



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

## FACULTAD DE QUÍMICA

### OBTENCIÓN DE ACEITE DE SEMILLA DE CHIA (*Salvia hispanica*) Y SU TRANSFORMACIÓN A BIOCOMBUSTIBLE.

### TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
QUÍMICA DE ALIMENTOS

PRESENTA:  
ADRIANA VERA SORIANO



MÉXICO, D. F.

2014



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: Lucio Antonio Reyes Chumacero
VOCAL:	Profesor: Rosa Luz Cornejo Rojas
SECRETARIO:	Profesor: Lino Joel Reyes Trejo
1er SUPLENTE:	Profesor: José Guillermo de Jesús Aguilar Osorio
2do SUPLENTE:	Profesor: Carlos Damián Zea

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA**

---

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE QUÍMICA UNAM.  
LABORATORIOS L-208 DE QUÍMICA ORGÁNICA Y L-111 DE FISICOQUÍMICA.

LABORATORIO DE PRODUCTOS NATRALES, ÁREA DE QUÍMICA,  
DEPARTAMENTO DE PREPARATORIA AGRÍCOLA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE  
CHAPINGO.

### **ASESOR DEL TEMA:**

\_\_\_\_\_  
Dr. Lino Joel Reyes Trejo

### **SUPERVISOR TÉCNICO:**

\_\_\_\_\_  
Dr. Benito Reyes Trejo

### **SUSTENTANTE:**

\_\_\_\_\_  
Adriana Vera Soriano



*Todos los triunfos nacen cuando nos  
atrevernos a comenzar.*

*- Eugene Ware*



# ÍNDICE

---

<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	IV
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	V
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	2
<b>3. HIPÓTESIS</b> .....	2
<b>4. MARCO TEÓRICO</b> .....	3
4.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL.....	3
4.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL.....	6
4.3 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO.....	9
4.4 FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA.....	11
4.4.1 Tipos de fuentes renovables de energía.....	11
4.4.2 Biocombustibles.....	12
4.4.2.1 Biocombustibles de primera generación.....	13
4.4.2.2 Biocombustibles de segunda generación.....	14
4.4.2.3 Biocombustibles de tercera generación.....	14
4.4.3 Tipos de Biocombustible.....	14
4.4.4 Biodiesel, una alternativa al diésel.....	16
4.4.4.1 Definición de biodiesel.....	16
4.4.4.2 Uso de aceites vegetales en motores diésel.....	16
4.4.4.3 Materias primas para la obtención de biodiesel.....	17
4.4.4.4 Ventajas y desventajas del uso de biodiesel.....	18
4.4.5 Reacción de transesterificación.....	20

4.4.5.1	Catálisis básica .....	21
4.4.5.2	Catálisis ácida .....	22
4.4.5.3	Catálisis enzimática.....	22
4.4.6	Parámetros de calidad del biodiesel.....	23
4.4.6.1	Viscosidad.....	24
4.4.6.2	Densidad.....	24
4.4.6.3	Índice de yodo.....	25
4.4.6.4	Índice de acidez.....	25
4.4.6.5	Entalpia de combustión.....	26
4.4.6.6	Punto de inflamación.....	26
4.4.6.7	Índice de cetano.....	26
4.4.6.8	Punto de Fluidez.....	27
4.4.6.9	Punto de Turbidez.....	27
4.5	SEMILLAS DE CHIA ( <i>Salvia hispanica</i> ).....	28
4.5.1	Situación Cultural y de Producción.....	28
4.5.2	Descripción de la planta y semilla.....	30
4.5.3	Composición proximal de la semilla.....	32
4.5.4	Antioxidantes de la semilla de <i>Salvia hispanica</i> .....	33
<b>5.</b>	<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>35</b>
5.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS.....	35
5.2	EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA SEMILLA DE CHIA.....	36
5.3	OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE CHIA.....	37
5.4	PRUEBAS DE CALIDAD DEL ACEITE Y EL BIODIESEL.....	39
5.5	CARACTERISACIÓN DEL BAGAZO DE CHIA.....	44

5.6	MODELADO MOLECULAR PARA LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN.....	47
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>48</b>
6.1	CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE <i>S. hiapanica</i> .....	48
6.2	EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE <i>S. hispanica</i> .....	50
6.3	CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE <i>S. hispanica</i> .....	52
6.4	OBTENCIÓN DE BIODIESEL.....	55
6.5	CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL.....	58
6.6	MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL DE ACEITE DE CHIA.....	65
6.7	CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE LA SEMILLA DE <i>S.</i> <i>hispanica</i> .....	68
6.8	ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE CHIA.....	72
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>75</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>83</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Ventajas e Inconvenientes en el uso del Biodiesel.....	18
Tabla 2. Algunas especificaciones para biodiesel ASTM D6751-01 (B100).....	23
Tabla 3. Algunas especificaciones para biodiesel Norma Europea EN 14214.....	23
Tabla 4. Comparación Nutricional de la Chia con los Cereales. ....	32
Tabla 5. Cantidades Relativas de Ácidos Grasos en Aceites Vegetales.....	33
Tabla 6. Caracterización física de la semilla <i>Salvia hispanica</i> .....	49
Tabla 7. Extracción de Aceite (Soxhlet y maceración) de la semilla <i>Salvia hispanica</i> .....	50
Tabla 8. Pruebas de calidad para el análisis químico del Aceite.....	52
Tabla 9. Propiedades de aceites vegetales y diésel de Petróleo .....	54
Tabla 10. Obtención de Biodiesel del Aceite de semilla <i>Salvia hispanica</i> .....	57
Tabla 11. Pruebas de calidad para el análisis químico del Biodiesel .....	58
Tabla 12. Perfiles de esteres metílicos de ácidos grasos encontrados en aceites destinados a la producción de Biodiesel. ....	64
Tabla 13. Especificaciones para mezclas de biodiesel de aceite de Chia con diésel PEMEX. ....	67
Tabla 14. Composición Química de la semilla de Chia .....	68
Tabla 15. Extracción Metanólica de la semilla <i>S. hispanica</i> desengrasada .....	69
Tabla 16. Rendimiento en particiones para el extracto Metanólico del bagazo de <i>Salvia hispanica</i> obtenido por maceración.....	69



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Comparación Oferta y Producción Mundial de Petróleo en el periodo del 2008 - 2012.....	4
Figura 2. Demanda Mundial de Petróleo por sector 2009 .....	5
Figura 3. Contribucion por categoria en gases de efecto inverdadero. Comparacion entre años 1990 -2010 .....	7
Figura 4. Contribución de GEI por sector durante el 2010 .....	7
Figura 5. Emisiones de GEI en la categoría de energía durante el 2010 .....	8
Figura 6. Oferta de Petróleo en México.....	9
Figura 7. Contribución de las fuentes de Energía en la Producción en 2012.....	10
Figura 8. Relación Porcentual de Producción de energía de fuentes renovables en el 2012 .....	10
Figura 9. Reacción de Transesterificación .....	20
Figura 10. Ilustración del Códice Florentino, escrito originalmente 1575 ~ 1577 o 1578 – 1580 representa un artesano azteca y sus vasos de lacado artesanales con aceite de Chia. ....	28
Figura 11. Cultivo de Chia y dispersión. El área sombreada representa la zona tradicional de cultivo de chia desde el centro de México hasta Guatemala. ....	29
Figura 12. Producción anual de <i>Salvia hispanica</i> .....	29
Figura 13. Clasificación botánica <i>Salvia hispanica</i> .....	30
Figura 14. Morfología de la Chia. a) Aspecto general de la planta; b) Clusas Incluidas en el Caliz; c) Clusas Oscuras y Claras; d) Mixocarpia. Clusas hidratadas con formación de Mucilago; e) Exomorfología de la Semilla .....	31
Figura 15. Estructura Química de algunos compuestos antioxidantes presentes en la semilla de chia. a) Miricetina b) Ácido Clorogénico c) Kaempferol d) Quercetina e) Ácido Cinámico f) Ácido Cafeico.....	34

Figura 16. Procedimiento de obtención de Aceite y su transformación a biodiesel.....	38
Figura 17. Bomba Calorimétrica empleada para las determinaciones de Entalpia de Combustión. a) Componentes b) Inserción de muestra .....	41
Figura 18. Determinación de Aminoácidos Péptidos y Ciclopéptidos en el Bagazo de <i>Salvia hiapanica</i> .....	46
Figura 19. Clasificación de una muestra de <i>S. hispanica</i> . a) Semilla Negra b) Semilla Blanca c) Semilla sin cascara d) Materia extraña e) Semilla <i>Amarantus hybridus</i> .....	48
Figura 20. Composición porcentual de los constituyentes en el lote de semilla de <i>Salvia hispanica</i> .....	49
Figura 21. Porcentaje de aceite en algunas especies del género <i>Salvia</i> . [*] Extracción promedio de aceite de chia; [**] Rendimiento Practico.....	51
Figura 22. Rendimiento en producción de Aceite de Semilla de Chia y otras especies.....	51
Figura 23. Apariencia de la Reacción de Transesterificación.....	55
Figura 24. Seguimiento de la reacción de Transesterificación para aceite de Chia obtenida por maceración. Eluyente Hex/ AcOEt/ AcOH [9: 1: 0.1] revelada con yodo. a) Placa a 30min de reacción, b) Placa a las 3 horas de reacción.....	56
Figura 25. Apariencia física del Biodiesel obtenido por el aceite de Soxhlet y su glicerina una vez finalizada la reacción .....	56
Figura 26. Variación de la viscosidad después de la reacción de transesterificación.....	60
Figura 27. Variación de la densidad después de la reacción de transesterificación.....	61
Figura 28. Entalpía de Combustión de Aceite y Biodiesel de Chia [*] Se empleó Aceite Maravilla como materia prima .....	61
Figura 29. Acidez de combustión para Biodiesel de Aceite Comercial, Biodiesel de aceite de Chia y diésel PEMEX.....	62

Figura 30. Relación Porcentual de Esteres Metílicos obtenidos de la transesterificación del Aceite de Chia. Cromatograma en Anexo 4. ....	63
Figura 31. Variación de la viscosidad de las mezclas y de los compuestos puros durante cambios de temperatura .....	65
Figura 32. Variación de la densidad relativa de las mezclas y de los compuestos puros durante cambios de temperatura .....	66
Figura 33. Entalpía de Combustión de Mezclas [Biodiesel - Diésel PEMEX] .....	67
Figura 34. Cromatoplaquea con ninhidrina del extracto metanolico y sus particiones .....	69
Figura 35. Reacción de Ninhidrina y el Grupo amino terminal de péptidos .....	70
Figura 36. Cromatoplaquea del extracto metanolico y los aminoácidos de referencia después de ser revelada con una solución de Ninhidrina .....	70
Figura 37. Cromatoplaquea del extracto metanolico y sus particiones después de ser revelada con una solución de O-tolidina .....	71
Figura 38. Estructura de Monoglicéridos correspondientes a los ácidos grasos más abundantes en el aceite destinado a la reacción de Transesterificación.....	72
Figura 39. Interacción del metóxido con los ácidos grasos durante la reacción de Transesterificación. R= -C <sub>18</sub> H <sub>37</sub> ; -C <sub>18</sub> H <sub>35</sub> ; -C <sub>18</sub> H <sub>33</sub> .....	72
Figura 40. Geometrías optimizadas de los puntos estacionarias en la reacción de transesterificación con metanol y el monoglicerido del ácido oleico en medio básico. a) Monoglicerido del Ácido Oleico; b) TS1; c) Intermediario Tetraédrico; d) TS2 .....	73
Figura 41. Mapa de potencial electrostático de los puntos estacionarios en la reacción de transesterificación con metanol y el monoglicerido del ácido oleico en medio básico. a) Monoglicerido del Ácido Oleico; b) TS1; c) Intermediario Tetraédrico; d) TS2 .....	74

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Los combustibles son uno de los principales agentes en el desarrollo de las civilizaciones, hoy en día la principal fuente de energía a nivel mundial proviene de combustibles fósiles, los cuales son recursos no renovables y su insuficiencia ha desembocado en la búsqueda de fuentes alternativas de energía renovable y sustentable.

Actualmente existe un gran número de estudios sobre el aprovechamiento de la bioenergía en sus distintas formas con el propósito de encontrar alternativas al uso de recursos energéticos fósiles. Esta energía se puede aprovechar para la generación de electricidad o la producción de biocombustibles líquidos para su empleo en vehículos automotores, con el propósito de reducir las emisiones de gases efecto invernadero producidas por combustibles fósiles ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , etc.). Por esta razón la producción de biodiesel ha adquirido fuerza en los últimos años, el cual es obtenido fundamentalmente de aceite vegetal no comestible o de desecho.

Los aceites vegetales tienen en su composición química ésteres de ácidos grasos, los cuales son una materia prima idónea para efectuar la reacción de transesterificación. Esta reacción produce una mezcla de esteres metílicos de ácidos grasos con características similares al diésel petroquímico, pero sus emisiones generadas de  $\text{CO}_2$  y de otros gases son inferiores a las producidas por los combustibles fósiles.

La producción de biodiesel está limitada por el origen del aceite empleado, pues la inversión económica en la producción varía en función la materia prima. Entre los tipos de biomasa útiles en la producción de energías renovables se encuentran las semillas oleaginosas, tales como: maíz, canola, soya y cártamo entre otros, actualmente se prefiere el uso de materias primas de cultivos no comestibles, por ejemplo: *jatropha curcas*, higuera, ricino, etc.

La semilla de chia ha tenido importantes aplicaciones a lo largo del tiempo. Como ingrediente culinario y aplicaciones medicinales, pero también su aceite ha sido empleado en la manufactura de cosméticos barnices y pinturas. En la actualidad su aceite se consume en la dieta alimentaria debido a su alto contenido de ácidos grasos poliinsaturados (principalmente  $\omega$ -3 y  $\omega$ -6).

Considerando las altas concentraciones de ácidos grasos insaturados en el aceite de la semilla de *Salvia hispanica* (chia), el biodiesel que se obtendría a partir de este aceite presentaría varios parámetros de calidad dentro de los límites permitidos por las normas internacionales. Lo anterior significa que el aceite de chia podría representar una fuente alternativa para la producción de biodiesel.

La presente investigación, tiene como finalidad investigar el uso del aceite de semilla de *S. hispanica* como una fuente alternativa para la producción de biodiesel mediante una reacción de transesterificación en medio alcalino.

## 2. OBJETIVOS

---

### OBJETIVOS GENERALES

- Proponer al aceite de la semilla de *Salvia hispanica* (*chia*) de origen nacional, como una fuente alternativa para la obtención de Biodiesel y analizar la calidad de ambos aceites.

### OBJETIVOS PARTICULARES

- Extraer el aceite de las semillas de *S. hispanica*.
- Transformar el aceite a biodiesel mediante una transesterificación alcalina.
- Efectuar pruebas de calidad al aceite y del biodiesel obtenido: Densidad, viscosidad, índice de acidez, índice de yodo y calor de combustión.
- Detectar compuestos de interés biológico en el bagazo de *S. hispanica* como la presencia de péptidos y ciclopeptidos.

## 3. HIPÓTESIS

---

La semilla de *S. hispanica* representará una alternativa viable para la obtención de aceite con características apropiadas para ser utilizado como materia prima en la producción de biodiesel con la calidad adecuada según estándares internacionales.

## 4. MARCO TEÓRICO

---

### 4.1 SITUACIÓN ENERGÉTICA MUNDIAL

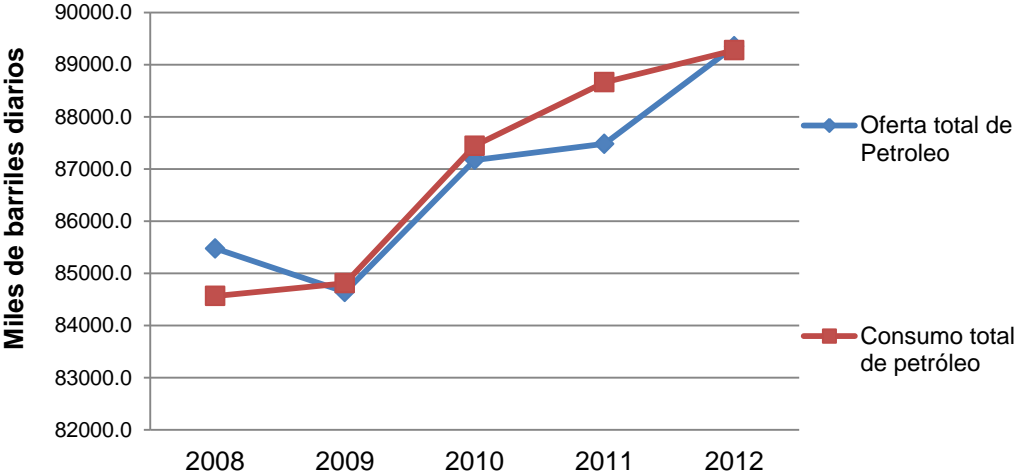
La energía suele definirse de modo muy general como “la capacidad de un cuerpo para realizar un trabajo”. Bajo esta definición se entiende la importancia que tiene la producción de energía y por ende el abastecimiento de los recursos para generarla. De manera práctica, las fuentes de energía se dividen en dos tipos: Energías no renovables y energías renovables. La primera representada por fuentes de origen fósil y la segunda por fuentes que se renuevan indefinidamente, tal es el caso de las energías hidráulica, solar y eólica, o de fuentes producidas de forma sostenible, como la biomasa (FAO, 2008).

El trastorno en los estilos de vida que ocurrió con el paso de una economía de subsistencia a otra basada en la industria, dio como resultado el aumento en la demanda energética, esto sin considerar que la población mundial se incrementó con el paso de los años (FAO, 2008). La Organización de las Naciones Unidas estima actualmente una población mundial aproximada de 7,000 millones de habitantes y espera que para el 2050 se supere esta cifra y se alcancen los 9,000 millones (Centro de Noticias ONU, 2013); en consecuencia, se vislumbra un escenario en el que la demanda energética pudiera incrementarse de manera desorbitada (Gómez, 2010).

El principal motivo por el que los hidrocarburos de procedencia fósil han adquirido vital importancia, se debe a que dan origen a toda una serie de bienes y servicios que no solo afectan a la industria, si no que forman parte también del entorno cotidiano en la vida moderna. Tan solo en el año 2010 el consumo de energía que proviene de combustibles fósiles, según lo señalado por el Banco Mundial, fue del 80.9%, haciendo evidente la incómoda situación que se ha generado con tal dependencia energética (The World Bank, 2013).

Preocupan ya las consecuencias que dicha dependencia energética genera en el suministro exigido por la población en general. La probabilidad del éxito en el

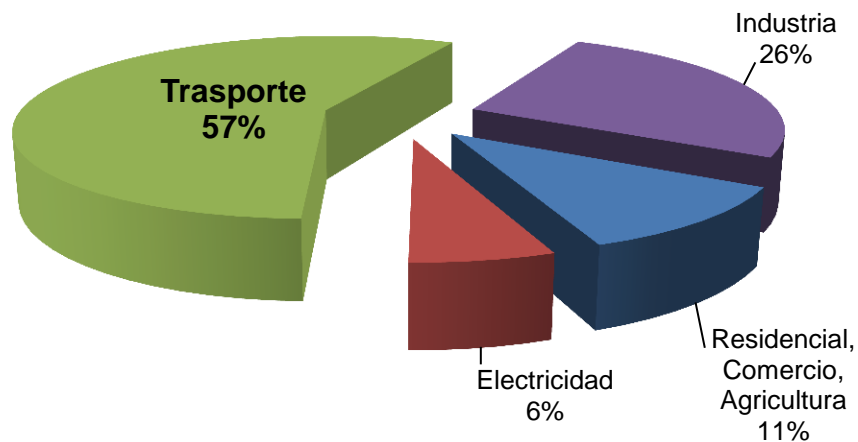
abasto petrolero podría llegar a verse gravemente afectada durante las próximas décadas, pues tan solo en los últimos 4 años el consumo de petróleo ha sido superior o equivalente al producido (Figura 1), situación que obliga a preguntarse durante cuánto tiempo se podrá disponer del petróleo. Se espera que la oferta de petróleo y otros hidrocarburos sean suficientes como para asegurar el abastecimiento de por lo menos los próximos 25 años (U.S. Energy Information Administration, 2013).



**Figura 1.** Comparación Oferta y Producción Mundial de Petróleo en el periodo del 2008 - 2012

Hasta ahora, los países afectados por el déficit en producción de petróleo serán aquellos con economía dependiente de éste, ya sean consumidores o productores. Pero el sector más afectado será el sector de transporte, pues a este se destina prácticamente el 57% de la producción mundial de petróleo (Figura 2).





**Figura 2.** Demanda Mundial de Petróleo por sector 2009

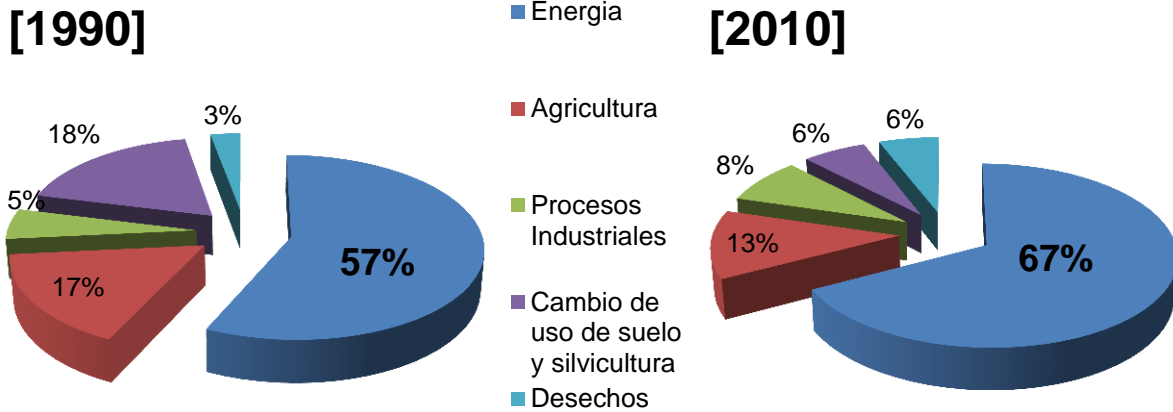
En el año 2009, el sector de transporte representó cerca del 19% del consumo final de energía a nivel mundial y casi una cuarta parte de las emisiones producidas de CO<sub>2</sub> y se espera que para el 2030 se tenga un incremento aproximado del 50% tanto en consumo de energía como en emisiones de CO<sub>2</sub> (Garcia & Manzini, 2012).

## 4.2 PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Durante la segunda mitad del siglo XX, se ha visto un rápido desarrollo en la toma de conciencia de la importancia y complejidad de la problemática ambiental (Craig, *et al.*, 2007). Pero no fue hasta finales de siglo, en la “Cumbre de Rio” en 1992, que el interés de ir en busca de métodos que mitigaran los efectos producidos por la explotación de los recursos naturales se volvió relevante, buscando promover un desarrollo sustentable en armonía con la naturaleza (Pacto aceptado por 154 países). En el mismo año, se estableció la “Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático” (CMNUCC), en la que se reconoce que los cambios en el clima de la Tierra y sus efectos adversos son una preocupación para la humanidad. En el Protocolo de Kioto (1997) diversos países, entre ellos México, se comprometieron a reducir sus emisiones de gases que producen el fenómeno llamado efecto invernadero, en el cual se conserva la energía emanada de la superficie provocando un aumento de la temperatura (INEGI, 2013).

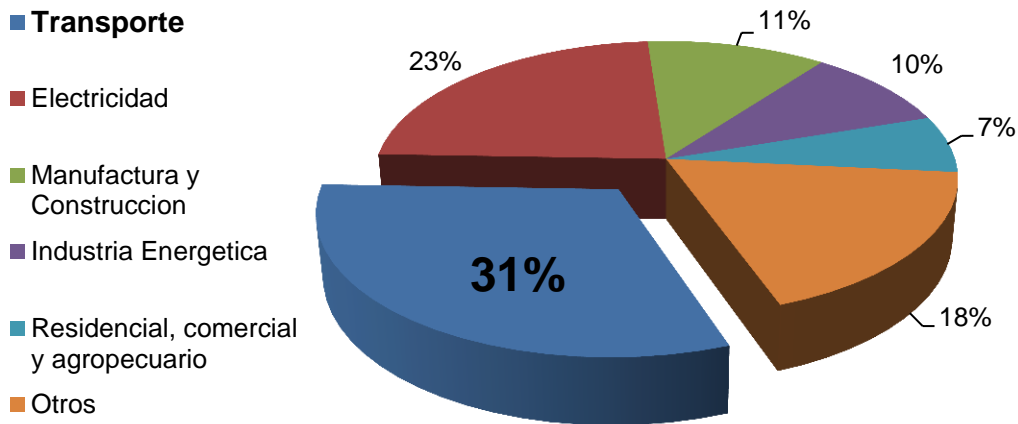
Entre los principales gases precursores del efecto invernadero (GEI), se encuentran: el bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), siendo el CO<sub>2</sub> el mayor contribuyente en las emisiones de GEI (Craig, *et al.*, 2007).

En el periodo de 1990 – 2010, las emisiones de GEI tuvieron un incremento del 33.4% (ver Figura 3) con una Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) de 1.5%, siendo la categoría de Energía (67%) el de mayor contribución a las emisiones durante el 2010 (Comisión Internacional de Cambio Climático, 2012).



