Poder calorífico reportado
Jatropa	16,065 J/g	17,080 J/g [49]

4.2 Extracción de aceites de higuierilla y jatropa

4.2.1 Extracción mecánica de los aceites

Las condiciones óptimas para la extracción del aceite de higuierilla con el mismo equipo de extracción fueron las reportadas por investigaciones anteriores, las cuales fueron: velocidad 1, boquilla #6 y temperatura de 90°C, obteniendo un rendimiento de extracción del 36.41% [33].

En el caso de la jatropa, para obtener las condiciones óptimas de extracción se realizó un diseño de experimentos.

Los resultados del diseño de experimentos se muestran en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados del diseño de experimentos para la extracción de aceite de jatropa.

Velocidad	Boquilla #8		Boquilla #10	
	T 95°C	T 100°C	T 95°C	T 100°C
Vel. 1	16.67	17.7	19.64	20.03
Vel. 1.5	16.85	18.03	19.43	20.11

Dando como resultado la siguiente tabla ANOVA para el diseño de experimentos (ver Tabla 31).

Tabla 31. Tabla ANOVA: modelo factorial con 3 factores.

Factor	S.S.	G.L.	M.S.	F _{exp}	F _{.05,1,1}
A	0.018	1	0.018	7.37	161.45
B	12.400	1	12.400	5061.31	
C	1.345	1	1.345	548.90	
AXB	0.051	1	0.051	20.90	
AXC	0.024	1	0.024	9.88	
BXC	0.162	1	0.162	66.31	
ERROR	0.002	1	0.002		
TOTAL	14.003	7			

Se concluyó que los factores significativos son B y C, que corresponden al tamaño de la boquilla y la temperatura.

Para el análisis de los resultados se utilizó el software Minitab® versión 18, utilizando los residuos para la comprobación de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia del modelo, las cuales son características que corroboran la validez del modelo. Lo cual indica que la variable de respuesta está distribuida de manera normal con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones fueron independientes. En la Figura 28 se observan los residuos como una muestra aleatoria de una distribución normal con media cero y varianza constante.

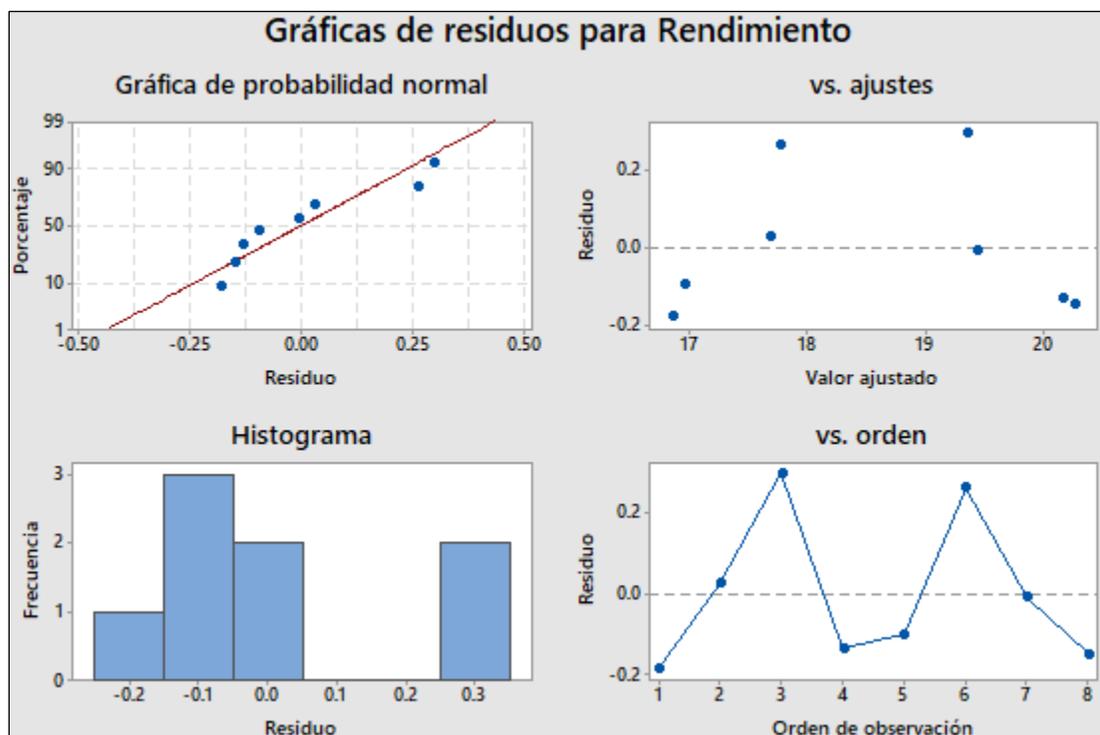


Figura 28. Gráficas de residuos para la variable de respuesta.

Consiguiendo las siguientes condiciones óptimas para la extracción de aceite de jatropha: temperatura a 100°C, velocidad 1.5 y boquilla #10, logrando un rendimiento del 20.11%, siendo este rendimiento semejante al de otros autores donde se utiliza equipo de extracción similar a la de esta investigación (23.26%) [22].

El rendimiento obtenido de cada extracción se muestra a continuación (ver Tabla 32).

Tabla 32. Rendimientos de extracción de aceite de jatropha.

Prueba	Rendimiento	Masa aceite (g)
1	16.67%	83.35
2	19.64%	98.2
3	16.85%	84.25
4	19.43%	97.15
5	17.70%	88.5
6	20.03%	100.15
7	18.03%	90.15
8	20.11%	100.55

4.2.2 Extracción por solventes de los aceites de higuera y jatropha

El porcentaje de aceite extraído por solventes de la semilla de higuera es mayor que el de la semilla de jatropha como se observa en las Tablas 33 y 34.

Siendo los coeficientes de variación menores a 5%, se considera que la distribución del porcentaje de extracción en ambos casos es homogénea [55].

Tabla 33 Porcentaje de extracciones de aceite de higuera por soxhlet.

Prueba	% extracción
1	38.75
2	39.12
3	38.36
Promedio	38.74
σ	0.38
C.V.	0.98

Tabla 34. Porcentaje de extracción de aceite de jatropha por soxhlet.

Prueba	% extracción
1	27.41
2	27.07
3	27.16
Promedio	27.21
σ	0.17
C.V.	0.63

4.3 Remoción de impurezas de los aceites de higuera y jatropha

En el caso del aceite de higuera el porcentaje impurezas removidas mediante la filtración al vacío fue menor al del aceite de jatropha esto debido a su alta viscosidad la cual dificultaba el flujo de aceite en el proceso de filtrado, por lo cual fue necesario someter al aceite de higuera a un primer centrifugado donde se recuperó el 10.6% de impurezas del aceite, en el segundo se recuperó el 2.23% de impurezas El porcentaje de impurezas retiradas de los aceites mediante la filtración al vacío, se presenta en las Tablas 35 y 36.

Tabla 35. Porcentaje de impurezas retiradas mediante filtración al vacío (aceite de higuera).

Semilla	% de impurezas retiradas
Higuera	1.8%

Tabla 36. Porcentaje de impurezas retiradas mediante filtración al vacío (aceite de jatropha).

Semilla	% de impurezas retiradas
Jatropha	4.80%

4.4 Caracterización de los aceites

4.4.1 Índice de acidez

Los resultados del índice de acidez del aceite de higuera son muy parecidos a los ya reportados por diversos autores y se encuentra dentro de los límites para realizar la reacción de transesterificación ya que en la literatura se reporta, que no es conveniente realizar la reacción de transesterificación con aceites con un contenido de AGL mayor a 2 mg KOH/g muestra dado que podrían dar paso a la formación de jabones cuando se trabaja con catalizadores básicos [56. 57].

En el caso del aceite de jatropha, el índice de acidez medido fue demasiado alto como para realizar la reacción de transesterificación, por lo que se debe proceder primero a reducir el porcentaje de AGL antes de realizar la transesterificación. El índice de acidez del aceite de jatropha puede deberse a diferentes factores como el tipo de semilla, la procedencia e inclusive la duración de almacenamiento.

Los resultados de índice de acidez de los aceites crudos fueron los siguientes (ver Tablas 37 y 38).

Tabla 37. Índice de acidez de aceite crudo de higuera.

Aceite crudo	Higuera
Índice de acidez	0.797 mgKOH/g
Índice de acidez reportado	2.41 mgKOH/g [45]

Tabla 38. Índice de acidez de aceite crudo de *Jatropha*.

Aceite crudo	<i>Jatropha</i>
Índice de acidez	23.44 mgKOH/g
Índice de acidez reportado	3.38 mgKOH/g [44]

4.4.2 Punto de nube

El punto de nube del aceite de higuera y *Jatropha* medidos son muy similares a los reportados en la literatura, siendo muy altos para manejarse en condiciones climáticas frías.

Los resultados de las pruebas de punto de nube de los aceites crudos se muestran en las Tablas 39 y 40.

Tabla 39. Punto de nube de aceite de higuera.

Aceite	Punto de nube (°C)	Punto de nube reportado (°C)
Higuera	10±1	14 [42]

Tabla 40. Punto de nube de aceite de *Jatropha*.

Aceite	Punto de nube (°C)	Punto de nube reportado (°C)
<i>Jatropha</i>	12±0.55	2 [58,59], 14 [60]

4.4.3 Punto de fluidez

El punto de fluidez del aceite de jatropha e higuierilla se alcanzó a la misma temperatura de -3°C lo cual no representa complicaciones para su utilización en zonas tropicales y favorece su capacidad de trabajo a temperaturas bajas.

Los resultados del punto de fluidez se muestran en las Tablas 41 y 42.

Tabla 41. Punto de fluidez de aceite de higuierilla.

Aceite	Punto de fluidez ($^{\circ}\text{C}$)	Punto de fluidez reportado ($^{\circ}\text{C}$)
Higuierilla	-3	2.7 [60], -13-7 [61], -2[62]

Tabla 42. Punto de fluidez de aceite de jatropha.

Aceite	Punto de fluidez ($^{\circ}\text{C}$)	Punto de fluidez reportado ($^{\circ}\text{C}$)
Jatropha	-3	-3 [58], 4 [60]

4.4.4 Viscosidad dinámica

El aceite de higuera posee la viscosidad más alta de todos los aceites vegetales conocidos y la viscosidad cambia poco con la temperatura, a diferencia de todos los aceites vegetales es miscible con alcohol en cualquier concentración [63].

Los resultados de las pruebas de viscosidad de aceite de higuera se muestran en la Tabla 43.

Tabla 43. Perfil de viscosidad vs temperatura del aceite de higuera.

