

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Extracción de aceite a partir de la semilla de *Jatropha Criolla* para la  
producción de biodiesel, a nivel laboratorio y Planta Piloto**

**Trabajo de investigación presentado por  
Ramiro Rafael Cifuentes de León**

**Guatemala**

**2009**



**Extracción de aceite a partir de la semilla de *Jatropha Criolla* para la  
producción de biodiesel, a nivel laboratorio y Planta Piloto**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



**Extracción de aceite a partir de la semilla de *Jatropha Criolla* para la  
producción de biodiesel, a nivel laboratorio y Planta Piloto**

**Trabajo de investigación presentado por  
Ramiro Rafael Cifuentes de León  
Para optar al grado académico de  
Licenciatura en Ingeniería Química**

**Guatemala**

**2009**

**Vo. Bo.:**

(f) \_\_\_\_\_  
**Ing. Qco. Oscar Armando Maldonado**  
**Colegiado No. 90**  
**Asesor**

**Tribunal:**

(f) \_\_\_\_\_  
**Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano**  
**Colegiado No. 686**  
**Director del Departamento de Ingeniería Química**

(f) \_\_\_\_\_  
**Ing. Oscar Armando Maldonado**  
**Colegiado No. 90**

(f) \_\_\_\_\_  
**Ing. Jaime Rosales Solórzano**  
**Colegiado No. 320**

**Fecha de aprobación: 10 de diciembre de 2009.**

## **PREFACIO**

El motivo de este trabajo de investigación se inició con el fin de buscar nuevas fuentes renovables para la producción de biocombustibles y reemplazar a los combustibles fósiles que han generado contaminación al medio ambiente. En Guatemala, el piñon estudiado, *Jatropha Criolla*, es de gran potencial de cultivo en las distintas áreas de Guatemala.

En el trabajo de investigación siguiente se contó con cierta limitación de frutos para seguir realizando pruebas tanto en la extracción de aceites como en la producción de biodiesel, pero los datos obtenidos que se obtuvieron si dan una representación estadística confiable de extracción y producción, la limitación fue porque esta semilla depende de cierta precipitación pluvial para cosechar frutos, factor que no hubo en este año de investigación. Otro factor limitante en el proceso de producción de biodiesel a partir del aceite de este fruto es su rendimiento experimental, puesto que lo máximo que se obtuvo en la extracción de aceite a nivel de planta piloto fue de 5 L de aceite por quintal de fruto, todavía sigue siendo tema de investigación para poder lograr mayores rendimientos ya que depende de varios factores tales como el tratamiento previo de la humedad de la semilla, cocimiento y calibración del expeller y decorticadora.

Se agradece a la Universidad del Valle de Guatemala, en particular al Laboratorio de Operaciones Unitarias y personal por el apoyo en prestar sus instalaciones y por su ayuda económica en la realización de las pruebas. Así también se agradece a Technoserve por haberme suministrado frutos en el principio de mi parte experimental de mi trabajo y por prestarme su maquinaria de extracción ubicada en Cuyotenango, Suchitepéquez.

# TABLA DE CONTENIDO

	Página
PREFACIO .....	vi
LISTA DE CUADROS .....	xii
LISTA DE GRÁFICAS .....	xvi
LISTA DE FIGURAS .....	xvii
LISTA DE IMÁGENES .....	xviii
GLOSARIO.....	xix
RESUMEN .....	xxii
ABSTRACT.....	xxiii
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. ANTECEDENTES .....	3
A. Lípidos.....	3
1. Los triacilgliceroles son ésteres de ácidos grasos y glicerol. ....	6
2. La extracción de lípidos requiere la utilización de disolventes orgánicos. ....	7
3. La cromatografía de adsorción separa los lípidos de polaridad diferente. ....	9
4. La cromatografía gas-líquido separa las mezclas de derivados lipídicos volátiles. ....	10
5. La hidrólisis específica ayuda a determinar la estructura lipídica.....	10
6. La espectrometría de masas revela la estructura lipídica completamente .....	11
7. Determinación de la estructura de un ácido graso por espectrometría de masas .....	11
B. Jatropha Criolla .....	12
1. Zonas geográficas adecuadas para su cultivo en Guatemala.....	12
a. Litoral del Océano Pacífico .....	12
b. Oriente del país .....	12
c. Occidente del país .....	12
d. Para todos los casos.....	12
2. Ficha técnica de la Jatropha Criolla .....	17
3. Morfología vegetal.....	17

4. Productos derivados de la <i>Jatropha</i> .....	18
a. Aceite vegetal. ....	18
b. Torta de la molienda. ....	18
c. Glicerol.....	18
C. Biodiesel.....	19
1. Bases de la reacción de transesterificación. ....	21
a. Mecanismo de la reacción de transesterificación. ....	21
2. Producción Industrial.....	23
3. Pretratamiento con catálisis ácida.....	24
4. Calidad del combustible.....	25
5. Glicerol libre.....	25
6. Alcohol y catalizador residuales .....	25
7. Agua y sedimentos.....	26
8. Estabilidad de almacenamiento.....	26
9. Control de calidad.....	27
10. Ventajas.....	27
11. Desventajas.....	29
a. Otros problemas del biodiesel respecto al diesel.....	29
12. Principios técnicos de la producción de biodiesel.....	30
13. Fuentes de materia prima.....	31
D. Extracción de aceite.....	31
1. Pretratamiento de aceites vegetales crudos.....	31
2. Desgomado.....	32
3. Neutralización, lavado y secado.....	32
E. El alcohol .....	33
F. El catalizador.....	33
1. Hidróxido de sodio (NaOH).....	34
2. Hidróxido de potasio (KOH).....	34

3. Metilato de sodio .....	34
G. Oxidación de los aceites y grasas .....	35
1. Filtrado.....	35
2. Secado.....	35
3. Valoración. ....	36
H. Preparación de etóxido/metóxido .....	36
1. Mezclado. ....	37
2. Separación. ....	37
3. Lavado. ....	37
III. JUSTIFICACIÓN.....	39
IV. OBJETIVOS .....	41
A. Generales.....	41
B. Específicos .....	41
V. PROBLEMA A RESOLVER .....	42
VI. METODOLOGÍA .....	43
A. Secuencia de actividades .....	43
B. Materiales y métodos para pruebas de caracterización al biodiesel y aceite .....	43
C. Materiales y método para cromatografía de gases.....	44
1. Procedimiento para preparación de soluciones: .....	44
2. Preparación de la muestra .....	45
3. Determinación por cromatografía .....	45
D. Medición del valor ácido .....	45
E. Obtención de aceite a nivel laboratorio .....	46
F. Obtención de biodiesel a nivel laboratorio .....	47
G. Extracción de aceite en planta piloto en Cuyotenango .....	48
VII. RESULTADOS.....	49
A. Composición de frutos de <i>Jatropha Criolla</i> .....	49

B.	Composición de las semillas de <i>Jatropha Criolla</i> .....	49
C.	Análisis del aceite obtenido a partir de la extracción con hexano en laboratorio .....	49
D.	Análisis del aceite obtenido en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango .....	50
E.	Pruebas al biodiesel obtenido del aceite extraído, laboratorio y en Planta Piloto .....	50
F.	Costos de extracción y producción obtenidos de la investigación.....	51
G.	Comparación de rendimientos del aceite del piñón, laboratorio y Planta Piloto .....	52
H.	Comparación de las propiedades del biodiesel.....	53
VIII.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	54
IX.	CONCLUSIONES .....	67
X.	RECOMENDACIONES.....	69
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	70
XII.	APÉNDICE .....	72
A.	Datos originales.....	73
B.	Cálculos de muestra .....	73
1.	Cálculo del porcentaje de componentes de la semilla de <i>Jatropha Criolla</i> obtenidos de la muestra 3 de Cuyotenango, extracción 1 .....	73
2.	Obtención de los componentes en % peso del fruto de <i>Jatropha Criolla</i> a partir de los datos obtenidos de la muestra 3 de Cuyotenango.....	73
3.	Obtención del porcentaje de composición de la pulpa y la semilla a partir de la muestra 3 de Cuyotenango.....	74
4.	Determinación del flujo del vapor requerido para trabajar en el expeller a capacidad máxima mediante una caldera que trabaja a 50 Psi .....	74
5.	Determinación del balance de energía en el cocimiento .....	75
6.	Balance energético en el motor.....	76
7.	Rendimiento en la obtención de biodiesel con agitación en licuadora en la prueba 1 .....	76
8.	Cálculo de la viscosidad en el viscosímetro de Cannon-Fenske .....	76
9.	Balance de masa para la producción de biodiesel .....	77
C.	Datos Calculados.....	77
D.	Análisis de error .....	105

1.	Análisis estadístico.....	105
a.	Media.....	105
b.	Desviación estándar.....	105
2.	Propagación de error .....	105
a.	Incertidumbres para sumas y restas.....	105
b.	Incertidumbre para multiplicaciones y divisiones .....	105
E.	Imágenes de equipos utilizados en el trabajo experimental.....	106

## LISTA DE CUADROS

Tabla 1 Algunos ácidos grasos naturales: estructura, propiedades y nomenclatura .....	4
Tabla 2 Rendimiento de varios tipos de semillas Oleoginosas.....	15
Tabla 3 Comparabilidad entre aceite de Jatropha y el diesel normal.....	19
Tabla 4 Características típicas del biodiesel y del diesel petrolífero.....	28
Tabla 5 Emisiones de biodiesel respecto al diesel convencional.....	28
Tabla 6 Análisis a nivel laboratorio de la composición promedio de los frutos de las muestras 1, 2, 3 de Cuyotenango y la muestra de Cuilco .....	49
Tabla 7 Análisis a nivel laboratorio de la composición promedio de las semillas de las muestras 1, 2, 3 de Cuyotenango y la muestra de Cuilco .....	49
Tabla 8 Valores de ácidos grasos libres del aceite extraído con hexano a nivel laboratorio .....	49
Tabla 9 Composición de los tipos de ácidos grasos analizados mediante Cromatografía de gases que se encuentran en el aceite de Jatropha Criolla tomados de la muestra 2 de Cuyotenango .....	50
Tabla 10 Valores de viscosidad, ácidos grasos libres y densidad del aceite extraído en planta piloto obtenido a partir de la muestra 3 de Cuyotenango.....	50
Tabla 11 Valores de viscosidad, densidad y poder calorífico del biodiesel obtenido del aceite extraído con hexano de la muestra 2 de Cuyotenango.....	50
Tabla 12 Caracterización del biodiesel obtenido del aceite extraído de la muestra 3 de Cuyotenango en Planta Piloto .....	51
Tabla 13 Rendimientos obtenidos del biodiesel a nivel laboratorio mediante transesterificación alcalina con agitación por medio de magnetos y en licuadora.....	51
Tabla 14 Resumen de producción y costos de la investigación, tipo batch, por quintal de fruto procesado de Jatropha Criolla, con base a la muestra 3 de Cuyotenango y en función de los días de extracción en Planta Piloto .....	51
Tabla 15 Costos de investigación para realizar una extracción de aceite de la semilla de jatropha criolla con hexano y el equipo Soxhlet en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala.....	52
Tabla 16 Costo de investigación para la producción de biodiesel a escala laboratorio a partir de un galón del aceite de Jatropha Criolla.....	52
Tabla 17 Comparación de los rendimientos obtenidos por fruto a nivel laboratorio y en Planta Piloto.....	52
Tabla 18 Comparación mediante el poder calorífico del biodiesel obtenido del aceite extraído a nivel laboratorio y en Planta Piloto .....	53

Tabla 19 Datos originales para la corrida utilizando 24 kg de semilla entera (kernel+cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco hecha el primer día de extracción en la Planta Piloto.....	73
Tabla 20 Temperaturas de entrada de vapor, del exterior e interior del recipiente de cocimiento al realizar la corrida con semilla entera (kernel+ cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco el primer día de extracción en la Planta Piloto.....	73
Tabla 21 Porcentaje de humedad promedio del fruto de la muestra 1 de Cuyotenango al momento de recibirla.....	77
Tabla 22 Composición promedio del fruto de la muestra 1 de Cuyotenango.....	77
Tabla 23 Relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo de la muestra 1 de Cuyotenango .....	77
Tabla 24 Composiciones promedio de extracciones hechas con hexano de la semilla, muestra 1 de Cuyotenango.....	78
Tabla 25 Datos de valor de acidez del aceite obtenido a nivel de laboratorio de la muestra 1 de Cuyotenango.....	78
Tabla 26 Porcentaje de humedad promedio de los frutos húmedos de la única muestra de Cuilco.....	78
Tabla 27 Composición promedio de los frutos de la única muestra de Cuilco.....	79
Tabla 28 Relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo de la muestra de Cuilco .....	79
Tabla 29 Composiciones promedio de las extracciones de semilla de la única muestra de Cuilco .....	79
Tabla 30 Densidad aparente a granel promedio de la única semilla de Cuilco.....	79
Tabla 31 Composiciones promedio de extracciones de la semilla de la muestra 2 de Cuyotenango .....	80
Tabla 32 Cromatografía de gases de las cadenas de ácidos grasos de los aceites estándares .....	80
Tabla 33 Cromatografía de gases de las cadenas de ácidos grasos del aceite extraído de la muestra 2 de Cuyotenango.....	80
Tabla 34 Composición de los tipos de ácidos grasos que se encuentran el aceite de jatropha tomados de la muestra 2 de Cuyotenango .....	80
Tabla 35 Datos de valor de acidez del aceite obtenido a nivel de laboratorio de la muestra 2 de Cuyotenango.....	81
Tabla 36 Valores de densidades en g/mL a diferentes temperaturas del biodiesel obtenido de la muestra 2 de Cuyotenango.....	81
Tabla 37 Medidas en el viscosímetro de Brookfield, modelo CAP-2000, del biodiesel obtenido de la muestra 2 de Cuyotenango .....	81
Tabla 38 Rendimientos obtenidos del biodiesel a nivel laboratorio a partir de la muestra 2 de Cuyotenango.....	81

