



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO SOBRE EL PROCESO DE
PRODUCCIÓN DEL BIODIESEL DE SEGUNDA
GENERACIÓN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA

MARIBEL CAROLINA TORRES CRUZ



MÉXICO, D.F.

2009



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: Dr. M. Javier Cruz Gómez

VOCAL: Profesor: M.I. María Rafaela Gutiérrez Lara

SECRETARIO: Profesor: Dr. Ernesto Rivera García

1er. SUPLENTE: Profesor: Dra. Ma. de los Ángeles Vargas Hernández

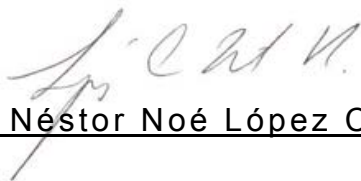
2º SUPLENTE: Profesor: Dr. Néstor Noé López Castillo

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química, Conjunto E
Laboratorio 212



Asesor del tema: Dr. M. Javier Cruz Gómez.



Supervisor Técnico: Dr. Néstor Noé López Castillo.



Sustentante: Maribel Carolina Torres Cruz

A MI ABUELITA
CON TODO MI AMOR
GRACIAS POR TODO

AGRADECIMIENTOS

A la U.N.A.M. y en especial a la Facultad de Química, que me abrió las puertas creyendo en mi capacidad.

Al Dr. M. Javier Cruz Gómez por la confianza que me brindó en un proyecto tan especial.

Al Dr. Néstor N. López Castillo por los consejos y cobijo en esta larga carrera, por el amigo y el maestro.

A mis profesores y compañeros que fueron el complemento de un gran equipo a lo largo de esta aventura. En especial a quienes pusieron magia a cada momento.

GRACIAS.

DEDICATORIAS

A Dios por darme la luz que cada paso que doy.

A mi familia, mamá, papá, hermana por ser la mano que me acompaña cada día.

A mis tíos, por todo el apoyo invaluable que he recibido, a mis primos por ser mi compañía de la vida y a mis sobrinos por nunca dejarme perder la alegría de la infancia.

A mis amigos por ser una compañía fiel de sueños y realidades.

A todos los que fueron partícipes de este logro en mi vida.

Y a ti que alegras cada momento de mi vida con amor.

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.	
ÍNDICE DE FIGURAS.	
ÍNDICE DE GRÁFICAS.	
ABREVIATURAS.	
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Objetivo general del proyecto.	4
1.2 Objetivo específico.	4
1.3 Objetivos particulares.	5
1.4 Hipótesis.	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.	6
2.1 Energía.	6
2.2 Energía en México.	10
2.2.1 Estructura del sector energético Mexicano.	11
2.2.2 Panorama de la energía en México.	12
2.2.3 Problemática y alternativas.	15
2.3 Biocombustibles.	21
2.3.1 Biodiesel.	22
2.3.2 Subproductos de la producción de biodiesel.	24
2.4 <i>Jatropha curcas</i> .	25
2.5 Análisis de Mercado.	27
2.5.1 El mercado en México.	31
CAPÍTULO III. MÉTODO EXPERIMENTAL.	34
3.1 Obtención de la semilla.	34
3.2 Determinación de peso promedio y métodos de secado de la semilla.	36
3.3 Extracción de aceite.	37
3.4 Determinación de índice de yodo.	38
3.5 Transesterificación.	38
3.6 Cinética de la reacción de transesterificación del aceite de <i>Jatropha curcas</i> .	42
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	45
4.1 Resultados de la determinación del peso promedio y métodos de secado de la semilla.	45
4.2 Resultados de la extracción del aceite.	46
4.3 Resultados de la determinación de índice de yodo.	48
4.4 Resultados de la transesterificación.	49
4.5 Resultados de a cinética de la reacción de transesterificación de aceite de <i>Jatropha curcas</i> .	63

4.5.1	Curva de calibración.	63
4.5.2	Establecimiento de La cinética de la reacción de transesterificación de aceite de <i>Jatropha curcas</i> .	64
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES.		68
BIBLIOGRAFÍA.		70
ANEXO A: Estándares del biodiesel. Norma ASTM D 6757 de 2008.		i
ANEXO B: Cálculo de las hectáreas para producir una mezcla B5		ii
ANEXO C: Índice de Yodo.		iv
ANEXO D: Condiciones de reacción de transesterificación		vii
ANEXO E: Concentraciones para la curva de calibración		ix
ANEXO F: Biodiesel producido con etanol.		xii

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Reservas totales de hidrocarburos entre los años 1998-2007. En millones de barriles de petróleo crudo equivalente.	13
Tabla 2.	Producción de Energía primaria en PJ.	13
Tabla 3.	Principales sectores consumidores de energía en el 2007 y 2008 en PJ.	14
Tabla 4.	Las energías renovables en el balance energético de México en PJ.	15
Tabla 5.	Producción de energía primaria 2006 y 2007 en PJ.	15
Tabla 6.	Comparación de diversos estándares para Biodiesel.	28
Tabla 7.	Comparación de diferentes cultivos de semilla para producir biodiesel (2002)	30
Tabla 8.	Consumo de energía en el sector transporte en PJ.	31
Tabla 9.	Consumo de diesel en el sector transporte en México.	32
Tabla 10.	Muestras de semilla de <i>Jatropha curcas</i> Rosamorada Nayarit.	36
Tabla 11.	Experimentos realizados para determinar las condiciones óptimas de transesterificación, con aceite de soya.	39
Tabla 12.	Concentración de las soluciones para la curva de calibración.	43
Tabla 13.	Peso promedio de una semilla de cada muestra de <i>Jatropha curcas</i> .	45
Tabla 14.	Determinación del porcentaje de humedad en muestras de <i>Jatropha curcas</i> .	45
Tabla 15.	Determinación del porcentaje de aceite en muestras de <i>Jatropha curcas</i> .	46
Tabla 16.	Determinación del índice de yodo para las muestras de <i>Jatropha curcas</i> .	49
Tabla 17.	Aceite de canola (muestra 3).	50
Tabla 18.	Observaciones de la reacción de transesterificación para determinar las condiciones óptimas, con aceite de canola.	53
Tabla 19.	Porcentaje de rendimiento en las muestras de soya para producción de biodiesel.	54
Tabla 20.	Valores de k para cada temperatura.	66
Tabla 21.	Valores a graficar para obtener la constante de Arrhenius.	67
Tabla 22.	Valores de las constantes de reacción.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Producción nacional de petróleo Crudo.	17
Figura 2.2	Reacción de transesterificación para producir biodiesel.	23
Figura 3.1	Bosque natural de <i>Jatropha curcas</i> .	34
Figura 3.2.	Germinación y esquejado de la planta de <i>Jatropha curcas</i> .	35
Figura 3.3.	Semillas con cáscara de <i>Jatropha curcas</i> .	35
Figura 3.4	Secado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> por mediante exposición al sol.	36
Figura 3.5.	Secado de semilla de <i>Jatropha curcas</i> por medio de la estufa (45°C).	37
Figura 3.6	Bagazo de semilla pelada (Sin cáscara) después de la expresión.	38
Figura 3.7	Partes de la grafica de orden de reacción.	44
Figura 4.1	Aceite de <i>Jatropha curcas</i> obtenido por expresión de las semillas	46
Figura 4.2	Bagazo de semilla con cáscara después de la expresión.	47
Figura 4.3	Expresión de semilla de <i>Jatropha curcas</i> fresca.	48
Figura 4.4	Torta de bagazo después de exprimir la semilla.	48
Figura 4.5	IR de biodiesel.	50
Figura 4.6	IR Glicerina.	52
Figura 4.7	Cromatograma de biodiesel	55
Figura 4.8	Espectro de masas que corresponde al palmitato de metilo.	56
Figura 4.9	Espectro de masas que corresponde al oleato de metilo.	57
Figura 4.10	Espectro de masas que corresponde al linoleato de metilo.	58
Figura 4.11	Espectro de masas que corresponde al estearato de metilo.	59
Figura 4.12	Espectro de masas que corresponde al monoleato de metilo	60
Figura 4.13	Cromatograma de la glicerina.	61
Figura 4.14	Espectro de masas de la glicerina.	62
Figura 4.15	Curva de calibración con biodiesel producido con aceite de <i>Jatropha curcas</i>	63
Figura 4.16	Orden de reacción cero.	64
Figura 4.17	Orden de reacción uno.	65
Figura 4.18	Orden de reacción dos.	65
Figura 4.19	Constante de rapidez, r	67

ABREVIATURAS

°C	Grados Celsius
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PEP	PEMEX Exploración y Producción
PR	PEMEX Refinación
PGPB	PEMEX Gas y Petroquímica Básica
PPQ	PEMEX Petroquímica
PMI	PEMEX Internacional
CFE	Comisión Federal de Electricidad
PIE	Productos independientes de electricidad
CRE	Comisión Reguladora de Energía
CNSNS	Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardias
CONAE	la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía
ININ	Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática
SENER	Secretaria de Energía
PJ	Petajoules (10^{15} J)
ASTM	American Standard Testing Materials
t/año	Toneladas por año
km/gal	Kilómetros por galón
m ³ /d	Metros cúbicos por día
SIE	Sistema de información energética
B5	Mezcla 5% biodiesel con 95% diesel
B10	Mezcla 10% biodiesel con 90% diesel
B20	Mezcla 20% biodiesel con 80% diesel
m ³	Metros cúbicos
CENVYTT	Centro de Valoración y Transferencia de Tecnología Agraria
g	Gramos
psig	Libra sobre pulgada cuadrada manométrica
mL	Mililitros
NaOH	Hidróxido de sodio
min	Minutos
IR	Infrarrojo
cm ⁻¹	Inverso de centímetro
C _A	Concentración de A
Ln K	Logaritmo natural de la constante de rapidez
T	Temperatura
C	Concentración
A	Constante de Arrhenius
ΔE	Energía de activación
m	metros
M ²	Metros cuadrados
g/L	Gramos por litro
mo/L	Mol por litro
mg	Miligramos

IY	Índice de yodo
V1	Volumen de tiosulfato sódico para ensayo en blanco
V2	Volumen de tiosulfato sódico para la determinación de la muestra
p	Peso de la muestra
Ha	Hectárea
% p/p	Por ciento en peso
% v/v	Por ciento en volumen

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.

En un mundo globalizado, donde las actividades de cada punto de la tierra repercuten en la vida del otro, es muy importante detenerse a pensar las consecuencias que tendrán nuestros actos. Hace algunos años no nos deteníamos a pensar que sucedería si continuaba el mal uso del agua o la posibilidad de que el petróleo se terminara en algunos años.

Hoy en día, conocemos grandes descubrimientos y sabemos de múltiples aplicaciones que se tienen de productos alimenticios, sin embargo, las viejas costumbres, la cultura, la economía y el sistema político de cada país hace la diferencia en el desarrollo de tecnologías de cada una de estas aplicaciones.

El *oro negro* siempre ha sido fuente de muchas guerras y problemas entre las naciones, cuando se encontraba en su auge, muchos de los que tenían la fortuna de tenerlo lo explotaron, otros lo seguirán explotando hasta no ver el fin de la mina de oro. Su abundancia era causa de problemas y ahora que su escasez es inminente los problemas se acrecientan y la economía de los países comienza a verse cada vez más perjudicada, el mismo destino comienza a cobrarse el mal uso de los recursos y el despilfarro de las riquezas.

Mientras los pozos de petróleo se empeñan en esconderse cada vez más en el fondo de la tierra, ésta nos muestra una nueva oportunidad, la misma naturaleza nos presenta las bondades de su tierra, al poder explotar sus recursos naturales, sin embargo, bajo la consigna de hacerlo de una manera inteligente y conservar el equilibrio que existe en la Tierra.

El medio ambiente se ha visto afectado, por los contaminantes que diariamente arrojamos al exterior y actualmente vivimos en un mundo sumamente contaminado, por lo que el uso de alternativas que mejoren estas condiciones se vuelven urgentes, para garantizar una saludable y grata estancia en nuestro planeta.

Es por la escasez de petróleo, y por ende su encarecimiento, por el daño ambiental que se ha causado y por los problemas económicos que se avecinan, que el planteamiento de una fuente de energía alterna es parte de un plan de mejora que debemos considerar.

El presente trabajo muestra una alternativa, que de manera global mejoraría las condiciones del campo mexicano, al favorecer la producción de la materia prima con un pago justo al campesino: las condiciones del medio ambiente, al disminuir las emisiones de contaminantes producidos por los combustibles fósiles y desahogando la demanda de petróleo y la dependencia que México tiene por ese combustible.

La producción de biodiesel es una realidad en algunas partes de Europa y América. En México puede ser una realidad si se emprende un proyecto global.

La *Jatropha curcas* es una planta originaria de México, sin embargo, no esta domesticada y no se ha podido explotar como en otros países tal como ya lo hace Brasil o India.

La producción de biocombustibles a partir de productos no alimenticios no afectaría la economía, ya que la materia prima, en este caso la *Jatropha curcas*, no competiría con el mercado de los alimentos, ni con otros mercados.

Para poder iniciar con la experimentación fue necesario identificar la semilla *Jatropha curcas*, determinando sus características físicas, tales como peso promedio, número de yodo y ubicación geográfica para conocer las condiciones en las que se desarrolla. Se trabajó con semilla proveniente de Rosamorada, Nayarit a la cual se le extrajo el aceite por medio del prensado.

La reacción de transesterificación es por medio de la cual se puede producir el biodiesel, esta reacción se lleva a cabo con el aceite de la semilla de *Jatropha curcas*, metanol e hidróxido de sodio (NaOH) como catalizador.

Inicialmente se determinaron las condiciones a las que se lleva a cabo la reacción con el mayor rendimiento, variando en diferentes ocasiones la cantidad de alcohol y catalizador y realizando la reacción a diferentes temperaturas.

Posteriormente, se observó el comportamiento de la reacción a diferentes temperaturas (22 °C, 37 °C, 45 °C) mientras se llevan a cabo en diferentes tiempos (0.5 min, 1 min, 2 min, 3 min, 5 min, 7 min, 10 min, 15 min y 20min), ésto con el propósito de determinar la cinética de la reacción y poder establecer las bases de diseño para una producción a gran escala.

Mediante el desarrollo experimental, el análisis de las muestras se realizó por cromatografía de gases y con una curva de calibración se pudo determinar la cinética de la reacción.

En este caso, la cinética es de orden uno, la reacción depende únicamente de la concentración de los triglicéridos como reactivo ya que el metanol se encuentra en exceso, por lo que prácticamente permanece a concentración constante. Se

determinaron los valores de la constante de Arrhenius y energía de activación.

Una vez analizado el panorama de nuestro país y las alternativas que existen podemos afirmar que existe la necesidad de nuevas alternativas para producir energía. La producción de biodiesel con *Jatropha curcas* es una de estas alternativas.

Continuar con el desarrollo del proyecto, analizando los balances de energía y ambiental además del proceso para purificar la glicerina, la cual es un subproducto de la reacción, y el bagazo que queda después de la extracción del aceite de la semilla harán de este un proyecto sustentable que permitirá abrir las puertas a una nueva alternativa que pueda satisfacer la alta demanda de energía.

1.1 OBJETIVO GENERAL DEL PROYECTO.

Estudiar, de manera global, el desarrollo de un biocombustible a través de semillas no comestibles, específicamente con la semilla *Jatropha curcas*; además de establecer las ventajas y desventajas de su uso en nuestro país y a través del estudio de la cinética de la reacción de transesterificación, establecer las bases para el diseño de la producción de biodiesel a nivel industrial.

1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.

Determinar la cinética de la reacción de transesterificación con

aceite de *Jatropha curcas* y metanol para obtener biodiesel.

1.3 OBJETIVOS PARTICULARES.

Ubicar la semilla de *Jatropha curcas*, determinar el peso promedio, el contenido de aceite y extraerlo por medio de su expresión.

Variar las condiciones de temperatura, concentración de catalizador y exceso de metanol para determinar las cantidades a las que la eficiencia de la reacción de transesterificación sea mayor del 95%.

Construir una curva de calibración con soluciones a diferentes concentraciones de biodiesel para determinar la concentración de los metilesteres a diferentes tiempos de reacción.

Realizar una prueba de reacción de transesterificación con aceite de *Jatropha curcas* con etanol para garantizar que la reacción se lleve a cabo con materia prima proveniente de fuentes no fósiles.

1.4 HIPÓTESIS.

Si se extrae el aceite y se realiza la reacción de transesterificación a diferentes temperaturas y se toman muestras a diferentes tiempos, se puede conocer la cinética de la reacción para la producción de biodiesel.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO.

En este capítulo se presentan las bases necesarias que fundamentan la investigación realizada. De manera general se da una visión de las fuentes de energía que se utilizan actualmente, el panorama en nuestro país, algunas proyecciones a futuro y de las implicaciones que se tiene al depender energéticamente de una fuente no renovable.

Se muestran las fuentes de energía alternativas y se plantea el desarrollo del biodiesel producido a partir de semillas no comestibles como la *Jatropha curcas*, una alternativa viable para nuestro país.

Se muestran las ventajas de la producción del biodiesel producido con *Jatropha curcas* y de las características generales de esta planta.

2.1 ENERGÍA.

En la vida diaria se observa la manifestación de la energía; se observa que las plantas crecen, los animales se mueven, que las máquinas y herramientas realizan varias tareas; para todo ello es necesario el uso de energía. [1]

La energía es una característica asociada a los objetos y sustancias respecto a su capacidad para poder realizar un trabajo; una transformación, ya sea cambios físicos o químicos, por ejemplo, al elevar un objeto, transportarlo o quemar un trozo de madera. Cada una de las manifestaciones muestra la transformación de una energía potencial a una energía cinética y una energía química.

La energía se puede clasificar la energía en dos tipos, con base en su fuente de producción:

1. Energía no renovable
2. Energía renovable

La energía no renovable es aquella que proviene de fuentes que no podemos reponer, este es el caso de los combustibles fósiles. Como lo son el coque, gas licuado de petróleo, gasolinas-naftas, querosenos, diesel, combustóleo, productos no energéticos derivados de los hidrocarburos, gas natural, etc.[2]

- ✓ Coque. Se obtiene de la destilación de la hulla a temperaturas muy altas en hornos cerrados. Cuando la hulla se calienta desprende gases y el sólido resultante es el carbón de coque, que es liviano y poroso.
- ✓ Gas licuado de petróleo. Producto de la destilación del petróleo y del tratamiento de los líquidos del gas natural. Se compone de propano, butano, o de una mezcla de ambos.
- ✓ Gasolinas y naftas. Combustible líquido liviano, con un rango de ebullición entre 30 y 200 °C, que se obtiene de la destilación del petróleo y del tratamiento del gas natural. Dentro de este rango se consideran las gasolinas de aviación, automotrices, naturales y las naftas.
- ✓ Querosenos. Combustible líquido compuesto por la fracción del petróleo que se destila entre 150 y 300 °C. Comprende la turbosina y otros querosenos.
- ✓ Diesel. Combustible líquido que se obtiene de la destilación del petróleo entre los 200 y 380 °C. Se utiliza principalmente en motores de combustión interna tipo

diesel.