**Figura 3.** Contribucion por categoria en gases de efecto inverdadero. Comparacion entre años 1990 - 2010

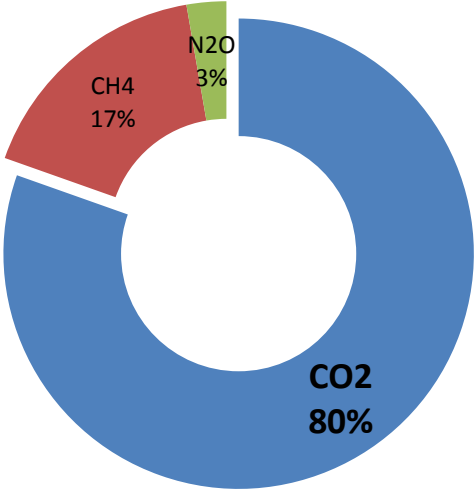
Dentro de la categoria de energia, se encuentran que los sectores con mayor contribución a las emisiones de CO<sub>2</sub> en el 2010 fueron: transporte con 31.1% y generación eléctrica con 23.3% (Figura 4). Si se analizan las fuentes de energia que emplea cada uno de los sectores involucrados en las emisiones de CO<sub>2</sub>, se observa que la gran mayoría de sus fuentes provienen del consumo de combustibles fósiles (Comisión Internacional de Cambio Climático, 2012).



**Figura 4.** Contribución de GEI por sector durante el 2010

El mayor problema que ocasiona la combustión de combustibles fósiles es la contaminación del aire (Craig, *et al.*, 2007), tan solo en 2010, la principal emisión de la categoría de Energía fue el CO<sub>2</sub>, que contribuyó con 80.4% del total, seguida

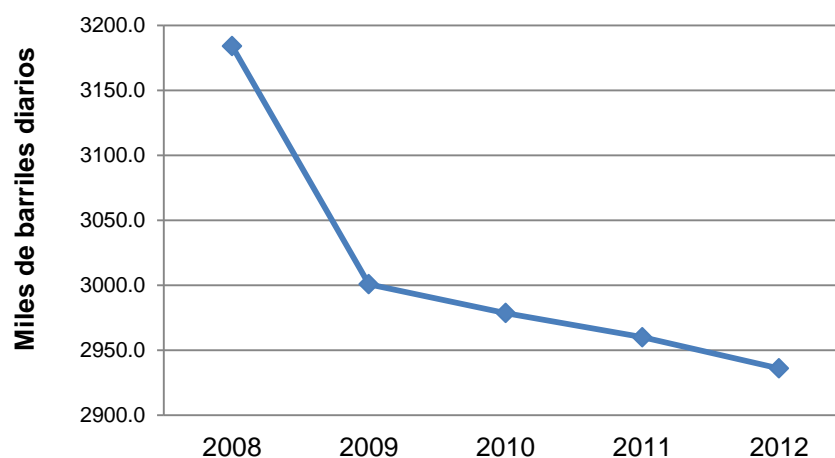
por las emisiones de CH<sub>4</sub>, 16.9% y N<sub>2</sub>O, 2.7% (ver Figura 5). En términos generales, las emisiones de CO<sub>2</sub> en 2010, contribuyeron en 65.9% al total del inventario y tuvieron un incremento de 23.6% con respecto a 1990 (Comisión Internacional de Cambio Climático, 2012).



**Figura 5.** Emisiones de GEI en la categoría de energía durante el 2010

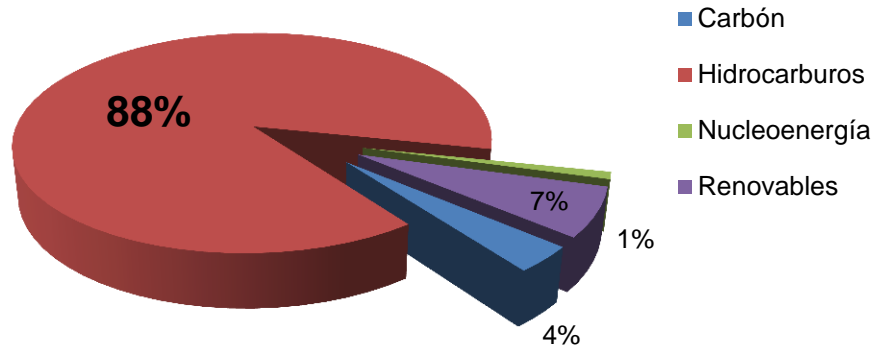
### 4.3 SITUACIÓN ENERGÉTICA EN MÉXICO.

La Secretaría de Energía (SENER) afirma que: “La energía es una condición necesaria para el crecimiento de la economía, indispensable en la elaboración y uso de casi todos los bienes y servicios del mundo moderno”. También señala que del año 2000 al 2011, el consumo de energía en el país creció a un promedio anual de 2.08%, en contraste con la producción de ese mismo periodo que disminuyó en un 0.35%; afirmando así que de continuar estas tendencias, tanto en consumo como en producción de energía para el 2020, México se convertiría en un país estructuralmente deficitario en energía (SENER, 2013). Tan solo en los últimos años se ha visto disminuida la producción de crudo (Figura 6), provocando un descenso en el ranking de producción mundial hasta la 9ª posición.

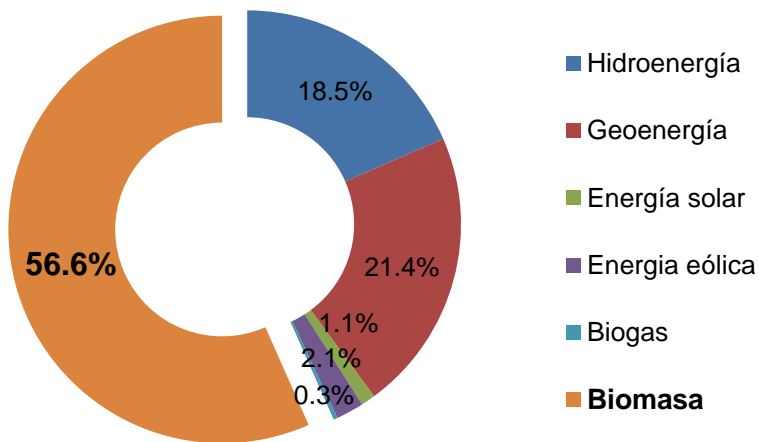


**Figura 6.** Oferta de Petróleo en México

Al ser el petróleo el máximo representante de las fuentes de energía, resulta inevitable pensar en el uso de combustibles fósiles, prácticamente el 88% de la energía que se consume se deriva de esta fuente (Figura 7). Este resultado no implica que el uso de la energía renovable no esté dentro del contexto energético, pues cerca del 7% de la energía producida es proveniente de energías renovables. Para su producción, más del 50% utiliza la biomasa como materia prima (Figura 8).



**Figura 7.** Contribución de las fuentes de Energía en la Producción en 2012



**Figura 8.** Relación Porcentual de Producción de energía de fuentes renovables en el 2012

Es importante señalar que ahora existe el mandato legal de generar el 35% de la electricidad a partir de energías no fósiles en 2024. (SENER, 2012).

## 4.4 FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA

### 4.4.1 Tipos de fuentes renovables de energía

La búsqueda de fuentes alternas de energía estuvo prácticamente inactiva hasta las crisis energéticas de la década de 1970 y principios de 1980 que provocaron un renovado interés en este tema (Knothe, 2010).

Las energías renovables son definidas como “aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por la humanidad, y que se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua...” (SENER, 2009).

Las energías renovables, son una respuesta a la demanda de un modelo sustentable de progreso que no afecte a las generaciones futuras. Así mismo, su eficaz aprovechamiento contribuye a la conservación y uso eficiente de los recursos energéticos no renovables (SENER, 2006).

Hasta ahora se han desarrollado toda una serie de tecnologías relacionadas con la obtención de energías renovables entre las que se incluyen (Craig, *et al.*, 2007):

- ☞ **Energía hidráulica:** Es la energía que se obtiene a partir del aprovechamiento de las energías cinética y potencial del agua que corre o cambia de nivel de manera natural o artificial.
- ☞ **Energía Solar:** Es la energía obtenida de la radiación electromagnética procedente del Sol. Su aprovechamiento se realiza principalmente mediante la utilización de celdas fotovoltaicas y termosolares.
- ☞ **Energía Geotérmica:** La energía que se genera en el núcleo de la tierra en forma de calor. Esta se puede utilizar para generar electricidad o bien para aplicaciones térmicas como calefacción de interiores, balnearios y procesos industriales o agroindustriales.

- ☞ **Energía eólica:** Es la que se genera cuando el viento mueve las turbinas eólicas para producir energía eléctrica.
- ☞ **Bioenergía:** Se produce al utilizar materia orgánica como energético, por combustión directa o mediante su conversión en combustibles gaseosos como el biogás o líquidos como bioetanol o biodiesel.

#### 4.4.2 Biocombustibles

Los biocombustibles, se refieren a aquellos combustibles obtenidos directa o indirectamente de la biomasa. La transformación de la biomasa en biocombustible se realiza mediante diversos procesos. Algunas de las técnicas más empleadas son: mezcla directa, microemulsiones, pirolisis y transesterificación (Banković-Ilić, *et al.*, 2012).

- ☞ **Mezcla directa:** Los aceites vegetales se pueden mezclar directamente con combustible diésel petroquímico, la mayor ventaja es que no se requiere de procesos de transformación, pero entre sus desventajas se encuentran las siguientes: una alta viscosidad, baja volatilidad, baja estabilidad de los aceites y formación de depósitos en los motores (Ramadhas, *et al.*, 2004).
- ☞ **Microemulsiones:** Se trata de una técnica de dispersión coloidal en el que se busca el equilibrio entre microestructuras isotrópicas con dimensiones generalmente en el intervalo de 1 a 150 nm, formada a partir de dos líquidos inmiscibles. Con esto se permite mejorar el patrón de rociado durante la combustión, baja viscosidad del combustible pero entre sus desventajas encontramos que es de baja volatilidad, reactividad de cadenas hidrocarbonadas insaturadas, bajo número de cetano, bajo contenido energético, formación de depósitos de carbón en los motores e inyección irregular (combustión incompleta) (Baskar, *et al.*, 2012).



- ☞ **Pirólisis:** Consiste en una conversión de una sustancia en otra por medio de calor con la ayuda de un catalizador, en ausencia de aire y oxígeno. Su producto es químicamente similar al combustible diésel, pero se requiere de un alto gasto de energía y costos. (De Olivera, *et al.*, 2006).
- ☞ **Transesterificación:** En términos generales, se trata de una reacción orgánica de un éster y un alcohol (de bajo peso molecular) para producir otro éster por medio del intercambio del grupo alcoxi. Entre sus ventajas encontramos que es un combustible renovable, de alto número de cetano, bajas emisiones y alta eficiencia de combustión en los motores pero se presentan dificultades en la eliminación de subproductos (glicerol y residuos de agua) (Yaakob, *et al.*, 2013).

De forma invariable, el uso de las tecnologías arriba citadas producen biocombustibles líquidos o gaseosos, ambos son substitutos de combustibles fósiles. Estos biocombustibles se pueden clasificar en función del origen de la materia prima empleada para su producción (Carels, 2011).

#### 4.4.2.1 Biocombustibles de primera generación

Los biocombustibles de primera generación son producidos a partir de materias primas empleadas como alimentos. Su producción se encuentra en competencia directa con la industria alimentaria (Baskar, *et al.*, 2012; Carels, 2011). Algunos ejemplos de este tipo de combustibles son los siguientes:

- ✓ Bioetanol de caña de azúcar, remolacha de azucarera y los cultivos de almidón (maíz y trigo).
- ✓ Biodiesel a partir de cultivos a base de aceites como la colza, girasol, soja, aceite de palma, y los residuos de los aceites comestibles.
- ✓ Biogás derivado de almidón.

#### 4.4.2.2 Biocombustibles de segunda generación

Los biocombustibles producidos a partir de cultivos no alimentarios (cultivos energéticos), o materias primas basadas en los residuos de la industria alimentaria (Baskar, *et al.*, 2012). Ejemplos:

- ✓ El biogás derivados de desechos y residuos.
- ✓ Biocombustibles a partir de materiales lignocelulósicos como los residuos procedentes de la agricultura, la silvicultura y la industria.
- ✓ Los biocombustibles de cultivos energéticos como el sorgo.

#### 4.4.2.3 Biocombustibles de tercera generación

Son aquellos biocombustibles producidos mediante el uso de microorganismos acuáticos como las algas (Carels, 2011). Ejemplos

- ✓ Biodiesel producido a partir de algas.
- ✓ Hidrogeno producido de algas.

#### 4.4.3 Tipos de Biocombustible

La producción de biocombustibles ha dado origen a toda una serie de productos que buscan sustituir a los combustibles fósiles, entre ellos se encuentra: bioetanol, biometanol, aceites vegetales, biodiesel, biogás, gas bio-sintético (bio-gas de síntesis), bio-aceite, carbón vegetal (carbón de leña creado por pirólisis de biomasa), líquidos de Fischer-Tropsch y biohidrógeno (Atadashi, *et al.*, 2013). Entre los más importantes encontramos:

- ☞ **Bioetanol:** Se deriva de azúcar o almidón a través de la fermentación. Se produce regularmente a partir del jarabe de alta fructosa, cultivos de cereales como el maíz o trigo y los cultivos de azúcar, tales como la remolacha o caña de azúcar. Es utilizado como sustituto de la gasolina en los llamados vehículos flexi-fuel. También puede servir como materia prima para acetato de butil-éter

(ETBE) que se mezcla más fácilmente con la gasolina y puede ser usado en vehículos de gasolina con ligeras adaptaciones. En Europa se prefiere la Remolacha, pues 1 Ha del cultivo produce 5.5 toneladas, pero en Brasil, la caña de azúcar produce 7.5 toneladas. (Naik, *et al.*, 2010; Carels, 2011).

- ☞ **Microdiesel:** Producido a partir de microorganismos oleaginosos. Microorganismos con un contenido de aceite superior al 20%. No todos los microbios son adecuados para la producción de biodiesel, pero de entre esta gama de productores encontramos Bacillus, microalgas, hongos y levaduras (Carels, 2011). Ejemplos. *Cryptococcus curvatus*, puede acumular >60% de lípidos cuando se cultivan bajo condiciones de limitación de nitrógeno; *Chlorella protothecoides* puede acumular lípidos a una tasa del 55%.
- ☞ **Biohidrogeno:** Las reservas de H<sub>2</sub> molecular no existen en la tierra. Por lo tanto, el H<sub>2</sub> debe ser considerado más como un portador de energía (como la electricidad) que como una fuente de energía. El H<sub>2</sub> se puede producir a partir de combustibles existentes, tales como el gas natural, metanol o gasolina o por microorganismos (cianobacterias, bacterias anaerobias y bacterias fermentativas) (Carels, 2011).
- ☞ **Biodiesel:** Se emplea como un sustituto de diésel fósil. Puede servir como un sustituto completo al hacer modificaciones menores al motor. Se puede producir por esterificación o transesterificación de aceites vegetales o grasas residuales. Las tecnologías usadas para la producción de biodiesel pueden ser químicas, por catálisis enzimática o tratamientos supercríticos con alcohol. Hoy en día, el 84% de la producción mundial proviene del aceite de Colza, la producción restante son de aceite de girasol (13%), aceite de palma (1%), aceite de soya y otros (2%). Más de 95% de biodiesel aun proviene de aceites comestibles. (Naik, *et al.*, 2010; Carels, 2011).

#### 4.4.4 Biodiesel, una alternativa al diésel.

##### 4.4.4.1 Definición de biodiesel.

El biodiesel, se define como un combustible compuesto principalmente de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenido de aceites vegetales o grasas animales (Knothe, 2010). Es un biocombustible que puede utilizarse en cualquier motor diesel sin modificaciones y puede mezclarse en distintas proporciones con el diesel fósil. El biodiesel reduce las emisiones de hidrocarburos sin quemar, monóxido de carbono y azufre (Bozbas, 2008).

##### 4.4.4.2 Uso de aceites vegetales en motores diésel

El uso de aceites vegetales en motores de combustión interna empezó en el año de 1900 en Francia, cuando Rudolf Diésel probó su primer prototipo de motor con aceite de maní (Knothe, 2010). Pero a diferencia del diesel de petróleo, el aceite vegetal presenta un número considerable de inconvenientes: problemas en el arranque del motor en climas fríos, depósitos en el pistón y desgaste excesivo del motor, entre otros. La mayoría de estos problemas es provocado por la alta viscosidad y bajo índice de cetano del aceite vegetal (Bozbas, 2008). Una de las técnicas empleadas de manera frecuente para superar estas dificultades, es la alteración química del aceite, en la que se busca que sus propiedades de combustión sean similares a las de diésel fósil (Enweremadu & Mbarawa, 2009). El origen de la materia prima, podría ser considerado como un factor limitante en la generación de biodiesel, pues la inversión económica en su producción varía en función del tipo de materia prima. Entre las fuentes de biomasa utilizadas para la producción de biodiesel, los aceites vegetales y las grasas animales han llamado mucho la atención como un recurso potencial para la obtención de bioenergía (Enweremadu & Mbarawa, 2009).

#### 4.4.4.3 Materias primas para la obtención de biodiesel

Las principales materias primas para la obtención de biodiesel son los aceites vegetales y las grasas animales. Estos están compuestos principalmente por triglicéridos de cadena larga, los cuales pueden ser simples o mixtos, considerando si los grupos sustituyentes unidos al glicerina son iguales o distintos (Enweremadu & Mbarawa, 2009). Entre las materias primas principales para la producción de biodiesel se encuentran:

- ☞ **Aceites comestibles.** Los aceites comestibles son las materias primas preferidas para la producción de biodiesel debido a que su composición de ácidos grasos genera un combustible de alta calidad y actualmente representan el 95% de los aceites empleados para la producción de biodiesel. El uso de especies vegetales para la producción de biocombustibles es un tema controversial por tratarse de productos comúnmente empleados para la alimentación. Los aceites más utilizados son: canola, maíz, coco, palma, girasol y cacahuate (Balat, 2011; Shahid & Jamal, 2011).
- ☞ **Aceites no Comestibles.** Considerando la gran demanda y alto costo de los aceites comestibles en la industria alimentaria, en la actualidad, los aceites no comestibles se han convertido en los preferidos para la producción de biodiesel. Estos cultivos de origen silvestre contienen compuestos tóxicos y ofrecen altos rendimientos de aceite. Los aceites más utilizados son: jatropha, pongamia pinnata, neem, ricino, algodón, etc (Banković-Ilić, *et al.*, 2012).
- ☞ **Aceites residuales.** Los aceites residuales constituyen uno de los productos de desecho de la industria de alimentos fritos y de los hogares. Estos son considerados en algunos países como materia prima para la producción de biodiesel, al grado de contar con legislación para las empresas que ya lo utilizan como materia prima. A pesar de ser una buena opción por su reciclaje, su alta acidez representa elevados costos en la industria de los biocombustibles (Ganesh, *et al.*, 2012).

☞ **Residuos sólidos orgánicos.** En la industria alimentaría la producción de residuos sólidos orgánicos puede significar un problema de almacenaje y de generación de gases y olores desagradables. Su aprovechamiento en la obtención de aceites y grasas representa una opción viable para la producción de biocombustibles. Los aceites de semillas de desecho en la producción de jugos y néctares, la producción de grasas animales como el cebo, el bagazo de caña de azúcar o la celulosa proveniente de hierbas, madera y partes no comestibles de algunas plantas son ejemplos potenciales para este tipo de materia prima (Ocampo, *et al.*, 2007).

#### 4.4.4.4 Ventajas y desventajas del uso de biodiesel

El biodiesel está atrayendo cada vez más la atención de todo el mundo como un reemplazo directo del diésel petroquímico en vehículos automotores. Por tal razón, es conveniente valorar los pros y contras de su empleo como combustible (Bozbas, 2008), ver Tabla 1.

**Tabla 1.** Ventajas e Inconvenientes del uso de Biodiesel

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prolonga la vida útil del motor y reduce la necesidad de mantenimiento (el biodiesel tiene mejores cualidades de lubricación que el diésel fósil).</li> <li>• Seguro al manejar, menos tóxico, más biodegradable y tiene un punto de inflamación más alto.</li> <li>• Reduce las emisiones del tubo de escape, humo nocivo y olores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Congelación del combustible a temperaturas bajas.</li> <li>• Menor entalpia de combustión.</li> <li>• Degradación del combustible durante períodos prolongados.</li> <li>• Alta viscosidad</li> <li>• Presenta Ácidos grasos libre.</li> <li>• Formación de goma por oxidación y polimerización durante el almacenamiento.</li> <li>• Formación de depósitos de carbono</li> </ul>

A menudo el biodiesel se utiliza como una mezcla para reducir los inconvenientes que se presentan al ser empleado en el motor de combustión interna. El biodiesel

tiene menor contenido de azufre, menor punto de inflamación, menor contenido de compuestos aromático y se biodegrada más rápidamente que el diesel fosil (Tariq, *et al.*, 2012). Además, cuenta con el potencial de ser un combustible de "carbono neutral", es decir, el CO<sub>2</sub> producido durante la combustión del biodiesel será consumido durante el ciclo de vida de las plantas que se emplearan en el futuro para la producción del biodiesel. Con esto se busca evitar un incremento neto de carbono en la atmosfera (Bezergianni & Dimitriadis, 2013).

El biodiesel puede ser mezclado con el diésel de petróleo en cualquier porcentaje, de 1 a 99%. Es común expresar el porcentaje de biodiesel seguido de una letra mayúscula B. Por ejemplo: B5 es 5% de biodiesel con 95% de diésel de petróleo, o B100 es 100% de biodiesel, sin ningún porcentaje de diésel de petróleo.

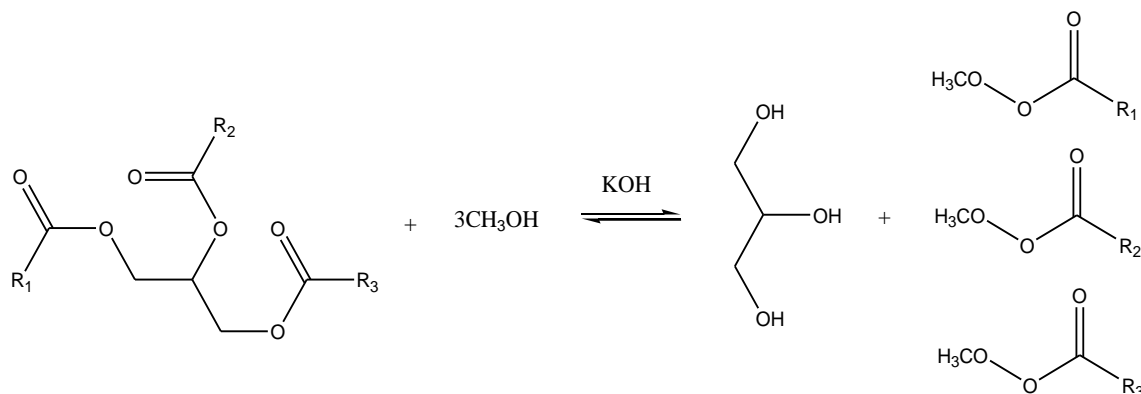
El uso de biocombustibles en motores de combustión interna reduce las emisiones de gases efecto invernadero. Sin embargo, el uso de grandes áreas de cultivo para la producción de biocombustibles podría tener impactos negativos sobre el medio ambiente (Bozbas, 2008).

Como ya se ha mencionado, la principal razón para el empleo del biodiesel, está relacionada con la reducción considerable de: hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono, compuestos azufrados, hidrocarburos aromáticos policíclicos, partículas suspendidas y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), entre otros. Estas reducciones están directamente relacionadas con el aumento de la proporción de biodiesel en las mezclas biodiesel/diesel empleadas, pues las mayores reducciones se han observado con B100 (Bozbas, 2008).

El Biodiesel puro reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> en más de un 75% con respecto al diesel de petróleo, mientras que una mezcla de B20 reduce en un 15% las emisiones de CO<sub>2</sub>. Diversos estudios demuestran que el CO<sub>2</sub> es uno de los principales gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global (Bozbas, 2008).

#### 4.4.5 Reacción de transesterificación

La reacción de transesterificación, también conocida como alcoholisis, es la reacción de un éster y un alcohol para producir otro éster (Enweremadu & Mbarawa, 2009). Como se ha indicado previamente, el biodiesel puede obtenerse empleando la reacción de transesterificación de aceites vegetales con un alcohol, empleando un catalizador adecuado (Figura 9).



**Figura 9.** Reacción de Transesterificación

Para completar estequiométricamente la reacción de transesterificación, se necesita una relación molar 3:1 de alcohol/triglicérido. En la práctica, para tener un rendimiento máximo, esta relación debe ser superior debido a que la reacción es reversible (Enweremadu & Mbarawa, 2009). El exceso de alcohol se utiliza para desplazar el equilibrio hacia el lado de los productos y el catalizador se emplea para aumentar la velocidad de reacción. La reacción puede ser catalizada por álcalis, ácidos o enzimas (Tariq, *et al.*, 2012). Las condiciones típicas cuando se utiliza metanol son: relación molar de alcohol/aceite vegetal de 6:1, T= 60-65°C, tiempo de 1h y la presión ambiente en presencia de hidróxido de sodio (Knothe, 2010).

La transesterificación consiste en una secuencia de tres reacciones reversibles consecutivas. El primer paso es la conversión de triglicéridos a diglicéridos, seguido por la conversión de diglicéridos a monoglicéridos y finalmente monoglicéridos, a glicerol, produciendo una molécula de éster para cada glicérido



en cada paso. Las reacciones son reversibles, aunque el equilibrio se desplaza hacia la producción de ésteres de ácidos grasos y glicerol (Tariq, *et al.*, 2012).

La reacción de transesterificación puede ser catalizada mediante ácidos, bases o enzimas. Generalmente la catálisis alcalina es más eficiente que la ácida, pero si un triglicérido tiene un alto contenido de ácidos grasos libres y agua, la transesterificación catalizada por ácido es más adecuada. Además, la catálisis puede ser homogénea o heterogénea. Los catalizadores homogéneos tienen más importancia a escala industrial debido a que son más eficientes, mientras que los catalizadores heterogéneos son útiles cuando los aceites presentan alto contenido de ácidos grasos libres (Tariq, *et al.*, 2012).