Tabla 39 Capacidad calorífica medida para el biodiesel obtenido a escala de laboratorio de la muestra 2 de Cuyotenango .....	82
Tabla 40 Composición en porcentaje de la semilla y cáscara de fruto de la muestra 3 de Cuyotenango .....	82
Tabla 41 Composición completa del fruto de la muestra 3 de Cuyotenango.....	82
Tabla 42 Relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo de la muestra 3 de Cuyotenango .....	82
Tabla 43 Componentes promedio de la semilla, muestra 3 de Cuyotenango .....	82
Tabla 44 Comparación entre los pesos promedio de la semilla de Cuilco y la muestra 3 Cuyotenango .....	83
Tabla 45 Costos para realizar una extracción de aceite de la semilla de Jatropha Criolla con hexano y el equipo Soxhlet en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala .....	83
Tabla 46 Costo para la producción de biodiesel a escala laboratorio a partir de un galón del aceite de Jatropha Criolla .....	83
Tabla 47 Balance de masa en decortadora para la corrida con fruto completo de la muestra 3 de Cuyotenango.....	83
Tabla 48 Balance de masa global de las corridas hechas el primer día de extracción en la Planta Piloto a partir de la muestra 3 de Cuyotenango y de Cuilco .....	83
Tabla 49 Cantidad de aceite sin sedimentos, impurezas del aceite obtenido el primer día de extracción en la planta extractora a partir de las semillas completas de Cuilco y la semilla decortada de la muestra 3 de Cuyotenango .....	84
Tabla 50 Balance de masa en decortadora utilizando la semilla decortada del fruto de la muestra 3 de Cuyotenango el segundo día de extracción en Planta Piloto.....	84
Tabla 51 Balance de masa global en expeller del segundo día de extracción en Planta Piloto utilizando kernel de la semilla 3 de Cuyotenango .....	84
Tabla 52 Balance de energía en el motor diesel para el primer y segundo día de extracción en Cuyotenango.....	84
Tabla 53 Balance de energía en el recipiente de cocimiento, corrida con capacidad máxima, 24 kilos de semilla .....	85
Tabla 54 Cantidad total de aceite sin sedimentos, impurezas del aceite y kg impurezas por L de aceites obtenidos a partir de 15.92 ±0.78 kg de kernel obtenidos del fruto de la Muestra 3 de Cuyotenango el segundo día de extracción .....	85
Tabla 55 Caracterización del biodiesel obtenido del aceite extraído en Planta Piloto de Cuyotenango .....	85
Tabla 56 Costos para procesar un 1 quintal, tipo batch, de fruto de Jatropha Criolla en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango en función de los dos días de extracción en Planta Piloto .....	85
Tabla 57 Resumen de costos y producción, tipo batch, por quintal de fruto procesado de Jatropha Criolla, Muestra 3 de Cuyotenango, en función de los días de extracción en Planta Piloto .....	86

Tabla 58 Resumen de costos y producción en tipo batch a capacidad máxima del Expeller, 24 kilos de kernel y por 82.10 kg de fruto procesado de Jatropha Criolla, muestra 3 de Cuyotenango en función de los dos días de extracción en Planta Piloto .....	86
Tabla 59 Producción de aceite en tipo batch a capacidad máxima del Expeller, 24 kilos de kernel y por 82.10 kg de fruto procesado de Jatropha Criolla, muestra 3 de Cuyotenango, en función de los dos días de extracción en Planta Piloto .....	86
Tabla 60 Rendimiento del biodiesel del aceite obtenido en Planta Piloto con agitación moderada .....	87
Tabla 61 Rendimiento del biodiesel del aceite obtenido en Planta Piloto con agitación en licuadora .....	87
Tabla 62 Valores de densidad del aceite después de clarificado y centrifugado a temperaturas de 23.5, 32 y 40 °C del aceite obtenido a nivel de Planta Piloto, Muestra 3 de Cuyotenango .....	87
Tabla 63 Prueba de Prensado de los sedimentos del aceite obtenidos en Planta Piloto y extracción con solventes de la torta obtenida, Muestra 3 de Cuyotenango.....	87
Tabla 64 Recuperación total de aceite de los sedimentos obtenidos en Planta Piloto, Muestra 3 de Cuyotenango.....	87
Tabla 65 Recuperación total de aceite de los sedimentos obtenidos en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango.....	88
Tabla 66 Densidades del aceite obtenido a nivel de Planta Piloto antes y después de prensado de la muestra 3 de Cuyotenango .....	88
Tabla 67 Porcentaje de los valores de ácidos grasos libres en el aceite, (FFA, free faty acid), obtenido en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango. ....	88
Tabla 68 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, 50 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango .....	88
Tabla 69 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, 60 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango .....	88
Tabla 70 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Cannon-Fenske, muestra 3 de Cuyotenango .....	89

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Composición de la semilla donde se obtuvo el máximo rendimiento, muestra 2 de Cuyotenango.....	90
Gráfica 2 Composición del fruto donde se obtuvo el máximo rendimiento, muestra 3 de Cuyotenango .....	91
Gráfica 3 Temperaturas del interior del recipiente en función del tiempo de cocimiento al realizar la corrida con semilla entera (kernel+ cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco el primer día de extracción en la Planta Piloto .....	92
Gráfica 4 Temperaturas del exterior del recipiente de cocimiento en función del tiempo al realizar la corrida con semilla entera (kernel+cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco el primer día de extracción en la planta piloto.....	93
Gráfica 5 Porcentaje en peso de los componentes que se obtuvieron de la decorticadora para la corrida con fruto completo de la muestra 3 de Cuyotenango el primer día de extracción en Planta Piloto .....	94
Gráfica 6 Porcentajes totales que se obtuvieron en las salidas del expeller de las corridas hechas el primer día de extracción en la Planta Piloto a partir de la muestra 3 de Cuyotenango y la de Cuilco.....	95
Gráfica 7 Porcentaje en peso del total de los componentes obtenidos de la decorticadora del segundo día de extracción en Planta Piloto utilizando la semilla decorticada del fruto de la muestra 3 de Cuyotenango.....	96
Gráfica 8 Porcentaje en peso de las salidas de los componentes obtenidos del Expeller el segundo día de extracción en Planta Piloto utilizando kernel de la semilla 3 de Cuyotenango.....	97
Gráfica 9 Viscosidad del aceite en cSt vs. Temperatura (oC) obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, modelo DV-E, 50 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango .....	98
Gráfica 10 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, modelo DV-E, 60 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango.....	99
Gráfica 11 Valores de la viscosidad del biodiesel obtenido del aceite extraído con hexano de la muestra 2 de Cuyotenango .....	100

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Grado de empaquetamiento de los ácidos grasos .....	5
Figura 2 Estructura de los triacilgliceroles mixtos .....	7
Figura 3 Procedimientos comunes utilizados en la extracción, separación e identificación de lípidos celulares.....	8
Figura 4 Cromatografía de masas para la identificación de estructuras .....	12
Figura 5 Zonas potencialmente aptas .....	13
Figura 6 Áreas potenciales para Jatropha .....	14
Figura 7 Reacción de transesterificación.....	20
Figura 8 Cinética de la reacción de transesterificación .....	22
Figura 9 Diagrama de bloques para el uso de los viscosímetros de Brookfield .....	44
Figura 10 Diagrama de bloques para la extracción de aceite mediante hexano a nivel de laboratorio.....	46
Figura 11 Diagrama de bloques para la producción de biodiesel a nivel de laboratorio .....	47
Figura 12 Diagrama de procedimiento para la extracción de aceite a nivel de Planta Piloto. ....	48
Figura 13 Capacidad calorífica del biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón extraído con hexano ...	101
Figura 14 Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de piñón extraído en Planta Piloto.....	102
Figura 15 Balance de masa con respecto al segundo día de extracción.....	103
Figura 16 Balance de energía con respecto al segundo día de extracción .....	104

## LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Viscosímetro de Brookfield modelo CAP 2000 .....	106
Imagen 2 Separación de fases biodiesel-glicerina .....	107
Imagen 3 Decortadora empleada en Planta Piloto .....	108
Imagen 4 Filtro prensa de la Planta Piloto utilizada .....	109
Imagen 5 Caldera tipo acuatubular de Planta Piloto .....	110
Imagen 6 Viscosímetro de Brookfield modelo DV-E .....	111
Imagen 7 Expeller utilizado en Planta Piloto .....	112
Imagen 8 Salida del aceite en el expeller.....	113
Imagen 9 Viscosímetro Cannon-Fenske.....	114
Imagen 10 Cromatograma del análisis de los ácidos grasos mediante cromatografía de gases.....	115
Imagen 11 Valores de los tiempos de retención, altura y área de los picos obtenidos de la cromatografía de gases .....	116
Imagen 12 Cromatografía de gases del estándar utilizado como parámetro de comparación de los ácidos grasos .....	117

## GLOSARIO

### 1. Ácidos Grasos

Componentes más importantes de las grasas, son sustancias químicamente lineales saturadas e insaturadas, con la función carboxilo. Químicamente, son ácidos orgánicos de más de seis carbonos de largo.

### 2. Alcóxido

Compuesto del tipo ROM, siendo R un grupo alquilo, O un átomo de oxígeno y M un ión metálico u otro tipo de catión. Los alcóxidos se obtienen a partir de los respectivos alcoholes mediante su desprotonación.

### 3. ASTM

American Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés. En español: Sociedad Americana para pruebas y materiales.

### 4. Biocombustible

Término con el cual se denomina a cualquier tipo de combustible que derive de la biomasa u organismos recientemente vivos o sus desechos metabólicos.

### 5. Biodiesel B20

Mezcla de 20% de biodiesel y 80% de diesel derivado del petróleo que puede ser utilizada en motores diesel sin modificar.

### 6. Biodiesel B100

Término utilizado para referirse al biodiesel puro producido de aceites vegetales o animales.

### 7. Calidad

Conjunto de propiedades y características de un servicio, producto o proceso, que satisfacen las necesidades establecidas del cliente.

### 8. Degradación

Descomposición de un cuerpo orgánico con disminución del número de átomos de carbono contenidos por su molécula.

### 9. Destilación

Técnica de separación que consiste en separar dos líquidos aprovechando la diferencia en sus puntos de ebullición. Los vapores de cada componente se condensan y recogen una vez separados.

### 10. Diesel 2D

Mezcla de hidrocarburos que se obtiene por destilación fraccionada del petróleo entre 250 °C y 350 °C a presión atmosférica y 0.5 % en peso de azufre.

### 11. Especificación

Documento técnico que establece una lista de requisitos o descripciones detalladas de características, propiedades, rangos, etc.

12. Estándar  
Norma de desempeño definida por entidades competentes para una actividad, un proceso, un producto o un servicio.
13. Éster  
Compuesto orgánico producido por la reacción de un ácido y un alcohol.
14. Etóxido Sódico  
Compuesto formado por la reacción entre el alcohol etílico y el hidróxido de sodio.
15. Índice de cetano  
Corresponde a la cantidad presente (porcentaje en volumen) de cetano (hexadecano) en una mezcla de referencia con igual punto de inflamación que el carburante (hidrocarburo) sometido a prueba. Es un indicativo de la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo en los motores de combustión interna.
16. Lípidos  
Sustancias de origen orgánico que forman las grasas y los aceites.
17. Lubricidad  
Capacidad de un lubricante de formar una película de un cierto espesor sobre una superficie. Esta propiedad está relacionada con la viscosidad; a mayor viscosidad, mayor lubricidad.
18. Método  
Conjunto de procesos que se deben emprender en la investigación y demostración de la verdad. Es un orden que debe imponer a los diferentes procesos necesarios para lograr un fin dado o resultados.
19. Oleaginoso  
Vegetal que contiene grandes cantidades de aceite en sus semillas o frutos.
20. Oxidación  
Unión de un material con el oxígeno, la cual da como resultado la combustión u otro proceso químico.
21. Propiedad  
Característica que define a un objeto y/o su comportamiento.
22. Rancidez  
Fenómeno de descomposición que sufren las sustancias grasas a partir de hidrólisis lentas que rompen las cadenas de carbono produciendo compuestos de mal olor.
23. Rendimiento  
Relación entre la materia prima utilizada inicialmente para un proceso y el producto obtenido del mismo.
24. Transesterificación  
Proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Esta reacción es frecuentemente catalizada por la adición de un ácido o una base.
25. Triglicérido  
Tipo de lípido formado por una molécula de glicerol, que tiene esterificados sus tres grupos hidroxilo, por tres ácidos grasos saturados o insaturados.

