

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL AMBIENTE



ESTUDIO DEL POTENCIAL DE PLANTAS
SILVESTRES COMO BIOCOMBUSTIBLES

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN SISTEMAS DEL
AMBIENTE

PRESENTA:
JUAN ALBERTO FLORES AHUACTZIN

BAJO LA DIRECCIÓN DE:
DRA. CLAUDIA IRENE CALVARIO RIVERA
DR. RODOLFO ORTIZ ORTIZ

TUTORES:
DR. JOSÉ ROBERTO VILLAGÓMEZ IBARRA
DRA. PATRICIA LIMÓN HUITRÓN



TLAXCALA, TLAX., ENERO DE 2018.

Parte de esta tesis fue presentada en los siguientes eventos académicos:

- **Flores J.A.**, Villagómez J.R., López F.O. y Calvario C.I., (2016) Potencial de plantas silvestres para la elaboración de biocombustibles. III Encuentro Internacional sobre Biotecnología en la UATx. Tlaxcala, Tlax., 4-7 de diciembre.
- **Flores Ahuactzin J.A.**, Calvario Rivera C.I. Villagómez Ibarra J.R. y López Hernández F.O. (2016) Caracterización de *Flourensia resinosa*, una alternativa para la producción de biodiesel en México. 51° Congreso Mexicano de Química y 35° Congreso Nacional de Educación Química, Pachuca de Soto, Hidalgo, 27de septiembre-1 de octubre de 2016.
- **Flores J. A.**, Calvario I., Villagomez J. (2017) Plantas Silvestres: Una alternativa para la producción de biodiesel en México. XVI Congreso Internacional. XXII Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, ANCA, UAQR, Chetumal, Quintana Roo, 7-9 de junio.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Remedios Ahuactzin Munive, José Juan Flores Ahuactzin, a mi hermana Jasibeth Flores Ahuactzin, a mi compañera de aventura Enriqueta Ortiz Romano y a la Dra. Claudia Irene Calvario Rivera, por el apoyo incondicional, en todos los ámbitos, durante este periodo, de retos.

AGRADECIMIENTOS

Mi más grato agradecimiento al Dr. José Roberto Villagómez Ibarra, por hacerme parte de este proyecto, y permitírnos utilizar las instalaciones y equipos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Fue un enorme gusto y una gran satisfacción haber trabajado bajo su asesoramiento y adquirir parte de su gran conocimiento.

La pieza clave de este trabajo fue la Dra. Claudia Irene Calvario Rivera, a quien no me alcanzaría la vida, para agradecer todo lo que ha realizado por mí, nunca dejé de aprender de usted, es como una segunda madre, una mujer admirable y ejemplo a seguir.

Un agradecimiento especial es para mí director de tesis el Dr. Rodolfo Ortiz Ortiz, por su apoyo hacia mi proyecto y también por su apoyo a la institución.

También quiero agradecerle, a mi tutora de tesis Mtra. Patricia Limón Huitrón, por la confianza depositada, y su apoyo sobre mi proyecto.

La base fundamental de mi desarrollo fue el CIGYA, una institución que sigue creciendo, gracias a todo el personal que lo conforma, de quienes recibí su apoyo de diferentes maneras, ya que ayudaron a mi formación, por mencionar algunos; Dra; Libertad, Dra. Edelmira, Dra. Elizabeth, Dr. Oscar, Dra. Aline López López, Mtra. Emma Socorro Soto Mora etc.

Un agradecimiento a todos los jóvenes estudiantes de diferentes instituciones que se involucraron en mi proyecto realizando actividades que fortalecieron mi investigación y me desarrollaron como maestro, para poder transferirles mi conocimiento adquirido. Gracias al programa Interinstitucional de Investigación Delfín, que integró a mi proyecto estudiantes de la Universidad Autónoma de

Chiapas, la Universidad Politécnica Metropolitana, la Universidad Autónoma de Quintana Roo, el Instituto Tecnológico de Reynosa, por mencionar algunos.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	4
1.1	LOS BIOCOMBUSTIBLES.....	4
1.2	LOS BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN MÉXICO.....	6
1.2.1	Bioetanol.....	7
1.2.2	Bioturbosina.....	8
1.2.3	Biodiesel.....	9
1.3	PROPIEDADES DEL BIODIESEL.....	16
1.3.1	Densidad.....	17
1.3.1	Humedad.....	17
1.3.2	Viscosidad.....	19
1.3.3	Índice de saponificación.....	19
1.3.4	Índice de acidez.....	20
1.3.5	Índice de yodo (Iodine Value, IV).....	20
1.3.6	Punto de inflamación y de ignición.....	20
1.3.7	Índice de cetano.....	21
1.3.8	Punto de obturación del filtro en frío (POFF).....	21
1.4	GESTIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO.....	21
1.4.1	¿Es posible producir biocombustibles de manera sustentable en México?.....	23
2	ANTECEDENTES.....	26
2.1	OBTENCIÓN DE BIODIESEL UTILIZANDO CULTIVOS ENERGÉTICOS NO COMESTIBLES.....	26
2.1.1	<i>Jatropha curcas</i> : caso de éxito.....	28
2.1.2	Biodiesel a partir del aceite de karanja (<i>Pongamia pinnata</i>).....	29

2.1.3	Obtención de biodiesel a partir del aceite de Mahua (<i>Madhuca indica</i>)	30
2.1.4	Obtención de biocombustibles utilizando <i>Ricinus communis</i>	32
2.1.5	<i>Flourensia resinosa</i> y su potencial como cultivo energético	34
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	36
4	JUSTIFICACIÓN.....	38
5	OBJETIVOS.....	40
5.1	OBJETIVO GENERAL	40
5.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	40
6	METODOLOGÍA	42
6.1	MUESTREO DE <i>F. resinosa</i> y <i>R. communis</i>	42
6.2	EXTRACCIÓN DE LOS ACEITES DE <i>Flourensia resinosa</i> Y <i>Ricinus communis</i>	43
6.3	TRANSESTERIFICACIÓN DE LOS ACEITES DE <i>Flourensia resinosa</i> Y <i>Ricinus communis</i>	45
6.4	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE Y BIODIESEL DE <i>Flourensia resinosa</i> Y <i>Ricinus communis</i>	46
6.4.1	Color y apariencia.....	46
6.4.2	Densidad	46
6.4.3	Viscosidad cinemática	46
6.4.4	Índice de acidez.....	46
6.4.5	Prueba de corrosión de la lámina de cobre	47
6.4.6	Resonancia magnética nuclear de protones (RMN ¹ H)	48
6.5	SIMULACIÓN.....	48
6.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	49
7	RESULTADOS	50

7.1	EXTRACCIÓN DE ACEITES	50
7.2	EXTRACCIÓN DE ACEITE DE <i>Ricinus communis</i>	50
7.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES OBTENIDOS A PARTIR DE <i>F. resinosa</i> Y <i>R. communis</i>	51
7.3.1	Color y apariencia de los aceites	51
7.3.2	Densidad, viscosidad y pH de los aceites.....	51
7.4	REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN	52
7.5	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL	52
7.5.1	Determinación de pH, viscosidad y densidad	52
7.5.2	Índice de acidez.....	53
7.5.3	Prueba de corrosión	53
7.5.4	Resonancia magnética nuclear de protones (RMN ¹ H)	54
7.6	SIMULACIÓN.....	57
8	DISCUSIÓN.....	62
8.1	RENDIMIENTO DE LOS ACEITES VEGETALES DE ACUERDO AL TIPO DE SOLVENTE	62
8.2	CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES OBTENIDOS A PARTIR DE <i>F. resinosa</i> Y <i>R. communis</i>	63
8.2.1	Color, olor, apariencia, densidad y viscosidad.....	63
8.2.2	RMN ¹ H del aceite de <i>R. communis</i>	64
8.2.3	RMN ¹ H del aceite de <i>F. resinosa</i>	64
8.3	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL OBTENIDOS A PARTIR DE <i>F. resinosa</i> Y <i>R. communis</i>	65
8.3.1	Densidad	65
8.3.2	Viscosidad	66
8.3.3	Pruebas de corrosión en lámina de cobre	66

8.3.4	RMN ¹ H del biodiesel producido a partir de <i>F. resinosa</i> y <i>R. communis</i>	67
8.4	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE DE <i>R. communis</i> OBTENIDAS A PARTIR DE LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE ASPEN PLUS V8	68
8.4.1	Compuestos de los metil éster de ácidos grasos	68
8.4.2	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL BODIESEL DE ACEITE DE <i>Ricinus communis</i>	68
8.5	PRODUCCIÓN DE BODIESEL.....	69
8.6	COSTOS DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BODIESEL.....	70
9	CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	72
9.1	CONCLUSIONES.....	72
9.2	PERSPECTIVAS.....	72
10	BIBLIOGRAFÍA.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Arbusto, hojas y flor de <i>F. resinosa</i>	42
Figura 2. Semilla y planta de <i>R. comunnis</i>	42
Figura 3. Proceso de deshidratación de <i>F. resinosa</i>	43
Figura 4. Separación de la semilla de <i>R. comunnis</i>	43
Figura 5. Semilla de <i>R. comunnis</i> , con cáscara.....	44
Figura 6. Semilla de <i>R. comunnis</i> , sin cáscara.....	44
Figura 7. Molienda de <i>F. resinosa</i>	44
Figura 8. Molienda de <i>R. comunnis</i>	44
Figura 9. Proceso de filtración del aceite obtenido a partir de <i>R. comunnis</i>	44
Figura 10. Aceite extraído a partir de <i>F. resinosa</i>	44
Figura 11. Proceso de separación del biodiesel y la glicerina producidos a partir del aceite de <i>F. resinosa</i>	45
Figura 12. Proceso de separación del biodiesel y la glicerina producidos a partir del aceite de <i>R. communis</i>	45
Figura 13. Placa de cobre en prueba de corrosión.....	47
Figura 14. Placa patrón empleada para la prueba de corrosión.....	47
Figura 15. Placa de cromatografía de capa fina CCF.....	48
Figura 16. Tratamiento de yodo para CCF.....	48
Figura 17. Espectro de RMN ¹ H (400 MHz) del aceite <i>F. resinosa</i>	55
Figura 18. Espectro de RMN ¹ H (400 MHz) del aceite de <i>R. communis</i>	55
Figura 19. Espectro de RMN de biodiesel de <i>Flourensia resinosa</i>	56
Figura 20. Espectro de RMN de biodiesel de <i>R. communis</i>	57
Figura 21. Simulación del proceso a escala industrial para la producción de biodiesel a partir de las semillas de <i>R. communis</i> utilizando el software Aspen plus v8.8.....	58
Figura 22. Simulación en software Aspen plus v8.8.....	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Materias primas para la elaboración de biodiesel (Medina <i>et al.</i> , 2012)...	14
Tabla II. Reducción de emisiones por el uso de biodiesel (Villegas <i>et al.</i> , 2005)..	15
Tabla III. Litros de biodiesel producidos por hectárea de cultivo (Villegas <i>et al.</i> , 2005).....	16
Tabla IV. Normas comúnmente empleadas para regular la calidad del biodiesel y sus estándares de calidad.....	18
Tabla V. Valores del punto de obturación del filtro en frío (POFF) específicos de algunas zonas geográficas.....	22
Tabla VII. Porcentaje de aceite extraído en <i>F. resinosa</i> y <i>R. communis</i> en dos periodos de cosecha.	50
Tabla VIII. Extractos de aceite de <i>R. communis</i>	50
Tabla IX. Apariencia de los aceites obtenidos.....	51
Tabla X. Parámetros de los aceites obtenidos.	51
Tabla XI. Porcentaje de biodiesel extraído en <i>F. resinosa</i> y <i>R. communis</i> en dos periodos de cosecha a partir de 50 g (peso seco) de biomasa.	52
Tabla XII. Parámetros del biodiesel producido para las plantas cosechadas en distintos periodos.	53
Tabla XIII. Resultados de prueba de acidez.....	53
Tabla XIV. Resultados de prueba de corrosión en lámina de Cu.....	54
Tabla XIV. Porcentaje de ácidos grasos que contiene el aceite de <i>Ricinus communis</i> de acuerdo con Karleskind (1996).	58
Tabla XV. Composición teórica del biodiesel producido a partir del aceite <i>R. communis</i> , según la simulación mediante el Aspen Plus V8.....	59
Tabla XVI. Propiedades fisicoquímicas del biodiesel producido a partir del aceite de <i>R. communis</i> proporcionadas por la simulación en Aspen plus V8.	60
Tabla XVII. Balance de materiales y consumo energético para la producción de 1 ton de biodiesel proporcionados por la simulación en Aspen plus V8.....	60
Tabla XVIII. Balance de materiales y consumo energético para la producción de 1 ton de glicerina proporcionados por la simulación en Aspen plus V8.....	61

Tabla XIX. Costos de instalación y operación de la planta de producción de biodiesel proporcionadas por la simulación en Aspen plus V8..... 61

RESUMEN

Uno de los retos más grandes en la actualidad es el suministro de combustibles para las actividades cotidianas. Nuestro ritmo de vida y hábitos de consumo dependen en gran medida del petróleo, ya sea para la elaboración de productos cotidianos o para el transporte. Aunque en la actualidad se están desarrollando un gran número de exploraciones para conocer nuevos yacimientos de petróleo, estudios recientes indican que hemos pasado la media de la producción máxima que nos corresponde, y, justo ahora, estamos en el declive de la producción. Así mismo, se han estado buscando alternativas sustentables para el transporte, como lo son: autos solares y eléctricos, motores de hidrógeno y el uso de biocombustibles. Sin embargo, la mayoría de los vehículos que se utilizan en la actualidad tienen motores de combustión interna, por lo que una opción viable, sería el empleo de combustibles, como el biodiesel, que no implicará el rediseño total de la industria del transporte. Típicamente, los biocombustibles se pueden producir utilizando una amplia diversidad de materias primas, presentan grandes ventajas como son, menos emisiones de gases de efecto invernadero, creación de fuentes de empleo, generación de combustible de forma autosuficiente en los países, entre otras. Sin embargo, el uso de granos para su elaboración también puede ser una desventaja, ya que se necesitan extensas zonas de cultivo, o bien, el empleo de zonas agrícolas destinadas a la siembra de plantas para el consumo humano, además de cantidades relativamente altas de agua y el uso de fertilizantes. Debido a lo anterior, es importante realizar investigaciones, estudios y pruebas para la obtención de biocombustibles de alta eficiencia a partir de plantas silvestres que no requieran inversiones cuantiosas y no afecten la seguridad alimentaria, por lo que el objetivo de este trabajo consistió en estudiar semillas o granos de especies de plantas silvestres, para la obtención de biodiesel, tales como *Flourensia resinosa* y *Ricinus communis*, las cuales se desarrollan favorablemente bajo condiciones climáticas locales, lo que también minimizará el uso de insumos, grandes cantidades de agua, así como de tierras de cultivo destinadas a la producción de alimentos.

Palabras clave: Biocombustibles, Biodiesel, *Flourensia resinosa*, *Ricinus communis*.

ABSTRACT

One of the biggest challenges at the present time is the supply of fuel for everyday activities. Our rhythm of life and consumption habits depend to a great extent on oil, whether in the production of everyday products or in transportation. Although a large number of explorations are currently underway to discover new oil fields, recent studies indicate that we have passed the average of the maximum production that corresponds to us, and, right now, we are in the decline of production. Likewise, they have been looking for sustainable alternatives for transport, such as, solar and electric cars, hydrogen engines and the use of biofuels. However, most of the vehicles that are currently used have internal combustion engines, so a viable option is the use of fuels, such as biodiesel, which will not involve the complete redesign of the automotive industry. Typically, biofuels can be produced using a wide variety of raw materials, have great advantages such as, less greenhouse gas emissions, creation of employment sources, fuel generation in a self-sufficient way in the countries, among others. However, the use of grains for processing post-harvest, can also be a disadvantage, since there is a need for large areas of cultivation, or the use of agricultural areas for the production of plants for human consumption, in addition to large volumes of water and the use of fertilizers. Due to the above, it is important to conduct research, studies and tests to obtain high efficiency biofuels from wild plants that do not require large investments and do not affect food security. Thus, the objective of this work was to study the seeds or grains of wild plant species to obtain biodiesel; weeds like *Flourensia resinosa* and *Ricinus communis*, which grow well in local climatic conditions, also require lower use of inputs, smaller quantity of water, as well as of agricultural land destined to the production of food.

Key words: Biofuels, Biodiesel, *Flourensia resinosa*, *Ricinus communis*

1 INTRODUCCIÓN

El consumo de petróleo en el mundo no ha dejado de crecer desde que empezó a extenderse su uso a finales del siglo XIX. La tasa de crecimiento del consumo de energía ha hecho incrementar constantemente la demanda anual de petróleo, que llegó a ser, en el año 1972, del 48% del total. En el año 1998, el porcentaje que el petróleo representaba en el consumo mundial de energía primaria se había reducido hasta el 40%, debido a la expansión del gas natural y de la energía nuclear. Pero el número de toneladas consumidas continuaba en aumento y llegaba a los 3.400 millones de toneladas (López *et al.*, 2006).

El aumento del precio de los productos del petróleo, las perspectivas de agotamiento de los combustibles fósiles, las crecientes preocupaciones ambientales, en particular las relacionadas con las emisiones de gases de efecto invernadero, y consideraciones de salud y de seguridad hacen imperativa la búsqueda de nuevas fuentes de energía y de formas alternativas de propulsar los medios convencionales de transporte en el mundo. Los biocombustibles obtenidos a partir de biomasa, pueden constituir una alternativa prometedora. Según algunas estimaciones, la sustitución para 2020 de hasta un 20% de los combustibles minerales consumidos en todo el mundo es un objetivo viable (Zarille, 2006).

1.1 LOS BIOCOMBUSTIBLES

Los biocombustibles son recursos energéticos, a partir de materias a las cuales se les denomina “biomasa”. Pueden ser líquidos, sólidos o gaseosos, y su finalidad es liberar la energía contenida en sus componentes mediante una reacción de combustión (García y Masera, 2016).

De acuerdo a Álvarez (2009), los biocombustibles se pueden clasificar con base en la materia prima o la tecnología empleada para su obtención:

Biocombustibles de primera generación: La materia prima es de procedencia agrícola y está conformada principalmente por cultivos agrícolas comestibles, estas tienen un alto contenido de almidón, azúcares y aceites. Ejemplos de este tipo de materia prima son: el jugo de la caña de azúcar, granos de maíz, jugo de betabel, aceite de semilla de girasol, aceite de soya, aceite de palma, aceite de ricino, aceite de semilla de algodón, aceite de coco, aceite de maní o cacahuate, entre otros. También se utiliza como materia prima, a las grasas animales, grasas y aceites de desecho generados en la cocción y en la elaboración de alimentos, y desperdicios sólidos orgánicos. Los biocombustibles son producidos utilizando procesos como la fermentación (para azúcares y carbohidratos), transesterificación (para los aceites y grasas), y la digestión anaerobia (para los desperdicios orgánicos). De estos procesos se obtiene etanol, metanol y n-butanol (a partir de azúcares), biodiesel (a partir de los aceites), y biogás (a partir de los desperdicios orgánicos).

Biocombustibles de segunda generación: La materia prima utilizada son residuos agrícolas y forestales, que están compuestos por celulosa. Ejemplos de estos son; el bagazo de la caña de azúcar, el rastrojo de maíz (tallos, hojas y olote), paja de trigo, aserrín, hojas y ramas secas de árboles, entre otros. Los procesos de producción son más complejos que los de primera generación, como la sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch; este último es conocido también como proceso GTL y proceso BTL, por sus siglas en inglés “Gas-To-Liquids” y “Biomass-To-Liquids”, ambos, consisten en la gasificación del carbón y de la materia lignocelulósica de la biomasa, para después sintetizar algún combustible líquido como el etanol. Mediante los procesos de segunda generación se fabrica etanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de anhídrido carbonoso, mejor conocido como monóxido de carbono, e hidrógeno), biodiesel, entre otros.

Biocombustibles de tercera generación: La materia prima utilizada en este caso, consiste de vegetales no comestibles de crecimiento rápido y con una alta densidad energética almacenada en sus componentes químicos, por lo que se les

conoce como: “cultivos energéticos”. Entre estos vegetales están los pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido, así como las algas verdes y verde azules. Aunque los procesos de obtención de biocombustibles se encuentran en desarrollo, ya se ha producido biodiesel y etanol en plantas piloto.

Biocombustibles de cuarta generación: Esta generación de biocombustibles está en fase teórica, sólo se conoce la posible ruta de síntesis del etanol utilizando anhídrido carbónico, sin embargo, depende de la información genética de una bacteria artificial y puede tener limitaciones termodinámicas.