#### 4.4.5.1 Catálisis básica

La catálisis alcalina puede realizarse en fase homogénea o heterogénea, la primera es adecuada para el aceite virgen que contiene un bajo contenido de ácidos grasos libres. Esta categoría comprende el uso de compuestos básicos como: NaOH, NaOCH<sub>3</sub> y KOH, los cuales son más económicos porque el proceso se lleva a cabo a baja temperatura (40-60 °C), menos tiempo (30-90 min) y bajo presión atmosférica. Asimismo, la tasa de conversión es alta sin pasos intermedios. Sin embargo, estos catalizadores son altamente higroscópicos y absorben agua del aire durante el almacenamiento. También forman agua cuando se disuelve en alcohol y afectan el rendimiento (Tariq, *et al.*, 2012)

La catálisis básica heterogénea incluye sólidos alcalino-térreos y óxidos como: MgO, CaO, ZnO, óxido de circonio sulfatado, óxido de estaño sulfatado etc. (Tariq, *et al.*, 2012). Estos catalizadores ofrecen muchas ventajas sobre los catalizadores homogéneos, tales como: la recuperación del catalizador, reutilización del catalizador, la purificación del producto, menor consumo de energía y agua (Atadashi, *et al.*, 2013). Los aceites comestibles, como la soya, girasol, palma, semilla de algodón, semilla de colza, etc., y los no comestibles (jatropha, higuera, ricino, etc.), han sido transesterificados por muchos grupos de trabajo utilizando

diversos catalizadores heterogéneos (Tariq, *et al.*, 2012). Estos catalizadores requieren de más tiempo, más proporción de metanol/aceite y temperaturas más altas para obtener altos rendimientos en el proceso de transesterificación.

#### 4.4.5.2 Catálisis ácida

La catálisis ácida es más adecuada para aceites que contienen un alto contenido de ácidos grasos libres. Los catalizadores homogéneos en medio ácido incluyen ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico o ácido sulfónico orgánico. Estos catalizadores requieren más tiempo y temperatura más alta para la conversión completa en comparación a catalizadores homogéneos en medio alcalino. El proceso de transesterificación catalizado por ácidos se emplea con menor frecuencia debido a que esta es aproximadamente 4000 veces más lenta que la catalizada por bases (Tariq, *et al.*, 2012).

#### 4.4.5.3 Catálisis enzimática

La transesterificación con catalizadores enzimáticos se recomienda para materias primas con alto contenido de ácidos grasos libres (Karmakar, *et al.*, 2010). La catálisis enzimáticas implica el uso de lipasas altamente específicas, como son: *Candida antarctica lipasa*, *Pseudomonas cepacia*, *Candida sp.*, *Pseudomonas fluorescens*, *Rhizomucor miehei*, *Chromobacterium viscosum* y *Rhizopus oryzae lipasa* (Atadashi, *et al.*, 2013). El empleo de la biocatálisis reduce el uso y generación de sustancias peligrosas y contaminantes, sin embargo, las reacciones son lentas (requieren de 4 a 40 horas y temperaturas de 35 a 45°C) (Karmakar, *et al.*, 2010).

#### 4.4.6 Parámetros de calidad del biodiesel

La composición de un combustible tiene una influencia significativa en sus propiedades físicas y químicas, la calidad del biodiesel depende del tipo de aceite utilizado como materia prima y del proceso de obtención. Para evaluar su calidad, se han establecido especificaciones que garanticen el buen funcionamiento y la vida útil de los motores diésel de combustión interna (Enweremadu & Mbarawa, 2009).

En Estados Unidos la especificación ASTM D6751-01 (Tabla 2), se emplea para la normalización del biodiesel usado como componente de mezclas con diésel (por ejemplo: B-20, significa que la mezcla contiene un 20% de biodiesel). La norma Europea EN 14214, indica los requisitos y métodos de análisis para los monoésteres metílicos de ácidos grasos utilizados en motores diésel (Tabla 3).

**Tabla 2.** Algunas especificaciones para biodiesel ASTM D6751-01 (B100)

Propiedad	Limites	Resultados típicos	Método ASTM
Punto de inflamación	130 °C min	173 °C	D93
Viscosidad cinemática, 40 °C	1.9-6.0 min <sup>2</sup> /sec.	3.9	D445
Cetano	47 min.	52	D613
Índice de acidez	0.80 mg KOH/mg máx.	0.14	D664

**Tabla 3.** Algunas especificaciones para biodiesel Norma Europea EN 14214

Propiedad	Lím. Inferior	Lím. Superior	Método de prueba
Densidad at 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	860	900	ISO 3675 - ISO 12185.
Viscosidad at 40°C (mm <sup>2</sup> /s)	3,5	5,0	ISO 3104
Punto de Inflamación (°C)	> 101	-	ISO 3679
Índice de cetano	51,0	-	ISO 5165
Índice de acidez (mg KOH/g)	-	0,5	EN 14104
Índice de yodo	-	120	EN 14111

El biodiesel tiene propiedades físicas muy similares al diésel convencional, el biodiesel suele ser caracterizado tanto por sus propiedades físicas como sus propiedades químicas, siendo las principales: densidad, viscosidad, índice de yodo, índice de acidez, entalpía de combustión, punto de inflamación, número de cetano, puntos de fluidez y punto de turbidez (Bozbas, 2008).

#### 4.4.6.1 Viscosidad

Es una medida de la resistencia de un combustible para fluir, este parámetro afecta al rendimiento de las bombas y sistemas de inyección, el método de prueba actual, la norma ASTM D445, mide la viscosidad cinemática a 40 °C en centistokes. La viscosidad depende de la composición del combustible y su trascendencia se refleja en los parámetros de destilación, densidad y propiedades de flujo en frío (Bezergianni & Dimitriadis, 2013). La Viscosidad es un parámetro que afecta particularmente a baja temperatura, cuando el aumento de la viscosidad afecta la fluidez del combustible (cuando los inyectores de combustible no funcionan correctamente y no rocían combustible para quemar correctamente (Tariq, *et al.*, 2012)).

#### 4.4.6.2 Densidad

La densidad es una propiedad importante principalmente en sistemas de combustión sin aire, ya que influye en la eficiencia de atomización. Se sabe que la densidad de biodiesel depende principalmente de su contenido de ésteres de alquilo y la cantidad que quedaba de alcohol, por lo que esta propiedad se ve influenciada principalmente por la elección de aceite vegetal (Enweremadu & Mbarawa, 2009).

La densidad se correlaciona fuertemente con otros parámetros como número de cetano, viscosidad y temperatura de destilación (intervalo de ebullición o volatilidad). En motores diésel con frecuencia, el combustible se inyecta directamente en la cámara de combustión mediante un sistema de medición

volumétrico. El contenido de energía del combustible es casi proporcional a la masa de la inyección de combustible. Por lo tanto, para un sistema de inyección de volumen constante, las variaciones en la densidad del combustible pueden resultar en variaciones en el contenido de energía de la inyección de combustible. Por consiguiente, la potencia del motor, las emisiones y el consumo de combustible pueden ser afectados por la densidad del combustible. Con el fin de optimizar el rendimiento del motor y las emisiones de escape, la densidad del combustible debe ser controlado dentro de un intervalo bastante estrecho (0.8 – 0.845 g/mL) (Bezergianni & Dimitriadis, 2013).

#### 4.4.6.3 Índice de yodo

El índice de yodo permite determinar el grado de insaturaciones del biodiesel. Este es un parámetro que depende principalmente de la materia prima empleada para producción del biodiesel. Es considerada una propiedad de relevancia, pues el grado de insaturaciones nos da una idea de la tendencia a oxidarse que se presentara en el biodiesel y por lógica predecirá la formación de depósitos sólidos en el motor (Enweremadu & Mbarawa, 2009).

#### 4.4.6.4 Índice de acidez

El índice de acidez o número de neutralización o la acidez del biodiesel es la masa en miligramos de KOH que se requiere para neutralizar 1 g de una sustancia química. El número ácido se utiliza para cuantificar la cantidad de ácido presente. El biodiesel se compone de ésteres metílicos de ácidos grasos y también puede contener una pequeña cantidad de ácido graso, que se cuantifica mediante un número de ácido. El porcentaje del índice de acidez en el biodiesel mayor a 3% provoca problemas de funcionamiento, tales como la corrosión y la formación de depósitos en la bomba. Sin mencionar que la transesterificación no ocurriría si el aceite tiene un contenido de ácidos grasos libres > 3% (Tariq, *et al.*, 2012).

#### 4.4.6.5 Entalpia de combustión

Es la energía térmica cuando un combustible se somete a combustión completa con el oxígeno requerido bajo condiciones estándar (Bezergianni & Dimitriadis, 2013). Por su composición química, sabemos que el biodiesel tiene un menor contenido de carbón y de hidrogeno en comparación con el combustible diésel, lo que resulta en una disminución del 10% en masa de energía (Juárez, 2012). Es uno de los tres factores principales que afectan a la economía de combustible y la potencia en el motor del vehículo, siendo los otro dos factores el tipo de motor (es decir, gasolina o diésel) y la eficiencia del motor de convertir la energía del combustible en trabajo útil (Bezergianni & Dimitriadis, 2013).

#### 4.4.6.6 Punto de inflamación

El punto de un líquido volátil de inflamación es la temperatura más baja a la que se puede vaporizar para formar una mezcla inflamable en el aire o es la temperatura a la que el combustible se convierte en una mezcla que se enciende cuando se expone a una chispa o llama (Tariq, *et al.*, 2012).

#### 4.4.6.7 Índice de cetano

El índice de Cetano es una medida de su tendencia a la auto-ignición (Bezergianni & Dimitriadis, 2013), se trata de una medida de retardo en la ignición del combustible; el período de tiempo entre el inicio de la inyección y de inicio de la combustión. La escala de índice de cetano muestra que los hidrocarburos saturados de cadena lineal tienen mayor índice de cetano, en comparación con la de cadena ramificada o componente aromático de peso molecular similar y el número de átomos de carbono (Tariq, *et al.*, 2012). Es una determinación que depende de la longitud de la cadena y del grado de insaturación. La presencia de ésteres grasos poliinsaturados es la causa de los problemas de estabilidad oxidativa con biodiesel y la presencia de mayores cantidades de ésteres grasos saturados es la causa de problemas de flujo en frío (Knothe, 2010). El número de

cetano de biodiésel a partir de grasas animales es mayor que la de aceite vegetal (Tariq, *et al.*, 2012).

#### 4.4.6.8 Punto de Fluidez

El punto de Fluidez describe las propiedades en frío de un combustible indica la temperatura más baja a la que el aceite fluye. Esta propiedad es crucial para los combustibles que debe fluir a bajas temperaturas. Una condición clave para la selección del combustible, es que este debe tener un punto de fluidez de al menos 10 °C (20 ° F) más baja que la temperatura ambiente más baja esperada de ignición (Bezergianni & Dimitriadis, 2013).

#### 4.4.6.9 Punto de Turbidez

Para aplicaciones de baja temperatura de biodiesel el punto de enturbiamiento es un parámetro decisivo (Knothe, 2010). Esta determinación hace referencia a la temperatura a la cual el líquido se enturbia cuando se enfría prediciendo la temperatura a la cual el aceite comienza a solidificar, creando problemas en los filtros del combustible y los inyectores de los motores ignición (Tariq, *et al.*, 2012). Cabe señalar que, en relación con las propiedades a baja temperatura, a menudo se informa el punto de fluidez, refiriéndose a la temperatura en la que el combustible ya no puede ser vertido libremente (Knothe, 2010).

## 4.5 SEMILLAS DE CHIA (*Salvia hispanica*).

### 4.5.1 Situación Cultural y de Producción

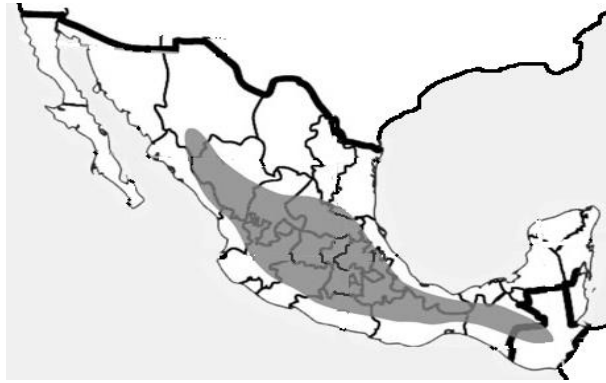
Las semillas de chia (*Salvia hispanica* L.), en la época pre-colombina fue tan importante como el maíz y el frijol. Durante el siglo XVI, el uso de esta semilla solo representaba un ingrediente de aplicación culinaria (Jamboonsri, *et al.*, 2011). Si bien fue importante su consumo en harinas y bebidas, sus bondades medicinales eran más valoradas en aquella época. Existen documentos donde se reseña el uso de la semilla de chia en tratamientos para infecciones oculares, vías respiratorias y usos obstétricos. También, las semillas eran aprovechadas en actividades artesanales y artísticas, pues sus aceites eran utilizados para cosméticos, barnices y pinturas que daban brillantez a los objetos o personas, ver Figura 10 (Cahill, 2003).



**Figura 10.** Ilustración del Código Florentino, escrito originalmente 1575 ~ 1577 o 1578 – 1580 representa un artesano azteca y sus vasos de lacado artesanales con aceite de Chia

Antes de la colonización española prácticamente todo centro américa era zona apta para la siembra de chia (Figura 11). Después de la conquista la producción de la especie fue en declive y solo sobrevivieron los cultivos silvestres y algunas variedades domésticas (Cahill, 2003), quedando la producción de chia prácticamente en el olvido.

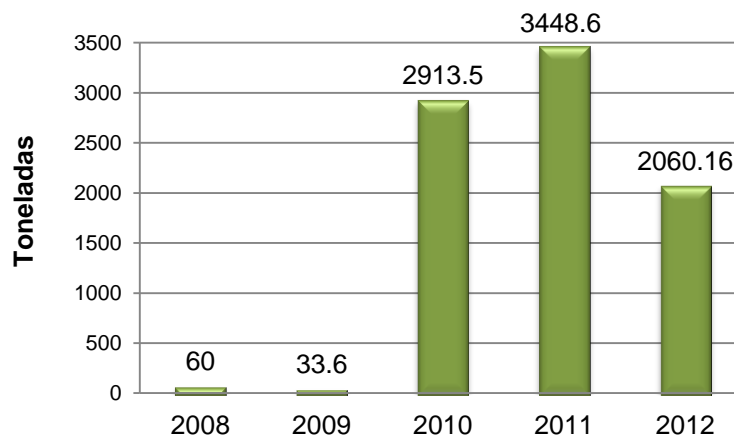




**Figura 11.** Cultivo de Chia y dispersión. El área sombreada representa la zona tradicional de cultivo de chia desde el centro de México hasta Guatemala

A finales del siglo pasado el interés por la chia resurgió, ya que se le considera una buena fuente de proteínas, fibra y antioxidantes (Ixtaina, *et al.*, 2011).

En México, la producción de chia se ha incrementado de una manera sorprendente, en los últimos 5 años, tan solo en el periodo 2008 – 2010, la superficie cosechada fue 99 veces mayor a la inicial, pasando de 20 a 2329 Ha (Figura 12). Los estados productores de chia: son jalisco y puebla, siendo Jalisco el estado que prácticamente ha monopolizado su producción, pues este aporta más del 90% de la semilla producida.



**Figura 12.** Producción anual de *Salvia hispanica*

#### 4.5.2 Descripción de la planta y semilla

Las plantas de la familia Lamiaceae, también conocidas como labiadas, abarcan cerca de 300 géneros, con alrededor de 7500 especies distribuidas entre las regiones cálidas y templadas. Las plantas pertenecientes a esta familia se caracterizan por presentar hojas simples, opuestas, aromáticas y flores bilabiadas hermafroditas con estilo ginobásico (la flor se conecta al ovario por su base). El género *Salvia* es el más numeroso de esta familia, se le conocen cerca de 900 especies (Di Sapio, *et al.*, 2012). En México se estima el cultivo de 275 especies, siendo el 88% endémicas (Campanilla & Martínez, 2012).

De entre toda la gama de especies y géneros de la familia Lamiaceae, nos encontramos con la *Salvia hispanica* L., también conocida como “salvia española”, “artemisa española”, “chia mexicana”, “chia negra” o simplemente “chia”, es una planta anual originaria de las zonas montañosas del oeste y centro de México (Figura 13).



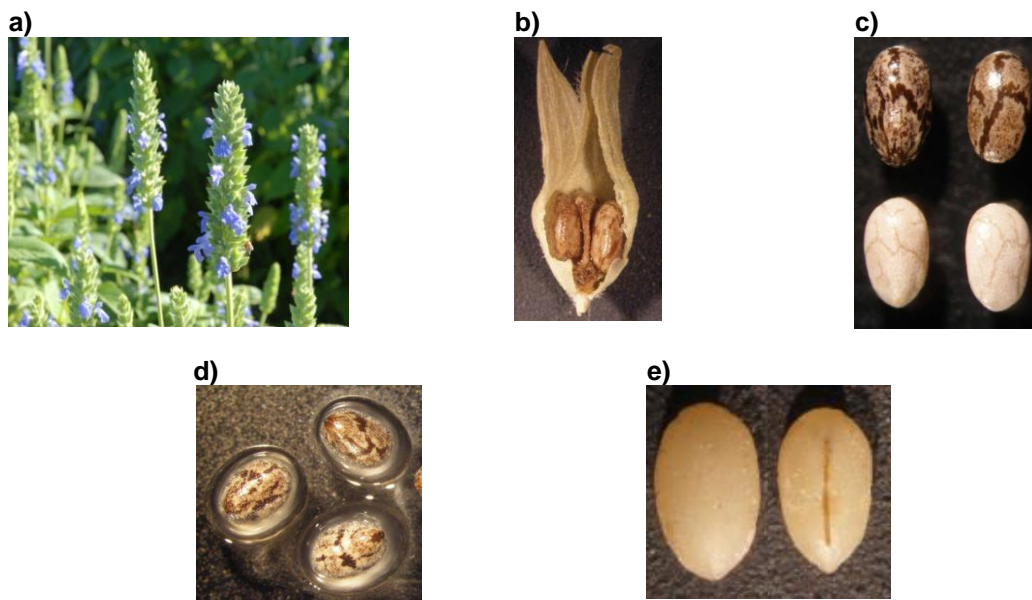
Reino: Plantae  
Subreino: Tracheobionta  
Superdivisión: Spermatophyta  
División: Magnoliophyta  
Clase: Magnoliopsida  
Subclase: Asteridae  
Familia: Lamiaceae  
Género: *Salvia*  
Especie: *S. hispanica*

**Figura 13.** Clasificación botánica *Salvia hispanica*

La planta de chia mide de 1 a 2 metros de altura, posee tallos cuadrangulares, acanalados y vellosos, las hojas miden de 4 a 8 cm de largo y de 3 a 5 cm de ancho (Figura 14a), un dato curioso es que la estación del crecimiento varía de acuerdo a la latitud, ya que si la siembra se realiza en un lugar más cercano al ecuador, el ciclo se acorta y viceversa; por tal razón, en Colombia el ciclo de

cultivo de la chia es de 90 días y para el caso de México es de 150 días (Campanilla & Martínez, 2012).

Cada fruto proveniente de cada flor es un carcérulo (fruto) que al madurar produce pequeños mericarpos indehiscentes (fruto que no es capaz de abrirse por sus propios medios) denominados Clusas o núculas, en números de 1 a 4 (Figura 14b), en mayor porcentaje se presentan de color pardo grisáceo y en una menor proporción se observan clusas de color blanquecino (Figura 14c). Una característica innegable de la *Salvia hispanica*, es que cuando las clusas entran en contacto con el agua, el epicarpio se hincha y tras la ruptura de la cutícula al agotar su elasticidad, el contenido de las células epicárpicas mucilaginosas se excreta como mucilago de apariencia transparente y consistencia pegajosa para rodear toda la superficie del fruto (Figura 14d). Por otra parte, la semilla es albuminosa de contorno oblongo-elíptico, posee una superficie opaca, reticulada, de color amarillo-ocre y dimensiones de (1.3–1.8 mm) x (1–1.2 mm). Las semillas ocupan todo el volumen del fruto y consta de epidermis, endospermo y embrión (Figura 14e) (Garcia & Manzini, 2012).



**Figura 14.** Morfología de la Chia. a) Aspecto general de la planta; b) Clusas Incluidas en el Caliz; c) Clusas Oscuras y Claras; d) Mixocarpia. Clusas hidratadas con formación de Mucilago; e) Exomorfología de la Semilla

Las plantas de Chia requieren un clima tropical o sub-tropical por lo que suelen cultivarse entre verano y otoño, es decir, requieren temperaturas de 14-20 °C. Estas pueden cultivarse con precipitaciones desde 400 a 1100 mm, pero no son tolerantes a heladas y sus principales amenazas son la lluvia y los granizos. La capa de mucílago que tienen las semillas de chia sirve como protección en climas áridos y calientes, hecho que les permite desarrollarse en suelo arenoso-limoso, aunque puede crecer en suelos arcillosos-limosos si tiene un buen drenaje (Campanilla & Martínez, 2012).

Uno de los beneficios del cultivo de chia es que no presenta problemas con ataques de plagas y enfermedades, por tal razón no es necesario el uso de insecticidas y fungicidas. Sin embargo, su principal problema son las hormigas, (atacan a las hojas en su madurez fisiológica) y los pájaros que se comen las semillas. (Campanilla & Martínez, 2012).

#### 4.5.3 Composición proximal de la semilla

La semilla de chia es un grano que posee una gran calidad nutrimental con respecto a otros cereales. En general, la composición porcentual de nutrientes en la semilla de chia es superior a la de otros cereales (Tabla 4). Es importante hacer notar que la semilla de chia contiene un mayor porcentaje de lípidos, proteínas y fibra (Campanilla & Martínez, 2012).

**Tabla 4.** Comparación Nutrimental de la Chia con los Cereales

Grano	Energía (kcal/100g)	Proteína (g%)	Lípidos (g%)	Carbohidratos (g%)	Fibra (g%)
Arroz	358	6.5	0.52	79.15	2.8
Cebada	354	12.48	2.3	73.48	17.3
Avena	389	16.89	6.9	66.27	10.6
Trigo	339	13.68	2.47	71.13	12.2
Maíz	365	9.42	4.74	74.26	3.3
<i>Chia</i>	<i>550</i>	<i>20.70</i>	<i>30.4</i>	<i>40.29</i>	<i>27.5</i>

La semilla de chia es rica en ácidos grasos Omega-3 y Omega-6 (63% y 20% respectivamente), de acuerdo a la Tabla 5 (Ayerza & Coates, 2006).

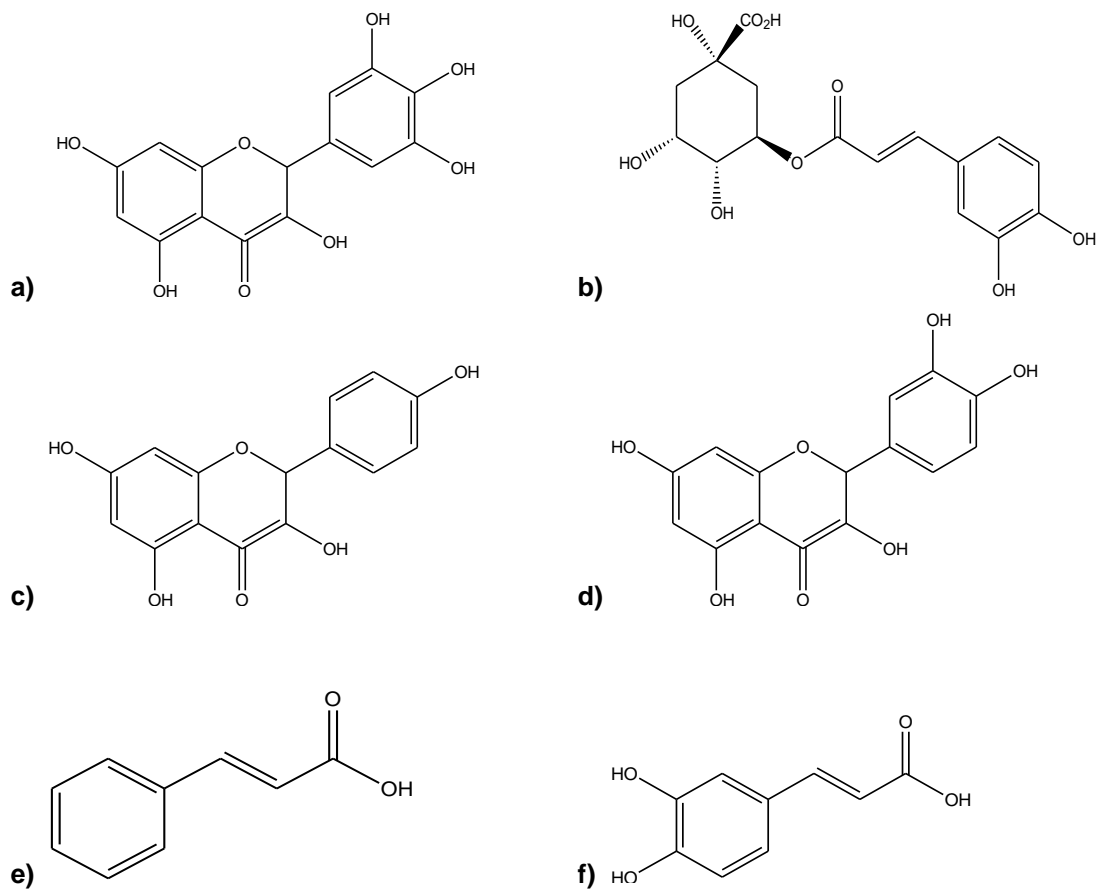
**Tabla 5.** Cantidades Relativas de Ácidos Grasos en Aceites Vegetales

Cultivo	Saturados	Oleico	Linoleico	Linolenico	Otros
Canola	6	64.1	18.7	9.2	2
Girasol	12.3	18.6	68.2	0.5	0.4
Maíz	14.5	27.5	57	0.9	0.1
Olivo	17.4	71.1	10	0.6	0.9
Soja	15.2	23.4	53.2	7.8	0.4
<i>Chia</i>	9.4	7.8	20.2	62.7	0

#### 4.5.4 Antioxidantes de la semilla de *Salvia hispanica*

El buen estado de los ácidos grasos en la semilla de chia, es un factor crítico en la calidad de su aceite, estos ácidos grasos son compuestos que al oxidarse producen ranciedad, propiedad indeseable en cualquier aceite (Barreiro & Sandoval, 2006).

