

Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Química

Facultad de ingeniería

Maestría en ciencias de la energía

**EVALUACIÓN DE EMISIONES EN UN MOTOR PARA MEZCLAS
DE BIODIÉSEL OBTENIDO A PARTIR DE *RICINUS COMMUNIS***

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en ciencias

Presenta

Ing. Luis Armando Galván Camacho

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Codirigido por:

Dr. Luis Alberto Morales Hernández

Santiago de Querétaro, Querétaro, junio, 2021.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Química
Maestría en Ciencias de la Energía

**“Evaluación de emisiones en un motor para mezclas de biodiésel obtenido a partir de
Ricinus communis”**

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestría en Ciencias de la Energía

Presenta:

Luis Armando Galván Camacho

Dirigido por:

Dr. Miguel Angel Ramos López

Dr. Miguel Angel Ramos López
Presidente

Firma

Dr. Luis Alberto Morales Hernández
Secretario

Firma

Dr. Rufino Nava Mendoza
Vocal

Firma

Dr. Francisco Javier de Moure Flores
Suplente

Firma

Dr. Jorge Gracida Rodríguez
Suplente

Firma

Dra. Silvia Lorena Amaya Llano
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.

Fecha: Junio/2021

Agradecimientos

A Dios padre, por darme la oportunidad de realizar mis propios deseos en esta vida, y a la vida misma por enseñarme cada día algo nuevo.

A mis padres, Ana Bertha Camacho Rubio y Armando Galván Rangel, por todo el apoyo que me han brindado desde el primer momento y hasta ahora.

A mis profesores de licenciatura y posgrado, que gracias a que compartieron su conocimiento conmigo es que yo he formado gran parte del mío, y en especial al Dr. Miguel Angel Ramos López que, confiando en mí, aceptó ser mi director de tesis, brindándome en todo momento su apoyo con su experiencia y conocimiento, así como gran parte de su equipo de trabajo y su tiempo.

A mis amigos, que me brindan en todo momento su amistad incondicional y su apoyo cuando les es posible.

A la todas las personas involucradas en el programa FOPER, por el apoyo económico para mi trabajo de investigación, así como su asesoría con el mismo y su disposición en todo momento

Al consejo nacional de ciencia y tecnología (CONACyT) por el apoyo brindado con la beca para estudios de posgrado, gracias a la cual fue posible la realización de mis estudios de posgrado

Resumen

Se sabe que con la combinación de cierto porcentaje de biodiésel y diésel de origen fósil se disminuye la cantidad de contaminantes emitidos debido a la combustión. Al paso de los años se han probado distintos aceites para la elaboración de biodiésel, siendo unas de las opciones que mayor cantidad de aceite producen las semillas de girasol, *Jatropha*, canola, soya, etc. Sin embargo, la mayoría de las semillas oleaginosas tienen otro tipo de usos que son de carácter de mayor importancia que la generación de biocombustibles. Una posible alternativa es la extracción de aceite de la semilla de *Ricinus communis* (Higuerilla) que es una planta considerada hasta hace tiempo como maleza en México, que se puede desarrollar en ambientes poco favorables y que además contiene un alto contenido de aceite a comparación de otras oleaginosas. En este trabajo se obtuvo biodiésel a partir de la semilla de esta planta y se evaluaron los resultados de emisiones correspondientes a mezclas. El aceite se obtuvo a partir de extracción mecánica en caliente a 95 °C y posteriormente se realizó una transesterificación por catálisis homogénea para separar los ésteres metílicos de ácidos grasos y el glicerol contenidos en el aceite. Posterior a la obtención del biodiésel se determinaron algunas propiedades fisicoquímicas del mismo y se realizaron pruebas mediante un diseño experimental factorial con diferentes proporciones de combustible comercial y el biocombustible obtenido en un motor estacionario de ciclo diésel. Se realizó ANDEVA para determinar el mejor tratamiento y se midieron las emisiones de CO, CO₂, y opacidad mediante una sonda Bosch BEA-150 y el un analizador fluke 750. Se determinó para cada tratamiento en qué porcentaje se disminuyeron las emisiones contaminantes. Así mismo se midió la temperatura de las emisiones y el torque para los diferentes tratamientos en el motor. Obteniendo con el mejor tratamiento una disminución de 45% para CO y 60% para CO₂.

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de esta tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento

Resume

It is known that the combination of a certain percentage of biodiesel and fossil diesel reduces the amount of pollutants emitted due to combustion. Over the years, different oils have been tested for the production of biodiesel, being one of the options that produce greater quantity of oil: sunflower seeds, jatropha, canola, soybeans, etc. However, most oilseeds have other uses that are more important than the generation of biofuels. A possible alternative is the extraction of oil from the seed of *Ricinus communis* (Castor bean), which is a plant considered until long ago as a weed in Mexico, that can develop in unfavorable environments and also contains a high oil content compared to other oilseeds. In this work, biodiesel was obtained from the seed of this plant and the emission results corresponding to mixtures were evaluated. The oil was obtained from hot mechanical extraction at 95 ° C and subsequently a homogeneous catalysis transesterification was carried out to separate the fatty acid methyl esters and glycerol contained in the oil. After obtaining the biodiesel, some physicochemical properties of the same were determined and tests were carried out by means of a factorial experimental design with different proportions of commercial fuel and the biofuel obtained in a stationary diesel cycle engine. ANOVA was carried out to determine the best treatment and the emissions of CO, CO₂, and opacity were measured using a Bosch BEA-150 probe and a fluke 750 analyzer. It was determined for each treatment in what percentage the pollutant emissions were reduced. Likewise, the temperature of the emissions and the torque were measured for the different treatments in the engine, obtaining with the best treatment a reduction of 45% for CO and 60% for CO₂.

Índice general

1. Introducción.....	10
2. Justificación.....	12
3. Objetivos.....	12
3.1. General.....	12
3.2. Particulares.....	12
4. Hipótesis.....	12
5. Fundamentación teórica.....	13
5.1.1. Biocombustibles.....	13
5.1.2. Biocombustibles líquidos.....	14
5.1.3. Biodiésel.....	14
5.2. Materias primas para la generación de biodiésel.....	15
5.2.1. Aceites de cultivos alimenticios.....	16
5.2.2. Microalgas.....	16
5.2.3. Residuales de aceites y grasas de origen animal y vegetal.....	17
5.2.4. Aceites provenientes de cultivos no comestibles.....	17
5.2.5. <i>Ricinus communis</i>	18
5.2.6. <i>Ricinus communis</i> , variedad guanajuatol.....	19
5.2.6.1. <i>Origen de la variedad</i>	19
5.2.6.2. Descripción varietal.....	19
5.3. Procesos para extracción de aceite de ricino.....	20
5.3.1. Métodos tradicionales.....	20
5.3.2. Extracción por solventes.....	20
5.3.3. Extracción mecánica.....	21
5.3.4. Extracción asistida por microondas.....	22
5.3.5. Extracción asistida por ultrasonido (UAE).....	23
5.3.6. Extracción enzimática.....	23
5.4. Proceso para obtención de biodiésel.....	24
5.4.1. Dilución.....	24

5.4.2.	Pirólisis.....	24
5.4.3.	Micro emulsión.....	24
5.4.4.	Hidrotratamiento.....	25
5.4.5.	Transesterificación (catálisis homogénea)	25
5.4.6.	Transesterificación (no catalítica)	25
5.4.7.	Transesterificación (catálisis heterogénea).....	26
5.5.	Análisis de las propiedades del biodiésel.....	26
5.6.	Medición de emisiones.....	26
6.	Metodología.....	28
6.1.	Materiales.....	28
6.1.1.	Descripción del espacio para el trabajo de investigación.....	28
6.1.2.	Prensa extractora	28
6.1.3.	Plataforma experimental (motor)	29
6.1.4.	Medidor de opacidad	30
6.1.5.	Fluke AirMeter 975	31
6.1.6.	Analizador termogravimétrico (TGA).....	32
6.1.7.	Calorímetro de barrido diferencial (DSC).....	32
6.1.8.	Medidor digital de temperatura	33
6.2.	Obtención de material vegetal.....	35
6.3.	Obtención del aceite.....	37
6.4.	Filtrado del aceite.....	39
6.5.	Transesterificación	40
6.6.	Lavado del biodiésel	42
6.7.	Determinación de características fisicoquímicas	44
6.8.	Medición de emisiones.....	45
6.9.	Análisis estadístico.....	47
7.	Resultados y discusión.....	48
7.1.	Obtención de las semillas de higuera.....	48
7.2.	Obtención del aceite.....	48
7.3.	Rendimientos de transesterificación	50

7.4. Determinación de propiedades fisicoquímicas del biodiésel	51
7.5. Análisis de emisiones	53
8. Conclusiones	58
9. Índice de ilustraciones	58
10. Referencias	59

Figura 1. Vista isométrica de prensa extractora	28
Figura 2. Vista isométrica del tornillo extractor	29
Figura 3. Motor para pruebas de Biodiésel con medidor de torque integrado.....	30
Figura 4. Sonda de análisis de emisiones BOSCH BEA 150	30
Figura 5. Medidor FLUKE AirMeter 750.....	31
Figura 6. TGA Q500, TA.....	32
Figura 7. DSC Q2000, TA	33
Figura 8. Sistema de medición de temperatura con microcontrolador	34
Figura 9. Funcionamiento del sistema de medición de temperatura y termopar	34
Figura 10. Circuito MAX6675 y vista de la PCB	35
Figura 11. Total de frutos secos contenedores de semillas	36
Figura 12. Proceso de descascarado de semillas.....	36
Figura 13. Total de semillas descascaradas	37
Figura 14. Proceso de obtención de aceite en prensado mecánico en caliente	38
Figura 15. Aceite obtenido mediante prensado mecánico	38
Figura 16. Filtración de aceite por vacío.....	39
Figura 17. Material sólido restante de la filtración en manta filtradora.....	40
Figura 18. Reacción de transesterificación en lote de 450 gr	41
Figura 19. Precipitación de glicerol y biodiésel en embudo de separación	41
Figura 20. Lavado de biodiésel y precipitación de glicerol	42
Figura 21. Lavado en seco de biodiésel	43
Figura 22. Recipientes contenedores de biodiésel	43
Figura 23. Emisiones de CO con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel.....	54

Figura 24. Emisiones de CO ₂ con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel	54
Figura 25. Medición de opacidad con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel	55
Figura 26. Medición de reducción de torque con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel	55
Tabla 1: Productividad(t ha ⁻¹), relación beneficio costo y balance energético (MJ Ha ⁻¹)...	19
Tabla 2. Estructura de tratamientos del experimento factorial aleatorizada	47
Tabla 3. Pesos totales de frutos secos y semillas de Ricinus communis var. Guanajuatoil elicidadas con ácido salicílico.....	48
Tabla 4. Rendimientos de aceite de ricino	49
Tabla 5: Contenidos preliminares de transesterificación de biodiésel por tratamiento del aceite elicitado con AS.....	50
Tabla 6. Contenidos totales de transesterificación de biodiésel por tratamiento del aceite elicitado con AS	51
Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino elicitado con AS	52
Tabla 8. Medición de emisiones en motor diésel para mezclas de biodiésel de aceite de ricino	53
Tabla 9. ANDEVA para el experimento de análisis de emisiones.....	57