Viscosidad de aceite de higuera (P)					
σ	Promedio	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Temp. (°C)
0.003	1.29	1.296	1.29	1.293	50
0.004	0.91	0.813	0.806	0.811	59.8
0.001	0.73	0.727	0.729	0.727	61.8
0.002	0.51	0.511	0.514	0.514	70.7
0.006	0.45	0.457	0.458	0.447	73.2
0.012	0.34	0.346	0.354	0.33	81.5
0.025	0.29	0.311	0.288	0.262	84.4
0.021	0.24	0.247	0.264	0.222	92.7
0.029	0.23	0.224	0.26	0.202	95.8
0.049	0.20	0.188	0.252	0.155	103.7

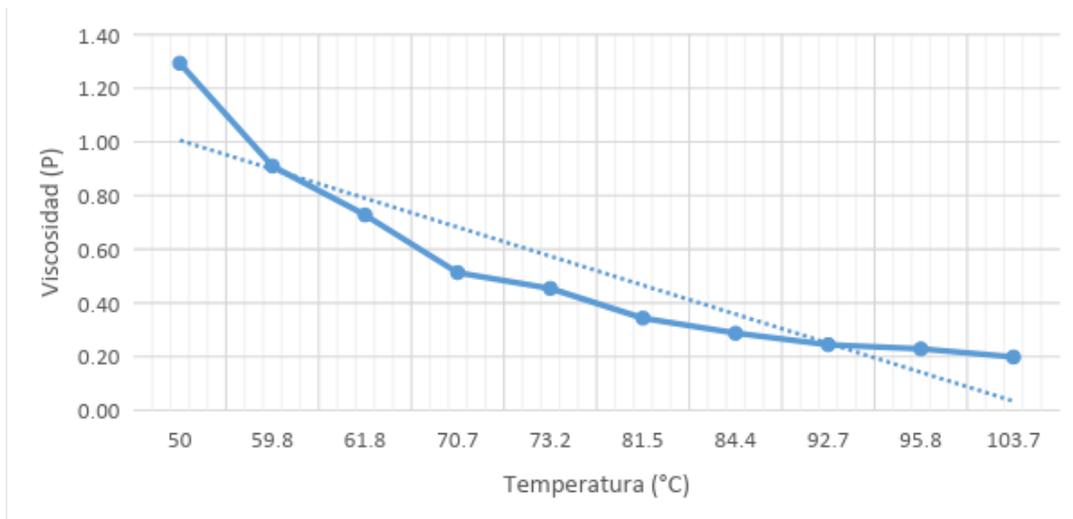


Figura 29. Viscosidad de aceite de higuera a diferentes temperaturas.

Al graficar la viscosidad del aceite a diferentes temperaturas se obtuvo la ecuación $y = 0.0177x^2 - 0.3024x + 1.5028$ con un coeficiente de correlación de 0.9833 (ver Figura 29). La viscosidad del biodiesel se ve afectada directamente por la viscosidad del aceite, siendo también la principal característica que se modifica al realizar la transesterificación.

Las mediciones de la viscosidad de aceite de jatropha se muestran a continuación (ver Tabla 44).

Tabla 44. Perfil de viscosidad vs temperatura del aceite de jatropha.

Viscosidad de aceite de jatropha (P)					
σ	Promedio	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Temp. (°C)
0.002	0.23	0.231	0.235	0.233	50
0.002	0.18	0.178	0.182	0.179	59.8
0.002	0.17	0.169	0.165	0.169	61.8
0.002	0.14	0.137	0.133	0.137	70.7
0.001	0.13	0.130	0.132	0.130	73.2
0.002	0.11	0.110	0.113	0.109	81.5
0.001	0.10	0.105	0.104	0.103	84.4
0.004	0.09	0.093	0.096	0.089	92.7
0.003	0.09	0.088	0.083	0.086	95.8
0.001	0.08	0.079	0.078	0.077	103.7

La ecuación resultante al graficar la viscosidad a diferentes de temperaturas del aceite de jatropha es $y = 0.0017x^2 - 0.0342x + 0.2542$ con una $R^2 = 0.9785$ (ver Figura 30).

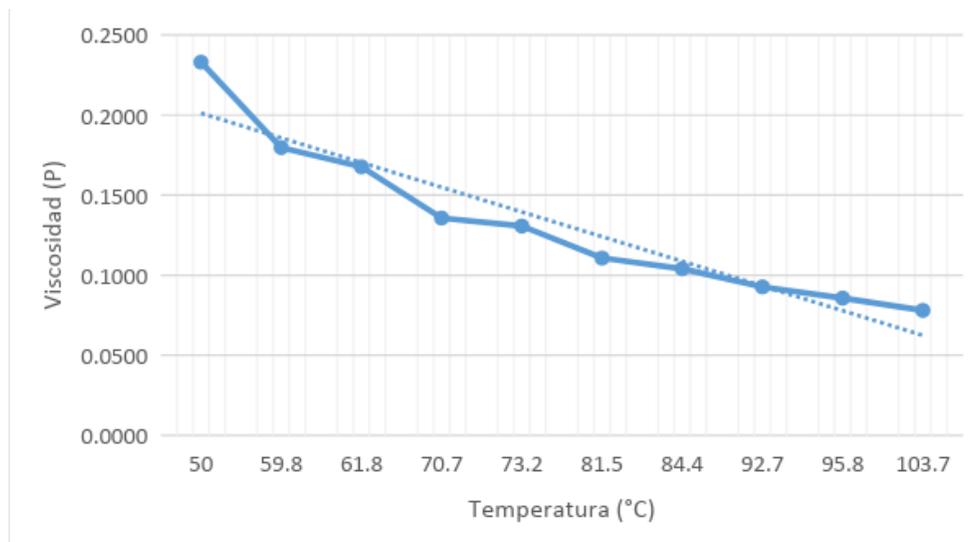


Figura 30. Viscosidad de aceite de jatropha a diferentes temperaturas.

Realizando la comparación de las viscosidades del aceite de higuierilla y jatropha (ver Figura 31), se aprecia que la viscosidad del aceite de higuierilla es mucho mayor que el aceite de jatropha. Esto se debe a los grupos hidroxilos presentes en la molécula del triglicérido del

aceite de higuera que le confieren esta característica de alta viscosidad. La viscosidad de los aceites se reducirá mediante la reacción de transesterificación.

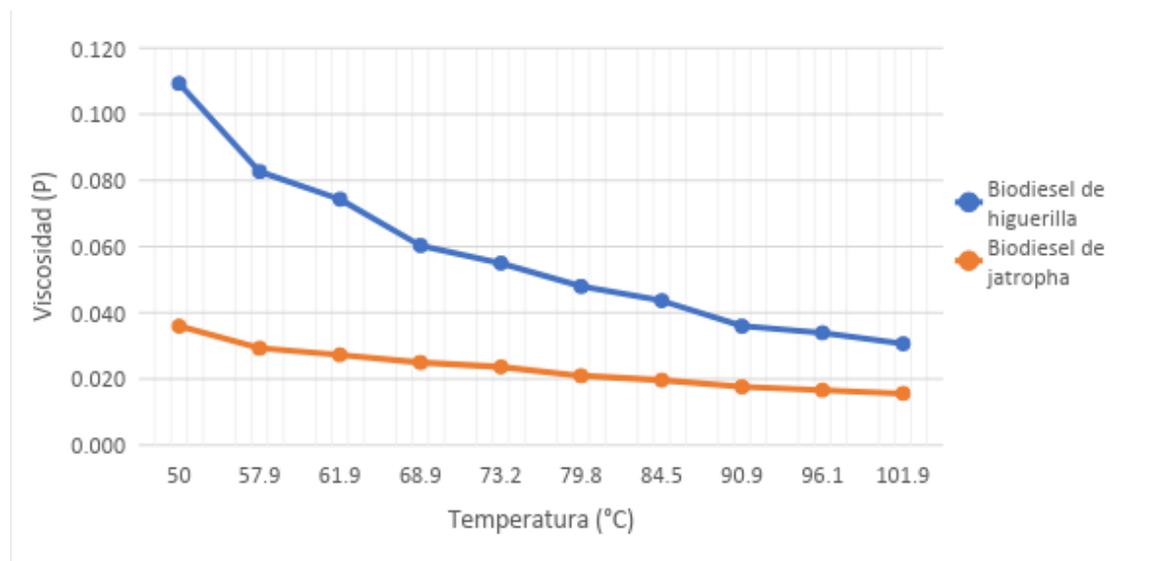


Figura 31. Comparación de la viscosidad de aceite de higuera y jatropa.

4.4.5 Cromatografía de gases

La composición de la materia prima puede inferirse por su composición de éster metílicos presentes en el aceite de higuera y jatropa por medio de una cromatografía de gases para realizar un estudio comparativo de la composición de los ácidos grasos de los aceites extraídos.

Los cromatogramas resultantes de aceite de higuera filtrado se muestran en las Figuras 32,33 y 34.

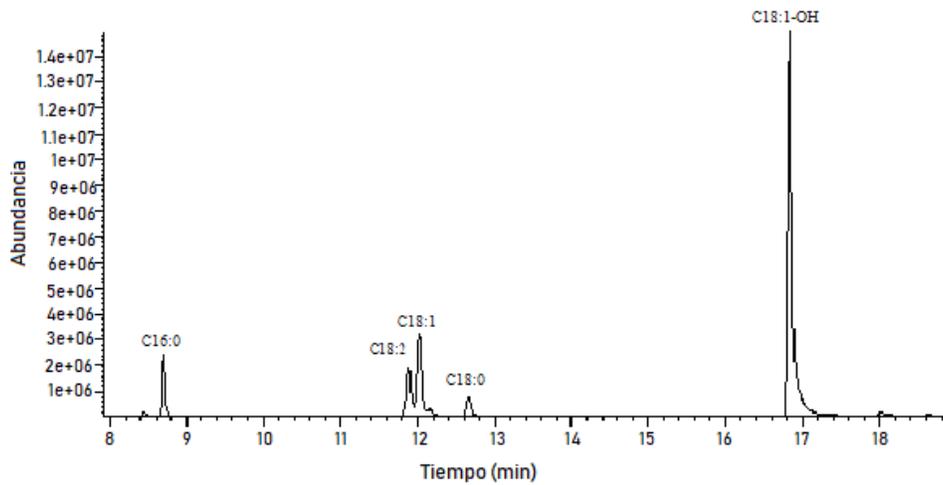


Figura 32. Cromatografía 1 de aceite de higuera filtrado.

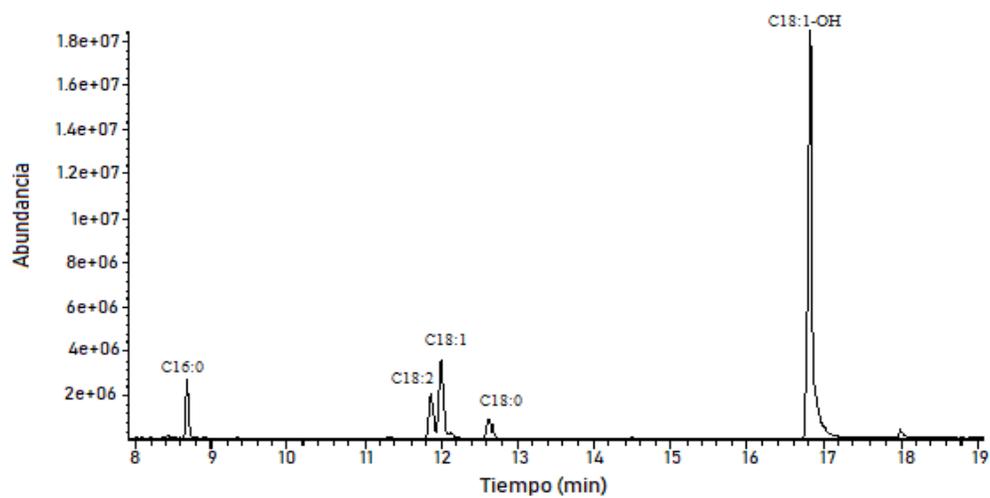


Figura 33. Cromatografía 2 de aceite de higuera filtrado.