1.2 LOS BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN MÉXICO

La siembra de cultivos energéticos puede impactar favorablemente las áreas agrícolas y rurales de México, ya que los productores podrán disponer de otras alternativas al obtener mayores recursos por la venta de insumos para la producción de biocombustibles, generación de empleos tanto en el campo como en la industria, lo que además de mejorar su calidad de vida, disminuiría la típica migración de las familias mexicanas (Zamarripa, 2011). La producción de biocombustibles resulta relativamente económica en lo que respecta al tipo de materias primas utilizadas, sin embargo, dicho proceso ha recibido una fuerte crítica debido a la competencia que tiene con la industria alimenticia, como en el caso de la utilización de maíz, soya y caña. En México, el maíz se produce en todas las regiones agrícolas del país, representa el principal alimento de los mexicanos, con un consumo promedio de alrededor de 500 g por persona/d (Arvizu, 2011). Según los Fideicomisos Instituidos en Relación a la Agricultura (FIRA, 2017), tan solo durante el ciclo comercial 2016/2017 el consumo nacional de maíz se estimó en alrededor de 39.6 millones de ton, mientras que durante el 2016 se importaron 12.36 millones de ton, principalmente a Estados Unidos. Se proyecta que el consumo per cápita mundial aumentará a 19.54 kg para el 2025. Debido a lo anterior, resulta necesario, encontrar sustitutos que no entren en conflicto con la seguridad alimentaria.

1.2.1 Bioetanol

El alcohol etílico o etanol puede obtenerse químicamente a partir del etileno o bioquímicamente a través de azúcares fermentables, derivados del almidón, celulosa y polisacáridos y otras formas de biomasa; a este último se le conoce como bioetanol y su uso como combustible para automotores se remonta a inicios del siglo XX, sin embargo, dado que el petróleo tenía un costo relativamente bajo en esa época, no se le dio importancia. En años recientes, debido a la disminución de las reservas de petróleo, y los problemas medioambientales causados por los combustibles fósiles, el bioetanol retomó importancia a nivel global (Amaya *et al.*, 2016).

El bioetanol se utiliza principalmente en mezclas con gasolina y presenta ventajas tales como, mayor octanaje, es un oxigenante que no tiene impactos negativos en la salud y el ambiente como el éter metil terbutílico (MTBE). El etanol hidratado se utiliza en automóviles flex-fuel, mientras que el etanol anhidro en mezclas del 5% al 85% (v/v) con gasolina, en motores convencionales. En mezclas E5 y E10 sustituye a oxigenantes y antidetonantes como el MTBE y el teramil metil éter (TAME). Una desventaja del etanol es que su poder calorífico tiende a ser un 30% menor al de la gasolina (26 MJ/kg contra 38 MJ/kg, o 23 MJ/L contra 32 MJ/L). Esto hace también que el punto de equilibrio energético para sustituir gasolina por etanol corresponda a una relación gravimétrica de 1.4:1 (Amaya *et al.*, 2016). Típicamente el bioetanol se produce a partir de maíz amarillo o de la caña de azúcar (como es el caso de Brasil) utilizando un proceso bioquímico convencional que se basa en la conversión de la biomasa en azúcares fermentables, la fermentación de estos azúcares y la posterior separación y purificación del bioetanol. A este proceso se le conoce como de primera generación (González y Brugués, 2010).

Debido a los altos costos de la materia prima empleada en la producción de etanol, así como por el tema de la sustentabilidad, se han sugerido otras fuentes de biomasa, tales como los residuos provenientes de otras actividades o procesos. A la producción de etanol a partir de dichos residuos se le denomina de segunda generación y se contemplan cinco etapas: pretratamiento de la biomasa; hidrólisis de celulosa y hemicelulosa; fermentación; separación y tratamiento de efluentes (Mäser *et al.*, 2011). Entre las principales materias primas de este tipo encontramos a los rastrojos de los cultivos, bagazo de caña, biomasa residual del aprovechamiento forestal y residuos sólidos municipales (Amaya *et al.*, 2016).

1.2.2 Bioturbosina

La bioturbosina está formada por hidrocarburos en el intervalo de 8 a 16 átomos de C, principalmente parafinas ramificadas con puntos de fusión muy bajos, lo cual es necesario para cumplir con una de las especificaciones más exigentes, como lo es la temperatura de congelamiento que se requiere, de -47 °C, según la norma ASTM D7566-b (ASTM, 2014). De acuerdo con la ASTM, existen tres procesos certificados para la producción de bioturbosina que se puede utilizar en mezclas con turbosina elaborada a partir de petróleo.

- 1) **Proceso de Fischer Tropsch (FT-SPK)**. El rendimiento de bioturbosina es relativamente bajo, por lo que generalmente este proceso no se orienta hacia su producción. (Güell *et al.*, 2012). Presenta como ventaja una gran flexibilidad en cuanto a la materia prima que puede ser procesada (cualquier tipo de materia orgánica), desde residuos agrícolas hasta desechos municipales. La bioturbosina obtenida por FT puede mezclarse con turbosina fósil hasta en un 50% (Amaya *et al.*, 2016).
- 2) **Hidroprocesamiento de ácidos grasos y sus ésteres (*Hydrotreated Esters and Fatty Acids*, HEFA)**. Es una adaptación del hidrotatamiento usado comúnmente en la industria de la refinación del petróleo. En el caso

de la producción de bioturbosina se utilizan aceites y grasas como materia prima, con lo que también se puede obtener diésel renovable. Al igual que en el proceso anterior, la bioturbosina que aquí se obtiene puede mezclarse hasta en un 50% con turbosina de petróleo. Se pueden emplear diversos aceites vegetales, grasas animales, aceite de pescado, aceite de cocina usado y aceite de microalgas. Los principales inconvenientes de esta tecnología son los altos costos de inversión y que el precio de la materia prima aún es elevado (Amaya *et al.*, 2016).

- 3) **Proceso de hidrotreamiento de las parafinas obtenidas por fermentación de azúcares (*Synthetic Iso-paraffin from Fermented Hydroprocessed Sugar, SIP*)**. Previamente había sido referida como Direct-Sugar-to-Hydrocarbon. Es un proceso de fermentación en el que se transforman azúcares en uno de los isómeros del farneseno el cual es un sesquiterpeno (de 15 carbonos) de naturaleza volátil miembro de los terpenoides, que presenta varias insaturaciones y grupos metilo en su estructura; al ser obtenido se le somete a un proceso de hidrogenación para saturar los dobles enlaces y obtener una bioturbosina constituida por una sola isoparafina, por lo que la cantidad en la que se puede mezclar con turbosina de petróleo se limita al 10% (Amaya *et al.*, 2016).

Además de las rutas tecnológicas mencionadas, existen otras que están siendo investigadas y evaluadas de manera intensiva como el *alcohol to jet* (ATJ).

1.2.3 Biodiesel

El proceso de producción de biodiesel inicia con el prensado de las semillas o la extracción de los aceites vegetales empleando solventes. La compresión se realiza con prensas continuas de tornillo que pueden trabajar con o sin calentamiento. Para una extracción óptima se combina el uso de solventes como el hexano comercial. Luego de ser extraído, generalmente, el aceite pasa por un

proceso de refinado, para lo cual se emplea álcali para eliminar los ácidos grasos libres (*Free Fatty Acid*, FFA), la materia colorante y los mucílagos, lo que deja como subproducto las llamadas tortas de material sólido, ricas en contenido proteico (Amaya *et al.*, 2016). El aceite, una vez extraído y refinado, pasa a la fase de esterificación, donde se refinan los ácidos grasos libres. En la reacción de transesterificación en donde un triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina.

Para que la reacción se lleve a cabo, son necesarios tres moles de alcohol por cada mol de triglicérido y la conversión de equilibrio de este proceso es usualmente a temperaturas de alrededor de 60°C.

En la práctica se utiliza siempre exceso de alcohol, además de que, a mayor cantidad de ácidos grasos libres y agua en los reactivos, se necesitará más NaOH para neutralizar los ácidos grasos libres y reaccionar con los triglicéridos (Ma *et al.*, 1999). Una vez que ha terminado la reacción de transesterificación, se forman dos nuevas fases: la superior, constituida básicamente por ésteres (biodiesel), y la inferior, compuesta principalmente por glicerol (Amaya *et al.*, 2016). La glicerina como producto secundario tiene una gran utilidad en la industria farmacéutica y cosmética si se purifica adecuadamente, ya que la presencia de agua, jabones, metanol, ácidos grasos e impurezas sólidas pueden hacer el proceso de purificación complejo y costoso; así mismo, su demanda es elevada, por lo que se le considera un subproducto altamente valorado (Castro *et al.*, 2006).

Los alcoholes comúnmente utilizados en el proceso de producción de biodiesel son el metanol y el etanol, si bien los aspectos técnicos son importantes, la elección del tipo de alcohol se basa en el costo. En el caso del metanol presenta algunas ventajas sobre el etanol, ya que se requiere menor cantidad, su eficiencia de conversión de aceites es mayor, las temperaturas de reacción requeridas son menores, y tanto su recuperación, como la separación de fases son más sencillas (Amaya *et al.*, 2016). Algunas de sus desventajas son su toxicidad y su poder

corrosivo. El etanol, por el contrario, puede ser producido a partir de fuentes renovables y no es tóxico. Para optimizar en tiempo y rendimiento la reacción de transesterificación se utiliza normalmente un catalizador, el cual puede ser básico, ácido o enzimático. El proceso de purificación comúnmente empleado involucra varias etapas (Bouaid *et al.*, 2005; Gerpen van *et al.*, 2004):

- 1) **Separación de fases.** Los productos más abundantes son la glicerina y los ésteres. Con base en la diferencia entre sus densidades, 0.83 g/cm³ en el caso de los ésteres y 1.05 g/cm³ se puede realizar la separación de fases mediante gravedad empleando un decantador.
- 2) **Lavado de biodiesel.** Los ésteres se lavan por medio de aspersion con agua templada (50 a 60 °C), con la finalidad de remover la presencia de catalizador, jabón y glicerol libre.
- 3) **Secado.** Finalmente, se calienta el biodiesel a temperaturas mayores al punto de ebullición del agua, para garantizar la eliminación del agua por evaporación.
- 4) **Recuperación del alcohol.** El exceso de alcohol puede ser recuperado para su reutilización por medio de destilación flash (Bouaid *et al.*, 2005).
- 5) **Control de calidad.** Para que el biodiesel sea aceptado como combustible, debe de cumplir con todas las especificaciones que establece la normatividad vigente, por lo que se realizan las diferentes pruebas de caracterización que determinan la calidad del producto obtenido (ASTM, 2012).

Aunque en la actualidad, diversas tecnologías pueden combinarse de diferentes maneras aplicando variaciones a las condiciones del proceso y la alimentación del mismo, todas se basan en los fundamentos ya mencionados. La elección más adecuada se basa en la capacidad de producción deseada, calidad, alimentación,

recuperación del alcohol y catalizador (Amaya *et al.*, 2016). Las plantas de menor capacidad con una calidad heterogénea en la alimentación comúnmente emplean procesos discontinuos, mientras que las de mayor capacidad y que requieren una alimentación más homogénea utilizan procesos continuos.

En los últimos años, la catálisis enzimática ha avanzado considerablemente, las enzimas que naturalmente trabajan sobre grasas y aceites tienen la ventaja de ser catalizadores seguros y ecológicos, además de catalizar reacciones tanto de transesterificación como de esterificación. Su gran utilidad resalta cuando se utilizan aceites con altos contenidos de ácidos grasos libres. Si bien su costo relativamente alto es considerado como una desventaja, su adecuado manejo permite que se reciclen a través de la inmovilización. Aún falta experiencia en cuanto a la optimización de los parámetros de operación de estos biocatalizadores (Amaya *et al.*, 2016).

Otra forma de producir aceites es a partir de microalgas. El proceso general consta de las siguientes etapas:

- 1) Selección de la cepa.** Se deben considerar factores como la velocidad de crecimiento, la cantidad y calidad lipídica, la respuesta a alteraciones del ambiente (variaciones de temperatura), entrada de nutrientes y fuente lumínica, así como la competencia entre especies de microalgas o bacterias, la velocidad de absorción y afinidad por nutrientes (CO₂, N y P) y un cultivo de biomasa sencillo para su posterior procesamiento (Fernández-Linares *et al.*, 2012).

- 2) Cultivo.** Los sistemas abiertos son los más empleados en la producción de biomasa microalgal ya que es lo más parecido a su entorno natural. Su construcción y operación son relativamente económicas; aunque es común que presenten problemas de baja productividad debido a agentes contaminantes, mezclado deficiente (lo que genera zonas muertas),

penetración limitada de la luz, pérdida de agua por evaporación y bajas tasas de fijación de CO₂ (Chisti, 2007; Garibay Hernández *et al.*, 2009; Mata *et al.*, 2010). Los sistemas cerrados (fotobiorreactores), son más eficientes debido a que se tiene más control sobre las condiciones de cultivo, pueden mejorar la transferencia de masa en la absorción del CO₂, y se le puede estabilizar a carbonatos mediante soluciones alcalinas para luego ser fijado por las microalgas (Chen *et al.*, 2015). El consumo de nutrientes inorgánicos (N y P) y la energía requerida para llevar a cabo la agitación mecánica elevan considerablemente los costos (Chen *et al.*, 2015).

- 3) Cosecha.** La cosecha de microalgas se puede dividir en una o dos etapas. La floculación es el primer método de recolección que está destinado a agregar las células de microalgas con el fin de aumentar el tamaño efectivo de partículas. Los floculantes más adecuados son las sales de metales multivalentes como el FeCl₃, Al₂(SO₄)₃ y Fe₂(SO₄)₃. Recientemente se han desarrollado nuevas tecnologías de floculación como la inducida por microorganismos, sustancias poliméricas extracelulares o biofloculantes (Brennan y Owende, 2010; Gerardo *et al.*, 2015; Pragya *et al.*, 2013). Otros métodos tradicionales incluyen la sedimentación, centrifugación y filtración.

- 4) Extracción de lípidos.** Se realiza mediante métodos físicos o químicos, o una combinación de ambos. El método utilizado debe ser rápido, fácilmente escalable, eficaz y no debe dañar los lípidos extraídos. El proceso de extracción debe ser selectivo hacia las fracciones lipídicas deseables ya que no todos los lípidos son adecuados para la producción de biocombustibles, además de que las fracciones no lipídicas se extraen junto con los lípidos. Se deben tener en cuenta los costos extras derivados de gastos adicionales por energía. Otra fuente de triglicéridos son los aceites microbianos, que provienen de microorganismos oleaginosos que acumulan 20% o más de su peso seco como triglicéridos. Debido a que su

composición es similar a la de los aceites vegetales se les considera una fuente viable para producir biodiesel en el futuro.

También se ha elaborado biodiesel a partir de productos renovables, como las grasas animales y los aceites vegetales derivados de plantas oleaginosas, tales como soya, colza, cacahuate, girasol, higuierilla (*Jatropha curcas*), entre otras; así como de las grasas y aceites de cocina reciclados (Villegas *et al.*, 2005). En la tabla I se muestra un resumen de las materias primas que se han empleado para la elaboración de biodiesel.

Tabla I. Materias primas para la elaboración de biodiesel (Medina *et al.*, 2012).

Aceites vegetales convencionales	Aceites vegetales alternativos	Otras fuentes
Aceite de girasol	Aceite de <i>Brassica carinata</i>	Aceite de semillas modificadas genéticamente
Aceite de colza	Aceite de <i>Cynara cardunculus</i>	Grasas animales
Aceite de soya	Aceite de <i>Carmelina sativa</i>	Aceite de fritura usados
Aceite de coco	Aceite de <i>Crambe abyssinica</i>	Aceites producidos por microorganismos y microalgas
Aceite de palma	Aceite de <i>Pogianus</i>	
	Aceite <i>Jatropha curcas</i>	

El biodiesel puede llegar a ser un combustible puro, además de ser biodegradable y no tóxico, casi libre de azufre y compuestos aromáticos. Entre los beneficios que se obtienen de la producción de biodiesel para fines energéticos se considera la emisión casi nula de CO₂, uno de los dos principales responsables del calentamiento global y cambio climático. Villegas *et al.* (2001) mencionan que el uso del biodiesel reduce considerablemente la emisión tanto de GEI's como de otras sustancias altamente carcinogénicas (Tabla II).

Tabla II. Reducción de emisiones por el uso de biodiesel (Villegas *et al.*, 2005).

Sustancia	Reducción de emisión
CO ₂	95 -100 %
SO ₂	100 %
Hollín	40 – 60 %
Hidrocarburos (HC)	10 – 50 %
CO	10 – 50 %
Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP's)	10 – 50 %
Sustancias de comprobada acción cancerígena	
Fenantreno	97 %
Benzofluorantreno	56 %
Benzopirenos	71 %
Compuestos aromáticos y aldehídos	13 %
Óxido nitroso (NOx)	5 – 10 % ^{*1}

^{*1} Se reducen o aumentan de acuerdo con el desgaste del motor y la calibración de la bomba de inyección.

Otras ventajas operativas y técnicas del biodiesel con respecto al diésel son:

- 1) Es altamente biodegradable comparado con la dextrosa, ya que contiene azufre lo cual permite el uso de catalizadores para mejorar la combustión y minimizar los gases generados. En la tabla III se muestran los diferentes compuestos y su reducción porcentual de emisión al usar biodiesel en lugar del diésel derivado del petróleo (Fukuda *et al.*, 2001).
- 2) La producción de biodiesel puede representar grandes ventajas socioeconómicas, por ejemplo, en términos de microeconomía los productores agropecuarios podrían autoabastecerse de combustible, mientras que, en términos de macroeconomía, se podría cubrir una gran parte de la dependencia que tienen los países agro-productores al abastecimiento de combustibles fósiles por parte de los países productores de petróleo.
- 3) La producción de biodiesel admite una amplia variedad de aceite vegetales, de tal forma que puede encontrarse el cultivo ideal para el clima específico de la localidad, las posibilidades van desde la jojoba de climas desérticos hasta el aceite de coco y palma de climas tropicales. Los litros de biodiesel

que pueden obtenerse por hectárea, a partir de cada uno de los cultivos oleaginosos que comúnmente se cultivan en países en vías de desarrollo se resumen en la tabla III (Villegas *et al.*, 2005):

Tabla III. Litros de biodiesel producidos por hectárea de cultivo (Villegas *et al.*, 2005).

Cultivo	Biodiesel producido (L/ha)
Soya (<i>Glicine max</i>)	420
Arroz (<i>Oriza sativa</i>)	770
Tung (<i>Leurites fordii</i>)	880
Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)	890
Mani (<i>Arachis hipogaea</i>)	990
Colza (<i>Brassica napus</i>)	1100
Ricino (<i>Ricinus communis</i>)	1320
Jatropha (<i>Jatropha curcas</i>)	1590
Aguacate (<i>Persea americana</i>)	2460
Coco (<i>Cocos nucifera</i>)	2510
Cocotero (<i>Acrocomia aculeata</i>)	4200
Palma (<i>Elaeis guineensis</i>)	5550

1.3 PROPIEDADES DEL BIODIESEL

Las propiedades físicas y químicas del biodiesel son muy diversas ya que dependen de la composición de la materia prima (Hoekman *et al.*, 2012). Alrededor del mundo tanto los fabricantes de motores como las plantas de biodiesel emplean estándares de calidad ligeramente diferentes para el biodiesel. En la tabla IV se muestra un resumen de las normas comúnmente empleadas y sus estándares de calidad, para ésteres metílicos de ácidos grasos (*Fatty Acid Methyl Esters*, FAMES), alquil ésteres de ácidos grasos (*Fatty Acid Alkyl Ester*, FAAE) y diésel de petróleo

Existen varios factores que deben tenerse en cuenta para el almacenamiento de biodiesel, como la temperatura de exposición (7-10 °C), la estabilidad a la oxidación y la compatibilidad de los materiales. La temperatura se debe controlar para evitar la formación de cristales que pueden obstruir las líneas y los filtros de combustible. En climas extremadamente fríos, el biodiesel puro se almacena de forma subterránea. La estabilidad es necesaria ya que un aumento de la acidez y

de la viscosidad del combustible provoca la formación de gomas y sedimentos. Cuando el almacenamiento sea superior a seis meses, se recomienda el uso de aditivos antioxidantes. El contenido de humedad debe reducirse al mínimo para evitar la proliferación de microorganismos, en caso contrario, se sugiere el uso de biocidas. Los tanques de almacenamiento deberán estar elaborados con aluminio, acero, teflón y polietileno o polipropileno fluorado y evitar la contaminación con agua (Leung *et al.*, 2010).

1.3.1 Densidad

Debido a la precisión en la cantidad de combustible que se debe inyectar en el sistema de un motor, se le considera una de las propiedades más importantes (Dzida y Prusakiewicz, 2008). La densidad del biodiesel dependerá del contenido en ésteres y la cantidad de alcohol remanente, por lo tanto, esta propiedad viene determinada fundamentalmente por el aceite vegetal elegido y, en cierta medida, por las etapas de purificación aplicadas (Predojević, 2008).

1.3.1 Humedad

Durante la etapa del lavado de biodiesel se emplea agua y aunque posteriormente se elimina queda un contenido de humedad residual. A escala industrial, la deshidratación se realiza generalmente mediante destilación en vacío a 5 kPa y a temperaturas entre los 30 y los 40 °C, lo que disminuye considerablemente el contenido de agua (Predojević, 2008). Los ésteres metílicos son más higroscópicos que los combustibles a base de petróleo, durante el almacenamiento pueden absorber agua hasta alcanzar una concentración de alrededor de 1000 ppm (Vicente, 2012), por arriba de ese valor, se propicia la acumulación de agua en los tanques de almacenamiento. El exceso de agua, además de promover el crecimiento de microorganismos degradadores de biodiesel, afecta el

Tabla IV. Normas comúnmente empleadas para regular la calidad del biodiesel y sus estándares de calidad.