En las semillas de chia se han encontrado antioxidantes de varios tipos, como son: ácidos cinámicos (clorogenico y cafeico), junto con compuestos flavonoides (miricetina, quercetina y kaempferol) (Figura 15). Estos compuestos pueden conferir cierta estabilidad al aceite contenido en las semillas y representan una oportunidad comercial en el mercado de los antioxidantes naturales (Caudillo, *et al.*, 2008). Sin embargo, el alto nivel de ácidos grasos insaturados (linoleico y linolenico) presentes en las semillas de chia, es la principal causa de la baja estabilidad de su aceite. Por otra parte, es importante hacer notar que algunos de los compuestos polifenolicos encontrados en el aceite de semilla de Chia, no están presentes en las semillas de otras oleaginosas (Ixtaina, *et al.*, 2011).



**Figura 15.** Estructura Química de algunos compuestos antioxidantes presentes en la semilla de chia. a) Miricetina b) Ácido Clorogénico c) Kaempferol d) Quercetina e) Ácido Cinámico f) Ácido Cafeico

## 5. METODOLOGÍA

---

### 5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS

Se partió de un lote de 3 kg de semillas de *Salvia hispanica* procedente de la Central de Abastos de Iztapalapa. México, D.F., en agosto de 2012.

A partir de una muestra con 20 g de la semilla seleccionada al azar y haciendo uso de una espátula se separó la materia extraña, las semillas de *Amarantus hybridus*, semillas de chia sin cascara, semillas blancas y semillas negras, el análisis se hace por triplicado.

#### ☞ Determinación de dimensiones de las semillas

Partiendo de una muestra de 100 g de semilla, se tomó una población de 30 semillas negras y 30 semillas blancas, a las cuales se les determinaron las medidas de largo, ancho y grosor utilizando un microscopio estereoscópico marca ZEISS, posterior a esto de manera individual las semillas fueron pesadas en una balanza analítica Galaxy 160 Ohaus y guardadas de forma individual en sobres numerados. Al resto de las semillas se les retiró el mayor número de impurezas y se molieron en una licuadora de uso doméstico.

#### ☞ Determinación de Humedad

Se partió de una muestra de 50 g tomada al azar y previamente molida en una licuadora de uso doméstico. La determinación se realizó en una termobalanza automática marca Sartorius modelo MA35, en la que sobre la charola se pesó un aproximado de 0.5 g y a una temperatura constante de 90 °C se realizó la determinación.

## 5.2 EXTRACCIÓN DE ACEITE DE LA SEMILLA DE CHIA

### ☞ Extracción por Soxhlet

Se elaboraron 3 cartuchos con papel filtro que contenían 50 g de semilla molida que se introducen en la cámara de Soxhlet, en 3 matraces de bola de 1 L, se colocaron 300 mL de hexano y de 3 a 4 piedras de ebullición. Una vez montado el equipo, durante un periodo de 18 horas, se mantuvo bajo reflujo a una temperatura de 60 °C con una parrilla eléctrica con 3 resistencias y mediante el uso de una bomba de recirculación el agua se mantuvo a un flujo constante, para mantener el agua de recirculación a una temperatura inferior a 20 °C, se utilizó hielo para su enfriamiento. Una vez terminado el tiempo, se secó lo extraído con hexano y Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> anhídrido. Después se evaporó el hexano y se concentró el aceite extraído en un evaporador rotatorio R-124 Büchi. Se realizó el mismo procedimiento tres veces para cada lote del Soxhlet.

### ☞ Extracción por maceración

Se pesaron 2.5 Kg de semilla molida, se colocó en un frasco de vidrio con 3 L de hexano, se dejó durante un periodo de 3 días con agitación intermitente y transcurrido este tiempo se procedió a la extracción del disolvente de contenedor, para retirar el bagazo se filtró al vacío con papel filtro mediano y celita. Una vez realizado esto, se evaporó el hexano en un evaporador rotatorio para concentrar el aceite. Este proceso se realizó 2 veces más para hacer un total de 3 extracciones.



### 5.3 OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DEL ACEITE DE CHIA

#### ☞ Reacción de Transesterificación

El biodiesel se obtuvo mediante la reacción de transesterificación del aceite obtenido de la *S. hispanica* por los métodos de Soxhlet y maceración. De acuerdo a lo indicado en la Figura 16. En un matraz de fondo plano con volumen de 500 mL se colocaron 1.250 g (0.022 moles) de KOH y 104 mL (2.5701 moles) de metanol. Una vez disuelto el KOH se agregaron 200 mL (0.2042 moles) del aceite obtenido por maceración y se dejó a reflujo bajo una agitación constante a una temperatura de 60 °C en una parrilla eléctrica. Para observar el avance de la reacción, se monitoreó cada 30 minutos por cromatografía en capa delgada por medio de cromatoplasmas (TLC Silica Gel F<sub>254</sub>), empleando el aceite como referencia y una mezcla de Hexano/AcOEt/AcOH (9:1:0.1) como eluyente, utilizando una cámara de yodo como revelador. Una vez terminada la reacción, la mezcla se transfirió a un embudo de separación, se dejó reposar toda una noche y posteriormente por la diferencia en la densidad se separó la glicerina del biodiesel. A éste último se le efectuaron dos lavados con 80 mL de disolución de ácido cítrico (0.1%) y posteriormente dos lavados con 160 mL de agua caliente a 60 °C. Por último, la muestra se secó con sulfato de sodio anhidro. Después de separar el líquido por decantación, se midió el volumen para obtener el rendimiento de la reacción.

El procedimiento anterior también fue empleado para tratar el aceite obtenido por el método Soxhlet, utilizando 20 mL (0.0205 moles) de aceite de *S. hispanica*, 0.1500 g de KOH (0.0027 moles) y 10.4 mL (0.2570 moles) de metanol. Mientras que para los lavados, se utilizaron 10 mL de ácido cítrico y 20 mL de agua a 60 °C.

Para propósitos de comparación, se empleó el biodiesel obtenido para preparar mezclas biodiesel/diésel de diferentes porcentajes: B10, B20, B30, B40 y B50. El diésel fósil se adquirió en marzo de 2012 en una estación de gasolina de PEMEX, ubicada en una zona cercana a la Cd. de Texcoco.

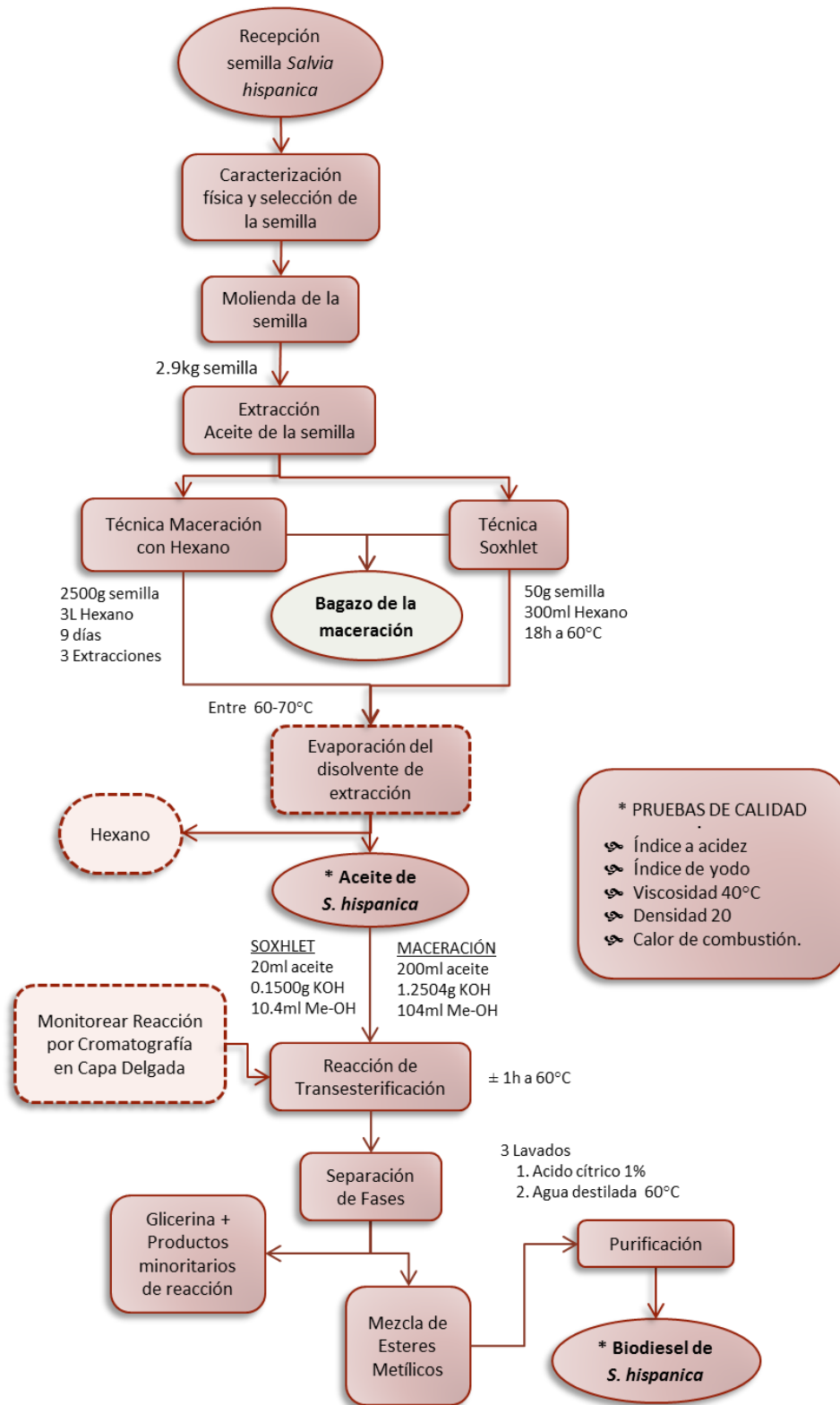


Figura 16. Procedimiento de obtención de Aceite y su transformación a biodiesel

## 5.4 PRUEBAS DE CALIDAD DEL ACEITE Y EL BIODIESEL

### ☞ Índice de Acidez (IA).

El índice de acidez (IA) se determinó colocando 1 g de muestra en un matraz Erlenmeyer de 125 mL y adicionando 10 mL de etanol y 2 gotas de fenolftaleína. La mezcla se calentó a una temperatura de 50 °C y se tituló con una solución de KOH 0.0056 N hasta observar una solución rosa pálido que perdure al menos 30 segundos (se utilizó etanol en sustitución de la mezcla de etanol-éter (1:1) que señala el método oficial MGA 0001, descrito en la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos). Se realizaron 3 repeticiones para cada aceite (Soxhlet, maceración y biodiesel). Se anotó el volumen empleado de la solución de KOH y se calculó el IA expresado en mgKOH/g de muestra, empleando la ecuación:

$$IA = \frac{(mL_{KOH})(N_{KOH})(56.1mg_{KOH})}{g_{muestra}}$$

### ☞ Índice de yodo.

El índice de yodo (IY) se obtuvo pesando entre 0.1 y 0.2 g del aceite en un matraz de 250 mL, el cual se cubrió con papel aluminio para evitar el paso de luz. Al matraz se añadieron 10 mL de diclorometano y 10 mL de reactivo de Wijs, se colocó un tapón forrado con aluminio, se agitó fuertemente y se guardó en un lugar oscuro durante 30 minutos. Una vez transcurrido este tiempo, se adicionaron 10 mL de una solución de yoduro de potasio al 10% y 100 mL de agua destilada previamente hervida y enfriada. Se tituló con una solución valorada de tiosulfato de sodio 0.16 N, hasta obtener un color amarillo paja. Una vez obtenida esta coloración, se adicionó 1 mL de una solución de almidón y se continuó la titulación titulando hasta desaparición de la coloración azul. Se repitió la titulación anterior empleando los mismos reactivos menos el aceite, empleando el volumen gastado de tiosulfato de sodio 0.16 N como blanco. Se calculó el índice de yodo empleando la ecuación siguiente:

$$\text{IY} \frac{(T_2 - T_1) \times 127 \text{ gI}_2 \times N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \times 100}{\text{peso del aceite (g)}}$$

Donde  $T_1$  el volumen de tiosulfato de sodio gastado en la titulación de la muestra y  $T_2$  es el volumen de tiosulfato de sodio gastado por el blanco. Se realizaron 3 repeticiones para cada aceite (Soxhlet, maceración y biodiesel).

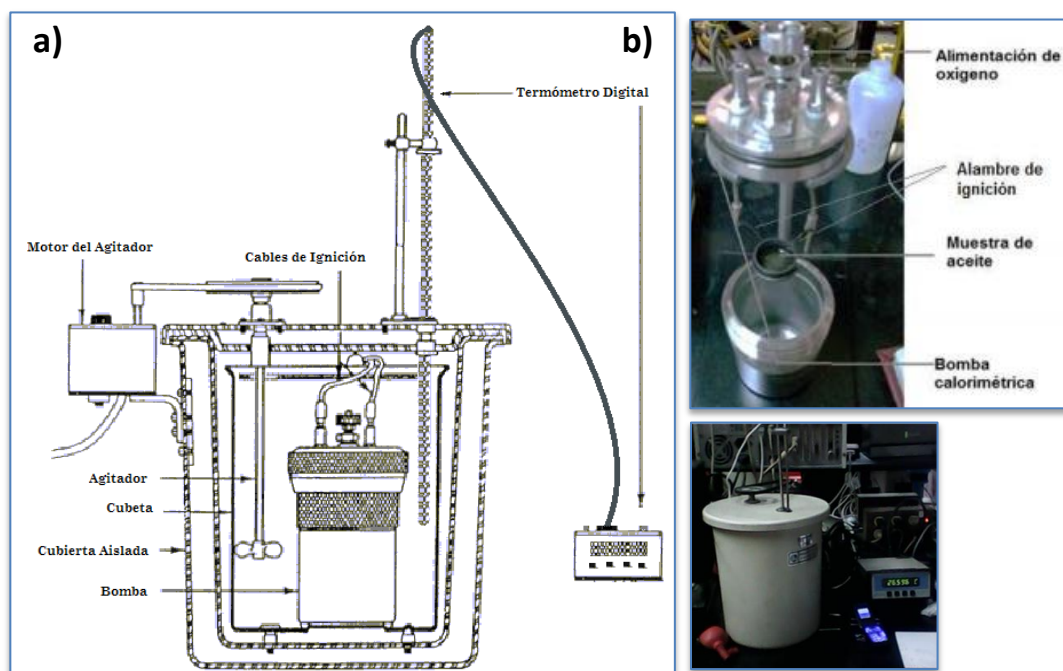
#### ☞ Entalpia de combustión.

Se realizó en un calorímetro de combustión Parr, modelo 1108 con un termómetro digital Erco-Hart modelo 850. Se pesó 1 g de muestra en la cápsula y se montó en el porta muestra. Se colocó el alambre de ignición marca Parr No.45C10, de tal manera que solo tocara la muestra y procurando que no tocara las paredes de la cápsula (Figura 17). Se agregó 1 mL de agua destilada a la bomba calorimétrica y después de cerrarse, se purgó con oxígeno hasta llegar a una presión de 30 atm. Después de conectar los electrodos, la bomba se sumergió en 2000 g de agua destilada, se cerró y se registró la temperatura ambiente y la del agua (la diferencia no debe ser mayor a 1.5 °C). La temperatura se registró cada 30 segundos por 2 minutos con un termómetro digital. Concluido ese tiempo, se agito y se registró la temperatura cada 30 segundos hasta que la temperatura fuera estable (alrededor de 5 minutos). Al llegar a este punto, se inició el proceso de ignición y se registró la temperatura cada 20 segundos hasta que ésta que comenzó a descender, momento en el cual, la temperatura se determinó cada 30 segundos durante 5 minutos. Después de lo anterior, se suspendió la agitación y se desconectaron los electrodos, dejando liberar el oxígeno restante. Se abrió la bomba calorimétrica y se midió lo que quedó del alambre de ignición con la escala proporcionada por el fabricante. Se construyeron gráficas correspondientes del tiempo vs. Temperatura y se procedió con los cálculos para determinar la entalpia de combustión y el valor de acidez de combustión.

Los datos obtenidos fueron utilizados para la determinación de la entalpia de combustión ( $\Delta H$ ) empleando la siguiente ecuación:

$$\Delta H = \frac{K (\Delta T) - e}{m}$$

Donde **K** es la constante del calorímetro (cal/°C), **ΔT** es la la diferencia de temperatura en el sistema, **e** la corrección por la entalpia de combustión del alambre de ignición expresado en calorías (2.3 cal/cm) y **m** es la cantidad de muestra en gramos. Se realizaron las pruebas por triplicado para cada aceite (Soxhlet, maceración y biodiesel).



**Figura 17.** Bomba Calorimétrica empleada para las determinaciones de Entalpia de Combustión.  
a) Componentes b) Inserción de muestra

Con el propósito de conocer la acidez producida durante la reacción de combustión, a la bomba se le colocaron 9 mL de agua destilada adicionales al mililitro colocado previo a la combustión y este volumen total se dividió en 4 porciones de 2.5 mL que se colocaron en matraces de 50 mL, para su posterior titulación con una solución valorada de KOH 0.0056 N.

Las determinaciones calorimétricas de las mezclas diésel-biodiesel y del diésel fósil, se realizaron empleando el Calorímetro Isoperibolco Automático Parr 6400.

El procedimiento de inserción de la muestra es muy similar al método empleado en el calorímetro manual Parr modelo 1108. Se pesaron 0.5 g de muestra en la cápsula, la cual se colocó en el porta muestra, poniéndose el hilo de ignición de tal manera que tenga contacto con la muestra. El porta muestras se colocó dentro de la bomba y se cerró el equipo para realizar la determinación del calor de combustión de acuerdo al procedimiento indicado en el instructivo del equipo mencionado.

#### ☞ Viscosidad cinemática

La determinación se realizó en un viscosímetro Stabinger marca Anton Paar modelo SVM 3000, en el que solo fue necesario inyectar una muestra de 4mL de aceite, biodiesel o de las mezclas a evaluar. El equipo realiza la medición cuando el tubo en U queda lleno con la muestra, permitiendo que el rotor de medición (con el imán integrado) flote en la muestra permitiendo eliminar la influencia de fricción externa. El rotor magnético gira a velocidad constante y queda centrado por las fuerzas centrífugas. Por otra parte, la regulación en los cambios de temperatura es por acción del sistema peltier integrado al equipo lo que permite que con la misma muestra inyectada al equipo se hagan las mediciones a diferentes temperaturas.

Las determinaciones se realizaron en un intervalo de temperatura de 10 a 90 °C, con incremento de 10° en la temperatura.

#### ☞ Densidad

La prueba de densidad se basa en la relación existente entre el peso de un determinado volumen de muestra. Comúnmente la prueba se realiza empleando el método oficial MGA 0251 que se describe en la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos. En este caso en particular la determinación se realizó en el mismo equipo empleado para la prueba de viscosidad, un tubo en forma de “U” oscilante que permite una determinación simultánea de densidad, viscosidad cinemática y dinámica. Las determinaciones se realizaron en intervalos de temperatura de 10 a 90 °C, con incremento de 10°.

### ☞ Perfil de Esteres Metílicos por Cromatografía de Gases

Esta determinación se realizó en el Laboratorio de Cromatografía del Instituto de Química, UNAM. Se utilizó un equipo Agilent 6890 y una columna FAME (30 m x 0.25 mm con 0.25 mm de espesor en la película), con una programación de temperatura de horno inicial de 180 °C, por 15 minutos, 10 °C/min hasta una temperatura final de 230 °C, y flujo de hidrogeno con caudal de 1.8 mL/min modo Split y presión de 40 psi, la temperatura del detector y del inyector fue de 250 °C. Como referencia se hizo uso de un estándar de Ésteres Metílicos (Esteres FAME2). Una vez corrida la muestra, el equipo proporciono el tiempo de retención para la identificación de los picos correspondientes a cada éster metílico y su respectivo porcentaje de área.

### ☞ Espectros de RMN <sup>1</sup>H de Aceite y Biodiesel.

Para el análisis de Resonancia Magnética Nuclear de hidrogeno se pesaron cerca de 0.0050 g de muestra (aceite o biodiesel), dicho análisis se llevó a cabo en la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación (USAI) de la Facultad de Química, UNAM. Se utilizó un espectrómetro Varian modelo Unity Inova 300 Autosuitable con frecuencia de 300 MHz. Se empleó tetrametilsilano (TMS) como referencia interna y como disolvente cloroformo deuterado (CDCl<sub>3</sub>).

## 5.5 CARACTERISACIÓN DEL BAGAZO DE CHIA

### ☞ Extracción del bagazo con Metanol

Posterior a la extracción por maceración con hexano del aceite de la semilla de *S. hispanica*, el bagazo correspondiente (aproximadamente 2 Kg) se sometió a un proceso de maceración con metanol (3.5 L) durante un periodo de 3 días. Transcurrido este tiempo, se separó el bagazo del metanol, mediante filtración por gravedad y se evaporó el metanol en un evaporador rotatorio. Este procedimiento se repitió 2 veces.

### ☞ Partición del extracto metanólico

El extracto metanólico obtenido fue sometido a un proceso de partición empleando: hexano, diclorometano y acetato de etilo, de acuerdo al siguiente procedimiento:

En un vaso de precipitado de 100 mL se pesaron 29.82 g de extracto metanólico y se adicionaron 50 mL de agua destilada, la mezcla se transfirió a un embudo de separación de 250 mL y se agregaron 70 mL de hexano. La muestra se agitó fuertemente y se separó la fase hexanica de la acuosa. Se realizaron 2 lavados adicionales con la misma cantidad de hexano y se juntaron los 3 lavados, secándose y evaporándose la mezcla en un evaporador rotatorio. Se pesó el producto obtenido y se calculó su rendimiento. La fase acuosa proveniente de la partición de hexano se trató con 3 lavados de 100 mL de diclorometano empleando el procedimiento anterior. Del mismo modo, se obtuvo la partición de que corresponde al acetato de etilo. Finalmente, el residuo presente en la fase acuosa se obtuvo mediante la evaporación del agua a temperatura ambiente en charolas de vidrio.

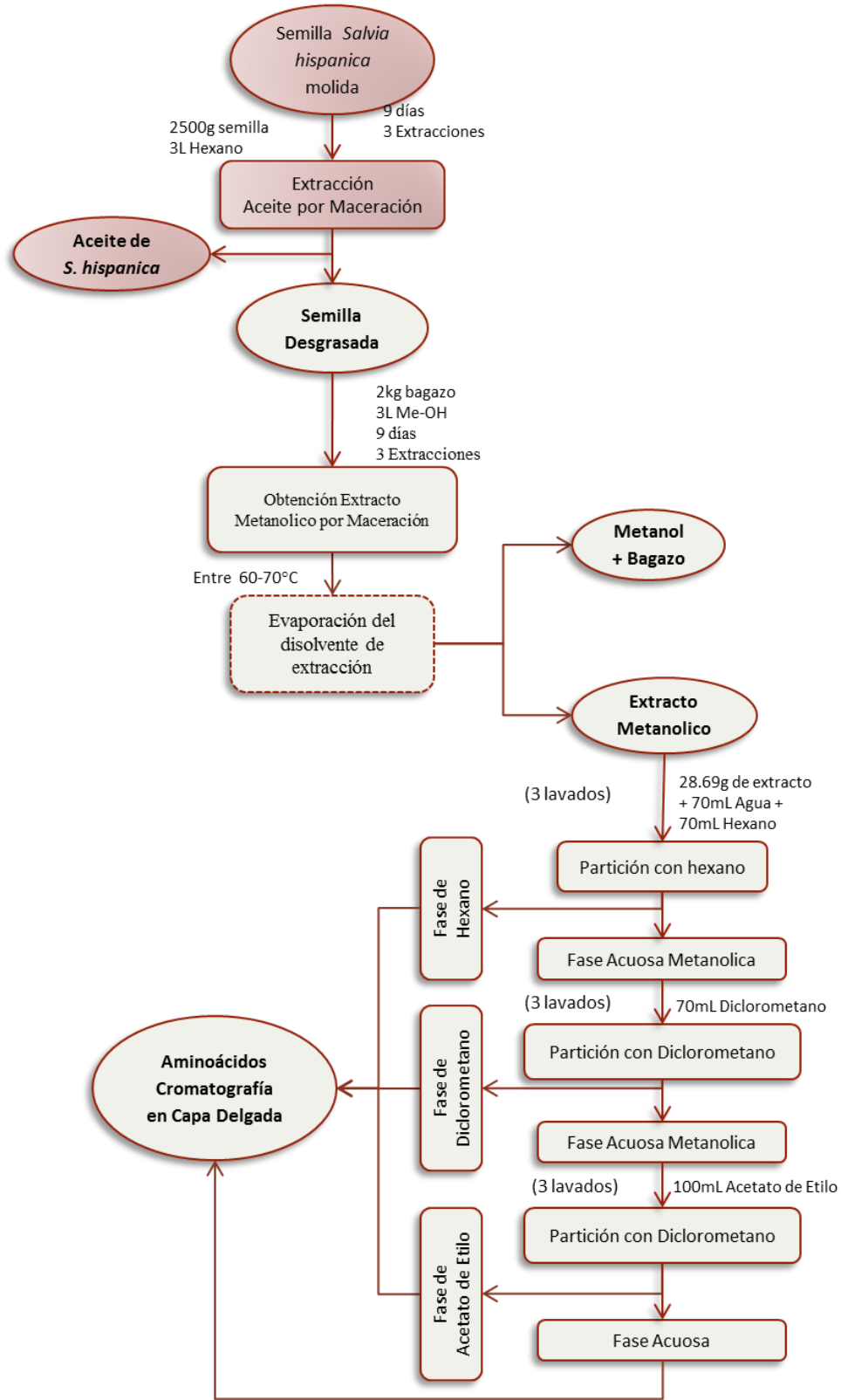


## ☞ Detección de aminoácidos, péptidos y ciclopéptidos por Cromatografía en Capa Delgada.

Se realizaron ensayos para la detección de la posible presencia de aminoácidos, péptidos y ciclopéptidos en el bagazo de las semillas de chia de acuerdo con el diagrama, ver Figura 18. El procedimiento para su identificación incluyó cromatografía en capa delgada, empleando cromatoplasmas TLC sílica gel 60 F<sub>254</sub> (MERCK), y soluciones de Ninhidrina y Cl<sub>2</sub>/o-tolidina como agentes reveladores.