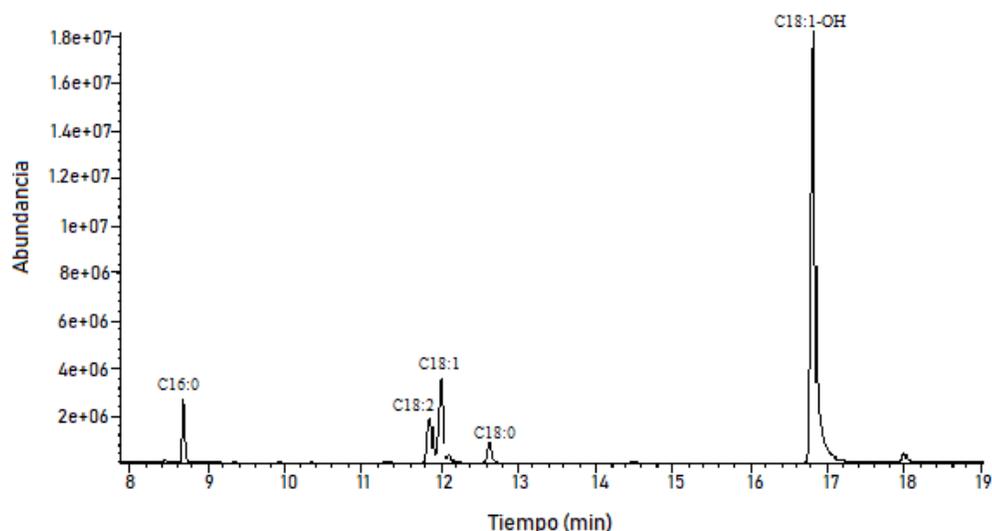


Figura 34. Cromatografía 3 de aceite de higuera filtrado.

La siguiente tabla (ver Tabla 45) presenta el tipo y porcentaje de éster metílico presente en el aceite de higuera filtrado. Como primera observación de los resultados obtenidos, se destaca el mayor porcentaje del éster metílico del ácido ricinoleico (66.38% en promedio) en todas las muestras analizadas; en segundo lugar el ácido oleico (13.79% en promedio) y, en tercer lugar, el ácido linoleico (7.54% en promedio).

Tabla 45. Composición de ácidos grasos de aceite de higuera filtrado.

Componente	MUESTRA	MUESTRA	MUESTRA	Media	σ
	1	2	3		
	% del total	% del total	% del total		
Ácido palmítico (C16:0)	7.09%	6.14%	5.97%	6.40%	0.006
Ácido linoleico (C18:2)	8.36%	7.39%	6.87%	7.54%	0.008
Ácido oleico (C18:1)	14.94%	13.37%	13.05%	13.79%	0.010
Ácido eláidico (C18:1 9 trans)	1.42%	1.06%	1.14%	1.20%	0.002
Ácido esteárico (C18:0)	3.70%	3.25%	3.27%	3.40%	0.003
Ácido ricinoleico (C18:1-OH)	63.63%	67.28%	68.22%	66.38%	0.024
Oleamida	0.86%	1.52%	1.49%	1.29%	0.004

Los perfiles cromatográficos del aceite de jatropha indican que, en el estudio realizado los ácidos grasos identificados y presentes en dicho aceite son los ácidos: palmítico (C16:0), palmitoleico (C16:1), linoleico (C18:2), oleico (C18:1), elaídico (C18:1 9 trans), esteárico (C18:0) y ricinoleico (C18:1-OH), pudiendo presentarse este último por posible contaminación de la muestra al realizar el perfil cromatográfico. Como se observa, los principales ácidos grasos que componen al aceite de jatropha son el ácido oleico (31.64% en promedio), seguido del ácido linoleico (27.13% en promedio) y en tercera posición el ácido palmítico (13.75% en promedio) (ver Tabla 46), siendo estos 3 ácidos grasos los principales componentes del aceite de jatropha coincidiendo con los de la literatura [40].

Tabla 46. Composición de ácidos grasos de aceite de jatropha.

Componente	MUESTRA	MUESTRA	MUESTRA	media	σ
	1	2	3		
	% del total	% del total	% del total		
Ácido palmitoleico (C16:1)	0.90%	0.96%	0.937%	0.93%	0.0003
Ácido palmítico (C16:0)	13.75%	13.85%	13.657%	13.75%	0.0009
Oleanitrilo	0.33%	0.40%	0.429%	0.39%	0.0005
Ácido linoleico (C18:2)	27.07%	27.18%	27.140%	27.13%	0.0006
Ácido oleico (C18:1)	31.62%	31.92%	31.377%	31.64%	0.0027
Ácido elaídico (C18:1 9 trans)	1.34%	2.00%	1.721%	1.69%	0.0033
Ácido esteárico (C18:0)	5.16%	5.23%	5.200%	5.20%	0.0004
Palmitamida	1.91%	1.82%	1.801%	1.85%	0.0006
Ácido ricinoleico (C18:1-OH)	0.92%	0.38%	0.805%	0.70%	0.0029
Oleamida	15.61%	15.34%	15.966%	15.64%	0.0032
Estearamida	1.38%	0.93%	0.969%	1.09%	0.0025

Los cromatogramas resultantes de aceite de jatropha se muestran en las Figuras 35, 36 y 37.

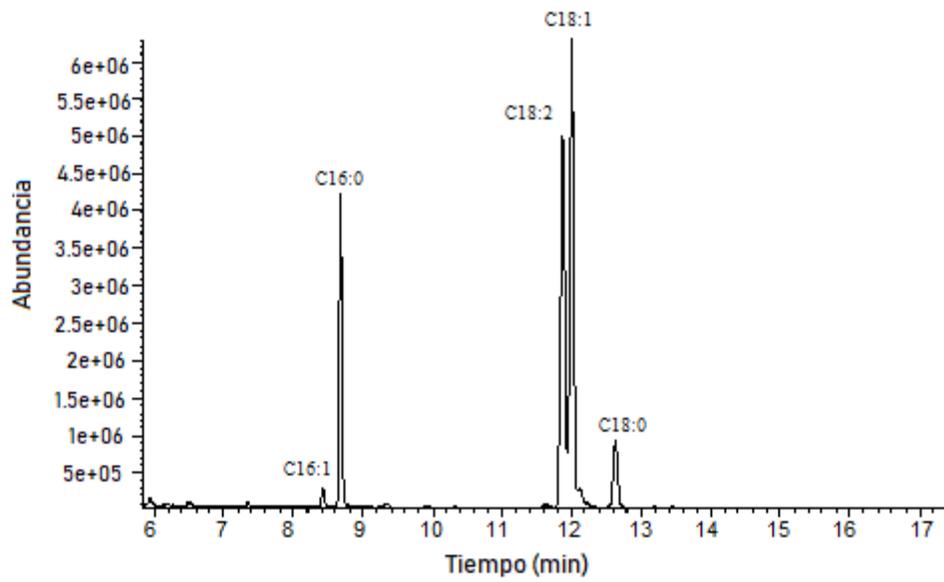


Figura 35. Cromatografía 1 de aceite de jatropha.

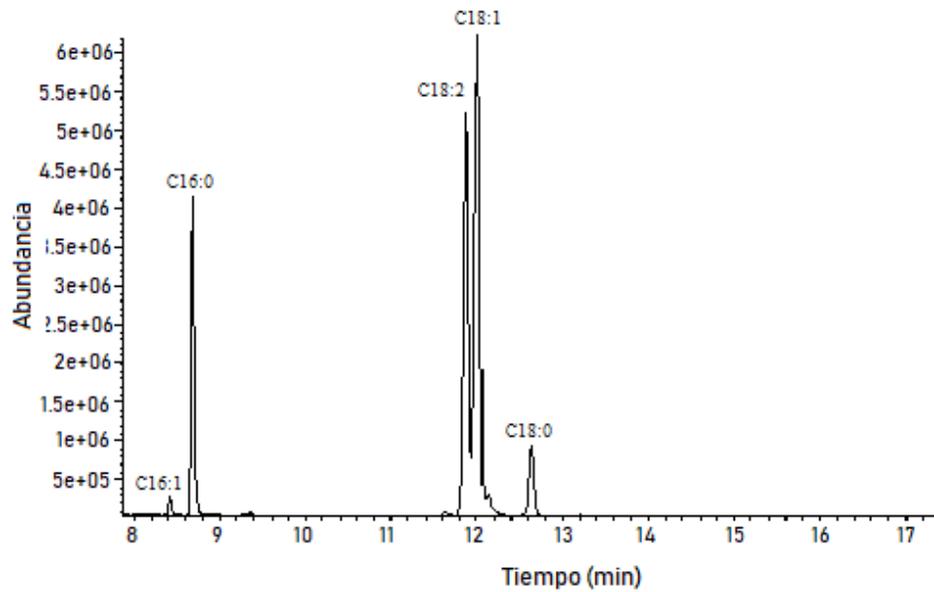


Figura 36. Cromatografía 2 de aceite de jatropha.

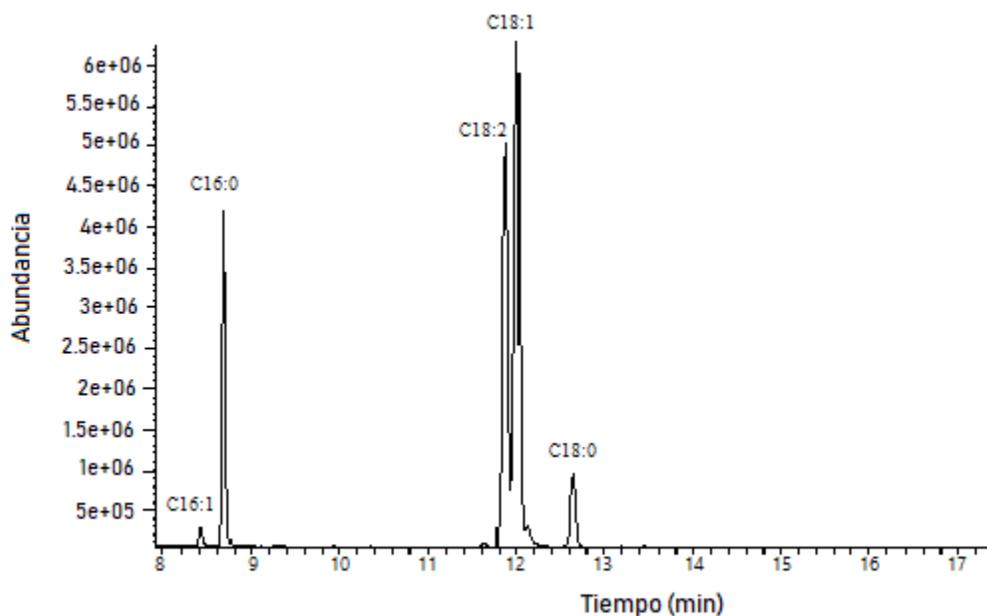


Figura 37. Cromatografía 3 de aceite de jatropha.