- ✓ Combustóleo. Combustible residual de la refinación del petróleo que comprende todos los productos pesados. Se utiliza principalmente en calderas, plantas de generación eléctrica y motores para navegación, y se divide en combustóleo pesado, ligero e intermedio.
- ✓ Gas natural. Hidrocarburo gaseoso obtenido como subproducto del gas asociado en plantas de gas y refinerías después de extraer los licuables. Se forma por metano y pequeñas cantidades de etano. Se utiliza como materia prima en la industria petroquímica y como combustible.

La energía renovable proviene de materias primas que pueden explotarse ilimitadamente ya que su cantidad disponible no disminuyen a medida en que ésta se aprovecha o en su defecto puede regenerarse constantemente. Dentro de esta clasificación encontramos a la energía hidráulica, la biomasa, energía solar, energía eólica, energía geotérmica, energía mareomotriz, etc.

- ✓ Caídas de agua: La energía potencial acumulada en los saltos de agua puede ser transformada en energía eléctrica. Las centrales hidroeléctricas aprovechan la energía de los ríos para poner en funcionamiento unas turbinas que mueven un generador eléctrico.
- ✓ Biomasa: La formación de biomasa a partir de la energía solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis vegetal, que a su vez es desencadenante de la cadena biológica. Mediante la fotosíntesis las plantas que contienen clorofila, transforman el dióxido de carbono y el agua en carbohidratos y oxígeno. La biomasa mediante estos

procesos almacena a corto plazo la energía solar en forma de carbono. La energía almacenada en el proceso fotosintético puede ser posteriormente transformada en energía térmica, eléctrica o carburantes de origen vegetal, liberando de nuevo el dióxido de carbono almacenado.

- ✓ El biocombustible es el término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa. Los biocombustibles más usados y desarrollados son el bioetanol y el biodiesel.
- ✓ Luz solar: mediante paneles fotovoltaicos se concentra la radiación solar aumentando temperatura en el receptor. Los paneles fotovoltaicos convierten directamente la energía luminosa en energía eléctrica, ésta puede transformarse en otras formas de energía como energía térmica o energía eléctrica utilizando paneles solares.
- ✓ Fuerza del viento: La energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire.
- ✓ Calor interno de la tierra: La energía geotérmica es aquella energía que puede ser obtenida por el hombre mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra. En algunas zonas del planeta, cerca de la superficie, las aguas subterráneas pueden alcanzar temperaturas de ebullición, y el vapor puede servir para accionar turbinas.
- ✓ Mareas: Se debe a las fuerzas gravitatorias entre la Luna, la Tierra y el Sol, que originan las mareas, es decir, la diferencia de altura media de los mares según la posición relativa entre estos tres astros. Esta diferencia de alturas puede aprovecharse en lugares estratégicos como golfos,

bahías o estuarios, utilizando turbinas hidráulicas que se interponen en el movimiento natural de las aguas, junto con mecanismos de canalización y depósito, para obtener movimiento en un eje. Mediante su acoplamiento a un alternador, se puede utilizar el sistema para la generación de electricidad, transformando así la energía mareomotriz en energía eléctrica.

2.2 ENERGÍA EN MÉXICO.

En este apartado se presenta la estructura que rige el sector energético en México, el cual está formado por el área de hidrocarburos y el de la energía eléctrica. Se muestra también un panorama general de la situación de México, comparando las demandas de los diversos sectores productivos contra la capacidad del sector energético mexicano y de las alternativas que existen para fortalecer esas necesidades del mercado.

2.2.1 ESTRUCTURA DEL SECTOR ENERGÉTICO MEXICANO.

El sector energía de México se divide en tres grandes áreas [3]:

1.- El subsector de hidrocarburos que tiene como principal entidad a Petróleos Mexicanos (PEMEX), conformada por cinco subsidiarias: PEMEX Exploración y Producción (PEP), PEMEX Refinación (PR), PEMEX Gas y Petroquímica Básica (PGPB), PEMEX Petroquímica (PPQ) y PEMEX Internacional (PMI). El Instituto Mexicano del Petróleo, entidad paraestatal, da apoyo tecnológico a PEMEX y labora muy cerca de éste. Además de estas entidades públicas, de acuerdo al Reglamento de Gas Natural publicado en 1995, un número importante de empresas privadas participan en el transporte de gas natural, en su distribución (el 100% de ésta la realizan entidades privadas), y en la regasificación del gas natural licuado importado.

2.- El subsector de electricidad tiene como principal entidad a Comisión Federal de Electricidad (CFE), que genera casi el 100% de la energía eléctrica del país, así como transporta y distribuye del orden del 75% de los kilowatts-hora vendidos. Luz y Fuerza del Centro que distribuye el otro 25% de la electricidad, da servicio sólo en el centro del país.

De acuerdo a las modificaciones a la Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica en 1992, en el presente existen varias empresas privadas que generan energía eléctrica para CFE (Productores Independientes de Electricidad-PIE), así como se abre la posibilidad que empresas privadas importen o exporten electricidad. El Instituto de Investigaciones Eléctricas da apoyo tecnológico en materia de electricidad a las dos entidades antes mencionadas, así como a PEMEX y otras entidades públicas y

privadas.

3.-Existen tres entidades que norman y/o promueven diferentes aspectos del sector energético. La Comisión Reguladora de Energía (CRE), la Comisión Nacional de Seguridad Nuclear y Salvaguardas (CNSNS), la Comisión Nacional para el Ahorro de Energía (CONAE) y el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) que realiza investigaciones y desarrollos científicos y tecnológicos en el área de las aplicaciones de la energía nuclear.

La economía del país depende de los hidrocarburos (petróleo, condensados y gas natural) en un 90.85%, incluyendo la exportación de crudo.

El consumidor final más demandante es el sector transporte con 41.27% del consumo final, excluyendo al sector energético, mientras que el sector industrial, consume solamente el 28.02%.

2.2.2 PANORAMA DE LA ENERGÍA EN MÉXICO.

México es un país con 103,263,388 [4] habitantes, que ha explotado sus pozos de petróleo, por lo que sus reservas han disminuido a lo largo de los años, como se muestra en la tabla 1, ésto es una realidad que ha afectado la estabilidad económica y política del país.

Tabla1. Reservas totales de hidrocarburos entre los años 1998-2007.
En millones de barriles de petróleo crudo equivalente.

Año	Reservas totales de Hidrocarburos	Reservas probadas de Hidrocarburos
1998	56,504.80	35,196.90
1999	57,741.20	34,179.50
2000	58,204.10	34,103.80
2001	56,154.00	32,614.40
2002	52,951.00	30,837.50
2003	50,032.20	20,077.30
2004	48,041.00	18,895.20
2005	46,914.10	17,649.80
2006	46,417.50	16,469.60
2007	45,376.30	15,514.20

Cifras al primero de enero de cada año.

FUENTE: Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2007-2016. SENER.

En la tabla 2 se pueden observar los tipos de energía que se generan en México y la cantidad consumida en Petajoules (PJ = 10^{15} Joules) durante el año 2003. También se puede observar que México depende en un 71.81% del petróleo como fuente de energía, siendo éste el porcentaje más alto. [5]

Tabla2. Producción de Energía primaria en PJ.

Tipo de Energía	Producción en PJ	%
Energía Nuclear	114.87	1.14
Energía eólica	0.05	0.00
Geoenergía	61.66	0.61
Hidroenergía	205.05	2.04
Carbón	192.89	1.92
Petróleo	7,228.47	71.82
Condensados	153.17	1.52
Gas natural	1,762.03	17.51
Bagazo de caña	89.42	0.89
Leña	256.74	2.55
Total	10,064.339	100.00

FUENTE: Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2004-2013. SENER.

En la tabla 3 se muestran los sectores consumidores de energía durante los años 2007 y 2008 en PJ y el porcentaje que esto representa del total consumido. Así como la diferencia que existió entre un año y otro. Se muestra que el mayor consumo de energía se da en el sector de transporte incrementando esta este un 10% para el año 2007.

Tabla 3. Principales sectores consumidores de energía en el 2007 y 2008 en PJ.

	2006	2007	Δ%	% 2006	% 2007
Total	4528.964	4815.115	6.3	100	100
Consumo no energético total	287.628	265.972	-7.5	6.4	5.5
Petroquímica PEMEX	198.588	158.653	-20.1	4.4	3.3
Otras ramas económicas	89.041	107.319	20.5	2	2.2
Consumo energético total	4241.335	4549.143	7.3	93.6	94.5
Residencial, comercial y público	857.138	893.526	4.2	18.9	18.6
Transporte	1966.478	2157.826	9.7	43.4	44.8
Agropecuario	126.646	134.899	6.5	2.8	2.8
Industrial	1291.073	1362.893	5.6	28.5	28.3

FUENTE: Balance Nacional de energía 2007.SENER

En las tabla 4 se observar como las fuentes de energía renovables han tenido altibajos durante su desarrollo, mientras que la tabla 5 muestra la aportación de las energías renovables en la producción de energía primaria, lo cual de manera general ha aumentado, con excepción de la leña. Esto puede deberse a medidas ambientales que prohíben la deforestación de áreas naturales, ya que esta forma de energía es principalmente explotada por las zonas rurales de nuestro país.

Tabla 4. Las Energías Renovables en el Balance Energético de México en PJ.

	Hidroenergía	Leña	Bagazo de Caña	Geoenergía	Energía Eólica
1995	283.872	243.615	87.858	58.459	0.062
1996	322.316	245.302	87.211	58.729	0.051
1997	271.153	246.088	95.971	56.075	0.041
1998	252.956	243.913	99.277	58.132	0.051
1999	336.146	249.517	91.979	57.778	0.062
2000	344.22	253.868	88.037	61.413	0.083
2001	291.822	255.844	92.996	57.132	0.071
2002	259.054	255.087	88.646	56.246	0.072
2003	205.049	256.742	89.417	61.661	0.072

FUENTE: Balance Nacional de energía 2007.SENER

Tabla 5. Producción de Energía Primaria 2006 y 2007 en PJ.

	2006	2007	Δ %	% 2006	% 2007
Total	10633.623	10522.966	-1	100	100
Carbón	230.704	251.237	8.9	2.2	2.4
Hidrocarburos	9568.381	9466.86	-1.1	90	90
Petróleo Crudo	7304.395	6923.361	-5.2	68.7	65.8
Condensados	141.127	107.2	-24	1.3	1
Gas Natural	2122.859	2436.299	14.8	20	23.2
Electricidad Primaria	490.379	458.555	-6.5	4.6	4.4
Nucleoenergía	119.419	114.486	-4.1	1.1	1.1
Hidroenergía	303.55	268.182	-11.7	2.9	2.5
Geoenergía	66.96	73.427	9.7	0.6	0.7
Energía Eólica	0.451	2.459	XXX	n.s	n.s
Biomasa	344.159	346.159	0.6	3.2	3.3
Bagazo de Caña	96.656	99.561	2.7	0.9	0.9
Leña	247.202	246.754	-0.2	2.3	2.3

FUENTE: Balance Nacional de energía 2007.SENER.

n.s. no significativo

2.2.3 PROBLEMÁTICA Y ALTERNATIVAS.

En enero de 2009 la producción de petróleo crudo promedió fue de 2,791.8 miles de barriles diarios, 8.3% menos que en enero de 2008, durante en el periodo de enero a julio del 2008 se registró una disminución del 10% en la cantidad de barriles diarios de crudo producido en nuestro país, con respecto al

mismo periodo en el año 2007, esta problemática actual, sumada a los problemas ambientales, ha dado pie a la búsqueda de alternativas para producir energía. [7]

Lo anterior se explica por la disminución del 34.1% en la producción del Activo Integral Cantarell, con un promedio de 818 millones de barriles diarios. En 2008, éste Activo aportó el 37.2% de la producción total de petróleo crudo y continúa siendo el de mayor importancia en la producción nacional. En lo que respecta a la producción mundial de crudo, en enero de 2009 fue de 71,830 miles de barriles diarios, de los cuales México aportó el 3.8%, de acuerdo con cifras de la Agencia Internacional de Energía.

En la figura 2.1 se observa una constante caída en la producción nacional de petróleo crudo, pero el consumo energético total aumentó un 7.3% entre los años 2006 y 2007. Si la demanda continua en aumento y la caída de la producción es constante no podemos seguir dependiendo de una sola fuente de producción de combustibles. Es importante incrementar el uso de combustibles provenientes de fuentes renovables, de manera más constante ya que como lo muestra la tabla 5 en el periodo 2002-2003 hubo un incremento, pero los años anteriores su producción era muy inconstante.

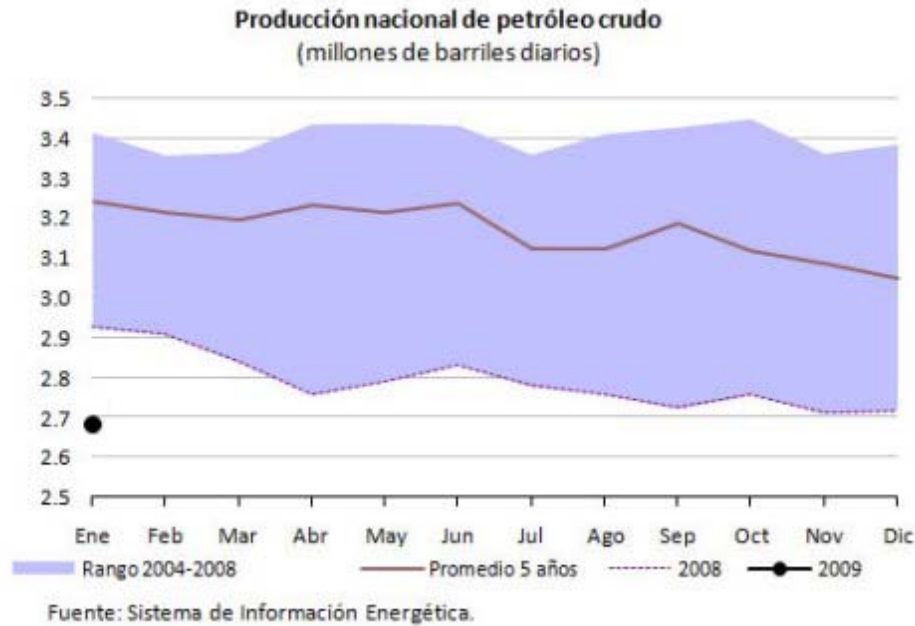


Figura 2.1. Producción Nacional de Petróleo Crudo.
FUENTE: Balance Nacional de energía 2007.SENER.

Si bien es verdad que la presencia de estas alternativas de energía han existido desde hace muchos años, ahora se ha vuelto necesario hacer a estas alternativas verdaderamente viables para desarrollarlas en todo el mundo.

Debido a los problemas energéticos y sociales que se atraviesan en el mundo, se han buscado alternativas que diversifiquen la producción de energía sin afectar el consumo de alimentos y con ello la economía de las familias, una de las alternativas que se plantean es la producción de bioenergéticos en sitios que, por sus características de baja fertilidad o por su degradación debido a desastres naturales, no son ocupados por los cultivos convencionales.

Para la producción de biodiesel, se hace énfasis en la utilización de espacios y cultivos que no compitan con la producción principal y menos aún con cultivos alimenticios. [7]

La demanda de combustibles que puede avecinarse debido a la escasez de petróleo en un futuro, es ciertamente un foco rojo, sin embargo, no podemos olvidar que los biocombustibles pueden también tener repercusiones ya que si éstos provienen de productos comestibles, el problema económico que se avecinaría sería importante.

El escenario de los bionergéticos debe considerar factores sociales, económicos y ambientales necesarios para que sea un producto realmente sustentable.

En México, la biodiversidad que encontramos es muy grande, sin embargo, el problema político y social en el que se encuentra puede ser un factor que frene las expectativas que se tienen al respecto de la producción de biocombustibles.

La seguridad en cuestión de alimentación debe tomarse en cuenta, con el fin, de garantizar la estabilidad de la economía del país, considerado también la capacidad productora del campo mexicano y el potencial que encontramos en las zonas para reforestar. [8]

El desarrollo de la industria ha dependido de los combustibles fósiles, debido a que su costo de producción es más bajo, por lo que desplazaron a otras fuentes de energía.

En la actualidad, se ha incrementado la preocupación por la posible extinción a mediano plazo de las reservas fósiles y la preocupación por el medio ambiente, lo que ha modificado la situación y aumentado el interés en la búsqueda de nuevas fuentes de energía.

La comunidad internacional ha comenzado a desarrollar fuentes

de energía alternativas, las cuales no son nuevas sino que ante las ventajas del petróleo y su menor precio relativo, habían sido desplazadas, en este contexto, hoy el mundo por diferentes circunstancias, marcha hacia la obtención de energía: hidráulica, eólica, solar, química, y de derivados de la biomasa [7].

El uso de biocombustibles no es una situación actual, si consideramos que el motor de diesel, inventado por Rudolph Diesel, en 1895, se empleó en sus ensayos aceite de cacahuete. Los biocombustibles derivan de un sinnúmero de productos agropecuarios; los más utilizados a nivel mundial son oleaginosas como: soya, girasol, cacahuete, canola, palma, lino, cártamo y nabo. Asimismo, se ha experimentado con aceites usados, grasas animales y otros vegetales que en su semilla pueden generar aceites, como el algodón y el maíz. En los últimos años, se ha centrado la atención en especies vegetales nativas de México como la higuera y el piñón [7].

Una vez encontradas las semillas que serán factibles para desarrollar el biodiesel en nuestro país, es importante considerar la situación del campo mexicano, el apoyo a los campesinos y la situación que viven debido a su postura en el tratado de libre comercio, hace menos atractiva la participación de ellos en la producción de biodiesel, considerando que la materia prima viene de ellos, debemos considerar un inicio sólido dando un precio adecuado e incentivos para hacer que el cultivo de las semillas sea viable y con ello hagamos competitivo nuestro mercado. [8].

Los biocombustibles desarrollados a partir de estos aceites, pueden ser utilizados en los motores convencionales, sin cambios considerables ya que solamente, y debido a su poder

diluyente, sólo requieren reemplazar las mangueras de conducción del combustible por elementos no fabricados sobre la base de caucho o espuma de poliuretano. [7].

En la actualidad, es necesario plantear alternativas energéticas, ya que el depender de una fuente no renovable como lo es el combustible fósil, limita la capacidad de producción de energía en un futuro no muy lejano.