Para la prueba con Ninhidrina, se colocaron las muestras de extracto metanólico y sus particiones sobre una cromatoplasma, al igual que los aminoácidos de referencia (Glicina, Valina, Aspartame, Isoleucina, Fenilalanina y Metionina). Se colocó la muestra en una cámara que contenía una mezcla de CHCl<sub>3</sub>/MeOH/H<sub>2</sub>O [5:4:1] como eluyente. Posteriormente se revelaron las placas haciendo uso de un aspersor que contenía una solución de Ninhidrina y se colocaron en una parrilla para observar la aparición de una coloración rojiza-purpura, lo cual indica la presencia de péptidos lineales y aminoácidos libres.

Para realizar el ensayo con o-tolidina, las muestras de extracto metanólico y sus correspondientes particiones se aplicaron sobre una cromatoplasma, así como el ciclopéptido 2,5-piperazindiona (Furniss, *et al.*, 1989). Las placas se colocaron en una cámara que contenía como eluyente una solución de CHCl<sub>3</sub>/ MeOH/ H<sub>2</sub>O [5:4:1]. Posteriormente, las cromatoplasmas se revelaron en una cámara de cloro por cerca de 15 minutos, transcurrido este tiempo, éstas se retiraron del recipiente y se dejaron reposar cerca de 5 horas para eliminar el exceso de cloro. Para verificarlo anterior, se aplicó con la punta de una espátula una pequeña cantidad del revelador o-tolidina sobre la placa, esperando que no se presentara la coloración azul. Una vez verificado que el cloro no está presente en exceso, se revelaron las placas mediante la aspersion de la solución de o-tolidina y secado a temperatura ambiente. La aparición de una coloración azul confirma la presencia de ciclopeptidos.



**Figura 18.** Determinación de Aminoácidos Péptidos y Ciclopéptidos en el Bagazo de *Salvia hispanica*

## 5.6 MODELADO MOLECULAR PARA LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN

En la reacción de transesterificación con metanol en medio básico los triglicéridos se convierten a diglicéridos y estos, a su vez se convierten en monoglicéridos, seguido por la conversión de monoglicéridos a glicerol, eliminando un grupo acilo en cada paso para producir los esteres metílicos correspondientes (FAME's). Si bien la transesterificación en medio básico es el mejor método para obtener biodiesel, esta reacción presenta algunas desventajas. Es necesario un índice de acidez bajo (menor a 3) y que se trabaje en condiciones anhidras para evitar la saponificación, pues la formación de jabones disminuye el rendimiento en la reacción y dificulta la separación del glicerol, aumentando los costos de producción. Por lo anterior, es necesario optimizar el proceso y entender mejor el mecanismo de la reacción de transesterificación básica (Tapanes, *et al.*, 2008).

Con el objetivo de comprender y controlar las variables de la reacción de transesterificación catalizada con bases, es necesario estudiar su mecanismo. Actualmente existe controversia relacionada con los pasos relacionados con el mecanismo de esta reacción, en particular, existen dudas con relación al paso de formación y ruptura del intermediario tetraédrico (Limpanuparb, *et al.*, 2010).

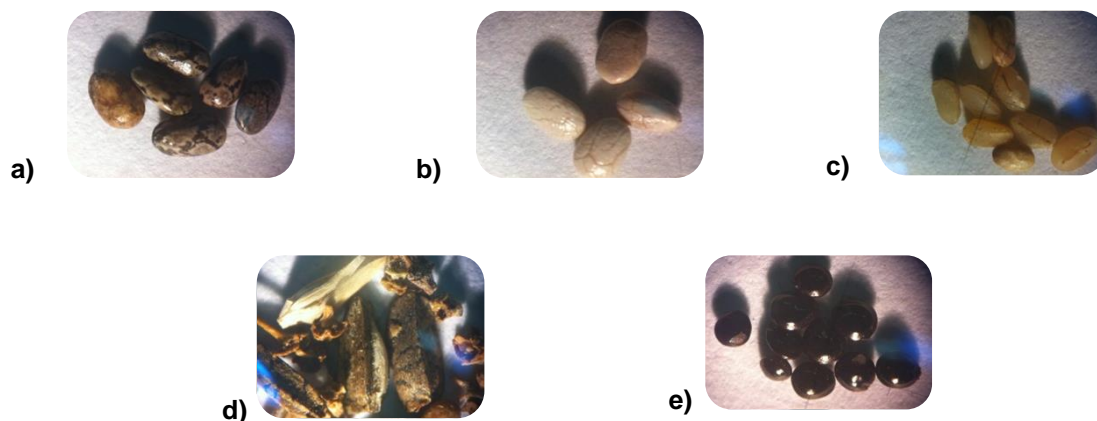
En la actualidad los estudios mecanocuánticos se emplean como una valiosa herramienta para elucidar los mecanismos de las reacciones químicas. Por lo anterior, en este trabajo se realizaron algunos cálculos teóricos para estudiar la reacción de transesterificación relacionada con la obtención del biodiesel a partir del aceite de la semilla de *S. hispanica*. Los cálculos se realizaron con el programa de modelado molecular Spartan 08, implementado en un servidor Opteron Dual Core y que se reporta en la sección 6.8.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

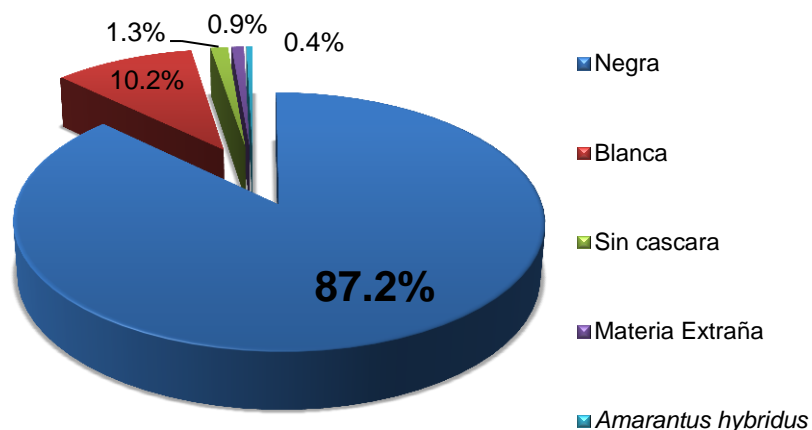
### 6.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS SEMILLAS DE *S. hispanica*

Las semillas de *Salvia hispanica* (chia) presentan una forma oval con aspecto liso, brillante y de color pardo grisáceo o blanco. Debido al tamaño de la semilla, la separación de la materia extraña resulto complicada, por lo cual, no fue posible realizar la limpieza de la semilla. Sin embargo, una muestra de las semillas de chia se clasifico de acuerdo a las siguientes características: Presencia o ausencia de cascara, color, materia extraña y semillas de otra especie (Figura 19).



**Figura 19.** Clasificación de una muestra de *S. hispanica*. a) Semilla Negra b) Semilla Blanca c) Semilla sin cascara d) Materia extraña e) Semilla *Amarantus hybridus*

La muestra analizada presento un porcentaje mayor al 97.4% de semillas decía (blancas y negras), del cual, 87.2% corresponde a semillas de color negro y pequeños porcentajes de materia extraña y semillas de *Amarantus hybridus* (Figura 20).



**Figura 20.** Composición porcentual de los constituyentes en el lote de semilla de *Salvia hispanica*

Las dimensiones de las semillas de chia analizadas se muestran en la Tabla 6. Las diferencias de peso y dimensiones promedio de las semillas blancas no presentan variación significativa con respecto al de las semillas negras.

**Tabla 6.** Caracterización física de la semilla *Salvia hispanica*

	Semilla negra	Semilla blanca
<b>Peso</b>	0.0011 ± 0.0003	0.0012 ± 0.0003
<b>Largo</b>	1.9200 ± 0.1332	1.9642 ± 0.0837
<b>Ancho</b>	1.1900 ± 0.1014	1.1858 ± 0.1123
<b>Grosor</b>	0.8592 ± 0.0423	0.8692 ± 0.0352

Por otro lado, el análisis de humedad de la muestra de semillas de chia presento un valor de 6.21%, el cual es inferior al porcentaje permitido (7.87%) para evitar en lo posible, el desarrollo de ranciamiento oxidativo del aceite contenido en las semillas (Mera, 2009).

## 6.2 EXTRACCIÓN DEL ACEITE DE *S. hispanica*

Se ha señalado que el rendimiento de la extracción del aceite de la semilla de *S. hispanica* depende de la técnica y temperatura empleadas. Se ha obtenido un rendimiento de 20.3% al utilizar extracción por compresión, mientras que la extracción por Soxhlet produce un mejor rendimiento (33.6%), (Ixtaina et al., 2011).

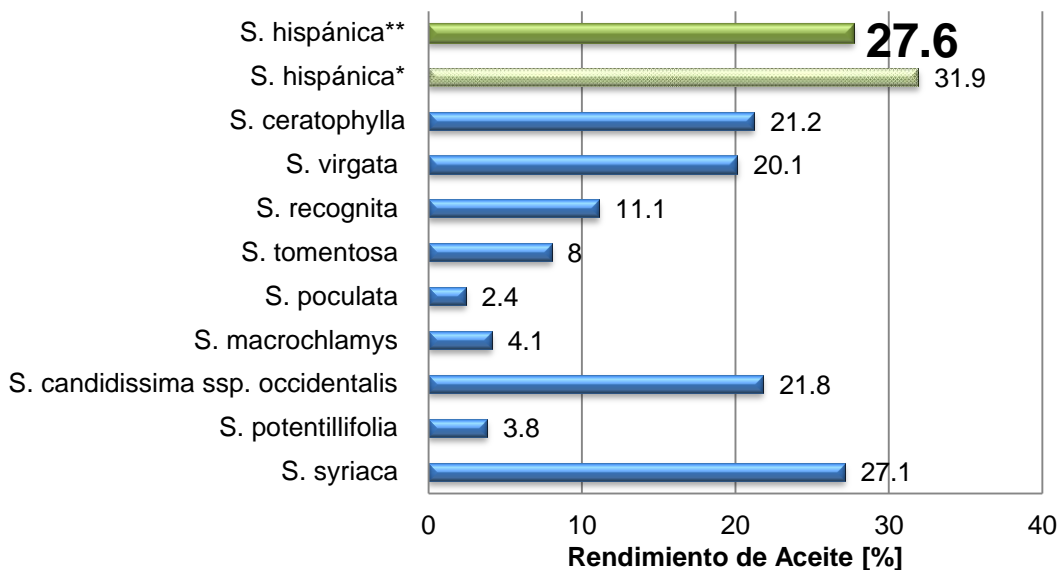
El rendimiento de aceite obtenido a partir de las semillas de *S. hispanica* fue de 27.6% y de 18.7% por los métodos Soxhlet y maceración respectivamente. (Tabla 7). Se observó que el rendimiento de la separación del aceite se vio afectado por la temperatura y el tiempo de extracción. Por una parte, el proceso de extracción con Soxhlet se realizó en un periodo de 18 horas a una temperatura de 60 °C, mientras que el método de maceración tuvo un menor rendimiento, debido a que, aunque se efectuó en un tiempo mayor (9 días), la temperatura de extracción fue menor (temperatura ambiente).

**Tabla 7.** Extracción de Aceite (Soxhlet y maceración) de la semilla *Salvia hispanica*

Tratamiento	Soxhlet	Maceración
<b>Peso de la semilla (g)</b>	49.0525	2542.50
<b>Volumen del Aceite (mL)</b>	17.3	470.0
<b>Peso del Aceite (g)</b>	12.7208	439.18
<b>Rendimiento bh (%)</b>	25.9	17.3
<b>Rendimiento bs (%)</b>	27.6	18.7

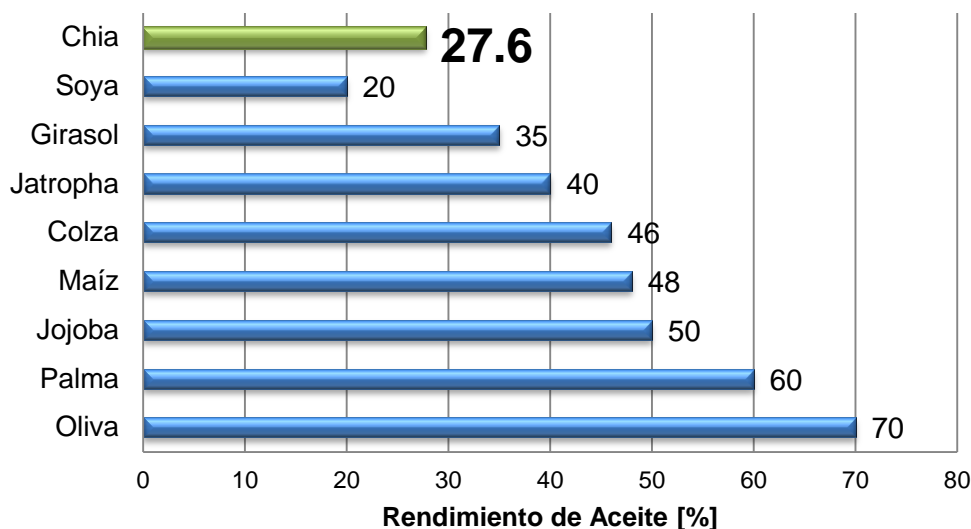
Por otro lado, se ha observado que la semilla de *Salvia hispanica*, presenta el mayor contenido de aceite en comparación con las semillas de otras Salvias (Ahmet, et al., 2006), ver Figura 21. En un estudio realizado recientemente sobre semillas de chia de diferentes regiones de México, se encontró que el contenido de aceite oscila entre 24.33 y 31.9% (Campanilla y Martínez, 2012). En el caso particular de la semilla estudiada en el presente trabajo, se encontró que el porcentaje de aceite obtenido a partir de la muestra analizada fue de 27.65%, el

cual se encuentra arriba del límite inferior al observado en una muestra de semilla de chia mexicana, ver Figura 21.



**Figura 21.** Porcentaje de aceite en algunas especies del género *Salvia*.  
[\*] Extracción promedio de aceite de chia; [\*\*] Rendimiento Practico

Cabe mencionar, que si se compara la producción de aceite de semilla de *Salvia hispánica* con la de otras fuentes de origen vegetal, su valor es razonablemente alto y puede considerarse como una fuente importante de materia prima para la obtención de biodiesel, compitiendo por ejemplo, con el aceite de soya, de girasol o jatropha (Karmakar, *et al.*, 2010; Balat, 2011), ver Figura 22.



**Figura 22.** Rendimiento en producción de Aceite de Semilla de Chia y otras especies

### 6.3 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE DE *S. hispanica*

Para que un aceite represente una fuente alternativa para la producción de biodiesel debe tener ciertas propiedades. Una de las principales características, es que la producción del aceite no interfiera con la producción de alimentos de consumo básico (Olivia, *et al.*, 2010). Este es el caso del aceite proveniente de la *Salvia hispanica*, pues la planta de chia tolera la sequía y suelos con baja o mediana fertilidad, ya que se cultiva en suelos arenoso-limosos (Campanilla y Martinez, 2012). Por otra parte, el biodiesel adquiere ciertas propiedades de la materia prima de la cual se obtiene, por lo cual es conveniente evaluar las características fisicoquímicas del aceite (Singh & Singh, 2010). En la Tabla 8, se presentan las propiedades de los aceites obtenidos a partir de la semilla de *Salvia hispanica*, empleando los métodos de extracción con Soxhlet y maceración. También se muestran las propiedades determinadas para el aceite comercial de canola (aceite marca “Maravilla”).

**Tabla 8.** Pruebas de calidad para el análisis químico del Aceite

Tratamiento	Soxhlet	Maceración	Aceite comercial Maravilla*
<b>Índice de Acidez (mg KOH/g muestra)</b>	0.96 ± 0.04	0.83 ± 0.05	0.14 ± 0.03
<b>Índice de Yodo (gl<sub>2</sub>/g muestra)</b>	218.67 ± 2.47	210.97 ± 1.86	123.90 ± 2.78
<b>Densidad relativa (g/cm<sub>3</sub> a 20°C)</b>	0.9278	0.9288	0.9163
<b>Viscosidad (mm<sub>2</sub>/s a 40°C)</b>	23.725	24.018	36.021
<b>Entalpía de Combustión (kJ/g muestra.)</b>	39.11 ± 0.20	38.95 ± 0.12	39.82 ± 0.14

(\*) datos obtenidos de pruebas realizadas en el laboratorio

Como ya se mencionó anteriormente, el índice de acidez está directamente relacionado con la cantidad de ácidos libres en el aceite. Un índice de acidez alto (mayor a 3 mgKOH/g de aceite) promueve la producción de jabones, disminuyendo el rendimiento del proceso de obtención del biodiesel. Si el contenido de ácidos grasos es mayor al 3% es necesario realizar un



pretratamiento del aceite, con metanol catalizado con ácido sulfúrico (esterificación), para disminuir la cantidad de ácidos grasos libres. El aceite obtenido de la semilla de *Salvia hispanica* presenta una acidez menor al 3% (de 0.83 a 0.96%), por lo que no es necesario someterlo a pretratamiento ácido con metanol para obtener un buen rendimiento en la reacción de obtención de biodiesel.

Con respecto al índice de yodo del aceite extraído de la *S. hispanica*, se puede observar que para ambos métodos de extracción (Soxhlet y maceración) un valor superior a 200  $\text{gI}^2/\text{g}$  muestra (Tabla 8), lo cual permite suponer un alto grado de insaturaciones y que se tendrá un punto de congelación menor que los aceites convencionales (canola, girasol, maíz, etc), permitiendo su uso en climas fríos. Sin embargo, el número alto de insaturaciones promueve la oxidación del aceite al someterlo a altas temperaturas, induciendo su rápida degradación y la formación de depósitos en el motor.

En la tabla 9, también es posible observar los valores de densidad de los aceites de semilla de *S. hispanica* obtenidos por los métodos de Soxhlet y maceración. Los valores de densidad de los aceites de chia obtenidos por ambos métodos, son similares (0.9278 y 0.9288  $\text{g}/\text{cm}^3$ ), pero son ligeramente mayores a la densidad observada en el aceite comercial (0.9163  $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

Por otra parte, los valores de viscosidad para los aceites obtenidos de la semilla chia son: 23.725 y 24.018  $\text{mm}^2/\text{s}$  para los métodos de Soxhlet y maceración respectivamente.

La entalpía de combustión es otra propiedad relevante en un aceite, la cual está asociada a la energía contenida en un gramo de aceite al someterse al proceso de combustión para producir  $\text{CO}_2$  y agua. La entalpía de combustión para los aceites extraídos de la semilla de chia por los métodos de Soxhlet y maceración, fue de  $39.11 \pm 0.20$  y  $38.95 \pm 0.12$   $\text{kJ}/\text{g}$ , respectivamente. Estos valores son similares a los observados para los aceites de la Tabla 9, pero es inferior al obtenido de una muestra de diésel de petróleo comercial (45.48  $\text{kJ}/\text{g}$ ).

Una comparación de las propiedades obtenidas del aceite de la semilla de Chia por el método de maceración (densidad, viscosidad y entalpía de combustión) con las presentadas en la Tabla 9, muestra que los valores de densidad son muy parecidos a los reportados de otras fuentes (son cercanos a 0.91 g/cm<sup>3</sup>). Por otro lado, el valor de viscosidad para el aceite de chia es alto comparado con la del diesel de petróleo (2.4181 mm<sup>2</sup>/s) y bajo (24.018 mm<sup>2</sup>/s) con respecto a la viscosidad de los aceites comunes (entre 28.87 y 44.79 mm<sup>2</sup>/s). Lo anterior sugiere un alto contenido de ácidos grasos insaturados (Omega-6 y Omega-3) (Ayerza & Coates, 2006).

**Tabla 9.** Propiedades de aceites vegetales y diésel de Petróleo

<b>Aceite vegetal</b>	<b>Densidad relativa</b> (g/cm <sup>3</sup> a 20°C)	<b>Viscosidad</b> (mm <sup>2</sup> /s a 40°C)	<b>Entalpía de Combustión</b> (kJ/gmtra.)
Maíz	0.9095	30.75	39.5
Jatropha	0.9400	33.90	38.65
Canola	0.9115	34.72	39.7
Girasol	0.9161	35.84	39.6
Soya	0.9138	28.87	39.6
Palma	0.9180	44.79	---
<b>Chia*</b>	<b>0.9288</b>	<b>24.018</b>	<b>38.95 ± 0.12</b>
Diésel de Petróleo*	0.8256	2.4181	45.48

(\*) Determinados en el estudio.

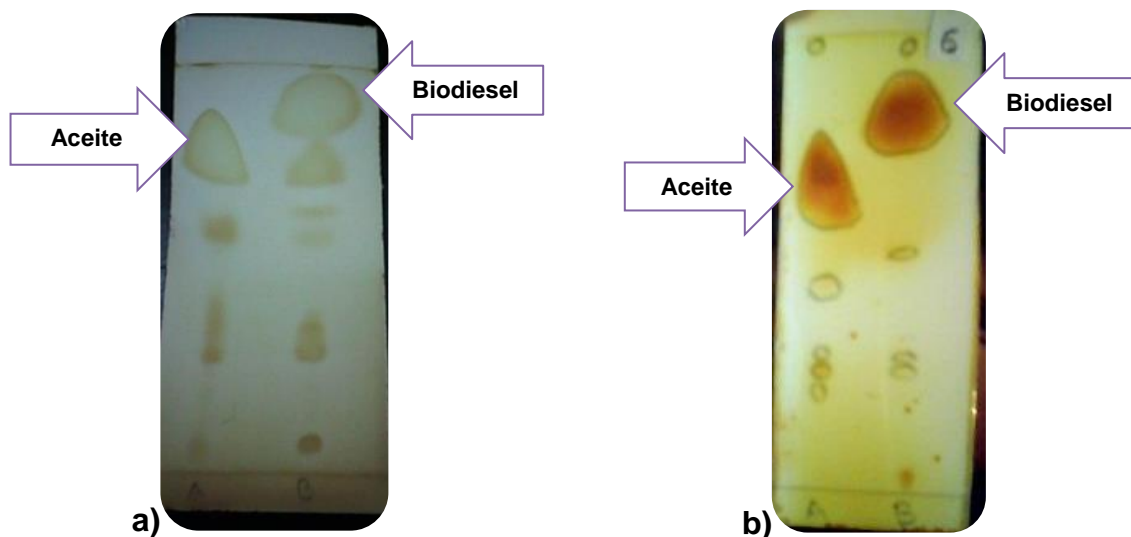
## 6.4 OBTENCIÓN DE BIODIESEL.

Para obtener el biodiesel a partir del aceite de semilla de Chia se realizó la reacción de transesterificación con metanol mediante catálisis alcalina empleando hidróxido de potasio, este método es el más utilizado debido a que produce altos rendimientos de biodiesel (Mbarawa y Enweremadu, 2009). Considerando que el índice de acidez del aceite de chia es inferior a 3% no fue necesario hacer un pre-tratamiento de este aceite. Para favorecer la formación de biodiesel se utilizó un exceso de metanol, empleando una relación molar de triglicérido/metanol de [1:12].



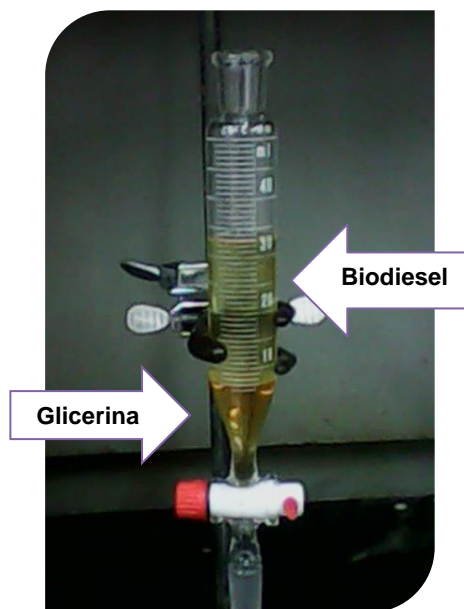
**Figura 23.** Apariencia de la Reacción de Transesterificación

La reacción se calentó a reflujo, a una temperatura de 60°C con agitación constante (Figura 23) durante dos horas, realizándose un monitoreo cada 30min empleando cromatografía en capa delgada y como eluyente una mezcla de Hex/ AcOEt/ AcOH [9: 1: 0.1] para verificar la formación de esteres metílicos. En la Figura 24 se observa un mayor desplazamiento del biodiesel con respecto al del aceite, lo cual se debe a una menor polaridad del biocombustible y probablemente contribuya su menor peso molecular. Adicionalmente, a partir de la mancha correspondiente al biodiesel se obtuvo un valor de  $R_f = 0.82$ , el cual concuerda con el dato reportado para mezclas de esteres metílicos ( $R_f = 0.83$ ) (Fontana, et al, 2009).



**Figura 24.** Seguimiento de la reacción de Transesterificación para aceite de Chia obtenida por maceración. Eluyente Hex/ AcOEt/ AcOH [9: 1: 0.1] revelada con yodo.  
 a) Placa a 30min de reacción, b) Placa a las 3 horas de reacción

Una vez finalizada la reacción, la mezcla obtenida se pasó a un embudo de separación, dejando se dejó reposar 12 horas para permitir la separación de la glicerina, la cual se depositó en la parte inferior del embudo debido a su mayor densidad (Figura 25).