4.5 Desgomado del aceite de higuera

Con el desgomado se eliminan los compuestos insolubles en el aceite de higuera y así hacer menos susceptible el aceite a la oxidación. Los resultados de las pruebas se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Resultados de desgomado para aceite de higuera.

Prueba	Peso aceite (g)	% de agua	Temp. de reacción (°C)	Peso final aceite	Gomas (% del peso)	Tiempo de reacción (min)
1	11.390	3%	50	11.0403	3.07	30
2	10.022	4%	50	9.757	2.65	30
3	9.998	5%	50	9.750	2.48	30
4	6.613	3%	60	6.374	3.61	30
5	6.947	4%	60	6.744	2.92	30
6	6.388	5%	60	6.2685	1.87	30

Los resultados de las pruebas se representan gráficamente de la siguiente manera (ver Figura 38).

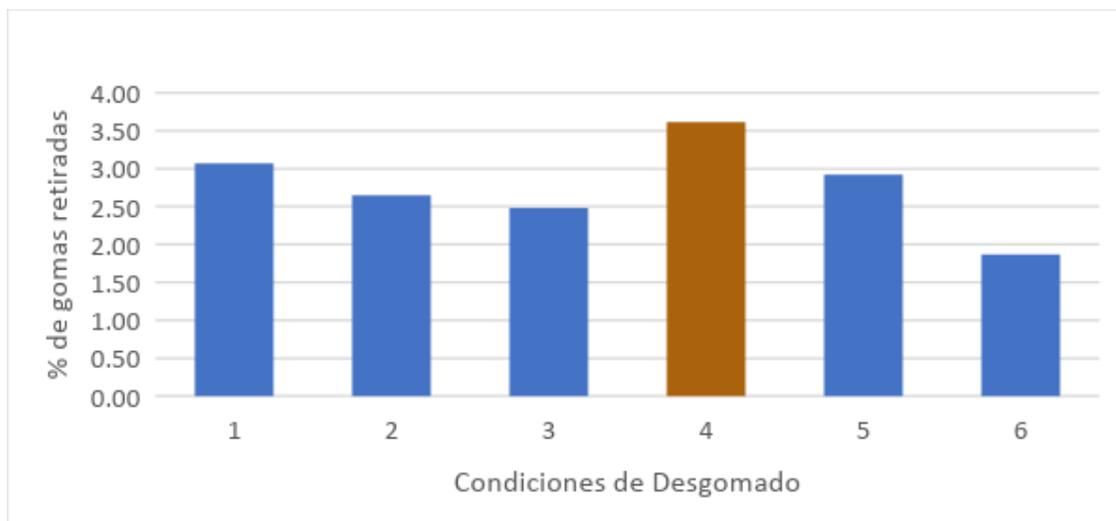


Figura 38. Porcentaje de gomas retiradas de aceite de higuera.

Dando como resultado que las mejores condiciones de desgomado para el aceite de higuera son a una temperatura de 60 °C con el 3% de agua. Se observa que no es necesaria una gran cantidad de agua para tener óptimos resultados en la remoción de gomas para el aceite de higuera.

4.6 Esterificación del aceite de jatropha

La alta acidez provoca que la reacción de saponificación se favorezca y durante el proceso se formen emulsiones y jabones, disminuyendo el rendimiento de la reacción y tornando más lentas las etapas de separación, recuperación y purificación de los productos. Por tal motivo se realizó la esterificación al aceite para reducir la acidez.

Los resultados de las pruebas de esterificación de aceite se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48. Resultados de esterificación de aceite de jatropha.

Prueba	Peso aceite (g)	% de MeOH	Cantidad H ₂ SO ₄	Temp. de reacción	Reducción de %AGL	Tiempo de reacción	%AGL finales	I.A.	I.A. Final	%AGL	Cantidad H ₂ SO ₄ (ml)	Peso MeOH (g)
1	22.30	60%	1.0%	60°C	0.86	1 hora	1.69	23.49	3.37	11.80	0.12	13.52
2	10.99	60%	0.5%	50°C	0.44	1 hora	6.65	23.49	13.24	11.80	0.03	6.65
3	10.10	60%	0.5%	65°C	0.80	1 hora	2.37	23.49	4.73	11.80	0.03	6.06
4	10.76	70%	0.5%	65°C	0.42	1 hora	6.82	23.49	13.59	11.80	0.03	7.53
5	90.43	60%	0.5%	60°C	0.98	1 hora	0.22	24.49	0.45	11.80	0.25	54.26

Expresándose gráficamente las mejores condiciones de la siguiente manera (ver Figura 39):

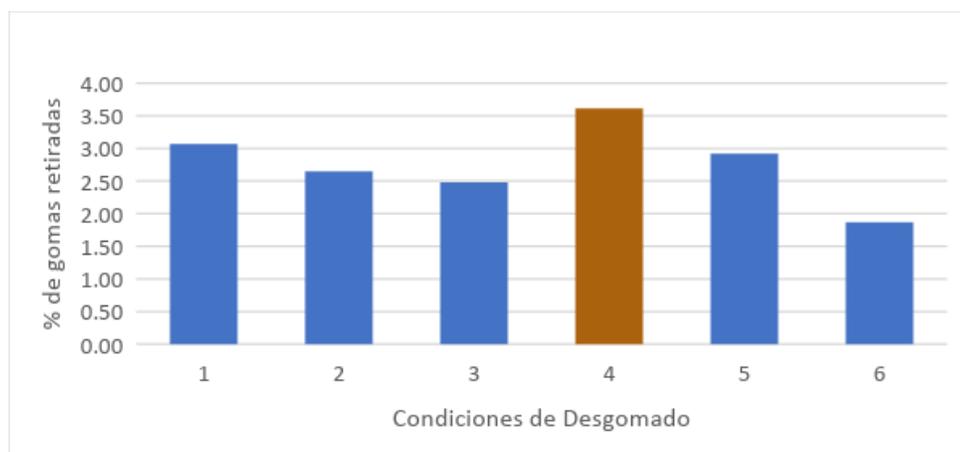


Figura 39. Reducción del porcentaje de ácidos grasos libres (%AGL).

La mayor reducción de índice de acidez, así como de porcentaje de ácidos grasos libres (%AGL) fueron a 60°C, con 60% de metanol y 0.5% de ácido sulfúrico. Reduciendo el 98.13% de AGL en el aceite, logrando alcanzar un índice de acidez del 0.45 mgKOH/g reduciendo el índice de acidez un 98.16%.

4.7 Biodiesel de aceite de higuera y jatropha

4.7.1 Transesterificación del aceite de higuera y jatropha

Se obtuvieron resultados de conversión de biodiesel satisfactorios en el aceite de higuera y jatropha, comparándolos con los de otros autores donde para el aceite de jatropha se obtuvo 91% de conversión, y en el caso del aceite de higuera se obtuvo 76% de conversión [42].

Los porcentajes de conversión de los aceites de higuera y jatropha a biodiesel, utilizando metanol e hidróxido de sodio como catalizador en esta investigación, fueron los siguientes (ver Tablas 49 y 50).

Tabla 49. Porcentaje de conversión de la reacción de transesterificación para aceite de higuera.

Aceite	% de conversión
Higuera	96.66%

Tabla 50. Porcentaje de conversión de la reacción de transesterificación para aceite de jatropha.

Aceite	% de conversión
Jatropha	98.88%

El porcentaje de conversión dependerá principalmente del tipo y calidad de las semillas, el pretratamiento y condiciones de transesterificación que se utilicen.

4.7.2 Lavado del biodiesel de aceite higuera y jatropa

Para el caso del biodiesel de aceite de higuera se necesitaron 5 lavados y posteriormente se realizó el secado del biodiesel, como se aprecia en las Figuras 40 y 41.

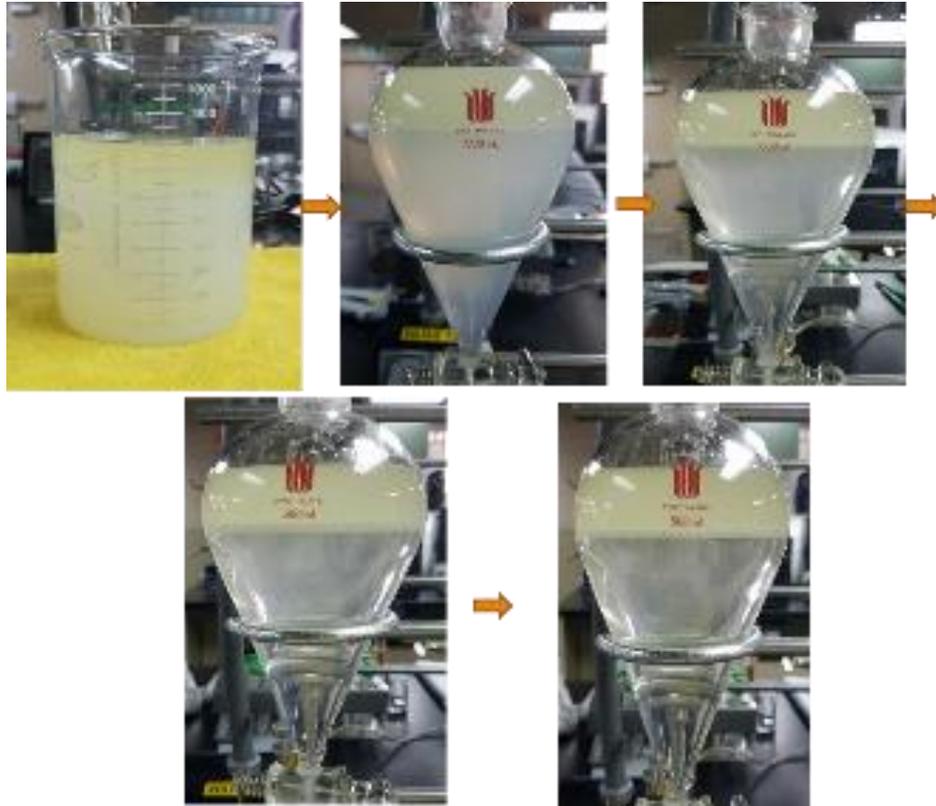


Figura 40. Lavado de biodiesel de aceite de higuera.

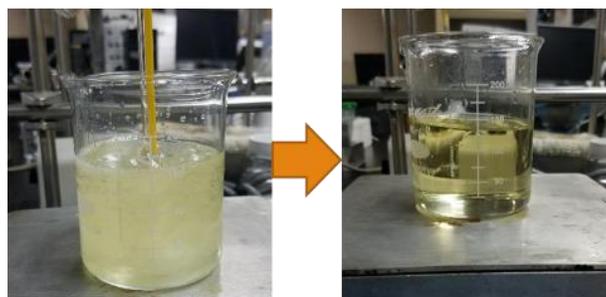


Figura 41. Secado de biodiesel de aceite de higuera.