1. Introducción

En la década de 2010-2020 la atención a combustibles alternativos se ha incrementado debido a escasez crítica de combustibles fósiles y al aumento en los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. El uso de biocombustibles como fuentes alternativas es una de las soluciones más prometedoras a los problemas de combustibles fósiles agotadas y los impactos ambientales negativos asociados al uso y a la cada vez menor disposición (Choi et al., 2016). Los biocombustibles se clasifican en primera, segunda, tercera y cuarta generación, de acuerdo con el tipo de materia prima empleado para producirlos. Así, los de primera generación son aquellos que se elaboran de cultivos que tienen un uso alimentario, ya sea animal o humano. Los de segunda generación son aquellos biocombustibles generados a partir de cultivos no comestibles, lo cual engloba a plantas, así como residuos de cultivos, de la elaboración de alimentos y desechos orgánicos municipales (Guo et al., 2015; Taylor, 2008). Los de tercera generación son aquellos producidos a partir de microalgas y otros microorganismos, las cuales tienen altos rendimientos de carbohidratos, proteínas y aceites (Singh & Heldman, 2016b). Por último, los de cuarta generación son aquellos que utilizan la ciencia de ingeniería genética para el crecimiento de materias primas, (Abdulkareem-Alsultan et al., 2020). En términos generales de biocombustibles de segunda generación, se buscan cultivos oleaginosos cuyas características hagan de éstos opciones sustentables para su utilización (Taylor, 2008). En este sentido, *Ricinus communis L.*; planta arbustiva de la familia Euphorbiaceae, es un cultivo oleaginoso importante, no comestible, tiene una alta producción anual y buen rendimiento en lugares donde se cultiva comercialmente, además debido a que es adecuada para desarrollarse en suelo marginales y climas semi áridos como los presentes en varios municipios en el estado de Querétaro. Su contenido de aceite se considera como una fuente combustible renovable y limpia. El nombre científico “*Ricinus*” viene de la garrapata de las ovejas europeas llamada *Ixodes ricinus* y “*communis*” del latín “común” debido a que es la única especie conocida del género. *Ricinus communis* es comúnmente conocida como ricino, castor, higuerrilla, etc. (Bueno et al., 2017) otros nombres comunes y dialecticos. Es ampliamente cultivada en áreas secas de los trópicos y subtrópicos

con diferentes temperaturas y con veranos cálidos (M. Das et al., 2018). La producción global de aceite de ricino es cercana a 1.8 millones de toneladas por año. Los principales productores son India, china y Brasil (Attia et al., 2018). Contienen entre 40 y 60 % de aceite rico en triglicéridos. Principalmente ácido ricinoléico (Das et al., 2019). Dado que las semillas son venenosas por la presencia de la proteína tóxica ricina, es necesaria precaución durante la cosecha (Scholz & da Silva, 2008). En particular, el aceite de ricino es un biolíquido no comestible, y su aplicación en la industria de los biocombustibles, en comparación del uso de materia prima sostenible (otro tipo de cultivos) para producción de biodiésel mediante tecnologías de transesterificación convencionales no crea crisis alimentarias ni eleva preocupaciones ambientales críticas (Canoira et al., 2010; Conceição et al., 2007; Maleki et al., 2013; Mukesh et al., 1993; Panwar et al., 2010). En adición, la producción de biodiésel con aceite de ricino es más barato comparado con otros aceites vegetales debido a que es soluble en alcohol y se somete a la reacción de transesterificación con calentamiento mínimo bajo condiciones de temperatura ambientales (Ramezani et al., 2010). Además, el biodiésel producido mediante aceite de ricino tiene un mayor número de cetano, lo que lleva a una mejor calidad de ignición para motores diésel, y contiene más oxígeno, aunque poco, y si lo hay, poco contenido de azufre, permitiendo así una combustión más completa y limpia que el diésel por sí mismo (M. Das et al., 2018; Islam et al., 2014).

2. Justificación

A pesar de que hace ya algún tiempo se viene haciendo uso de *R. communis* para elaboración de biodiésel, son pocos los estudios que se han dedicado a la investigación de emisiones y rendimiento de motores diésel usando biodiésel hecho a partir de su aceite. Estudios previos han mostrado que el alto contenido del ácido ricinoléico en este, incorpora mayor lubricidad al biodiésel, comparado con el elaborado con el de otros aceites vegetales. Además, es uno de los cultivos oleaginosos con mayor cantidad de aceite por tonelada de semilla (380 L), siendo así una de las opciones con mayor viabilidad para la producción de biocombustibles. Se ha observado que la disminución de emisiones de CO es alrededor de 30%, CO₂ alrededor de 35% e HC alrededor de 40%, mientras que el aumento en emisiones de NO_x es menor al reportado en literatura para biodiésel obtenido a partir de otros cultivos oleaginosos

3. Objetivos

3.1. General

Evaluar el biodiésel elaborado a partir del aceite de ricino con diésel comercial y determinar las emisiones resultantes de la combustión de estas en un motor de ciclo diésel.

3.2. Particulares

- Determinar las características fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de *R. communis*
- Medir las emisiones contaminantes de CO, CO₂, HC, O₂ y NO_x derivadas del uso del biodiésel en un motor de ciclo Diésel
- Determinar el torque entregado en el motor con las mezclas de biodiésel y la temperatura de los gases de escape

4. Hipótesis

Debido a la cadena de los ésteres metílicos del biodiésel obtenido con el aceite de *Ricinus communis* se disminuye al menos el 20% de las emisiones de CO, CO₂ y HC, las emisiones de NO_x no son mayores al 50% y el torque del motor se mantiene igual.

5. Fundamentación teórica

5.1.1. Biocombustibles

La producción de energía a partir de biomasa es una vía renovable que se utiliza para reducir el impacto de la producción y uso de energía a lo largo el planeta (McKendry, 2002). Para este cometido, la biomasa tiene el mayor potencial y puede ser considerada como la mejor opción para atender la demanda y seguridad del suministro de combustibles de una manera sustentable (Chandra et al., 2012).

En este sentido la energía se puede obtener de la biomasa de 5 maneras:

Utilización de cultivos que produzcan almidón, azúcar, celulosa y aceite; Los desechos sólidos pueden ser quemados; Los digestores anaeróbicos productores de biogás, los cuales pueden ser utilizados para generar calor/electricidad; Producción de metano a partir de desechos sólidos en rellenos sanitarios y producción de biocombustibles líquidos que incluyen etanol, metanol, biodiésel y sus derivados (Demirbaş, 2001).

5.1.2. Biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos proveen una de las pocas opciones para reemplazo a corto/mediano término para gran parte de combustibles de origen fósil. Tienen el potencial de ofrecer ahorros en emisiones de gases de efecto invernadero y seguridad energética. Siendo así, en tiempos actuales las alzas en los precios de los alimentos y reportes pobres de energía en los biocombustibles (particularmente en biocombustibles de primera generación) han causado que sea cuestionado su uso ampliamente en diversas partes del mundo, además, futuras preocupaciones apuntan también hacia el desplazamiento de tierras de cultivo. Los biocombustibles líquidos pueden ser algunos como: bioturbosina, etanol, biodiésel, biobutanol y otros diversos. Las materias primas son cultivos a base de aceite, como lo pueden ser semillas oleaginosas, para la producción de biodiésel, y cultivos a base de azúcar, como lo pueden ser la caña de azúcar, para la generación de etanol. Los anteriores cultivos, que tienen un uso alimenticio, son conocidos como cultivos energéticos de “primera generación”. Toda la masa lignocelulósica (Biomasa cuya mayoría de células de las paredes tienen alto contenido de carbono) pueden ser convertidos en combustibles líquidos a través de procesos biológicos (esterificación y fermentación) o a través de rutas termoquímicas como pirólisis. Aquellos cultivos que no tienen usos alimenticios son conocidos como de “segunda generación”. Los biocombustibles que utilizan algas como materia prima son conocidos como de “tercera generación”, por último, aquellas materias primas genéticamente diseñadas para gran rendimiento de biomasa y bajos contenidos de lignocelulosa y lignina pertenecen a la llamada “cuarta generación” de biocombustibles. La complejidad de la cadena de suministro de los cultivos de segunda generación puede impedir el desarrollo de los biocombustibles, pero puede ser también ventajoso, ya que pueden emerger muchos productos de la pequeña agricultura (Taylor, 2008)

5.1.3. Biodiésel

La Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) define al biodiésel como un combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos

grasos de cadena larga derivado de aceites vegetales o grasas animales (ASMT, 2015). En México, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos lo define como “combustible que se obtiene por la transesterificación de aceites de origen animal o vegetal” (DOF, 2008)

Aunque la especificación ASTM D6551 no indica el proceso de producción en su definición de biodiésel, señala que comúnmente se produce por una reacción de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol en presencia de un catalizador para producir ésteres monoalquílicos y glicerina (ASMT, 2015). De cualquier manera, ambas definiciones coinciden en el tipo de materia prima para producir biodiésel y en cierta medida con su proceso de producción.

se considera como “biodiésel convencional” aquel combustible renovable y limpio derivado de aceites vegetales o grasas animales, químicamente constituido por una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga (Cheng & Timilsina, 2011).

El término convencional se refiere al tipo de biomasa empleado para su obtención: fuentes comestibles/alimenticias también denominadas de primera generación.

El “biodiésel avanzado”, por otra parte, es un combustible renovable, limpio compuesto por una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga o pudiendo ser similar al diésel convencional en términos de estructura química y contenido energético si se considera al diésel renovable dentro de esta categoría. El término avanzado alude a la tecnología y/o al tipo de biomasa usada en su producción: fuentes no comestibles/no alimenticias desarrolladas sustentablemente, aceites/grasas residuales, residuos agrícolas, residuos municipales e inclusive aceites derivados de microorganismos (Advanced biofuels, 2012).

5.2. Materias primas para la generación de biodiésel

Las principales materias primas para la producción de biodiésel convencional mediante la transesterificación son los aceites comestibles y el metanol. Mientras que los insumos del biodiésel avanzado incluyen los aceites de cultivos no alimenticios/no comestibles,

aceites/grasas residuales y materiales lignocelulósicos denominados fuentes de segunda generación, así como los aceites derivados de microorganismos que se consideran insumos de tercera generación (Sandoval, 2010). El tipo de insumo empleado es relevante porque éste imparte características relacionadas con las propiedades del biodiésel producido (Zhang et al., 2016). El metanol es el alcohol preferido para producir biodiésel por su bajo costo y ventajas químicas y físicas. Cuando éste se emplea en su producción, usualmente al producto también se le denomina éster metílico de ácidos grasos en vez de biodiésel (FAME, por sus siglas en inglés). El uso de otros alcoholes como el etanol e iso-propanol es posible, pudiéndose obtener biodiésel con mejores propiedades combustibles, pero su uso está limitado cuando se buscan cumplir varios estándares existentes (Knothe, 2010).

5.2.1. Aceites de cultivos alimenticios

Los aceites comestibles como el de soya, palma, canola, girasol, cártamo, coco y cacahuete se consideran insumos de primera generación por ser los primeros cultivos empleados en la producción del biodiésel (Atabani et al., 2012). Actualmente la mayor cantidad del biodiésel se produce mediante aceites comestibles como el de soya (Estados Unidos), canola (Europa) y palma (Malasia) (Stoytcheva & Montero, s. f.).

Las ventajas de los aceites comestibles son su composición pura (reduce su pretratamiento), su disponibilidad a gran escala, su comercialización internacional y la posibilidad de ser importados (Balat, 2011). Las desventajas incluyen su competencia con la producción de alimentos y las preocupaciones por la posible deforestación y cambios de uso de suelo relacionados con el incremento en la producción de aceite vegetal (IEA, 2018).

5.2.2. Microalgas

Las microalgas son organismos fotosintéticos que convierten la luz del sol, agua y dióxido de carbono en biomasa y representan el insumo de tercera generación para producir biodiésel. Dada su eficiencia fotosintética para producir biomasa, tasas altas de crecimiento y gran contenido de aceite, se consideran el único insumo capaz de cumplir la demanda de combustibles y desarrollarse sustentablemente en el futuro. (Atabani et al., 2012; Tabatabaei et al., 2015)

Actualmente existen numerosas investigaciones e intentos para obtener biodiésel mediante la transesterificación de aceites de algas (Atabani et al., 2012; Tabatabaei et al., 2015). Sin embargo, éste posee altos costos de producción. Por ello, los esfuerzos se orientan a seleccionar las mejores cepas y establecer estrategias de cultivos robustas y estables comercialmente, administrando sustentablemente el uso de tierra, agua y nutrientes para obtener la máxima productividad de biomasa y lípidos con microalgas (Loera-Quezada & Olguín, 2010).

5.2.3. Residuales de aceites y grasas de origen animal y vegetal

Las grasas animales como cebo de res, grasa de aves, manteca de cerdo, grasas y aceites residuales de cocina se consideran insumos de segunda generación. En particular, los aceites y grasas residuales son una alternativa para producir biodiésel al ser una materia prima barata y eliminar la necesidad de disponer estos residuos (Tabatabaei et al., 2015). En particular, el aceite de cocina usado es 2.5-3.5 veces más barato que los aceites puros, su disponibilidad no se afecta por políticas de uso de suelo, se producen grandes cantidades en las cocinas de todo el mundo y su pretratamiento solo requiere deshidratación y filtrado por lo que su conversión convencional es ideal para instalaciones pequeñas ubicadas en centros urbanos (Bart, 2011).

Sin embargo, la utilización de aceites residuales puede presentar problemas técnicos y de logística por su naturaleza residual como lo son su recolección, control y trazabilidad. También este insumo puede requerir varios procesos para su acondicionamiento cuando tiene altos contenidos de material insaponificable, agua y ácidos grasos libres. Por lo que los costos de producción de biodiésel de aceite residual pueden ser elevados (Martínez Valencia, 2011).

5.2.4. Aceites provenientes de cultivos no comestibles

Los aceites no comestibles representan una solución para disminuir el uso de aceites comestibles en la producción de biodiésel. Se consideran insumos sostenibles siempre y cuando se cultiven en páramos no aptos para cultivos alimenticios, eliminen la competencia por alimentos, reduzcan la deforestación, sean más eficientes, ambientalmente amigables y más económicos que los aceites comestibles (Tabatabaei et al., 2015).

Aunque existen varios cultivos de aceites no comestibles para producir biodiésel (Atabani et al., 2012), algunos destacados son la jatropha (*Jatropha curcas*), la camelina (*Camelina sativa*) y la higuera (*Ricinus communis*) (Tabatabaei et al., 2015).