**Figura 25.** Apariencia física del Biodiesel obtenido por el aceite de Soxhlet y su glicerina una vez finalizada la reacción

Como puede observarse en la Tabla 10, el aceite obtenido por maceración produjo un mayor rendimiento de biodiesel (95%) que el aceite obtenido por Soxhlet (90%). Ambos aceites de chia fueron más eficientes en la obtención de biodiesel que el aceite comercial de canola marca “Maravilla” (80%), lo que hace suponer que el aceite de *S. hispanica* es una opción viable para la producción de biodiesel.

**Tabla 10.** Obtención de Biodiesel del Aceite de semilla *Salvia hispanica*

<b>Tratamiento</b>	<b>Soxhlet</b>	<b>Maceración</b>	<b>Aceite Comercial (Maravilla)**</b>
<b>Aceite (mL)</b>	20	200	25
<b>Biodiesel (mL)</b>	18	190	20
<b>*Rendimiento (%)</b>	<b>90</b>	<b>95</b>	<b>80</b>

(\* )dato en relación al volumen del biodiesel y el aceite;

(\*\*) datos obtenidos de pruebas realizadas en el laboratorio

## 6.5 CARACTERIZACIÓN DEL BIODIESEL

Para considerar al biodiesel obtenido a partir del aceite de *S. hispanica* como un biocombustible alternativo viable, se obtuvieron algunas de sus propiedades principales para ser comparadas con las del biodiesel petroquímico, de otros materiales y los parámetros marcados por las normas europeas (Tabla 11).

**Tabla 11.** Pruebas de calidad para el análisis químico del Biodiesel

Tratamiento	Soxhlet	Maceración	*Biodiesel aceite "Maravilla"	Norma Europea (EN 14214/07)
<b>Índice de Acidez</b> (mg KOH/g muestra)	0.32 ± 0.02	0.33 ± 0.03	0.29 ± 0.03	0.5 máx.
<b>Índice de Yodo</b> (gI <sub>2</sub> /g muestra)	281.49 ± 21.34	291.66 ± 6.07	123.51 ± 1.50	120 máx.
<b>Densidad relativa</b> (g/cm <sup>3</sup> a 20°C)	0.8941	0.8901	0.8777	0.860 – 0.900 (15°C)
<b>Viscosidad</b> (mm <sup>2</sup> /s a 40°C)	3.94	3.6243	4.4112	3.5 – 5.0
<b>Entalpía de Combustión</b> (kJ/gmtra.)	39.23 ± 0.24	39.19 ± 0.22	40.20 ± 0.18	39.99 ± 0.18

(\*) datos obtenidos de pruebas realizadas en el laboratorio

### ☞ Índice de acidez

Los valores obtenidos del índice de acidez para el biodiesel obtenido a partir del aceite de *S. hispanica* (Soxhlet y maceración) y el del aceite comercial de canola se muestran en la Tabla 11. Como se puede observar los valores de índice de acidez de las muestras mencionadas presentan un valor similar que cumplen con las especificaciones de la Norma Europea. Es importante hacer notar, que el índice de acidez representa un parámetro del grado de envejecimiento del combustible durante su almacenamiento, debido a que su degradación aumenta el nivel de acidez. Un valor alto de acidez del biodiesel induce la corrosión del recipiente metálico que lo contiene y la formación de sedimentos en el motor de combustión interna. Por tal razón, el índice de acidez se ve restringido en las especificaciones de un biodiesel aceptable para su consumo (Tariq, *et al.*, 2012).

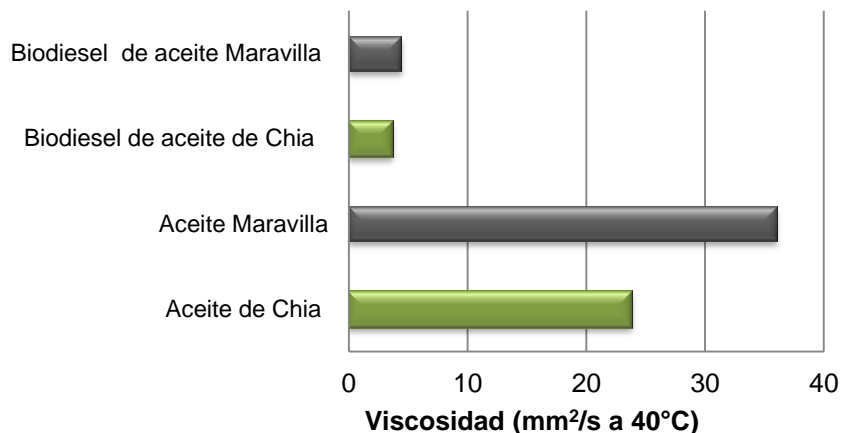
### ☞ Índice de yodo

El índice de yodo es una medida de la cantidad de yodo que reacciona con los dobles enlaces presentes en el biodiesel, un valor alto indica un elevado grado de instauración y una baja estabilidad del biodiesel (Enweremadu & Mbarawa, 2009). Por lo anterior, la norma EN 14214/07 especifica que el límite sugerido de índice de yodo debe ser menor a 120  $\text{gI}^2/\text{g}$  muestra, un valor superior implica el uso de aditivos como el uso de antioxidantes sintéticos fenólicos o de origen natural que contienen carotenoides y tocoferoles (Sierra, 2012).

Considerando el índice de yodo determinado para el biodiesel obtenido del aceite de *Salvia hispanica*, por los métodos de Soxhlet y maceración, se observan valores muy superiores a los límites establecidos en la norma europea mencionada arriba. Esto implica la presencia de un alto contenido de dobles enlaces en el biodiesel del aceite de chia y la posibilidad de su rápida degradación, haciendo a este biodiesel como una alternativa poco viable.

### ☞ Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es la propiedad de un líquido relacionada con su oposición a fluir debido a su resistencia interna. El motivo principal para realizar la reacción de transesterificación de los triglicéridos de un aceite, es la obtención de sus esteres metílicos con el propósito de reducir la viscosidad (Atadashi, et al., 2013). En el caso particular de la viscosidad del aceite de chia, esta fue disminuida en forma drástica, pasando de 23.72 a 3.6  $\text{mm}^2/\text{s}$ , casi a una sexta parte de su valor original, ver Figura 26.



**Figura 26.** Variación de la viscosidad después de la reacción de transesterificación

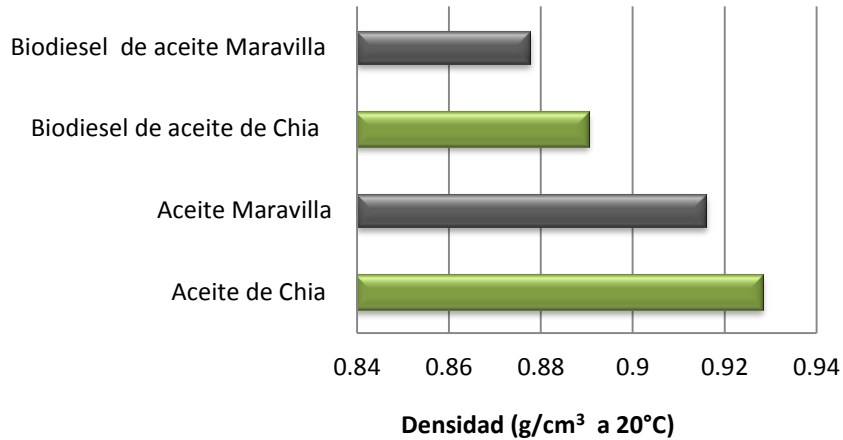
Los datos obtenidos de viscosidad cinemática para el biodiesel de *S. hispanica* por los métodos de Soxhlet y maceración son similares (3.94 y 3.62 mm<sup>2</sup>/s respectivamente), ambas muestras cumplen con lo establecido por la Norma Europea (Tabla 11), al igual que la muestra del aceite comercial (4.41 mm<sup>2</sup>/s).

Se ha observado que valores altos de viscosidad producen una mala combustión y formación de depósitos, así como un desgaste de la bomba de los inyectores provocando el deterioro del motor.

#### ☞ Densidad Relativa

La densidad relativa del biodiesel obtenido de los aceites de *S. hispanica* (Soxhlet y maceración), fue muy similar (0.8941 y 0.8901 g/cm<sup>3</sup> respectivamente), pero superior a la densidad del biodiesel obtenido del aceite comercial de canola (0.8777 g/cm<sup>3</sup>), ver Figura 27. Estos valores se encuentran dentro de los límites establecidos por la Norma Europea (0.860-0.900 g/cm<sup>3</sup>). La mayor densidad del biodiesel obtenido del aceite de chia podría deberse a un mayor grado de instauración de éste, ya que se ha observado que un alto índice de instauración conduce a una densidad elevada (Bailey, 1984; Enweremadu & Mbarawa, 2009) Por otra parte, es importante mencionar que la densidad de los aceites empleados (aceite de Canola y de chia) disminuyen su densidad (0.9288 y 0.9163 g/cm<sup>3</sup> respectivamente) después de la reacción de transesterificación para producir sus correspondientes biocombustibles, ver Figura 27.

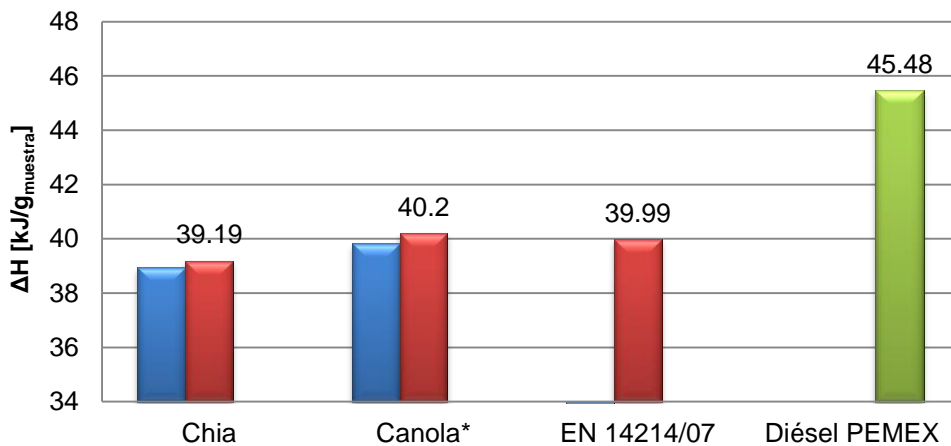




**Figura 27.** Variación de la densidad después de la reacción de transesterificación

### ☞ Entalpía de combustión

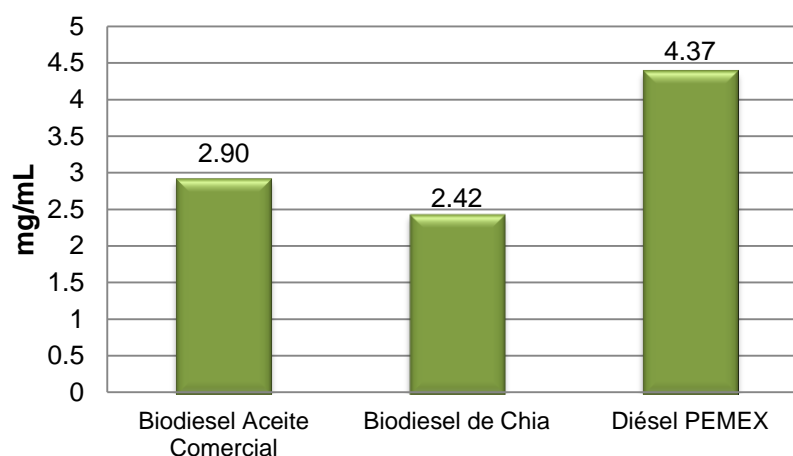
Otro de los puntos a evaluar del biodiesel de *S. hispanica*, es la entalpía de Combustión, este parámetro indica la energía liberada al someterse a combustión 1g de muestra a una presión y temperatura controlada para obtener CO<sub>2</sub> y agua (Bezergianni & Dimitriadis, 2013). En la Figura 28, se presentan los valores de entalpía de combustión del biodiesel obtenido del aceite de maceración de la semilla de *S. hispanica* ( $39.2 \pm 0.22$  kJ/g muestra), se observa que este valor es menor al del biodiesel de aceite de Canola.



**Figura 28.** Entalpía de Combustión de Aceite y Biodiesel de Chia  
[\*] Se empleó Aceite Maravilla como materia prima

En la misma Figura 28, se observa que los valores de entalpia de combustión del biodiesel de *S. hispanica* es menor que el de diésel fósil y ligeramente menor al valor que marca la norma europea EN14214/07. Este valor indica que el biodiesel obtenido a partir de la semilla de chia es viable y tendría una buena eficiencia en el motor.

Por otra parte, los valores de acidez de combustión dan una idea de la acidez producida durante un proceso de combustión. En la Figura 29 que la acidez producida por el biodiesel de chia es casi la mitad del que se produce por el diésel fósil y ligeramente menor al producido por el biodiesel obtenido del aceite de canola.

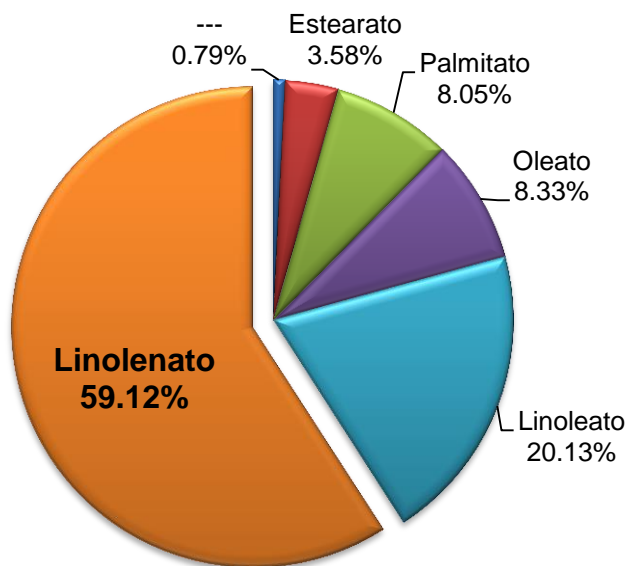


**Figura 29.** Acidez de combustión para Biodiesel de Aceite Comercial, Biodiesel de aceite de Chia y diésel PEMEX

#### 🔍 Perfil de Esteres Metílicos

Para conocer el perfil de Estere Metílicos del biodiesel obtenido del aceite de semilla de *Salvia hiapanica* y considerarlo como un biocombustible viable, se realizó una Cromatografía de Gases a una muestra de este biodiesel (Anexo 4). Los resultados expuestos en la Figura 30, señalan que la proporción de esterres metílicos insaturados presentes en el Biodiesel del aceite de Chia es muy elevado con respecto a las muestras de biodiesel provenientes de aceites saturados,

considerando que los esteres metílicos correspondientes al ácido linolenico se encuentran en mayor proporción (59.12%).



**Figura 30.** Relación Porcentual de Esteres Metílicos obtenidos de la transesterificación del Aceite de Chia. Cromatograma en Anexo 4

La comparación del perfil de esteres metílicos de Ácidos Grasos Presentes en el biodiesel de aceite de Chia con los perfiles de biodiesel producido a partir de otras especies vegetales (Tabla 12), muestra que el biodiesel obtenido de este aceite tiene porcentajes similares de ácido oleico y linoleico, pero un alto porcentaje de ácido Linolenico.

El alto porcentaje observado de ácidos insaturados en el biodiesel procedente de la semilla de chia podría representar un problema en este biocombustible, un alto contenido de poliinsaturaciones, implicaría una degradación oxidativa, conduciendo a la formación de compuestos de descomposición, tales como ácidos de bajo peso molecular, aldehídos, ésteres, cetonas, peróxidos, y alcoholes (Chen, *et al.*, 2013). En contra parte, la alta concentración de ácidos grasos insaturados podría traer ventajas, pues un índice alto de insaturaciones favorecería la fluidez del biodiesel en climas fríos, evitando formación de sedimentos en el motor a bajas temperaturas.

**Tabla 12.** Perfiles de esteres metílicos de ácidos grasos encontrados en aceites destinados a la producción de Biodiesel

	Oleato (%)	Linoleato (%)	Linolenato (%)
<b>Chia</b>	<b>8.3</b>	<b>20.1</b>	<b>59.1</b>
Coco	6.8	2.1	0.1
Jatropha	40.4	36.2	0.3
Canola	<b>60.4</b>	21.2	9.6
Palma	41.3	9.5	0.3
Grasa amarilla	44.6	25.1	1.1
Maíz	26.6	<b>58.7</b>	0.6
Soja	23.7	53.8	5.9

[\*] Datos experimentales.

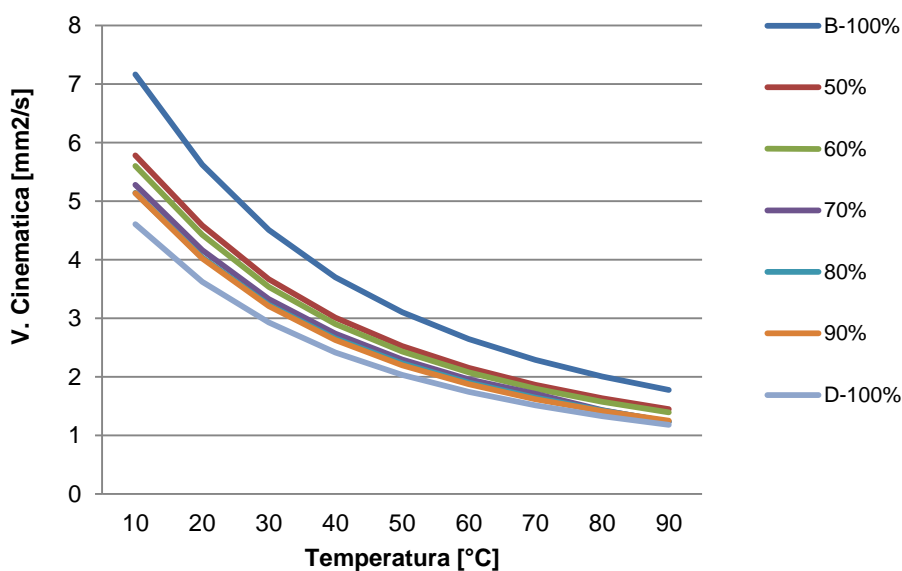
#### ☞ Pureza del Biodiesel (RMN <sup>1</sup>H)

Para confirmar la presencia de los esteres metílicos de ácidos grasos y de las impurezas presentes, se realizó un análisis de Resonancia Magnética Nuclear (RMN <sup>1</sup>H) a las muestras de aceite de chia y del correspondiente biodiesel obtenido (Anexos 2 y 3). En el espectros de RMN del aceite, es posible observar las señales correspondientes al grupo glicerol y la desaparición de estas en el espectro del biodiesel obtenido, en su lugar se encuentra la señal producida por el grupo metóxi (singulete).

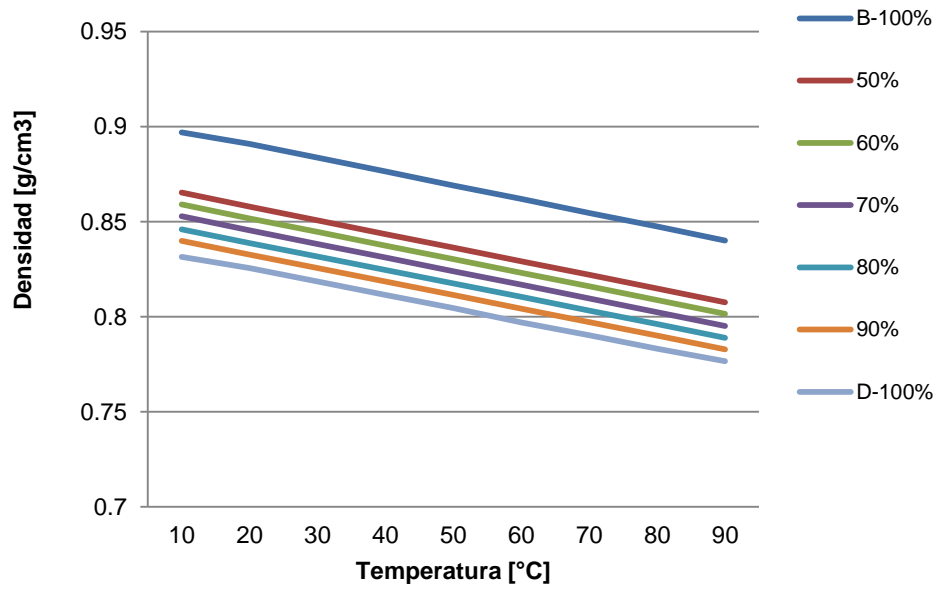
## 6.6 MEZCLAS DIESEL-BIODIESEL DE ACEITE DE CHIA

Es una práctica común emplear el biodiesel de una determinada fuente vegetal o animal mezclado en pequeñas proporciones con diésel fósil. Las normas establecidas para el uso del biodiesel puro también se aplican para las mezclas de diésel-biodiesel (Chen, *et al.*, 2013).

Para conocer el comportamiento del biodiesel de aceite de chia mezclado con diésel de petróleo, se prepararon 5 mezclas de diésel-biodiesel (B10, B20, B30, B40 y B50), a las cuales se les determinó su viscosidad y densidad relativa en un intervalo de temperaturas de 10 a 90 °C, con incrementos de 10°. Los resultados obtenidos se presentan en el Anexo 5. Las Figura 31 y Figura 32, muestran el comportamiento de viscosidad y densidad relativa respectivamente, de las mezclas citadas arriba y de sus componentes puros al variar la temperatura.



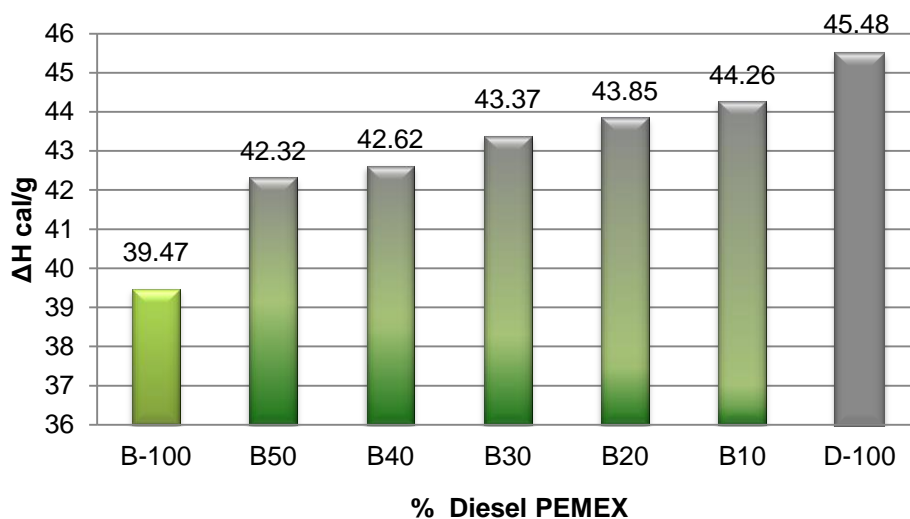
**Figura 31.** Variación de la viscosidad de las mezclas y de los compuestos puros durante cambios de temperatura



**Figura 32.** Variación de la densidad relativa de las mezclas y de los compuestos puros durante cambios de temperatura

Como era de esperarse, los valores de densidad relativa y viscosidad disminuyen con el aumento de las temperaturas para todas las mezclas y sus componentes puros. En el caso de la densidad, se puede observar que los datos siguen una tendencia lineal, mientras que los valores de viscosidad cinemática disminuyen en forma asintótica (Figura 31 y Figura 32).

Uno de los beneficios de elaborar mezclas diésel-biodiésel, está relacionado con el aumento de su poder térmico, la Figura 33 muestra que los valores de las mezclas B10 y B20 se asemejan más al calor liberado por el diésel de petróleo puro. Por otra parte, es clara la diferencia entre la entalpia de combustión del Biodiésel obtenido del aceite de chia puro y del Diésel de petróleo, siendo más alto el valor de este último.



**Figura 33.** Entalpía de Combustión de Mezclas [Biodiesel - Diésel PEMEX]

Es importante analizar los valores de densidad y viscosidad para cada mezcla diésel-biodiesel a temperaturas de 20 y 40 °C respectivamente, considerando los estándares que señalan las normas europeas (EN 590; para mezclas B7, densidad 0.820-0.845 g/cm<sup>3</sup> y viscosidad 2.0-4.5 mm<sup>2</sup>/s) y americanas (ASTM; viscosidad 1.09 - 4.01 mm<sup>2</sup>/s para mezclas de B6 a B20), ver tabla 14. En esta tabla se observa, que la densidad de las mezclas B10 y B20 entran en los límites aceptados por las normas europeas, mientras que las mezclas restantes exceden el valor permitido. Por otra parte, todos los valores de viscosidad de las mezclas del biodiesel de *Salvia hispanica* con diésel petroquímico se encuentran dentro de los límites establecidos en ambas normas.

**Tabla 13.** Especificaciones para mezclas de biodiesel de aceite de Chia con diésel PEMEX

Propiedad	*EN 590	B100	B10	B20	B30	B40	B50	Diésel
Densidad g / cm <sup>3</sup> a 20 °C	0.820-0.845	0,8909	<b>0,8326</b>	<b>0,8388</b>	0,8454	0,8517	0,8579	<b>0,8256</b>
Viscosidad mm <sup>2</sup> /s a 40 °C	2.0-4.5	3,7029	<b>2,6287</b>	<b>2,6556</b>	2,7382	2,9032	3,0118	<b>2,4181</b>

[\*] La norma referida en la tabla aplica para diésel y a mezclas B7 a 15 °C, pero la ASTM D7467 señala que las mezclas de B6 a B20 deben de tener un valor de viscosidad 1.09-4.01 mm<sup>2</sup>/s.

## 6.7 CARACTERIZACIÓN DEL BAGAZO DE LA SEMILLA DE *S. hispanica*.

Con la finalidad de aprovechar los residuos generados durante el proceso de extracción del aceite de la semilla de *Salvia hispanica*, se realizó un análisis del bagazo para detectar la posible presencia de péptidos y ciclopeptidos. Estos últimos poseen una amplia gama de aplicaciones, ya que presentan actividades como antibióticos, fitotoxícos, insecticidas o antivirales, etc (Insanu, *et al.*, 2012).