Para el biodiesel de aceite de jatropa se necesitaron 3 lavados, continuando posteriormente con el secado del mismo, como se muestra a continuación en la Figura 42.

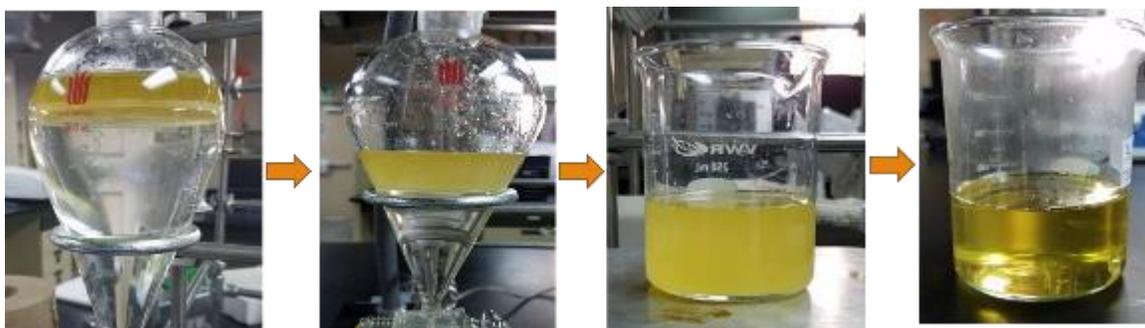


Figura 42. Proceso de lavado y secado de biodiesel de aceite de jatropha.

Para determinar la cantidad de lavados necesarios para limpiar el biodiesel, se utilizó la turbidez del agua residual de cada lavado como indicador para determinar si el biodiesel estaba lavado correctamente.

4.8 Caracterización de biodiesel de aceite higuera y jatropha

4.8.1 Índice de acidez

De acuerdo con los valores medidos de índice de acidez antes y después de la reacción de transesterificación, se obtiene que para el caso del aceite de higuera hubo una disminución de 0.26 mgKOH/g y en el caso del aceite de jatropha la disminución fue de 0.19 mgKOH/g .

Se muestran los índices de acidez tomados anterior y posteriormente a la reacción de transesterificación (ver Tablas 51 y 52).

Tabla 51. Índice de acidez antes y después de la reacción de transesterificación de higuera.

Biodiesel	I.A. antes	I.A. después	Norma ASTM D6751
Higuera	0.69 mgKOH/g	0.43 mgKOH/g	0.50 mgKOH/g

Tabla 52. Índice de acidez antes y después de la reacción de transesterificación de *jatropha*.

Biodiesel	I.A. antes	I.A. después	Norma ASTM D6751
Jatropha	0.45 $mgKOH/g$	0.26 $mgKOH/g$	0.50 $mgKOH/g$

Como se puede observar el índice de acidez para biodiesel permitido por la norma ASTM D6751 es de 0.50 $mgKOH/g$, por lo que el biodiesel de aceite de higuerilla y *jatropha* están dentro del rango que se pide por parte de para el biodiesel.

4.8.2 Punto de nube

En general, los puntos de nube se redujeron en los biodiesel de aceite de higuerilla y *jatropha*. El biodiesel de aceite de higuerilla tiene un punto de nube más bajo que el biodiesel de *jatropha*, lo que hace que el biodiesel de aceite de higuerilla sea más adecuado para su uso en países fríos.

El biodiesel de *Jatropha* puede requerir el uso de aditivos para mejorar su propiedad de clima frío deseable en países fríos. Los resultados obtenidos de las pruebas de punto de nube del biodiesel de aceite de higuerilla y *jatropha* se muestran en las Tablas 53 y 54.

Tabla 53. Punto de nube de biodiesel a partir de aceite de higuerilla.

Biodiesel	Punto de nube (°C)	Punto de nube reportado (°C)	Norma ASTM D 6751 para Biodiesel (°C)
Higuerilla	-12.50	<-13 [42], -18 [64], -13[65]	Reportado por el cliente

Tabla 54. Punto de nube de biodiesel a partir de aceite de jatropa.

Biodiesel	Punto de nube (°C)	Punto de nube reportado (°C)	Norma ASTM D 6751 para Biodiesel (°C)
Jatropa	6.10	-1 [61], -6 [42], 3.7 y 4.1[66]	Reportado por el cliente

4.8.3 Punto de fluidez

El punto de fluidez medido del biodiesel de aceite de higuerilla y jatropa fueron valores bajos por lo que al igual que en el caso del punto de nube, estos biocombustibles son una buena alternativa en condiciones invernales. En el biodiesel de aceite de jatropa se midió un punto de fluidez de 0°C, para el caso del biodiesel de aceite de higuerilla el punto de fluidez no se logró determinar debido a limitantes de temperatura del equipo, donde la temperatura alcanzada por el equipo fue de -20°C, superando así la capacidad de medición del equipo (ver Tablas 55 y 56),

Tabla 55. Punto de fluidez de biodiesel a partir de aceite de higuerilla.

Biodiesel	Punto de fluidez (°C)	Punto de fluidez reportado (°C)	Norma ASTM D 6751 para Biodiesel (°C)
Higuerilla	< -20	-30 [64]	-15 a 16

Tabla 56. Punto de fluidez de biodiesel a partir de aceite de higuera.

Biodiesel	Punto de fluidez (°C)	Punto de fluidez reportado (°C)	Norma ASTM D 6751 para Biodiesel (°C)
Jatropha	0	-6 a 2 [58], -5.5 [61], 3 [59, 67], 1.6 y 2.2 [66]	-15 a 16

4.8.4 Viscosidad dinámica de biodiesel de higuera y jatropha

La viscosidad del aceite de higuera se redujo significativamente después de someterse a la reacción de transesterificación, logrando reducciones superiores al 85% en las todas las mediciones realizadas en el mismo rango de temperatura. En el caso de la viscosidad en el aceite de jatropha, se obtuvieron reducciones mayores al 80% en todas las mediciones realizadas en el mismo rango de temperatura.

El perfil de viscosidad del biodiesel de aceite de higuera se reporta en la Tabla 57.

Tabla 57. Perfil de viscosidad de biodiesel de aceite de higuera.

Viscosidad (P) de biodiesel de aceite de higuera					
σ	Promedio	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Temp. (°C)
0.0006	0.109	0.109	0.109	0.11	50
0.0006	0.083	0.082	0.083	0.083	57.9
0.0006	0.074	0.074	0.074	0.075	61.9
0.0006	0.060	0.06	0.06	0.061	68.9
0.0017	0.055	0.054	0.054	0.057	73.2
0.0035	0.048	0.046	0.046	0.052	79.8
0.0046	0.044	0.041	0.041	0.049	84.5
0.0010	0.036	0.035	0.036	0.037	90.9
0.0036	0.034	0.031	0.033	0.038	96.1
0.0038	0.031	0.028	0.029	0.035	101.9

Con los valores obtenidos se creó la siguiente gráfica con la ecuación $y = 0.0009x^2 - 0.0178x + 0.1206$ con un coeficiente de correlación de 0.9821 (ver Figura 43).

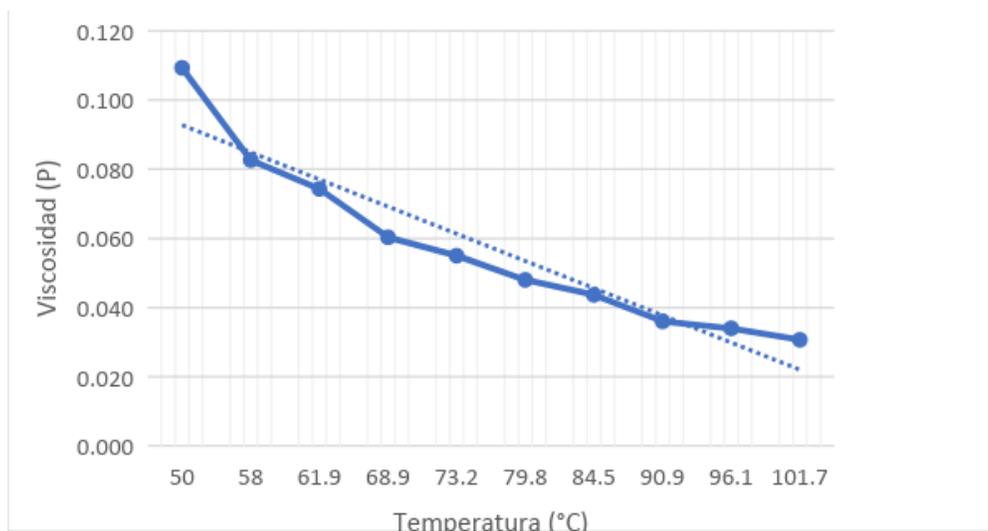


Figura 43. Viscosidad de biodiesel de higuera a diferentes temperaturas.

La viscosidad del biodiesel de aceite de jatropha se reporta en la Tabla 58 a continuación.

Tabla 58. Perfil de viscosidad de biodiesel de jatropha.

Viscosidad (P) de biodiesel de aceite de jatropha					
σ	Promedio	1	2	3	Temp. (°C)
0.0044	0.036	0.041	0.034	0.033	50
0.0015	0.029	0.031	0.029	0.028	57.9
0.0015	0.027	0.029	0.027	0.026	61.9
0.0026	0.025	0.028	0.024	0.023	68.9
0.0038	0.024	0.028	0.022	0.021	73.2
0.0020	0.021	0.023	0.021	0.019	79.8
0.0021	0.020	0.022	0.019	0.018	84.5
0.0012	0.018	0.019	0.017	0.017	90.9
0.0021	0.017	0.019	0.016	0.015	96.1
0.0021	0.016	0.018	0.015	0.014	101.9

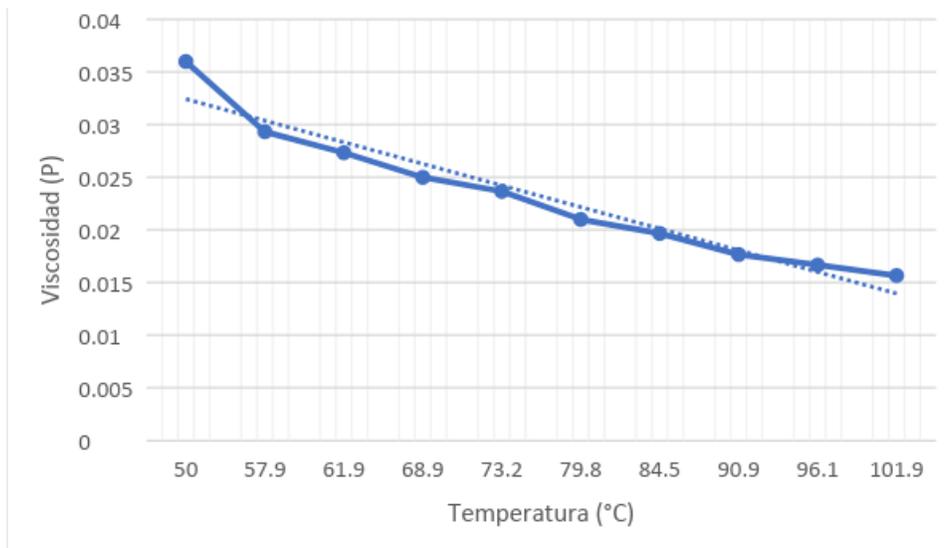


Figura 44. Viscosidad de biodiesel de jatropha a diferentes temperaturas.