La propuesta radica en utilizar energías renovables, ya que éstas tienen ventajas como:

1. Solución a los problemas de cambio climático.
2. Diversificación del mercado energético.
3. Oportunidad de posicionarse estratégicamente en el mercado de una nueva industria energética.
4. Debido a su carácter sustentable son capaces de preservar las fuentes.
5. Garantizan la seguridad y diversidad del suministro energético.
6. Proveen servicios de energía virtualmente sin impacto ambiental, contribuyendo a la protección del ecosistema de las generaciones presente y futuras.
7. En los últimos años se ha visto una clara tendencia hacia la baja de los costos en los equipos de energías renovables.
8. Sus requerimientos se pueden desarrollar la infraestructura necesaria de forma gradual, conforme el mercado lo requiere y en las zonas donde sea necesario.

La aplicación de las energías renovables en México con fines de

generación eléctrica se podrán dar en dos ámbitos distintos, pero complementarios:

1. Con instalaciones ligadas a la red eléctrica tanto en forma de grandes centrales generadoras como generación en centrales de menor tamaño.
2. Con instalaciones en zonas remotas, alejadas de las líneas de distribución, para la alimentación de pequeñas cargas aisladas tanto en proyectos productivos como de mejoramiento de calidad de vida en el medio rural.

El uso de las energías renovables representa:

1. Nuevas fuentes de empleo.
2. Mayores exportaciones.
3. La reactivación de muchas industrias tradicionales.
4. El fortalecimiento del aparato científico-técnico del país ya que alentaría la vinculación de la industria con los centros de investigación y de desarrollo tecnológico.

2.3 BIOCOMBUSTIBLES.

El biodiesel es una alternativa cada vez más común como energético, la realidad de la problemática con los energéticos fósiles va en aumento, por lo que la producción de este bioenergético cada día es más útil. La producción de biocombustibles estaba basada en la sustentabilidad de su producción, en el presente trabajo se busca proponer una alternativa viable que cumpla con tres balances positivos para

su producción:

1. Energético: Si la cantidad de energía utilizada para la producción de los biocombustibles, como la invertida en el transporte, en la producción de la materia prima, en la producción del biocombustible, etc. es menor a la cantidad de energía que puede aprovecharse el biocombustible, entonces, el balance es positivo y viable para la producción.
2. Económico: Se basa principalmente en el impacto que puede tener en el país ya que la planta que se propone es una alternativa que no compite con el campo alimenticio, más aún ayuda al campo para su desarrollo como una alternativa de cultivo.
3. Ecológico: La cantidad de gases de efecto invernadero que se fijarán en las plantas utilizadas para la producción de biodiesel, debe ser menor que la cantidad producida de la combustión del biocombustible.

2.3.1 Biodiesel.

Los orígenes del biodiesel se remontan a la invención del motor diesel, Rudolf Diesel entre los años de 1889 y 1895 desarrolló el motor de ignición por compresión conocido como “El motor diesel”. En un inicio la combustión de motor se hacía con una gran variedad de aceites, incluido el aceite destilado de petróleo y el aceite de cacahuete. [9].

En la región norte de Europa se vio que era mucho más económico fabricar combustible para motores de compresión a

base de petróleo, que obtener este tipo de combustible a partir de cultivos de oleaginosas, dado que el rendimiento de éstas últimas era pobre en términos de la relación entre la energía usada para cultivar plantas de aceite vegetal y la energía proporcionada por dicho aceite una vez tratado. Desde entonces, las modificaciones que se habían hecho al motor se enfocaron al funcionamiento de éste utilizando aceites menos viscosos que el aceite vegetal, es decir, los obtenidos del petróleo.

El biodiesel se define como los monoalquiléster de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales o grasas animales. [10]. Es un combustible generado a partir de aceites vegetales o grasas animales mediante un proceso químico llamado transesterificación. Para llevarlo a cabo se utiliza un alcohol y un catalizador obteniendo glicerina y biodiesel como productos de la reacción. [11]

La forma general de la reacción de transesterificación se muestra en la figura 2.2.

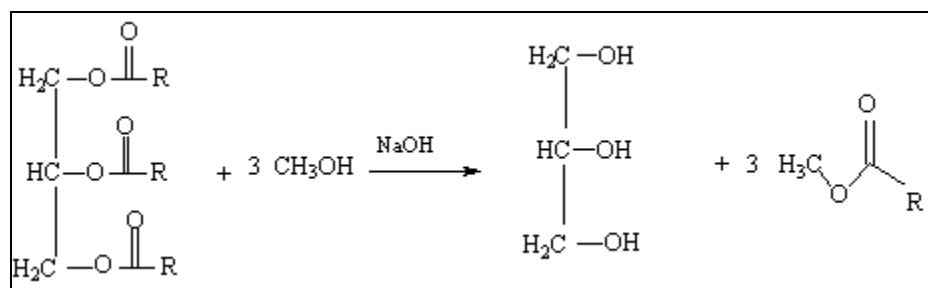


Figura 2.2. Reacción de transesterificación para producir biodiesel. [12]

La materia prima para producir el aceite utilizado para la producción de biodiesel en algunos casos puede ser utilizada como comestible. Al biodiesel producido con aceite proveniente

de productos comestibles como el maíz y la soya se le llama de primera generación y al biodiesel producido de materia prima no comestible como el aceite de *Jatropha* se denomina biodiesel de segunda generación.

Las características específicas del biodiesel (100%) se establecen en la norma ASTM D6751-08. El biodiesel no únicamente puede ser utilizado como combustible al 100%, sino que se puede utilizar en proporciones del 5%-20% en volumen con diesel de petróleo, como un aditivo a los combustibles fósiles, a los cuales les proporciona lubricidad. [13].

2.3.2 SUBPRODUCTOS DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

En la producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas*, se tienen principalmente dos subproductos:

1. Bagazo
2. Glicerina

La extracción del aceite se puede hacer principalmente por tres métodos [14]:

- ✓ Derretimiento.- El cual se utiliza para grasas animales por medio del calentamiento para separar la grasa de los tejidos.
- ✓ Prensado mecánico.- Utilizado para productos de alto contenido de aceite, su principio es la presión mecánica.
- ✓ Extracción por solvente.- Utilizando una lixiviación con hexano como el solvente más común.

El bagazo puede trabajarse para su comercialización como

forraje de animales dependiendo del grado de toxicidad de la semilla.

La glicerina debe someterse a un proceso de purificación para eliminar el catalizador, biodiesel y alcohol residual que pudiera contener después de la reacción. Al finalizar la purificación puede ser comercializada para su uso en distintas ramas industriales como la farmacéutica y cosmética.

2.4 *Jatropha curcas*

La *Jatropha* es una semilla de la familia de las *Euphorbiaceae*, la cual se da principalmente en clima tropical o subtropical con temperatura media anual de 20°C. La planta soporta heladas leves de corta duración, siempre que la temperatura no se presente por debajo de 0°C. Se desarrolla en altitudes desde el nivel del mar hasta los 1200 m preferentemente, y con precipitación pluvial desde 300 hasta 1800 mm anuales de lluvia ó más.

Es una planta de cuyas semillas se obtiene el aceite útil para producir biodiesel. Las cadenas de ácidos grasos más comunes en aceite de *Jatropha* son: oléico (41-42%), linoléico (42-44%), palmítico (9-11), esteárico (2-3%), mirístico (0.3-0.4%) y palmitoléico (0.3-0.4%). [12]

Las semillas de *Jatropha* contienen entre un 30% a un 40% de aceite. La floración en la planta *Jatropha* puede presentarse desde antes del primer año, sin embargo para que la floración sea suficiente para la producción de biodiesel, debe pasar más tiempo.

La producción de semilla se estabiliza a partir del 4° ó 5° años. Al parecer la formación de flores está relacionada con el periodo de lluvias. Puede florear nuevamente después de producir frutos cuando las condiciones permanecen favorables por otros 90 días, pero después de esta 2ª floración, la planta no florea hasta el año siguiente. [15]

El desarrollo del fruto toma entre 60 y 120 días desde la floración hasta la madurez de la semilla. La reproducción se detiene al inicio del período de lluvias.

Las semillas de *Jatropha curcas* es una especie tóxica debido a la presencia de esteres de forbol y cursina, sin embargo contiene hasta 60% de ácidos grasos en patrones similares a los aceites comestibles.

El bagazo obtenido después de la extracción de aceite, tiene un contenido nutricional comparable con pastas similares utilizadas como forraje, pero, debido a diversos principios tóxicos en la *Jatropha curcas*, incluyendo lecitina (curcina); ésteres de forbol; saponinas; inhibidores de proteasas; el aceite, la semilla o la pasta resultante de la extracción de aceite de *Jatropha curcas* no puede ser utilizada en la nutrición animal o humana sino hasta que se lleve a cabo un proceso de extracción de las sustancias tóxicas.

Las plagas y enfermedades en la planta *Jatropha* en estado silvestre, no son gran problema debido a su carácter tóxico, sin embargo la ataca el insecto *Podagrica spp* y al hongo *Cercospera spp*.

La cosecha se realiza en dos o tres ocasiones durante al año, debido a que no todos los frutos maduran al mismo tiempo.

2.5 ANÁLISIS DE MERCADO.

En México, el costo del diesel de petróleo es bajo debido a que cuenta con subsidios especiales dentro del sector agrícola. Los costos de producción del biodiesel tienen un rango de entre \$5.3 a \$12.4 pesos por litro. [16].

Para llegar a sustituir un 5% del diesel de petróleo en el país será necesario instalar 10 plantas industriales con capacidad de 100.000 ton/año cada una o más de 140 plantas pequeñas con capacidad de 5,000 ton/año cada una.

Para el mezclado de diesel-biodiesel es necesario un sistema con capacidad de almacenamiento dos tanques del orden de 40,000 barriles para garantizar de esta manera el abasto de biodiesel de 7 días. Cada tanque con tuberías y sistema de mezclado representa 7 millones de dólares, aunque se puede ajustar a cada refinería dependiendo de su ubicación y de la infraestructura necesaria para acoplarla con la existente.[17]

Uno de los principales cuellos de botella para la introducción del biodiesel en México está en el sector agrícola. Por esta razón se tiene que establecer un amplio plan de apoyo a la agricultura para lograr el suministro nacional de los insumos.

La producción a gran escala de biodiesel en México requiere de un esfuerzo importante en investigación y desarrollo. Las actividades que deberían enfatizarse son, por ejemplo, el establecimiento de investigación agrícola para mejorar la productividad de cultivos energéticos, especialmente para ampliar las variedades de las diferentes especies, y el establecimiento de nuevos sistemas de cultivo.

Es necesaria sería la creación de centros de investigación y desarrollo regional sobre biodiesel/biocombustibles y de los efectos dañinos al motor que pueden reducirse e incluso eliminarse mediante la transesterificación del aceite o grasa (triglicéridos) para formar un metiléster (biodiesel).

En la tabla 6 se muestra el costo promedio de combustible en dólares/galón y en km/dólar. Se observa que el costo del diesel de petróleo es más bajo que el biodiesel, esta diferencia tendrá que disminuir a medida que la escasez de petróleo dificulte el abasto de combustibles provenientes de fuentes fósiles.

El rendimiento del diesel y el B100 como se muestra en la tabla 6 no es tan grande, es de poco menos de 2 Km/galón.

Tabla 6. Comparación de diversos estándares para Biodiesel.

Combustible	Km/gal	Promedio del costo de combustible (dolares/galón)	Costo de combustible por km (centavos de dólar)
Diesel	61.16-74.03	2.21	3.23
B20	59.55-72.42	2.56	3.73
Gas	40.23-49.89	1.9	4.28
B100	59.55-72.42	3.4	5.09

FUENTE: Experiencia con *Jatropha curcas* L. en México. [18]

Actualmente la Unión Europea tienen estándares establecidos para el biodiesel, debido a que en esta región del planeta el uso de los biocombustibles ha aumentado y la regulación de éstos debe ser un elemento importante para llevar un adecuado manejo de los combustibles existentes. Ver anexo A.

En México no se cuenta con la materia prima suficiente para producir la cantidad de biocombustibles que se requiere. Actualmente, la industria aceitera demanda más de 5 millones

de toneladas de oleaginosas de las que en México sólo se producen 250 mil ton aproximadamente. [8]

México es un país eminentemente importador de oleaginosas para uso alimenticio, por lo que se requiere fomentar y apoyar la producción de semillas oleaginosas en el país para cubrir la necesidad actual, y aún más intensiva si se desea obtener aceite vegetal como materia prima para biodiesel.

Durante el 2002, el consumo de Diesel por sector se distribuyó en: 85.6 % al transporte; 7.6 % al sector industrial; 4.1 % al sector petrolero y 2.7 % al sector eléctrico.

La producción de biodiesel se puede realizar de diversas semillas, en la Tabla 7 se muestra el rendimiento de varias semillas utilizadas, sin embargo, es un cuadro representativo ya que el rendimiento va a variar de acuerdo a la ubicación geográfica, tipo de riego y condiciones culturales del lugar donde este el cultivo entre otras.

En la tabla 7 se muestran diferentes semillas que se pueden producir en México, las cuales contienen aceite útil para la transesterificación, se observa que el rendimiento por hectárea de *Jatropha curcas* es mayor a las demás semillas y que su contenido de aceite también es alto. Es importante considerar que pueden ser usadas varias semillas para la producción de biodiesel, aprovechando las zonas más apropiadas para cada caso. El desarrollo sustentable debe ser la condición prioritaria ineludible en el cultivo de la planta de *Jatropha*, porque las consecuencias negativas debido a la falta de sustentabilidad en los cultivos, pueden ser severas y agravar los problemas de seguridad alimentaria; inequidad social; pobreza; cambio climático y degradación de los ecosistemas en Latinoamérica.

Tabla 7. Comparación de diferentes cultivos de semilla para producir biodiesel (2002).

Nombre común	Nombre científico	Rendimiento de semilla (ton de semilla/ ha cultivada)	Contenido de aceite (% de la semilla)	Rendimiento Aceite (L de aceite/ ha cultivada)	Rendimiento Biodiesel (L fr biodiesel/ Ha cultivada)	Superficie requerida (ha cultivadas anuales) x10 ⁷	Veces la superficie cultivable nacional.
Cacahuete	<i>Arachis hypogaea L.</i>	1.8	45	890.11	901.24	1.605	0.59
Mostaza verde	<i>Brassica juncea (L) Czern</i>	1.5	34	560.44	567.45	2.55	0.94
Colza	<i>Brassica napus L.</i>	3.18	40	1397.8	1415.27	1.022	0.38
Cártamo	<i>Carthamus tinctorius L.</i>	2	38	835.16	845.6	1.711	0.63
Girasol	<i>Helianthus annuus L.</i>	2.3	35	884.62	895.67	1.615	0.6
Coco	<i>Cocos nucifera L.</i>	33	10	3626.37	3671.7	3.941	0.15
Algodón	<i>Gossypium hirsutum L.</i>	0.65	22	157.44	159.11	9.094	3.37
Ricino	<i>Ricinus communis L.</i>	1	45	494.51	500.69	2.89	1.07
Piñoncillo	<i>Jatropha curcas</i>	5	40	2197.8	2225.27	0.6502	0.24

2.5.1 EL MERCADO EN MÉXICO.

En la actualidad el diesel tiene un valor de \$7.55 pesos (marzo 2009) y es utilizado en un 43.4% en el sector del transporte, ver tabla 8, por lo que este sería el principal mercado, por la aplicación y demanda en este rubro.

Además conocemos como ha variado el consumo de diesel en el sector transporte entre los años 1993 y el año 2006, como se observa en la Tabla 9.

Tabla 8. .Consumo de energía en el sector transporte en PJ.

	Diesel (PJ)
Total	573.874
Aéreo	0
Autotransporte	517.996
Eléctrico	0
Ferrovionario	25.81
Marítimo	30.068

FUENTE. SENER

La creciente demanda de combustibles y el inminente encarecimiento de combustibles fósiles hacen de este proyecto una alternativa, sin embargo hay que plantear las condiciones para que se lleve a cabo.

En la tabla 9 se muestra que entre los años 2002-2006 el consumo de diesel en el sector transporte se vio incrementado, debido a la próxima producción de Diesel Ultra Bajo Azufre, el cual, al disminuirle la cantidad de azufre se le afecta la lubricidad y para cumplir con el límite especificado por el método HFRR (High Frequency Reciprocating Rig) cuyo máximo recomendado es de 460 micrones, entonces se abren las puertas para el uso del biodiesel a los combustibles como aditivo, el cual será útil como lubricante. [17].

Tabla 9. Consumo de diesel en el sector transporte en México.

Año	Consumo Transporte(m³/d)
1993	36,027
1994	35,471
1995	33,254
1996	34,802
1997	36,937
1998	38,686
1999	38,934
2000	39,681
2001	38,887
2002	38,406
2003	40,515
2004	42,761
2005	45,811
2006	49,718

FUENTE: Sistema de Información Energética (SIE) de la secretaría de energía.

En países europeos, el biodiesel se emplea como una mezcla de biodiesel-diesel que contienen un 5 % v/v, 10 % v/v y 20 % v/v de biodiesel, B5, B10 y B20 respectivamente.

Para realizar la producción correspondiente a una mezcla B5 será necesario considerar que:

- ✓ Para la producción del biodiesel necesario para una mezcla B5 son aproximadamente 2485.90 m³/d, si tomamos como base una producción de 49,718 m³/d de diesel como en 2006.
- ✓ La materia prima requerida, es decir, la semilla de *Jatropha curcas* se va a producir en el campo mexicano. Garantizando un precio mínimo al campesino.
- ✓ La semilla de *Jatropha curcas* produce de un 30-40% de aceite [15].
- ✓ El promedio anual de producción de semillas es de 5

ton/Ha y por su adaptabilidad es viable sembrarla en suelos marginales o como cerca viviente donde no intervengan en el cultivo alimenticio.

Con estas consideraciones se realizan los cálculos correspondiente y determinamos que se requieren 31,792.46 Ha para producir la cantidad necesaria de semilla para extraer los 1.9×10^6 L de biodiesel necesarios para la mezcla B5. El cálculo se puede ver en el anexo B.

CAPÍTULO III

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presentan los trabajos experimentales que se realizaron para determinar las características de la semilla, *Jatropha curcas*. Así como conocer la metodología para la extracción del aceite empleado para la transesterificación, reacción mediante la cual se produce el biodiesel y con esto poder determinar la cinética de esta reacción, tomando como base las condiciones establecidas experimentalmente.

3.1 OBTENCIÓN DE LA SEMILLA

Para el desarrollo de este proyecto se trabajó de cerca con el CENVYTT (Centro de Valoración y Transferencia de Tecnología Agraria) en el municipio de Rosamorada, Nay. La figura 3.1 muestra el lugar donde se encuentran bosques naturales de *Jatropha curcas*, localmente conocida como *sangre de grado*, allí se realiza la reproducción de la planta mediante germinación y esquejado, ver figura 3.2.