Estándares para el biodiesel	Unidades	Norma EN 14214:2008 (EUROPA)	Norma ASTM D 6751-07b (USA)	Norma EN 590:1999
		Aplica para		
		FAME	FAAE	Diésel
Densidad a 15°C	g/cm ³	0.86-0.90		0.82-0.845
Viscosidad a 40°C	mm ² /s	3.5-5.0	1.9-6.0	2.0-4.5
Destilación	% @ °C		90%,360°C	85%,350°C - 95%,360°C
Punto de inflamabilidad	°C	101 min	93 min	55 min
Punto de obturación del filtro frío (POFF)	°C	*Específico del país		*Específico del país
Punto de inflamación	°C		*Reportado	
S	mg/kg	10 max	15 max	350 max
Residuos carbonosos Conradson (CCR 100%)	%(m/m)		0.05 max	
Residuos de carbono (10%)	%(m/m)	0.3 max		0.3 max
Cenizas sulfatadas	%(m/m)	0.02 max	0.02 max	
Cenizas de óxido	%(m/m)			0.1 max
Agua	mg/kg	500 max	500 max	200 max
Contaminación total	mg/kg	24 max		24 max
Corrosión de Cu max	3h/50°C	1	3	1
Estabilidad oxidativa	hrs;110°C	6 h min	3 h min	N/A (25 g/m ³)
Número de cetano		51 min	47 min	51 min
Valor ácido	mgKOH/g	0.5 max	0.5 max	
Metanol	%(m/m)	0.20 max	0.2 max o Fp <130°C	
Contenido de ésteres	%(m/m)	96.5 min		
Monoglicéridos	%(m/m)	0.8 max		
Diglicéridos	%(m/m)	0.2 max		
Triglicéridos	%(m/m)	0.2 max		
Glicerol libre	%(m/m)	0.02 max	0.02 max	
Glicerol total	%(m/m)	0.25 max	0.24 max	
Índice de yodo (IV)	%(m/m)	120 max		
Ácido linolénico de metil ésteres	%(m/m)	12 max		
Ésteres insaturados	%(m/m)	1 max		
P	mg/kg	4 max	10 max	
Alcalinidad	mg/kg			
Metales del gpo. IA (Na, K)	mg/kg	5 max	5 max	
Metales del gpo. IIA (Ca, Mg)	mg/kg	5 max	5 max	
HAP's	%mass			11 max
Lubricidad/Desgaste	µm at 60°C			460 max

funcionamiento del motor debido a la producción de lodos que pueden causar taponamiento en el sistema (Mittelbach,1996), o bien puede causar la corrosión del motor o reaccionar con glicéridos para producir jabones y glicerina.

1.3.2 Viscosidad

La viscosidad afecta a la atomización del combustible cuando se inyecta a la cámara de combustión. Una viscosidad fuera de rango puede llevar a la formación de depósitos en el motor (Peña *et al.*, 2008). Es la principal razón de la transesterificación, ya que este proceso permite que la viscosidad del biodiesel se reduzca sustancialmente (Canoira *et al.*, 2010). La viscosidad aumenta con el número de átomos de carbono y con el grado de saturación, por lo que los ésteres etílicos presentan una viscosidad ligeramente superior a la de los ésteres metílicos. La configuración de los dobles enlaces también influye en la viscosidad, ya que una configuración de doble enlace *cis* da una viscosidad inferior que una *trans*, mientras que la posición de doble enlace afecta en menor medida (Knothe, 2005).

1.3.3 Índice de saponificación

El índice de saponificación representa los miligramos de KOH necesarios para saponificar un gramo de biodiesel. Se relaciona con la masa molecular promedio de la muestra y depende básicamente de la materia prima utilizada en la transesterificación, más no de las condiciones del proceso. Durante la reacción sólo se produce el cambio de glicerina por el alcohol utilizado, por lo que los ácidos presentes en los triglicéridos y en los ésteres alquílicos continúan siendo los mismos, por lo tanto, la masa molecular promedio no cambia de manera significativa, en consecuencia, el índice de saponificación de los ésteres metílicos no se modifica considerablemente respecto al aceite inicial (Mittelbach, 1996).

1.3.4 Índice de acidez

Este parámetro refleja la concentración de ácidos grasos libres, los cuales, al ser degradados incrementan la presencia de depósitos en el combustible que reducen la vida útil de la bomba y los filtros en los motores (Ma y Hanna, 1999).

1.3.5 Índice de yodo (Iodine Value, IV)

Este parámetro depende del aceite vegetal de origen. Se obtiene midiendo la masa de yodo adsorbido por cada 100 g de muestra, y se relaciona con el nivel de insaturación presente en el aceite. A mayor contenido en insaturaciones, mayor será el IV (Albuquerque *et al.*, 2009). Debido a la gran capacidad calorífica de los ácidos grasos, es necesario controlar el valor del IV, ya que se puede propiciar la polimerización de los glicéridos, lo que formaría depósitos y el deterioro del aceite lubricante, así como el engrosamiento de las paredes de los conductos del motor. En el diésel de petróleo se maneja un IV menor a 10, mientras que, en el caso del biodiesel, suele ser superior (Lang *et al.*, 2001).

1.3.6 Punto de inflamación y de ignición

Es un parámetro a considerar en el manejo, almacenamiento y seguridad de materiales inflamables, refleja la tendencia de una muestra a formar mezclas inflamables con aire en condiciones controladas de laboratorio. Los aceites vegetales, por lo regular, tienen altos puntos de inflamación que se reducen durante la transesterificación (Vicente, 2012). Un bajo punto de inflamación puede indicar presencia de metanol en el biodiesel (Dias *et al.*, 2008). En cuanto al punto de ignición, es un parámetro que indica la temperatura a la cual una sustancia comienza a arder y se mantiene sin necesidad de añadir calor exterior, esta suele ser superior a la del punto de inflamación.

1.3.7 Índice de cetano

Es un parámetro que depende del aceite vegetal de origen. Es muy importante debido a que indica la calidad del biodiesel, se define como una función de la densidad del combustible y su volatilidad. A mayor índice de cetano, mayor control de la combustión y rendimiento, además de que se mejora el arranque en frío y disminuyen los gases de escape (Encinar *et al.*, 2007). Aumenta a medida que las cadenas de los ácidos grasos contienen mayor número de átomos de C y con el contenido en ésteres saturados (Evera *et al.*, 2009).

1.3.8 Punto de obturación del filtro en frío (POFF)

Es la temperatura a la cual el combustible no fluye a través de un filtro de una malla de alambre dentro de un tiempo determinado. Una de las desventajas del biodiesel es su limitada capacidad de flujo a baja temperatura. Este parámetro está relacionado con el arranque del motor en frío, y debe ser lo suficientemente bajo para evitar el congelamiento del biodiesel. Debido a las cantidades elevadas de ésteres de ácidos grasos saturados (Mittelbach, 1996). Este valor varía según la región geográfica (Tabla 5).

1.4 GESTIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO

Durante el 2010 se emitieron a la atmósfera 493,450.6 Gg CO₂, según el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI's), (INE, 2013) lo que representa un 65.9% de los GEI's; de los cuales el 82.1 % fue proveniente del consumo de combustibles fósiles que se utilizan en motores de combustión interna. Uno de los combustibles más consumidos en México es el diésel, tan solo durante el 2016, el Sistema de Información Energética de la Secretaría de Energía (SIE-SENER) reportó que se consumieron en nuestro país alrededor de 472,621,564.25 gal, y en el futuro, los requerimientos energéticos serán mayores y, por ende, las emisiones de GEI's incrementarán considerablemente. Es indispensable intervenir en el marco legal del país con la

finalidad de prevenir el deterioro del medio ambiente, debido a las emisiones contaminantes provenientes del consumo de combustibles fósiles.

Tabla V. Valores del punto de obturación del filtro en frío (POFF) específicos de algunas zonas geográficas.

País	Norma	Estación	Max P (°C)
Reino Unido	BS EN 14214	Verano	-5°C
		Invierno	-15°C
Austria	ÖNORM EN 14214	Verano	+5°C
		Invierno	-20°C
		Primavera	-15°C
Estonia	EVS EN 14214	Verano	-5°C
		Invierno	-26°C
Francia	NF EN 14214	Verano	0°C
		Invierno	-15°C
Alemania	DIN EN 14214	Verano	0°C
		Invierno	-20°C
		Primavera	-10°C
		Otoño	-10°C
Grecia	ELOT EN 14214	Verano	+5°C
		Invierno	-5°C
Irlanda	IS EN 14214	Verano	-5°C
		Invierno	-15°C
Italia	UNI EN 14214	Verano	0°C
		Invierno	-10°C
Países Bajos	NEN EN 14214	Verano	0°C
		Invierno	-15°C
		Resto del año	-5°C
Portugal	NP EN 14214	Verano	0°C
		Invierno	-10°C
		Primavera	-5°C
España	UNE EN 14214	Verano	0°C
		Invierno	-10°C

A partir del 2008, en México entró en vigor la nueva Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, que tiene como objeto “la promoción y desarrollo de los bioenergéticos con el fin de coadyuvar a la diversificación energética y el desarrollo sustentable como condiciones que permitan garantizar el apoyo al

campo mexicano y establecer las bases para: 1) promover la producción de insumos para bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país; 2) desarrollar la producción, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos para contribuir a la reactivación del sector rural y la generación de empleos, procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y de gases de efecto invernadero, utilizando para ello los instrumentos internacionales contenidos en los tratados en que México sea parte; 3) coordinar acciones entre los Gobiernos Federal, Estatales y municipales, así como la concurrencia con los sectores social y privado, para el desarrollo de los bioenergéticos” (DOF, 2008). Estas propuestas han permitido el desarrollo de empresas que producen bioenergéticos a nivel industrial, como es el caso de biocombustibles Internacionales S.A. de C.V., en Nuevo León, que produce 50,000 L/d de biodiesel, utilizando como materia prima sebo de res y aceites vegetales usados; Chiapas Bioenergético, tiene dos plantas en el estado de Chiapas que producen 48,000 L/d utilizando aceite de palma y aceites vegetales usados (Masera *et al.*, 2011). Debido a lo anterior, es necesario que las propiedades fisicoquímicas del biodiesel producido en México sean evaluadas conforme a normatividad internacional, no solo para conocer su calidad, sino para ofrecer un producto competitivo en el mercado. En la actualidad las normas que regulan la calidad del biodiesel son, la EN 14214:2008+A1:2009 (British Standard, 2010) en Europa y la ASTM D6751-12-07b (ASTM, 2012) en Estados Unidos.

1.4.1 ¿Es posible producir biocombustibles de manera sustentable en México?

La producción de biocombustibles puede satisfacer un gran porcentaje de los requerimientos energéticos de México, lo que también contribuirá a su desarrollo económico y a la mejora en la calidad de vida de los mexicanos. Para lograrlo, García *et al.* (2016) sugieren trabajar sobre cinco ejes estratégicos:

- 1) *El desarrollo de un marco regulatorio*, por medio del fortalecimiento del marco legal y jurídico teniendo en cuenta la reducción de GEI's y la seguridad alimentaria.
- 2) *El desarrollo institucional*, a través de arreglos institucionales sólidos y a largo plazo para ejecutar programas específicos en diversas ramas de la bioenergía y coordinar programas intersectoriales en las áreas de salud, ambiente y desarrollo social.
- 3) *El desarrollo de mercados*, mediante la eliminación de los subsidios a los combustibles fósiles y la elaboración de normas técnicas y estándares para los distintos biocombustibles.
- 4) *El desarrollo de capacidades técnicas*, a partir de la elaboración de convenios para el apoyo de las empresas hacia las instituciones educativas de nivel superior para la formación de técnicos y especialistas altamente capacitados en las áreas requeridas.
- 5) *La investigación y la validación tecnológica*, a través de incentivos y apoyos financieros para hacer investigación optimizar, adaptar y aplicar tecnologías de bioenergía.

Si bien, la caída en la producción de petróleo ha provocado que el gobierno mexicano preste atención a la restitución de las reservas y al aumento en la producción de petróleo crudo y gas, por medio de la reforma energética (DOF, 2013), aún existe la incertidumbre de que esto se pueda lograr, ya que se desconoce la verdadera dimensión de las reservas petrolíferas, así como la viabilidad económica y los impactos ambientales de su extracción total (García *et al.*, 2016). Además de buscar fuentes de energía alternas, es necesario tomar medidas que incluyan un cambio en los patrones de los usos finales de la energía (iluminación, cocción, movilidad, entre otros), así como aumentar la eficiencia

energética (Chu y Majumdar, 2012). En la actualidad, el 64.3% de la demanda total de energía en México es abastecida con petróleo (SENER, 2014), por lo que necesario que el país acelere su transición a las fuentes renovables, aunque aún falta un gran camino por recorrer.

2 ANTECEDENTES

2.1 OBTENCIÓN DE BIODIESEL UTILIZANDO CULTIVOS ENERGÉTICOS NO COMESTIBLES

Un cultivo agrícola con fines energéticos es aquel cuya finalidad es suministrar la biomasa para producir biocombustibles. En la actualidad, se hace especial hincapié en los biocombustibles elaborados a partir de cultivos, como el maíz, la caña de azúcar y la soya, para utilizarlos como fuentes de energía renovables. Aunque puede parecer beneficioso utilizar materiales vegetales renovables para elaborar biocombustibles, el uso de residuos de cultivos y otro tipo de biomasa plantea diversas preocupaciones sobre los principales problemas ambientales, incluida la escasez de alimentos y la grave destrucción de los recursos vitales del suelo (Balat, 2008). Entre los principales puntos a considerar surgen: la composición química de la biomasa, las prácticas de cultivo, la disponibilidad de tierras y prácticas de uso de la tierra, el uso de recursos, el balance de energía, la emisión de GEI's gases acidificantes y sustancias agotadoras de la capa de ozono, la absorción de minerales en el agua y el suelo, el uso de pesticidas, la erosión del suelo, la pérdida de la biodiversidad y del paisaje, el precio de la biomasa proveniente de granjas, el costo de la logística (transporte y almacenamiento de la biomasa), el valor económico directo de las materias primas considerando los coproductos, la creación o mantenimiento del empleo, y los requisitos de agua y su disponibilidad (Gnansounou *et al.*, 2005).

Actualmente, más del 95% del biodiesel que se produce en el mundo, es a partir de aceites comestibles fácilmente disponibles a gran escala en la industria agrícola (tabla 3). Sin embargo, la producción continua a partir de aceites comestibles, recientemente ha sido motivo de preocupación debido a la disputa entre la seguridad alimentaria y las necesidades de combustibles provenientes de fuentes renovables. Existe la preocupación de que la materia prima del biodiesel compita con el suministro de alimentos a largo plazo (Refaat, 2010).

Entre los años de 2004 y 2007, el uso mundial de aceites comestibles aumentó (34%) más rápidamente que su producción (Mitchell, 2008). Entre 2005 y 2017, se prevé más de un tercio del crecimiento esperado en el uso de dichos aceites para la elaboración de biodiesel (FAO, 2009). En 2007, los mayores productores de biodiesel fueron la Unión Europea (UE), los Estados Unidos, Brasil e Indonesia, con un uso combinado de aceite comestible para la producción de biodiesel de alrededor de 8,6 millones de toneladas en comparación con la producción mundial de aceite comestible de 132 millones de toneladas (Mitchell, 2008). Además, se estima que ese mismo año aproximadamente 7.8 millones de hectáreas de suelo se utilizaron para proporcionar materias primas para la elaboración de biodiesel en los cuatro países ya mencionados (Trostle, 2010). A ese ritmo, es poco probable que los países de la Unión Europea tengan la superficie agrícola necesaria para satisfacer su creciente demanda de producción actual de biocombustibles (Gibbs *et al.*, 2008). Para satisfacer dicha demanda, será necesario abarcar cada vez mayor superficie, lo que implicaría la deforestación y una mayor cantidad de emisiones de GEI's.

Si bien el biodiesel presenta varias ventajas como combustible, entre las que se encuentran su portabilidad (por ser un líquido), su disponibilidad, su renovabilidad, una mayor eficiencia de combustión, menor contenido de S y HAP's, mayor número de cetano y mayor biodegradabilidad, también presenta algunas desventajas como, su mayor viscosidad, menor contenido energético, mayor punto de enturbiamiento y punto de fluidez, mayor emisión de óxidos de nitrógeno, menor velocidad y potencia del motor, presencia de coque en los inyectores, problemas de compatibilidad con el motor, un precio relativamente alto y un mayor desgaste del motor (Demirbas, 2009). Debido a lo anterior, es necesario trabajar en la optimización de los procesos, así como en la búsqueda de cultivos que no compitan con la seguridad alimentaria y que no requieran de grandes inversiones en insumos o un gasto considerable de agua.

2.1.1 *Jatropha curcas*: caso de éxito

Esta planta, conocida también como piñón, es un cultivo con gran potencial energético. Se adapta fácilmente en climas cálidos con lluvias moderadas. En México, las primeras siembras de piñón iniciaron en el año 2008 y se encuentran principalmente en los estados de Sinaloa, Michoacán, Chiapas entre otros (Galaz *et al.*, 2008). En febrero de 2008, el gobierno mexicano aprobó una ley para promover y desarrollar los biocombustibles sin competir con la producción alimentaria (GEXSI, 2008). Según mapas preliminares de la Red Mexicana de Bioenergía, existen 5 millones de hectáreas con potencial para la producción de *Jatropha curcas* distribuidas principalmente a lo largo de la costa Pacífica. (Sinaloa y Michoacán), el sur del país (Chiapas) y Yucatán. México tiene entre 3070 y 6500 ha plantadas con *J. curcas*. Los gobiernos de los estados de Chiapas, Sinaloa y Michoacán son importantes actores en la promoción de dicho cultivo. Por ejemplo, en Chiapas el gobierno del estado tiene como meta plantar 30.000 ha anuales hasta el 2024; en 2008 la meta fue de 20.000 ha. De manera similar, el estado de Michoacán pretende sembrar 120.000 ha hasta el año 2015 (GEXSI, 2008). En Sinaloa, la Fundación Produce Sinaloa estableció una plantación piloto y está conduciendo estudios de factibilidad para establecer una planta de procesamiento de biodiesel en la región. Varias empresas privadas contemplan proyectos en Michoacán, Guerrero, Chiapas, Oaxaca, Yucatán y Veracruz. Existen además iniciativas locales de universidades y ONG en diversas partes del país (Cifuentes y Fallot, 2009).

Adicionalmente, se han estudiado algunos de los genes que codifican para las enzimas involucradas en la biosíntesis de los triacilglicéridos en *Jatropha curcas*. Sin embargo, no hay un estudio sistemático de todo el proceso que incluya la medida de las actividades enzimáticas. Este es un campo de la investigación sobre *Jatropha curcas* que requiere de atención inmediata, ya que el mejoramiento genético de *Jatropha curcas* está a la cabeza de estas posibles soluciones. La mejora de la resistencia a enfermedades y extremos ambientales es la principal

prioridad para hacer de esta planta un modelo exitoso para la producción de biocombustibles (Galaz *et al.*, 2008).

2.1.2 Biodiesel a partir del aceite de karanja (*Pongamia pinnata*)

La planta de karanja (*P. pinnata*) es originaria de varios países, entre ellos India, Malasia, Indonesia, Taiwán, Bangladesh, Sri Lanka y Birmania (Balat, 2011). *P. pinnata* es un árbol de 12-15 m de altura, con ramas extendidas que puede crecer en ambientes húmedos y subtropicales con precipitaciones anuales que oscilan entre 500 y 2500 mm (Sharma *et al.*, 2008). Es un árbol leguminoso de crecimiento rápido con el potencial para la producción de semillas oleaginosas (con un 35% de aceite en peso) y que además tiene la capacidad de crecer en tierras marginales, lo cual la hace idónea para la producción sostenible de biodiesel a partir de aceite (Scott *et al.*, 2008). Akoh *et al.* (2007) reportaron la composición de los ácidos grasos de las semillas de *P. pinnata*, el más abundante es el ácido oleico (51.8%), seguido del ácido linoleico (17.7%), el ácido palmítico (10.2%), el ácido esteárico (7.0%) y en menor proporción el ácido linolénico (3.6%).

Raheman y Phadatare (2004) investigaron las propiedades del biodiesel elaborado a partir del aceite de *P. pinnata*, su éster metílico y sus mezclas con combustible diésel del 20% al 80% en volumen, y encontraron que la viscosidad cinemática del aceite fue 10.7 veces mayor que la del diésel (a 313 K). Después de la esterificación, la viscosidad cinemática se redujo a 2.9 veces la del aceite puro de *P. pinnata* y se redujo aún más con el aumento en la cantidad de diésel en la mezcla. También observaron una reducción similar en la gravedad específica y encontraron que el punto de inflamación del aceite de *P. pinnata* y su éster metílico era superior a 373 K, lo que garantiza la seguridad de su almacenamiento y manipulación.

Meher *et al.* (2004) estudiaron la metanólisis por catálisis básica del aceite de *P. pinnata* para la preparación de ésteres de metilo modificando la temperatura, la relación molar de catalizador con el metanol, la velocidad de agitación y el tiempo de reacción, de modo que lograron obtener 97% de los ésteres de metilo. Posteriormente, Meher *et al.* (2008) estudiaron la transesterificación del aceite de *P. pinnata* con etanol para la preparación de ésteres etílicos y lograron un rendimiento de ésteres etílicos del 95% en condiciones de reacción optimizadas. Los principales factores que afectan a la transesterificación son la relación molar de glicéridos a alcohol, el catalizador, la temperatura y presión de reacción, el tiempo de reacción, el contenido de ácidos grasos libres y el agua en aceites.