26. Titulación

Técnica analítica volumétrica para determinar la concentración de sustancia presente en una muestra por adición de otra sustancia (titulante) de concentración conocida.

27. Titulante

Solución o sustancia de concentración conocida utilizada en la técnica de valoración para determinar la concentración de analito en una muestra.

28. Viscosidad cinemática

Representa la característica propia del líquido desechando las fuerzas que genera su movimiento, obteniéndose a través del cociente entre la viscosidad absoluta y la densidad del producto en cuestión.

29. Pulpa del piñón

Capa exterior porosa que contiene el fruto del piñón, al quitar completamente quedan las tres semillas del piñón.

30. Cáscara de semilla

Es la capa externa de color negro que rodea el kernel de la semilla del piñón.

31. Kernel

Es la parte interior de la semilla del piñón de color blanco, aquí se concentra la mayoría de aceite y proteína del fruto.

## RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo presentar el estudio sobre la extracción y caracterización del aceite obtenido del fruto de piñón, *Jatropha Criolla*, a nivel de dos procesos, a nivel laboratorio y Planta Piloto, con el fin de obtener una nueva fuente de biocombustible como es el biodiesel. Se estudió la composición de los frutos provenientes de dos lugares que fueron los frutos de Cuilco, Huehuetenango y los frutos de las parcelas del ICTA, Cuyotenango, Suchitepéquez.

Se encontró que el rendimiento de aceite sí depende de varios factores, tales como el tratamiento previo de la semilla, secado, almacenamiento y forma de extracción. Se trabajaron tres muestras de Cuyotenango y una muestra de Cuilco. En la muestra 2 de Cuyotenango solo se analizó la semilla y en las demás muestras se analizaron las composiciones de las semillas y los frutos. A nivel de laboratorio y mediante extracción con solventes, al fruto al cual se le obtuvo el mayor rendimiento de aceite fue a la muestra 3 de Cuyotenango con  $8.92 \pm 0.19$  % superando a la muestra 1 de Cuyotenango y la Cuilco en 6.88 % y 2.35 % respectivamente. El mayor rendimiento en porcentaje peso de aceite obtenido a partir de las semillas fue de  $33.59 \pm 0.51$  % y fue a partir de la muestra 2 de Cuyotenango.

Mediante un balance de masa, el rendimiento obtenido en la extracción de aceites mediante Planta Piloto fue de 4.25 L aceite/100 libras de fruto. En el proceso de producción de biodiesel el rendimiento de conversión máximo obtenido fue del  $61.55 \pm 0.95$  % mediante agitación con una licuadora. Este trabajo se enfocó en el estudio a nivel laboratorio de las propiedades fisicoquímicas tanto del aceite y del biodiesel. Se les hicieron pruebas tales como la viscosidad cinemática, poder calorífico, ácidos grasos libres, agua y sedimentos, densidad y punto de inflamabilidad con el fin de observar si es factible su aplicación en motores de combustión interna.

En el trabajo de investigación efectuado según los costos obtenidos para la obtención de biodiesel, se requiere todavía mayor investigación tanto en el sector agronómico como también en la forma de extracción debido a que los costos de investigación han sido altos; se motiva entonces a seguir realizando más pruebas, especialmente en los equipos más críticos, en Planta Piloto a mejorar la eficiencia de la prensa y la calibración de la decorticadora.

## **ABSTRACT**

The present report intends to present the study of the extraction and characterization of piñon seeds oil, *Jatropha Criolla*, in two processes, laboratory and pilot plant. With the objective of producing a new source of biofuels and reduce the amount of emission of gases. The piñon seeds used during this investigation were from Cuilco, Huehuetenango and from the farms of the ICTA area in Cuyotenango, Suchitepéquez.

The oil extraction was in function of various factors, such as the previous treatment of the seed, drying, storage and the form of the extraction. In this report, three seeds of Cuyotenango and one of Cuilco were analyzed. Only the seed was analyzed for the second sample of Cuyotengango while the seeds and fruits were analyzed for the rest of the samples. The best yield for fruit was the third sample of Cuyotenango with  $8.92 \pm 0.19$  %. The best yield for seed was the second sample of Cuyotenango with  $33.59 \pm 0.51$  %.

By means of a balance of mass, the yield obtained from the pilot plant extraction was 4.25 L oil/100 pounds of fruit. During the production process of biodiesel the maximum yield was of  $61.55 \pm 0.95$  %, with the strong stirring method. Also, the focus of this report was the study, in laboratory, of the physical and chemistry properties such as kinematic viscosity, calorific power, free fatty acid, water and sediments, density and flash point.

In the report performed, according to the costs obtained, is required more experimental proves in the agronomical sector and the extraction form; is necessary to realize more prubes, specially in the critic equipment, in pilot plant is recommended to improve the efficiency of de press and the calibration of the decorticadora.

# I. INTRODUCCIÓN

Las características de los suelos y condiciones de Guatemala la convierten en un país con gran potencial en el campo de los biocombustibles. Entre ellos se encuentra el biodiesel que es un combustible biodegradable, renovable y puede ser fabricado a partir de materia prima propia de la región. Este trabajo contribuye en el estudio de este campo evaluando un método para obtener biodiesel a partir de aceite vegetal de una planta oleaginosa llamada comúnmente piñón; nombre científico: *Jatropha Curcas*, variedad: Criolla.

El cultivo y estudio del piñón representa un área de interés para el país debido a sus características, a las tendencias del mercado actual de biocombustibles y a su adaptabilidad a los suelos de Guatemala. Se pretende probar si es posible evaluar el rendimiento y características fisicoquímicas tanto en la obtención de biodiesel como en la extracción del aceite de la semilla de piñón (*Jatropha Criolla*) a partir de dos procesos, a nivel de laboratorio y Planta Piloto para observar si existen variaciones estadísticas significativas.

En este trabajo de investigación se estudió la composición del fruto y semilla, la extracción de aceite mediante dos métodos, extracción con solventes y extracción con expeller y los factores que influenciaron en el rendimiento del mismo; así también obtener una caracterización del aceite obtenido mediante los dos procesos y caracterizar fisicoquímicamente el biodiesel. Las pruebas para el biodiesel se realizaron en los laboratorios de Operaciones Unitarias y el Laboratorio de Fisicoquímica de la Universidad del Valle de Guatemala y en el Laboratorio del Ministerio de Energía y Minas. Las pruebas hechas del aceite se llevaron a cabo en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Laboratorio de Química y Fisicoquímica en la Universidad del Valle de Guatemala y en el Laboratorio de PINCASA situado en Villanueva.

El método usado para obtener biodiesel fue el de transesterificación con metanol e hidróxido de potasio, éste se obtuvo a nivel de laboratorio con agitación moderada y fuerte, para comparar qué factor influye más en el mejor rendimiento en la cinética de reacción. Para obtener la máxima conversión de los triacilgliceroles a metil esteres de ácidos grasos se controló y se midió el porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite.

Se obtuvo un rendimiento promedio de las extracciones hechas con el mejor método estandarizado, se encontró las mejores temperaturas de operación, se usó como equipo principal de secado el Secador de Bandejas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para secar la semilla a un porcentaje de humedad entre el 10-12 %. Se encontró la composición de los componentes que tiene tanto el fruto como la semilla de dos lugares de Guatemala, una muestra fue de los frutos que se siembran en las Parcelas del ICTA en Cuyotenango, Suchitepéquez y otra muestra fue la que se da en las

montañas de Cuilco, Huehuetenango. Se realizaron extracciones a nivel de Planta Piloto con la maquinaria de Technoserve en Cuyotenango Suchitépquez.

Al aceite obtenido a nivel de laboratorio y Planta Piloto se le realizaron pruebas tales como la de Cromatografía de gases, también la del porcentaje de ácidos grasos libres, viscosidad y densidad. Se obtuvo biodiesel a nivel de laboratorio a partir de las extracciones de aceite hechas con hexano y del aceite obtenido en Planta Piloto. Dentro de las pruebas que se obtuvieron del biodiesel fueron la capacidad calorífica, punto de inflamabilidad, viscosidad, densidad e índice de agua y sedimentos, los procedimientos que se hicieron para obtener estas pruebas se basaron en el método ASTM. Se obtuvo una comparación del biodiesel obtenido mediante aceite extraído con hexano y del aceite obtenido en planta piloto para ver sus variaciones significativas especialmente mediante su capacidad calorífica.

Dentro de las conclusiones más importantes obtenidas, se observó que según las condiciones obtenidas en la planta piloto y en laboratorio, todavía se requiere mayor investigación para la producción de biodiesel a gran escala a partir del piñon, los costos de investigación realizados han sido altos debido a que no hay mucha siembra y producción de éste cuando es época de sequía; y también que se requieren mayores pruebas experimentales en equipos críticos de la maquinaria de extracción tales como la prensa y la decorticadora; se requiere mayor investigación en el sector agronómico para lograr una tecnología adecuada para su recolección y disposición a plagas en el campo de cultivo. El máximo rendimiento obtenido en porcentaje peso de la semilla fue alrededor del 33 % extrayendo con solventes y se obtuvo 4.25 L de aceite por quintal de fruto en Planta Piloto. En cuanto a las propiedades obtenidas del aceite y del biodiesel, éstos si cumplen con los parámetros requeridos especificados en normas internacionales para su aplicación en motores de combustión interna. Se deben buscar otros usos que se le pueda dar a la torta y cáscaras resultantes para hacer más rentable el proceso, ya sea utilizando un biodigestor con la cáscara del fruto para la producción de fertilizantes orgánicos y la torta como fuente de combustible sustituyendo al búnker o al diesel.

## II. ANTECEDENTES

### A. Lípidos

Los lípidos biológicos constituyen un grupo químicamente diverso de compuestos cuya característica común y definitoria es su insolubilidad en agua. Las funciones biológicas de los lípidos son igualmente diversas. En muchos organismos, las grasas y los aceites son las formas principales de almacenamiento energético, mientras que los fosfolípidos y los esteroides constituyen los principales elementos estructurales de las membranas biológicas. Otros lípidos, aun estando presentes en cantidades relativamente pequeñas, juegan papeles cruciales como cofactores enzimáticos, transportadores electrónicos, pigmentos que absorben la luz, anclas hidrofóbicas para proteínas, que ayudan en el plegamiento de las proteínas de membrana, agentes emulsionantes en el tracto digestivo, hormonas y mensajeros intracelulares (Lehninger, 2005).

Las grasas y aceites, utilizados casi universalmente como formas de almacenamiento de energía en los organismos vivos, son compuestos derivados de los ácidos grasos. Los ácidos grasos son derivados hidrocarbonados con un nivel de oxidación casi tan bajo (esto es, tan reducidos) como el de los hidrocarburos de los combustibles fósiles. La oxidación de los ácidos grasos (a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) en las células, al igual que la oxidación explosiva de los carburantes fósiles en los motores de combustión interna, es muy exergónica (Lehninger, 2005).

Los ácidos grasos son ácidos carboxílicos con cadenas hidrocarbonadas de 4 a 36 carbonos (C<sub>4</sub> a C<sub>36</sub>). En algunos ácidos grasos, esta cadena está completamente saturada (no tiene dobles enlaces) y sin ramificar; otros contienen uno o más dobles enlaces. Unos cuantos contienen anillos de tres carbonos, grupos hidroxilo o grupos metilo ramificados. La nomenclatura simplificada de estos compuestos específicos, la longitud de la cadena y el número de dobles enlaces separados por dos puntos; el ácido palmítico, que tiene 16 átomos de carbono y es saturado, se abrevia 16:0 y el ácido oleico de 18 carbonos con un doble enlace es 18:1. Las posiciones de los dobles enlaces se especifican por exponentes que siguen a una Δ (delta); un ácido graso de 30 carbonos con un doble enlace entre C-9 y C-10 (C1 es el carbono carboxílico) y otro entre C-12 y C-13 se designa 20:2(Δ<sup>9,12</sup>), por ejemplo. Los ácidos grasos más abundantes tienen números pares de átomos de carbono en una cadena sin ramificar de entre 12 y 24 carbonos. El número par de carbonos es consecuencia de la forma de síntesis de estos compuestos, que utiliza la condensación de unidades de acetato (de dos carbonos) (Lehninger, 2005).

La posición de los dobles enlaces también es regular; en la mayoría de ácidos grasos monoinsaturados, el doble enlace se encuentra entre C-9 y C-10 (Δ<sup>9</sup>); los restantes dobles enlaces de los ácidos grasos polinsaturados suelen ser Δ<sup>12</sup> y Δ<sup>15</sup>. Los dobles enlaces de los ácidos grasos polinsaturados casi nunca son conjugados (alternancia de enlaces dobles y sencillos como en -CH=CH-CH=CH-) sino que están separados por un grupo metileno (-CH=CH-CH<sub>2</sub>-CH=CH-). Los dobles enlaces de casi todos los ácidos grasos naturales están en la configuración cis. Los ácidos grasos trans se producen durante la fermentación en el

rumen de los animales productores de lácteos y carne. También se forman durante la hidrogenación de aceites de pescado o vegetales. Dado que dietas ricas en ácidos grasos trans están correlacionadas con niveles sanguíneos elevados de LDL (colesterol malo) y bajos de HDL (colesterol bueno), se recomienda evitar la ingestión de grandes cantidades de estos ácidos grasos. Por desgracia, las patatas fritas, los buñuelos y la repostería tienden a ser ricos en ácidos grasos trans (Lehninger, 2005).