Figura 3.1. Bosque natural de *Jatropha curcas*.



Figura 3.2 Germinación y esquejado de la planta de *Jatropha curcas*.

Del CENVYTT se obtuvieron 5 diferentes muestras de semilla de *Jatropha curcas*, un ejemplo de ellas se muestra en la figura 3.3. Estas semillas habían sido recolectadas, en diferentes puntos del municipio de Rosamorada, Nay. Las semillas venían identificadas con los nombres que se muestran en la tabla 10, la última muestra fue Ramoncita la cual se recibió húmeda.



Figura 3.3. Semillas con cáscara de *Jatropha curcas*.

Tabla 10. Muestras de semilla de *Jatropha curcas* Rosamorada, Nay.

Número de muestra	Nombre de la Muestra
1	Julia 4
2	Marychuy 2
3	Perla 6
4	Sindi 3
5	Susie 5
6	Ramoncita

3.2 DETERMINACIÓN DEL PESO PROMEDIO Y MÉTODOS DE SECADO DE LA SEMILLA.

Las primeras 5 muestras se recibieron secas, para determinar el peso promedio se pesaron 20 semillas de *Jatropha curcas* de cada muestra.

La muestra denominada Ramoncita, la cual estaba húmeda, fue separada en dos lotes de 200 g cada uno los cuales se secaron por dos métodos, el primer lote se secó mediante exposición al sol de la misma forma en que se realizó en el CENVYTT, ver figura 3.4 y el segundo lote fue secado en la estufa a 45 °C como se observa en la figura 3.5. Esto para determinar la humedad de la muestra.



Figura 3.4 Secado de semilla de *Jatropha curcas* por mediante exposición al sol durante 48 h.



Figura 3.5. Secado de semilla de *Jatropha curcas* por medio de la estufa (45 °C) durante 2 h.

3.3 EXTRACCIÓN DE ACEITE.

Se realizaron lotes de 200 g de semilla sin pelar, los cuales se colocaron en la Prensa CARVER a una presión de hasta 20,000 psig.

Se colectó el aceite extraído y se midió el volúmen y la densidad del aceite para cada lote. El aceite se guardó en frascos color ámbar para evitar que se oxidara.

Para considerar las pérdidas por manejo, en cada caso, se peso antes y después de la extracción la charola de recolección.

También se hizo el ejercicio de pelar 400 g de semillas. La figura 3.6 muestra el bagazo de la semilla pelada después de exprimir.



Figura 3.6 Bagazo de semilla pelada después de la expresión.

Se determinó la cantidad de cáscara y la cantidad de semilla en porcentaje, pesando ambas por separado y obteniendo la relación. Se extrajo el aceite con la prensa CARVER de la misma forma que la semilla sin pelar.

3.4 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE YODO.

La determinación del índice de yodo se realizó por medio de la técnica descrita en el anexo C. La experimentación se realizó por duplicado para así tener el promedio de las dos determinaciones.

3.5 TRANSESTERIFICACIÓN.

La etapa de pruebas para determinar la transesterificación se llevó a cabo con aceite de soya proporcionado por la empresa Resinas y Materiales S.A. de C.V. (RYMSA), se realizaron los experimentos variando cantidad de metanol para determinar la

cantidad de exceso más adecuada, se varió la cantidad de catalizador y finalmente se determinó la temperatura óptima tomando como límite el punto de ebullición del metanol ya que de ser superior perderíamos uno de los reactivos. Para el inicio se tomaron como base las propuestas experimentales que ya existen en la literatura y se comprobó que fueran condiciones favorables en el aceite de *Jatropha curcas*, por medio de la experimentación.

La metodología para determinar las condiciones a las que se va a llevar a cabo la transesterificación se presenta a continuación:

Se realizaron lotes de 250 mL de aceite de soya, los cuales se colocan en un matraz bola de tres bocas montado en una mantilla de calentamiento regulada con un reostato, una vez en el matraz se comienza a calentar se inicia la agitación por medio de un agitador magnético, cuando se llega a una temperatura 5 °C arriba de la temperatura a trabajar se agrega la cantidad de metanol que se va a variar en ese lote. Para poder determinar la cantidad más adecuada de cada una de las variables se varió la temperatura, el exceso de metanol y la cantidad de catalizador en la forma que muestra la tabla 11.

Tabla 11. Experimentos realizados para determinar las condiciones óptimas de transesterificación, con aceite de canola.

No. de reacción	Temperatura [°C]	NaOH %p/p	Exceso %
1	25	5	50
2	30	3.5	50
3	45	1	80
4	50	1	80
5	50	1	100
6	55	1	80

Una vez que se realiza cada lote, se deja en un embudo de separación de 500 mL, este tiempo también se varió de acuerdo a las observaciones, pasando por 48 h, 24 h, 12 h, 6 h y 2 h.

Una vez realizada la separación se midió el volumen de cada una de las fases, la fase inferior es una mezcla de glicerina (en su mayoría) biodiesel, catalizador y el metanol en exceso y la fase superior es una mezcla preferentemente de biodiesel, aunque con trazas de los otros componentes, para eliminar esas trazas se realiza a un lavado con un 50% v/v de agua, con agitación vigorosa y se espera la separación de la fase acuosa y el biodiesel por 15 min. Mediante la cromatografía de gases se monitoreó la presencia de residuos en el biodiesel hasta establecer el número de lavados necesarios para eliminar la cantidad de residuos presentes en el biodiesel.

Una vez determinadas las condiciones mediante las pruebas se establece la siguiente metodología.

- i. Se prepara una solución homogénea de la cantidad estequiométrica de metanol + 80% de exceso v/v y un 1%p/p de NaOH en un vaso de precipitados de 100 mL con un agitador magnético, montado en una parrilla de agitación.
- ii. Se colocan 200 mL de aceite de soya en un matraz bola de tres bocas, en una de las bocas se coloca un termómetro, por otra se agrega la solución de metanol-sosa y al final se tapa con un tapón de hule, una queda sin tapar, el matraz se coloca sobre una parrilla con agitación magnética y calentamiento, el aceite se calienta hasta 55 °C.

- iii. Se agrega la solución de metanol-sosa al aceite de soya, y se mantiene el calentamiento y agitación constante a una temperatura de 50-55 °C durante 2 h.
- iv. La mezcla se coloca en un embudo de separación y se deja reposar durante 2 h.
- v. Se separan las fases formadas. La fase superior es el biodiesel y la inferior una mezcla de glicerina, metanol, catalizador y aceite, correspondiente al proceso. A ambas fases se les mide el volumen con una probeta.
- vi. El biodiesel separado, se lava con un 50% v/v de agua en tres ocasiones:

Se coloca el agua y el biodiesel en un embudo de separación y se agita vigorosamente durante 5 min. Se separa la fase acuosa y se realiza el procedimiento tres veces. Si la reacción no fue completa se formará una emulsión.

- vii. Una vez terminados los lavados se mide el pH del biodiesel y en caso de ser necesario se neutraliza el biodiesel con ácido fosfórico para evitar residuos de sosa.

3.6 DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE *Jatropha curcas*.

Para determinar la cinética de la reacción primero se realiza la curva de calibración llevando a cabo la reacción de transesterificación como se indica en el punto 3.5, con aceite de *Jatropha curcas*. Se establecieron concentraciones, mostradas en la tabla 12, presentes al final de la reacción y posteriormente se realizaron diluciones a diferentes concentraciones las cuales se analizan por medio de la cromatografía de gases. Ver anexo E. Se realiza la gráfica C_A (Concentración de metilésteres) vs A (área total) para establecer la curva de calibración.

Tabla 12. Concentración de las soluciones para la curva de calibración.

Concentración [%pp]	Área total
89.8	87.6×10^8
50.3	34.7×10^8
30.2	21.0×10^8
14.5	13.1×10^8
2.3	3.1×10^8

Para tomar las muestras necesarias para la transesterificación se realiza la siguiente metodología:

Se pesa el 1% p/p de NaOH y se coloca en un vaso de precipitados que contenga la cantidad estequiométrica de metanol con un 80% de exceso. Se inicia la agitación constante con un agitador magnético hasta que se disuelve la sosa en el metanol.

Colocar 30 mL de aceite de *Jatropha curcas* en un matraz bola de tres bocas, en una de las bocas se adapta el termómetro, por otra se vacía la solución sosa-metanol y la otra servirá para la

toma de muestras por medio de una pipeta graduada de 1 mL. El matraz se coloca a calentamiento hasta 5 °C arriba de la temperatura a la que se va a trabajar (ya que por la experimentación previa se sabe que es una reacción endotérmica y esto hará que la temperatura baje cuando inicie la reacción) y agitación constante.

Una vez que la sosa se ha disuelto y el aceite está a la temperatura necesaria, se vacía la sosa al matraz bola e inmediatamente se contabiliza el tiempo con un cronómetro.

Se colocan en un baño de hielo 9 tubos de ensayo debidamente identificados con 0.2 mL de solución 1.25 M de ácido clorhídrico en isopropanol. Posteriormente en cada tubo se coloca la alícuota de 1 mL tomada a diferentes tiempos (0.5 min, 1 min, 2 min, 3 min, 5 min, 7 min, 10 min, 15 min, 20 min) y finalmente se agregan 5 mL de hexano. Este procedimiento se repite para tres temperaturas diferentes (22 °C, 37 °C y 45 °C).

Finalmente se trazan las gráficas C vs t (orden cero), $\ln C$ vs t (primer orden) y $1/C$ vs t (segundo orden) y con ellas se determina el orden de la reacción de acuerdo a la gráfica que se ajuste mejor a una regresión lineal para determinar el valor de la k (constante de rapidez) cuyos valores son el valor de la pendiente de cada caso.

Para determinar el orden de la reacción se debe graficar C vs t (orden cero), $\ln C$ vs t (primer orden) y $1/C$ vs t (segundo orden) las gráficas que se ajusten mejor de manera lineal corresponderán al orden de la reacción de transesterificación.

Después de determinar el orden de la reacción se toman las pendientes de las gráficas, las cuales corresponden los valores

de las k (constante de rapidez), éstos valores se grafican como $\ln k$ vs $1/T$, de esta gráfica podemos obtener el valor de la constante de Arrhenius y la energía de activación.

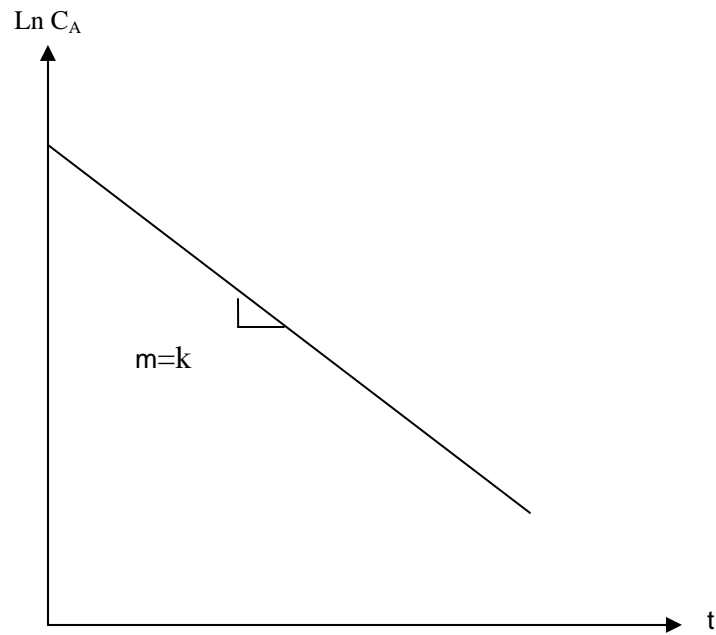


Figura 3.7 Partes de la grafica de orden de reacción.

4.0 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DEL PESO PROMEDIO Y MÉTODOS DE SECADO DE LA SEMILLA.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en la parte experimental y se dan algunas observaciones sobre los mismos.

Al pesar 20 semillas de cada una de las muestras, se determinó el peso promedio los resultados se observan en la tabla 13.

Tabla 13. Peso promedio de una semilla de cada muestra de *Jatropha curcas*.

Muestra	Peso promedio [gr]
Marichuy 2	0.564
Julia 4	0.542
Susie 5	0.521
Sindi 3	0.508
Perla 6	0.484

La muestra identificada como Ramoncita, nos permitió obtener la cantidad de humedad por dos métodos, en la estufa y al sol, obteniendo un promedio de humedad superior al 40% de humedad, como se puede observar en la tabla 14.

Tabla 14. Determinación del porcentaje Humedad en muestras de *Jatropha curcas*.

Tipo se Secado	Masa inicial [g]	Masa final [g]	% Humedad
Al sol (8 días)	218.149	124.274	43.030
Estufa (45°C)	227.172	127.058	44.070

4.2 RESULTADOS DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE.

La determinación del porcentaje de aceite se muestra en la tabla 15, donde se observa que de las muestras que se trabajaron Julia 4 y Marychuy 2 contienen del 13-15% de aceite y son muy diferentes a las otras tres muestras de la tabla 16 que sólo contienen entre 5 y 7 % en peso de aceite. Ver figuras 4.1 y 4.2.

Tabla 15. Determinación del porcentaje de aceite en muestras de *Jatropha curcas*.

Muestra	Aceite total, [g]	Bagazo total, [g]	Pérdidas por manejo, [g]	Aceite colectado, % pp
Julia 4	142.056	909.281	23.662	13.210
Marychuy 2	111.787	620.562	17.651	14.900
Perla 6	51.597	832.922	15.481	5.730
Sindi 3	45.793	592.061	12.146	7.050
Susie 5	57.827	887.257	31.916	5.920
Ramoncita	15.66	183.87	35.633	7.130



Figura 4.1 Aceite de *Jatropha curcas* obtenido por expresión de las semillas.



Figura 4.2 Bagazo de semilla con cáscara después de la expresión.

Si observamos los datos de las tablas 14 y 16 se puede observar que las semillas más grandes son las que mayor porcentaje de aceite contienen, en este caso las semillas denominadas Marychuy y Julia que van del 13-15%.

Se peló una muestra de semillas (400 g), lo cual nos permitió observar que el 40% de la semilla es cáscara, y el 60% en peso restante son los cotiledones de la semilla en donde se encuentra el aceite. Al tratar de obtener el aceite directamente de la semilla pelada se tuvieron problemas con el pistón de la prensa, de la cual se atora su cilindro y no se obtiene una buena recuperación de aceite.

También se realizó la expresión de la semilla fresca lo que hizo que la prensa se atascara, la consistencia de la semilla húmeda da por resultado una pasta, el poco aceite que se tiene viene acompañado de muchas impurezas y mucho agua, como se muestra en la Figura 4.3.

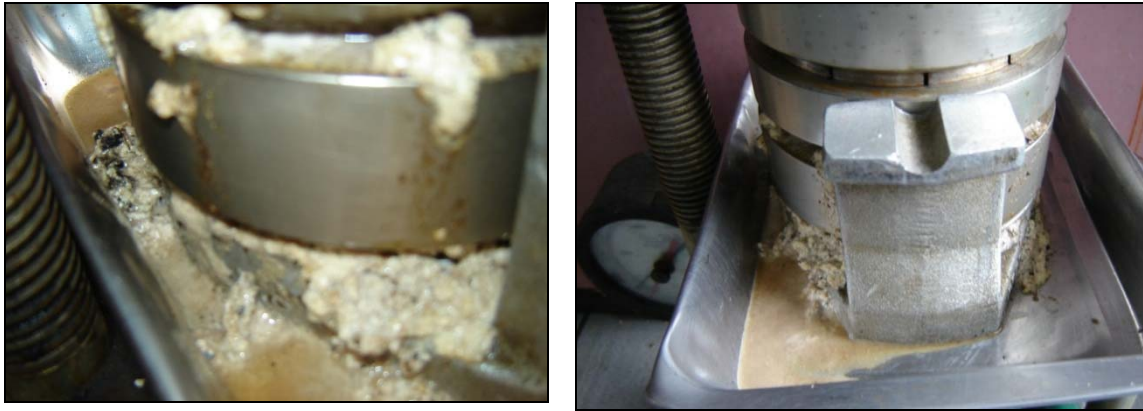


Figura 4.3 Expresión de semilla de *Jatropha curcas* fresca.

La figura 4.4 muestra el bagazo que se obtiene después de la expresión e la semilla, a este bagazo hay que determinar el grado de toxicidad para evaluar su posible uso como alimento de ganado.



Figura 4.4 Torta de bagazo después de exprimir la semilla.

4.3 RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DE YODO.

Al aceite extraído de cada muestra de semillas se le determinó el índice de yodo con la metodología que se describe en el anexo C.

Tabla 16. Determinación del Índice de yodo para las muestras de *Jatropha curcas*.

Muestra	Índice de Yodo
Julia 4	95.52
Marychuy 2	106.96
Perla 6	107.06
Sindi 3	98.14
Susie 5	102.58

Como se observa en la tabla 16, la semilla con mayor porcentaje de aceite, es Marychuy 2, tiene un valor de índice de yodo alto, lo cual es útil para la producción de bioplastificantes.

4.4 RESULTADOS DE LA TRANSESTERIFICACIÓN.

Durante el desarrollo experimental de las tres muestras que se hicieron seis muestras, las cuales permitieron determinar las condiciones más adecuadas, a continuación se muestra como ejemplo una de las muestras, todas se realizaron de la misma manera.

Condiciones:

- ✓ Volumen de aceite: 250 mL = 232.5g
- ✓ $\rho=0.930$ g/mL
- ✓ Volumen de metanol + 100% exceso = 100mL
- ✓ $M_{NaOH}= 2.32g$ (1%)
- ✓ Temperatura de reacción: 50-55°C
- ✓ Tiempo de reacción: 2h
- ✓ Tiempo de reposo para la separación: 11 julio- 13 julio

Tabla 17. Aceite de soya. Muestra 3.

Fase	Cantidad		Observaciones
Inferior	71.09 g	74.5 mL	Líquido color café. Glicerina impura.
Superior	194.72 g	223 mL	Líquido amarillo, con trazas de aceite sin reaccionar.