Nabi *et al.* (2009) determinaron las propiedades del biodiesel a partir de *P. pinnata* y de diésel, así como su rendimiento en el motor y sus emisiones; además realizaron un análisis en infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) y encontraron que el diésel contenía principalmente alcanos y alquenos, mientras que el biodiesel contenía principalmente ésteres. Estos mismos autores analizaron el biodiesel por cromatografía de gases y observaron que un rendimiento máximo de 97% de éster metílico a partir del aceite de *P. pinnata*. En cuanto al experimento que realizaron en el motor, observaron que todas las mezclas de biodiesel redujeron las emisiones por la quema del biocombustible, incluyendo al CO, el humo (del 43 al 50% comparado con el diesel) y el ruido del motor (se redujo en 2.5 dB), sin embargo, aumentaron los NO_x (15% comparado con el diésel).

2.1.3 Obtención de biodiesel a partir del aceite de Mahua (*Madhuca indica*)

El aceite de *M. indica* es no comestible, se obtiene del árbol mahua, que es caducifolio mediano a grande y que se encuentra de forma abundante alrededor del mundo (Puhan *et al.*, 2005). El árbol mahua comienza a producir semillas después de 10 años y continúa hasta los 60 años, el rendimiento de sus semillas

varía (5-200 kg/árbol) dependiendo del tamaño y la edad; el grano constituye aproximadamente el 70% de la semilla y contiene un 50% de aceite (Puhan *et al.*, 2005; Puhan *et al.*, 2008). Bhatt *et al.* (2004) estudiaron la composición de ácidos grasos en el aceite de *M. indica* y encontraron tanto ácidos saturados (24.5% de ácido palmítico y 22.7% de ácido esteárico) como ácidos grasos insaturados (37.0% de ácido oleico y 14.3% de ácido linoleico). Así mismo, estos autores probaron el rendimiento a corto plazo en un motor diésel utilizando aceite de mahua como combustible y sus mezclas con diésel. Encontraron un efecto significativo de la temperatura sobre la viscosidad y sus mezclas, ya que la viscosidad cinemática del aceite de *M. indica* fue 15.23 veces mayor a 313 K, mientras que a 353 K la viscosidad cinemática del aceite se redujo considerablemente con el aumento de la temperatura y mediante el incremento en la proporción de diésel en la mezcla de combustible.

El aceite de *M. indica* generalmente contiene alrededor del 20% de FFA, por lo que es necesario un pretratamiento para convertirlo a biodiesel. Ghadge y Raheman (2005) llevaron una reacción en dos etapas, cada paso lo llevaron a cabo con una relación de metanol/aceite de 0.30-0.35 (v/v) en presencia de H₂SO₄ al 1% (v/v) como catalizador ácido durante 1 h a 333 K. Después del pretratamiento del aceite, llevaron a cabo la reacción de transesterificación con una relación de metanol/aceite de 0.25 (v/v) (6: 1 M) y KOH al 0.7% (m/v) como catalizador alcalino para producir biodiesel y obtuvieron un rendimiento del 98%.

Kapilan *et al.* (2009) llevaron a cabo la transesterificación el aceite de *M. indica* con metanol utilizando KOH como catalizador para producir biodiesel, el cual se probó utilizando distintas mezclas con diésel en un motor de un solo cilindro con inyección directa e ignición por compresión. Observaron que las mezclas B5 y B20 producen emisiones de CO, hidrocarburos y humo en menor comparación con el diésel, así mismo, estas mezclas resultaron en una mayor eficiencia en comparación con el biodiesel sin mezclar. Puhan *et al.* (2007) utilizaron ésteres metílicos y etílicos provenientes del aceite de *M. indica* en un motor diésel y

observaron que las emisiones de hidrocarburos y CO fueron comparativamente más bajas que las del combustible diésel, del 49-60% y del 67-79%, respectivamente.

2.1.4 Obtención de biocombustibles utilizando *Ricinus communis*

Diversos autores coinciden que la higuera es originaria del este de África, específicamente de la región de la antigua Abisinia, actual Etiopía y es cultivada en los climas tropicales y subtropicales alrededor del mundo y en varios estados de México, como Tlaxcala. La higuera es una planta que puede encontrarse de manera silvestre desde el nivel del mar hasta los 2600 msnm. Entre sus características principales, y una por la cual ha sido considerada como una planta de alto potencial para la producción de bioenergéticos, es que el aceite, el cual es su principal producto, no es de consumo humano, además, de tener más de 600 aplicaciones para la industria entre las que se encuentra la producción de biodiesel (Armendáriz, 2012).

En México, la producción de higuera se encuentra enfocada principalmente a la herbolaria, por lo que la producción de semilla para la elaboración de aceite de ricino es relativamente baja. Además, la planta de higuera es considerada como una maleza por lo cual su explotación no es muy difundida en el país. En la actualidad no existen datos precisos de la superficie sembrada de higuera ni de niveles de producción de semilla o rendimiento de aceite, principalmente debido a que en nuestro país no es considerado un cultivo de interés. Cabe resaltar el gran potencial de adaptación de esta planta, ya que se desarrolla tanto en suelos húmedos con todos los minerales necesarios, como en suelos desfavorecidos; terrenos abandonados de una construcción. Se puede observar el desarrollo de esta planta a lo largo de la cuenca del río Zahuapan, en el caso de Tlaxcala, pero también es observada a lo largo de diferentes cuencas del país, sin importar la calidad del cuerpo de agua. Su presencia en el paisaje es dominante debido a su

alta capacidad de adaptación. Su abundancia y fácil adaptación la convierten en un cultivo energético con gran potencial.

El aceite de *Ricinus communis* posee una composición química peculiar, debido al alto contenido (87- 97%) de ácido ricinoleico (ácido cis-12-hidroxi octadeca-9-enoico). La presencia del grupo hidroxilo provee de características únicas tanto al aceite de ricino como a sus derivados: polaridad, alta viscosidad y gravedad específica, además de permitir su completa solubilidad en alcoholes. Las propiedades particulares del biodiesel de aceite de higuera están muy ligadas a su naturaleza química. Tal biocombustible posee un alto contenido de metilésteres del ácido ricinoleico, el cual es de carácter insaturado (presenta un enlace doble en su estructura). Adicionalmente, el ácido ricinoleico, a diferencia de los otros ácidos carboxílicos comúnmente presentes en los aceites vegetales, posee un grupo hidroxilo en su estructura que le confiere su alta viscosidad (Sánchez y Huertas, 2012), lo que también puede ser una deficiencia, al igual que el bajo índice de cetano el cual se reflejaría en la calidad de ignición de un combustible tipo diésel y puede conducir al fenómeno denominado “golpeteo diésel” que se presenta por un pico de presión como consecuencia de un alto tiempo de retardo en el inicio de la combustión. Un combustible con alta viscosidad no será pulverizado adecuadamente por los sistemas de inyección que poseen los motores diésel de inyección directa modernos. Las mezclas B60 y B30, aunque cumplen con la especificación del índice de cetano, poseen valores de la viscosidad por fuera del rango recomendado en las normas. Con las mezclas B15 y B5, las cuales cumplen especificaciones, es de esperar un funcionamiento adecuado en los motores que las utilicen.

Yunus *et al.* (2012) obtuvieron valores de cetano relativamente altos al producir biodiesel con aceite de *Ricinus communis*, lo que le proporcionó una alta calidad al biodiesel. Estos autores también indicaron que se puede utilizar como aditivo a otros biodiesel, para aumentar su índice de cetano. Ahora bien, las diferencias encontradas en la calidad de los distintos biodiesel a partir de cultivos

provenientes de la misma especie se pueden explicar a partir de la ubicación geográfica de las plantas de las cuales procedieron las semillas, ya que las primeras se obtuvieron en un país sudamericano y las segundas en Turquía. En estas regiones, los suelos poseen distintos climas, altitudes y características fisicoquímicas, que proporcionaron rasgos diferentes a los cultivos, es por esto que la composición del biodiesel que se obtuvo, también fue distinta.

2.1.5 *Flourensia resinosa* y su potencial como cultivo energético

En México se encuentran 9 especies de *Flourensia*, siendo la más estudiada *Flourensia cernua* (de Rodríguez *et al.*, 2012). Una especie poco estudiada es *Flourensia resinosa*, la cual se encuentra en el estado de Hidalgo. Los lugares donde es más abundante son los municipios de Santiago de Anaya e Ixmiquilpan, ubicados en el Valle de Mezquital. Este valle comprende una superficie aproximada de 461,000 hectáreas, lo que representan el 23% del territorio del estado de Hidalgo, este porcentaje nos da una idea de la superficie sobre la cual se puede desarrollar *Flourensia resinosa*. López (2005) reportó que es una planta que secreta en su parte superficial una cantidad importante de resina. Esta autora realizó extractos a partir de distintas partes de la planta (tallo, hoja y flor) y encontró sustancias de diversas estructuras como son flavonoides, eudesmanos, benzopiranos, monoterpenos, sesquiterpenos y diversos triterpenos, también reportó haber encontrado otros compuestos como; tectocrisina, criptomeridiol, ácido cúmico, ácido ilíco y kaurenol. Adicionalmente, realizó pruebas antimicrobianas en las que encontró actividad para *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli* no patógena, *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio cholerae*, *Stafilococcus aureus*, *Salmonella typhimurium* y *Pseudomona aeruginosa*.

Aunque no existen antecedentes del uso de *Flourensia resinosa* para la producción de biodiesel, comparte propiedades y características con especies silvestres que ya se han utilizado en la producción de biocombustibles, por lo que su estudio podría mostrar si tiene potencial para la producción de dicho biocombustible. Adicionalmente presenta ventajas tales como son, que su cultivo a

gran escala no requeriría de altos volúmenes de agua ya que se desarrolla fácilmente sobre suelos áridos, y que no es una planta de consumo humano.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estilo de vida actual nos ha llevado al agotamiento de los recursos no renovables, entre los cuales, investigaciones recientes indican que existe una marcada tendencia hacia el declive de los combustibles fósiles. Desafortunadamente, una gran cantidad de actividades productivas podrían verse afectadas ante estos hechos, principalmente el sector transporte. Si bien en la actualidad se han estado realizando investigaciones diversas para abastecer las necesidades de combustibles, tales como aquellas que se basan en el desarrollo de biocombustibles a partir de aceites vegetales, se debe tener en consideración los impactos negativos que esto ha traído consigo. Entre dichos impactos se encuentra el uso de hectáreas de zonas agrícolas que comúnmente eran destinadas a la producción de granos para consumo humano, y que ahora se utilizan para cultivar plantas que se emplearán en la elaboración de biocombustibles, lo que ha provocado el aumento en los precios de granos de consumo básico para la población (como el maíz) debido a su elevada demanda.

Adicionalmente, en la búsqueda de grandes extensiones de suelo para cubrir la demanda de combustible en los próximos años, la superficie necesaria llevaría a la deforestación de numerosas hectáreas de bosque con la finalidad de tener suelo fértil, lo que tendría como consecuencia la pérdida de la biodiversidad y de zonas que actúan como sumidero de CO₂, lo que tendría un impacto sobre el calentamiento global que se podría reflejar como cambio climático. Otro inconveniente en cuanto a la producción de biocombustibles a base de granos tiene que ver con la necesidad de grandes volúmenes de agua, además de todos los insumos, tales como fertilizantes, plaguicidas y mano de obra que se requieren para el crecimiento y rendimiento óptimo de los cultivos, lo cual eleva los costos de inversión.

Debido a lo anterior es preciso contar con cultivos energéticos que tengan requerimientos mínimos de agua, insumos y mano de obra menos costosa, que se adapten fácilmente a condiciones climáticas extremas, de modo que no se

requieran zonas forestales que estén contribuyendo al amortiguamiento del cambio climático, ni de zonas agrícolas que se utilicen para cultivar plantas comestibles o que puedan poner en riesgo la seguridad alimentaria.

4 JUSTIFICACIÓN

La necesidad de encontrar fuentes de energía alternas a la quema de combustibles fósiles, ha puesto en auge el estudio de procesos eficientes para la producción de etanol y biodiesel. En países como Argentina, el biodiesel se ha posicionado como un recurso clave para complementar sus necesidades energéticas, además, ha demostrado tener efectos positivos a nivel social (mejores ingresos y expectativas de desarrollo), económico (con la generación de empleos) y ambiental (por ser amigable con el medio ambiente). El uso de semillas provenientes de plantas silvestres para la producción de biodiesel, es una alternativa viable en lo que concierne a superar las desventajas de los biocombustibles que se emplean actualmente, entre las que se encuentra la poca sustentabilidad, un elevado costo en lo que respecta a insumos y agua, además del empleo de cultivos de tipo alimenticio.

Adicionalmente, de los géneros que se utilizarán en este trabajo, *Flourensia resinosa* y *Ricinus communis*, uno de ellos es una planta endémica de México, mientras que ambas especies son de clima árido, y necesitan poca agua para desarrollarse, lo que evita el conflicto derivado del uso del agua para consumo humano o para la producción de biocombustibles. Al ser ambas especies silvestres no representarían una amenaza para la seguridad alimenticia, por lo que se evita el dilema del uso de la planta para consumo humano o para la producción de biocombustibles. Otro punto importante radica en el tipo de suelo que necesitan dichas plantas para desarrollarse, ya que no se requieren extensas superficies agrícolas, ni la deforestación de zonas boscosas, como ha sido el caso del cultivo del maíz o la caña para la producción del bioetanol y que ha favorecido la pérdida de la biodiversidad, además de la contribución al cambio climático al destruir parte del sumidero del CO₂ antropogénico.

Dentro del sector académico, este trabajo abrirá un nuevo campo de investigación en el estado de Tlaxcala, lo que dará pie al estudio de otras especies de plantas

silvestres con las características ya mencionadas. De igual manera, se podrá aprovechar la glicerina obtenida como subproducto de la producción del biodiesel, lo cual constituye una gran ventaja al aportar valor agregado a una materia prima de bajo costo, de forma que se disminuiría el costo final del biocombustible producido. En cuanto al impacto social y económico que la producción de biodiesel a gran escala podría generar en el estado de Tlaxcala se encuentran la creación de empleos, la mejora del valor agregado al suelo utilizado para la siembra de los cultivos energéticos, el aprovechamiento de subsidios federales, y finalmente el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías que lleven a una economía sostenible.

5 OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de las plantas silvestres *Ricinus communis* y *Flourensia resinosa* como cultivos energéticos para la producción de biocombustibles mediante la caracterización del biodiesel producido a partir de sus respectivos aceites esenciales, lo anterior con base en la normatividad vigente y con la finalidad de proponer alternativas al uso de cultivos energéticos a partir de plantas comestibles.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Realizar la extracción de los aceites esenciales de las hojas de *F. resinosa* y de las semillas de *R. communis* en diferentes solventes, con la finalidad de caracterizarlos.

Llevar a cabo las reacciones de transesterificación para los aceites obtenidos a partir de *F. resinosa* y *R. communis*.

Caracterizar los biodiesel obtenidos a partir de los aceites esenciales extraídos de *F. resinosa* y *R. communis* con la finalidad de caracterizarlos con base en la norma ASTM D 6751-07b.

Realizar el análisis del biodiesel producido a partir de los extractos de las plantas *F. resinosa* y *R. communis* mediante resonancia magnética nuclear de protón (RMN de ^1H), con la finalidad de confirmar la presencia de triglicéridos.

Analizar la producción de aceite y biodiesel en las plantas silvestres *F. resinosa* y *R. communis* utilizando el software Infostad.

Estimar la producción de biodiesel empleando las propiedades teóricas del aceite de *Ricinus communis*, así como el costo aproximado de escalamiento del proceso mediante el software Aspen Plus 8.

6 METODOLOGÍA

6.1 MUESTREO DE *F. resinosa* y *R. communis*

La recolecta de *F. resinosa* se realizó en dos periodos, uno en el mes de abril, y otro en el mes de septiembre (mes de floración de la planta) a orillas de la carretera Ixmiquilpan – Pachuca en el estado de Hidalgo (20°24'18.6" N, 99°07'35.22" W). Se recolectaron aproximadamente 3 kg de muestra, de una población de *F. resinosa*, y se separaron las hojas (figura 1). Las muestras se dejaron secar durante un mes a temperatura ambiente (figura 3), bajo sombra en el almacén de plantas del Área Académica de Química (AAQ), de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), como se observa en la figura 5.

En el caso de *R. communis*, el muestreo se realizó en el mes de abril a orillas del río Zahuapan, en el estado de Tlaxcala (19°20'17.9" N 98°12'10.4" W). Se recolectaron aproximadamente 3 kg de planta, de una población de *R. communis*, seleccionando la parte que contenía las semillas (figuras 2 y 4). Al igual que en el caso de *F. resinosa*, las muestras de *R. communis* se dejaron secar bajo sombra en el almacén del AAQ, de la UAEH.



Figura 1. Arbusto, hojas y flor de *F. resinosa*.



Figura 2. Semilla y planta de *R. comunnis*.



Figura 3. Proceso de deshidratación de *F. resinosa*.



Figura 4. Separación de la semilla de *R. comunis*.

6.2 EXTRACCIÓN DE LOS ACEITES DE *Flourensia resinosa* Y *Ricinus communis*

Una vez que la muestra de *F. resinosa* estuvo seca, se separaron las hojas de los tallos, las cuales se trituraron en un mortero de piedra debido a la dureza de la planta (figura 7). En el caso de *R. communis*, las semillas se pelaron para desprender las capas superiores (figuras 5 y 6), posteriormente se le dio un tratamiento térmico, para desactivar las toxinas y evitar intoxicación durante su manipulación a lo largo del proceso, calentándolas con agua hasta alcanzar la temperatura de ebullición durante una hora. Después del tratamiento, se desprendió la cubierta de la semilla como se observa en la figura 6: Las semillas sin cáscara se trituraron en un mortero de porcelana (figura 8).

Las muestras ya molidas, se sometieron a un reflujo con diferentes disolventes (hexano, acetato de etilo, metanol y agua), por separado en un matraz pera de 1000 mL durante 2 h, a la temperatura de ebullición de cada solvente, utilizando 50 g de muestra molida, y 500 mL de disolvente puro en cada extracción. Una vez que el reflujo concluyó, el sistema se dejó enfriar a temperatura ambiente. El extracto se filtró utilizando un embudo de vidrio y papel filtro Whatman del no. 1 (figura 9). Posteriormente, se evaporó el solvente del extracto ya filtrado con ayuda de un rotavapor a la temperatura de ebullición de cada solvente y con agitación constante. El rendimiento de la extracción se calculó por gravimetría.



Figura 5. Semilla de *R. communis*, con cáscara. **Figura 6.** Semilla de *R. communis*, sin cáscara.



Figura 7. Molienda de *F. resinosa*



Figura 8. Molienda de *R. communis*



Figura 9. Proceso de filtración del aceite obtenido a partir de *R. communis*.



Figura 10. Aceite extraído a partir de *F. resinosa*.

6.3 TRANSESTERIFICACIÓN DE LOS ACEITES DE *Flourensia resinosa* Y *Ricinus communis*

Para llevar a cabo la reacción de transesterificación se utilizó metanol e hidróxido de sodio como catalizador básico. Se disolvieron 0.4 g de NaOH, previamente deshidratado, en 30 mL de metanol, con la finalidad de formar los metóxidos. La mezcla se calentó hasta alcanzar una temperatura de 50 °C y se mantuvo en agitación constante hasta que se hubo disuelto completamente el catalizador (aproximadamente 30 min). Para *R. communis*, el procedimiento fue el mismo, solo que la cantidad de catalizador (NaOH) fue de 0.1 g en 30 mL. Cuando el catalizador estuvo disuelto, en ambos casos, se agregaron 50 g de aceite y se dejaron reaccionar durante 2 h a 65 °C, en reflujo con agitación constante. Al término de la reacción, el producto se depositó en un embudo de separación durante 24 h para observar la separación de fases (figuras 12 y 13). Posteriormente, se separó la glicerina del biodiesel. El rendimiento de reacción se determinó por gravimetría.



Figura 11. Proceso de separación del biodiesel y la glicerina producidos a partir del aceite de *F. resinosa*.



Figura 12. Proceso de separación del biodiesel y la glicerina producidos a partir del aceite de *R. communis*.

6.4 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE Y BIODIESEL DE *Flourensia resinosa* Y *Ricinus communis*

6.4.1 Color y apariencia

La prueba de color se realizó con base en la norma estadounidense ASTM D1500 (2013). El resultado se midió empleando una escala de colores. La prueba de apariencia consiste en hacer una revisión visual para identificar la presencia de agua o contaminación de partículas, esto según el procedimiento 1 de la norma ASTM D4176 (ASTM, 2009).

6.4.2 Densidad

La densidad del biodiesel y de los aceites extraídos de ambas plantas se determinó con la ayuda de un densímetro (Mettler Toledo, 30PX) empleando 50 mL de muestra, para lo cual fue necesario retirar el exceso de disolvente en éstas. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana de Hidalgo.

6.4.3 Viscosidad cinemática

La viscosidad tanto de los aceites como del biodiesel se determinó con la ayuda de un viscosímetro. Fue necesario retirar previamente el exceso de disolvente a las muestras. Se utilizaron 50 mL de muestra previamente calentada a 40 °C. Esta prueba se realizó en el Laboratorio de Energía de la Universidad Autónoma Metropolitana de Hidalgo.