### ☞ Detección de aminoácidos y péptidos en el bagazo de *S. hispanica*

Se ha determinado la composición química de la semilla de Chia (Ayerza & Coates, 2006), la cual presenta una alta proporción de proteínas principalmente en el bagazo resultante de la extracción del aceite con hexano (Tabla 14).

**Tabla 14.** Composición Química de la semilla de Chia

Energía (Kcal/100g)	550
Proteína (g%)	20.70
Lípidos (g%)	30.4
Carbohidratos (g%)	40.29
Fibra (g%)	27.5

Para poder analizar el bagazo de la semilla de *Salvia hispanica* desengrasada obtenida por extracción con hexano, fue necesario hacer un proceso de maceración con metanol, obteniéndose un rendimiento de alrededor del 2.7% de extracto metanólico (Tabla 15). Una vez obtenido el mencionado extracto, una muestra de éste se mezcló con agua para efectuar una serie de extracciones líquido-líquido, empleando disolventes de distinta polaridad: hexano, diclorometano y acetato de etilo. En la Tabla 16, se muestran las diferentes cantidades de extracto obtenidas con cada disolvente.



**Tabla 15.** Extracción Metanólica de la semilla *S. hispanica* desengrasada

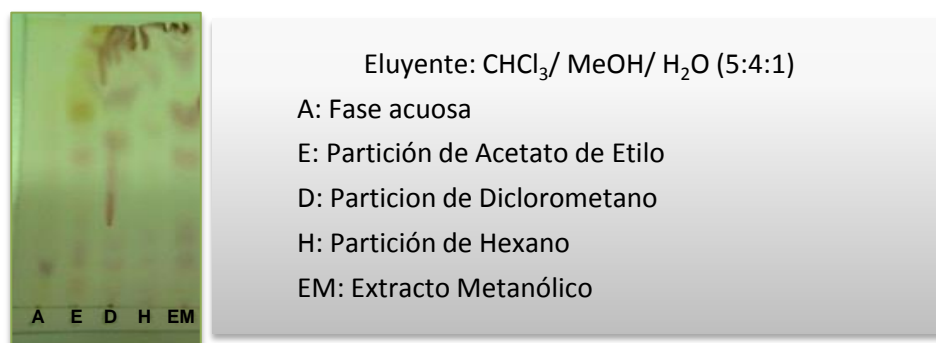
<b>Semilla Desgrasada (g)</b>	1970.10
<b>Extracto Metanólico (g)</b>	53.00
<b>Rendimiento (%)</b>	<b>2.69</b>

**Tabla 16.** Rendimiento en particiones para el extracto Metanólico del bagazo de *Salvia hispanica* obtenido por maceración.

Extractos de partición	Cantidad (g)	Porcentaje (%)	Extracto Metanólico (g)
<b>Partición hexano</b>	7.9550	<b>27.73</b>	28.690
<b>Partición de diclorometano</b>	0.2887	1.01	
<b>Partición de acetato de etilo</b>	0.0387	0.13	
<b>Acuoso</b>	9.4191	<b>32.83</b>	

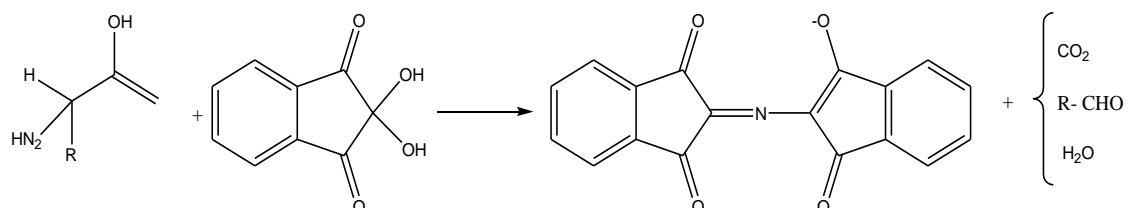
El 38% de la muestra se perdió al hacer la extracción con hexano, se formó una interface que limitó el proceso de extracción.

Las particiones obtenidas del extracto metanólico se analizaron mediante la técnica de cromatografía en capa delgada, empleando como eluyente una mezcla de disolventes  $\text{CHCl}_3/\text{MeOH}/\text{H}_2\text{O}$  (5:4:1), utilizando como revelador una solución de ninhidrina y calentamiento de las cromatoplasmas, para detectar la presencia de aminoácidos y péptidos Figura 34.



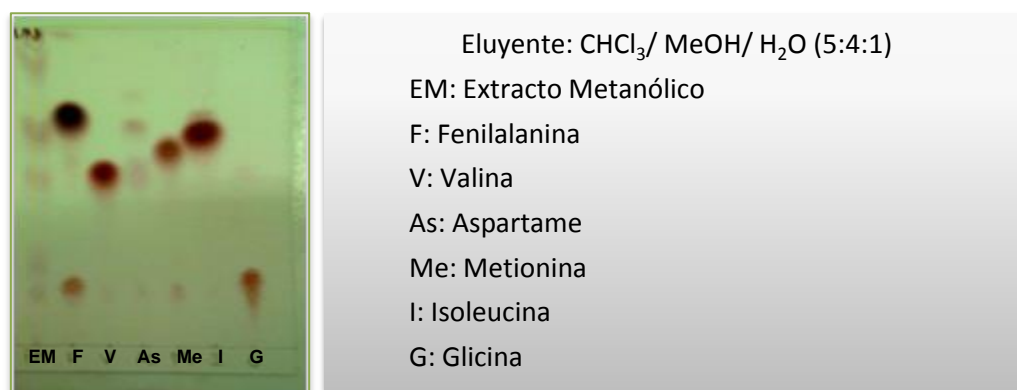
**Figura 34.** Cromatoplasma con ninhidrina del extracto metanólico y sus particiones

El ensayo anterior es positivo si existen grupos  $\alpha$ -NH<sub>2</sub> de aminoácidos terminales de los péptidos, estos grupos reaccionarán con la ninhidrina, dando una coloración rosa, ver Figura 35 (Mac Faddin, 2000).



**Figura 35.** Reacción de Ninhidrina y el Grupo amino terminal de péptidos

Adicionalmente, se realizaron ensayos de control, empleando los aminoácidos: Glicina, Valina, Metionina, Isoleucina y Fenilalanina y el péptido Aspartame. Posteriormente se realizó una cromatografía para detectar algunos aminoácidos en el extracto metanólico de la *S. hispanica*. En todos los casos, los ensayos fueron positivos para la presencia de los aminoácidos mencionados arriba, de acuerdo a los R<sub>f</sub> de las manchas (Figura 36).



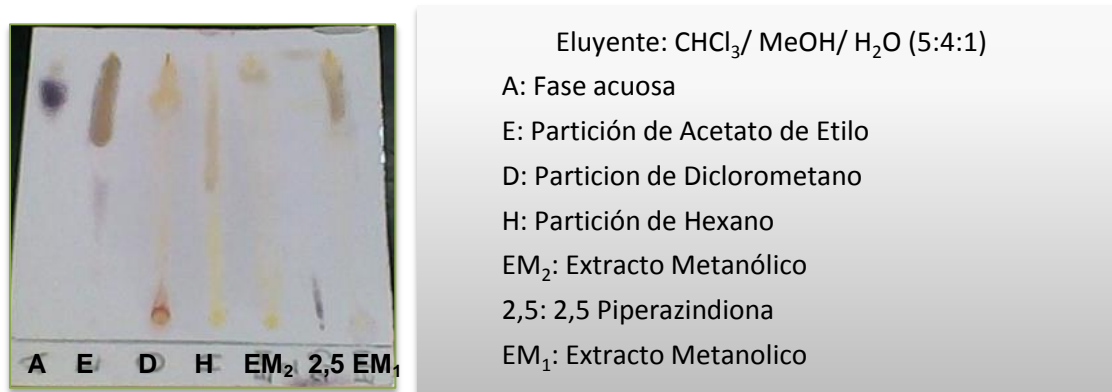
**Figura 36.** Cromatoplaqa del extracto metanólico y los aminoácidos de referencia después de ser revelada con una solución de Ninhidrina

### ☞ Detección ciclopéptidos en el bagazo de *S. hispanica*

Para la identificación de ciclopéptidos, en el extracto metanólico y sus respectivas particiones, se realizaron ensayos de detección empleando cromatografía en capa delgada y tomando como referencia al ciclopéptido 2,5-piperazindiona. Las cromatoplaqa se eluyeron con una mezcla de CHCl<sub>3</sub>/ MeOH/ H<sub>2</sub>O (5:4:1),

dejándolas reposar en una cámara de cloro por 20 min y después de evaporar totalmente el cloro en exceso, para evitar falsos positivos. Finalmente, las cromatoplasmas se reveló con una solución de o-tolidina, la aparición de una coloración azul indico la presencia de grupos amino de ciclopeptidos (Greig & Leaback, 1960).

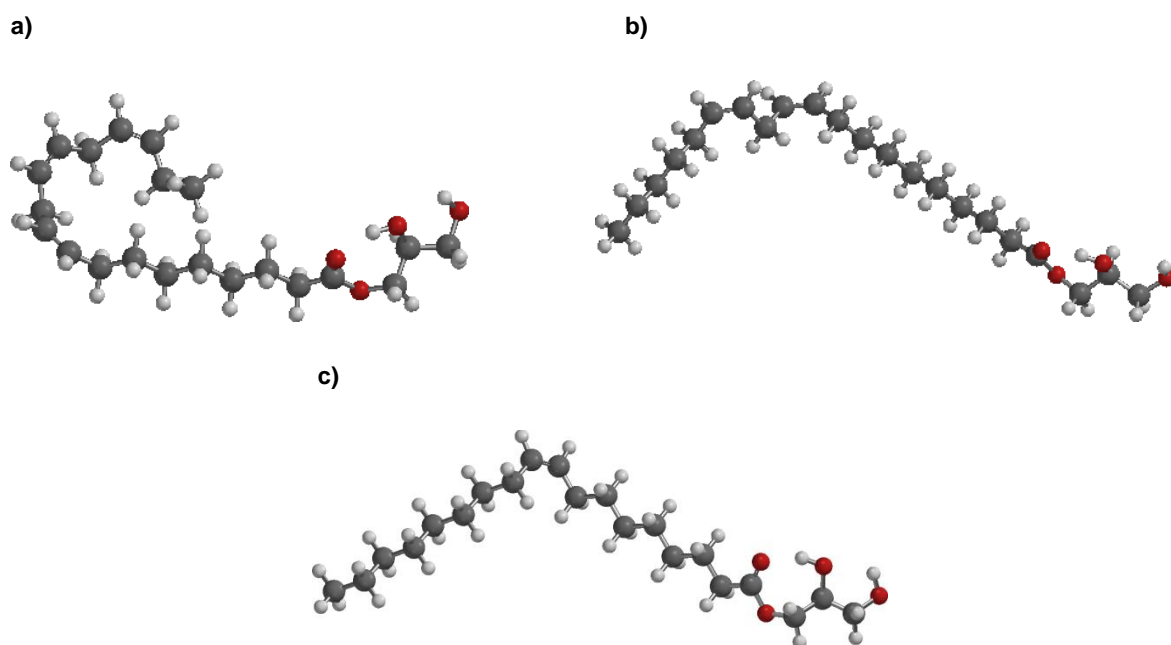
Es importante mencionar que los grupos amino de los ciclopeptidos en presencia de cloro forman cloraminas, las cuales al reaccionar con o-tolidina forman una coloración azul. De esta manera, los ciclopeptidos presentes en el extracto metanolico y en las particiones, se confirmó al observarse la coloración mencionada Figura 37.



**Figura 37.** Cromatoplasma del extracto metanolico y sus particiones después de ser revelada con una solución de O-tolidina

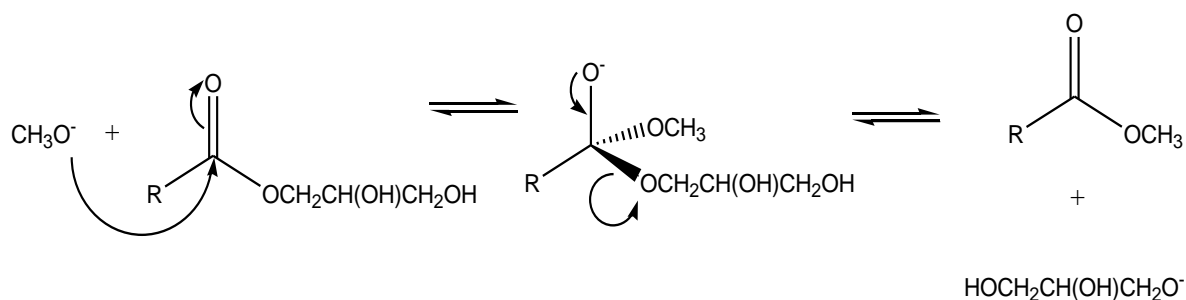
## 6.8 ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN DEL ACEITE DE CHIA

Se estudió el mecanismo de la transesterificación del aceite en medio básico utilizando como modelo los monoglicéridos de los ácidos grasos presentes en el aceite de chia (ácido oleico, linoleico y linolenico), ver Figura 38.



**Figura 38.** Estructura de Monoglicéridos correspondientes a los ácidos grasos más abundantes en el aceite destinado a la reacción de Transesterificación

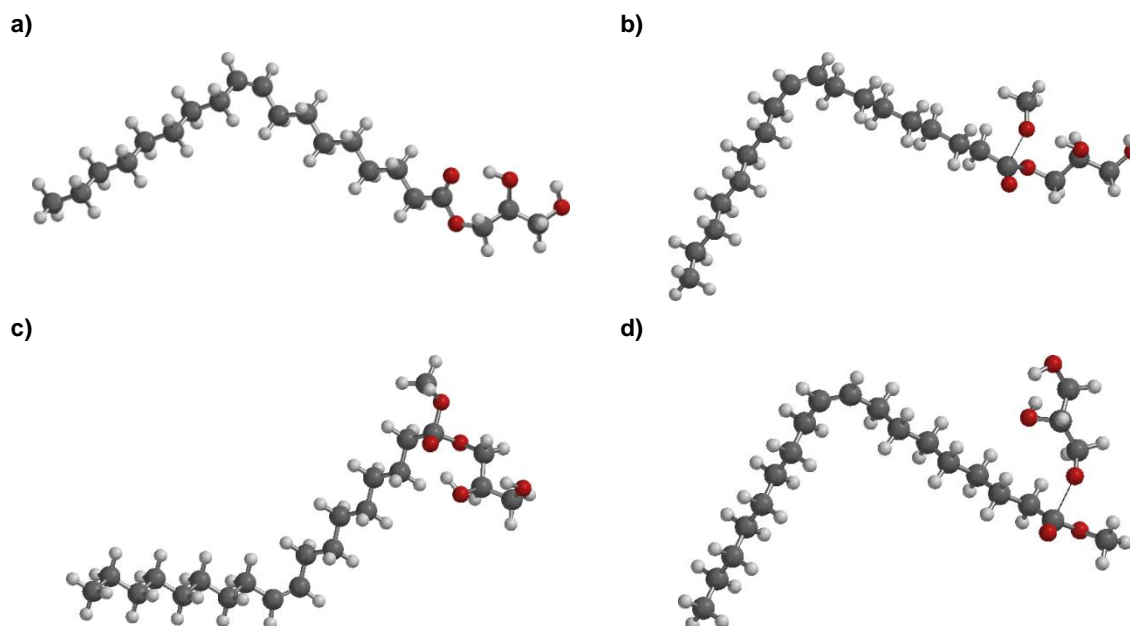
Se ha planteado que la reacción entre el anión metóxido y los monoglicéridos presentes en el aceite, sigue el mecanismo planteado en la Figura 39.



**Figura 39.** Interacción del metóxido con los ácidos grasos durante la reacción de Transesterificación. R=  $-C_{18}H_{37}$ ;  $-C_{18}H_{35}$ ;  $-C_{18}H_{33}$

En primer lugar, empleando el método semiempírico PM3, se optimizaron las geometrías de los puntos estacionarios en la superficie de energía potencial: reactivos, estado de transición de la adición (TS1), intermediario tetraédrico y el estado de transición de su descomposición (TS2).

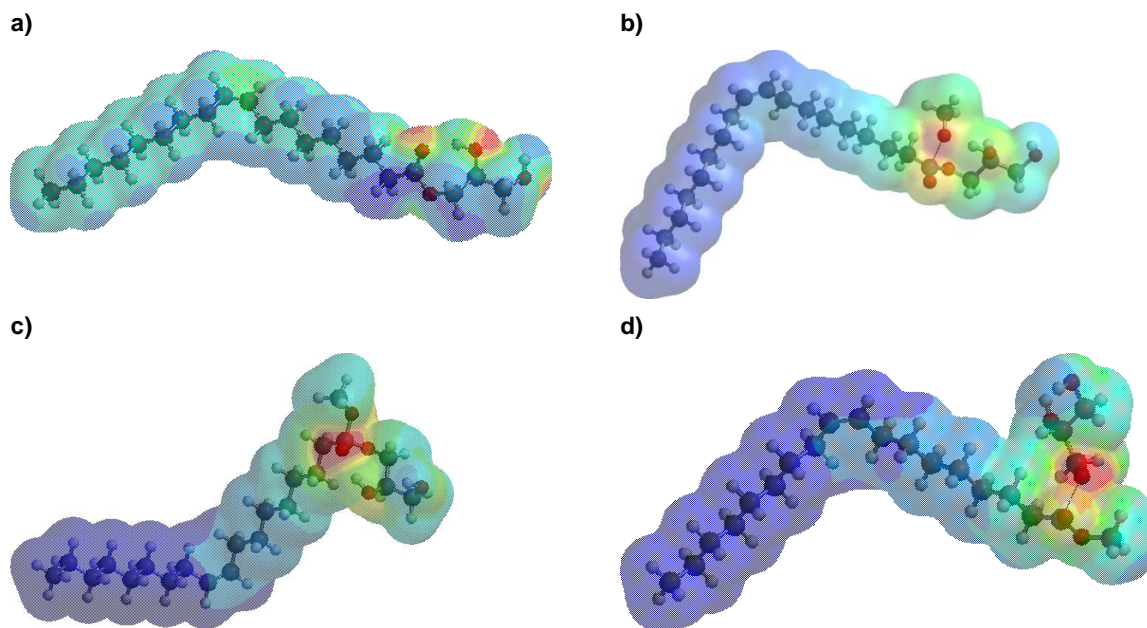
En la Figura 40, se muestran las geometrías optimizadas de los puntos estacionarios correspondientes a la adición del metóxido sobre el monoglicérido del ácido oleico.



**Figura 40.** Geometrías optimizadas de los puntos estacionarios en la reacción de transesterificación con metanol y el monoglicérido del ácido oleico en medio básico. a) Monoglicérido del Ácido Oleico; b) TS1; c) Intermediario Tetraédrico; d) TS2

La reacción de transesterificación incluye cambios sustanciales en la distribución electrónica de los átomos. En la Figura 41 se muestran los mapas de potencial electrostático de los estados estacionarios correspondientes a la reacción de sustitución efectuada entre el ion metóxido y el monoglicérido del ácido oleico. La alta densidad electrónica corresponde a zonas rojas mientras que las azules muestran deficiencia electrónica. En la estructura del TS1 es posible observar una zona de alta densidad electrónica que recae en el oxígeno del metóxido y en menor proporción en el oxígeno del carbonilo del éster. Sin embargo, en el

intermediario tetraédrico la mayor densidad electrónica se encuentra en el oxígeno que se encuentra en la parte del éster. Lo anterior nos da una idea de la forma en que los electrones se mueven durante el proceso de la adición. En el caso del estado de transición correspondiente a la descomposición de este intermediario tetraédrico (TS2), se puede observar un desplazamiento de la densidad electrónica hacia la base conjugada del glicerol.



**Figura 41.** Mapa de potencial electrostático de los puntos estacionarios en la reacción de transesterificación con metanol y el monoglicerido del ácido oleico en medio básico.  
a) Monoglicerido del Ácido Oleico; b) TS1; c) Intermediario Tetraédrico; d) TS2

Cabe mencionar, que si bien, los cálculos semiempíricos realizados en este trabajo fueron capaces de aclarar algunos puntos importantes del mecanismo de transesterificación de los monoglicéridos, falta por estudiar la reacción de metanólisis básica de los triglicéridos empleando métodos de cálculo de más alto nivel, como es el caso del método que emplea la Teoría de los funcionales de la densidad (Becke, 1992).

## 7. CONCLUSIONES

---

1. Se realizó la extracción del aceite de la semilla de *S. hispanica* con el propósito de obtener biodiesel viable como combustible de acuerdo a las normas internacionales.
2. El extracto hexánico de la semilla de chia produjo un rendimiento promedio de 27.6%. el cual fue el más alto en la familia de las salvias y su valor es similar al de otras especies vegetales utilizadas actualmente para la producción de biodiesel.
3. Casi todos los parámetros de calidad obtenidos para el biodiesel del aceite de *S. hispanica* se encuentran dentro de los límites permitidos por las normas Europeas y norteamericanas, lo cual implica que el aceite representa una fuente alternativa para la producción de biocombustibles.
4. El alto índice de yodo determinado para el biodiesel del aceite de chia, indica un elevado grado de instauración y una baja estabilidad de éste. Lo anterior Implica el uso de antioxidantes para hacer viable a este biocombustible como una fuente alterna de energía.
5. Las mezclas B10 y B20 de biodiesel del aceite de *S. hispanica* se asemejan más a la entalpia de combustión del diésel petroquímico.
6. Empleando cromatografía en capa delgada y revelador cloro/o-tolidina se detectó la presencia de ciclopeptidos en el extracto metanólico del bagazo de *S. hispanica*.
7. Debido a la calidad nutrimental que posee la semilla de Salvia hispánica (alto contenido de  $\omega$ -3, fibra y proteínas) y por sus beneficios terapéuticas en infecciones oculares o de vías respiratorias, esta semilla no podría ser considerada como materia prima para la producción de biodiesel.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- Ahmet, C., Görena, A., Kiliçb, T., Dirmencic, T., & G., B. (2006). Chemotaxonomic evaluation of Turkish species of *Salvia*: Fatty acid compositions of seed oils. *Biochemical systematics and Ecology*, *34*, 160-164.
- Atadashi, I., Aroua, M., Aziz, A., & Sulaiman, N. (2013). The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *19*, 14-16.
- Ayerza, R., & Coates, W. (2006). Chía. Redescubriendo un olvidado alimento de los aztecas. *Argentina: Del Nuevo Extremo*, 45-78, 93-96.
- Bailey, A. (1984). *Aceites y Grasas Industriales*. 65. Barcelona: Reverte.
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production. A Review of current work. *Energy Conversion and Management*, *52*, 1479-1483.
- Banković-Ilić, I., Stamenković, O., & Veljković, V. (2012). Biodiesel production from non-edible plant oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*, 3621– 3647.
- Barreiro, A., & Sandoval, B. (2006). Operaciones de conservación de alimentos por bajas temperaturas. 40-46. Venezuela: Equinoccio.
- Baskar, C., Baskar, S., & Dhillon, R. (2012). *Biomass Conversion. The Interface of Biotechnology, Chemistry and Materials Science*. 4-7; 56-79. New York: Springer.
- Becke, A. (1992). Density functional thermochemistry. I. The effect of the exchange-only gradient correction. *J. Chem Phys*, *96*, 2155-60.
- Bezergianni, S., & Dimitriadis, A. (2013). Comparison between different types of renewable diesel. *Renewable and Sustainable Energy Review*, *21*, 110-116.



- Bozbas, K. (2008). Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 542-552.
- Brannan, L., & Owened, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Review*, 44, 557-577.
- Cahill, J. (2003). Ethnobotany of Chia, *Salvia hispanica* L. *Economic Botany*, 57, 604-618.
- Campanilla, C., & Martínez, O. (2012). Tesis . *Calidad de la semilla de Chia*. Universidad Autónoma de Chapingo: Departamento de Fitotecnia.
- Carels, N. (2011). Biofuel's Engineering Process Technology. The Challenge of Bioenergies: An Overview. *InTech*, 23-64.
- Caudillo, E., Tecante, A., & Valdivia, L. (2008). Dietary fibre content and antioxidant activity of phenolic compounds present in Mexico Chia (*Salvia hispanica* L.) seeds. *Food Chemistry*, 107, 656-663.
- Centro de Noticias ONU. (2013). *La población mundial crecerá en mil millones en la próxima década*. Recuperado el 09 de diciembre de 2013, de <http://www.un.org/spanish/News/story.asp?newsID=26703#.Uk0WK9I2Y9U>
- Chen, Y., Chiang, T., & Chen, J. (2013). Properties of soapnut (*Sapindus mukorossi*) oil biodiesel and its blends with diesel. *Biomass & Bioenergy*, 52, 15-21.
- Comisión Internacional de Cambio Climático. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf>
- Craig, R., Vaughan, J., & Skinner, J. (2007). *Recursos de la tierra : origen, uso e impacto ambiental* (3° ed.). Madrid, México: Pearson Educación.

- De Jesus, R. (2013). Tesis. *Obtención y caracterización del aceite de Semillas de Frutos de Chirimoya (Annonacherimola) y su Transformación a Biodiesel*. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de química.
- De Olivera, E., Quirino, R. L., Suarez, P., & Prado, A. (2006). Heats of combustion of biofuels obtained by pyrolysis and by transesterification and biofuel/diesel blends. *Thermochimica Acta*, 450, 87-90.
- Di Sapio, O., Bueno, M., Busilacchi, H., Quiroga, M., & C., S. (2012). Caracterización Morfoanatómica de hojas, tallo, fruto y semilla de *Salvia hispanica* L. (Lamiaceae). *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromaticas*, 11, 249-268.
- Enweremadu, C., & Mbarawa, M. (2009). Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 2205-2224.
- FAO. (2008). *Bosques y energía. Cuestiones Clave*. Recuperado el 09 de diciembre de 2013, de Food and Agriculture Organization of the United Nations: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/i0139s/i0139s00.pdf>
- Fontana, J., Zagonel, G., Vechiatto, W. W., Costa, B., Laurindo, J. C., Fontana, R., y otros. (2009). Simple TLC-Screening of Acylglycerol Levels in Biodiesel as an Alternative to GC Determination. *Journal of Chromatographic Science*, 47, 844 - 846.
- Furniss, B., Hannford, J., Smith, W., & Tatchell, A. (1989). *Vogel's Textbook of Practical Organic Chemistry*. 1179-1180. Longman Scientific & Technical.
- Ganesh, L. M., Pandit, A., & Gogate, P. (2012). Intensification Approaches for Biodiesel Synthesis from Waste. *Industrial & engineering chemistry research*, 51, 14610–14628.