La gráfica anterior (ver Figura 44) muestra el comportamiento de la viscosidad del biodiesel de aceite de jatropha en un rango de temperaturas que van desde los 50 a los 100 °C. La cual tiene la siguiente ecuación $y = 0.0002x^2 - 0.0039x + 0.0382$ con un coeficiente de correlación de 0.9812.

Se muestra de manera gráfica la comparación de la viscosidad del biodiesel de higuera y jatropha en la Figura 45.

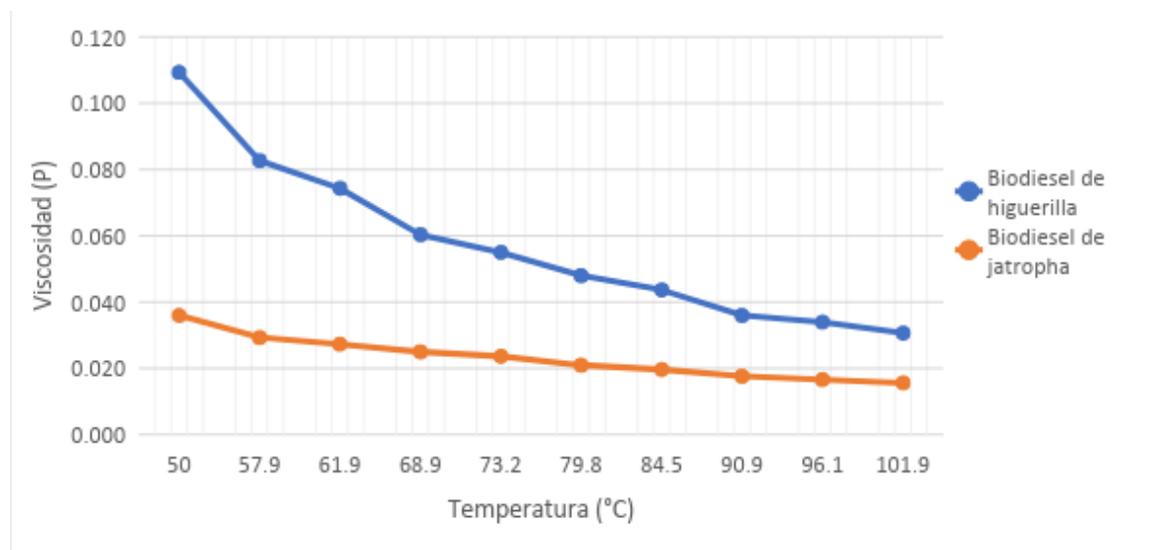


Figura 45. Comparación de viscosidades de biodiesel de higuera y jatropha.

Se aprecia en la gráfica anterior que la viscosidad del biodiesel de aceite de higuerilla permanece siendo mayor que el biodiesel de aceite de jatropha, debido a que la propiedad de viscosidad perteneciente al aceite con el que se produce el biodiesel afecta directamente a la viscosidad del biodiesel resultante.

4.9 Simulación en ASPEN PLUS®

Al finalizar el proceso para la obtención de biodiesel se obtuvo un rendimiento final del 82%, pudiendo optimizarse este rendimiento total del proceso, evaluando diferentes estimaciones crudas y altercaciones no evidentes del sistema de evaluación de propiedades termodinámicas de ASPEN®. Para modelar adecuadamente una planta de producción de biodiesel, es necesario tomar en cuenta cuatro factores que afectan el funcionamiento de la simulación: la relación de alimentación de la materia prima, la conversión de la reacción, la temperatura de la reacción y la neutralización del catalizador.

A continuación, se presentan los resultados clave de la simulación en ASPEN PLUS® para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuerilla.

Las Tablas 59 y 60 presentan los flujos de proceso.

Tabla 59. Corrientes de entrada y salida de simulación en ASPEN PLUS®.

Material									
Nombre de la corriente	Unidades	OIL	WATER	OILWATER	OILDEGUM	DIRTYWAT	NAOH	OIL-NAOH	JABON
Temperature	C	25.00	25.00	25.00	60.00	60.00	25.00	59.99	59.99
Pressure	atm	1	1	1	1	1	1	1	1
Mass Flows	kg/h	351.14	10.53	361.67	333.58	28.09	0.19	333.77	35.30
ACEITE	kg/h	298.47	0.00	298.47	298.47	0	0	298.47	0.00
METHANOL	kg/h	0	0	0	0	0	0	0	0
FAME	kg/h	0	0	0	0	0	0	0	0
GLYCERIN	kg/h	0	0	0	0	0	0	0	0
WATER	kg/h	0.00	10.53	10.53	0	10.53	0	0	0
JABON	kg/h	35.12	0	35.12	35.12	0.00	0.00	35.12	35.12
NAOH	kg/h	0.00	0	0	0	0	0.19	0.19	0.19
FOSFOLI	kg/h	17.56	0	17.56	0	17.56	0	0	0

Tabla 60. Corrientes de entrada y salida de simulación en ASPEN PLUS®.

Material											
Nombre de la corriente	Unidades	NEUT-OIL	NAOH2	METHOL	ALCOHOL	BIODIESEL	MEOH	FAME-GLY	FAME	GYCERIN	H2O
Temperature	C	59.99	25.00	25.00	25.58	60.00	60.00	60.00	58.50	58.50	60.00
Pressure	atm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Mass Flows	kg/hr	298.47	2.98	192.25	195.24	493.70	168.08	325.62	234.61	136.91	45.89
ACEITE	kg/hr	298.47	0	0	0	14.92	0	14.92	0.79	14.13	0
METHANOL	kg/hr	0	0	192.25	192.25	168.08	168.08	0	0	0	0
FAME	kg/hr	0	0	0	0	248.53	0	248.53	233.62	14.91	0
GLYCERIN	kg/hr	0	0	0	0	59.18	0	59.18	0	59.18	0
WATER	kg/hr	0	2.98	0	2.98	2.98	0	2.98	0.20	48.68	45.89
JABON	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
NAOH	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
FOSFOLI	kg/hr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Se observan los resultados condensados de la simulación en la Tabla 61.

Tabla 61. Resultados finales de la simulación.

Corriente	Unidad	OIL	OILDEGUM	NEUT-OIL	BIODIESE	FAME-GLY	FAME
Temperatura	°C	25	60	59.99	60	60	58.5
Presión	atm	1	1	1	1.97	1.97	1
Flujo másico	kg/hr	351.14	333.58	298.47	493.7	325.62	246.286
ACEITE	kg/hr	298.47	298.47	298.47	14.92	14.92	0.0447
METHANOL	kg/hr	0	0	0	168.08	0	0
FAME	kg/hr	0	0	0	248.53	248.53	246.05
GLYCERIN	kg/hr	0	0	0	59.18	59.18	0
WATER	kg/hr	0	0	0	2.98	2.98	0.19
JABON	kg/hr	35.12	35.12	0	0	0	0
NAOH	kg/hr	0	0	0	0	0	0
FOSFOLI	kg/hr	17.56	0	0	0	0	0

5. Conclusiones

Al término de la investigación se caracterizaron las semillas de higuierilla y jatropha obteniendo las dimensiones promedio de los dos tipos de semilla, el contenido de albumen de la semilla de jatropha, el cual fue en promedio de 59.36%. Se determinó el contenido de humedad de las semillas teniendo para la higuierilla y la jatropha 3.74% y 4.7 % de humedad respectivamente. Se determinó el poder calorífico de la cascara de las semillas, concluyendo que el poder calorífico de la cascara de higuierilla fue de 13,525.33 J/g y para la cascara de la semilla de jatropha de 16,065 J/g., siendo estas un subproducto de la obtención de biodiesel. Se extrajo el aceite de higuierilla (*Ricinus Communis*) y de jatropha (*Jatropha Curcas L.*) a través de una extracción mecánica, obteniendo las condiciones óptimas de extracción en la prensa de marca KOMET –CA59G para el caso de las semillas de jatropha, logrando 20.11% de rendimiento de extracción. En el caso de la extracción de aceite de higuierilla se obtuvo un rendimiento de extracción de 36.41% con las condiciones ya establecidas para la misma prensa por otros autores. Para motivos de comparación se realizó la extracción de aceite por solvente, utilizando hexano y en el caso del aceite de higuierilla se obtuvo un rendimiento de extracción de 38.74% y para el aceite de jatropha se obtuvo un rendimiento promedio de 27.21%.

Se realizó la caracterización de los aceites midiendo su índice de acidez, punto nube, punto de fluidez, viscosidad dinámica y realizándoles una cromatografía de gases. Los resultados de la caracterización que más destacan de los aceites son que el aceite de higuierilla cuenta con una alta viscosidad lo que indica que el biodiesel tendrá a su vez una viscosidad elevada, en el caso del aceite de jatropha, el índice de acidez fue la característica que más sobresalió, tomando un valor de 23.44 mgKOH/g, lo cual modifica el proceso para la obtención de biodiesel con respecto al aceite de higuierilla, realizando una reacción de esterificación para reducir el índice de acidez, logrando bajarlo a 0.45 mgKOH/g. El principal componente del aceite de higuierilla es el ácido ricinoleico siendo el 66.38% del total de la composición del aceite. En el aceite de jatropha el ácido oleico representa el 31.64% de la composición total del aceite. Comparando las características de los aceites se puede decir que el aceite de higuierilla cuenta con las mejores características para la producción de biodiesel.

Se utilizó en la reacción de transesterificación de ambos aceites metanol y como catalizador NaOH, teniendo para el aceite de higuera 96.66% de conversión y para el aceite de jatropha 98.88%.

El biodiesel resultante de aceite de higuera y jatropha se lavó utilizando el método por chorro de agua evitando así la emulsificación.

Al biodiesel de aceite de higuera y jatropha lavados se les realizaron las mismas pruebas de caracterización que los aceites y los resultados fueron comparados con los establecidos por la Norma ASTM D 6751 para biodiesel, llegando a la conclusión que las características medidas de los dos tipos de biodiesel están en los rangos permitidos por la norma.

Además de la experimentación, la simulación realizada en Aspen Plus® brinda una oportunidad de mejora para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales.

6. Recomendaciones

- Realizar la medición del punto de inflamación para el biodiesel de aceite de higuera y jatropha y comparar con la Norma ASTM D 6751 para Biodiesel.
- Realizar la medición de la capacidad calorífica para el biodiesel de aceite de higuera y jatropha y comparar con la Norma ASTM D 6751 para Biodiesel.
- Realizar una simulación para la producción de biodiesel utilizando la composición de los aceites obtenidas en las cromatografías de gases para lograr resultados más reales.
- Probar el biodiesel de aceite de higuera y jatropha en motores y evaluar su rendimiento.