6.4.4 Índice de acidez

El índice de acidez indica la cantidad en miligramos de KOH necesaria para neutralizar los ácidos grasos libres en 1.0 g de aceite o grasa. Esta prueba se realizó de acuerdo a lo establecido en la NMX-F-101-SCFI-2012 (DOF, 2012). A

56.4 mL de muestra (tanto aceite como biodiesel) se añadieron 50 mL de alcohol etílico (95°). Posteriormente, la mezcla se tituló empleando una solución 1N de KOH utilizando 1 mL de fenoftaleína como indicador. El índice de acidez se calculó utilizando la ecuación 1 y se expresa en mg de KOH.

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

En donde:

56.1 = equivalente químico de la potasa.

N = normalidad de la solución de KOH.

V = cm³ de solución valorada de KOH gastados en la titulación de la muestra.

P = masa de la muestra en gramos.

6.4.5 Prueba de corrosión de la lámina de cobre

Esta prueba se realizó según el procedimiento marcado dentro de la norma ASTM D130 (ASTM, 2004). Se sumergió una lámina de cobre de 3 cm x 3 cm en el biodiesel obtenido en cada caso, previamente calentado a 100 °C, durante 3 h (figura 14). Posteriormente, la tonalidad de la placa se comparó con la placa patrón (figura 14).

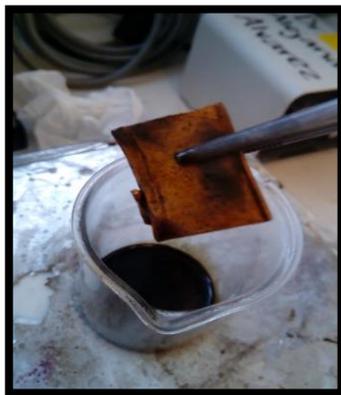


Figura 13. Placa de cobre en prueba de corrosión.



Figura 14. Placa patrón empleada para la prueba de corrosión.

6.4.6 Resonancia magnética nuclear de protones (RMN ^1H)

Tanto a los aceites como al biodiesel se les realizó una cromatografía en columna empacada con gel de sílice, así como una cromatografía en capa fina (CCF). También se les realizó un tratamiento con yodo, para observar otros compuestos presentes (figuras 16 y 17). La elucidación estructural de los compuestos se realizó mediante análisis espectroscópicos de RMN ^1H , utilizando el equipo Bruker (300 MHz) ubicado en el AAQ de la UAEH. Se empleó cloroformo deuterado como solvente, para poder ingresar las muestras en el equipo. En un trabajo conjunto, se caracterizó el aceite de *Flourensia resinosa*, para conocer composición química.



Figura 15. Placa de cromatografía de capa fina CCF.

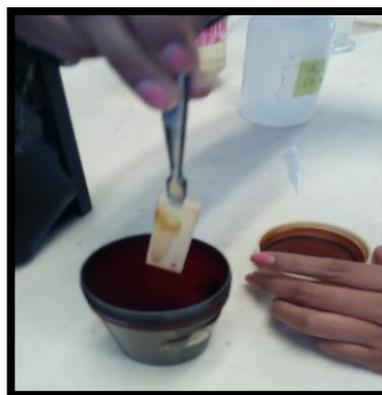


Figura 16. Tratamiento de yodo para CCF.

6.5 SIMULACIÓN

Con la finalidad de simular las necesidades de materia prima, características del proceso y costos de operación para producir biodiesel a escala industrial de *R. communis* se utilizó el Software ASPEN (Advance System for Process Engineering) desarrollado por Aspen Technology, Inc.

6.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se realizó un análisis de varianza mediante el empleo del Software estadístico INFOSTAT, para observar si los periodos de muestreo y los diferentes solventes tuvieron efectos significativos sobre el rendimiento de aceite y biodiesel producidos, bajo el siguiente modelo estadístico:

$$Y_{IJKL} = \mu + E_i + P_{(E)ij} + PD_{(E)ijk} + E_{ijkl} \dots \dots \dots \text{Ec. 2}$$

donde:

- μ : Promedio de las medias
- E_i : Especie de la planta
- $P_{(E)ij}$: Periodo de cosecha
- $PD_{(E)ijk}$: Periodo y disolvente
- E_{ijkl} : Error

7 RESULTADOS

7.1 EXTRACCIÓN DE ACEITES

Cada una de las muestras se trató con diferentes solventes para el proceso de extracción de los aceites. En la tabla 7 se muestran los rendimientos correspondientes a cada una de las temporadas de recolección de la planta y el solvente empleado en cada caso. No hubo diferencias entre períodos ($p=0.0594$), pero sí entre solventes dentro de cada período ($p=0.0001$). El porcentaje de rendimiento más alto se observó con la extracción a partir de hexano en la muestra recolectada durante el mes de septiembre.

Tabla VI. Porcentaje de aceite extraído en *F. resinosa* y *R. communis* en dos periodos de cosecha.

DISOLVENTE	<i>F. resinosa</i>		<i>R. communis</i>	
	Abril	Septiembre	Abril	Septiembre
Hexano	30.47 ^a	32.44 ^a	45.27 ^a	43.23 ^a
Agua destilada	28.26 ^{ab}	30.56 ^a	NA	NA
Acetato de etilo	25.11 ^{bc}	24.98 ^b	37.67 ^b	34.66 ^b
Metanol	23.59 ^{bc}	24.41 ^b	NA	NA

Diferencias significativas entre especies ($p=0.0001$)

No hubo diferencias entre periodos dentro de especie ($p= 0.1790$)

Medias con una letra común dentro de columna no son significativamente diferentes ($p\leq 0.05$)

7.2 EXTRACCIÓN DE ACEITE DE *Ricinus communis*

En el caso de *R. communis* se realizó un muestreo durante la temporada de estiaje (mes de abril). Para el caso de la extracción de aceite de *R. communis* el valor mayor fue con hexano. Los resultados de los respectivos rendimientos se muestran en la tabla 8.

Tabla VII. Extractos de aceite de *R. communis*

DISOLVENTE	RENDIMIENTO
Hexano	47.4%
Acetato de etilo	39.8%

7.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES OBTENIDOS A PARTIR DE *F. resinosa* Y *R. communis*

7.3.1 Color y apariencia de los aceites

El color de *F. resinosa* fue más intenso con una tonalidad verdosa, mientras que el color de *R. communis* tuvo una apariencia y una consistencia más ligera (Figuras 12 y 13). El olor fue el característico de los aceites comunes (a fritura). En la tabla IX se resumen los resultados para ambos parámetros analizados en los aceites obtenidos a partir de cada una de las plantas.

Tabla VIII. Apariencia de los aceites obtenidos.

Parámetro	<i>F. resinosa</i>	<i>R. communis</i>
Color	Verde oscuro	Amarillo pálido
Olor	Característico, intenso	Característico
Solubilidad	Hexano, metanol y acetato de etilo	Hexano y acetato de etilo

7.3.2 Densidad, viscosidad y pH de los aceites

En la tabla X se presentan los parámetros de los aceites obtenidos de las dos plantas. comparando la densidad el pH y la viscosidad. Se observa como el pH de 7 prevalece en todas las pruebas, el cual es el pH recomendado. En el caso de la densidad y la viscosidad, el aceite de *F. resinosa* presentó valores más elevados que el aceite de *R. communis*.

Tabla IX. Parámetros de los aceites obtenidos.

Parámetro	<i>R. communis</i>		<i>F. resinosa</i>	
	Hexano	Acetato de etilo	Hexano	Acetato de etilo
Disolvente	Hexano	Acetato de etilo	Hexano	Acetato de etilo
pH	7	7	7	7
Densidad (kg/cm ³)	965	949	989	975
Viscosidad (mm/s ²)	9.5	8.7	14.5	15.3

7.4 REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

Los rendimientos de biodiesel producidos a partir de cada una de las plantas, y los diferentes solventes utilizados para la extracción en *R. communis*, fueron mayores que los obtenidos a partir de *F. resinosa*, esto se explica porque las semillas de *R. communis* tienen un elevado contenido de aceite, en comparación con el contenido en las hojas de *F. resinosa* (Tabla XI).

Tabla X. Porcentaje de biodiesel extraído en *F. resinosa* y *R. communis* en dos periodos de cosecha a partir de 50 g (peso seco) de biomasa.

Disolvente	<i>F. resinosa</i>		<i>R. communis</i>	
	Abril	Septiembre	Abril	Septiembre
Hexano	21.70 ^b	22.13 ^c	58.43 ^a	57.67 ^a
Acetato de etilo	33.77 ^a	31.50 ^b	53.50 ^b	52.20 ^b
Metanol	38.17 ^a	38.57 ^a	NA	NA

Diferencias significativas entre especies ($p=0.0001$)

No hubo diferencias entre periodos dentro de especie ($p= 0.7439$)

Medias con una letra común dentro de columna no son significativamente diferentes ($p\leq 0.05$)

7.5 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL

7.5.1 Determinación de pH, viscosidad y densidad

En la tabla XII se muestran los resultados de pH, densidad y viscosidad medidos en el biodiesel producido a partir de los aceites extraídos de *F. resinosa* y *R. communis*. Se comparan solo los resultados con el mismo tipo de solvente. Si bien para el pH y la densidad no existe un rango de valores permisibles, en el caso de la viscosidad se establece un rango que va de 1.9 a 6.0 mm²/s. Para el biodiesel obtenido a partir del aceite de *F. resinosa*, la viscosidad estuvo dentro del rango establecido, no así para el biodiesel producido a partir de *R. communis*, ya que se obtuvieron valores de viscosidad de hasta el doble de lo recomendado por la Norma ASTM D 6751-07b (ASTM, 2012), lo cual refleja la presencia de hidroxiácidos que generan fuertes interacciones a nivel molecular.

Tabla XI. Parámetros del biodiesel producido para las plantas cosechadas en distintos periodos.

Parámetro	<i>F. resinosa</i>				<i>R. communis</i>			
	Hexano		Acetato de etilo		Hexano		Acetato de etilo	
	Abril	Septiembre	Abril	Septiembre	Abril	Septiembre	Abril	Septiembre
pH	7	7	7	7	7	7	7	7
Densidad (kg/cm ³)	915	926	908	919	935	924	946	930
Viscosidad (mm/s ²)	4.6	4.9	5.3	5.5	11.8	10.6	12.1	11.2

7.5.2 Índice de acidez

Una de las variables más importantes que influye sobre el rendimiento del éster es la relación molar de alcohol:triglicérido. La relación estequiométrica para la transesterificación requiere tres moles de alcohol y uno de glicérido para producir tres moles de éster de ácido graso y uno de glicerol. La relación molar está asociada con el tipo de catalizador utilizado.

En la tabla XIII, se muestran los resultados de la prueba de acidez, así como la cantidad de catalizador básico que se necesitó en cada caso para llevar a cabo la reacción de transesterificación.

Tabla XII. Resultados de prueba de acidez.

Extracto	NaOH g/ L de aceite <i>F. resinosa</i>	NaOH g/L de aceite <i>R. communis</i>
Metanol	6.4	ND
Hexano	7.3	1.5
Acetato de Etilo	6.9	1.9

7.5.3 Prueba de corrosión

La tabla 14 muestra los resultados, para ambos biodiesel, de la prueba de corrosión de la lámina de cobre, estos resultados se miden comparando las manchas en la lámina con la escala de colores de 1A a 4C de la ATSM, como se muestra en figura 15. Los valores obtenidos fueron aceptables de acuerdo a lo que contempla la normatividad.

Tabla XIII. Resultados de prueba de corrosión en lámina de Cu.

Biodiesel	Escala de colores
<i>Flourensia resinosa</i>	2c
<i>Ricinus communis</i>	2c

7.5.4 Resonancia magnética nuclear de protones (RMN ^1H)

En la figura 17, se pueden observar las señales del espectro de RMN de ^1H , del aceite de *Flourensia resinosa* en cloroformo deuterado, CDCl_3 , y en la figura 18 se muestran las señales del espectro de RMN de ^1H , del aceite de *R. communis*. En el caso del aceite crudo, para ambos espectros, se pudo evidenciar la presencia fundamentalmente de triglicéridos. De acuerdo a lo mencionado por Vallarta (20017) los aceites vegetales presentan señales en 0.893 ppm corresponde a los protones de los metilos ($-\text{CH}_3$) del triglicérido, señal en el intervalo de 1.259 a 2.772 ppm que corresponden a los metilenos ($-\text{CH}_2-$) de las cadenas hidrocarbonadas de los triglicéridos, señales correspondientes a los metilenos ($-\text{CH}_2-$) del fragmento glicerol en el intervalo de 4.125 a 4.317 ppm y señales en el intervalo de 5.250 a 5.374 ppm correspondientes al protón del metino ($-\text{CH}-$) del fragmento del glicerol y los protones de los metinos ($-\text{CH}-$) de los dobles enlaces de la cadena hidrocarbonadas.

De igual forma, en el espectro de RMN de ^1H del aceite de *Flourensia resinosa* se observaron varios compuestos químicos de interés en 0.95 ppm y 1.02 ppm. Se observan señales simples de metileno, en 2.66 ppm una señal simple de H-13 alílico, además de dos señales dobles en 3.55 ppm y 3.70 ppm similares a un sistema AB del CH_2OH , también dos señales anchas, una en 4.72 ppm y otro en 4.80 ppm características de protones pertenecientes a un metileno exocíclico, así como se aprecian señales en el rango de 1.259 a 2.772 ppm que corresponden a los metilos de ($-\text{CH}_2-$), López 2005.

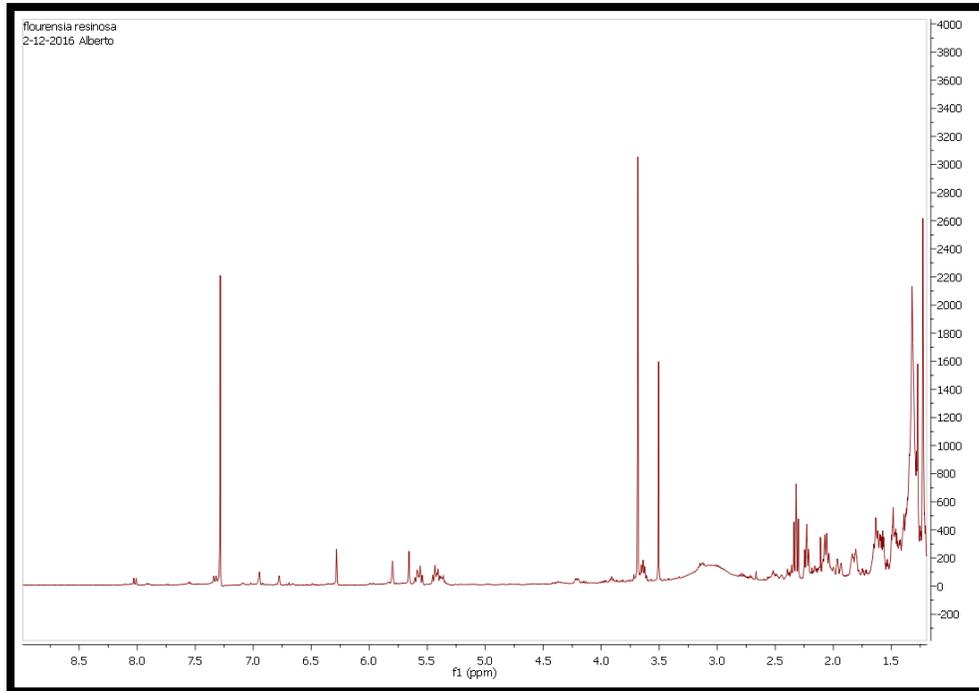


Figura 17. Espectro de RMN ^1H (400 MHz) del aceite *F. resinosa*.

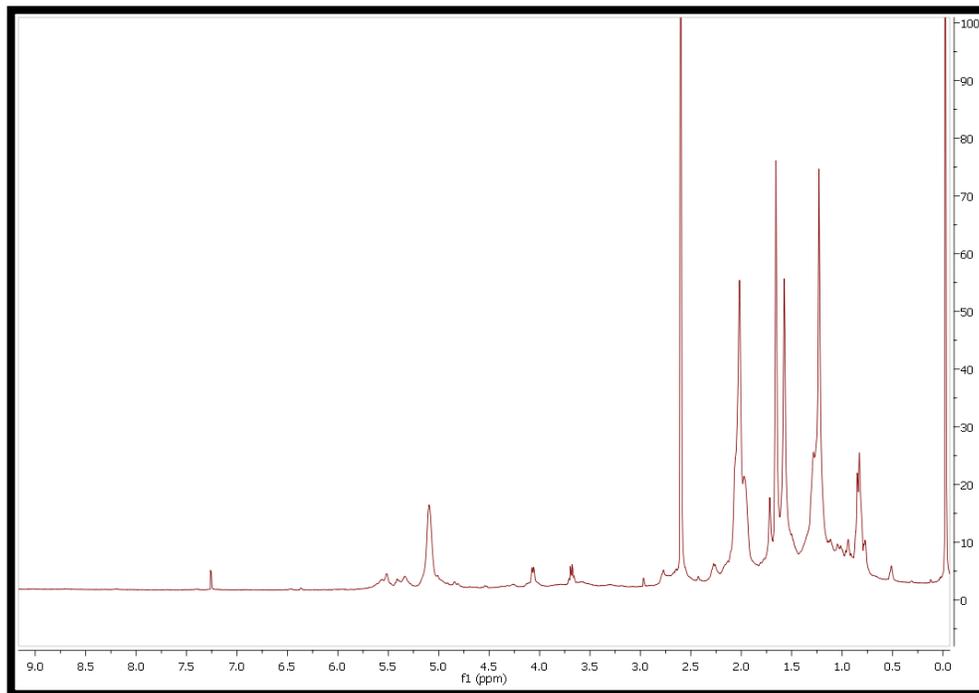


Figura 18. Espectro de RMN ^1H (400 MHz) del aceite de *R. communis*.

En las figuras 19 y 20 se pueden observar los espectros de RMN ^1H del biodiesel obtenido a partir de los aceites de *Flourensia resinosa* y de *Ricinus communis*,

respectivamente, los cuales fueron semejantes. Se observaron las señales esperadas para el biodiesel (dobles enlaces e hidrógenos de cadenas carbonadas largas), destacando las señales del éster monoalquilado. El metileno del grupo OCH_2CH_3 aparece como un cuadruplete a 4.08 ppm. Los triglicéridos también mostraron señales representativas de la estructura de la glicerina. Los hidrógenos mostraron dos dobles dobletes: uno a 4.12 ppm y otro a 4.30 ppm. Por otro lado, el H aparece como un multiplete a 5.35 ppm, **cuya integral es proporcional a un hidrógeno**. Es posible identificar la presencia de restos de triglicéridos en el biodiesel preparado en la zona entre 4.0 y 4.5 ppm. Se observó la señal del metileno del grupo OCH_2CH_3 a 4.08 ppm como la más intensa. A campos más bajos, 4.33 ppm, se aprecia el doble doblete de los hidrógenos H del triglicérido. El otro doble doblete correspondiente, está oculto en la señal del OCH_2CH_3 . Por lo tanto, la señal a 4.33 ppm representa a los dos hidrógenos del resto del glicérido, mientras que la señal a 4.08 ppm representa los dos hidrógenos del glicérido y a los dos a hidrógenos del OCH_2CH_3 , Cedrón *et al.* (2014).

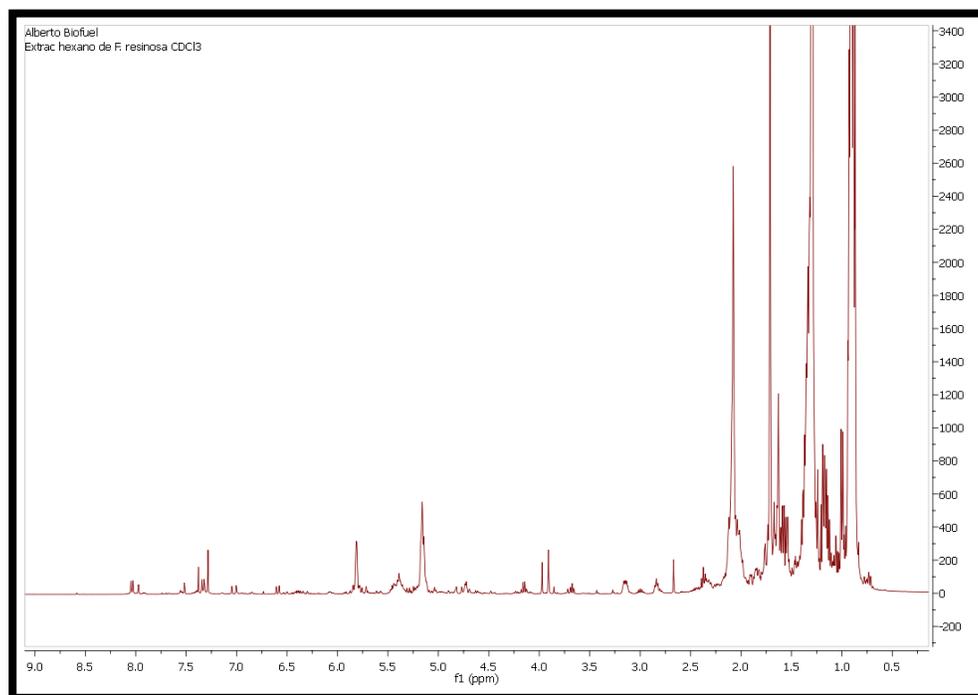


Figura 19. Espectro de RMN de biodiesel de *Flourensia resinosa*.