- Garcia, C., & Manzini, F. (2012). Environmental and economic feasibility of sugarcane ethanol for the Mexican transport sector. *Solar Energy*, 86, 1063-1069.
- Garriz, A., & Chamizo, J. (1998). Química. 22-26. Mexico: PEARSON Educación.
- Gómez, F. (2010). Tesis. *Impacto económico y ecológico de la producción de biocombustibles líquidos secundarios como sustituto energético y su viabilidad en México*. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de Economía.
- Greig, C., & Leaback, D. (1960). Use of Chlorine in the Detection of Compounds on Paper Chromatograms. *Nature*, 188-310.
- INEGI. (2013). *Cambio Climático y Estadística Oficial. Seminario Internacional*. Recuperado el 09 de diciembre de 2013, de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://www.inegi.org.mx/eventos/2009/CCyEO/>
- Insanu, M., Anggadiredja, J., & Kayser, O. (2012). Curcacycline A and B - new pharmacological insights to an old drug. *International Journal of Applied Research in Natural Products*, 5(2), 26-27.
- Ixtaina, V., Nolasco, M. S., & Tomás, M. (2011). Oxidative Stability of Chia (*Salvia hispanica* L.) Seed Oil: Effect of antioxidants and Storage Conditions. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24, 166-174.
- Ixtaina, Y., Martínez, M., Spotorno, V., Mateo, C., Maestri, D., Diehl, B., y otros. (2011). Characterization of chia seed oils obtained by pressing and solvent extraction. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 89, 1077-1090.
- Jamboonsri, W., Phillips, T., Geneve, R., Cahill, J., & Hildebrand, D. (2011). Extending the range of an ancient crop, *Salvia hispanica* L.—a new  $\omega$ -3 source. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 59, 171-178.

- Juárez, R. (2012). Tesis. *Aprovechamiento sustentable de las semillas de guanábana (Annonamuricata) en la obtención de biodiesel*. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de química.
- Karmakar, A., Karmakar, S., & Mukherjee, S. (2010). Properties of various plants and animals feedstocks for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 101, 7201-7210.
- Knothe, G. (2010). Biodiesel and renewable diesel: A comparison. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36, 364-373.
- Limpanuparb, T., Punyain, K., & Tintarungrotechai, Y. (2010). A DFT investigation of methanolysis and hydrolysis of triacetin. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 955, 23-32.
- Mac Faddin, F. (2000). Pruebas bioquímicas para la identificación de bacterias de importancia clínica. 3°, 185-187. E.U.A.: Medica Panamericana.
- Mera, A. M. (2009). CARACTERIZACIÓN BROMATOLÓGICA DE SEMILLAS DE TRES ESPECIES DE OLEAGINOSAS (GIRASOL, HIGUERILLA Y CHÍA). *Cultivos energéticos alternativos*, 89 -98.
- Naik, S., Goud, V., Rout, P., & Dalai, A. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 578-597.
- Ocampo, S., Betancur, J., Ortiz, A., & Ocampo, C. (2007). Estudio cromatográfico comparativo de los ácidos grasos presentes en semilla de *Annona cherimolioides* y *Annona muricata* L. . *Vector* 2, 103-112.
- Olivia, R., Rosales, S., Nava, B., Delgado, L., Cuellar, R. I., Carrete, C., y otros. (2010). Identificación de especies vegetales con potencial para la producción de biocombustibles líquidos en Durango. *Revista Mexicana de Ciencia*, 1, 45-54.

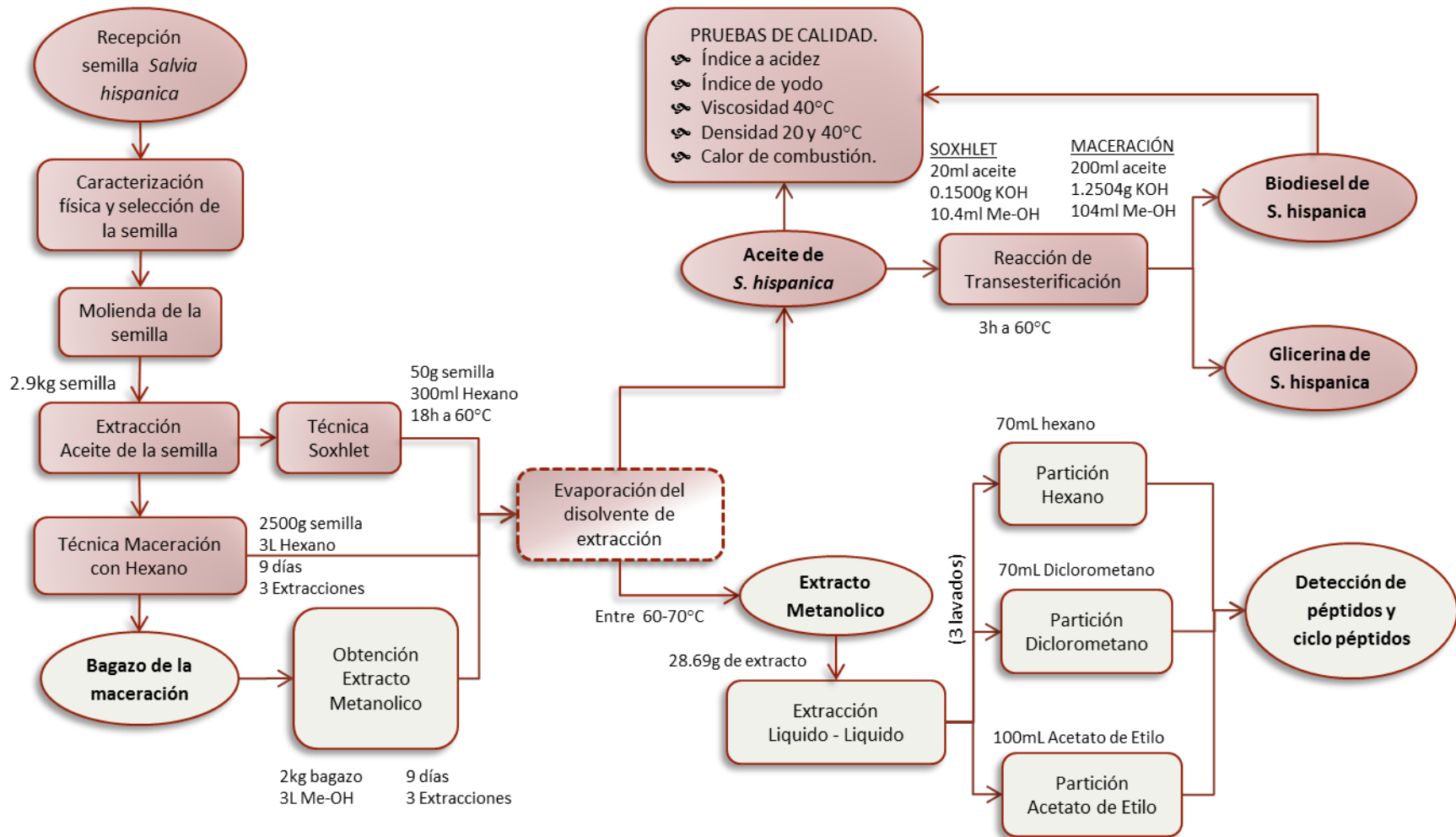
- Olivos, L. (2005). Tesis. *Estudios de las Propiedades térmicas, funcionales y nutritivas de la fracción Proteica de la semilla de chia*. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de química.
- Olvera, G. (2013). Tesis. *Obtención de Biodiesel a Partir del Aceite de la Semilla de Annona purpurea*. Universidad Nacional Autónoma de México: Facultad de química.
- Ramadhas, A., Jayaraj, S., & Muraleedharan, C. (2004). Use of vegetable oils as I.C. engine fuels—A review. *Renewable Energy*, 29, 727-742.
- SENER. (2006). *Energías renovables para el desarrollo sustentable en México*. Recuperado el 09 de Diciembre de 2013, de Secretaria de Energía: [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/FolletoERenMex-SENER-GTZ\\_ISBN.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/FolletoERenMex-SENER-GTZ_ISBN.pdf)
- SENER. (2009). *Energías renovables para el desarrollo sustentable en México*. Recuperado el 09 de Diciembre de 2013, de Secretaria de Energía: [http://www.sener.gob.mx/res/0/ER\\_para\\_Desarrollo\\_Sustentable\\_Mx\\_2009.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/0/ER_para_Desarrollo_Sustentable_Mx_2009.pdf)
- SENER. (2012). *Prospectiva del Sector Eléctrico 2012 – 2026*. Recuperado el 10 de Febrero de 2014, de Secretaria de Energía: [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2012/PSE\\_2012\\_2026.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2012/PSE_2012_2026.pdf)
- SENER. (2013). *Estrategia Nacional de Energía 2013-2027*. Recuperado el 09 de diciembre de 2013, de Secretaría de Energía: [http://www.energia.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/2013/ENE\\_2013-2027.pdf](http://www.energia.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/2013/ENE_2013-2027.pdf)
- Shahid, E. M., & Jamal, Y. (2011). Production of biodiesel: A technical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4733-4734.
- SIAP. (2013). *Cierre de la Producción Agrícola por Estado*. Recuperado el 09 de Diciembre de 2013, de Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>

- Sierra, L. (2012). Proyecto Fin de Carrera. *Estudio de la estabilidad a la oxidación y otras*. Universidad Zaragoza: Escuela de Ingeniería y Arquitectura.
- Singh, S., & Singh, D. (2010). Biodiesel Production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel, A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 200-216.
- Tapanes, M. E., Aranda, G. D., Carneiro, M. J., & Antunes, C. O. (2008). Transesterification of Jatropha curcas oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction. *Fuel*, 87, 2286-2295.
- Tariq, M., Ali, S., & Khalid, N. (2012). Activity of homogeneous and heterogeneous catalysts, spectroscopic and chromatographic characterization of biodiesel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 6303-6316.
- The World Bank. (2013). *World Development Indicators*. Recuperado el 09 de diciembre de 2013, de Energy production and use: <http://wdi.worldbank.org/table/3.6>
- U.S. Energy Information Administration. (2013). 2013. *“International Energy Statistics*. Recuperado el 09 de Diciembre de 2013, de <http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/IEDIndex3.cfm?tid=5&pid=53&aid=1>
- Yaakob, Z., Mohammada, M., Alherbawi, M., & Alam, Z. (2013). Overview of the production of biodiesel from Waste cooking oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 184–193.

# ANEXOS

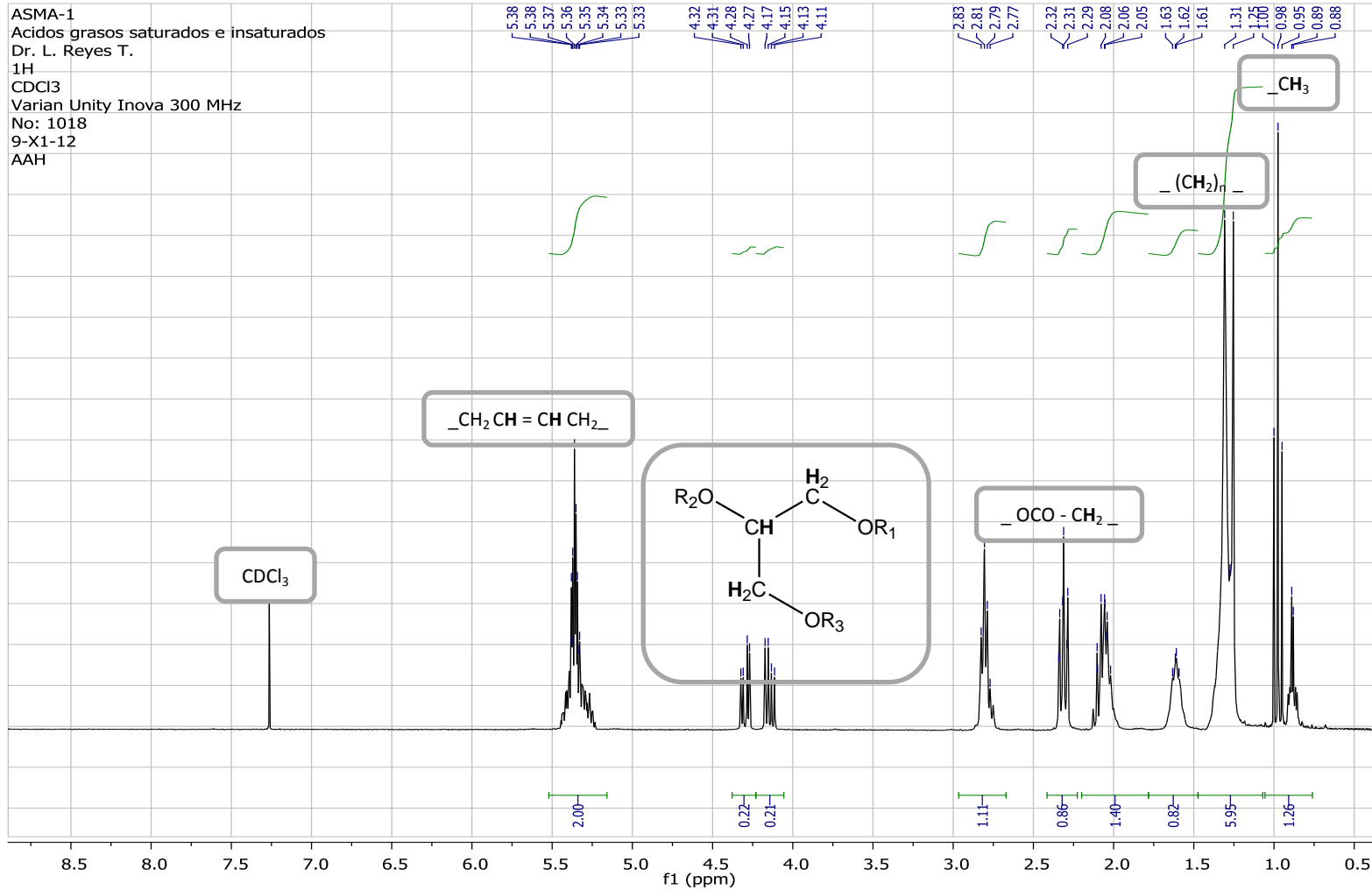
---

ANEXO 1. Diagrama General de Actividad Experimental.....	84
ANEXO 2. RMN 1H de Aceite de <i>Salvia hispanica</i> .....	85
ANEXO 3. RMN 1H de Biodiesel obtenido de la reacción de Transesterificación de Aceite de <i>Salvia hispanica</i> .....	86
ANEXO 4. Cromatograma de Esteres metílicos en Biodiesel obtenidos por transesterificación de aceite de Chia. ....	87
ANEXO 5. Resultados en la determinación de Densidad para Mezclas de Diésel [PEMEX]-Biodiesel [S. <i>hispanica</i> ] a diferentes Temperaturas .....	88
ANEXO 6. Resultados en la determinación de Viscosidad para Mezclas de Diésel [PEMEX]-Biodiesel [S. <i>hispanica</i> ] a diferentes Temperaturas .....	88

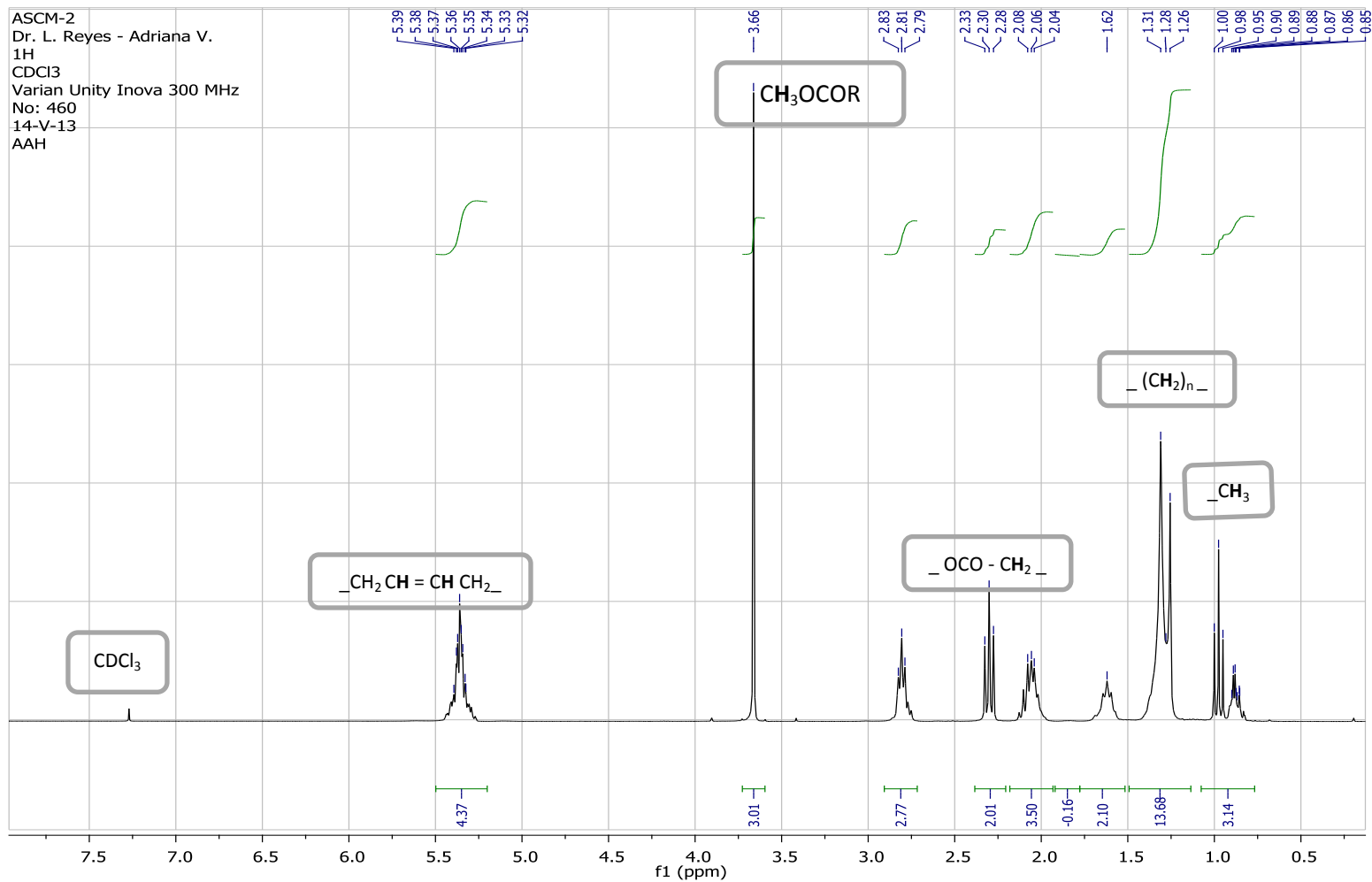


ANEXO 1. Diagrama General de Actividad Experimental

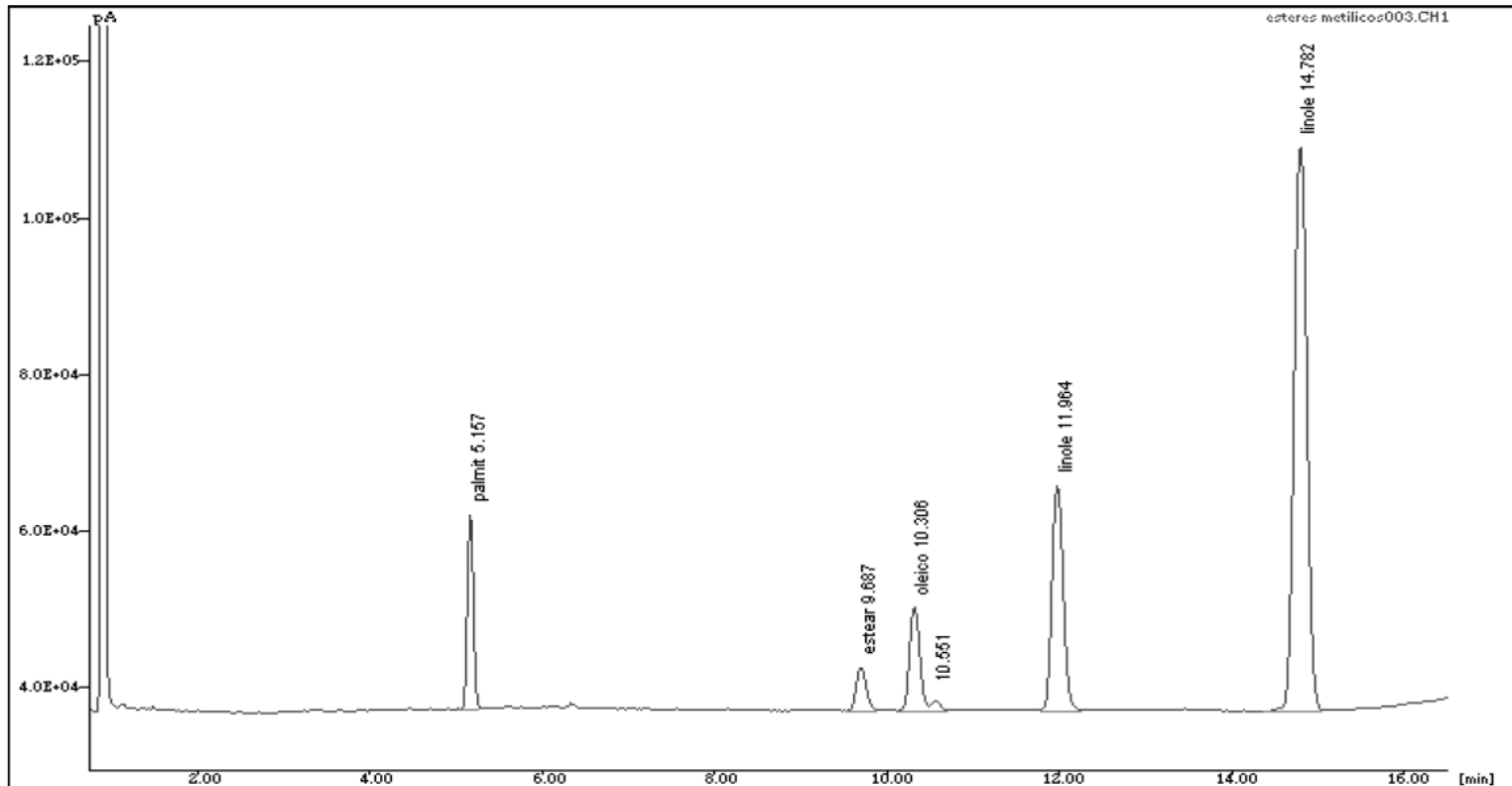




ANEXO 2. RMN 1H de Aceite de *Salvia hispanica*



**ANEXO 3.** RMN 1H de Biodiesel obtenido de la reacción de Transesterificación de Aceite de *Salvia hispanica*



ANEXO 4. Cromatograma de Esteres metílicos en Biodiesel obtenidos por transesterificación de aceite de Chia

**ANEXO 5.** Resultados en la determinación de Densidad para Mezclas de Diésel [PEMEX]-Biodiesel [*S. hispanica*] a diferentes Temperaturas

T [°C]	Aceite	B-100	B-50	B-40	B-30	B-20	B-10	Diésel
10	0,9364	0,897	0,8653	0,8591	0,8528	0,8460	0,8399	0,8315
20	0,9295	0,8909	0,8579	0,8517	0,8454	0,8388	0,8326	0,8256
30	0,9227	0,8836	0,8507	0,8446	0,8383	0,8317	0,8256	0,8185
40	0,9159	0,8764	0,8435	0,8374	0,8312	0,8246	0,8185	0,8115
50	0,9091	0,8691	0,8364	0,8303	0,8240	0,8175	0,8114	0,8045
60	0,9024	0,8619	0,8292	0,8230	0,8169	0,8104	0,8043	0,7970
70	0,8957	0,8546	0,8220	0,8160	0,8096	0,8032	0,7972	0,7903
80	0,8890	0,8474	0,8148	0,8088	0,8024	0,7961	0,7901	0,7832
90	0,8824	0,8401	0,8076	0,8016	0,7952	0,7889	0,7829	0,7767

**ANEXO 6.** Resultados en la determinación de Viscosidad para Mezclas de Diésel [PEMEX]-Biodiesel [*S. hispanica*] a diferentes Temperaturas

T [°C]	Aceite	B-100	B-50	B-40	B-30	B-20	B-10	Diésel
10	71,315	7,1635	5,7834	5,603	5,2817	5,1445	5,1363	4,6066
20	47,298	5,6223	4,5840	4,4267	4,1642	4,0401	4,0243	3,6233
30	33,067	4,5073	3,6680	3,5379	3,3307	3,2328	3,2104	2,9327
40	24,133	3,7029	3,0118	2,9032	2,7382	2,6556	2,6287	2,4181
50	18,278	3,1066	2,5246	2,4334	2,2970	2,2300	2,2003	2,0335
60	14,287	2,6489	2,1550	2,0766	1,9590	1,9027	1,8750	1,7437
70	11,439	2,2929	1,8659	1,7982	1,7127	1,6469	1,6214	1,5140
80	9,3779	2,0080	1,6360	1,5762	1,4318	1,4260	1,4186	1,3309
90	7,8350	1,7774	1,4497	1,3971	1,2331	1,2384	1,2557	1,1825