La jatropha es una planta perenne que se puede cosechar casi continuamente (30-50 años), resiste a sequías, crece rápido y se adapta a varias condiciones climáticas (SAGARPA- INIFAP, 2011) mientras que la higuera es una planta tropical que tolera suelos variables y reduce la erosión de este (Balat, 2011; SAGARPA- INIFAP, 2011).

En general, se señala que ambos cultivos crecen con poca irrigación en suelos marginales de cualquier tipo, aunque también se ha encontrado que para producir altos rendimientos se requiere abastecer adecuadamente de agua y nutrientes (IEA, 2018).

5.2.5. *Ricinus communis*

El ricino es un arbusto perenne ramificado de rápido crecimiento, ocasionalmente un árbol de madera blanda que crece hasta 3 m de altura y ocasionalmente más alto. En el primer año puede alcanzar los 12 m de altura (Aboelazayem et al., 2018). Sus semillas varían en largo de 15 a 20 mm y en ancho de 5 a 12 mm. La semilla, en variedades híbridas contiene de 47 a 51 % de aceite.

El ciclo de la vida es anual, bienal o perenne y germina de otoño a primavera y crece rápido. Comienza a producir a partir de los 6 meses y continúa rindiendo frutos durante todo el año durante 6 a 7 meses (Yesilyurt et al., 2020) Crece lentamente en invierno. En primavera, las plantas comienzan a crecer rápidamente. El volumen de producción disminuye significativamente después de la tercera cosecha, momento en el cual la plantación debe renovarse. Se comporta como un cultivo anual en áreas heladas (Gad et al., 2018). Tradicionalmente, se usa para iluminación y en medicina (García et al., 2017). Se utiliza también como un lubricante de alta calidad y es en general una materia prima versátil en la industria química (Arbab et al., 2013).

En el caso de las semillas, estas estarán listas para la cosecha cuando todas las cápsulas están secas. La demora en la cosecha una vez que el cultivo está listo puede ocasionar pérdidas en la recolección debido a que las semillas son expulsadas de las cápsulas. Por lo regular, las semillas de aceite de ricino se remueven a mano y las capsulas maduras se

recogen directamente la planta. Las semillas recolectadas se secan para eliminar la humedad, y su aceite se puede extraer de diferentes maneras (Subramaniam et al., 2013).

5.2.6. *Ricinus communis*, variedad guanajuatoil.

5.2.6.1. Origen de la variedad

Guanajuatoil es una variedad de polinización libre, desarrollada para condiciones de temporal, cuyo origen se inicia a partir de 56 colectas realizadas y evaluadas en ensayos de rendimiento en el estado de Guanajuato, México, sobresaliendo la colecta denominada **Gto-3-SMA-planta roja-2008**. Con esta colecta se inició el mejoramiento genético utilizando el método de selección masal estratificada durante 3 ciclos, seleccionando en cada ciclo el 15% de los individuos más rendidores y de porte bajo (entre 1.5 a 2.25m) de una población de 800 individuos. En el último ciclo de selección masal se sembró a distancia de 0.75m x 0.75m (entre hileras y plantas) para provocar una mayor competencia entre los individuos y poder seleccionar los de mayor rendimiento, los cuales integraron de forma masal la semilla original. Paralelamente se desarrollaron los componentes tecnológicos de fecha de siembra, fertilización, control de maleza y manejo perenne mediante podas (INIFAP, 2018).

Tabla 1: Productividad($t\ ha^{-1}$), relación beneficio costo y balance energético ($MJ\ Ha^{-1}$)

Cultivo	% Aceite	Productividad t ha^{-1}	Relación B/C	Balance energético
Higuerilla	44	2.25	1.60	1:+4.35

5.2.6.2. Descripción varietal

La variedad Guanajuatoil se caracterizó por dos ciclos consecutivos, para su registro oficial es HIG-003-010716, dentro de las características morfológicas destacan: el color de tallo rojo, de porte entre 1.80 a 2.35m, con dos niveles de inflorescencia cuyo rendimiento oscila de 1.8 a 2.7 $t\ ha^{-1}$ en regiones donde se tiene una precipitación de 450 a 550 mm y con 140 días a la madurez de cosecha del primer y segundo nivel de

inflorescencias, el color de los estigmas es rojo en la flor femenina y la flor masculina es de color púrpura, el racimo es largo de color púrpura, forma cónica y la semilla de tamaño mediano (longitud 0.9 a 1.5 cm y ancho de 0.5 a 1.0 cm), el color de la semilla es café rojizo, brillante fuerte con presencia de carúncula pronunciada de color café y forma redonda, con un contenido de aceite de 42 a 46%; el diámetro de la copa de la planta es estrecho (1.50 m) de forma abovada y ciclo corto (Hernández y Móntes, 2018).

5.3. Procesos para extracción de aceite de ricino

5.3.1. Métodos tradicionales

En términos de recuperación de aceite y rendimiento, a manera tradicional e informal de extracción usados por comunidades rurales alrededor del mundo es reconocida como ineficiente. (Olaniyan, 2010) ha propuesto 3 maneras principales de recuperación de aceites de materiales oleaginosos originarios de plantas, como son: extracción húmeda (agua caliente o por acción de vapor), extracción por solventes y prensado mecánico. En términos de la extracción húmeda, (Oluwole et al., 2015) señalaron 9 principales pasos involucrados en la extracción de aceite de ricino por el método tradicional siendo: recolección de vainas de semillas, abrir las vainas, hervir las semillas para reducir humedad, machacar las semillas para formar una pasta, mezclar la pasta con agua/hervir para extraer aceite y separar aceite, secándolo por calentamiento. Evaluaron el porcentaje de eficiencia de recuperación de aceite (19.42 %)

Los métodos convencionales son bien conocidos y ampliamente practicados, siendo las principales extracciones por solventes y extracción mecánica. Muchas semillas son tratadas por ambos métodos o por la combinación de los dos.

5.3.2. Extracción por solventes

La extracción por solventes es comúnmente realizada a semillas con bajo contenido de aceite (<20%) como el de soya. Este método es considerado como uno de los más eficientes en extracción de aceite vegetal, con muy poco residuo de aceite en la pasta (Buenrostro & López-Munguía, 1986; Saurabh, 2011). Los solventes más

comúnmente usados son hexano, dietil éter, éter de petróleo y etanol, las consideraciones en la elección del solvente son la alta relación soluto-solvente, volatilidad del solvente con el aceite, viscosidad y polaridad del aceite, costo y disponibilidad del solvente (Muzenda et al., 2012; Takadas & Doker, 2017).

De acuerdo con (Muzenda et al., 2012), en la optimización en los parámetros de proceso para aceite de ricino, observaron que la habilidad de extracción de éste es mejorada con el aumento del tiempo de extracción y con una relación solvente-soluto de 6:1.

En su trabajo en extracción caracterización y modificación de aceite de ricino, (Akpan et al., 2006), Hicieron uso de la extracción de aceite de pasta de semillas de ricino usando extractor Soxhlet, obtuvieron 33.2% de eficiencia de extracción y concluyeron que el modo de extracción y la variedad de la semilla son parámetros importantes que afectan la eficiencia de extracción de este.

Algunas de las ventajas de este método de extracción son la repetibilidad y reproducibilidad, sin embargo, las desventajas son largos periodos de extracción, consumo relativamente alto de solvente, altas inversiones, alto requerimiento de energía, emisiones de compuestos orgánicos volátiles a la atmosfera, altos costos de operación, baja calidad del aceite y por el número de pasos en el proceso (Buenrostro & López-Munguia, 1986; Dawidowicz et al., 2008; del Valle & Aguilera, 1999; Takadas & Doker, 2017). Aunado a lo anterior, el proceso hace uso de solventes orgánicos cuya remoción trae consigo costos adicionales y pasos extra en el proceso (Gibbins et al., 2012; Takadas & Doker, 2017).

5.3.3. Extracción mecánica

La extracción mecánica involucra la aplicación de presión (usando prensa hidráulica o de tornillo) para forzar al aceite a salir de los materiales oleaginosos (Arisanu, 2013). Por este método la eficiencia de extracción es mejorada por el incremento de presión. (Mwithiga & Moriasi, 2007) encontraron que la eficiencia de extracción se incrementaba con presiones cercanas dentro del rango de (40-80 kgf m⁻²), la duración de prensado (6-12 min) e incrementando la temperatura del batch de las semillas, alcanzando 75 °C.

En cuestión del porcentaje de extracción, la prensa de tornillo tiene una ventaja contra la prensa hidráulica por tener ligeramente mejor eficiencia, en adición a su modo de extracción continuo (Arisanu, 2013). La extracción mecánica es generalmente más sencilla, segura y contiene menos pasos que la extracción que empleando solventes (Oyinlola et al., 2004).

Los métodos de prensa mecánica son usualmente usados para extraer aceites vegetales de semillas que contengan arriba del 20% (Sinha et al., 2015). Generalmente estos métodos tienen la ventaja de bajo costo de operación y la producción de aceites es de alta calidad con poco contenido de ácidos grasos libres (Carr, 1978; Kirk et al., 1949). Sin embargo, este método de extracción tiene menor eficiencia comparado con la extracción por solventes, dejando una porción grande del mismo en la pasta restante (Anderson et al., 2020; Buenrostro & López-Munguia, 1986). En la extracción de aceite de ricino, la prensa mecánica remueve cerca del 45% presente en las semillas, con un remanente en la pasta, extraíble mediante solventes (Ogunniyi, 2006).

Hay dos tipos de métodos para prensa mecánica, nombrados prensado en frío y prensado en caliente. Prensado en frío o método de escarificación es llevado a baja temperatura (<50 °C), mientras que el prensado en caliente es llevado a temperaturas elevadas. Prensado en frío es generalmente más seguro que el prensado en caliente, así mismo, efectos adversos se pueden presentar, como lo son la disminución en la estabilidad oxidativa y degradación de componentes valiosos del aceite. La pureza y las propiedades naturales del aceite son preservadas con la compresión fría (Azadmard-Damirchi et al., 2011; Bhatol, 2013); Los métodos de prensado en caliente tienen mayores eficiencias debido a la disminución de la viscosidad del aceite a altas temperaturas, las eficiencias son cercanas al 80% del aceite disponible en semillas (Patel et al., 2016).

5.3.4. Extracción asistida por microondas

La extracción asistida por microondas es una técnica innovadora para extracción de aceites vegetales y aceites esenciales (Ramanadhan, 2005; Rassem et al., 2016). Este método es simple pero superior a otros métodos térmicos usados para extraer aceites de alta calidad. El pretratamiento para las semillas es realizado en un horno de microondas,

que usa ondas de radio para transmitir y convertir energía en calor a frecuencias de 300 MHz a 300 GHz (Singh & Heldman, 2016). El uso de radiación de microondas resulta en la ruptura de membranas celulares, haciendo posible una mayor eficiencia en la extracción y un incremento en coeficientes de transferencia de masa (Azadmard-Damirchi et al., 2011). De hecho, esta técnica ha sido utilizada para la extracción de aceite en semillas de una gran variedad, incluyendo soya, ricino, cacahuate, canola, oliva, girasol, avellanas, colza, entre otras (Muzenda et al., 2012).

5.3.5. Extracción asistida por ultrasonido (UAE)

UAE es una técnica innovadora que hace uso de ondas de ultrasonido para incrementar la vibración y el calor, resultando en la destrucción de las paredes celulares rígidas de la planta, incrementando el contacto entre el solvente y el material de la planta (Takadas & Doker, 2017). Se analizó la producción de aceite de semillas de papaya por UAE y solventes, reportaron que la extracción convencional por solvente se realizó en 12 h, cuando el método UAE duró solamente 30 min, observando eficiencias similares (Samaram et al., 2014). Las ventajas de la extracción por UAE incluyen reducción en tiempo de extracción (Stanisavljević et al., 2007), menor consumo de energía (Hashemi et al., 2015; Tian et al., 2013)) e igual o mayor eficiencia de extracción de aceite (Takadas & Doker, 2017).

5.3.6. Extracción enzimática

La extracción enzimática es una técnica prometedora para la extracción de aceite usando enzimas al momento de aplastar la semilla. El objetivo principal del uso de las enzimas durante la extracción acuosa del aceite es hidrolizar la estructura de los polisacáridos que forman la pared celular de las semillas oleaginosas o las proteínas que forman la membrana celular y los cuerpos lipídicos (Latif & Anwar, 2008; Taha & Hassanein, 2007). El proceso es amigable con el medio y no produce compuestos orgánicos volátiles. Sin embargo, el proceso es tardado. En la actualidad existen complejos o preparados enzimáticos comerciales de grado alimenticio con actividad múltiple como celulasa, hemicelulasa y pectinasa, que se aplican a las semillas oleaginosas con la finalidad de

hidrolizar los componentes de la pared celular de los tejidos (Ovando-Chacón & Waliszewski, 2005).