Las propiedades físicas de los ácidos grasos y de los compuestos que los contienen vienen determinadas en gran parte por la longitud y el grado de insaturación de la cadena hidrocarbonada. La cadena hidrocarbonada apolar explica la escasa solubilidad de los ácidos grasos en agua. Así, el ácido láurico (12:0, *Mr* 200), tiene una solubilidad en agua de 0.063 mg/g- muy inferior a la de la glucosa (*Mr* 180), que es de 1100 mg/g-. Cuando más larga sea la cadena acílica grasa y menor el número de dobles enlaces, menor es la solubilidad en agua. El grupo ácido carboxílico es polar (y está ionizado a pH neutro), de ahí la ligera solubilidad en agua de los ácidos grasos de cadena corta (Lehninger, 2005).

**Tabla 1 Algunos ácidos grasos naturales: estructura, propiedades y nomenclatura**

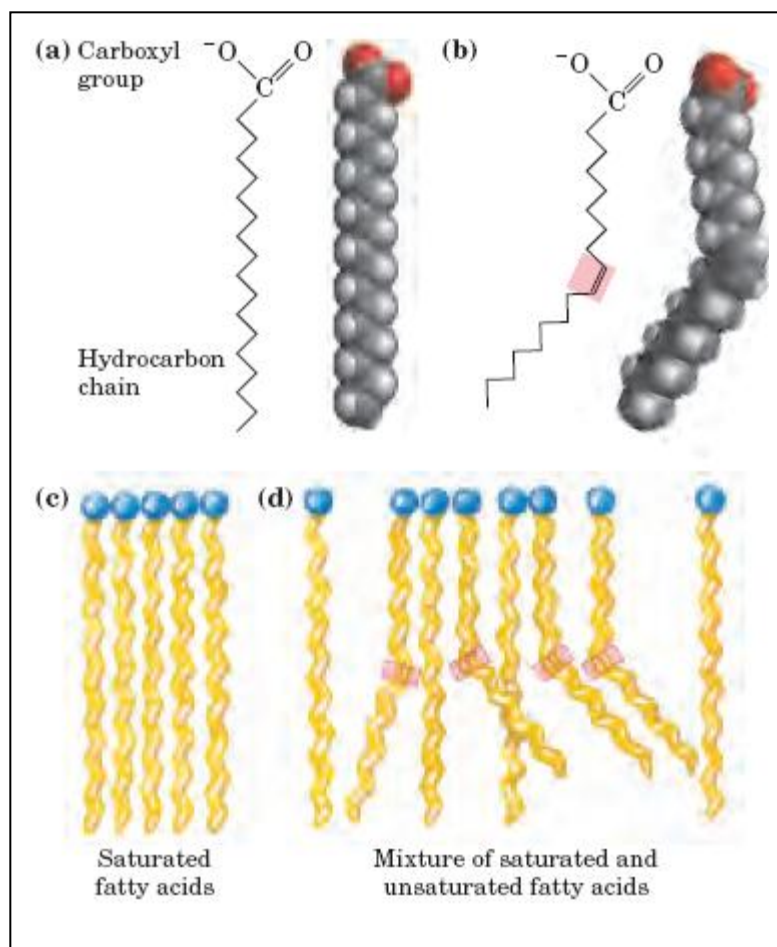
Esqueleto Carbonado	Estructura	Nombre sistemático	Nombre común (etimología)	Punto de fusión
12:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{10}\text{COOH}$	Acido n-dodecanoico	Ácido láurico	44.2
14:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$	Acido n-tetradecanoico	Ácido mirístico	53.9
16:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$	Acido n-hexadecanoico	Ácido palmítico	63.1
18:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$	Acido n-octadecanoico	Ácido esteárico	69.6
20:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{18}\text{COOH}$	Acido n-icosanoico	Ácido araquídico	76.5
24:0	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{22}\text{COOH}$	Acido n-tetracosanoico	Ácido lignocérico	86.0
16:1 ( $\Delta^9$ )	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_5\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Acido cis-9-hexadecenoico	Ácido palmitoleico	1-0.5
18:1 ( $\Delta^9$ )	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Acido cis-9-octadecenoico	Ácido oleico	13.4

Continuación Tabla 1

18:2 ( $\Delta^{9,12}$ )	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Ácido <i>cis</i> -, <i>cis</i> -9,12-octadecadienoico	Ácido linoleico	1-5
18:3 ( $\Delta^{9,12,15}$ )	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$	Ácido <i>cis</i> -, <i>cis</i> -, <i>cis</i> -9,12,15octadecatrienoico	Ácido linolénico	-11
20:4 ( $\Delta^{5,8,11,14}$ )	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_4\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CHCH}_2\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_3\text{COOH}$	Ácido <i>cis</i> -, <i>cis</i> -, <i>cis</i> -, <i>cis</i> -5,8,11,14 Icosatetraenoico	Ácido araquidónico	-49.5

Fuente: Lehninger, 2005.

Figura 1 Grado de empaquetamiento de los ácidos grasos



El grado de empaquetamiento de los ácidos grasos depende de su grado de saturación. a) Dos representaciones del ácido graso saturado ácido esteárico (estearato a pH 7) se muestran en su conformación normal extendida. Cada línea del zigzag representa un enlace simple entre carbonos subyacentes. b) El doble enlace (sombreado) del ácido oleico (oleato) no le permite la rotación e introduce un giro rígido en la cola hidrocarbonada. Todos los demás enlaces de la cadena pueden rotar libremente. c) Los ácidos grasos totalmente saturados en la forma extendida se empaquetan en ordenamientos casi cristalinos estabilizados por muchas interacciones hidrofóbicas. d) La presencia de uno o más dobles enlaces cis interfiere en este empaquetamiento apretado dando lugar a agregados menos estables (Lehninger, 2005).

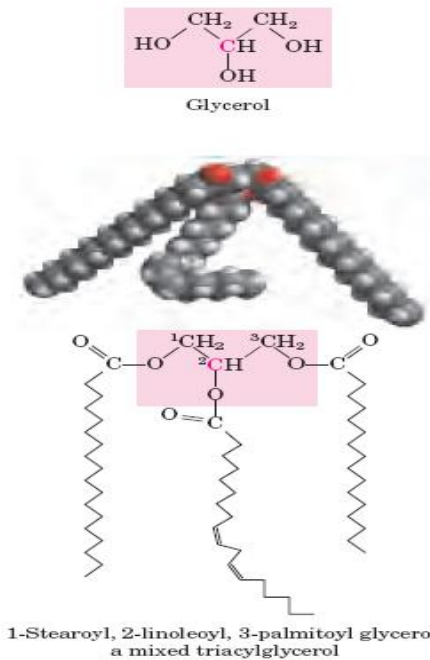
Los puntos de fusión están también muy influidos por la longitud y grado de saturación de la cadena hidrocarbonada. A temperatura ambiente (25°C), los ácidos grasos saturados desde 12:0 a 24:0 tienen una consistencia cerosa, mientras que los ácidos grasos insaturados de estas longitudes son líquidos oleosos. Esta diferencia en los puntos de fusión se debe a los diferentes grados de empaquetamiento de las moléculas de los ácidos grasos. En los compuestos totalmente saturados, la rotación libre alrededor de cada enlace carbono-carbono confiere gran flexibilidad a la cadena hidrocarbonada; la conformación más estable es la forma totalmente extendida, en la que los impedimentos estéricos entre átomos vecinos están reducidos al mínimo. Estas moléculas se pueden empaquetar fuertemente en ordenamientos casi cristalinos con contactos por uniones de van der Waals entre átomos a lo largo de la propia cadena y átomos de cadenas vecinas. En ácidos grasos insaturados, un doble enlace cis provoca un doblamiento en la cadena hidrocarbonada. Los ácidos grasos con uno o más doblamientos no se pueden empaquetar tan fuertemente como los ácidos grasos totalmente saturados, por lo que las interacciones entre ellos son más débiles. Dado que se necesita menos energía térmica para desordenar estos conjuntos poco ordenados de ácidos grasos insaturados, éstos tienen puntos de fusión claramente más bajos que los ácidos grasos saturados de la misma longitud de cadena (Lehninger, 2005).

En los vertebrados los ácidos grasos libres circulan por la sangre unidos de forma no covalente a una proteína portadora, la albúmina sérica. No obstante, los ácidos grasos en su mayoría se encuentran presentes en el plasma sanguíneo en forma de derivados del ácido carboxílico tales como ésteres o amidas. Al carecer del grupo carboxilado cargado, estos derivados de los ácidos grasos son generalmente aún menos solubles en agua que los ácidos grasos libres (Lehninger, 2005).

**1. Los triacilglicerol**es son ésteres de ácidos grasos y glicerol. Los lípidos más sencillos obtenidos a partir de los ácidos grasos son los triacilglicerol. Los triacilglicerol están compuestos por tres ácidos grasos unidos por enlace éster con un solo glicerol. Los que contienen el mismo tipo de ácido graso en las tres posiciones se denominan triacilglicerol simples y se denominan según el ácido graso que contienen. La triesterina, la tripalmitina y la trioleína son, respectivamente, ejemplos de triacilglicerol sencillos que contienen 16:0, 18:0 y 18:1. La mayoría de los triacilglicerol naturales son mixtos; éstos contienen dos o más ácidos grasos diferentes. Se han de especificar el nombre y posición de cada ácido graso para designar sin ambigüedades estos compuestos (Lehninger, 2005). Dado que los hidroxilos

polares del glicerol y los carboxilatos polares de los ácidos grasos están unidos por enlaces éster, los triacilgliceroles son moléculas apolares, hidrofóbicas, prácticamente insolubles en agua. Los lípidos tienen densidades específicas menores que el agua, lo que explica por qué las mezclas de agua y aceite tienen dos fases (Lehninger, 2005).

Figura 2 Estructura de los triacilgliceroles mixtos

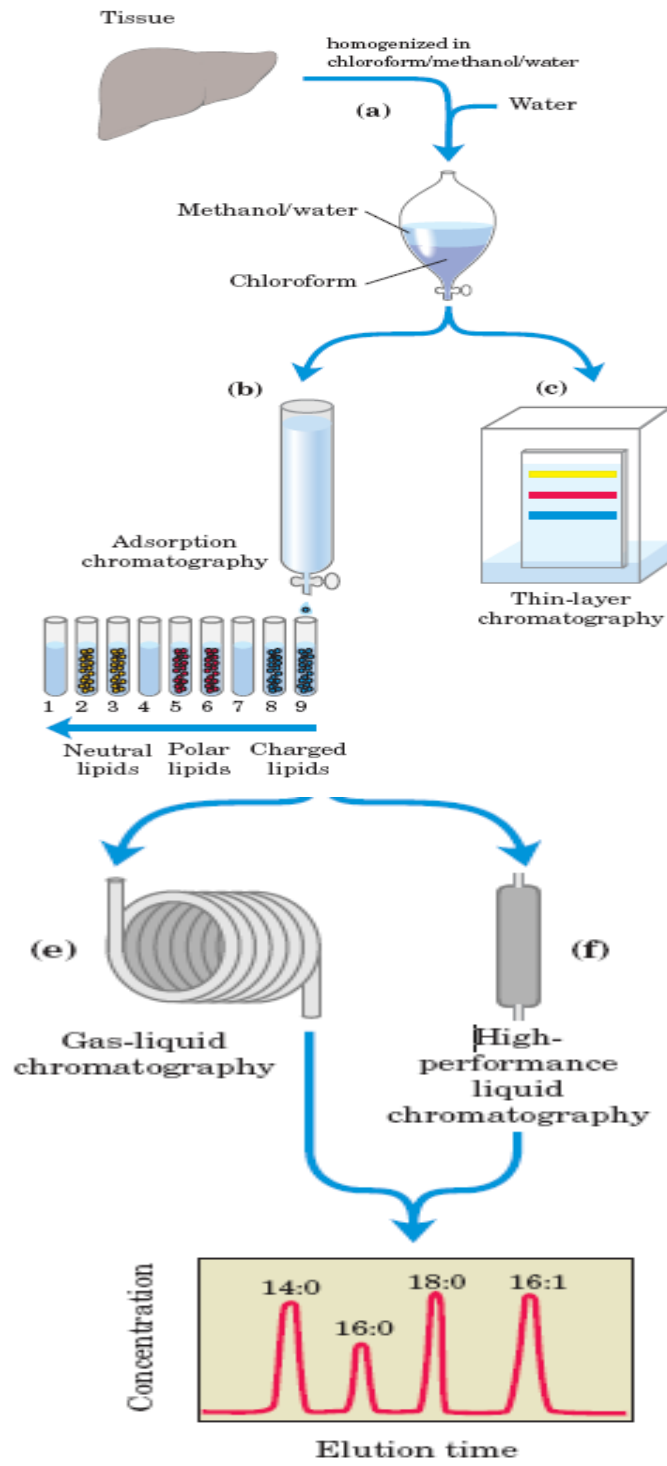


Glicerol y un triacilglicerol. El triacilglicerol mixto representado en esta figura tiene tres ácidos grasos diferentes unidos al armazón de glicerol. Cuando hay dos ácidos grasos diferentes en C-1 y C-3, el C-2 se transforma en un centro quiral (Lehninger, 2005).