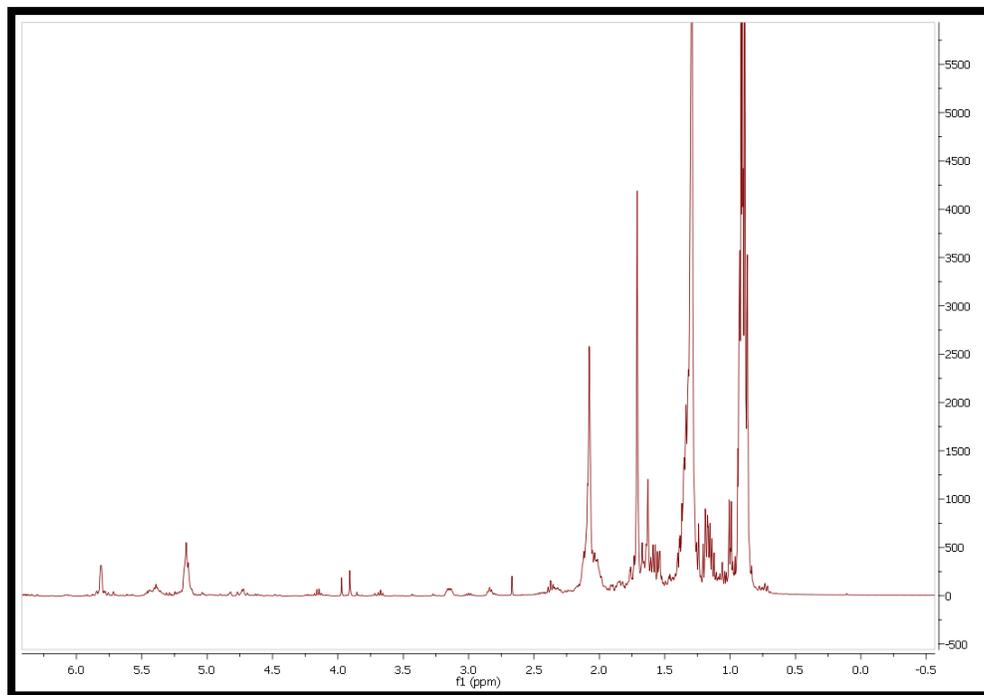


Figura 20. Espectro de RMN de biodiesel de *R. communis*

7.6 SIMULACIÓN

Mediante el empleo del software Aspen Plus V8.8, el cual emplea algoritmos de cálculo, el método secuencial modular y modelo orientado a ecuaciones, se llevó a cabo la simulación del proceso a escala industrial para la obtención de biodiesel considerando como base de cálculo la producción de 1 ton de biodiesel y el aceite de *R. communis* como materia prima. Se integraron los datos de los porcentajes de ácidos grasos, que contiene el aceite de *R. communis*, reportados por Karleskind (1996), los cuales se observan en la tabla XIV. En primer lugar, se realizó el esquema de procesos, el cual incluye dos tanques de almacenamiento para las materias primas, cuatro bombas para fluidos, tres mezcladores, un reactor principal en el que se llevará a cabo la reacción de transesterificación, y 6 reactores secundarios, en donde se llevarán a cabo procesos complementarios, como la separación de la glicerina, la recuperación del aceite, la purificación del biodiesel, entre otros (Figura 21). La simulación del proceso cuenta con dos entradas de materias primas, una en la que se alimentará el metanol, junto con el

catalizador básico (NaOH); en la entrada anexa, se introducirá el aceite de *R. communis* y el aceite recuperado de la recirculación del proceso. Los productos finales generados de este proceso son biodiesel, agua mezclada con metanol, glicerol y sólidos sedimentables. Además de la información sobre la caracterización y composición del biodiesel producido, el software permite obtener los gastos de insumos, de energía eléctrica, costos de inversión y operación (Figura 22).

Tabla XIV. Porcentaje de ácidos grasos que contiene el aceite de *Ricinus communis* de acuerdo con Karleskind (1996).

Ácido Graso	Porcentaje (%)
Palmítico	1
Esteárico	1
Oleico	3
Linoléico	3 – 4
Linolénico	< 0.2
Ricinoleico	89 – 90
Dihidroxiesteárico	1

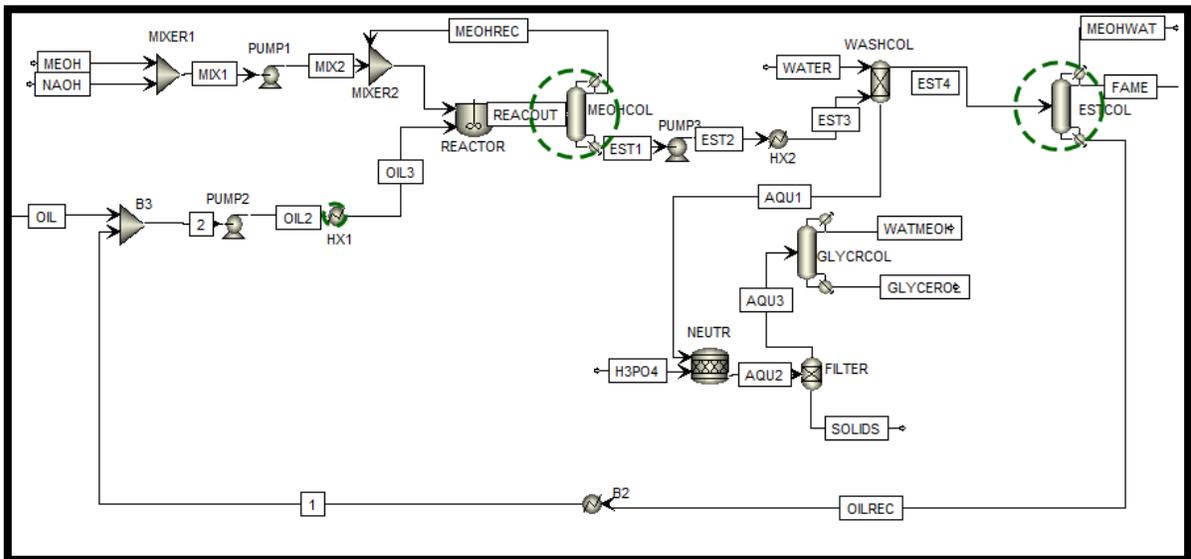


Figura 21. Simulación del proceso a escala industrial para la producción de biodiesel a partir de las semillas de *R. communis* utilizando el software Aspen plus v8.8.

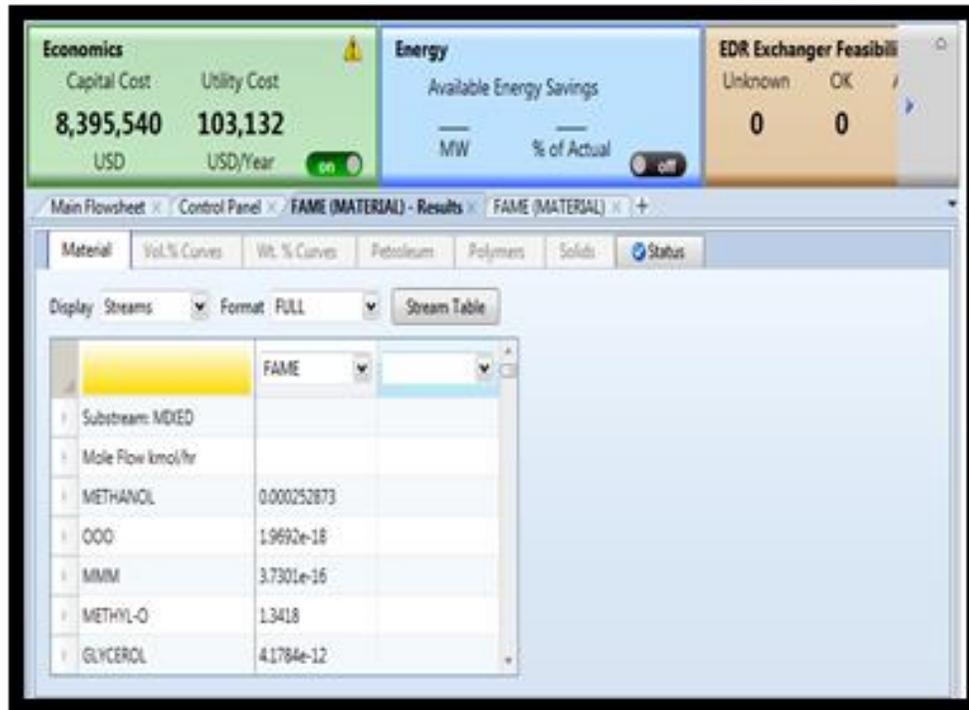


Figura 22. Simulación en software Aspen plus v8.8

En la tabla XV, se muestra la composición teórica de acuerdo con la simulación, de los metil ésteres de ácidos grasos que contendrá el biodiesel a la salida del reactor donde se lleva a cabo la transesterificación a partir del aceite de *R. communis*, mientras que, en la tabla XVI se muestran los parámetros fisicoquímicos del mismo. Estos parámetros son los más relevantes, para el desempeño del motor.

Tabla XV. Composición teórica del biodiesel producido a partir del aceite *R. communis*, según la simulación mediante el Aspen Plus V8.

Metiléster	Concentración (%)
Ricinileato de metilo (C18:1)	87.68
Oleato de metilo (C18:1)	5.14
Estearato de metilo (C18:0)	3.88
Palmitato de metilo (C16:0)	1.50
Linoleato de metilo (C18:2)	1.02
Linolenato de metilo (C18:3)	0.45
Araquidato de metilo (C20:0)	0.33

Tabla XVI. Propiedades fisicoquímicas del biodiesel producido a partir del aceite de *R. communis* proporcionadas por la simulación en Aspen plus V8.

PARÁMETRO	VALOR
Densidad a 40°C (kg/m ³)	910
Índice de Cetano	43
Poder calorífico MJ/Kg	37.55
Punto de inflamación °C	83
Estabilidad oxidativa (h) 110 °C	3.3
Punto de Nube °C	-3
Viscosidad cinemática a 40 °C, mm ² /s	16

En la tabla XVII se observa el balance de materiales y consumo energético que se necesitan para producir una tonelada de biodiesel a partir del aceite de *R. communis*, incluyendo los subproductos del proceso como la glicerina, la cual tiene un valor agregado.

Tabla XVII. Balance de materiales y consumo energético para la producción de 1 ton de biodiesel proporcionados por la simulación en Aspen plus V8.

ITEM	CONSUMO
MATERIAS PRIMAS Y MATERIALES	
Aceite vegetal	1030 Kg
Metanol	102 Kg
Catalizador básico	6.2 Kg
SERVICIOS	
Agua enfriamiento	20 m ³
Vapor de agua (a 4 bar)	350 Kg
Energía eléctrica	50 Kwh
Nitrógeno	3.2 N·m ³
Aire en instrumentos	4.8 N·m ³
SUBPRODUCTOS	
Glicerina bruta	112 Kg

En la tabla XVIII se observa el balance de materiales y el consumo energético requerido para purificar la glicerina de acuerdo con la simulación mediante el Aspen Plus V8.

Tabla XVIII. Balance de materiales y consumo energético para la producción de 1 ton de glicerina proporcionados por la simulación en Aspen plus V8.

ITEM	CONSUMO
MATERIAS PRIMAS Y MATERIALES	
Glicerina bruta	1350Kg
Productos químicos	10 Kg
Carbón activado	5 Kg
SERVICIOS	
Energía eléctrica	30 Kw
Vapor de agua (a 4 bar)	1700 Kg
Agua de enfriamiento	100 m ³
Nitrógeno	3.2 N·m ³

En la tabla XIV se muestra el balance económico de los gastos totales para poder instalar la planta de producción de biodiesel, los costos de operación, y la tasa de retorno del capital invertido. Los costos se presentan en dólares.

Tabla XIX. Costos de instalación y operación de la planta de producción de biodiesel proporcionadas por la simulación en Aspen plus V8

RUBRO	COSTO
Total de Costos de Capital [USD]	83,955.40
Total Costos de Operación [USD/año]	17,394.60
Total de costos de utilidad[USD/año]	1,031.32
Tasa deseada de retorno [Porcentaje/año]	20
Costos de equipamiento [USD]	42,130
Total de costos de instalación [USD]	22,246.00

8 DISCUSIÓN

8.1 RENDIMIENTO DE LOS ACEITES VEGETALES DE ACUERDO AL TIPO DE SOLVENTE

Con base en el rendimiento del aceite obtenido utilizando las hojas de *F. resinosa* no se encontraron diferencias significativas entre períodos de muestreo, pero sí entre disolventes (tabla VII). Los mejores rendimientos se obtuvieron utilizando hexano (32.32 %) y agua destilada (30.53 %) como disolventes, sin embargo, el uso de agua genera problemas durante el proceso de separación del aceite. Ríos *et al* (2013), reportaron un rendimiento del 7.5% utilizando como disolvente acetona, mientras que Filardo *et al.* (2015) obtuvo un rendimiento del 50 %, utilizando como disolvente agua destilada. Por su parte, López (2005) reportó un rendimiento de 39.45 % utilizando hexano como disolvente. Estas variaciones se pueden atribuir a que las plantas fueron muestreadas en diferentes sitios y años, por lo que sus características fisicoquímicas dependen de los factores que la rodean, clima, condiciones del suelo, cantidad de precipitación pluvial, entre otras.

En lo que respecta a *R. communis*, los rendimientos de producción de aceite fueron relativamente más altos comparados con los de *F. resinosa* (47.4% y 39.8%), aunque tampoco se encontraron diferencias significativas entre periodos de muestreo. Los rendimientos que se obtuvieron en este trabajo son relativamente más bajos que los reportados por Rivera y Hernández (2016), de 88 % y 60% utilizando hexano en semilla cosechada en Costa Rica, mientras que Salazar *et al.* (2014) reportaron 33.2 % utilizando éter de petróleo como disolvente en semilla cosechada en Durango.

8.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS ACEITES OBTENIDOS A PARTIR DE *F. resinosa* Y *R. communis*

8.2.1 Color, olor, apariencia, densidad y viscosidad

Si bien no existen reportes en los cuales se haga hincapié en el olor y la apariencia de los aceites empleados para la reacción de transesterificación, la viscosidad de los aceites o grasas que se emplean en la elaboración del biodiesel suele representar un problema ya que su baja volatilidad puede causar formación de depósitos en las máquinas de combustión interna (Meher et al., 2006). En cuanto al color no hay una normatividad que regule dicho parámetro, Sanford et al. (2009) clasificaron a la materia prima como aceites o grasas oscuras según su tonalidad, aunque no existe una escala para definir la tonalidad de *F. resinosa* (Tabla X).

La densidad del aceite pareciera no ser un parámetro relevante en cuanto a la calidad del biodiesel. Cornejo (2012), reportó un valor de 860 kg/cm^3 en aceite de *R. communis*, mientras que Karmakar et al. (2010), reportaron una densidad de 995 kg/m^3 , también para *Ricinus communis*. Con respecto al aceite extraído de las hojas de *Flourensia resinosa*, no existen trabajos previos sobre su densidad, por lo que se compararon con la densidad de otros cultivos energéticos como es el caso del aceite de palma con una densidad de 918 kg/m^3 y *Jatropha curcas* 940 kg/m^3 , ambos reportados por Karmakar et al. En el 2010. Se puede observar que las densidades obtenidas en este trabajo son similares reportadas en trabajos anteriores. La viscosidad de los aceites obtenidos se puede comparar con las registradas en el trabajo de (Karmakar et al. 2010), donde se reportan las siguientes viscosidades; $251 \text{ mm}^2/\text{s}$ para *Ricinus communis*, $44 \text{ mm}^2/\text{s}$ para el aceite de palma y $33.9 \text{ mm}^2/\text{s}$ para *Jatropha curcas*.

8.2.2 RMN ¹H del aceite de *R. communis*

En la figura 18 se muestra el espectro de RMN de ¹H del aceite de *Ricinus communis*, la señal en 0.893 ppm representa a los protones de los metilos (-CH₃) de los triglicéridos, señales en el intervalo de 1.259 a 2.772 ppm que corresponden a los metilenos (-CH₂-) de las cadenas hidrocarbonadas de los triglicéridos, señales correspondientes a los metilenos (-CH₂-) del fragmento del glicerol en el intervalo de 4.125 a 4.317 ppm y señales en el intervalo de 5.250 a 5.374 ppm correspondientes al protón del metino (-CH-) del fragmento del glicerol y los protones de los metinos (-CH-) de los dobles enlaces en las cadenas hidrocarbonadas, Torrentes *et al.* 2017.

8.2.3 RMN ¹H del aceite de *F. resinosa*

Se observaron compuestos químicos de interés en el espectro de *F. resinosa*, sin embargo, algunos pueden tener afectaciones en los motores de combustión, por lo que se recomienda optimizar el proceso de separación (figura 17). *F. resinosa* es una planta poco estudiada, López (2005) estudio el aceite de *Flourensia resinosa*, mediante una caracterización con RMN ¹H. En su trabajo aisló e identifico 5 compuestos: tectocrisina, criptomeridiol, ácido cúmico, ácido ilícico, kaurenol. Adicionalmente, Ríos *et al.* (2015), estudiaron el aceite obtenido de *F. resinosa*, lo caracterizaron mediante RMN ¹H e identificaron los siguientes compuestos: β-eudesmol, criptomeridiol, ácido ilicico, crisina, tectocrisisna, flourensiadiol, espatuleno, p-acetofenol, lupeol, β-sitosterol, triacontanol, escualeno.7

8.3 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL OBTENIDOS A PARTIR DE *F. resinosa* Y *R. communis*

La presencia de contaminantes en el biodiesel tiene como resultado problemas operativos, tales como depósitos en los motores, por lo que es muy importante su análisis. La cantidad de contaminantes, como glicerol, mono-, di- y tri-, así como alcohol, presentes en el combustible una vez que se ha llevado a cabo la purificación posterior a la transesterificación es un factor importante para determinar la calidad de los biocombustibles. La mayoría de los procedimientos analíticos para determinar el perfil de ácidos grasos y la calidad del combustible biodiesel utilizan cromatografía de gases (GC) (Mittelbach, 1993; Knothe, 2000; Okullo *et al.*, 2013).

8.3.1 Densidad

Hubo una ligera disminución en la densidad en el biodiesel, con respecto a la del aceite utilizado como materia prima en el caso de ambas plantas. Sanford *et al.* (2009) estudiaron 31 biodiesel producidos con materias primas diversas, desde aceites vegetales y animales, hasta grasas. La densidad que reportan estos autores se encuentra en el rango de los 860 a los 900 kg/m³. Cornejo (2012) reportó una densidad de 860 kg/cm³ para biodiesel producido a partir de *R. communis*. Karmakar *et al.* (2010), reportaron un valor de 899 kg/m³, también para biodiesel producido a partir de *R. communis*, 876 kg/m³ en el caso del biodiesel producido con aceite de palma y 879 kg/m³ para biodiesel elaborado con *Jatropha curcas*. No existen trabajos previos sobre biodiesel producido a partir de *F. resinosa*. Aunque las densidades obtenidas en este trabajo para cada uno de los biodiesel producidos son relativamente mayores, esto podría presentar una ventaja ya que los combustibles más densos proporcionan una mayor energía por galón y dado que el combustible se vende volumétricamente, cuanto mayor es la densidad, mayor es la energía potencial (Karmakar *et al.*, 2010).

8.3.2 Viscosidad

Las viscosidades cinemáticas del biodiesel producido a partir de los aceites de cada una de las plantas tuvieron valores más bajos que las de sus respectivos aceites (Tabla 10). Lo anterior es de esperarse ya que las moléculas de biodiesel son ésteres grasos de cadena larga, únicos, con mayor movilidad que las moléculas de triglicéridos más grandes y voluminosas. Sanford et al. (2009) reportaron valores de viscosidad cinemática en un rango desde 2.726 para aceite de coco hasta 15.250 (mm/s²) para aceite de *R. communis*. La viscosidad cinemática del biodiesel producido en este trabajo a partir de *R. communis*, fue relativamente más alta que la del biodiesel producido a partir del aceite de *F. resinosa*, lo cual puede ser atribuido en el caso del primero, a que el aceite de ricino está compuesto casi en su totalidad (aproximadamente 90%) de triglicéridos de ácido ricinoleico en los que la presencia de un grupo hidroxilo en el C-12 imparte varias propiedades químicas y físicas únicas y, por lo tanto, el aceite y sus derivados exhiben viscosidades hasta siete veces más altas que las de otros aceites vegetales (Kulkarni y Sawant, 2003).

8.3.3 Pruebas de corrosión en lámina de cobre

La prueba de corrosión con la lámina de cobre está diseñada para determinar el grado relativo de corrosividad de un producto petrolífero por la presencia de ácidos o azufre. Los valores de 2C, obtenidos por parte de ambos biodiesel están por debajo del límite máximo permisible marcado por la norma ASTM D130 (ASTM, 2004), que establece un valor menor a 3 en la escala de colores. Benavides *et al.* (2007) reportaron un valor de 1A para un biodiesel producido con aceite extraído de las semillas de *R. communis*. Sandford et al. (2009) reportaron un valor de 1a para 30 distintos biodiesel producidos a partir de diversas materias primas, entre las cuales se encuentra *R. communis* y las grasas animales.