5.4. Proceso para obtención de biodiésel

5.4.1. Dilución

En este método, los aceites son diluidos con diésel en ciertas proporciones, reduciendo la viscosidad. Los aceites preferidos para este método son semilla de algodón, girasol y aceite de semilla de palo María (*Calophyllum inophyllum*). Se ha observado que las viscosidades cinemáticas de aceite de ricino con diésel logran alcanzar la descrita en el estándar ASTM D6751 con 30% de aceite de ricino. Algunas características fisicoquímicas importantes del aceite de ricino como la densidad, viscosidad cinemática, contenido de agua, mayor valor calorífico, punto nube, etc., de mezclas de aceite de ricino son ampliamente estudiadas. La mezcla de aceite de ricino encontrará los requerimientos del biodiésel con el 30% (Nwafor, 2003).

5.4.2. Pirólisis

El proceso de pirólisis involucra la descomposición de materia orgánica en estructuras más pequeñas o simples usando la energía térmica en un ambiente libre de oxígeno. Es un proceso termoquímico y tiene una alta eficiencia, pero no es un método económico para la producción de biodiésel (Boopathi et al., 2018).

5.4.3. Micro emulsión

Las micro emulsiones pueden describirse como isotrópicas, transparentes, o distribución de aceite termodinámicamente estable y semitransparente, agua, surfactante y otras moléculas anfifílicas. Otro proceso utilizado para minimizar la viscosidad de los aceites vegetales es la creación de micro emulsiones con alcoholes de cadena corta como metanol, etanol, 1-butanol. El diámetro de caída en micro emulsiones está entre 100 y 1000 Å. Con lo que se ha encontrado disminución de la viscosidad y mejoras en las características de rociado de los combustibles obtenidos por este proceso, así como

reducciones en números de cetano y valores térmicos debido al alcohol que se adiciona. (Ribeiro et al., 2007).

5.4.4. Hidrotratamiento

El hidrotratamiento es un proceso alternativo a la transesterificación de grasas animales y aceites vegetales que consiste en la reacción de estos insumos con hidrógeno. Los productos de esta reacción son hidrocarburos parafínicos químicamente equivalentes al petrodiesel (Bart, 2011; Rapier, 2014).

5.4.5. Transesterificación (catálisis homogénea)

La transesterificación es el proceso mediante el cual el aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol en presencia de un catalizador líquido para producir una mezcla de ésteres metílicos (biodiesel) y glicerol como subproducto (Knothe et al., 2010; Naik et al., 2010) El proceso de catálisis homogénea implica que el catalizador se encuentra en estado líquido al igual que los reactivos pudiendo ser éste un catalizador ácido o básico. Los catalizadores básicos incluyen hidróxido de sodio, metóxido de sodio, metóxido de potasio, hidróxido de potasio y carbonato de potasio. Los catalizadores ácidos incluyen ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fosfórico, sulfato férrico y ácido sulfónico. Aunque la reacción es más lenta comparada con la transesterificación alcalina, se han reportado muy altos rendimientos en ésteres. Además, los catalizadores ácidos toleran aceites con un mayor nivel de ácidos grasos libres y agua (Naik et al., 2010).

5.4.6. Transesterificación (no catalítica)

La transesterificación de aceites vegetales con metanol supercrítico se realiza sin usar algún catalizador. El fundamento del tratamiento con fluido supercrítico es aprovechar la relación temperatura/presión en las propiedades termofísicas del alcohol que ocasiona que éste además de ser reactivo, actúe como catalizador ácido de la reacción (Warabi et al., 2004). Este proceso fue propuesto en 2001 y permite manejar altos contenidos de agua y ácidos grasos (Warabi et al., 2004).

5.4.7. Transesterificación (catálisis heterogénea)

La catálisis heterogénea es un método alternativo de producción de biodiésel que consiste en utilizar catalizadores sólidos para la reacción de transesterificación superando así las desventajas de usar catalizadores líquidos (da Costa Evangelista et al., 2016) Los catalizadores heterogéneos poseen una gran cantidad de sitios básicos en su superficie para la reacción de transesterificación. Por lo que se han evaluado diversos catalizadores depositados en materiales soporte como alúminas, hidrocalcitas, zeolitas y sílicas. El proceso de producción de biodiésel es muy parecido al de catálisis homogénea. La diferencia principal es la producción de ésteres y glicerina sin ningún rastro de catalizador, lo que facilita la etapa de purificación de ambos productos.

5.5. Análisis de las propiedades del biodiésel

Las propiedades del biodiésel dependen en gran medida del tipo de materia prima usado para su producción (Zhang et al., 2016). Por lo tanto, las especificaciones para su uso como combustible son necesarias para confinar las propiedades en un intervalo aceptable, controlar su calidad y asegurar un desempeño confiable del motor. Dentro de las especificaciones existentes para el biodiésel destacan las de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) y las del Comité Europeo de Normalización (CEN). Particularmente, la ASTM D6751 y la UNE EN14214 especifican la calidad del biodiésel puro mientras que la ASTM D7467 y EN 590 especifican las mezclas de biodiésel. Las propiedades que se indican en estas especificaciones incluyen el poder calorífico, número de cetano, densidad, viscosidad, contenido de ceniza, corrosión al cobre, contenido de agua, azufre, glicerina, entre otras (ASMT, 2015).

5.6. Medición de emisiones

Las mediciones de las fracciones de CO, CO₂ se aplica el método infrarrojo no dispersivo. El oxígeno se determina con un sensor de actuación electroquímica.

En 2019 K.A. Abed et al en su trabajo “Efectos de combustibles biodiésel en emisiones de motor”, encontraron que para un motor monocilindrico, usando biodiésel de jatropa,

palma, alga y aceite de uso alimenticio en B10 y B20, con cargas de 1, 2, 3 y 4 kw a 1500 revoluciones, que las emisiones de CO y HC disminuyeron, las emisiones de CO₂ con aceite de cocina fueron mayores que el diésel por sí mismo y que las emisiones de NO_x aumentaron a comparación con las emisiones de diésel comercial.

En 2018 Aboelazayem et al, en su trabajo “Producción de aceite de ricino en Egipto, optimización, estudio cinético desempeño del motor diésel y análisis de emisiones”, encontraron que hubo reducciones significantes de emisiones de CO, CO₂, HC y PM (partículas de materia) al incrementar los porcentajes de biodiésel presente en la mezcla. Bueno et al, (2017), en su trabajo “Desempeño y características de emisiones de mezclas de biodiésel de ricino”, encontraron que el uso de biodiésel de ricino no impacta en la eficiencia térmica con relación al diésel, que el mayor nivel de oxígeno presente en el biodiésel de aceite de ricino no mejora las emisiones de PM y que las emisiones de PM, HC y CO dependieron de la carga, debido a la poca atomización de la mezcla.

Özcanli et al, (2012), en su trabajo “Desempeño y estudio de emisiones de biodiésel de aceite de ricino y sus mezclas con diésel”, encontraron que el bajo poder calorífico del biodiésel elaborado a partir de aceite de ricino disminuyó la potencia de salida del motor en 4.12 % con la mezcla B25. Mientras que las emisiones de CO y CO₂ disminuyeron un 16.9 y 17.2 % respectivamente para mezclas B50, mientras que con B25 las emisiones de CO y CO₂ disminuyeron un 12.8 y 14.1 %. Se reporta que las emisiones de NO_x incrementaron un 43.16% con la mezcla B50, lo cual es indeseable para resultados de emisiones de NO_x, también se determinó que las emisiones de NO_x aumentaron para mezclas B25 y B50.

6. Metodología

6.1. Materiales

6.1.1. Descripción del espacio para el trabajo de investigación

Para la obtención de las pruebas de biodiésel, se realizaron en el laboratorio de pruebas de mecánica automotriz, en campus San Juan Del Río, de la Universidad Autónoma de Querétaro.

6.1.2. Prensa extractora

La extracción mecánica de aceite en caliente fue realizada mediante una prensa extractora marca Zagaon Tech (México, Querétaro) con capacidad para 5 kg hr^{-1} (figura 1 y 2).

Figura 1. Vista isométrica de prensa extractora



Figura 2. Vista isométrica del tornillo extractor



6.1.3. Plataforma experimental (motor)

Consta de un motor de ciclo diésel mono cilíndrico enfriado por aire Mpower modelo 178 FD de 6 HP/3600 rpm, un desplazamiento de 296 cm³, relación de compresión 19:1 y un torque máximo de 13.6 Nm @ 2880 rpm. Esta se ubica en el campus San Juan del Rio, en la facultad de ingeniería de la Universidad autónoma de Querétaro. (Figura 3).

Figura 3. Motor para pruebas de Biodiésel con medidor de torque integrado



6.1.4. Medidor de opacidad

Es un sistema de análisis de emisiones Bosch® Bea-150 con DMT (Del alemán, módulo de número de revoluciones y temperatura) (Figura 4).

Figura 4. Sonda de análisis de emisiones BOSCH BEA 150



Los rangos de medición son los siguientes:

CO	Monóxido de carbono	0-10% vol
HC	Hidrocarburos	0-9999 ppm
CO ₂	Dióxido de carbono	1-18% vol
O ₂	Oxígeno	0-22% vol
NO _x	Monóxido de nitrógeno	0-5000 ppm
λ	Razón de aire lambda	0.5 – 9.999

6.1.5. Fluke AirMeter 975

Simultáneamente mide, registra y muestran en pantalla la temperatura, humedad, CO₂ y CO en una pantalla LCD brillante retroiluminado

CO: **Rango** 0 a 500 ppm, precisión $\pm 5\%$ o ± 3 ppm, lo que sea mayor, @ 20 °C y 50 % HR
CO₂ **Rango** 0 a 5000 ppm Tiempo de calentamiento 1 min (5 minutos para la especificación completa) 2.75 % + 75 ppm (Figura 5)

Figura 5. Medidor FLUKE AirMeter 750



6.1.6. Analizador termogravimétrico (TGA)

Para la determinación de la temperatura de descomposición del biodiésel se hizo uso de un equipo marca TA instruments (DELAWARE, EE. UU), modelo Q500. Esto fue realizado en el laboratorio de ... en la facultad de ingeniería, campus aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro. (Figura 6).

Figura 6. TGA Q500, TA



6.1.7. Calorímetro de barrido diferencial (DSC)

Para la determinación del poder de combustión del biodiésel se hizo uso de un equipo marca TA instruments (DELAWARE, EE. UU), modelo Q2000. Esto fue realizado en el laboratorio de ... en la facultad de ingeniería, campus aeropuerto de la Universidad Autónoma de Querétaro. (Figura 7).

Figura 7. DSC Q2000, TA



6.1.8. Medidor digital de temperatura

Para la medición de temperatura de las emisiones de escape se realizó un sistema digital que consta de un conversor digital para termopar tipo K (MAX6675) con interfaz SPI (Figura 10), un microcontrolador PIC 18F2550 de Microchip® (Figura 8) y un termopar tipo K (Figura 9). El sistema registra cada 500 ms la temperatura y la despliega en una pantalla LCD de 16x2 caracteres, así mismo despliega la temperatura máxima y mínima registradas mientras se encuentra en funcionamiento, cuenta con un rango de medición de 0 a 1024 °C y una resolución de 0.25° C, el sistema es alimentado mediante un cargador de teléfono celular y un cable USB tipo B. El diseño del sistema se realizó en el software proteus 8 y la PCB se realizó por medio de impresión negativa y coagulación mediante cloruro férrico. La indentación de código se realizó mediante PIC C compiler® versión 5.049

Figura 8. Sistema de medición de temperatura con microcontrolador

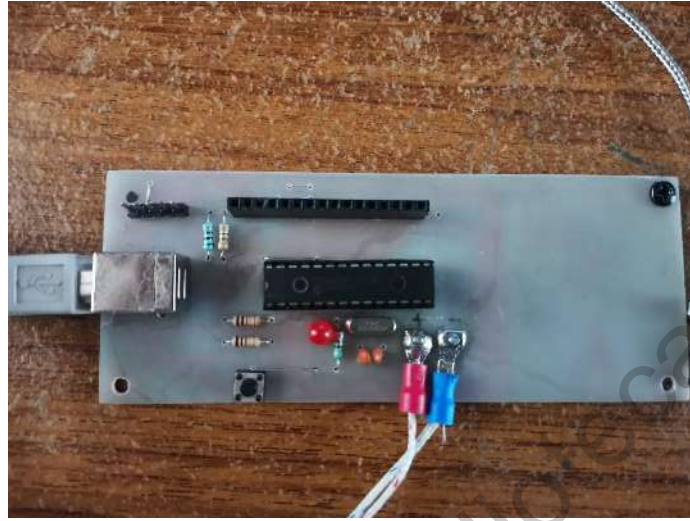
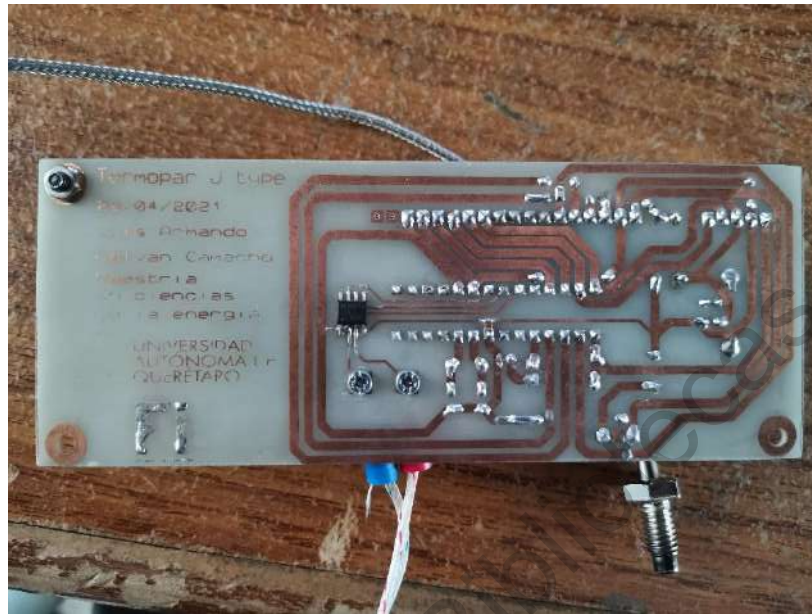