7. Referencias

- [1] Clarimón, L.; Fernández, C.; Sánchez, B., (2005), Informe sobre el empleo de combustibles renovables biodiesel, Departamento de Medio Ambiente, Zaragoza, España.
- [2] Sánchez Medina, I.; Huertas Greco, K., (2012), Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de *Ricinus Communis L.* (higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero. Universidad tecnológica de Pereira. Colombia.
- [3] Tapia, P., (2017), Biodiesel, a la espera de brillar en México. MILENO. Recuperado de <http://www.milenio.com/negocios/biodiesel-a-la-espera-de-brillar-en-mexico>
- [4] Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, Bioenergéticos higuerilla, jatropha curcas, sorgo dulce mexicanos, 2017.
- [5] Medina Ramírez, I. E.; Chávez Vela, N. A.; Jáuregui Rincón, J., (Mayo-Agosto, 2012). Biodiesel, un combustible renovable. Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes. 55, 62-70.
- [6] BARNWAL, B. K. SHARMA, M. P. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1-16.
- [7] Syviengkham, P., (2014), Pretreatment of high Free Fatty Acid Jatropha Oil by Esterification (Tesis de maestría), National University of Laos.
- [8] MYINT, L., (2007), Process analysis and optimization of biodiesel production from vegetable oils, thesis, Master of science, Texas A&M University.
- [9] Nada E.M.ElSoL, (2011), The manufacture of biodiesel from the used vegetable oil” Master of Science, Faculty of Engineering at Kassel and Cairo Universities.
- [10] Knothr, G., (2010), The Biodiesel Handbook, 9-12.
- [11] István Barabás, Ioan-Adrian Todoruț, (2011), Biodiesel Quality, Standards and Properties, BiodieselQuality, Emissions and By-Products, Dr. Gisela Montero (Ed.), ISBN: 978-953-307-784-0, InTech. Recuperado de: <http://www.intechopen.com/books/biodiesel-quality-emissions-and-by-products/biodiesel-qualitystandards-and-properties>
- [12] Knothe, G., (2010). Biodiesel fuel quality and the astm standard. Vol. 31, 162-171.

- [13] WEISS, E., (1983), Oilseed crops. London: Longman, 660.
- [14] Food and agriculture Organization of the United Nations, 2016.
- [15] Mondragón Pichardo, J., (Julio, 2009). Euphorbiaceae *Ricinus Communis L.*
Recuperado de <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/euphorbiaceae/ricinus-communis/fichas/ficha.htm>
- [16] Manzano, P.; Rivera, P.; Pérez, J.; Orellana, A; Ahumada, O.; Castillo, J.; Ruiz, O., (Septiembre, 2009). Comparación del porcentaje de aceite y del tamaño de seis ecotipos de semillas de higuierilla (*Ricinus Communis*), de origen sudamericano. Revista tecnológica ESPOL-RTE, Vol. 22, 15-20. Recuperado de <http://learningobjects2006.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/viewFile/66/37>
- [17] Perea Flores, M.; Chanona Pérez, J.; Garibay Febles, V.; Calderón Dominguez, G.; Terrés Rojas, E.; Mendoza Pérez, J.; Herrera Bucio, R., (Mayo, 2011). Microscopy techniques and image analysis for evaluation of some chemical and physical properties and morphological features for seeds of the castor oil plant (*Ricinus Communis*). Industrial Crops and Products 34 (2011) 1057– 1065.
- [18] Cultivarán productores higuierilla en el Valle de Mexicali, para la producción de Biodiesel: GAH., (Marzo, 2016). BOLETÍN DE PRENSA Delegación Estatal en Baja California, 063. Recuperado de <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/bajacalifornia/Boletines/Paginas/063B2016.aspx#>
- [19] H. Rico Ponce, L. Tapía Vargas, R. Teniente Oviedo, A. González Avila, M. Hernández Martínez, J. Solís Bonilla, A. Zamarripa Colmenero, (Mayo, 2011) Guía para cultivar higuierilla (*Ricinus Communis L.*) en Michoacán, Folleto técnico, núm.1.
- [20] Armendáriz Velázquez, J., (2012), CARACTERIZACIÓN FENOTÍPICA Y MOLECULAR DE GENOTIPOS DE HIGUERILLA (*Ricinus Communis L.*) PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL (Tesis de maestría), Universidad Autónoma De Nuevo León. [5] Jatropha, Generalidades del cultivo, (Octubre, 2015). Recuperado de http://snics.sagarpa.gob.mx/rfaa/Paginas/Basicos_e_Industriales/Jatropha/Generalidades_Cultivo.aspx

- [21] Kingswood Sideman, A., (2010), Estudio exploratorio de la producción de biodiesel a partir de aceite de *Jatropha curcas* en Chile (Tesis de licenciatura), Universidad De Chile.
- [22] Yate Segura, A., (2013), Evaluación del proceso de extracción del aceite de *Jatropha curcas* L. para la producción de biodiesel (Tesis de maestría), Universidad Nacional De Colombia.
- [23] González Ávila, A.; García Mariscal, K.; Hernández García, M.; Teniente Oviedo, R.; Solís Bonilla, J.; Zamarripa Colmenero, A., (Noviembre, 2011), Guía para cultivar Piñón Mexicano (*Jatropha curcas* L.) en Jalisco, Folleto técnico, núm. 6.
- [24] Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2018.
- [25] Trevejo Chávez, E.; Maury Laura, M., (2002), Extracción y caracterización del aceite de *Poraqueiba sericea* Tulasne (UMARÍ), Revista Amazónica de Investigación Alimentaria, Vol. 2, No. 2, 1-18. Recuperado de <http://www.gob.gob.edu.unu.cnm.edu.edu.unapiquitos.edu.pe/pregrado/facultades/alimentarias/descargas/vol3/1.pdf>
- [26] Copeland, R.; Blencher, M., (2002), ES 2248218T3. Madrid, España: Oficina español de patentes y marcas. Recuperado de http://www.espatentes.com/pdf/2248218_t3.pdf
- [27] Achaya, K.; Hamed Al-Jasir, M.; Andah, A.; Beare-Rogers, J.; A. Bieber, M.; Bray G.; K. Yeo, Y., (1997). Grasas y aceites en la nutrición humana. Consulta FAO/OMS de expertos. (Estudio FAO Alimentación y Nutrición - 57). Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/V4700S/v4700s00.htm#Contents>
- [28] Castro, P.; Coello, J.; Castillo, L., (2007), Opciones para la producción y uso de biodiesel en el Perú. Lima, Perú, Intermediate Technology Development Group, ITDG-Perú.
- [29] Sequeira, A.; Polich, N.; Morales, W.; Chamorro, E., (2011). Primeros pasos en la obtención de biodiesel utilizando un reactor continuo de construcción sencilla. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, vol.15, 47-55.
- [30] Avellaneda Vargas, F., (2010). Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal (Tesis de doctorado). Universidad Rovira I Virgil. España.

- [31] Tabio García, D.; Díaz Domínguez, Y.; Rondón Macías, M.; Fernández Santana, E.; Piloto Rodríguez, R., (2017), Extracción de aceites de origen vegetal. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba.
- [32] Cornejo Martínez, M., (2012), Caracterización de aceite de higuera (*Ricinus Communis*) de dos variedades silvestres para la producción de biodiesel en la región del Valle de Mezquital, Hidalgo (Tesis de maestría). CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S. C.
- [33] Daniela Montes, N., (2014), Extracción de aceite vegetal de semillas oleaginosas de Baja California. Caso de estudio: Higuera y Algodón (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Baja California.
- [34] Yate Segura, A., (2013), Evaluación del proceso de extracción del aceite de *Jatropha curcas* L. para la producción de biodiesel (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- [35] Giraldo Y., H., Velásquez J., J., Cuartas A., P., (2010), Extracción con solventes y purificación de aceites a partir de semillas de *Jatropha curcas*. Revista Investigaciones Aplicadas vol. 4 N°4,2010, pp.77-86.
- [36] Navarrete R., L., (2009), Extracción y caracterización fisicoquímica de aceite de higuera. AVANCES Investigación en Ingeniería - 2009 N°10.
- [37] Norma NMX-F-089-S-1978.Determinación de extracto etéreo (método soxhlet) en alimentos.
- [38] Chilingarian G., Robertson, J., Kumar, SX., (1989), Surface operations in petroleum production II, Estados Unidos: ELSEVIER SCIENCE PUBLISHING COMPANY INC.
- [39] Sánchez Marín, F., Pérez González, A., Sancho Bru, J., & Rodríguez Cervantes, P., (2006), Mantenimiento mecánico de máquinas. España: Publicacions de la Universitat Jaume I.
- [40] Patel, V.; Dumancas, G.; Viswanath, L.; Maples, R.; Subong, B., (2016), Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production, Lipid Insights, EE. UU, vol 9, pp. 1-12

- [41] Ferdous, K., Rakib Uddin, M., Ded, A., Ferdous, J., R, Khan, M., A. Islam, M., (2012), Preparation of Biodiesel from Castor Oil by Two-Step Method. SUST Journal of Science and Technology, Vol. 20, No. 6, 2012; P:48-56
- [42] Okullo, A., Temu, A., Ogwok, P., Ntalikwa, J., (2012), Physico-Chemical Properties of Biodiesel from Jatropha and Castor oil. INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH, vol. 2, N°1,2012.
- [43] García González, C.; Montero Alpírez, G.; Coronado Ortega, M.; Montes Núñez, D.; Vázquez Espinoza, A., (2012), Evaluación del consumo de agua y propuesta de tratamiento del efluente residual del lavado de biodiesel, 5° Encuentro Nacional de Expertos en Residuos Sólidos, México.
- [44] Aspen Technology, Inc., “Aspen Plus Aspen Plus Biodiesel Model”, 2008.
- [45] Aspen Technology, Inc., “Aspen Plus® Aspen Plus User Guide”, 2000.
- [46] Y. Zhang, M.A. Dube, D.D. McLean, M. Kates, Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 1. Process Design and Technological Assessment, Bioresource Technology, 89:1-16, 2003.
- [47] C. Kick, A. Kline, H. Hladky, B. Aller, (2013), Using AspenPlus Resources to Model Biodiesel Production Applicable for a Senior Capstone Design Project, Journal of Engineering Education.
- [48] Castillo Peña, A.; Labrada Vázquez, B.; Penedo Medina, M.; Sánchez del Campo, L., (2013), Simulación del proceso de producción de biodiesel a partir del aceite de Jatropha curcas, Tecnología Química, vol. 33, 107-120.
- [49] Betancur Prisco, J., Mira Hernández C., París Londoño, L., (Julio, 2014), Physical and mechanical properties of Jatropha curcas seed grown up in Colombia, Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N. °73 pp. 187-199.
- [50] Vasco, J.; Hernández, I.; Méndez, S.; Ventura, E.; Cuellas, M.; Mosqueda, J., (2017), Relation between the chemical composition of the seed and oil quality of twelve accessions of *Ricinus Communis L.* Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas Vol.8 Núm.6, pp. 1343-1356.