Observaciones:

- ✓ No fue necesario agregar ácido fosfórico ya que el pH ya era 7.
- ✓ El líquido presente como biodiesel tiene una capa de aceite sin reaccionar. Después de lavar el biodiesel, se obtienen 216.1 g equivalentes a 251.5 mL

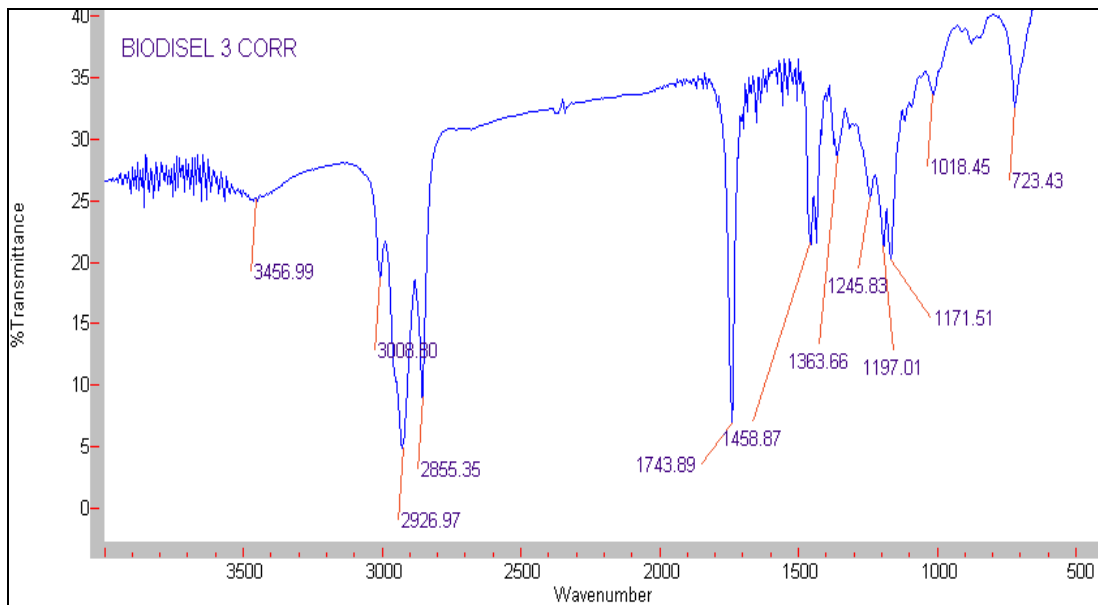


Figura 4.5 IR de biodiesel.

En la figura 4.5 muestra el producto de la reacción después de tres lavados, en el espectro de IR se observa lo siguiente:

*En la banda de 3456 cm^{-1} se muestra la presencia de $-\text{OH}$ de agua y glicerina.

*La banda localizada en 3008 cm^{-1} muestra la presencia del ^-OH de ácido carboxílico.

*Las bandas en 2926 cm^{-1} y 2855 cm^{-1} reflejan la presencia de los grupos alifáticos metilos-metilenos los cuales se confirman en las bandas en 1363 cm^{-1} y 1458 cm^{-1} , además la presencia de los grupos metilenos se observa en 723 cm^{-1} .

*La presencia del grupo carbonilo se muestra en la banda 1743 cm^{-1} , así como los enlaces C-O de los grupos ester se muestran en 1245 cm^{-1} lo cual se confirma en la banda que se encuentra en 1018 cm^{-1} .

*La presencia de las bandas de 1171 cm^{-1} y 1197 cm^{-1} corresponden a los enlaces C-O de los alcoholes primarios y secundarios respectivamente.

*La bandas presentes en 1547 cm^{-1} y 878 cm^{-1} en muestran la presencia de nitrógeno el cuál proviene de aminoácidos del aceite.

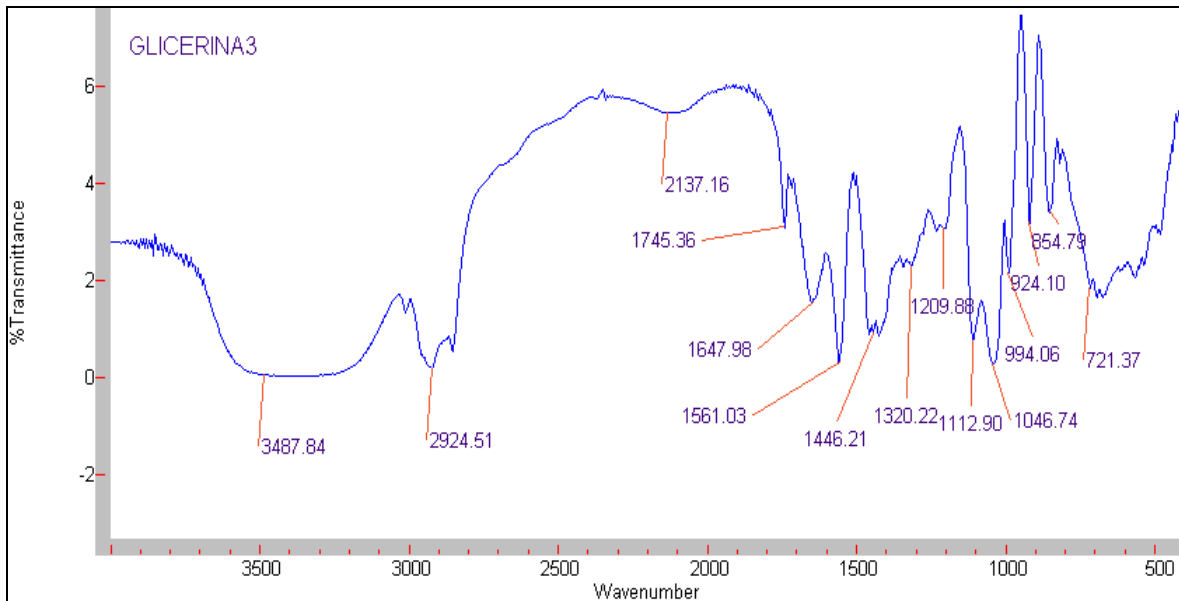


Figura 4.6 IR Glicerina.

En la figura 4.6 se observa la glicerina obtenida en la reacción, el espectro de IR, muestra lo siguiente:

*La banda ubicada en 3487 cm^{-1} se observan grupos $-\text{OH}$ correspondiente a agua o glicerina.

*En la banda ubicada en 2924 cm^{-1} se muestran los grupos alifáticos metilos-metilenos los cuales se confirman en las bandas en 1320 cm^{-1} y 1446 cm^{-1} y finalmente los metilenos se muestran en la banda de 721 cm^{-1} .

*La banda de 2137 cm^{-1} es del CO_2 presente en el aire.

*Las bandas de 1745 cm^{-1} y 1647 cm^{-1} que pertenecen a grupos carbonilo, son mucho menores en este caso, ya que observamos como la presencia de éste grupo es mayor en la figura 8 que corresponde a biodiesel.

*La banda de 1561 cm^{-1} muestra la presencia de nitrógeno, ésta se confirma en la banda 854 cm^{-1} .

*La banda del 1209cm^{-1} muestra la presencia del grupo éter, la cual se confirma en la banda de 994cm^{-1} .

*En las bandas de 1046 cm^{-1} y 1112 cm^{-1} , se presentan alcoholes primarios y secundarios respectivamente.

Al llevar a cabo la metodología para la transesterificación de acuerdo a las variantes que se plantean en la metodología y realizando para cada una de las reacciones el mismo análisis de IR, se muestran en la tabla 18 algunas observaciones.

Tabla 18. Observaciones de la reacción de transesterificación para determinar las condiciones óptimas, con aceite de canola.

Temperatura °C	NaOH %p/p	Exceso %	Observaciones
25	5	50	Saponificó
30	3.5	50	Se hace una emulsión al lavar
45	1	80	En el lavado no hay saponificación ni emulsiones.
50	1	80	El número de lavadas es mayor que para 55 °C.
50	1	100	El número de lavados es el mismo que para el 80% de exceso. Por lo que no tiene caso gastar más metanol si el resultado es el mismo.
55	1	80	El número de lavadas es un uno menos que con 50 °C y el exceso de metanol es suficiente por que con el 100% ya no mejora.

En la tabla 19 se muestra el rendimiento de en la producción de biodiesel con aceite de soya.

Tabla 19. Porcentaje de rendimiento en las muestras de soya para producción de biodiesel.

Muestra	aceite [g]	Biodiesel [g]	%
1	186	25.9	13.9
2	232.5	184.8	79.5
3	235.5	216.1	91.8
4	235.5	183.3	77.9
5	235.5	214.4	91.0
6	235.5	209.2	88.8

Finalmente, después de analizar los espectros de IR y los rendimientos se establecen las condiciones para producir biodiesel, se establece que lo más conveniente es agregar un 80% exceso de metanol y 1% de catalizador ya que en este caso no se presenta jabón y las trazas de aceite sin reaccionar se eliminan realizando tres lavados, la temperatura más adecuada para llevar a cabo la reacción es de 50-55 °C, es importante mencionar que no puede ser mayor ya que la temperatura de ebullición del metanol es una limitante.

Mediante la cromatografía de gases se pudieron determinar algunos ésteres presentes en las muestras, ver figura 4.7.

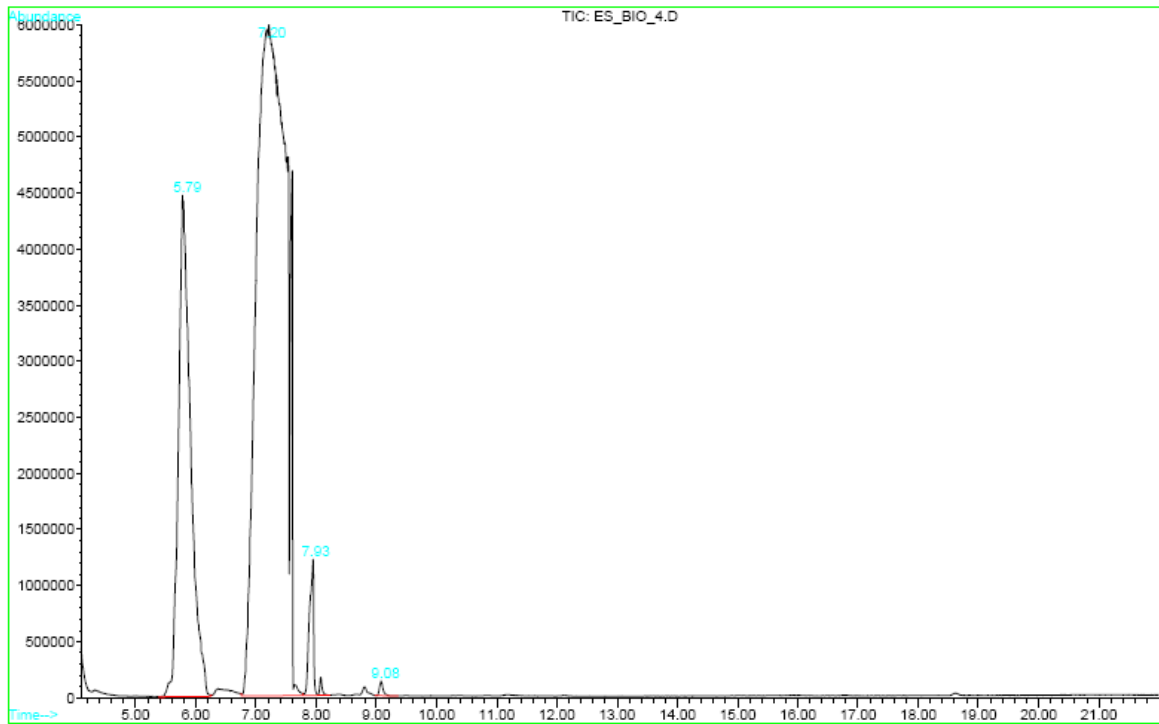


Figura 4.7 Cromatograma de biodiesel.

En el pico con un tiempo de retención de 5.7 minutos se muestra el palmitato de metilo, lo cual se confirma en el espectro de masas del éster en la figura 4.8.

Library Searched : C:\DATABASE\WILEY275.L
Quality : 99
ID : Hexadecanoic acid, methyl ester (CAS) \$\$ Methyl palmitate \$\$ Methyl hexadecanoate \$\$ Methyl n-hexadecanoate \$\$ Uniphat A60 \$\$ Methol

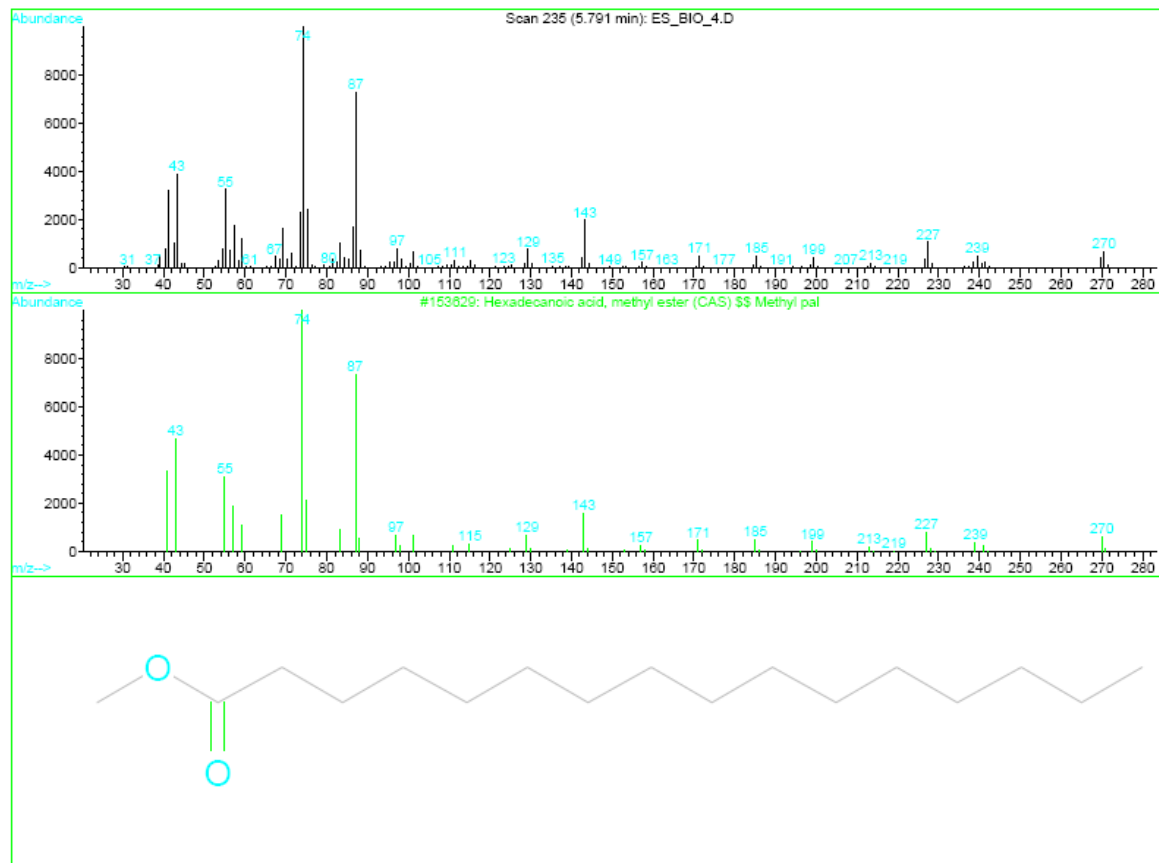


Figura 4.8 Espectro de masas que corresponde al palmitato de metilo.

En el pico con un tiempo de retención de 7.5 min muestra el oleato de metilo que se observa en el espectro de masas del ácido en la figura 4.9.

Library Searched : C:\DATABASE\WILEY275.L
 Quality : 98
 ID : 9-Octadecenoic acid (Z)-, methyl ester (CAS) \$\$ Methyl oleate \$\$ Methyl cis-9-octadecenoate \$\$ Oleic acid methyl ester \$\$ Oleic acid

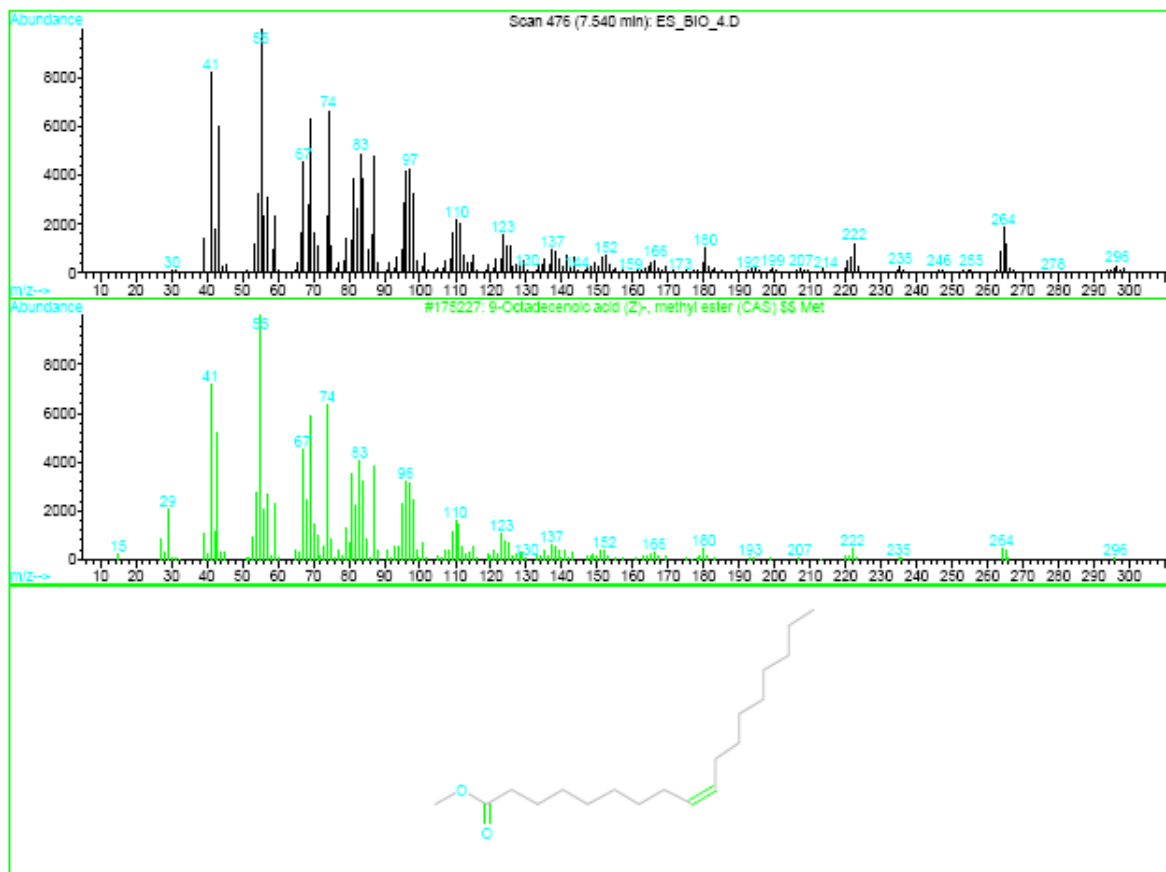


Figura 4.9 Espectro de masas que corresponde al oleato de metilo.