**2. La extracción de lípidos requiere la utilización de disolventes orgánicos.** Los lípidos neutros (triacilgliceroles, ceras, pigmentos, etc) se extraen fácilmente de los tejidos con éter etílico, cloroformo o benceno, disolventes en los que no se produce la agregación de lípidos promovida por las interacciones hidrofóbicas. Los lípidos de membrana se extraen mejor con disolventes orgánicos más polares, tales como etanol o metanol, que reducen las interacciones hidrofóbicas entre las moléculas de lípidos, pero que también debilitan los puentes de hidrógeno y las interacciones electrostáticas que unen los lípidos de membrana a las proteínas de membrana.

Una disolución extractiva muy utilizada es una mezcla de cloroformo, metanol y agua. Inicialmente en proporciones que sean miscibles, produciendo una sola fase. Después de homogenizar el tejido en este disolvente para extraer todos los lípidos, se añade más agua al extracto resultante, que se separa en dos fases, metanol/agua (fase superior) y cloroformo (fase inferior). Los lípidos permanecen en el cloroformo y las moléculas más polares tales como proteínas y glúcidos se sitúan en la fase polar de metanol/agua (Lehninger, 2005).

Figura 3 Procedimientos comunes utilizados en la extracción, separación e identificación de lípidos celulares



Fuente: Lehninger, 2005.

Algunos procedimientos comunes utilizados en la extracción, separación e identificación de lípidos celulares. a) Se homogeniza el tejido en una mezcla de cloroformo/metanol/agua, la cual al añadir más agua y eliminar el sedimento no extraíble por centrifugación proporciona dos fases.

Se pueden extraer diversos lípidos de la fase cloroformo mediante b) cromatografía de adsorción en columna de gel de sílice, a través de la que se hacen pasar disolventes de polaridad creciente o c) cromatografía en capa fina (TLC), en la que los lípidos son arrastrados sobre una placa recubierta con gel de sílice por un frente de disolvente ascendente.

Los lípidos menos polares se desplazan más rápidamente que los lípidos más polares o los que están cargados. La TLC con los disolventes adecuados también puede servir para separar especies lipídicas muy semejantes dentro de una misma clase: los lípidos cargados fosfatidilserina, fosfatidilglicerol y fosfatidilinositol se separan fácilmente en TLC (Lehninger, 2005).

Para la determinación de la composición de ácidos grasos, una fracción lipídica que contiene ácidos grasos unidos por enlace éster se transesterifica en una solución acuosa templada de NaOH y metanol d) produciéndose una mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos.

Estos ésteres metílicos se separan en función de la longitud de cadena y grado de saturación por e) cromatografía gas-líquido (GLC) o por f) cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). La determinación precisa de la masa molecular por espectrometría de masas permite la identificación sin ambigüedades de los lípidos individuales (Lehninger, 2005).

**3. La cromatografía de adsorción separa los lípidos de polaridad diferente.** Las mezclas complejas de lípidos tisulares se pueden fraccionar mediante procedimientos cromatográficos basados en la diferente polaridad de cada clase de lípido.

En la cromatografía de adsorción, se empaqueta un material polar insoluble, tal como el gel de sílice en una columna de vidrio, aplicándose la mezcla de lípidos (en solución de cloroformo) en la parte superior de la columna. (En la cromatografía líquida de alta resolución, la columna tiene un diámetro menor y los disolventes se fuerzan a pasar a través de la columna a altas presiones).

Los lípidos polares se fijan fuertemente al ácido silícico polar mientras que los lípidos neutros pasan directamente a través de la columna y emergen en el primer lavado con cloroformo. A continuación se eluyen los lípidos polares, en orden de polaridad creciente, lavando la columna progresivamente con disolventes de mayor polaridad.

Los lípidos polares sin carga se eluyen con acetona y los lípidos muy polares o cargados (tales como los glicerofosfolípidos), se eluyen con metanol (Lehninger, 2005). La cromatografía en capa fina sobre ácido silícico utiliza el mismo principio. Se distribuye una fina capa de gel de sílice (ácido silícico) sobre una placa de vidrio a la que se adhiere.

Se aplica una pequeña muestra de lípidos disueltos en cloroformo cerca del borde de la placa, lo cual se sumerge en un recipiente poco profundo con un disolvente orgánico, o una mezcla de disolventes,

contenidos dentro de una cámara cerrada saturadas con vapor del disolvente. A medida que el disolvente asciende sobre la placa por acción de la capilaridad arrastra consigo los lípidos.

Los lípidos menos poares con los que se desplazan más rápidamente, ya que tienen menos tendencia a unirse al ácido silícico. Después de su separación se pueden detectar los lípidos pulverizando sobre la placa con un colorante que presenta fluorescencia cuando se asocia con lípidos o bien exponiendo la placa a los vapores de yodo.

El yodo reacciona reversiblemente con los dobles enlaces de los ácidos grasos, confiriendo a los lípidos que los contengan un color amarillo o marrón. Existe una gran variedad de reactivos que se pulverizan y que son también útiles en la detección de lípidos específicos. Para el análisis posterior, se pueden rascar las regiones de la placa que contienen los lípidos separado recuperándolos por extracción con un disolvente orgánico (Lehninger, 2005).

**4. La cromatografía gas-líquido separa las mezclas de derivados lipídicos volátiles.** La cromatografía gas-líquido separa los componentes volátiles de una mezcla según sus tendencias relativas a disolverse en el material inerte empaquetado en la columna cromatográfica y a volatilizarse, desplazándose a través de la columna arrastrados por una corriente de un gas inerte tal como el helio. Algunos lípidos son de naturaleza volátil, pero la mayoría han de modificarse previamente para aumentar su volatilidad (esto es, disminuir su punto de ebullición).

Para el análisis de los ácidos grasos presentes en una muestra de fosfolípidos, se calientan primeramente los lípidos en una mezcla metanol/HCL o metanol/NaOH, que convierte los ácidos grasos que esterificaban el glicerol en sus ésteres metílicos (en un proceso de transesterificación). Se aplican a continuación estos ésteres metílicos de los acilos grasos en una columna de cromatografía gas-líquido y se calienta ésta para volatilizar los compuestos.

Aquellos ésteres de acilo graso más solubles en el material de la columna se reparten (disuelven) en el mismo; los menos solubles son arrastrados por la corriente de gas inerte y emergen en primer lugar de la columna. El orden de elución depende de la naturaleza del adsorbente sólido de la columna y del punto de ebullición de los componentes de la mezcla lipídica.

Con la utilización de los componentes de la mezcla lipídica. Con la utilización de estas técnicas se pueden separar completamente mezclas de ácidos grasos con diferentes longitudes de cadena y diversos grados de insaturación (Lehninger, 2005).

**5. La hidrólisis específica ayuda a determinar la estructura lipídica.** Ciertas clases de lípidos son susceptibles de degradación en condiciones específicas. Por ejemplo, todos los ácidos grasos unidos por enlace éster en los triacilgliceroles, fosfolípidos y ésteres de esteroides se liberan mediante tratamiento ácido o alcalino suave, mientras que un tratamiento algo más fuerte libera los ácidos grasos unidos por enlace amida de los esfingolípidos.

Las enzimas que hidrolizan específicamente ciertos lípidos también son útiles en la determinación de la estructura lipídica. La combinación de hidrólisis específica con caracterización de los productos por

cromatografía en capa fina, cromatografía gas-líquido o cromatografía líquida de alta resolución permite, a menudo, la determinación de la estructura de un lípido (Lehninger, 2005).

**6. La espectrometría de masas revela la estructura lipídica completamente.** Para establecer sin ambigüedades la longitud de una cadena hidrocarbonada o la posición de los dobles enlaces, es de gran valor el análisis por espectrometría de masas de los lípidos o de sus derivados volátiles.

Las propiedades químicas de los lípidos similares (por ejemplo, dos ácidos grasos de longitud similar insaturados en posiciones diferentes o dos isoprenoides con un número diferente de unidades isopreno) son muy parecidas y a menudo la posición de elución utilizando varios métodos cromatográficos no los distinguen entre sí.

Sin embargo, cuando se acopla un espectrómetro de masas a la salida de una columna cromatográfica, los componentes de la mezcla lipídica pueden ser separados o identificados simultáneamente por su patrón de fragmentación característico (Lehninger, 2005).

**7. Determinación de la estructura de un ácido graso por espectrometría de masas.** El ácido graso se convierte en primer lugar en un derivado que minimiza la migración de los dobles enlaces cuando se fragmenta la molécula mediante bombardeo por electrones.

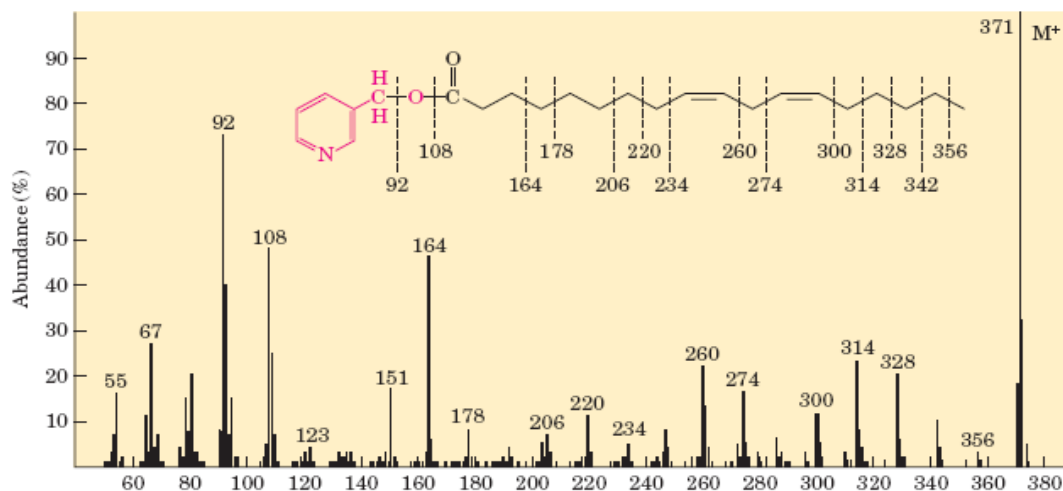
El derivado aquí mostrado es un éster picolinilo del ácido linoleico 18:2 ( $\Delta^{9,12}$ )- en el que el alcohol es el pinolinol (rojo). Cuando se bombardea con una corriente de electrones, esta molécula se volatiliza y se convierte en el ion inicial en el que el átomo de N lleva una carga positiva, y una serie de fragmentos menores producidos por rotura de enlaces C-C en el ácido graso.

El espectrómetro de masas separa estos fragmentos cargados según su razón masa/carga ( $m/z$ ). Los iones prominentes a  $m/z = 92, 108, 151$  y  $164$  contienen el anillo de piridina del picolinol y varios fragmentos del grupo carboxilo, lo que demuestra que el compuesto es, desde luego, en éstos picolinilo. El ion molecular ( $m/z = 371$ ) confirma la presencia de un ácido graso de C-18 con dos dobles enlaces.

La serie uniforme de iones separados por 14 unidades de masa atómica (uma) representa la pérdida de sucesivos grupos metilo y metileno desde el extremo derecho de la molécula (C-18 del ácido graso), hasta que se llega al ion de  $m/z = 300$ .

A éste le sigue un hueco de 26 uma para los carbonos del doble enlace terminal con  $m/z = 274$ ; otro hueco de 14 uma para el grupo metileno C-11 a  $m/z = 260$  y así sucesivamente. De esta manera se determina la estructura completa, aunque estos datos por si solos no revelan la configuración (cis o trans) de los dobles enlaces (Lehninger, 2005).

Figura 4 Cromatografía de masas para la identificación de estructuras



Fuente: Lehninger, 2005.

## B. *Jatropha* Criolla

### 1. Zonas geográficas adecuadas para su cultivo en Guatemala

#### a. Litoral del Océano Pacífico

Elevaciones menores de 60 msnm., y precipitación debajo de 1,600 mm. No incluye zonas inundadas o inundables ni suelos extremadamente arcillosos (Estrada, 2008).

#### b. Oriente del país

Elevaciones entre 300 a 1,400 msnm., a excepción de Izabal, por su régimen de lluvias nocivos para *Jatropha* (Estrada, 2008).

#### c. Occidente del país

Valle del río Cuilco o Selegua, Valle de las Delicias en el Vértice NW de Huehuetenango (Estrada, 2008).

Valles de San Jerónimo, Salamá, Rabinal, San Miguel Chicaj y Cubulco en Baja Verapaz, incluyendo el valle de Sacapulas en Quiché. Se evita en esta región los suelos de textura muy fina sobre topografía plana (Estrada, 2008).