- [51] Omari, A.; Mgani, Q.; Mubofu, E., (2015), Fatty Acid Profile and Physico-Chemical Parameters of Castor Oils in Tanzania. *Green and Sustainable Chemistry*, 2015, 5, pp. 154-163.
- [52] M. Montes, J., Rodríguez Aliciardi, M., Vaca Chávez, J., Guzmán, C., Calandri, E., (2011), Characterization of *Jatropha curcas* L. seed and its oil, from Argentina and Paraguay. *Journal of the Argentine Chemical Society*, Vol. 98, 1-9.
- [53] K. Garnayak D.; C. Pradhan, R.; N. Naik, S.; Bhatnagar, N, (2008), Moisture-dependent physical properties of *Jatropha* seed (*Jatropha curcas* L.). *INDUSTRIAL CROPS AND PRODUCTS*, 27,123-129.
- [54] Ortiz Laurel, H., Rössel Kipping, D., Duran Garcia, H., González Muñoz, L., (2016), Balance energético de la biomasa agrícola con procesos y tecnologías de vanguardia. *Revista de Energía Química y Física*, 3-7: 9-14.
- [55] Posada Hernández, G., (2016), Elementos básicos de estadística descriptiva para el análisis de datos, Medellin, Colombia, Funlam.
- [56] Mashad, E.; Zhang, H.; Bustillos, A, (2008), A two step process for biodiesel production from salmon oil. *Biosystems Eng.*, 99, pp. 220-227.
- [57] Ghadge; Raheman, S., (2005), Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids. *Biomass & Bioenergy*, 28, pp. 601-605.
- [58] Koh, M., Mohd Ghazi, T., (2011), A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.
- [59] Tint Tint, K.; Mya Mya, O., (2009), Production of Biodiesel from *Jatropha* Oil (*Jatropha curcas*) in Pilot Plant, *PROCEEDINGS OF WORLD ACADEMY OF SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, Vol. 38.
- [60] Ahmad, K., Abdullah, M., Hassan, N., Ambak, K., Musbah, A., Usman, N., Binti Abu Bakar, S., (2016), EXTRACTION TECHNIQUES AND INDUSTRIAL APPLICATIONS OF *JATROPHA CURCAS*. *Sciences & Engineering* 78: 7–3 (2016) 53–60.
- [61] Chaturvedi, O., (2013), Process Optimization for Conversion of Vegetable Oil into Biodiesel and Design of Biodiesel Plant (Tesis de doctorado). TERI University.

- [62] Benavides, A., Benjumea, P., Pashova, V., (2007), CASTOR OIL BIODIESEL AS AN ALTERNATIVE FUEL FOR DIESEL ENGINES. *Dyna*, vol. 74, N°153,2007, pp 141-150.
- [63] Valderrama, J.; Mery, A.; Aravena, F., (1994), La higuerilla y su principal producto, el aceite de ricino. Parte 1. Aspectos generales, Chile, *INFORMACION TECNOLOGICA*, vol 5, pp.87-91.
- [64] Keera, S.; El Sabagh, S.; Taman, A., (2018), Castor oil biodiesel production and optimization, *Egyptian Journal of Petroleum* 27 (2018) 979–984.
- [65] Gokdogan, O.; Erylmaz, T.; Yesilyurt, M., (2015), THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CASTOR OIL (*RICINUS COMMUNIS L.*) BIODIESEL AND ITS BLENDS, *Journal of oil, gas and alternative energy sources*, Vol. 6 N°1, pp. 95-128.
- [66] Reddy, A.; Saleh, A.; Islam, M.; Hamdan, S.; Rezaur Rahman Md.; Masjuki, H., (2018), Experimental evaluation of fatty acid composition influence on *Jatropha* biodiesel physicochemical properties, *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10, 013103.
- [67] Hanumantha Rao, Y.; Sudheer Voleti, R.; Hariharan. V.; Sitarama, A.; Nageswara, P., (2009), Use of *Jatropha* Oil Methyl Ester and Its Blends as an Alternative Fuel in Diesel Engine, *J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.*, Vol. 31, N° 3.

8. Anexos

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: GARCIA GONZALEZ CONRADO
GONZALEZ ZUÑIGA JOSE JORGE
MONTERO ALPIREZ GISELA
ORTEGA CORONADO MARCOS ALBERTO
SANCHEZ PEREZ LUZ BIBIANA

TITULO: ACEITE DE HIGUERILLA Y JATROPHA PARA LA OBTENCION DE BIODIESEL

RAMA: LITERARIA

TITULARES: GARCIA GONZALEZ CONRADO
GONZALEZ ZUÑIGA JOSE JORGE
MONTERO ALPIREZ GISELA
ORTEGA CORONADO MARCOS ALBERTO
SANCHEZ PEREZ LUZ BIBIANA

Con fundamento en lo establecido por el artículo 3º de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I y II de la Ley Federal del Derecho de Autor, no es objeto de protección como derecho de autor: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2017-121912441700-01

03-2017-121912441700-01 Página 1 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



Híjar A.C.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

La presente firma ampara el registro número: 03-2017-121912441700-01

México D.F., a 15 de enero de 2018

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ



SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL
DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DEL REGISTRO
PÚBLICO
DEL DERECHO DE AUTOR



Página 2 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



WFM Hel

TITULO DE LA OBRA

“ACEITE DE HIGUERILLA Y JATROPHA PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIESEL”

SEP-INDAUTOR
REGISTRO PUBLICO
03-2017-121912441700-01

AUTORES

Luz Bibiana Sánchez Pérez

Marcos Alberto Coronado Ortega

Conrado García González

José Jorge González Zúñiga

Gisela Montero Alpírez

No. REGISTRO: 03-2017-121912441700-01
TITULO : ACEITE DE HIGUERILLA Y JATROPHA
PARA LA OBTENCION DE BIODIESEL
TIPO TRAMITE :REGISTRO DE OBRA
PRESENTACION: HOJAS ENGRAPADAS



Mexicali, Baja California a Octubre 2017.

CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

Para los efectos de los artículos 13, 162, 163 fracción I, 164 fracción I, 168, 169, 209 fracción III y demás relativos de la Ley Federal del Derecho de Autor, se hace constar que la **OBRA** cuyas especificaciones aparecen a continuación, ha quedado inscrita en el Registro Público del Derecho de Autor, con los siguientes datos:

AUTORES: CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
GONZALEZ ZUÑIGA JOSE JORGE
MONTERO ALPIREZ GISELA
SANCHEZ PEREZ LUZ BIBIANA

TITULO: ACEITE ESENCIAL DE HIGUERILLA PARA APLICACIONES ANTIOXIDANTES

RAMA: LITERARIA

TITULARES: CORONADO ORTEGA MARCOS ALBERTO
GARCIA GONZALEZ CONRADO
GONZALEZ ZUÑIGA JOSE JORGE
MONTERO ALPIREZ GISELA
SANCHEZ PEREZ LUZ BIBIANA

Con fundamento en lo establecido por el artículo 3° de la Ley Federal del Derecho de Autor, el presente certificado ampara única y exclusivamente la obra original literaria.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 14 fracciones I y II de la Ley Federal del Derecho de Autor, no es objeto de protección como derecho de autor: las ideas en sí mismas, las fórmulas, soluciones, conceptos, métodos, sistemas, principios, descubrimientos, procesos e invenciones de cualquier tipo; el aprovechamiento industrial o comercial de las ideas contenidas en las obras.

Con fundamento en lo establecido por el artículo 168 de la Ley Federal del Derecho de Autor, las inscripciones en el registro establecen la presunción de ser ciertos los hechos y actos que en ellas consten, salvo prueba en contrario. Toda inscripción deja a salvo los derechos de terceros. Si surge controversia, los efectos de la inscripción quedarán suspendidos en tanto se pronuncie resolución firme por autoridad competente.

Con fundamento en los artículos 2, 208, 209 fracción III y 211 de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 64, 103 fracción IV y 104 del Reglamento de la Ley Federal del Derecho de Autor; artículos 1, 3 fracción I, 4, 8 fracción I y 9 del Reglamento Interior del Instituto Nacional del Derecho de Autor, se expide el presente certificado.

Número de Registro: 03-2017-121912451500-01

03-2017-121912451500-01

Página 1 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



CERTIFICADO

Registro Público del Derecho de Autor

La presente firma ampara el registro número: 03-2017-121912451500-01

México D.F., a 15 de enero de 2018

EL DIRECTOR DEL REGISTRO PÚBLICO DEL DERECHO DE AUTOR

JESUS PARETS GOMEZ



SECRETARÍA DE CULTURA
INSTITUTO NACIONAL DEL
DERECHO DE AUTOR
DIRECCIÓN DEL REGISTRO PÚBLICO



Página 2 de 2

CULTURA
SECRETARÍA DE CULTURA



INDAUTOR
Instituto Nacional del Derecho de Autor

MHC *del*

Título de la Obra

SEP-INDAUTOR
REGISTRO PUBLICO
03-2017-121912451500-01

"Aceite esencial de la hoja de higuera para aplicaciones antioxidantes"

Autores

José Jorge González Zúñiga

Conrado García González

Marcos Alberto Coronado Ortega

Luz Bibiana Sánchez Pérez

Gisela Montero Alpírez

No. REGISTRO: 03-2017-121912451500-01
TITULO : ACEITE ESENCIAL DE HIGUERILLA PARA
APLICACIONES ANTIOXIDANTES

TIPO TRAMITE :REGISTRO DE OBRA
PRESENTACION: HOJAS ENGRAPADAS



Mexicali, Baja California a octubre de 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

Instituto de Ingeniería · Facultad de Ingeniería · Facultad de Pedagogía e Innovación Educativa



Otorga la presente

CONSTANCIA

A: **LUZ BIBIANA SÁNCHEZ**

Por su participación activa como staff de apoyo durante la

FERIA STEAM 2018: Explora, Ciencia, Tecnología + Arte

llevada a cabo el día 7 de noviembre de 2018, en las Instalaciones del Centro de Convenciones del ICBC-CEART, Mexicali.

Mexicali, Baja California, noviembre de 2018

"POR LA REALIZACIÓN PLENA DEL HOMBRE"

Dra. Gisela Montero Alpírez
Directora Instituto de Ingeniería

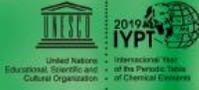
Dr. Daniel Hernández Balbuena
Director Facultad de Ingeniería

Dr. Ernesto Israel Santillán Anguiano
Director Facultad de Pedagogía e Innovación Educativa





SOCIEDAD QUÍMICA
DE MÉXICO, A.C.
"La química nos une"



Sociedad Química de México, A.C.

"La química nos une"

otorga la presente



Constancia

a

Luz Bibiana Sánchez Pérez

por su apoyo en la organización de la
Jornada Académica "Química sin fronteras"
en celebración del
Año Internacional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos

Mexicali, B.C., México, 26 de marzo de 2019

Dra. María del Jesús Rosales Hoz
Presidente Nacional
SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO, A.C.

Dr. Ignacio González-Martínez
Presidente Nacional Electo
SOCIEDAD QUÍMICA DE MÉXICO, A. C.