Figura 9. Funcionamiento del sistema de medición de temperatura y termopar



Figura 10. Circuito MAX6675 y vista de la PCB



6.2. Obtención de material vegetal

Se utilizaron semillas de higuera variedad Guanajuatoil, resultantes de un trabajo experimental previo, en el cual se realizó un aumento en la producción de metabolitos por elicitación con ácido salicílico (Tratamiento 1 = 0 μ M, Tratamiento 2 = 100 μ M, Tratamiento 3 = 300 μ M, Tratamiento 4 = 600 μ M, Tratamiento 5 = 900 μ M, el peso es el total para cada tratamiento). Este experimento fue realizado por el mismo grupo de investigación y se llevó a cabo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala en un invernadero de 432 m², La siembra se realizó el 15 de julio de 2019 y la cosecha en diciembre de 2019. Los frutos se separaron por tratamiento y se trasladaron al laboratorio de compuestos naturales insecticidas de la facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro, los cuales se mantuvieron almacenados a temperatura ambiente bajo sombra, para su posterior utilización en este trabajo de investigación.

Posteriormente de un total de 63.9 kg de frutos secos (figura 11) se realizó un descascarillado para la obtención de semillas (figura 12) de manera manual, obteniendo un total de 32.4 kg de semillas (figura 13).

Figura 11. Total de frutos secos contenedores de semillas



Figura 12. Proceso de descascarado de semillas



Figura 13. Total de semillas descascaradas



6.3. Obtención del aceite

Se realizó extracción mecánica de aceite en caliente mediante una prensa extractora marca Zagaon Tech (México, Querétaro) con capacidad para 5 kg hr^{-1} (Figura 14), al final de la extracción se obtuvo aceite con residuos sólidos provenientes de la testa de la semilla (Figura 15). esto fue realizado en las instalaciones del Laboratorio de Compuestos Naturales Insecticidas, de la facultad de Química, en la Universidad Autónoma de Querétaro, campus CU, al igual que el filtrado, la reacción de transesterificación y el lavado del biodiésel.

El aceite obtenido fue almacenado en envases de polietileno de alta densidad con capacidad de 1L, hasta su empleo para la realización del biodiésel. (Figura 15).

Figura 14. Proceso de obtención de aceite en prensado mecánico en caliente



Figura 15. Aceite obtenido mediante prensado mecánico



6.4. Filtrado del aceite

El resultante se sometió a filtrado mediante bomba de vacío a 500 mmHg, con embudo de Büchner y matraz Kitasato (Figura 16), utilizando manta filtradora con poros de 0.3 μm^2 (figura 17), para separar los residuos sólidos y el aceite.

Figura 16. Filtración de aceite por vacío



Figura 17. Material sólido restante de la filtración en manta filtradora



6.5. Transesterificación

Se llevó a cabo en lotes de 450 g de aceite, la reacción se llevó a cabo en vasos de precipitado de 500 mL a 55° C con agitación continua (Figura 18), con un tiempo de 25 min cada uno, lo anterior, siguiendo la metodología de Keera et al., (2018) cambiando el tiempo de reacción de 30 – 120 a 25 minutos, y el catalizador de KOH por NaOH.

Para la reacción de catálisis heterogénea, se utilizó una relación molar metanol/aceite 6:1 (w/w), empleando como catalizador perlititas de hidróxido de sodio (<99% de pureza) al 1% (w/w) previamente molidas en mortero de porcelana. Para el número molar del aceite se consideró el de una hoja de datos técnica de aceite comercial FISCHER SCIENTIFIC® (933.4 g mol^{-1}) (FISCHER SCIENTIFIC, s. f.), una vez preparado y adicionado el metóxido se reguló la agitación y se comenzó a tomar el tiempo.

Figura 18. Reacción de transesterificación en lote de 450 gr



Una vez terminado el tiempo de la reacción, se detuvo la agitación y se vació en embudo de separación de 500 mL con la ayuda de un embudo. El contenido se dejó precipitar por 12 h y posteriormente se separó el glicerol y los ésteres metílicos (Figura 19).

Figura 19. Precipitación de glicerol y biodiésel en embudo de separación



6.6. Lavado del biodiésel

Una vez separado el biodiésel, este se sometió a un lavado con agua destilada, por triplicado, para separar los remanentes de catalizador y metanol de la reacción con una relación 1:1 (v/v) de agua destilada y biodiésel, esto se realizó en embudo de separación de 1 L con agitación manual. Después de cada lavado, se dejó reposar el contenido por 45 min y se separó el agua mediante precipitación (Figura 20).

Figura 20. Lavado de biodiésel y precipitación de glicerol



Posterior al lavado por triplicado, se realizó un lavado en seco del biodiésel (Figura 21), este consistió en agitación constante a 110° C en parrilla de calentamiento por 20 min, esto con la finalidad de evaporar los remanentes de agua destilada del biocombustible. Una vez transcurrido el tiempo se dejó reposar por 1 h y se almacenó en recipientes plásticos con el fin de evitar el contacto con la atmosfera (Figura 22).

Figura 21. Lavado en seco de biodiésel



Figura 22. Recipientes contenedores de biodiésel



6.7. Determinación de características fisicoquímicas

Para la determinación de las características fisicoquímicas se llevaron a cabo distintas metodologías descritas a continuación

Densidad

Se determinó mediante la relación de aproximadamente 10 mL de biocombustible y su peso en balanza analítica, a una temperatura 27° C, por triplicado para cada tratamiento elicitado.

Viscosidad

Determinada mediante viscosímetro a 27° C, por triplicado para cada tratamiento elicitado.

Contenido de cenizas

Determinada mediante la metodología descrita en la norma ASTM D482, mediante mufla y mechero de bunsen

Se utilizaron crisoles a peso constante, para esto se calentaron a 700° C por 10 min en mufla y se dejaron reposar en desecador de vidrio

Fueron colocados 17 g de biodiésel en crisol a peso constante y se pesó, se agregaron 2 mL de alcohol isopropílico y se agitó con una barra de papel filtro, el contenido de cenizas del papel filtro fue determinado previamente.

Se calentó el crisol en triángulo de calentamiento con mechero de bunsen previniendo que la mezcla hirviera, se quemaron los vapores del biodiésel hasta que este se agotó

El crisol con el excedente de biodiésel se calentó a 800° C por 1 h en la mufla, se dejó reposar por 1 h dentro de la mufla y se determinó su peso

El contenido de cenizas se determinó como la diferencia del peso de la ceniza de la barra de papel filtro, el peso constante del crisol y el peso final del crisol con cenizas. Este proceso se realizó por triplicado

Calorimetría (Differential sweep calorimetric – DSC)

La determinación se realizó por medio de cambios de flujo de calor, se colocó muestra de 80 g en crisol, así como un crisol de referencia en una celda de temperatura controlada, la temperatura comenzó a elevarse en escalones de 10° C.

Punto de inflamabilidad (Thermo gravimetric analysis - TGA)

Se colocaron muestras de 40g aproximadamente en el analizador y se comenzó a subir la temperatura en escalones de 10° C,

6.8. Medición de emisiones

Se realizó una mezcla homogénea de 3 litros por partes iguales del biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino obtenido a partir de los 5 experimentos previos de elicitación y se realizó la mezcla de biodiésel con diésel comercial PEMEX.

El biodiésel fue probado en el motor estacionario de ciclo diésel siendo evaluadas diferentes mezclas con biodiésel al 10% (B10) 20 % (B20) y se comparó con un control donde se usó solamente diésel (B0)

La medición de opacidad fue realizada mediante la sonda Bosch BEA-150 mientras que la medición de CO y CO₂ por medio del medidor Fluke 750, así mismo la medición de temperatura por medio de la tarjeta de termopar y el torque fue mediante la plataforma mitsubishi GOT1000 acoplada al motor, esto anterior se realizó para cada tratamiento (estadístico) de la siguiente manera:

Se introdujo la sonda del medidor BOSCH, al igual que la plataforma electrónica del termopar en el colector de escape y se mantuvieron midiendo de manera continua la opacidad y la temperatura. El medidor Fluke, se colocó de manera vertical a la salida del escape a un metro de distancia y se realizaron las mediciones para cada tratamiento de manera puntual.

El torque fue medido de manera continua desde inicio hasta el fin de las pruebas.

Inicialmente se encendió el motor y se dejó funcionando en ralenti (aprox 1780 RPM) durante 15 min y hasta alcanzar 90° C en el cabezal del motor, esto con diésel comercial nuevo, para calentar el motor y asegurar que las mediciones sean las correspondientes a las condiciones normales de operación de este. El depósito de combustible fue limpiado anterior a agregar el diésel nuevo.

Se seleccionó aleatoriamente el tratamiento a realizar (revoluciones y nivel de biodiésel)

Se agregó la mezcla correspondiente de cantidad de biodiésel al depósito limpio, se encendió el motor y se aceleró manualmente hasta alcanzar las revoluciones indicadas mediante un tacómetro digital conectado a la flecha del motor, una vez fijadas las revoluciones, este se mantuvo en funcionamiento por dos minutos con la mezcla correspondiente y se realizaron las mediciones correspondientes para CO, CO₂, Opacidad, torque y temperatura de los gases, el motor se mantuvo encendido hasta terminar con el combustible en el depósito y se vaciaron los remanentes de combustible mediante una manguera conectada al mismo por gravedad.

El proceso anterior se repitió hasta completar todos los tratamientos para el experimento (3 niveles de revoluciones y 3 concentraciones de biodiésel).

6.9. Análisis estadístico

Para el diseño estadístico se planteó un factorial completamente aleatorizado 3^k

Donde los factores a controlar fueron las RPM y el porcentaje de la mezcla de biodiésel, con 3 niveles cada uno (3^2), sin repeticiones (Tabla 8).

Tabla 2. Estructura de tratamientos del experimento factorial aleatorizada

BD	RPM
B0	3500
B0	2850
B20	2850
B0	1780
B10	3500
B20	3500
B10	1780
B20	1780
B10	2850

7. Resultados y discusión

7.1. Obtención de las semillas de higuera

Se pesaron el total de frutos secos y semillas resultantes de los tratamientos elicitados con ácido salicílico (AS) (Tabla 4), observando que el tratamiento 2 fue en el que presentó mayor peso de semillas (40%) en relación con el peso de frutos secos; sin embargo, en peso de semillas en el tratamiento 5 fue el que presentó mayor rendimiento (49%), y el tratamiento con el menor rendimiento de semillas por tratamiento fue el 3 (32%).

Tabla 3. Pesos totales de frutos secos y semillas de *Ricinus communis* var. Guanajuatoil elicitadas con ácido salicílico

Tratamiento	Peso frutos secos (g)	Peso semillas (g)
1	11,681	4,947
2	26,357	10,543
3	13,939	4,546
4	13,939	5,230
5	14,331	7,114
Total (g)	50,883	32,380

Tratamiento 1 = 0 μ M, Tratamiento 2 = 100 μ M, Tratamiento 3 = 300 μ M, Tratamiento 4 = 600 μ M, Tratamiento 5 = 900 μ M, el peso es el total para cada tratamiento.

Hesami et al. (2012), reportaron 71.1, 41.9 y 35.2% de incremento en el peso de la semilla de *Coriandrum sativum*, con la elicitación por medio de AS para concentraciones de 0.01, 0.1 y 1 mM respectivamente. Por otro lado, Tucuch-Hass et al. (2017), observaron que al elicitar *Zea mays* con 0.1 y 1 μ M de AS, obtuvieron rendimientos mayores de semilla de 78.6 y 107.2% respecto al control. Mientras que Ijaz et al. (2019), encontraron que para la elicitación con AS (100 ppm), se incrementó 16.2% el peso de semillas de *Brassica napus*. Con el presente trabajo se demostró al igual que con los anteriores que el uso de AS como elicitor incrementa el peso de semillas de diferentes especies vegetales.