8.3.4 RMN ^1H del biodiesel producido a partir de *F. resinosa* y *R. communis*.

Los espectros obtenidos para cada uno de los biodiesel obtenidos de los aceites de *R. communis* y *F. resinosa* resultaron ser muy semejantes (figuras 17 y 18). Se observaron las señales esperadas, tales como dobles enlaces, hidrógenos de cadenas carbonadas largas, entre otros, destacando las señales del éster mono alquilado. Morgenstern *et al.* (2006) reportaron protones H_a a 4.30 ppm que destacan como el doblete de dobletes en el campo bajo, y protones tipo H_b a 4.15 ppm con un doblete de dobletes en la parte superior. Estos autores asignaron una constante de acoplamiento $J_{ab} = 12$ Hz, debido a la interacción de acoplamiento geminal entre los protones de metileno no equivalentes de ambos grupos metileno. Ahora bien, los ácidos grasos de cadena larga (R1, R2 y R3) son muy similares o incluso idénticos en el efecto que tienen sobre el medio ambiente de los protones de glicéridos. Si los grupos fueran muy diferentes, el patrón resultante a 4.21 ppm sería mucho más complejo porque los cuatro protones de glicérido metileno tendrían todos diferentes cambios químicos. Ya se han observado los patrones complejos en esta región para mono y diglicéridos, los cuales sirven como ejemplo (Knothe-Gerhard 2000). Si bien los espectros de ^1H NMR de los aceites utilizados como materia prima para la reacción de transesterificación y los ésteres metílicos producidos son muy similares, es posible diferenciar las señales de resonancia en la medida en que se puede lograr la cuantificación del progreso de la reacción. Los resultados obtenidos usando el análisis de RMN ^1H concuerdan con lo reportado para los metil estéres, a partir del análisis convencional realizado mediante cromatografía de gases de la reacción de transesterificación llevada a cabo a partir de aceite de soya y aceite de palma (Ma y Hanna, 1999; Darnoko y Cheryan, 2000).

8.4 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE DE *R. communis* OBTENIDAS A PARTIR DE LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE ASPEN PLUS V8

8.4.1 Compuestos de los metil éster de ácidos grasos

En la tabla XV se muestra la composición química del biodiesel, obtenida con el software Aspen plus V8, los compuestos obtenidos, se pueden comparar con lo encontrado por Lamiel *et al.* (2015) quienes reportaron al ricinoleato como el metil éster más abundante en el biodiesel producido con aceite *Ricinus communis* (97.99%), mientras que mediante el software Aspen V8, el porcentaje fue relativamente menor (87.68%); además, estos autores reportaron una fracción minoritaria del 7-Metil(7E)-7Hexadecenoato (2%), mientras que en la simulación no se reporta dicho compuesto. Nakarmi y Joshi (2014) reportaron ausencia del ricinoleato de metilo, y hacen referencia a que esto se puede atribuir a la diferencia de clima, la diferencia en la variedad de semilla y los distintos lugares donde se desarrolla la planta. Adicionalmente, Nakarmi y Joshi (2014) reportaron otros metil ésteres, tales como, Metil octa-9-enoato, Metil 9, 10 metilhexadecanoato, 2 pentanona, 4-hydroxy-40 metil diacetona, los cuales no reportó la simulación mediante el Aspen V8.

8.4.2 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL BIODIESEL DE ACEITE DE *Ricinus communis*.

Las propiedades fisicoquímicas obtenidas con el software están dentro de los límites permisibles que contempla la normatividad internacional para biodiesel, en el caso de la densidad que es un parámetro importante, ya que de esta depende la fluidez y desempeño del biodiesel en el motor. Si bien la densidad no ésta incluida como parámetro de la norma ASTM, sí aparece en las normas europeas EN 14214-2008, donde el valor obtenido por el software lo rebasa ligeramente (valor máximo de 900 kg/m³), sin embargo, se debe considerar que en Europa las condiciones climáticas son distintas al continente americano. El valor obtenido de 910 kg/m³ es considerado óptimo. Sreenivas *et al.*, (2011) reportaron un valor

mucho mayor, de 24 mm²/s, y Benavides *et al.*, (2007) reportaron una densidad de 14.89 24 mm²/s, mientras que Banerjee *et al.* (2017) obtuvieron un valor de 18.55 mm²/s para el mismo parámetro. El índice de cetano de 43 min arrojado en el software, es similar al índice de cetano de 42 min reportado por Sreenivas *et al.*, (2011) quienes utilizaron aceite de *R. communis* para producir biodiesel. Benavides *et al.*, (2007) reportaron un índice de cetano de 38 min para un biodiesel de higuera. El poder calorífico no está incluido en las normas, pero el valor de 37.55 MJ/Kg obtenido en el software, es similar al reportado por Sreenivas *et al.* (2011) de 37.5 MJ/Kg y por Benavides *et al.* (2007) de 37.52 MJ/Kg, ambos autores utilizaron como materia prima aceite de *R. communis*. La temperatura de 83 °C, correspondiente al Punto de inflamación, es relativamente inferior a la temperatura de 93 °C de la norma ASTM D 6751-07b (ASTM, 2012), pero la temperatura obtenida, es similar a la reportada por Pérez y Uribe (2008) de 82 °C y de 84.3 °C reportada por Benavides *et al.* (2007). La estabilidad oxidativa presento un resultado de 3.3 h, mientras que la norma ASTM indica un valor mínimo de 3 h y la europea recomienda 6 h como mínimo. Karmakar *et al.*, (2010) reportaron 1.1 h para la estabilidad oxidativa del biodiesel a partir de *R. communis*, mientras que Banerjee *et al.*, (2017) reportaron 8 h. El punto de nube es un parámetro que no está en las normas, la temperatura que calculó el software fue de -3 °C, similar a la temperatura reportada por Benavides *et al.* (2007) de -4 °C, pero diferente a la reportada por Karmakar *et al.* (2010) de -13.4 °C. En cuanto a la viscosidad cinemática, la normatividad de la ASTM marca un intervalo de valores entre 1.9 mm²/s y 6 mm²/s, mientras que el que se obtuvo mediante la simulación fue de 16 mm²/s. Shirame *et al.* (2011) obtuvieron una densidad de 19.4 16 mm²/s.

8.5 PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Se ha reportado los rendimientos de litros de biodiesel producidos por hectárea cultivada del cultivo de *R. communis* (Villegas *et al.*, 2005) presento en su trabajo un rendimiento de 1320 litros por hectárea cultivable y (Karmakar *et al.* 2010) 1413

litros de aceite por hectárea cultivable. En el 2007 se edificó la primera planta procesadora de biodiesel en el municipio de Cintalapa, Chiapas, en la cual se procesaban 20 ton de semilla de piñón (*Jatropha curcas*) o higerilla (*Ricinus communis*), la cual produce 7000 L de biodiesel, 1 ton de glicerina y 11 ton de pasta proteica (Valero *et al.*, 2011). En el 2017 se inauguró la primera etapa de la planta de biodiesel de higerilla, la cual consta de una superficie de 1500 m², ubicada en el Rancho Monte Toro, municipio de Ejutla de Crespo, Oaxaca, procesa 6048 ton de semilla, 2630 ton de aceite de higerilla y 3418 ton de pasta de higerilla desnaturalizada al año y se producen 498 ton de biodiesel, 479 ton de aceite crudo de higerilla y 49 ton de glicerina. López *et al.* (2011) reportaron que, para el procesamiento de 4 ton de semilla de higerilla existe un gasto energético de 44.35 Kwh/ton para el proceso de extracción de su aceite y un gasto energético de 81.57 Kwh/ton, para el proceso de transesterificación del aceite para la producción del biodiesel, y un gasto total de 125.92 Kwh/ton y 4763 MJ/Ha.

8.6 COSTOS DE INSTALACIÓN Y OPERACIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Es difícil encontrar costos de inversión y operación para una planta productora de biodiesel con las mismas características, pero se tienen varios casos de implementación de plantas de biodiesel, a nivel industrial, en el 2009 se construyó una planta de biodiesel producido con aceite de *Jatropha curcas*, en Puerto Morelos, Tapachula Chiapas, con una inversión de 14.5 millones de pesos, con capacidad para producir de 12000 a 20000 litros de biodiesel. En el 2010 se inauguró otra planta productora de biodiesel con una inversión de 36,000,000 de pesos utilizando *Jatropha curcas* (Valero *et al.*, 2011). El costo arrojado por el software es de \$83,955.40 USD (aproximadamente 16 millones de pesos) es similar lo reportado. En el 2015 la SAGARPA destinó 17 millones de pesos, para la instalación de una planta para producir biodiesel, que procesaría 2 mil 250 ton de semilla de *Ricinus communis* en Monte del Toro, Ejutla de Crespo, Oaxaca. Rangel y Alejos (2012), realizaron un estudio de los costos para instalar una planta

productora de biodiesel en Celaya Guanajuato y reportaron una inversión de 3,685,321 de pesos. Zazueta (2009) realizó un estudio para la operación de una planta de producción de biodiesel que utilizaría como materia prima aceite de cocina usado, donde reporta una inversión de 39,320,703.18 pesos, para procesar 176,636 L de aceite y producir 48,000 L de biodiesel.

9 CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

9.1 CONCLUSIONES

Se desarrolló el proceso para la obtención de biodiesel a partir de semillas de *Ricinus communis*, y hojas de *Flourensia resinosa*, este proceso tiene la ventaja de que es aplicable a las características de la materia prima disponible en el país. Nuestros resultados reportados, indican que *Ricinus communis*, tiene mejores resultados y rendimientos como biocombustibles, sin dejar de lado a *Flourensia resinosa*, que necesita ser más investigada y producir biodiesel en otras condiciones de transesterificación. El potencial de *Ricinus comunis*, no solo se limita a sus características de materia prima, también se observó con los datos obtenidos por el software Aspen Plus V8.8, que su biodiesel producido, los parámetros están cercanos y dentro de la norma, y sus costos de inversión son similares e incluso, inferiores a los presupuestos de plantas industriales ya instaladas en la vida real. Estas dos especies tienen un impacto positivo al cuidado del medio ambiente y desarrollo sustentable, tiene la gran ventaja de no ser de consumo humano, lo que les permite tener un alto potencial como biocombustibles.

9.2 PERSPECTIVAS

Para obtener más información sobre la producción de biodiesel a partir de las semillas de la higuera (*R. communis*) en el estado de Tlaxcala y de *Flourensia resinosa* en el estado de Hidalgo, es necesario hacer estudios de evaluación, para conocer cuántas Hectáreas tienen potencial para el desarrollo de las plantas en cada estado (Rico *et al.*, 2011). Por un lado, en el estado de Tlaxcala se debe indagar sobre la superficie que tiene potencial para la higuera, que se desarrolla en las orillas de la cuenca del río Zahuapan que tiene por superficie 1632.7 km² (Mena *et al.*, 2017). Sin contar los demás espacios donde se desarrolla en el

estado. Por otro lado, en el caso de la *Flourensia resinosa*, se requiere estudiar cuantas hectáreas tienen potencial para su desarrollo en el valle del Mezquital, ya que se calcula que aproximadamente hay disponible una superficie de 461,000 hectáreas (lo que representa el 23% del territorio de Hidalgo), con las condiciones óptimas para su desarrollo (López, 2005).

Así mismo, sería recomendable realizar estudios de factibilidad para la plantación de policultivos, en los cuales se pueda desarrollar a la par *R. communis* y maíz de manera que se puedan aprovechar las tierras destinadas a la siembra de maíz (Cruz, 2009). Es importante el estudio del impacto de *R. communis* en el suelo, ya que en algunos trabajos se reporta su capacidad para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados (Gómez *et al.*, 2017) y considerar también estudios, que evalúen el impacto de la higuera en el suelo. En el caso de *Flourensia resinosa*, se debe realizar un estudio de impacto ambiental en los suelos del valle del mezquital.

Adicionalmente, existe la posibilidad de hacer modificación genética de las semillas de *Ricinus communis*, como lo realizaron Sánchez y Huertas (2012), en Colombia, para obtener mejores rendimientos de obtención de aceite. También se puede observar en la convocatoria, por parte del CONACYT (para validar híbridos de higuera para bioenergéticos en diferentes condiciones climáticas de México: de porte bajo, resistentes a plagas y enfermedades y para cosecha mecánica). En el caso de *Flourensia resinosa*, se deben hacer estudios sobre modificación genética, para lograr que las hojas acumulen más ácidos grasos, y obtener mejores rendimientos de obtención de aceite.

Se deben optimizar los procesos de extracción de aceite en ambas plantas, como lo sugiere Armendáriz (2012), quien obtuvo aceite mediante el prensado de la semilla de higuera sin necesidad de utilizar solventes. Otras alternativas incluyen, en la parte de producción de biodiesel, diferentes tipos de catalizadores ácidos, básicos y enzimáticos, con diferentes alcoholes, y en diferentes

condiciones de transestrificación (Medina *et al.*, 2012). Para mejorar los rendimientos de biodiesel a partir de *Flourensia resinosa* se recomienda implementar técnicas alternas que involucren el uso de catalizadores de óxidos de metales alcalintérreos o las zeolitas básicas, que utilizan condiciones críticas, como altas temperaturas y presiones (Castellar *et al.*, 2014)

Se sugiere realizar estudios de todos los parámetros incluidos en la norma ASTM D6751-12-07b (ASTM, 2012) para biodiesel, además de realizar un estudio en cromatografía de gases para obtener un perfil de FAME, como lo indica Lamiel *et al.* (2015).

Estudiar un método eficiente y eficaz para la purificación del biodiesel proveniente del aceite de semillas de *Ricinus communis*, y hojas de *Flourensia resinosa*, en especial para la etapa de lavado debido a la gran formación de jabón que disminuye el rendimiento general del proceso ya que se presentan pérdidas considerables en esta etapa. Además, aumenta el costo de producción del biodiesel y por ende el costo final del producto afecta su competitividad en el mercado.

Realizar pruebas en motores diésel empleando el biodiesel de aceite de semillas de *Ricinus communis*, y hojas de *Flourensia resinosa*, con los objetivos de evaluar el desempeño de dichos motores con este biocombustible y/o mezclas utilizando diésel convencional.

Se recomienda estudiar las cascarillas de las semillas de *Ricinus communis*, y hojas de *Flourensia resinosa*, para evaluar sus propiedades y potenciales usos. En el caso de la torta residual que se obtiene del aceite, por ejemplo, se puede evaluar su uso como abono con características nematocidas e insecticidas; para la glicerina, se propone estudiar su grado de pureza, ya sea para utilizarla como producto cosmético o incluso como fertilizante entre otros (Armendáriz, 2012).

10 BIBLIOGRAFÍA

- Akoh-Casimir. C., Chang-Shu. W., Lee-Guan. C. y Shaw-Jei. F. 2007. Enzymatic approach to biodiesel production. *J. Agric. Food Chem.* 55(22):8995-9005.
- Albuquerque, M. C. G., Machado, Y. L., Torres, A. E. B., Azevedo, D. C. S., Cavalcante, C. L., Firmiano, L. R. y Parente, E. J. S. 2009. Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources and their blends. *Renew. Energ.*, 34(3):857-859.
- Álvarez-Maciél, C. 2009. Biocombustibles: desarrollo histórico–tecnológico, Mercados Actuales y Comercio Internacional. *Econom. Informa. UNAM.* 359:63-89.
- Amaya-Delgado, L., Alarcón-Gutiérrez, E., Gutiérrez-Ortega, N.L., Ramos-Ramírez, E., Mendoza-Puga, L.E., Contreras, R., Serafín-Muñoz, A.H., Sacramento-Rivero, J.C., Cuevas-Castillo, G.A., Chavarría-Hernández, J. C., Sandoval, G. y Barahona-Pérez, L. F. 2016. Biocombustibles líquidos In: García-Bustamante C. A., Masera-Cerutti O. (Editores), "Estado del arte de la bioenergía en México", Publicación de la Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt, México. Primera Edición: 34-54. ISBN: 978-607-8389-11-7.
- Armendáriz V. J. 2012. Caracterización fenotípica y molecular de Genotipos de Higuerrilla (*Ricinus communis* L.) para la producción de biodiesel. Tesis de Maestría en Ciencias Agrícolas. Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Arvizu J. L. F. 2011. Biocombustibles derivados del maíz, en *El cultivo del maíz*, Temas Selectos, Ed. Munid-prensa, 1ª Edn., noviembre de 2011.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2009. ASTM D4176-04. Standard Test Method for Free Water and Particulate Contamination in Distillate Fuels (Visual Inspection Procedures), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. Fecha de última consulta: 25 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://agrifuelsqcs-i.com/attachments/1207%20d4176.pdf>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2012. ASTM D6751-12-07b. Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate

- fuels. ASTM International, West Conshohocken, Pensilvania, www.astm.org. Fecha de última consulta: 25 de diciembre de 2017.
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2013. ASTM D1500-12. Standard Test Method for ASTM Color of Petroleum Products. Fecha de última consulta: 26 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.ptplab.net/upfile/201402/19/154454346.pdf>
- ASTM (American Society for Testing and Materials). 2017. ASTM D7566-17a. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org. Fecha de última consulta: 25 de diciembre de 2017.
- ASTM, (American Society for Testing and Materials). 2004. ASTM D130-12. Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. Fecha de última consulta: 26 de diciembre de 2017. Disponible en: <http://www.ptplab.net/upfile/201402/19/154823776.pdf>.
- Avendaño, J. 2017. Aumentó 0.2 por ciento el desempleo en Tlaxcala en agosto de 2017: Inegi. Economía Ecología. La jornada de oriente. Disponible en: <http://www.lajornadadeoriente.com.mx/2017/09/27/aumento-0-2-ciento-desempleo-tlaxcala-agosto-2017-inegi/>. Ultima visualización 28/12/2017.
- Balat, M. 2008. Modeling vegetable oil viscosity. *Energ. Source., Part A*, 30(20):1856-1869.
- Balat, M. 2011. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production—A review of current work. *Energ. Convers. Manage.*, 52(2):1479-1492.
- Banerjee-Atiya., Varshney-Devyani., Kumar-Surrenda. y Chaudhary-Payal. 2017. Biodiesel production from castor oil: ANN modeling and kinetic parameter estimation. *Int. J. of Ind. Chem.* 8:253-262.
- Benavides-Alirio., Benjumea, P. y Pashova-Veselina. 2007. El Biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diésel. *Dyna.* 153:141-153.
- Berchmans-Johanes, H., y Hirata-Shizuko. 2008. Biodiesel production from crude *Jatropha curcas* L. seed oil with a high content of free fatty acids. *Bioresource Technol.*, 99(6): 1716-1721.
- Bhatt, Y. C., Murthy-Satya, N. S., y Datta, R. K. 2004. Use of mahua oil (*Madhuca indica*) as a diesel fuel extender. *J. Inst. Eng., (India): Agric. Eng. Div*, 85:10-14.

- Brennan, L. y Owende, P., 2010. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustain. Energ. Rev*, 14(2), pp.557-577.
- British Estándar, 2010. Automotive fuels fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines: Requirements and test methods. BS EN 14214:2008+A1:2009. Incorporating Corrigendum, Management Centre, Bruselas, Bélgica.
- British Estándar. 2010. Automotive fuels fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines: Requirements and test methods. BS EN 14214:2008+A1:2009. Incorporating Corrigendum, Management Centre, Bruselas, Bélgica.
- Canoira-Laureano., Galeán-García, J., Alcántara, R., Lapuerta-Magin., y García-Contreras, R. 2010. Fatty acid methyl esters (FAMEs) from castor oil: Production process assessment and synergistic effects in its properties. *Renew. Energ.*, 35(1):208-217.
- Castellar-Ortega, G. C., Angulo-Mercado, E. R. y Cardozo-Arrieta B. M. 2014. Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospect.*, 12(12): 90-104.
- Castro, P., Castillo, L., Nazario, M., Coello, J., y Calle, J. 2006. Producción de biodiésel a pequeña escala a partir de aceites usados en la ciudad de Lima. Intermediate Technology Development Group (ITDG). Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) de Lima, Perú.
- Cedrón, J., C., Moncada, A., Mendoza, P. 2014. Análisis de biodiesel preparado a partir de residuos de aceite doméstico, mediante RMN. *Rev. Soc. Quím. Perú*. 80 (1), 1-8.
- Chen, H., Qiu, T., Rong, J., He, C. y Wang, Q. 2015. Microalgal biofuel revisited: an informatics-based analysis of developments to date and future prospects. *Applied Energy*, 155, 585-598.
- Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), pp.294-306.
- Chu-Steven., y Majumdar-Arun. 2012. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*, 488(7411): 294-303.
- Cifuentes-Jara, M. y Fallot, A. 2009. *Jatropha curcas* como biocombustible: estado actual del cultivo. *Recurs. Natural. y Ambient.*, 56-57.
- Cornejo, M. F. M. 2012. Caracterización de aceite de higuera (*Ricinus communis*) de dos variedades silvestres para la producción de biodiesel en la región del valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis Maestría en Ciencias en Energías Renovables con

- Especialidad en Biodiesel. Centro de Investigaciones en Materiales Avanzados, S.C. Posgrado. Chihuahua, Chihuahua.
- Cruz, M. A. C. 2009. *Eficiencia relativa de la tierra y perspectivas de dos policultivos de temporal en Santa Cruz Xoxocotlán Oaxaca*. Tesis de la Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales. Centro Interdisciplinario de Investigaciones para el Desarrollo Integral Regional Unidad- Oaxaca.
- Darnoko, D. y Cheryan, M. 2000. Kinetics of palm oil transesterification in a batch reactor. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77(12):263-1267.
- De Rodríguez, D. J., Hernández-Castillo, F. D., Solís-Gaona, S., Rodríguez-García, R., y Rodríguez-Jasso, R. M. (2012). *Flourensia cernua* DC: A Plant from Mexican Semiarid Regions with a Broad. In *Integrated Pest Management and Pest Control- Current and Future Tactics*. InTech., 639-650.
- Demirbas-Ayhan. 2009. Potential resources of non-edible oils for biodiesel. *Energ. Source.*, Part B, 4(3): 310-314.
- Dias, J. M., Alvim-Ferraz, M. C., y Almeida, M. F. 2008. Comparison of the performance of different homogeneous alkali catalysts during transesterification of waste and virgin oils and evaluation of biodiesel quality. *Fuel*, 87(17): 3572-3578.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación) 2008. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. México, Gobierno de la República, publicada el 1 de febrero. Disponible en: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lpdb.htm>. Fecha de último acceso 26 de diciembre de 2017. 12 p.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación) 2008. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. México, Gobierno de la República, publicada el 1 de febrero. Recuperado el 26 de diciembre de 2017. 12 p. de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lpdb.htm>.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación) 2012. NMX-F-101-SCFI-2012. Alimentos-aceites y grasas vegetales o animales-determinación de ácidos grasos libres-método de prueba. 17 de septiembre de 2012. 8 p.
- DOF, (Diario Oficial de la Federación) 2013. Decreto por el que se reforman y adicionan diversas disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en Materia de Energía, Mexico: Secretaría de Gobernación.
- Dzida, M. y Prusakiewicz, P. 2008. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. *Fuel*, 87(10), 1941-1948.