En el pico con un tiempo de retención de 7.20 min muestra el linoleato de metilo que se observa en el espectro de masas del ácido en la figura 4.10.

Library Searched : C:\DATABASE\WILEY275.L
Quality : 99
ID : 10,13-Octadecadienoic acid, methyl ester (CAS)

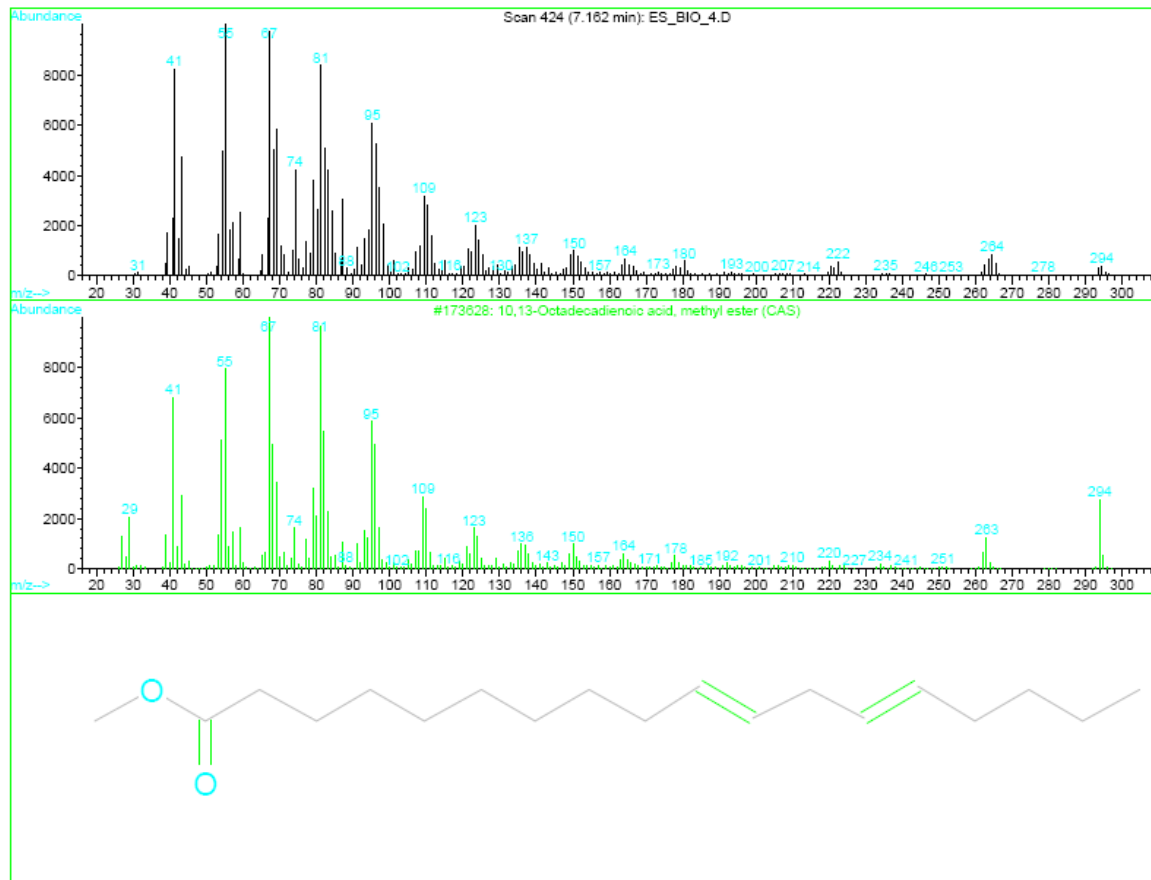


Figura 4.10 Espectro de masas que corresponde al linoleato de metilo.

En el pico con un tiempo de retención de 7.20 min muestra el estearato de metilo que se observa en el espectro de masas del ácido en la figura 4.11.

Library Searched : C:\DATABASE\WILEY275.L
 Quality : 93
 ID : Eicosanoic acid, methyl ester (CAS) \$\$ Arachidic acid methyl ester \$\$ Methyl arachate \$\$
 Methyl eicosanoate \$\$ METHYL N-EICOSANOATE

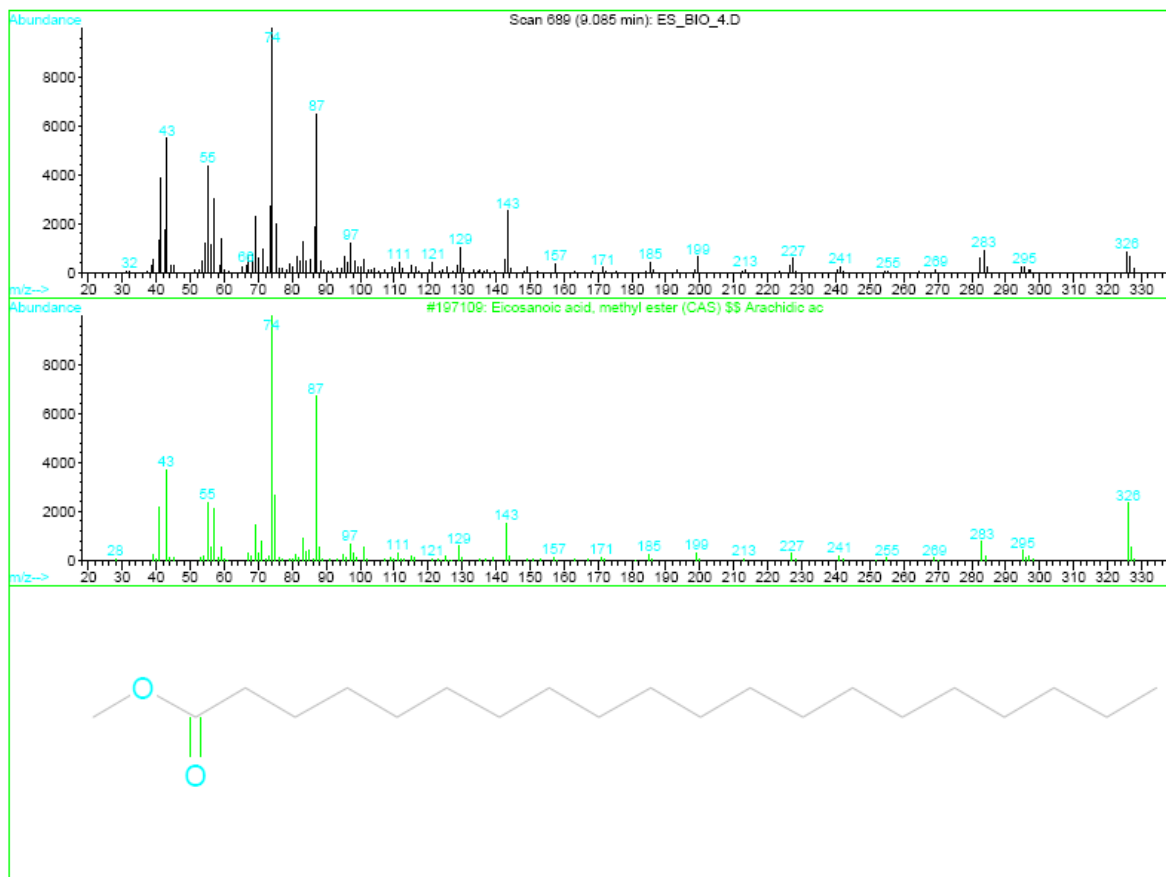


Figura 4.11 Espectro de masas que corresponde al estearato de metilo.

En el pico con un tiempo de retención de 7.93 min muestra el monoleato de metilo que se observa en el espectro de masas del ácido en la figura 4.12.

Library Searched : C:\DATABASE\WILEY275.L
Quality : 25
ID : 9-Octadecenoic acid (Z)-, 2,3-dihydroxypropyl ester (CAS) \$\$ 1-Monoolein \$\$ Aldo MO \$\$ Aldo HMO \$\$ Olein, 1-mono- \$\$ 1-Oleylglycerol

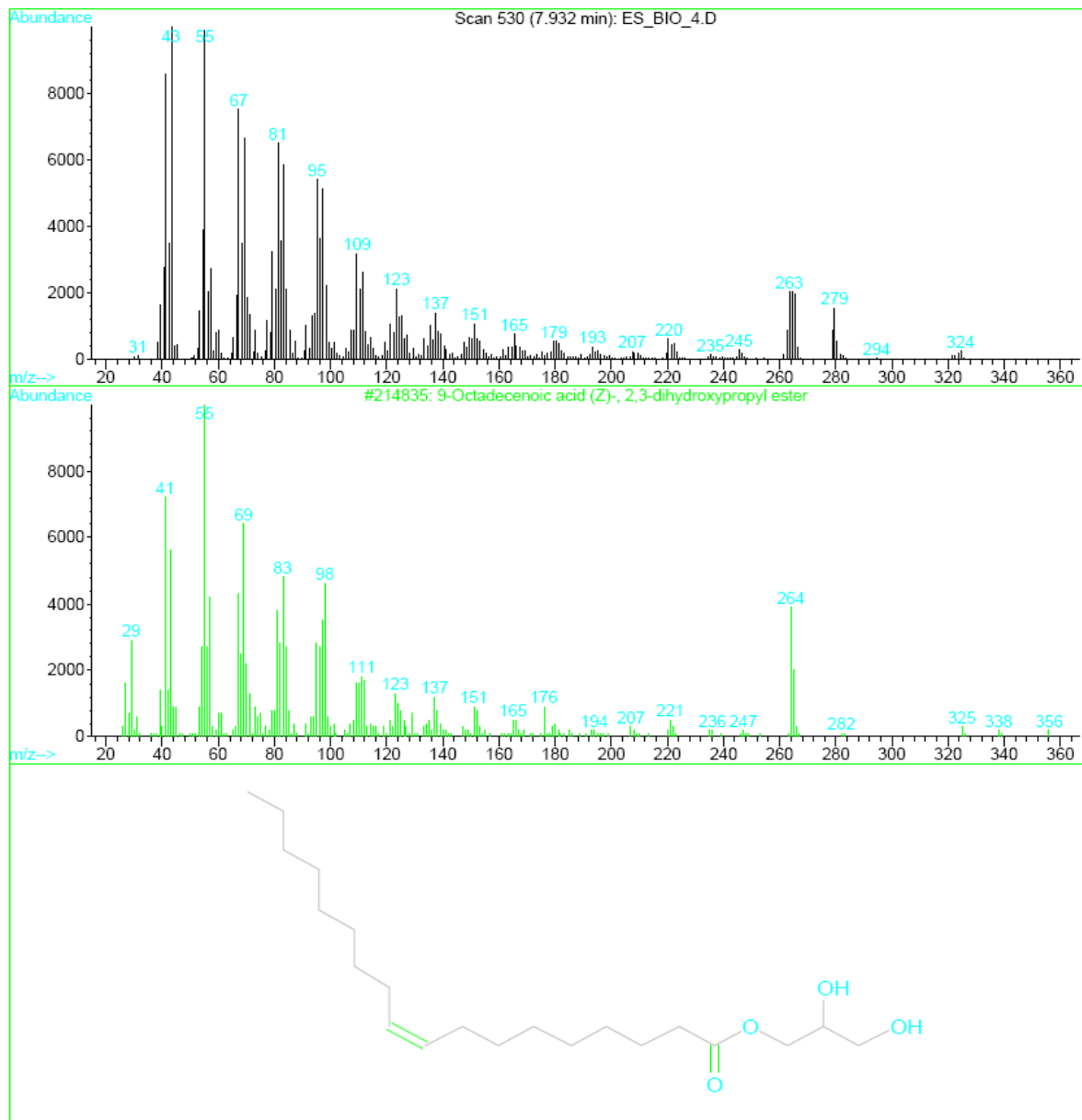


Figura 4.12 Espectro de masas que corresponde al monoleato de metilo.

Además de otros ácidos de 18 carbonos que no son identificados por la base de datos del cromatógrafo con el que se cuenta.

En los cromatogramas de gases que se realizaron a la glicerina de las diferentes muestras se observa la presencia de un pico en un tiempo de retención 10.860 minutos el cual al ser comparado con el espectro de masas correspondiente a la figura 4.13 se observa que es la glicerina que es subproducto del proceso de obtención de biodiesel.

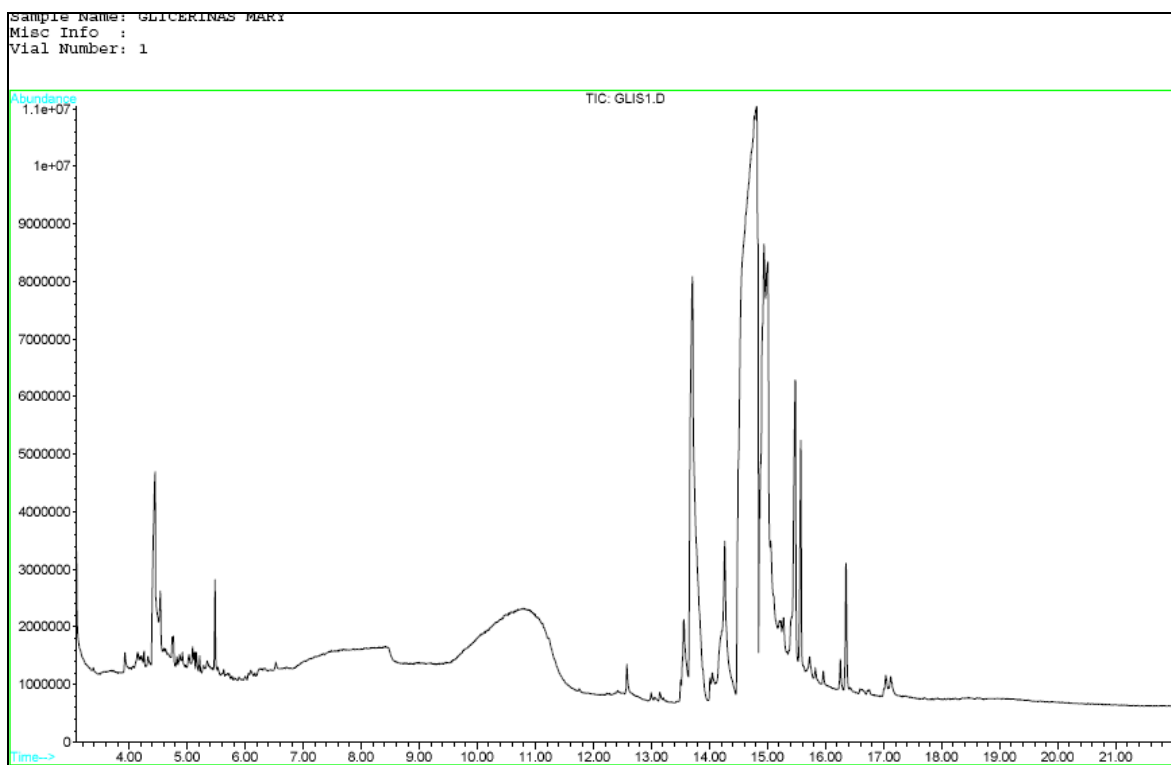


Figura 4.13 Cromatograma de la glicerina.

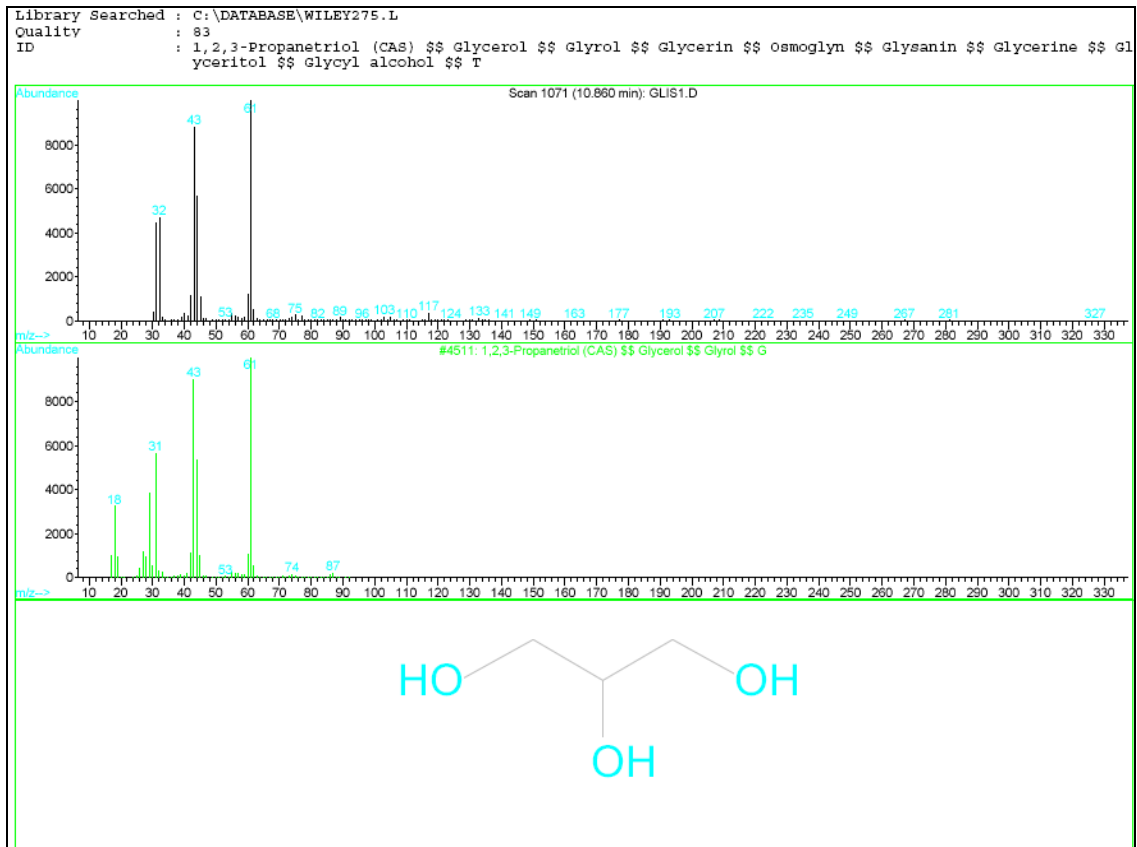


Figura 4.14 Espectro de masas de la glicerina.

4.5 RESULTADOS DE LA CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE *Jatropha curcas*.

4.5.1 CURVA DE CALIBRACIÓN

La curva de calibración hecha con las áreas totales de las concentraciones que se establecieron en la tabla 11 se utiliza para poder determinar la concentración de las muestras de metilésteres que se toman a diferentes tiempos para la cinética de la reacción. La curva de calibración se muestra en la figura 4.15.