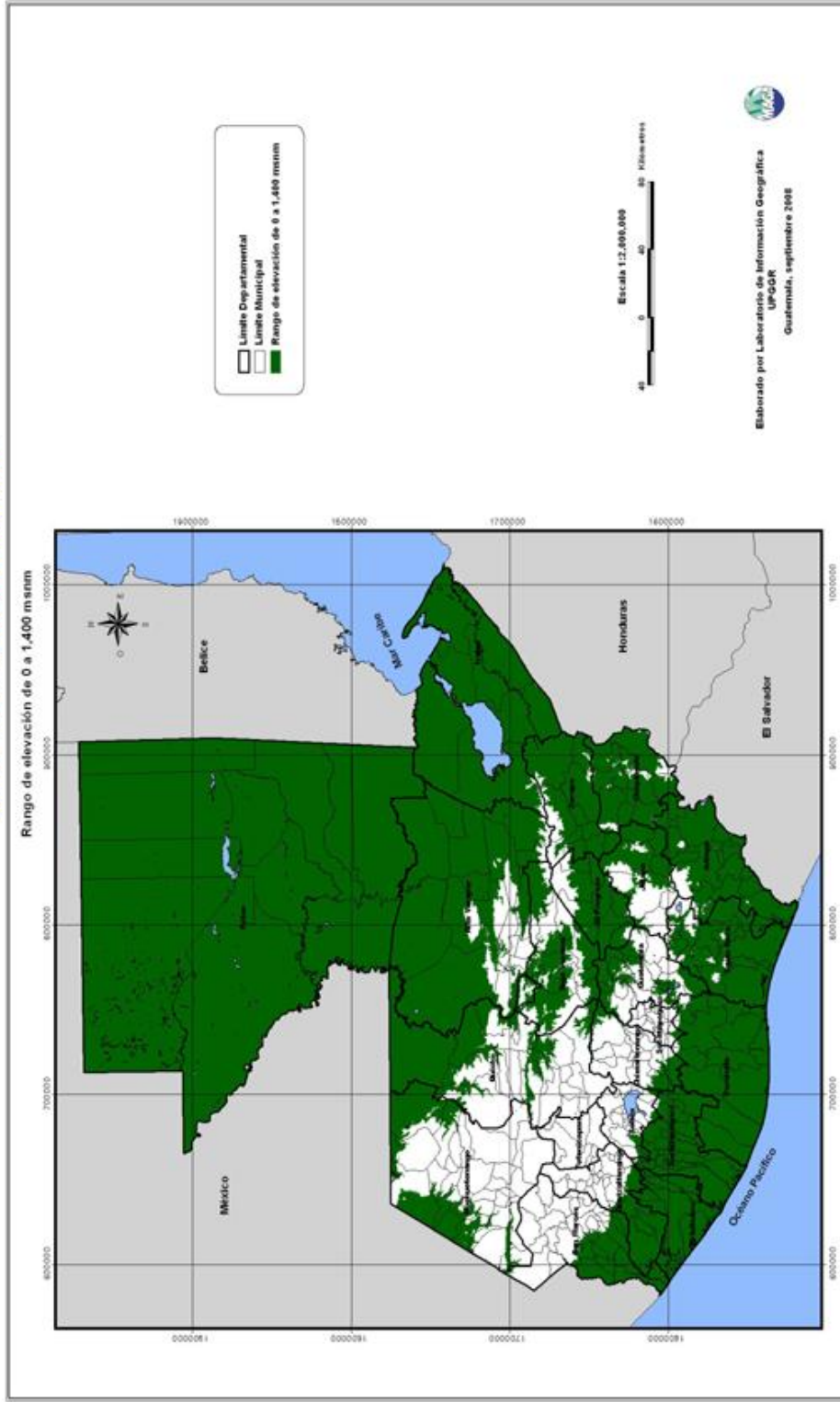
#### d. Para todos los casos

La precipitación anual debe estar en el rango de 400 a 1,600 mm.

Las estaciones seca y lluviosa deben ser muy bien diferenciadas. (más o menos 6 meses c/u a lo largo del año).

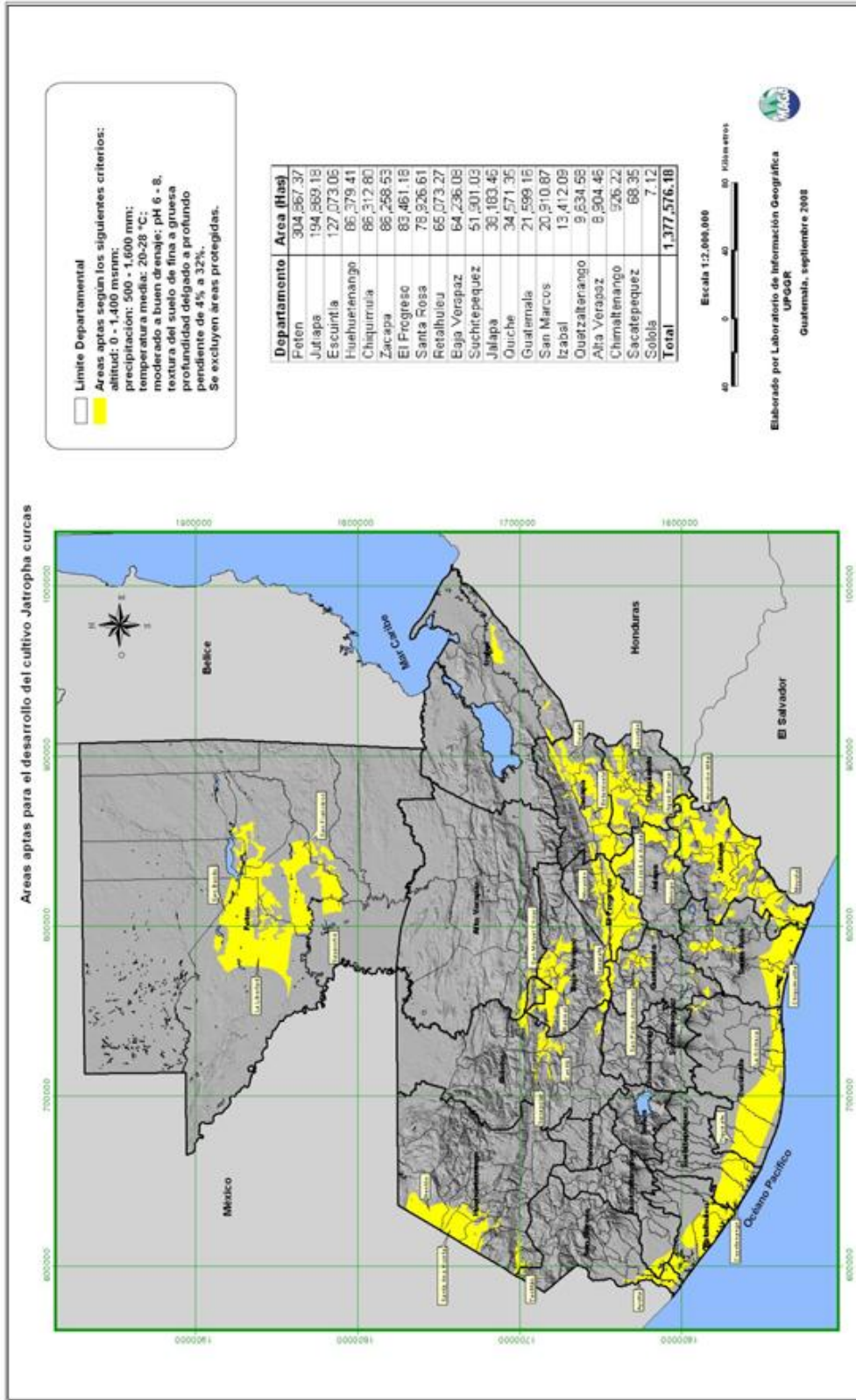
Excluir suelos con textura extremadamente arcillosa y densa pedregosidad. La topografía puede ser plana, ondulada y hasta quebrada inclusive. La pedregosidad no es problema (Estrada, 2008).

Figura 5 Zonas potencialmente aptas



Fuente: Ing. Rodolfo Estrada. Ex ministro de Agricultura. *Algunas Experiencias de su Cultivo en Guatemala. 2008.*

Figura 6 Áreas potenciales para Jatrophia



Fuente: Ing. Rodolfo Estrada. Ex ministro de Agricultura. Algunas experiencias de su cultivo en Guatemala. 2008

El piñón (*Jatropha Criolla*) es una planta nativa de Mesoamérica. Sus plantaciones pueden llegar a ser una excelente vía de reforestación, contribuyendo a la conservación de los suelos y evitando la erosión; esto la convierte en una alternativa para la recuperación de suelos marginales y áreas en proceso de desertificación ya que puede crecer en suelos pobres y soportar largas sequías. Crece relativamente rápido (según el clima, entre tres y seis años) y vive más de 30, prefiriendo una temperatura media de más de 25 °C; durante los cuales produce semillas con un contenido en aceite de 28 -36 %. Por ser una planta venenosa que crece de forma natural y silvestre en los países tropicales desaparecen algunos inconvenientes que poseen otras plantaciones, como por ejemplo: Plantaciones monocultivo, tala voraz o encarecimiento del precio de los alimentos, tal y como ya ha sucedido con el maíz. El piñón (*Jatropha Criolla*) se cree originario de Centro América, pero crece en todos los países tropicales. En Birmania este cultivo se extiende sobre 800,000 hectáreas y en China sobre 20,000. El aceite que se extrae de ella puede ser destinado para la producción de biodiesel, así como la elaboración de jabones. Otra de las ventajas naturales de esta planta, de la familia de las Euphorbiaceae, frente a otros carburantes renovables es su capacidad para resistir en condiciones climatológicas extremas. Puede crecer en suelos pobres en nutrientes o soportar largas temporadas de escasez hídrica. Si bien para su óptimo crecimiento requiere más de 500 mililitros de agua al año, salvo en zonas donde la humedad del aire sea muy elevada, podría crecer con sólo 250 mililitros. Existen otras plantas venenosas de las que se puede extraer su aceite. Pero no muchas y además el piñón (*Jatropha Criolla*) parece tener más ventajas frente al resto de especies de flora consideradas venenosas. Los litros de biodiesel que se obtienen por hectárea, dependerán del cultivo que da origen al aceite vegetal, se puede observar en la siguiente tabla que el piñón es uno de los cultivos con mejor rendimiento promedio por hectárea cultivada (Torres, 2009).

**Tabla 2 Rendimiento de varios tipos de semillas Oleoginosas**

Nombre común del cultivo	Nombre científico	Parte oleaginosa	Rendimiento estimado de aceite en plantación (kg/ha*año)	Contenido de aceite del fruto o semilla (%)
Palma Aceitera	<i>Elaeis guineensis</i>	Pulpa de fruto Semilla	5000 800	45-55 44-57
Soya	<i>Glycine max</i>	Semilla	280 - 580	18 - 20
Colza y canola	<i>Brassica napus</i> <i>Brassica rapa</i>	Semilla	700 – 1500	40

Continuación Tabla 2

Nombre común del cultivo	Nombre científico	Parte oleaginosa	Rendimiento estimado de aceite en plantación (kg/ha*año)	Contenido de aceite del fruto o semilla (%)
Girasol	<i>Helianthus annuus</i>	Semilla	600 – 950	45 - 55
Algodón	<i>Gossypium hirsutum</i>	Semilla	300	18 - 25
Ricino o higuera	<i>Ricinus communis</i>	Semilla	1200	45 - 55
Piñon	<i>Jatropha Criolla</i>	Semilla con cáscara	1590	50 - 60 24 - 34
Aguaje	<i>Mauritia flexuosa</i>	Pulpa	2400	21.1
Almendro	<i>Caryocar villosum</i>	Pulpa y semilla	270	
Almendro colorado	<i>Caryocar glabrum</i>	Semilla		37
Babasu	<i>Orbignia phalerata</i>	Semilla	90 – 150	72
Bacuri	<i>Platonia insignis</i>	Semilla		46
Castaña	<i>Bertholletia excelsa</i>	Semilla		69.3
Chopé	<i>Gustavia longifolia</i>	Pulpa		30
Coco	<i>Cocos nucifera</i>	Endocarpio	610 – 732	66
Copoasu	<i>Theobroma grandiflorum</i>	Semilla	482 -808	
Hamaca Huayo	<i>Couepia dollicopoda</i>	Semilla	70 – 80	
Huasaí	<i>Euterpe precatoria</i>	Pulpa y Semilla		
Inchi	<i>Caryodendron orinocense</i>			41 - 59
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i>	Nuez		46.3

Fuentes: Adaptada de Coello, 2006; *Tratado de Cooperación Amazónica*, 1997; Villachica, 1996. *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú* (Torres, 2009).

## **2. Ficha técnica de la *Jatropha Criolla***

**Reino:** Plantae

**Subreino:** Tracheobionta

**División:** Magnoliophyta

**Clase:** Magnoliopsida

**Subclase:** Rosidae

**Orden:** Euphorbiales

**Familia:** Euphorbiaceae

**Género:** *Jatropha*

**Especie:** *Curcas*, variedad *Criolla*

Origen: Es una planta oleaginosa de porte arbustivo con más de 3500 especies agrupadas en 210 géneros. Es originaria de México y Centroamérica, pero crece en la mayoría de los países tropicales. Se le cultiva en América Central, Sudamérica, Sureste de Asia, India y África (Torres, 2009).

Nombre común en distintos países: Coquito, Capate, Tempate, Piñon, Piñoncito, Piñol, Piñon Botija, Higos del duende, Barbasco, Piñones purgativos, Higo de infierno, Purga de fraile, Tua tua, nuez del physic, pinhao manso, etc., (Torres, 2009).

## **3. Morfología vegetal**

Detalle general. Es un arbusto que crece más de 2 mts de altura con corteza blanco grisácea y exuda un látex translucido (Torres, 2009).