- Dzida-Marzena., y Prusakiewicz-Piort. 2008. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. *Fuel*, 87(10):1941-1948.
- Eevera, T., Rajendran, K., y Saradha, S. 2009. Biodiesel production process optimization and characterization to assess the suitability of the product for varied environmental conditions. *Renew. Energ.*, 34(3): 762-765.
- Encinar, J. M., González, J. F. y Rodríguez-Reinares, A. 2007. Ethanolysis of used frying oil. Biodiesel preparation and characterization. *Fuel Process. Technol.*, 88(5), 513-522.
- Fernández-Linares, L. C., Montiel-Montoya, J., Millán-Oropeza, A., y Badillo-Corona, J. A. 2012. Producción de biocombustibles a partir de microalgas. Universidad Autónoma Indígena de México.
- Filardo S., Sanchez V., González L., Castro J., Rodriguez J., Viveros R., y Cruz B. 2015. Recubrimiento a base de resina extraída de *Flourensia resinosa* para aumentar la vida de anaquel del jitomate (*solanum lycopersicum*). *Indust. Aliment.* 37(1), 66-75.
- FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, (2017), Panorama agroalimentario: Maíz 2017. Recuperado el 30 de noviembre del 2017 de <file:///C:/Users/CLAU/Downloads/Panorama%20Agroalimentario%20Ma%C3%ADz%202017.pdf>.
- FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, (2017), Panorama agroalimentario: Maíz 2017. Disponible en: <file:///C:/Users/CLAU/Downloads/Panorama%20Agroalimentario%20Ma%C3%ADz%202017.pdf>. Fecha de última consulta 27 de enero de 2018.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (2009). The market and food security implications of the development of biofuel production. En: FAO committee on commodity problems, sixty-seventh session, Rome; April 20–22. Disponible en: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/meeting/017/k5896e.pdf>.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 2009. The market and food security implications of the development of biofuel production. En: FAO committee on commodity problems, sixty-seventh session, Rome; April 20–22. Recuperado el 27 de Noviembre del 2017 de <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/meeting/017/k5896e.pdf>.
- Fukuda, H., Kondo, A., y Noda, H. 2001. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils, *J Biosci. Bioeng.*, 92(5):406-413.

- Galaz-Avalos, R. M., Avilez-Montalvo, R. N., Ucan-Uc, C. M., Chan-López, J. M., y Loyola-Vargas, V. M. 2012. *Jatropha curcas* una alternativa para la obtención de biodiesel sin afectar el sector alimentario. *BioTecnología*. Vol. 16 N. 2: 94 -114.
- García-Bustamante, C. A. y Masera-Cerutti, O., 2016. Estado del arte de la bioenergía en México. ISBN: 978-607-8389-11-7.
- Garibay-Hernández, A., Vázquez-Duhalt, R., Sánchez Saavedra, M. D., Serrano Carreón, L., y Martínez Jiménez, A. 2009. Biodiesel a partir de microalgas. *BioTecnolog.*, 13(3), 38-61.
- Gerardo, M. L., Van Den Hende, S., Vervaeren, H., Coward, T. y Skill, S. C. 2015. Harvesting of microalgae within a biorefinery approach: a review of the developments and case studies from pilot-plants. *Algal Research*, 11, 248-262.
- GEXSI (The Global Exchange for Social Investment), (2008). Global market study on *Jatropha*. Final Report. London, Reino Unido. 187 p.
- GEXSI (The Global Exchange for Social Investment), 2008. Global market study on *Jatropha*. Final Report. London, Reino Unido. 187 p.
- Ghadge-Vilas, S., y Raheman-Hifjur. 2005. Biodiesel production from mahua (*Madhuca indica*) oil having high free fatty acids. *Biomass Bioenerg.*, 28(6): 601-605.
- Gibbs-Holly, K., Johnston, M., Foley, J. A., Holloway, T., Monfreda, C., Ramankutty, N., y Zaks, D. 2008. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *Environ. Res. Lett.*, 3(3), 034001.
- Gnansounou, E., Bedniaguine, D., y Dauriat, A. 2005. Promoting bioethanol production through clean development mechanism: findings and lessons learnt from ASIATIC project. In Proceedings of the 7th IAEE European energy conference, Norway.
- Gómez-Vilchis, J. C., Martínez-Guerrero, F. L., y Contreras-Barbara J. 2017. Estudio de la Higuera (*Ricinus communis*) para la fito remediación de suelos contaminados con metales pesados en el Municipio de Atitalaquia Hidalgo. Instituto Tecnológico de Atitalaquia. Programa y Sesiones de Posters del XIV Encuentro Participación de la Mujer en la Ciencia D.R. Centro en investigaciones en Óptica. Guanajuato, México.
- Gonzalez- Albuquerque, M. G., Luna-Machado, Y., Belo-Torres, A. E., Silva de-Azevedo, D. C., Loureiro-Cavalcante, C., Firmiano, L. R., y de Sa-Parente, E. J. 2009. Properties of biodiesel oils formulated using different biomass sources and their blends. *Renew. Energ.*, 34(3):857-859.

- González Andrade, S., y Brugués Rodríguez, A. 2010. Producción de biocombustibles con maíz: un análisis de bienestar en México. *Ra Ximhai*, 6(001).
- Güell, B. M., Bugge, M., Kempegowda, R. S., George, A. y Paap, S. M. 2012. Benchmark of conversion and production technologies for synthetic biofuels for aviation. Norway: SINTEF Energy Research.
- Guell, B.M., Bugge, M., Kempegowda, R.S., George, A., Paap, S.M., 2012. Benchmark of Conversion and Production Technologies for Synthetic Biofuels for Aviation. Recuperado el 10 de Diciembre del 2017 de <http://www.flygreenfund.se/wp-content/uploads/2015/05/Benchmark-of-conversion-and-production-technologies-for-synthetic-biofuels-for-aviation-Sintef-2013.pdf>.
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., y Natarajan, M. 2012. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 16(1): 143-169. Recuperado el 5 de Diciembre del 2017 de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C04> <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- INE, (Instituto Nacional de Ecología), (2013) Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010, México, 384 p. Fecha de último acceso: 5 de diciembre de 2017. Disponible en http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inf_inegei_public_2010.pdf.
- INE, (Instituto Nacional de Ecología), 2013 Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010, México, 384 p. Recuperado el 5 de Diciembre de 2017 de http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/inf_inegei_public_2010.pdf.
- Jasso-de Rodríguez, D. , Hernández-Castillo, F. D., Solís-Gaona, S., Rodríguez-García, R., y Rodríguez-Jasso, R. M. 2012. *Flourensia cernua* DC: A Plant from Mexican Semiarid Regions with a Broad. In *Integrated Pest Management and Pest Control- Current and Future Tactics*. InTech., 639-650.
- Kapilan, N., Babu-Ashok, T. A., y Reddy, R. P. 2009. Characterization and effect of using Mahua oil biodiesel as fuel in compression ignition engine. *Journ. of Therm. Scienc.*, 18(4), 382.
- Karmakar-Aninidita., Karmakar-Subatra., y Mukherjee-Souti. 2010. Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technol.*, 101, 7201-7210.

- Killner, M., H., M., Garro-Linck., Y., Danieli., E., Rohwedder, J., J., R., Blumich., B. 2015. Compact NMR spectroscopy for real time monitoring of a biodiesel production. *Fuel*, (139), 240-247.
- Knothe-Gerhard. 2000. Monitoring a progressing transesterification reaction by fiber-optic near infrared spectroscopy with correlation to ^1H nuclear magnetic resonance spectroscopy. *J. Am. Oil Chem. Soc.*, 77(5): 489-493.
- Knothe-Gerhard. 2005. Dependence of biodiesel fuel properties on the structure of fatty acid alkyl esters. *Fuel Process. Technol.*, 86(10): 1059-1070.
- Kulkarni, M.G. y Sawant, S.B., 2003. Some physical properties of castor oil esters and hydrogenated castor oil esters. *European Journal of Lipid Science Technology* 105:214–218.
- Lamiel-Charmaine, S. J., Manocan-C, Ma. C. C., Marasigan-Paul, G. M., Dimaano-R., M. N. 2015 Optimization of Transesterification Parameters in *Ricinus Communis* L. (Castor) Seed Oil for Biodiesel Production: Reaction Temperature based at 70° C. (*IJERT*) 4(11): 472-476.
- Lang, X., Dalai, A. K., Bakhshi, N. N., Reaney, M. J., y Hertz, P. B. (2001). Preparation and characterization of biodiesels from various bio-oils. *Bioresource Technol.*, 80(1), 53-62.
- Leung-Denis., Y. C., Wu-Xan, y Leung, M. K. H. 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Appl. Energ.*, 87(4): 1083-1095.
- López C., Inesta J. y García P. (2002). El petróleo el recorrido de la energía. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica Dirección General de Industria, Energía y Minas. Madrid Inovva
- López H. F. O. 2005. Estudio químico y microbiológico de *Flourensia resinosa* (T. S. Brandeg) Blake. Tesis de obtención del Título de Químico. Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería Centro de Investigaciones Químicas. Universidad Autónoma del Edo. Hidalgo.
- López, L. J., Solís, J. L., Martínez, B. B., Díaz, V. H., y Zamarripa, A. 2011 Balance energético del cultivo de higuierilla (*Ricinus communis* L.) para la producción de biodiesel. Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México, Primera Edición.
- Ma-Fangrui., y Hanna-Milford., A. 1999. Biodiesel production: a review. *Bioresource technology*, 70(1): 1-15.

- Masera, C. O. Coralli, F., García, B. C., Riegelhaupt, I. E., Arias, C. T., Vega, C. J., Díaz, J. R., Guerrero, P. G., y Cecotti, L. 2011. LA BIOENERGÍA EN MÉXICO, Situación actual y perspectivas. Cuaderno Temático No. 4. Red Mexicana de Bioenergía, A.C. (Editores), México. Recuperado el 22 de Diciembre del 2017 en <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf>.
- Mata, T.M., Martins, A.A. y Caetano, N.S. 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), pp.217-232.
- Medina-Ramírez, I. E., Chávez-Vela, N. A., Jáuregui-Rincón, J. 2012. Biodiesel, un combustible renovable. *Investigac. y Cienc.. UAA*. 55, 62-70.
- Meher, L. C., Naik, S. N., y Das, L. M. 2004. Methanolysis of *Pongamia pinnata* (karanja) oil for production of biodiesel. *J. Sci. Ind. Res.*, 63, 913-8.
- Meher-Charan, L., Naik-Narayan, S., Naik-Kumar, M., y Dalai-Kumar, A. 2008. Biodiesel production using karanja (*Pongamia pinnata*) and *Jatropha* (*Jatropha curcas*) seed oil. *Handbook of plant-based biofuels*, 255-266.
- Mena-Mejía, I., Bustamante-González, A., Vargas-López, S., Olvera-Hernández, J. I., y Méndez-Espinoza, J. A. 2017. Evaluación de la condición ecológica del río Zahuapan. *Rev. Int. de Contamin. Ambient.* 33(1): 7-19.
- Mitchell, D. 2008. A note on rising food prices. Vol. 4682. Washington, DC: World Bank.
- Mittelbach, M. 1993. Diesel fuel derived from vegetable oils, V [1]: gas chromatographic determination of free glycerol in transesterified vegetable oils. *Chromatographia*, 37(11): 623-626.
- Mittelbach, M. 1996. Diesel fuel derived from vegetable oils, VI: Specifications and quality control of biodiesel. *Bioresource Technol.*, 56(1): 7-11.
- Montes, L. R. 2008. Potencial de Producción de Semillas de *Jatropha curcas* en Sinaloa. Tesis de Posgrado en Ciencias de la Tierra. Centro de Geo ciencias UNAM.
- Morgenstern, M., Cline, J., Meyer, S. y Cataldo, S. 2006. Determination of the kinetics of biodiesel production using proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (1H NMR). *Energy & Fuels*, 20(4):1350-1353.
- Nabi-Nurun, N., Hoque-Najmul, S. M., y Akhter-Shamim, Md. 2009. Karanja (*Pongamia pinnata*) biodiesel production in Bangladesh, characterization of karanja biodiesel and its effect on diesel emissions. *Fuel Process. Technol.*, 90(9): 1080-1086.
- Nakarmi, A., y Joshi, S. 2015. A Study on Castor Oil and Its Conversion into Biodiesel by Transesterification Method. *Nepal J. Sci. Technol.*, 15(1): 45-52.

- Okullo, A., Ogwok, P., Temu, A. K., y Ntalikwa, J. W. 2013. Gas Chromatographic Determination of Glycerol and Triglycerides in Biodiesel from *Jatropha* and Castor Vegetable Oils. In Adv. Mat. Res., 824: 436-443. Trans Tech Publications.
- Peña, R., Romero, R., Martínez, S. L., Ramos, M. J., Martínez, A., y Natividad, R. 2008. Transesterification of castor oil: effect of catalyst and co-solvent. Ind. Eng. Chem. Res., 48(3): 1186-1189.
- Pérez, N. y Uribe, J. (2008). Determinación de las condiciones óptimas para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera (*Ricinus communis*) Y aceite de palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*) Proyecto de grado en Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería de Procesos Medellín.
- Pérez, N. y Uribe, J. 2008. Determinación de las condiciones óptimas para la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera (*Ricinus Communis*) Y aceite de palma mil pesos (*Oenocarpus bataua*) Proyecto de grado en Ingeniería de Procesos. Universidad EAFIT Escuela de Ingeniería Departamento de Ingeniería de Procesos Medellín.
- Pragya, N., Pandey, K.K. y Sahoo, P.K., 2013. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 24:159-171.
- Predojević, Z. J. 2008. The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps. Fuel, 87(17): 3522-3528.
- Puhan, S., Nagarajan, G., Vedaraman, N., y Ramabramham, B. V. 2007. Mahua oil (Madhuca indica oil) derivatives as a renewable fuel for diesel engine systems in India: a performance and emissions comparative study. Int. J. Green Energy, 4(1): 89-104.
- Puhan, S., Vedaraman, N., Ramabraham, B. V., y Nagarajan, G. 2005. Mahua (Madhuca indica) seed oil: a source of renewable energy in India. J. Sci. Ind. Res., 64(11): 890-896.
- Puhan, S., Vedaraman, N., y Ramabramham, B. V. 2008. 19 Biodiesel Production from Mahua Oil and Its Evaluation in an Engine. Plant-Based, 267-280.
- Raheman, H., y Phadatare, A. G. 2004. Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel. Biomass Bioenerg., 27(4): 393-397.

- Rangel, J., y Alejos, A. 2012 Factibilidad para la implementación de biodiesel en el transporte público de la ciudad de Celaya, Guanajuato. *Revista Panorama administrativo*. Año 6. No. 11.
- Refaat, A. A. 2010. Different techniques for the production of biodiesel from waste vegetable oil. *Int. J. Environ. Sci. Te.*, 7(1): 183-213.
- Rico H., Tapia L., Teniente R., Gonzales A., Hernandez M., Solís J., Zamarripa A. 2011 Guía para cultivar higuierilla (*Ricinus communis* L.) Instituto Nacional de Investigadores Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro Campo Experimental Valle de Apatzingán. Num. 1. México.
- Ríos M., Estrada S., Flores V., Aguilar M., 2013. Chemical constituents from *Flourensia resinosa* S.F. Blake (Asteraceae). *Biochem. Syst. Ecol.*, 51: 240-242.
- Rivera P., Hernández J. 2016. Evaluación del rendimiento y calidad del aceite de siete variedades de *Ricinus communis*. *Agron. Meso.*, 27(1): 183-189.
- Salazar L., Rosales R., Jiménez R., Ríos J., Breton B. 2014. Rendimiento de la higuierilla (*Ricinus communis* L.) cultivada en dos densidades de población en Durango, México. *Agrofaz*, 14(11): 129-135.
- Sánchez I. y Huertas K., 2012. Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de semillas de *Ricinus communis*. (higuierilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero. Tesis de grado Químico Industrial. Facultad de Tecnología. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Sanford, S. D., White, J. M., Shah, P. S., Wee, C., Valverde, M. A., & Meier, G. R. 2009. Feedstock and biodiesel characteristics report. *Renew. Energy Group*, 416: 1-136.
- Scott, P. T., Pregelj, L., Chen, N., Hadler, J. S., Djordjevic, M. A., y Gresshoff, P. M. 2008. *Pongamia pinnata*: an untapped resource for the biofuels industry of the future. *Bioenerg. Res.*, 1(1): 2-11.
- Sharma, Y. C., Singh, B., y Upadhyay, S. N. 2008. Advancements in development and characterization of biodiesel: a review. *Fuel*, 87(12): 2355-2373.
- Shirame H., Panwar N., Bamniya B., 2011 Bio Diesel from castor Oil- A Green Energy Option. *Low Carbon Economy Sci. Res.*, 2: 1-6.
- Sistema de Información Energética Secretaría de Energía 2016 Balance Nacional de Energía: Consumo de energía en el sector industrial.
- Sreenivas, P., Ramesh, V. y Chandra, K. 2011. Development of Biodiesel from castor oil. *Int. J. Energy Sci.*, 1(3):192-197.

- Torrentes-Espinoza, G., Miranda, B., C., Vega-Badudrit, J., Mata-Segreda, J., F. 2017. Castor oil (*Ricinus communis*) supercritical methanolysis. *Energy*, (140), 426-435.
- Trostle, R. 2010. Global agricultural supply and demand: Factors contributing to the recent increase in food commodity prices, Washington DC, US Department of Agriculture Economic Research Service, p.1-30.
- Valero Padilla, J., Cortina Villar, H. S., & Vela Coiffier, M. P. 2011. El proyecto de biocombustibles en Chiapas: experiencias de los productores de piñón (*Jatropha curcas*) en el marco de la crisis rural. *Estud. Soc. (Hermosillo, Son.)*, 19(38): 119-144.
- Vallarta, C. D. E. 2017. Extracción de aceite de *Jatropha curcas L.* en un proceso batch, utilizando isopropanol como disolvente. Tesis de titulación Ingeniero Químico Petrolero. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. Instituto Politécnico Nacional.
- Vicente, A. C. P. D. 2012. *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: Nuevos métodos de síntesis*. Tesis doctoral, Universidad de Extremadura.
- Villegas, A., Zanzi, V., Bucid, W., Bonnet, E., López, D., Herrera, M. y Viedma, P., 2005. Algunas consideraciones preliminares acerca de la factibilidad de la obtención de biodiesel en países en vías de desarrollo. *Avanc. en Energ. Renovab. y Med. Amb.*, 9: 1-6.
- Yunes, O., Ozcanli, M., Serin, H. y Aydin, K. 2010. Biodiesel production from *Ricinus communis* oil and its blends with soybean biodiesel. *J. Mechanic. Engineer.*, 56(12): 811-816.
- Zamarripa, A., 2011. Estado del arte y novedades de la bioenergía en México. Oficina Regional para América Latina y el Caribe-RLC. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la Agricultura (FAO).
- Zarille S. 2006. El Mercado Emergente de Biocombustibles: Consecuencias Normativas, Comerciales y de Desarrollo, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo Nueva York y Ginebra.
- Zazueta I. 2009. Estudio técnico para determinar la viabilidad de instalar una planta generadora de biodiesel en la región Guaymas – Empalme. Tesis de Ingeniería Industrial y de Sistemas, Instituto Tecnológico de Sonora.