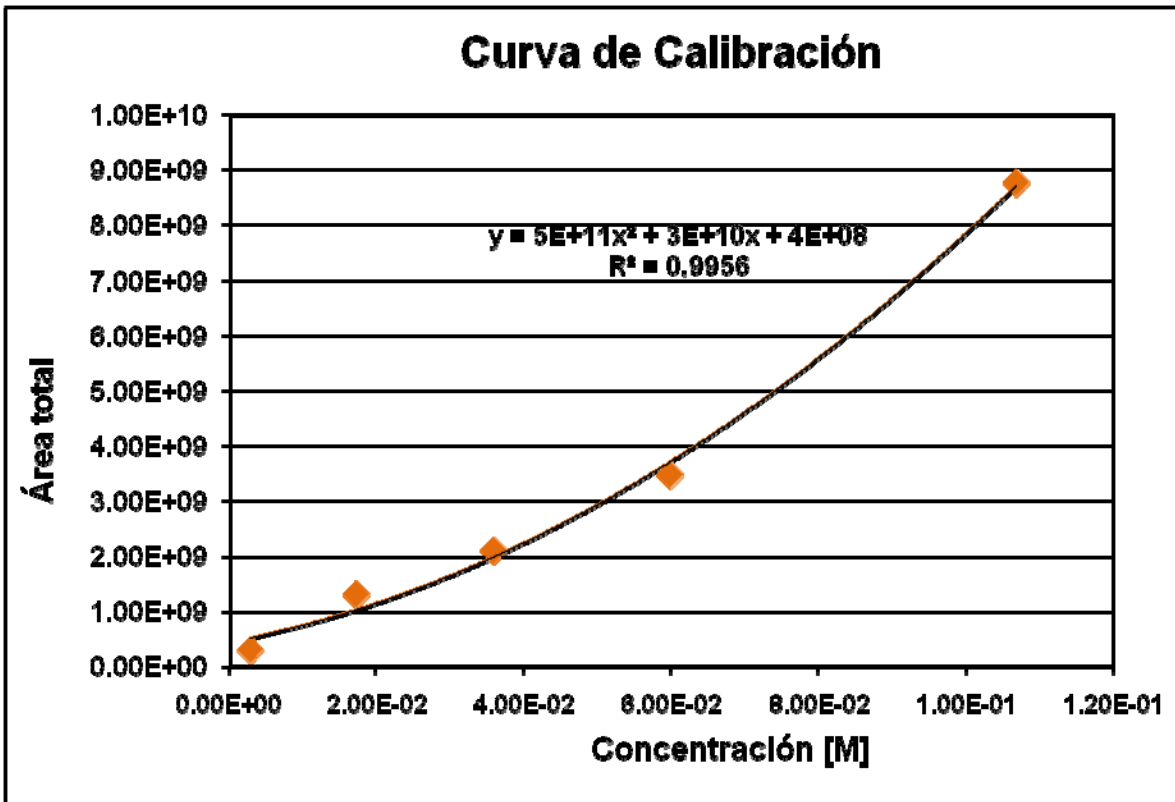


Figura 4.15 Curva de calibración con biodiesel producido con aceite de *Jatropha curcas*.

4.5.2 ESTABLECIMIENTO DE LA CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DE ACEITE DE *Jatropha curcas*.

A partir de las concentraciones calculadas mediante la curva de calibración y el tiempo al que se tomó cada muestra se realizan las siguientes gráficas de Concentración vs tiempo para determinar el orden de reacción al que corresponde la transesterificación.

Como consideración se tiene que la cantidad de metanol esta en exceso por lo que la cinética de la reacción solo dependerá de la concentración de los triglicéridos del aceite como reactivo (C_A).

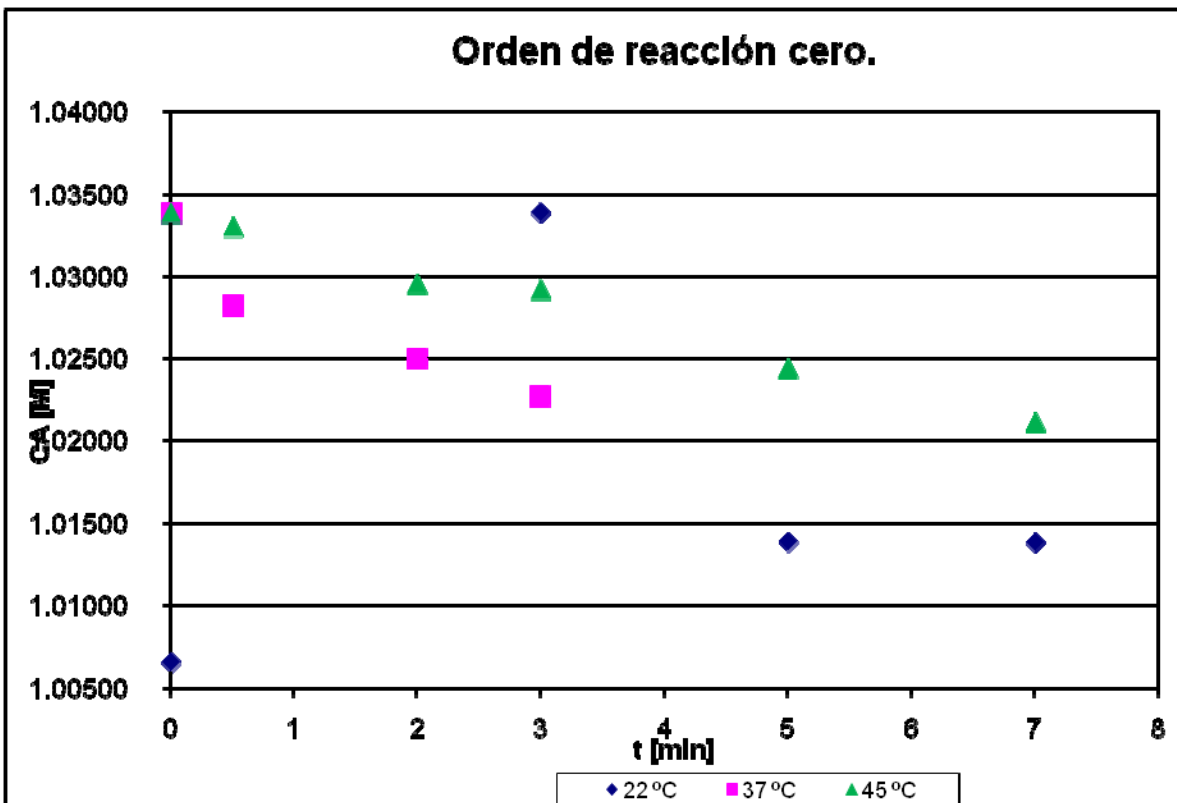


Figura 4.16 Orden de reacción cero.

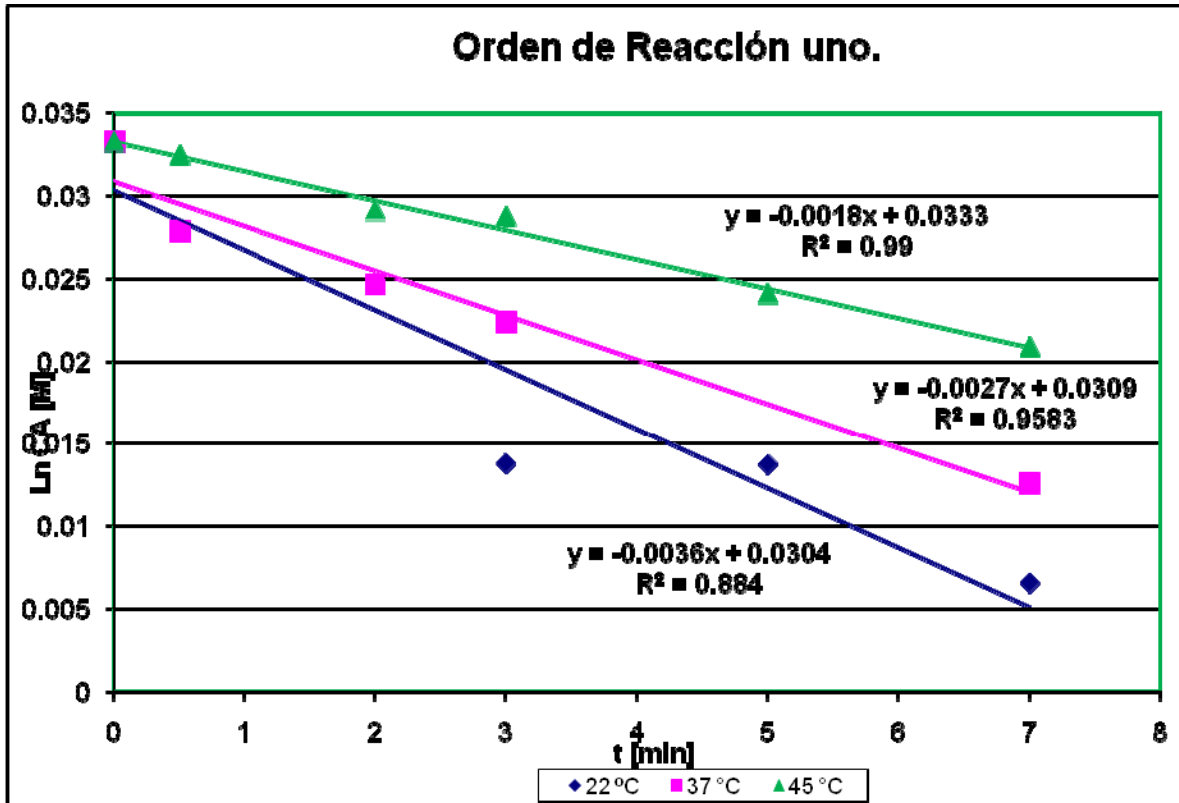


Figura 4.17 Orden de reacción uno.

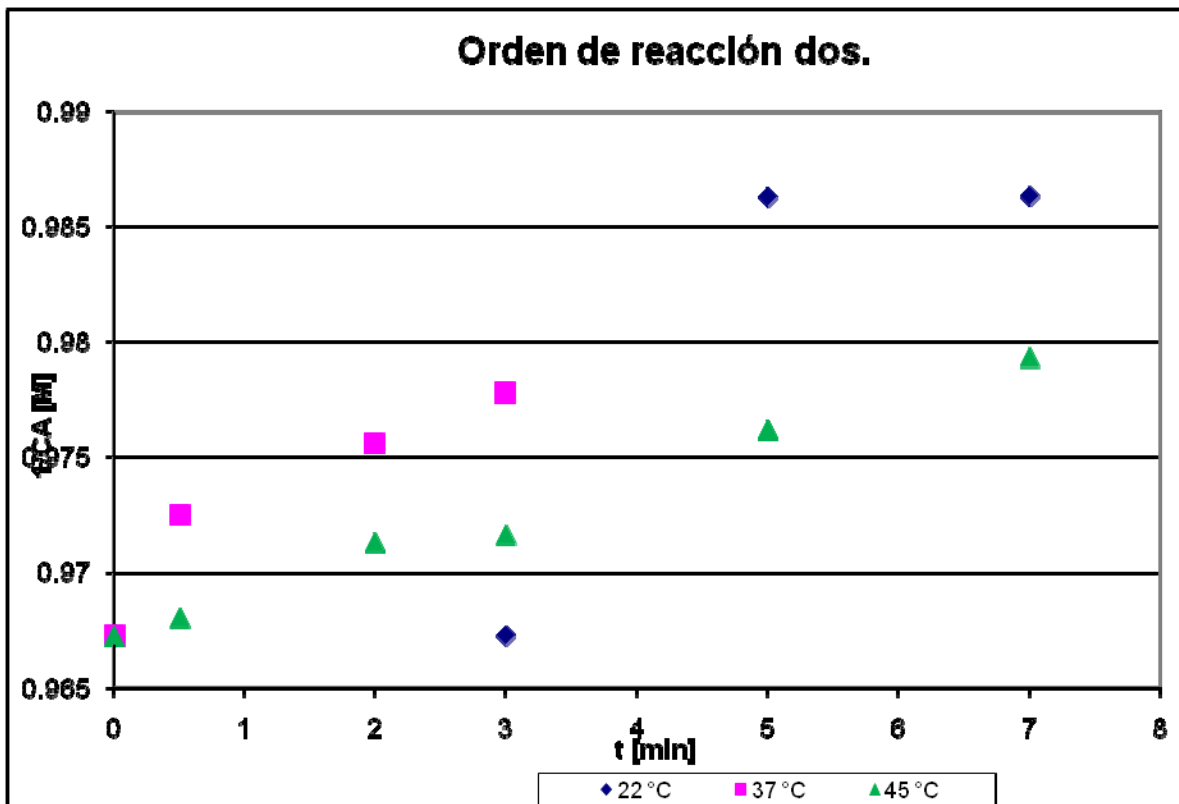


Figura 4.18 Orden de reacción dos.

Tabla 20 Valores de k para cada temperatura.

Temperatura [K]	k [1/min]
295.15	-0.0038
310.15	-0.0027
318.15	-0.0018

En la tabla 20 se observa como la constante de reacción varia conforme aumenta la temperatura. La temperatura sugerida de reacción se ve limitada por el punto de ebullición del metanol (65 °C), sin embargo, ya en estudios anteriores se habían determinado 50-55 °C como una temperatura con alta conversión, por lo que invertir en más energía para la reacción no atribuiría un aumento considerable en la conversión.

La gráfica donde los datos experimentales mejor se ajusta es la de orden 1, $\ln C$ vs t para cada temperatura, los valores de k de reacción de puede ver en la tabla 20.

La cinética de la reacción se representa mediante la siguiente ecuación, la cual indica que la que la variación de la concentración de triglicéridos (C_A) en función del tiempo es directamente proporcional a la desaparición del reactivo (C_A).

$$\frac{dC_A}{dt} = -kC_A$$

Finalmente se graficó $1/T$ vs $\ln k$ para cada una de las condiciones de T, con el propósito de obtener el valor de las constante de Arrhenius y la energía de activación.

Tabla 21. Valores a graficar para obtener la constante de Arrhenius.

1/T [1/K]	Ink
0,00338811	-5,572754212
0,00322425	-5,914503506
0,00314317	-6,319968614

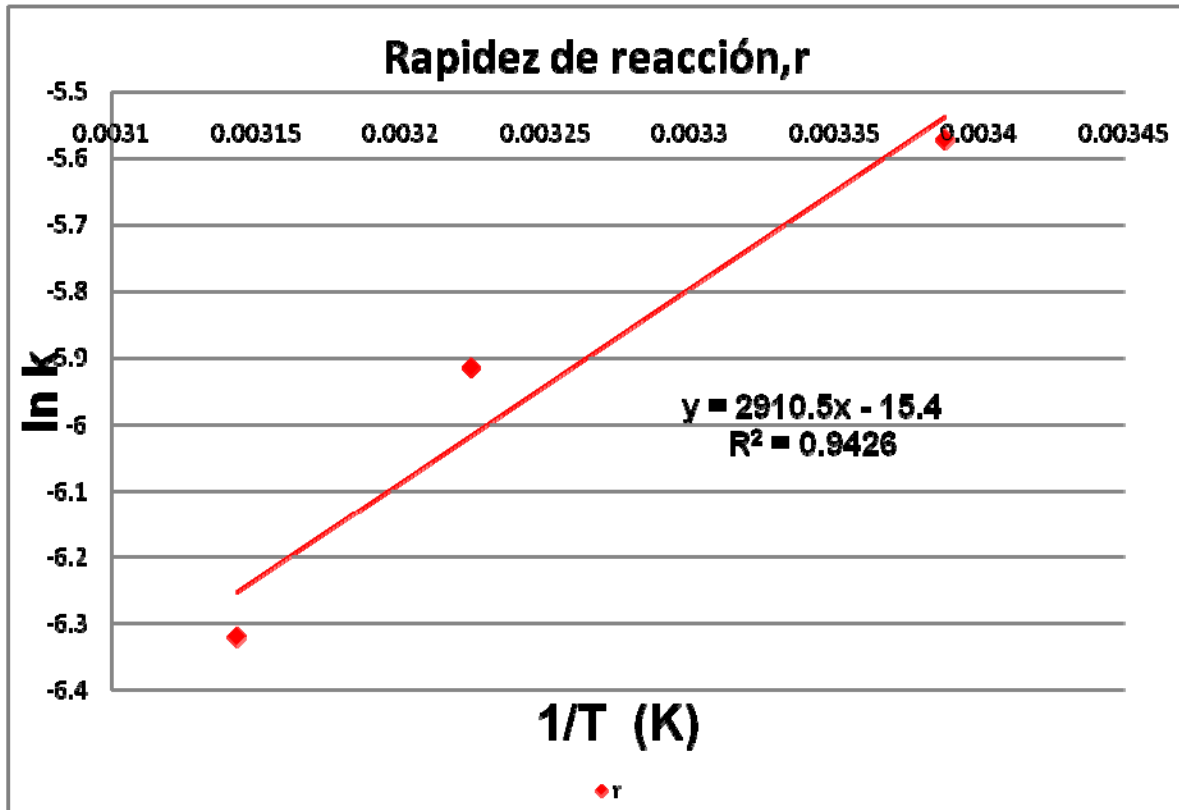


Figura 4.19 Constante de rapidez, r.

Los valores de las constantes de Arrhenius que se ajustaron se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Valores de las constantes de reacción

A =	4.9×10^6 [1/min]
$\Delta E =$	24.2 [kJ]

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

En el capítulo anterior se mostraron los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo experimental, los cuales se analizaron de acuerdo a los objetivos planteados al inicio del proyecto. A continuación se desglosan una serie de conclusiones hechas de acuerdo a los resultados y el análisis de los mismos.

- Las pruebas para determinar las condiciones a las que se trabajaría la transesterificación se llevaron a cabo con aceite de canola. La experimentación permitió determinar que con un 1 %p/p de catalizador, 80% de exceso de metanol de acuerdo al estequiométrico y realizando la reacción a una temperatura entre 50-55 °C el rendimiento de la reacción era de un 91%, lo cual es un rendimiento alto. El número de lavados es de tres con un 50% v/v de agua, ya que así se le eliminan los residuos al biodiesel, un cuarto lavado no aumenta la calidad y por ello no tendría sentido hacerlo. La temperatura de la reacción es relativamente baja lo cual implica que no es necesaria una gran cantidad de energía para llevar a cabo la reacción y finalmente el exceso de metanol es suficiente con un 80% ya que un exceso mayor no significa un aumento en el rendimiento. La cantidad de catalizador es la adecuada para evitar la saponificación o la formación de emulsiones durante la producción.
- Posteriormente, se realizó el estudio de la cinética de la reacción para lo cual la expresión del aceite de las semillas de *Jatropha curcas* fue una parte fundamental ya que este aceite es la materia prima de todo el proceso. La expresión de la semilla permitió identificar cual de las muestras trabajadas fue la que más aceite tenía, que resultó ser

Marychuy 2, además la expresión fue la manera de extraer aceite y la técnica permitió dejar prácticamente sin aceite a la semilla.