7.2. Obtención del aceite

Para la extracción de aceite mediante prensado mecánico, se realizaron lotes para cada tratamiento y se pesó el aceite sucio (con resultantes de la testa de las semillas) y el aceite

limpio (posterior al filtrado) (Tabla 5). Se puede observar que T1 fue el que mayor rendimiento de aceite presentó (39.42%), mientras que T2 fue el menor (22.64%) respecto al peso de la semilla.

Tabla 4. Rendimientos de aceite de ricino

Rendimientos semillas/aceite	Peso aceite sucio (Total) (g)	Peso aceite limpio (Neto) (g)	Rendimiento aceite limpio (%)
T1	1985	1950	39.42
T2	2854	2387	22.64
T3	1729	1692	37.22
T4	1984	1858	35.532
T5	3213	2406	33.68
Pesos totales (kg)	11765	10293	
Rendimiento promedio (%)	33.7±2.61		

Zahran & Willis, (2009), reportaron rendimientos de 50% de aceite contenido en semilla de *R. communis* en Egipto, por otro lado, Hernández Martínez & Montes Hernández (2012), (2012), reportan un rendimiento de entre 44% de contenido de aceite en semilla para la variedad Guanajuatoil de *R. communis* en Celaya, México. Armendáriz et al, (2015), realizaron la evaluación de 11 genotipos de *R. communis* para la producción de biodiésel, en la cual reportan rendimientos de extracción de aceite entre 48% en Nuevo León, México. Mediante lo anterior, se muestra que el promedio de aceite obtenido en este trabajo fue inferior que en todos los anteriores. Esto se puede deber a los diferentes métodos de extracción empleados en los anteriores trabajos y en el presente (prensado mecánico en caliente).

7.3. Rendimientos de transesterificación

Se puede observar que en la prueba preliminar (Tabla 6) y en la transesterificación del total del aceite de ricino (Tabla 7), el tratamiento que menor rendimiento de biodiésel fue el T2, mientras que el mayor presentó fue el T4, siendo el rendimiento promedio de los tratamientos en la prueba preliminar de 89.73% y 89.74% para la transesterificación realizada en el contenido total del aceite.

Tabla 5: Contenidos preliminares de transesterificación de biodiésel por tratamiento del aceite elicitado con AS

Tratamiento	Peso de aceite (g)	Peso de biodiésel (g)	Rendimiento (%)
T1	20.04±0.02	13.48±0.10	89.7±0.53
T2	20.16±0.03	13.4425±0.06	89.06±0.50
T3	20.07±0.02	13.4975±0.07	89.66±0.30
T4	20.08±0.01	13.5725±0.04	90.13±0.21
T5	20.08±0.02	13.56±0.00	90.1±0.08

Los datos representan el promedio de 3 determinaciones más el error estándar

Tabla 6. Contenidos totales de transesterificación de biodiésel por tratamiento del aceite elicitado con AS

	Aceite (g)	Biodiésel (g)	Rendimiento promedio (%)
T1	1950	1749	89.7
T2	2387	2126	89.1
T3	1692	1517	89.7
T4	1858	1674	90.1
T5	2406	2168	90.1
TOTAL	10293	9234	89.74

Islam et al, (2014), obtuvieron un rendimiento de transesterificación con aceite de ricino de 90% para una reacción en calentamiento directo, en su trabajo ellos hacen uso de metanol, no se menciona la relación molar. En cambio, utilizan KOH en vez de NaOH y tiempos de transesterificación de 1 h vs 25 min. Por otro lado, Armendáriz et al, (2015) obtuvieron un rendimiento de transesterificación con aceite de ricino de 89% con una relación metanol aceite de 6:1, un tiempo de 2 h y con NaOH (0.5% v/v). Mientras que Keera et al, (2018), obtuvieron rendimientos de transesterificación de aceite de ricino de 95% con una relación metanol aceite de 9:1 y un tiempo de 30 min y con NaOH (1% v/v). En comparación con este trabajo, se obtuvieron rendimientos de transesterificación similares, las variaciones se pueden deber a que se utilizaron tiempos de reacción, relaciones molares y concentraciones de catalizador distintos.

7.4. Determinación de propiedades fisicoquímicas del biodiésel

Se realizó la determinación de densidad, viscosidad, porcentaje de cenizas, poder calorífico, punto de inflamabilidad y PH para el aceite de ricino elicitado con AS. En la siguiente tabla (Tabla 8) se puede observar que la diferencia de propiedades entre tratamientos es mínima y solamente existe cierta variación entre los puntos de inflamabilidad, siendo T3 el que menor temperatura presenta y T5 el que mayor.

Tabla 7. Propiedades fisicoquímicas de biodiésel obtenido a partir de aceite de ricino elicitado con AS

Tratamiento	Densidad (g mL ⁻¹)	Viscosidad (mm ² s ⁻¹)	Contenido de cenizas (%)	Poder calorífico (MJ Kg ⁻¹)	Punto de inflamabilidad (° C)	PH
T1	0.91±0.00016	15.46±0.0072	0.029±0.00016	40.49±0.31	175.33±0.67	7.6±0.042
T2	0.911±0.00028	15.53±0.0054	0.029±0.00018	39.83±0.27	162.73±0.38	7.5±0.039
T3	0.911±0.00041	15.67±0.0136	0.028±0.00019	39.18±0.45	150.14±0.40	7.6±0.041
T4	0.911±0.00032	15.16±0.0113	0.028±0.0002	40.8±0.54	167.54±0.43	7.6±0.047
T5	0.91±0.00045	15.85±0.0103	0.028±0.00019	40.12±0.15	183.88±0.40	7.5±0.044

Los siguientes autores en sus trabajos de investigación, realizaron pruebas con biodiésel a partir de aceite de ricino. Conceição et al. (2007) obtuvieron una densidad de 0.9245 g mL⁻¹ @ 20° C, un punto de inflamabilidad de 120° C y un contenido de cenizas de 0.0001%, por otro lado, Ramezani et al. (2010), obtuvieron una densidad de 0.922 g mL⁻¹ @ 15° C, un punto de inflamabilidad de 190.7° C, un contenido de cenizas de 0.037% y un poder calorífico de 37.9 MJ Kg⁻¹, por otra parte Armendáriz et al. (2015), obtuvieron una densidad de 0.951 g mL⁻¹ y un poder calorífico de 37.62 MJ Kg⁻¹, Finalmente Keera et al. (2018), obtuvieron una densidad de 0.9461 g mL⁻¹ @ 15° C, un punto de inflamabilidad de 194.7° C y un poder calorífico de 37.9 MJ Kg⁻¹. En comparación con este trabajo, se puede ver que los parámetros como la viscosidad, el contenido de cenizas, la densidad y el punto de inflamabilidad son similares. En cuanto al poder calorífico, se observa que fue ligeramente mayor, esto potencialmente se puede deber al trabajo anterior de elicitación.

7.5. Análisis de emisiones

Se realizó el análisis de emisiones para mezclas de biodiésel con B0, B10 y B20 (Tabla 9). Se puede observar que, sin biodiésel, a medida que aumentaron las revoluciones del motor, se incrementaron las emisiones de CO y CO₂ (Figuras 23 y 24), así como la opacidad (Figura 25) mientras que la temperatura de los gases y el torque se mantuvieron prácticamente iguales (Figura 26), se puede ver también que a medida que la cantidad de biodiesel aumentó, las emisiones de estos gases disminuyeron (Figuras 23 y 24), así como la opacidad disminuyó, mientras que el torque se vio afectado levemente (Figura 26) y la temperatura no tuvo variaciones de consideración (Figura 27), en general se observó que para B20 se obtuvo la mayor disminución de emisiones y opacidad (Figuras 23, 24 y 25), además que fue la que presentó la mayor disminución de torque al igual que la temperatura de los gases se mantuvo prácticamente igual (Figura 27).

Tabla 8. Medición de emisiones en motor diésel para mezclas de biodiésel de aceite de ricino

RPM	%BD	C0 (ppm)	C02 (ppm)	OP (%)	Disminución de torque (%)	T. Gases (°C)
1780	B0	40	3510	1.7	0.0	65
1780	B10	35	2214	1.4	6.54	62
1780	B20	32	1965	1.3	8.18	68
2850	B0	85	3681	2.2	0.0	80
2850	B10	50	2779	1.9	4.21	72
2850	B20	46	2394	1.2	6.43	79
3500	B0	90	3902	3.2	0.0	90
3500	B10	65	3304	2.9	2.82	95
3500	B20	55	1542	2.1	4.27	92

Figura 23. Emisiones de CO con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel

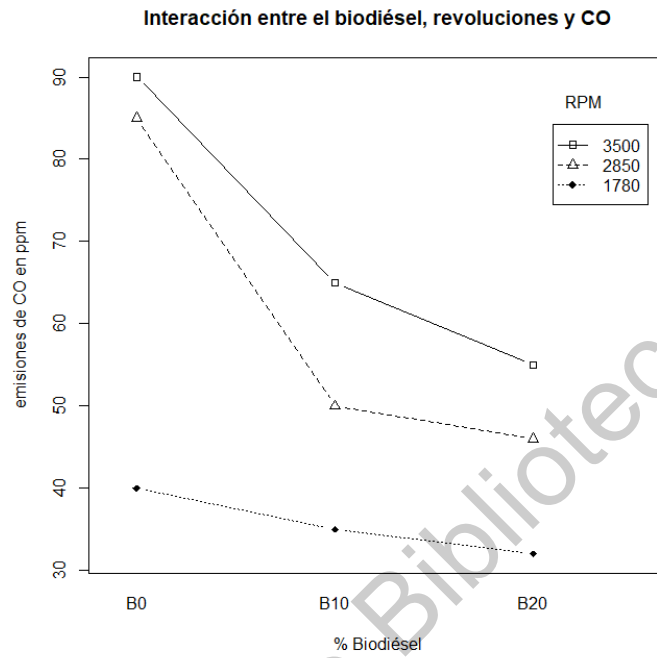


Figura 24. Emisiones de CO₂ con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel

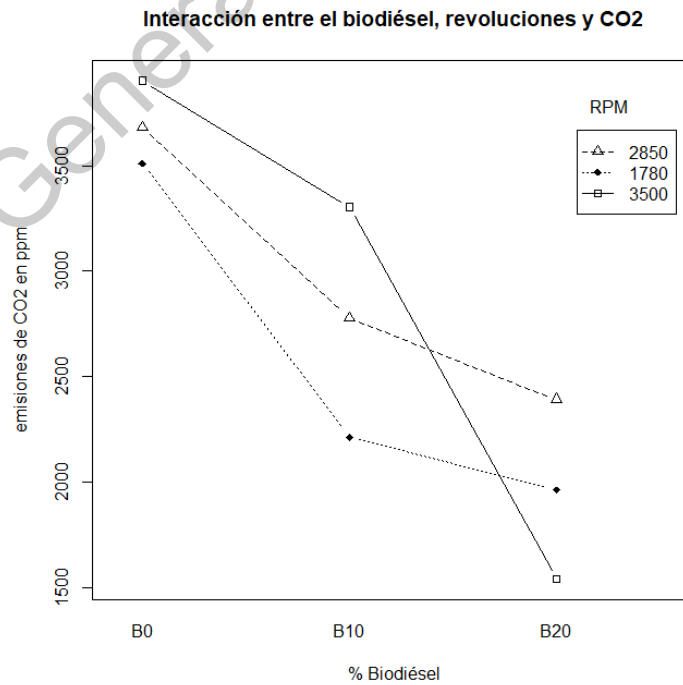


Figura 25. Medición de opacidad con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel

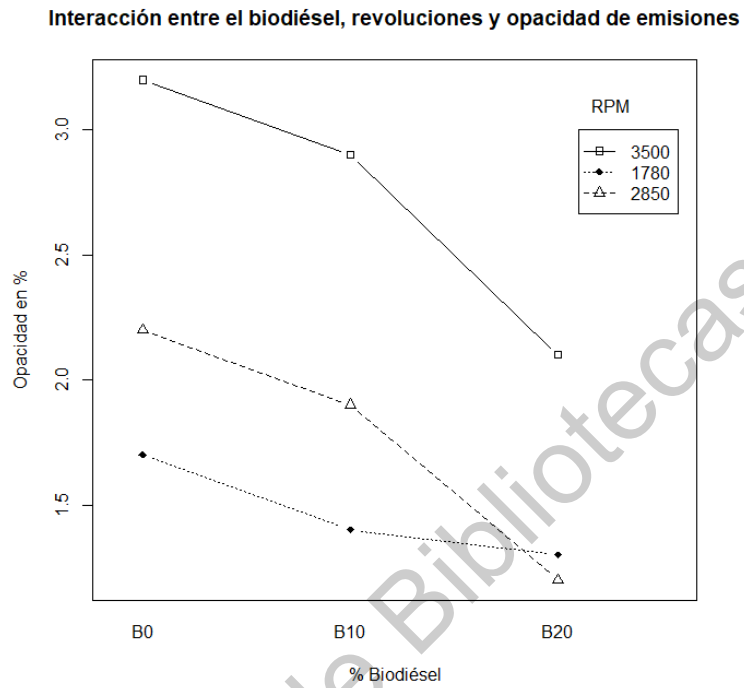
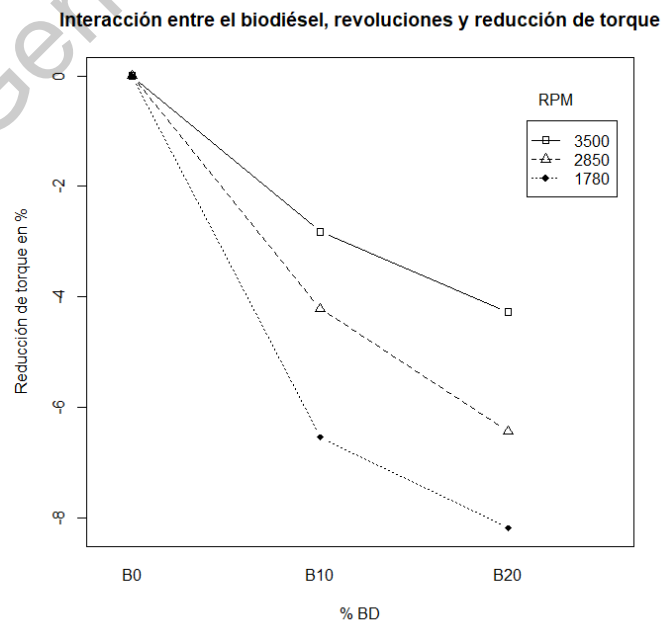


Figura 26. Medición de reducción de torque con los 3 niveles de RPM y concentración de biodiésel



En el presente trabajo, las opacidades que se midieron fueron de 3.2% (B0 @ 3500 RPM) a 1.3% (B20 @ 1750 RPM), valor 2.46 veces menor al control. Así mismo dichos valores fueron menores a los límites máximos permitidos en la NOM-045-SEMARNAT-2017, que establece los límites máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación equipados con motor a diésel, los cuales son de 65.87% para vehículos 2003 y anteriores, así como es de 57.68% para 2004 y posteriores. Por otro lado, Benavides et al, (2007), reportaron que las proporciones en que utilizaron las mezclas biodiesel/diesel en el motor no se alcanzaron a observar diferencias estadísticamente significantes en las emisiones de CO y CO₂. En lo que respecta a la opacidad de los humos encontraron que disminuyeron con el porcentaje de biodiesel de higuierilla en la mezcla. Mientras que, Islam et al. (2014), encontraron que al usar 10% de mezcla de biodiésel hecho a partir de aceite de ricino disminuyeron en 5% las emisiones de CO y 10% al usar el 20% de mezcla en un motor de ciclo diésel, en este trabajo se observó que al usar el 10% de biodiésel se logró un decremento de alrededor de 15% las emisiones de este gas, mientras que para el 20% de mezcla se disminuyeron en 20%. A su vez, Mafla-Yépez et al, (2018), encontraron que al usar una mezcla con biodiésel obtenido de aceite de ricino al 10% con diésel comercial se redujo alrededor del 15% la opacidad de las emisiones en un motor de ciclo diésel de 157 HP, en comparación, en este trabajo se encontró que hubo una reducción de alrededor de 20% en la opacidad de las emisiones al usar el mismo 10% de mezcla con biodiésel.

Se realizó el análisis de varianza (ANDEVA) en software R, para las emisiones de CO, CO₂, opacidad y temperatura de los gases de escape, así como para el torque entregado por el motor. Se pudo observar que, para las emisiones de CO, el porcentaje de la mezcla y las revoluciones son estadísticamente significativos, para las emisiones de CO₂, el porcentaje de la mezcla muestra la mayor significancia estadística de ambos factores, mientras que para la opacidad se puede ver que el factor con mayor significancia estadística es el número de revoluciones. Para la parte del torque entregado, se observa con mayor significancia estadística el porcentaje de la mezcla de biodiésel. Finalmente, para la temperatura de los

gases de escape se observa que la mayor significancia estadística se encuentra en el número de RPM. (Tabla 9).

Tabla 9. ANDEVA para el experimento de análisis de emisiones

Factores	P				
	Emisiones CO	Emisiones CO2	Opacidad	Torque	Temperatura de gases
BD	0.03049 *	0.0175 *	0.1721	0.000412 ***	0.75688
RPM	0.00764 **	0.2487	0.0347 *	0.002109 **	0.00827 **
BD: RPM	0.21513	0.2524	0.6205	0.013349 *	0.74312

8. Conclusiones

- El biodiesel obtenido a partir de aceite de ricino tuvo la calidad necesaria para su utilización en motores de ciclo diésel. A pesar de que se muestran reducciones de torque de hasta 8%.
- El biodiésel elaborado a partir de aceite de ricino es una alternativa viable para la reducción de emisiones contaminantes al ser usado en mezclas con diésel comercial, ya que se obtuvieron reducciones de hasta 45% para CO y 60% para CO₂
- En cuanto a la temperatura de los gases de escape, se observó que el biodiésel no contribuyó al aumento de ésta.

9. Referencias

Abdulkareem-Alsultan, G., Asikin-Mijan, N., Lee, H. V., & Taufiq-Yap, Y. H. (2020). Biofuels: Past, Present, Future. En A. K. Gupta, A. De, S. K. Aggarwal, A. Kushari, & A. Runchal (Eds.), *Innovations in Sustainable Energy and Cleaner Environment* (pp. 489-504). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9012-8_21

Aboelazayem, O., El-Gendy, N. Sh., Abdel-Rehim, A. A., Ashour, F., & Sadek, M. A. (2018). Biodiesel production from castor oil in Egypt: Process optimisation, kinetic study, diesel engine performance and exhaust emissions analysis. *Energy*, *157*, 843-852. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.202>

Advanced biofuels, U. (2012). *What Are Advanced Biofuels? Part of a Truly Sustainable Renewable Future! – Advanced BioFuels USA*. <https://advancedbiofuelsusa.info/truly-sustainable-renewable-future/>

Akpan, U. G., Jimoh, A., & MOHAMMED, A. (2006). Extraction, Characterization and Modification of Castor Seed Oil. *Leonardo Journal of Sciences*, *8*.

Anderson, D., Hossain, A., & Shahidi, F. (2020). A Primer on Oils Processing Technology. En *Bailey's Industrial Oil and Fat Products* (pp. 1-47). American Cancer Society. <https://doi.org/10.1002/047167849X.bio077.pub2>

Arbab, M. I., Masjuki, H. H., Varman, M., Kalam, M. A., Imtenan, S., & Sajjad, H. (2013). Fuel properties, engine performance and emission characteristic of common biodiesels as a renewable and sustainable source of fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *22*, 133-147. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.046>

Arisanu, A. O. (2013). *MECHANICAL CONTINUOUS OIL EXPRESSION FROM OILSEEDS: OIL YIELD AND PRESS CAPACITY*. *6*.

Armendáriz, J., Lapuerta, M., Zavala, F., García-Zambrano, E., & del Carmen Ojeda, M. (2015). Evaluation of eleven genotypes of castor oil plant (*Ricinus communis* L.) for the production of biodiesel. *Industrial Crops and Products*, *77*, 484-490. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.023>

ASMT. (2015). *Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D6751-20>

Atabani, A. E., Silitonga, A. S., Badruddin, I. A., Mahlia, T. M. I., Masjuki, H. H., & Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(4), 2070-2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>

Attia, A. M. A., Nour, M., & Nada, S. A. (2018). Study of Egyptian castor biodiesel-diesel fuel properties and diesel engine performance for a wide range of blending ratios and operating conditions for the sake of the optimal blending ratio. *Energy Conversion and Management*, *174*, 364-377. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.016>

Azadmard-Damirchi, S., Alirezalu, K., & Achachlouei, B. F. (2011). Microwave Pretreatment of Seeds to Extract High Quality Vegetable Oil. *Undefined*. /paper/Microwave-Pretreatment-of-Seeds-to-Extract-High-Oil-Azadmard-Damirchi-Alirezalu/781befad3d14995ab0ab69252e1218b730c42196

Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – A review of current work. *Energy Conversion and Management*, *52*(2), 1479-1492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.011>

Bart, J. C. (2011). *Biodiesel Science and Technology—From Soil to Oil—Knovel*. <https://app.knovel.com/web/toc.v/cid:kpBSTFSO04/viewerType:toc/>

Benavides, A., Benjumea, P., & Pashova, V. (2007). *EL BIODIESEL DE ACEITE DE HIGUERILLA COMO COMBUSTIBLE ALTERNATIVO PARA MOTORES DIESEL*. 10.

Bhatol, K. (2013). *Castor Oil Obtained by Cold Press Method*. *Shri Bhgwati Oil*.

Boopathi, D., Thiyagarajan, S., Edwin Geo, V., Madhankumar, S., & Gheith, R. (2018). Effect of geraniol on performance, emission and combustion characteristics of CI engine fuelled with gutter oil obtained from different sources. *Energy*, *157*(C), 391-401.

- Bueno, A. V., Pereira, M. P. B., de Oliveira Pontes, J. V., de Luna, F. M. T., & Cavalcante, C. L. (2017). Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Applied Thermal Engineering*, *125*, 559-566. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.114>
- Buenrostro, M., & López-Munguía, A. C. (1986). Enzymatic extraction of avocado oil. *Biotechnology Letters*, *8*(7), 505-506. <https://doi.org/10.1007/BF01025210>
- Canoira, L., García Galeán, J., Alcántara, R., Lapuerta, M., & García-Contreras, R. (2010). Fatty acid methyl esters (FAMEs) from castor oil: Production process assessment and synergistic effects in its properties. *Renewable Energy*, *35*(1), 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.05.006>
- Carr, R. A. (1978). Refining and degumming systems for edible fats and oils. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, *55*(11), 765-771. <https://doi.org/10.1007/BF02682645>
- Chandra, R., Takeuchi, H., & Hasegawa, T. (2012). Methane production from lignocellulosic agricultural crop wastes: A review in context to second generation of biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(3), 1462-1476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.035>
- Cheng, J. J., & Timilsina, G. R. (2011). Status and barriers of advanced biofuel technologies: A review. *Renewable Energy*, *36*(12), 3541-3549. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.04.031>
- Choi, S. K., Choi, Y. S., Kim, S. J., & Jeong, Y. W. (2016). Characteristics of flame stability and gaseous emission of biocrude-oil/ethanol blends in a pilot-scale spray burner. *Renewable Energy*, *91*, 516-523. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.066>
- Conceição, M. M., Candeia, R. A., Silva, F. C., Bezerra, A. F., Fernandes, V. J., & Souza, A. G. (2007). Thermoanalytical characterization of castor oil biodiesel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *11*(5), 964-975. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.10.001>

Das, A., Satyanarayana, P. A., Srinu, P., Sridevi, V., & Ranjan, R. (2019). Qualitative Study on production of Methyl ester (Biodiesel) from Castor oil and Nannochloropsis. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4751-4762. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.463>

Das, M., Sarkar, M., Datta, A., & Santra, A. K. (2018). An experimental study on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-castor oil biodiesel blends. *Renewable Energy*, 119, 174-184. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.014>

Dawidowicz, A., Rado, E., Wianowska, D., Mardarowicz, M., & Gawdzik, J. (2008). Application of PLE for the determination of essential oil components from *Thymus vulgaris* L. *Talanta*, 76(4), 878-884. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.04.050>

del Valle, J. M., & Aguilera, J. M. (1999). Revision: Extracción con CO₂ a alta presión. Fundamentos y aplicaciones en la industria de alimentos / Review: High pressure CO₂ extraction. Fundamentals and applications in the food industry. *Food Science and Technology International*, 5(1), 1-24. <https://doi.org/10.1177/108201329900500101>

Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357-1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)

DOF. (2008). *Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos*. 12.