Tallo. Los tallos crecen con discontinuidad morfológica en cada incremento (Torres, 2009).

Raíz. Normalmente se forman cinco raíces, una central y cuatro periféricas (Torres, 2009).

Hojas. Las hojas normalmente se forman con 5 a 7 lóbulos acuminados, pocos profundos y grandes con pecíolos largos de 10 a 15 cm y de igual ancho. Árbol con hojas caducas (Torres, 2009).

Flores. Las inflorescencias se forman terminalmente en el axial de las hojas en las ramas. Ambas flores, masculinas y femeninas, son pequeñas (6-8 mm), verdoso-amarillo en el diámetro y pubescente. Cada inflorescencia rinde un manojo de aproximadamente 20 frutos ovoides o más (Torres, 2009).

Fruto. El desarrollo del fruto necesita 90 días desde la floración hasta que madura la semilla. Son cápsulas drupáceas y ovoides. Al inicio son canosas, pero dehiscentes cuando son secas. Las frutas son cápsulas inicialmente verde pero volviéndose a café oscuro o negro en el futuro. Las semillas están maduras cuando el fruto cambia de color del verde al amarillo (Torres, 2009).

Semillas. La fruta produce tres almendras negras, cada una aproximadamente de 2 centímetros de largo y 1 centímetro en el diámetro (Torres, 2009).

Fisiología vegetal. Colocada la semilla en el tubete con el sustrato adecuado y con una buena humedad la germinación toma cinco días. Se abre la cáscara de la semilla, sale la radícula y se forman 4 raíces

periféricas pequeñas. La germinación es epigea (cotiledones surgen sobre la tierra). Poco después que las primeras hojas se han formado, los cotiledones marchitan y se caen (Torres, 2009).

**Período vegetativo o Ciclo productivo.** Es una planta perenne, cuyo ciclo productivo se extiende de 45 a 50 años. Es de crecimiento rápido y con una altura nominal de 2 a 3 mts. En condiciones especiales llega hasta 5 mts. El grosor del tronco es de 20 cm con crecimiento desde la base en distintas ramas (Torres, 2009).

**Hábitat.** No requiere un tipo de suelo especial. Se desarrolla normalmente en suelos áridos y semiáridos. Responde bien a suelos con pH no neutros. La *Jatropha* crece casi en cualquier parte, incluso en las tierras cascojosas, arenosas y salinas, puede crecer en la tierra pedregosa más pobre, inclusive puede crecer en las hendeduras de piedras. Climáticamente, la *jatropha* se encuentra en los trópicos y subtropicos, resiste normalmente el calor aunque también soporta bajas temperaturas y puede resistir hasta una escarcha ligera. Su requerimiento de agua es sumamente bajo y puede soportar períodos largos de sequedad. Habita en campos abiertos, como en parcelas nuevas. Es susceptible a inundaciones (Torres, 2009).

**Densidad de plantación.** Densidades de 2500, 1600 y 1111 plantas p/ha. Ello implica colocarlas en 2 x 2 m; 2.5 x 2.5 m y 3 x 3 mts respectivamente. Se cultiva en forma de cuadro, a un distanciamiento de 2 metros entre surco y 2 metros entre plantas (2 x 2). Ello da un total de 2500 plantas por ha., (Torres, 2009).

Un plantín de 15 cm tiene ya las propiedades para trasplante a campo. El crecimiento es relativamente rápido. Es una planta perenne, resistente, creciendo en suelos marginales, produciendo semillas por 50 años en promedio. El fruto es tipo nuez verde, luego se torna amarilla y madura tomando un color marrón. Dentro del mismo se encuentran 3 semillas de color negro. La semilla resiste altas temperaturas y sequías. La planta nace en todo tipo de terreno y altitud tanto en terrenos áridos como húmedos. La mejor condición es con altitud de 600 a 800 mts. El género *Jatropha* contiene: alcaloides, sapogeninas, taninos, esteroides, taxoalbúminas, compuestos cianogénicos. Además, contiene aceites fijos, ácidos grasos tales como el palmítico, oleico, linoleico y el esteárico (Torres, 2009).

#### **4. Productos derivados de la *Jatropha***

**a. Aceite vegetal.** El aceite obtenido del prensado de las semillas es de uso directo para más de 400 productos en la Industria Química. El mayor impacto es su destino para biodiesel.

**b. Torta de la molienda.** Es utilizada para fertilizante. No obstante si se desintoxica la misma (por técnicas biotecnológicas) su destino es para alimento de animal bovino, porcino y aves de corral, ya que es rica en minerales y proteínas.

**c. Glicerol.** Luego del proceso de transesterificación (aceite *jatropha* más alcohol) se obtiene un 10 % de glicerol, con alto valor para uso farmacológico e industrial (Torres, 2009).

**Aceite –Propiedades.** El aceite de “*Jatropha criolla*” y el diesel comparten características similares que hacen del primero una opción viable para sustituir al combustible fósil (Torres, 2009).

**Tabla 3 Comparabilidad entre aceite de Jatropha y el diesel normal**

Propiedades	Aceite de Jatropha	Diesel
Gravedad específica	0.9186	0.82/0.84
Punto de llamarada	240/110 °C	50 °C
Punto de destilación	295 °C	350 °C
Viscosidad cinemática	50.73 cs	2.7 cs a 3.6 cs
Sulfuro	0.13 por ciento	1.2 o menos por ciento
Poder calorífico	9,470 kcal/kg	10,170 kcal/kg
Residuos de carbono	0.024	.35
Punto de ebullición	8 °C	10 °C
Punto de solidificación	2.0	0.14
Color	4.0	4 o menos

Fuente. Carlos Torres A. *Cultivos Energéticos SRL & Cooperativa El Rosario Ltda.*

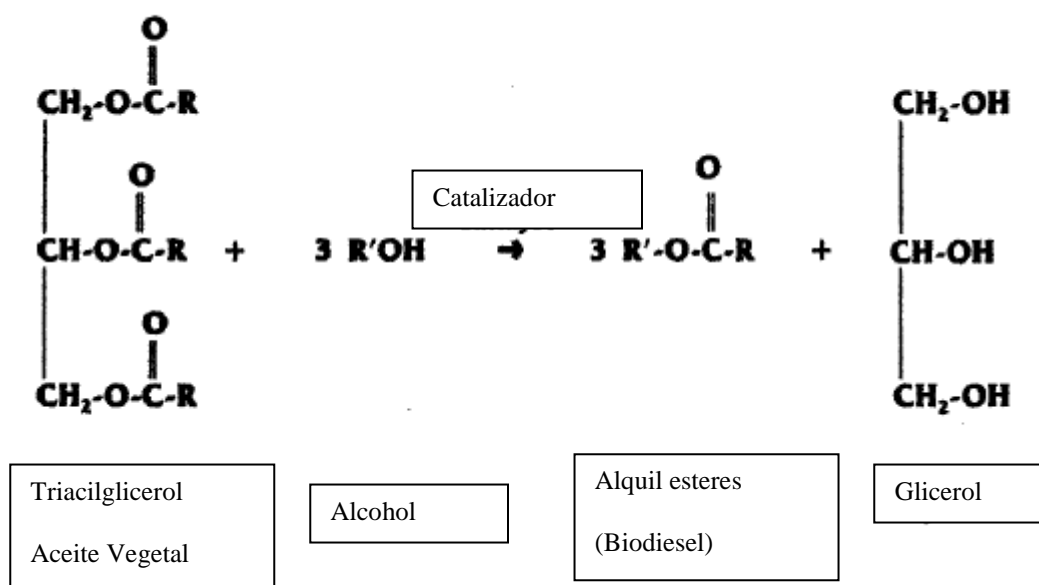
### C. Biodiesel

Son ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales y que se emplea en los motores de ignición de compresión (motores diesel) o en calderas de calefacción. (Definición ASTM). Esta definición incluye, además de los ésteres metílicos o etílicos, otros ésteres de monoalcoholes como los ésteres isopropílicos, butílicos, etc. El biodiesel es un combustible líquido renovable que puede producirse a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como soya, maní, piñón, etc.; además se puede obtener de aceites usados, oxidados o incluso de excremento animal. Tiene propiedades muy similares al aceite diesel; además, es seguro, biodegradable, y reduce agentes contaminantes serios del aire tales como: partículas en suspensión, monóxido de carbono, hidrocarburos y otros agentes tóxicos del aire. Los componentes básicos de los aceites y grasas son triglicéridos, los cuales provienen tanto de ácidos grasos saturados como insaturados. Dependiendo de estas y otras características del origen de los triglicéridos se obtendrá un biodiesel con unas cualidades y otras. Generalmente, el biodiesel posee una energía específica de combustión 5 % menor que la del diesel común, pero el tener mayor lubricidad y mejor índice de cetano, se compensa esta diferencia. Las mezclas al 20% de biodiesel con diesel de petróleo (B20) son las más comunes y se pueden utilizar generalmente en motores diesel sin

modificar. También se puede utilizar en su forma pura (B100), pero puede requerir ciertas modificaciones del motor para evitar problemas del mantenimiento y de funcionamiento (Larosa, 2007).

Los mayores componentes de aceites vegetales y grasas animales son triacilglicérols. Químicamente, los triacilglicérols son ésteres de ácidos grasos con glicerol (1,2,3-propanotriol; glicerol es comúnmente llamado glicerina. Para obtener biodiesel, el aceite vegetal o la grasa animal es sujeta a reacciones químicas llamada transesterificación. En esta reacción, el aceite vegetal o grasa animal reacciona en presencia de un catalizador (usualmente una base) con un alcohol (usualmente metanol) para dar los correspondientes alquil ésteres (para el metanol, metil ésteres) de la mezcla de ácidos grasos que son encontrados en el aceite vegetal o grasa animal. El biodiesel puede ser producido de una gran variedad de materias primas. Estas materias primas incluyen los aceites vegetales más comunes (por ejemplo: soya, semilla de algodón, palma, cacahuate, canola, girasol coco) y grasa animales (usualmente sebo) así también de aceites usados (por ejemplo, aceites de fritura usados). Biodiesel es miscible con petrodiesel en todas las proporciones, a las mezclas con petrodiesel son denominadas por acrónimos tales como B20, que indica una mezcla de 20% biodiesel con petrodiesel (Knothe, *et.al*, 2005).

Figura 7 Reacción de transesterificación



R es una mezcla de varias cadenas de ácidos grasos. El alcohol usado para producir biodiesel es usualmente metanol (R' = CH<sub>3</sub>)  
Fuente: (Knothe, *et.al*, 2005).

Biodiesel tiene varias ventajas distintas comparadas con petrodiesel que lo hacen totalmente competitivo con petrodiesel en aspectos más técnicos:

- Derivado de fuentes domésticas renovables, que reducen la dependencia y preserva el petróleo.

- Biodegradabilidad
- Reducción de las emisiones más exhaustas (con la excepción de óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>)
- Punto más alto de ebullición, esto da un seguro manejo y almacenamiento.
- Excelente lubricidad.

Algunos problemas asociados con biodiesel son sus inherentes precios altos, puesto que en muchos países esta fuera de legislación e incentivos regulatorios o subsidios en la forma de reducir impuestos, emisiones ligeras de emisiones exhaustivas (NO<sub>x</sub>), estabilidad cuando es expuesto a aire (estabilidad oxidativa), y propiedades de flujo no muy buenas en climas fríos. Es por esto que es de interés usar materias primas tales como aceites de fritura usados (Knothe, *et.al*, 2005).

La mayor razón del porque los aceites vegetales y grasas animales son transesterificados a alquil esterres (biodiesel) es que la viscosidad cinemática del biodiesel es mucho más cerca que la de petrodiesel. La alta viscosidad de aceites y grasas no transesterificadas lideran problemas operacionales en el motor diesel tales como depósitos en varias partes del motor. Aunque hay motores y calderas que pueden usar aceites no transesterificados, la gran mayoría de motores requieren combustibles de menor viscosidad (Knothe, *et.al*, 2005).

El hecho que los aceites vegetales, grasas animales, y sus derivados tales como alquil esterres son adecuados como combustible diesel demuestra que deberían ser un poco similares al combustible petrodiesel o por lo menos de algunos de sus componentes. La propiedad del combustible que mejor muestra esta idoneidad es llamada el número de cetano. Otras propiedades que son importantes para determinar idoneidad son el calor de combustión, punto de nube, punto de escurrimiento, viscosidad cinemática, estabilidad oxidativa y lubricidad (Knothe, *et.al*, 2005).