- Una vez obtenido el aceite y con los demás reactivos (metanol y sosa como catalizador) se llevó a cabo la reacción de transesterificación sacando muestras durante un periodo de tiempo de 20 minutos, con éstos datos tomados a diferentes temperaturas (22 °C, 37 °C y 45 °C) se realizó el análisis que permitió determinar que la cinética de la reacción es de orden 1. La reacción depende de la concentración del aceite más no de la concentración del metanol, ya que al estar en exceso prácticamente permanece constante.
- Las constantes de la cinética de la reacción de transesterificación son $A = 4,9 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$ lo cual nos indica una alta posibilidad de llevarse a cabo la reacción ya que éste parámetro muestra la probabilidad de colisión entre las moléculas de nuestros reactivos y la $E_a = 24.2 \text{ kJ}$, con lo cual comprobamos como se observó en la experimentación con la canola que la reacción es endotérmica y que la energía necesaria para llevar a cabo la reacción es baja.
- Finalmente, se realizó una reacción de transesterificación utilizando el etanol como reactivo en lugar del metanol y mediante el espectro de IR se observó que los productos son muy similares, por lo que sí es posible producir biodiesel con un alcohol que puede producirse a partir de fuentes renovables como el bioetanol.

BIBLIOGRAFÍA

1. Tippens Paul E. *"Física: Conceptos y aplicaciones"*. 7ª edición. McGraw-Hill Interamericana. México, 2007.
2. Secretaría de energía (SENER) (en línea);2009, (3 de febrero del 2009). Disponible en: World Wide Web: <http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=46>
3. Secretaría de energía (SENER) (en línea);2009, (13 de marzo del 2009). Disponible en: World Wide Web: http://www.energia.gob.mx/webSener/res/168/Cap1_SecEner2003.pdf *"Prospectiva del mercado de petróleo crudo 2004-2013."*
4. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (en línea), (16 de marzo del 2009) Disponible en World Wide Web: <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp?t=mpob02&c=3179>
5. Secretaría de energía [SENER][en línea];2009, (16 de marzo del 2009). Disponible en: World Wide Web: http://www.sener.gob.mx/webSener/res/PE_y_DT/pub/Prospectiva%20Petroleo%20Crudo%20Finas.pdf *"Prospectiva de mercado del petróleo crudo 2007-2016"*
6. Secretaría de energía (SENER) (2007) *"Balance Nacional De Energía 2007"* México, 2007.
7. Ovando M. I., et al. (2007). *"Producción de Biodiesel en El Soconusco, Chiapas a partir de Higuerrilla (ricinus Sp.) y Piñón (Jatropha Sp.)"*.Universidad Autónoma de Chiapas, 2edn, México, pp. 5-9.
8. Ramírez L.H. (14.05.2007). *"Granos básicos y combustibles para el campo. In: Retos para el desarrollo de biocombustibles en México"*. México, pp.1-16.
9. Joshua and Kaia Tickell. *"From the Fryer to the Fuel Tank: The complete guide to using vegetable oil as an alternative fuel"*, Tickell Energy Consulting, Sarasota Florida, 1999 pp. 23.

10. American Society for testing Materials (ASTM). "*Specification for Biodiesel (B100)*". D6751-08. 2008.
11. Gutiérrez, G. F. (2006). Tesis: "*Optimización de la producción de biodiesel en la planta piloto del ITESM a partir de aceite vegetal usado*". ITESM, Monterrey N.L, México. Maestra en ciencias: Especialidad en ingeniería energética. Pp. 10-13.
12. Ali Y., Hanna M.A. (1994). "*Alternative diesel fuels from vegetable oils*". In: ELSEVIER, Bioresource Technology 50 (1994) 153-163.
13. Quigley R. (2007). "*Biodiesel: The good, the bad...and aditives*". In: Biofuels international (2007) 70-72.
14. Castillo A. O.(2001). Tesis: "*Extracción y refinación de aceites vegetales comestibles; control de mermas en el proceso de refinación*". UNAM, FES Cuautitlan, Estado de México. Licenciatura de Ingeniería en alimentos. pp.10-12.
15. Dela Vega Lozano J.A., "*Jatropha curcas L.*" Consultor independiente. Agro-Proyectos y Agro-Energía. México. pp. 3,4,11,12,20.
16. Trindade, S. C., (2006). "*Potenciales y viabilidad del uso de Bioetanol y biodiesel para el transporte en México*". Task 8: Synthesis and recommendations. SENER, México. pp.487-534
17. Secretaría de energía (SENER) (en línea); 2009, (18 de marzo del 2009). Disponible en: World Wide Web: http://www.energia.gob.mx/webSener/res/168/Cap1_SecEner2003.pdf "*Potenciales y viabilidad de uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México*"
18. Martínez H.J. (2007). "*Experiencia con Jatropha curcas L. en México*". Instituto Politécnico Nacional. Pp. 15-17, 35-38.

Anexo A
Estándares de biodiesel. Norma ASTM D 6757 de 2008

En este anexo se muestran los estándares marcados por la norma ASTM D6757-08 que da los parámetros generales para que el biodiesel pueda ser utilizado como combustible.

Especificación para Biodiesel (100). ASTM D 6751-08			
Propiedad	Método ASTM	Limites	Unidades
Calcio y magnesio combinado	EN 14538	5 max	ppm
Punto de flama	D 93	93 min	°C
<i>Contol de Alcoholes</i>			
Contenido de metanol	EN1411D	0,2 max	% volumen
Punto de flama	D 93	130 min	°C
<i>Agua y sedimentos</i>			
Viscosidad cinemática	D 445	1,9-6	mm ² /s
Ceniza sulfatada	D 874	0,02 max	% masa
<i>Sulfuros</i>			
S 15 grado	D 5453	0,0015 max (15)	%masa (ppm)
S 500 grados	D 5453	0,05 max(500)	%masa (ppm)
Corrosión al Cobre	D 130	Nº3 max	
Cetano	D 613	47 min	
Punto de nube	D 2500	report	°C
Carbono residual del total de la muestra	D 4530 *	0,05 max(500)	% masa
Numero de ácido	D 664	0,5 max	% masa
Glicerina libre	D 6584	0,20 max	% masa
Glicerina total	D 6584	0,24 max	% masa
Contenido de fosfatos	D 4951	0,001 max	% masa
Destilacion, T90 AET	D 1160	360 max	°C
Sodio/ potasio, combinado	EN 14538	5 max	ppm
Estabilidad a la oxidación	EN 14112	3 min	h
Filtración en frío	Anexo de D 6751	360 max	s
Para temperatura menor a -12 °C	Anexo de D 6751	200 max	s

ANEXO B

Cálculo de las hectáreas para producir una mezcla B5

Se muestra el cálculo de las hectáreas necesarias para producir el biodiesel útil para una mezcla B5, que satisfaga las necesidades del sector transporte.

Datos

De acuerdo a una producción de 351,750 mbd de diesel
 [fuente: Sistema de Información Energética. PEMEX.]

Se plantea utilizar un 0.5 % v/v de biodiesel como aditivo para incrementar la lubricidad o producir un B5 (mezcla diesel 95% biodiesel 5%), para lo cual es necesario lo siguiente:

Diesel: 5.6×10^{10} L

30%pp aceite en la semilla

5 t/Ha

Conversión de la reacción de transesterificación: 91%

Gravedad específica: 0.94

	Aditivo	B5
Biodisel necesario	2.8×10^8 L	2.8×10^9 L
Hectáreas necesarias	1.9×10^5	1.9×10^6

$$2.8 \times 10^9 L_{\text{biodiesel}} \left(\frac{1,000 L_{\text{aceite}}}{910 L_{\text{biodiesel}}} \right) = 3,076,923,077 L_{\text{aceite}}$$

$$3,076,923,077 L_{\text{aceite}} \left(\frac{0.94 \text{ kg}_{\text{aceite}}}{1 L_{\text{aceite}}} \right) = 2,892,307,692 \text{ kg}_{\text{aceite}}$$

$$2,892,307,692kg_{aceite} \left(\frac{1t_{aceite}}{1000kg} \right) \left(\frac{1t_{semilla}}{0.300t_{aceite}} \right) = 9,641,026Ton_{semilla}$$

$$9,641,026Ton_{semilla} \left(\frac{1Ha}{5t_{semilla}} \right) = 1,928,205.1Ha$$

En caso de que la cantidad de aceite sea menor la cantidad de hectáreas incrementaría. En este trabajo se encontró una semilla con un rendimiento del 15% por lo que en este caso las hectáreas necesarias serían el doble.

Hectáreas requeridas para la producción de biodiesel.

% Aceite	Aditivo	B5
10%	6.3×10^4	6.3×10^5
15%	3.8×10^5	3.8×10^6
30%	1.9×10^5	1.9×10^6

ANEXO C

Índice de Yodo

En este anexo se presenta la metodología que se siguió para determinar el índice de yodo en el aceite obtenido en cada una de las muestras trabajadas de *Jatropha curcas*.

Determinación de Índice de Yodo.

Reactivos	Material
<ul style="list-style-type: none">• Yoduro de potasio: solución de 100 g/L, exento de yodatos o de yodo libre.• Engrudo de almidón (Mezclar 5 g de almidón soluble con 30 mL de agua, añadir la mezcla a 1000 mL de agua en ebullición, hervir durante 3 minutos y dejar enfriar.)• Solución volumétrica patrón de tiosulfato de sodio (0,1 mol/L de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, valorada como máximo 7 días antes de su uso).• Disolvente, preparado mezclando volúmenes iguales de ciclohexano y ácido	<p>Navecillas de vidrio, apropiadas para la muestra problema y que puedan introducirse en los matraces.</p> <p>Matraces Erlenmeyer de 500 mL de capacidad con boca esmerilada, provistos de sus correspondientes tapones de vidrio y perfectamente secos.</p>

acético.

- Reactivo de Wijs, que contenga monoclóruo de yodo en ácido acético. Se utilizará reactivo de Wijs comercializado (el reactivo contiene 9 g de ICl_3 + 9 g de I_2 en ácido acético)

Preparación de la muestra:

Secar la muestra homogeneizada con sulfato de sodio y filtrarla.

51 - 100	0,20 g
101 - 150	0,13 g

Pesar la muestra problema con precisión de 0,1 mg en una navcilla cápsula de pesadas de vidrio.

Introducir la muestra problema en un matraz de 500 mL. Añadir 20 L del disolvente para disolver la grasa. Agregar 25 mL del reactivo de Wijs, tapar el matraz, agitar el contenido y colocar el matraz al abrigo de la luz. No deberá utilizarse la boca para pipetear el reactivo de Wijs.

Preparar del mismo modo un ensayo en blanco con el disolvente y el reactivo, pero sin la muestra problema.

Para las muestras con un índice de yodo inferior a 150, mantener los matraces en la oscuridad durante 1 hora.

Una vez transcurrido el tiempo correspondiente, agregar a cada uno de los matraces 20 ml de solución de yoduro potásico y 150 mL de agua.

Valorar con la disolución de tiosulfato de sodio hasta que haya desaparecido casi totalmente el color amarillo producido por el yodo. Añadir unas gotas de engrudo de almidón y continuar la valoración hasta el momento preciso en que desaparezca el color azul después de una agitación muy intensa. (Se permite la determinación potenciométrica del punto final).

Efectuar 3 determinaciones de la muestra problema.

Expresión de Resultados.

El índice de yodo se expresa del siguiente modo:

$$IY = \frac{12.69C(V_1 - V_2)}{P}$$

Donde:

- C : valor numérico de la concentración exacta, expresada en moles por litro, de la solución volumétrica patrón de tiosulfato sódico utilizada
- V_1 : valor numérico del volumen, expresado en mililitros, de la solución de tiosulfato sódico utilizada para el ensayo en blanco.
- V_2 : valor numérico del volumen, expresado en mililitros, de la solución de tiosulfato sódico utilizada para la determinación.
- p: valor numérico del peso, expresado en gramos, de la muestra problema.

Se tomará como resultado la media aritmética de las dos determinaciones, siempre que se cumpla el requisito establecido con respecto a la repetibilidad.

ANEXO D

Condiciones de reacción de transesterificación

En este anexo se presentan los experimentos que se realizaron con aceite de canola para determinar el rango de las condiciones a las que se trabajaría la reacción.

Metodología aplicada

Se realizaron lotes de 250 mL de aceite de canola y 20 %v/v fijos las variaciones se muestran en la siguiente tabla.

Temperatura °C	NaOH %pp	Exceso %	Observaciones
25	5	50	Saponificó
30	3.5	50	Se hace una emulsión al lavar
45	1	80	En el lavado no hay saponificación ni emulsiones.
50	1	80	El número de lavadas es mayor que para 55 °C.
50	1	100	El número de lavados es el mismo que para el 80% de exceso. Por lo que no tiene caso gastar más metanol si el resultado es el mismo.
55	1	80	El número de lavadas es un uno menos que con 50°C y el exceso de metanol es suficiente por que con el 100% ya no mejora.

Con estas pruebas se establece que el biodiesel para la curva de calibración se realizará entre 50-55 °C con 1% de catalizador y se calculará la estequiometría para determinar la cantidad de Metanol, agregando un 80% de exceso y tres lavados para evitar trazas de catalizador.

1.- Se prepara una solución homogénea de 20 %v/v de metanol + 80% v/v de metanol y un 1%p/p de NaOH

2.- Se colocan 250mL de aceite de canola y se calienta hasta 45 °C.

3.- Se agrega la solución al aceite mineral, y se mantiene el calentamiento y agitación constante a una temperatura de 50-55 °C durante 2h.

4.- Se coloca la mezcla en un embudo de separación y se deja reposar durante 24 h min.

5.- Se separan las dos fases formadas. La fase superior es el biodiesel y la inferior la glicerina correspondiente al proceso.

6.- El biodiesel separado, se lava con un 50% v/v de agua en tres ocasiones:

Se coloca el agua y se agita vigorosamente durante 5 minutos, colocar en un embudo de separación. Se separa la fase acuosa y se realiza el procedimiento tres veces. Si la reacción no fue completa se formara una emulsión estable.

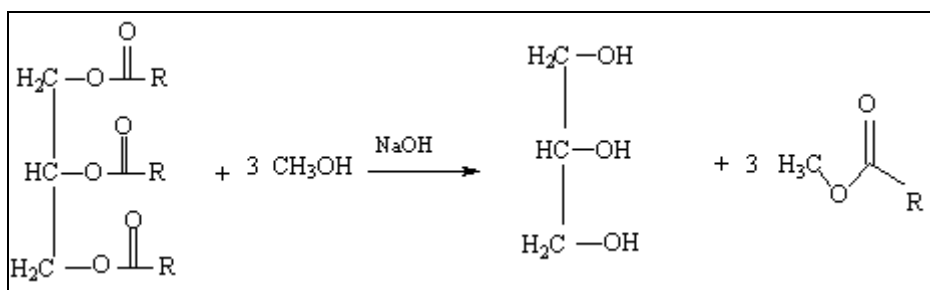
7.- Se neutraliza el biodiesel con ácido fosfórico para evitar residuos de sosa.

ANEXO E

Concentraciones para la curva de calibración

En este anexo se muestra la memoria de cálculo para determinar la concentración máxima de biodiesel que estará presente en la reacción y poder determinar la concentración de las soluciones que se utilizarán para elaborar la curva de calibración.

Reacción de transesterificación:



Cálculos:

$$30.0 \text{ mL}_{\text{aceite}} \left(0.95 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \right)_{\text{aceite}} = 28.5 \text{ g}_{\text{aceite}}$$

$$28.5 \text{ g} \left(\frac{\text{mol}}{842 \text{ g}} \right)_{\text{aceite}} = 0.03385 \text{ mol}_{\text{aceite}}$$

Si por cada mol de aceite son necesarias 3 moles de metanol y además se agrega en un 80% entonces:

$$0.03385 \text{ mol} * 3 * 1.8 = 0.183 \text{ moles}_{\text{MetOH}}$$

$$0.183 \text{ moles} \left(\frac{32 \text{ g}}{\text{mol}} \right) = 5.85 \text{ g}_{\text{MetOH}}$$

Las cantidades que quedan en la mezcla final son:

La cantidad de biodiesel es 3 veces la cantidad de aceite, sin embargo, consideramos el peso molecular de 296 del ácido oléico ya que es el que predomina en nuestra mezcla.

$$0.03385 \text{ moles} * 3 * 296 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 30.0588 \text{ g}_{\text{biodiesel}}$$

Las moles de glicerina son las mismas que la cantidad de aceite inicial, por lo tanto:

$$0.03385 \text{ moles} * 56 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 1.8656 \text{ g}_{\text{glicerina}}$$

El metanol residual es la diferencia entre la cantidad inicial y la que reacciona estequimétricamente:

$$0.183 \text{ moles}_{\text{MetOH}} - 3(0.03385) \text{ moles}_{\text{MetOH}} = 0.08145 \text{ moles}_{\text{MetOH}} \text{ residual}$$

$$0.08145 \text{ moles}_{\text{MetOH}} \text{ residual} * 32 \frac{\text{g}}{\text{mL}} = 2.6064 \text{ g}_{\text{MetOH}} \text{ residual}$$

La masa total de la mezcla es:

$$30.0588 \text{ g}_{\text{biodiesel}} + 1.8656 \text{ g}_{\text{glicerina}} + 2.6064 \text{ g}_{\text{MetOH}} \text{ residual} = 34.5308 \text{ g}_{\text{mezcla}}$$

El porcentaje en masa de Biodiesel en la mezcla es:

$$\left(\frac{30.0588 \text{ g}_{\text{biodiesel}}}{34.5308 \text{ g}_{\text{mezcla}}} \right) * 100 = 87.04\%$$

En partes por millón (ppm):

$$87.04 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \left(\frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \right) \frac{1000 \text{ mL}}{1 \text{ L}} = 870,492.43 \text{ ppm}$$

Esta es la concentración máxima que existiría en la mezcla con una conversión del 100% por lo que será la concentración máxima de nuestras concentraciones en la curva de calibración.

ANEXO F

Biodiesel producido con etanol

Se realizó la producción de biodiesel utilizando como alcohol el etanol.

Como se observa en el siguiente cromatograma, las señales que se presentan entre el biodiesel producido con metanol es el mismo que el producido con etanol, esto es un indicador que en caso de ser necesario se podría producir biodiesel con bioetanol y así fomentar el uso de los biocombustibles.