FISCHER SCIENTIFIC. (s. f.). *Aceite de ricino, especificado de acuerdo con los requisitos de...* Recuperado 1 de junio de 2021, de <https://www.fishersci.es/shop/products/castor-oil-eur-pharm-grade-acros-organics-2/11974041>

Gad, M. S., El-Araby, R., Abed, K. A., El-Ibiari, N. N., El Morsi, A. K., & El-Diwani, G. I. (2018). Performance and emissions characteristics of C.I. engine fuelled with palm oil/palm oil methyl ester blended with diesel fuel. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(2), 215-219. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.05.009>

- García, M., Botella, L., Gil-Lalaguna, N., Arauzo, J., Gonzalo, A., & Sánchez, J. L. (2017). Antioxidants for biodiesel: Additives prepared from extracted fractions of bio-oil. *Fuel Processing Technology*, 156, 407-414. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.10.001>
- Gibbins, R. D., Aksoy, H. A., & Ustun, G. (2012). Enzyme-assisted aqueous extraction of safflower oil: Optimisation by response surface methodology: Aqueous enzymatic extraction of safflower oil. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(5), 1055-1062. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.02940.x>
- Guo, M., Song, W., & Buhain, J. (2015). Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 712-725. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.013>
- Hashemi, S. M. B., Michiels, J., Asadi Yousefabad, S. H., & Hosseini, M. (2015). Kolkhoung (Pistacia khinjuk) kernel oil quality is affected by different parameters in pulsed ultrasound-assisted solvent extraction. *Industrial Crops and Products*, 70, 28-33. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.023>
- Hernández Martínez, M., & Montes Hernández, S. (2012). *Guanajuatoil: Variedad de higuierilla para extraccion de aceite industrial en guanajuato*.
- Hesami, S., Nabizadeh, E., Rahimi, A., & Rokhzadi, A. (s. f.). *Effects of salicylic acid levels and irrigation intervals on growth and yield of coriander (Coriandrum sativum) in field conditions*. 4.
- IEA. (2018). *From 1st- to 2nd-Generation Biofuel Technologies – Analysis*. IEA. <https://www.iea.org/reports/from-1st-to-2nd-generation-biofuel-technologies>
- Ijaz, M., Sher, A., Sattar, A., Shahid, M., Nawaz, A., Ul-Allah, S., Tahir, M., Ahmad, S., & Saqib, M. (2019). Response of canola (*Brassica napus* L.) to exogenous application of nitrogen, salicylic acid and gibberellic acid under an arid climate. *Soil & Environment*, 38, 90-96. <https://doi.org/10.25252/SE/19/71619>

Islam, Md. S., Ahmed, A. S., Islam, A., Abdul Aziz, S., Xian, L. C., & Mridha, M. (2014). Study on Emission and Performance of Diesel Engine Using Castor Biodiesel. *Journal of Chemistry*, 2014, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2014/451526>

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

Kirk, R. E., Othmer, D. F., & Mann, C. A. (1949). Encyclopedia of Chemical Technology. Vol. II. *The Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 53(4), 591-591. <https://doi.org/10.1021/j150469a016>

Knothe, G., Jürgen, K., & Jon Van, G. (2010). *The Biodiesel Handbook*. <https://www.perlego.com/book/1831208/the-biodiesel-handbook-pdf>

Latif, S., & Anwar, F. (2008). Quality assessment of Moringa concanensis seed oil extracted through solvent and aqueous-enzymatic techniques. *Grasas y Aceites*, 59. <https://doi.org/10.3989/gya.2008.v59.i1.493>

Loera-Quezada, M. M., & Olguín, E. J. (2010). *Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: Retos y oportunidades* / REVISTA LATINOAMERICANA DE BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL Y ALGAL. <http://www.solabiaa.org/ojs3/index.php/RELBAA/article/view/17>

Mafla Yépez, C. N., García Montoya, J. C., Universidad Técnica del Norte, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de investigación BICER, Ciudadela Universitaria Av. 17 de julio 5-21 y General José María Córdoba sector El Olivo, CP. EC100150 Ibarra-Ecuador, Revelo Aldas, M. D., Universidad Técnica del Norte, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de investigación BICER, Ciudadela Universitaria Av. 17 de julio 5-21 y General José María Córdoba sector El Olivo, CP. EC100150 Ibarra-Ecuador, Hernández Rueda, E. P., Universidad Técnica del Norte, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de investigación BICER, Ciudadela Universitaria Av. 17 de julio 5-21 y General José María Córdoba sector El Olivo, CP. EC100150 Ibarra-Ecuador, Benavides Cevallos, I. B., & Universidad Técnica del Norte, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de investigación BICER, Ciudadela Universitaria Av. 17 de julio 5-21 y General José María Córdoba sector El Olivo, CP.

- EC100150 Ibarra-Ecuador. (2018). Ventajas del uso del biodiesel B10 (*Ricinus communis*) sobre el Diésel fósil en la protección del medio ambiente. *Bionatura*, 3(2). <https://doi.org/10.21931/RB/2018.03.02.4>
- Maleki, E., Aroua, M. K., & Sulaiman, N. M. N. (2013). Castor oil—A more suitable feedstock for enzymatic production of methyl esters. *Fuel Processing Technology*, 112, 129-132. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2013.03.003>
- Martínez Valencia, B. B. (2011). *Calidad fisicoquímica de insumos bioenergéticos para la producción de biodiesel en México (SIBE)*. SIBE. <http://www.bioenergeticos.gob.mx/wp-content/uploads/2015/06/CALIDAD-FISICOQUIMICA-DE-INSUMOS-BIOENERGETICOS-PARA-LA-PRODUCCION-DE-BIODIESEL-EN-MEXICO.pdf>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5)
- Mukesh, D., Iyer, R. S., Wagh, J. S., Mokashi, A. A., Banerji, A. A., Newadkar, R. V., & Bevinakatti, H. S. (1993). Lipase catalysed transesterification of castor oil. *Biotechnology Letters*, 15(3), 251-256. <https://doi.org/10.1007/BF00128314>
- Muzenda, L., Mgudu, L., Kabuba, J., & Belaid, M. (2012). *Microwave –Assisted Extraction of Castor Oil*.
- Mwithiga, G., & Moriasi, L. (2007). A Study of Yield Characteristics During Mechanical Oil Extraction of Preheated and Ground Soybeans. *Journal of Applied Sciences Research*, 3.
- Naik, S. N., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 578-597. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003>
- Nwafor, O. M. I. (2003). The effect of elevated fuel inlet temperature on performance of diesel engine running on neat vegetable oil at constant speed conditions. *Renewable Energy*, 28(2), 171-181. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00032-0](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00032-0)

Ogunniyi, D. (2006). Castor oil: A vital industrial raw material. *Bioresource Technology*, 97(9), 1086-1091. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.028>

Olaniyan, A. M. (2010). *Effect of extraction conditions on the yield and quality of oil from castor bean. 1(*. *Journal of Cereals and Oilseeds*). 24-33. <https://doi.org/DOI:10.4236/gsc.2015.54019>

Oluwole, F., Aviara, N. A., Umar, B., & Muhammad, A. (2015). Influence of Variety and Pre-treatment on Oil Properties of Mechanically Expressed Castor Oil. *Global Advanced Research Journal of Engineering, Technology and Innovation*, 4, 1-9.

Ovando-Chacón, S., & Waliszewski, K. (2005). *PREPARATIVOS DE CELULASAS COMERCIALES Y APLICACIONES EN PROCESOS EXTRACTIVOS*. 11.

Oyinlola, A., Ojo, A., & Adekoya, L. O. (2004). Development of a laboratory model screw press for peanut oil expression. *Journal of Food Engineering*, 64(2), 221-227. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.10.001>

Panwar, N. L., Shrirame, H. Y., Rathore, N. S., Jindal, S., & Kurchania, A. K. (2010). Performance evaluation of a diesel engine fueled with methyl ester of castor seed oil. *Applied Thermal Engineering*, 30(2-3), 245-249. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.07.007>

Ramanadhan, B. (2005). *Microwave extraction of essential oils (from black pepper and coriander) at 2.46 GHz*. <https://harvest.usask.ca/handle/10388/etd-10262005-135622>

Ramezani, K., Rowshanzamir, S., & Eikani, M. H. (2010). Castor oil transesterification reaction: A kinetic study and optimization of parameters. *Energy*, 35(10), 4142-4148. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.034>

Rapier, R. (2014). *Global Biofuels Status Update*. <http://www.energytrendsinsider.com/2014/08/28/global-biofuels-status-update/>

Rassem, H. H. A., Nour, A. H., & Yunus, R. M. (2016). Techniques For Extraction of Essential Oils From Plants: A Review. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 11.

Ribeiro, N. M., Pinto, A. C., Quintella, C. M., da Rocha, G. O., Teixeira, L. S. G., Guarieiro, L. L. N., do Carmo Rangel, M., Veloso, M. C. C., Rezende, M. J. C., Serpa da Cruz, R., de Oliveira, A. M., Torres, E. A., & de Andrade, J. B. (2007). The Role of Additives for Diesel and Diesel Blended (Ethanol or Biodiesel) Fuels: A Review. *Energy & Fuels*, 21(4), 2433-2445. <https://doi.org/10.1021/ef070060r>

SAGARPA- INIFAP. (2011). *Balance energético del cultivo de la higuierilla (Ricinus communis L.) para la producción de biodiésel*. http://www.inifap.gob.mx/Documents/transparencia/trans_foca/2016/Transparencia_Focalizada/Higuierilla/Balance_Biodiesel/BALANCE-ENERGETICO-DEL-CULTIVO-DE-HIGUERILLA-PARA-LA-PRODUCCION-DE-BIODIESEL.pdf.

Samaram, S., Mirhosseini, H., Tan, C. P., & Ghazali, H. M. (2014). Ultrasound-assisted extraction and solvent extraction of papaya seed oil: Crystallization and thermal behavior, saturation degree, color and oxidative stability. *Industrial Crops and Products*, 52, 702-708. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.047>

Sandoval, G. (2010). *Biocombustibles avanzados en mexico*. <http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT2.pdf>

Saurabh, T. (2011). *EPOXIDATION OF VEGETABLE OILS: A REVIEW*. 8.

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

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2016a). *Introduction to Food Engineering—3rd Edition*. <https://www.elsevier.com/books/introduction-to-food-engineering/singh/978-0-08-057449-3>

Singh, R. P., & Heldman, D. R. (2016b). *Introduction to Food Process Engineering* (3rd edition). Academic Press.

Sinha, L. K., Haldar, S., & Majumdar, G. C. (2015). Effect of operating parameters on mechanical expression of solvent-soaked soybean-grits. *Journal of Food Science and Technology*, 52(5), 2942-2949. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1340-8>

Stanisavljević, I. T., Lazić, M. L., & Veljković, V. B. (2007). Ultrasonic extraction of oil from tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) seeds. *Ultrasonics Sonochemistry*, 14(5), 646-652. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2006.10.003>

Stoytcheva, M., & Montero, G. (s. f.). *Biodiesel—Feedstocks and Processing Technologies* / *IntechOpen*. Recuperado 30 de marzo de 2021, de <https://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies>

Subramaniam, D., Murugesan, A., Avinash, A., & Kumaravel, A. (2013). Bio-diesel production and its engine characteristics—An expatiate view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 361-370. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.02.002>

Tabatabaei, M., Karimi, K., Sárvári Horváth, I., & Kumar, R. (2015). Recent trends in biodiesel production. *Biofuel Research Journal*, 2(3), 258-267. <https://doi.org/10.18331/BRJ2015.2.3.4>

Taha, F. S., & Hassanein, M. M. (2007). Pretreatment of cottonseed flakes with proteases and an amylase for higher oil yields. *Grasas y Aceites*, 58(3), 297-306. <https://doi.org/10.3989/gya.2007.v58.i3.186>

Takadas, F., & Doker, O. (2017). Extraction Method and Solvent Effect on Safflower Seed Oil Production. *Chemical and Process Engineering Research*, 51(0), 9.

Taylor, G. (2008). Biofuels and the biorefinery concept. *Energy Policy*, 36(12), 4406-4409. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.069>

Tian, Y., Xu, Z., Zheng, B., & Martin Lo, Y. (2013). Optimization of ultrasonic-assisted extraction of pomegranate (*Punica granatum* L.) seed oil. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 202-208. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2012.07.010>

Tucuch, C., Alcántar-González, G., Trejo-Téllez, L. I., Volke-Haller, V., Salinas-Moreno, Y., & Larqué-Saavedra, A. (2017). Effect of salicylic acid on growth, nutritional status, and performance of maize (*Zea mays*). *Agrociencia*, 51, 771-781.

Warabi, Y., Kusdiana, D., & Saka, S. (2004). Biodiesel Fuel from Vegetable Oil by Various Supercritical Alcohols. En M. Finkelstein, J. D. McMillan, B. H. Davison, & B. Evans (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Fifth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals Held May 4–7, 2003, in Breckenridge, CO* (pp. 793-801). Humana Press. https://doi.org/10.1007/978-1-59259-837-3_64

Yesilyurt, M. K., Cesur, C., Aslan, V., & Yilbasi, Z. (2020). The production of biodiesel from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition engine: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109574. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109574>

Zahran, M. A., & Willis, A. J. (2009). *The Vegetation of Egypt* (2.^a ed.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8756-1>

Zhang, C., Hui, X., Lin, Y., & Sung, C.-J. (2016). Recent development in studies of alternative jet fuel combustion: Progress, challenges, and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 120-138. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.056>