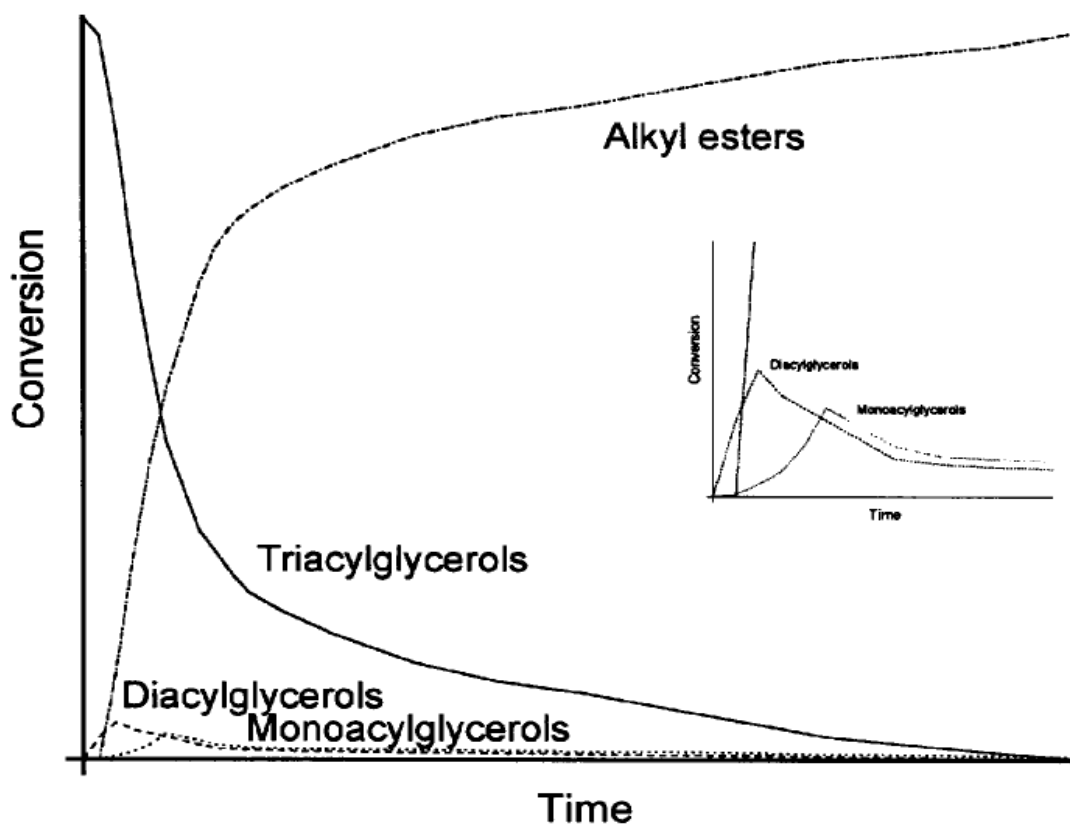
**1. Bases de la reacción de transesterificación.** Cuatro métodos para reducir la alta viscosidad de aceites vegetales para posibilitar su uso en motores comunes diesel sin problemas operacionales tales como depósitos en el motor han sido investigados: mezclas con petrodiesel, pirolisis, microemulsificación (mezclas con cosolventes), y transesterificación. Transesterificación es por mucho el método más común. Los esterres más comunes son metil esterres. En Brasil, por ejemplo, donde etanol es mas barato, etil esterres son usados como combustible (Knothe, *et.al*, 2005).

Además de aceites vegetales y grasas animales, otros materiales tales como aceites de fritura pueden ser adecuados para producción de biodiesel; sin embargo, cambios en el procedimiento de reacción frecuentemente tiene que ser hecho debido a la presencia de agua o ácidos grasos libres en los materiales (Knothe, *et.al*, 2005).

**a. Mecanismo de la reacción de transesterificación.** La reacción, denominada transesterificación, substituye el alcohol (metanol o etanol) por la glicerina en los triglicéridos (grasas, aceites) para elaborar metil-esterres o etil-ésteres también denominados biodiesel. En general, la transesterificación es una reacción característica de los ésteres y consecuentemente de los lípidos y consiste en la transformación de un tipo de éster en otro (Barraza,2007).

Cuando el éster original reacciona con un alcohol, la reacción de transesterificación se denomina alcoholólisis. En el caso de la alcoholólisis de un aceite o grasa, las moléculas de triglicérido se combinan con un alcohol alifático de bajo peso molecular en presencia de un catalizador. Los productos de la reacción química son alquilésteres de los ácidos grasos del aceite o grasa y glicerol. Los alquilésteres una vez purificados mediante procesos de lavado y secado constituyen el biodiesel. El glicerol se puede beneficiar para obtener glicerina de alta pureza (Barraza,2007).

**Figura 8 Cinética de la reacción de transesterificación**



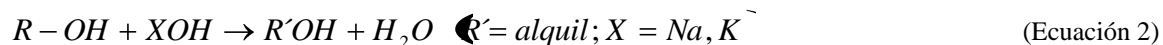
Di y monoacilgliceroles son formados como intermediarios en la reacción de transesterificación, al final de la reacción la concentración de éstos va a depender de las condiciones de la reacción. Generalmente, transesterificación puede ser hecha por catálisis ácida o básica. Sin embargo, en catalisis homogéneas, catálisis alcalina (hidróxido de sodio o potasio) es un proceso mucho más rápido que catálisis ácida. Fuente: (Knothe, *et.al*, 2005).

En adición al tipo de catálisis (alcalina vs. ácida), parámetros de reacción de transesterificación que son estudiados incluyen la relación molar de alcohol con el aceite vegetal, temperatura, tiempo de reacción, grado de refinamiento del aceite vegetal y el efecto de la presencia de humedad y ácidos grasos libres. Para que la transesterificación de el máximo rendimiento, el alcohol debería estar libre de humedad y el contenido de ácidos grasos libres debería ser < 0.5 %. La ausencia de humedad en la reacción de transesterificación es importante porque de acuerdo con la ecuación (mostrada para metil ésteres),



puede ocurrir hidrólisis de esteres alquílicos formados a ácidos grasos libres (Knothe, *et.al*, 2005).

A temperaturas mayores o iguales que 60°C, usando una relación molar de alcohol:aceite de por lo menos 6:1 y aceites completamente refinados, la reacción puede completarse en 1 hora. Estos parámetros (60°C de temperatura de reacción y 6:1 de relación de metanol:aceite) puede convertirse en una transesterificación estándar basada en metanol. Otros alcoholes (etanol y butanol) requiere temperaturas mayores (75 y 114°C, respectivamente) para una conversión óptima. Alcóxidos tienen la ventaja sobre hidróxidos que la reacción de formación de agua de acuerdo con la ecuación



no puede ocurrir en el sistema de reacción, por lo que garantiza que la reacción de transesterificación del sistema tenga la menor cantidad de agua libre. La reacción anterior, sin embargo, es una de las que se forma cuando se usa NaOH o KOH como catalizador. Los catalizadores son higroscópicos por lo que hay que tener precaución para evitar contacto con humedad (Knothe, *et.al*, 2005).

**2. Producción Industrial.** El proceso del biodiesel y calidad están estrechamente relacionados. El proceso usado para refinar la materia prima y convertirla en biodiesel determina si el combustible va a encontrar las especificaciones aplicables. Para la transesterificación alcalina se muestra el siguiente diagrama del proceso implicado en la producción de biodiesel de materia prima que contengan bajos niveles de ácidos grasos libres. Estos incluyen aceite de soja, aceite de canol y aceites usados de restaurantes. Alcohol, catalizador y aceite son combinados en un reactor y agitados por 1 hora a 60°C. Plantas pequeñas usan comúnmente reactores batch pero las plantas más grandes usan procesos de flujo continuo implicando reactores agitados continuos. La reacción es algunas veces hecha en dos pasos en que el 80 % del alcohol y catalizador es adicionado al aceite que está en el reactor. Después, la corriente de producto de este reactor va un removedor de glicerina antes de entrar al segundo reactor. El 20 % faltante del alcohol y catalizador es adicionado a este segundo reactor. Este sistema provee una reacción muy completa con el potencial de usar menos alcohol que un sistema de un único paso. Después de la reacción, el glicerol es removido de los metil esteres. Debido a la baja solubilidad del glicerol en los esteres, esta separación generalmente ocurre rápidamente y puede ser lograda con cualquier tanque o centrífuga. El exceso de metanol puede actuar como solubilizante y puede retardar la separación. Sin embargo, este exceso de metanol es usualmente no removido de la corriente de reacción hasta que el glicerol y los metil ésteres son separados debido al cuidado acerca de la reacción de transesterificación reversible. El agua puede ser agregada la mezcla de la reacción después que la transesterificación ha sido completada para lograr la separación del glicerol. Kreutzer describió como altas presiones y temperaturas (90 bares, 240°C) pueden transesterificar las grasas sin antes remover o conversión de los ácidos grasos libres. Sin embargo, la mayoría de las plantas de biodiesel usan bajas temperaturas, cerca de la presión atmosférica y tiempos largos de reacción para reducir costos de equipos (Knothe, *et.al*, 2005).

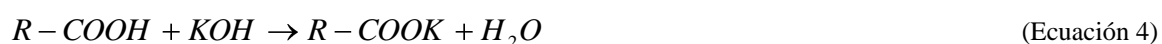
Después de la separación del glicerol, los metil esteres entran a un paso de neutralización y después pasan por medio de una trampa de metanol, usualmente un proceso flash de vacío o mediante la caída en un

evaporador, después a un lavado con agua. El ácido es adicionado al biodiesel para neutralizar algún catalizador residual y eliminar alguna sopa que pudo haberse formado durante la reacción. Sopas deberán reaccionar con el ácido para formar sales solubles en agua y ácidos grasos libres de acuerdo con la siguiente ecuación:

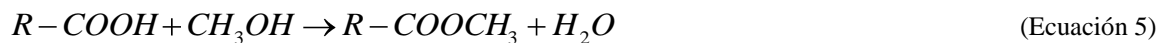


Las sales van a ser removidas en el paso de lavado de agua y los ácidos grasos libres van a quedarse en el biodiesel. El paso del lavado con agua es hecho con el fin de eliminar cualquier residuo de catalizador, sopa, sales, metanol o gliceroles libres del biodiesel. Neutralización antes del lavado reduce la cantidad de agua y minimiza el potencial de emulsiones a formarse cuando el lavado con agua es adicionada al biodiesel. Después del proceso de lavado, algún residuo de agua es removido del biodiesel por un proceso de vacío flash. La corriente de glicerol que se remueve del separador es solamente alrededor del 50 %. Este contiene algunos de los excesos de metanol y la mayoría del catalizador y sopas. En esta forma, el glicerol tiene un pequeño valor y su venta puede ser difícil. El primer paso en el refinamiento del glicerol es usualmente añadir ácido para dividir la sopa en ácidos grasos libres y sales. Los ácidos grasos libres no son solubles en el glicerol y pueden subir a la parte superior donde ellos pueden ser removidos y reciclados. Mittelbach y Koncar describieron un método para esterificar estos ácidos grasos libres y después retornarlos a la corriente de reacción de transesterificación. Las sales restantes con el glicerol, aunque dependen de los compuestos químicos presentes, algunas pueden precipitar. Una opción frecuente es usar hidróxido de potasio como el catalizador de reacción y el ácido fosfórico para neutralización por lo que la sal formada es fosfato de potasio, que puede ser utilizada como fertilizante. Después de acidificar y separar los ácidos grasos libres, el metanol en el glicerol es removido por un proceso de vacío flash o algún tipo de evaporador. En este punto, el glicerol debería tener una pureza del 85 % y es típicamente vendido a una refinería de glicerol. El proceso de refinación del glicerol lleva la pureza de 99.5 a 99.7 % usando destilación al vacío o procesos de intercambio de iones (Knothe, *et.al*, 2005).

**3. Pretratamiento con catálisis ácida.** Procesos especiales son requeridos si el aceite o grasa contiene cantidades significantes de ácidos grasos libres. Aceites usados de cocina contienen de 2-7 % de ácidos grasos libres y las grasas animales contienen de 5-30 %. Cuando un catalizador alcalino es agregado a estas materias primas, la reacción del ácido graso libre con el catalizador forman una sopa y agua como se muestra en la siguiente reacción:



Hasta un 5 % en ácidos grasos libres, la reacción puede ser todavía catalizada con catalizador alcalino. La sopa creada durante la reacción es removido con el glicerol o en el lavado durante el lavado con agua. Cuando el nivel de ácidos grasos libres es arriba del 5 %, la sopa inhibe la separación del glicerol de los metil ésteres y contribuye a la formación de emulsificación durante el lavado con agua. Para estos casos, un catalizador ácido tal como ácido sulfúrico puede ser usado para esterificar los ácidos grasos libres a metil ésteres como se muestra en la siguiente reacción:



Este proceso puede usarse como un pretratamiento para convertir los ácidos grasos libres a metil ésteres, así reduciendo el nivel de ácidos grasos libres. Después, el aceite con bajos niveles de ácidos grasos libres puede ser transesterificado con catalizador alcalino para convertir los triglicéridos a metil ésteres. Como se muestra en la reacción, agua es formada y, si esta se acumula, puede parar la reacción antes de que se complete (Knothe, *et.al*, 2005).

Se ha propuesto entonces separar el alcohol del aceite pretratado después de la reacción. Al remover el alcohol también se separa el agua formada. Hay que notar que la mezcla de metanol-agua podría contener algunos aceites disueltos y ácidos grasos libres que debieran ser recuperados y reprocesados (Knothe, *et.al*, 2005).

**4. Calidad del combustible.** El criterio principal para decir que un biodiesel es de calidad es su adherencia a un estándar apropiado. Generalmente, la calidad del biodiesel puede ser influenciado por muchos factores, incluyendo la calidad de la materia prima, la composición del ácido graso del aceite vegetal, el proceso de producción y otros materiales usados en este proceso y los parámetros de post-producción. Cuando el biodiesel llega a especificación, este puede ser usado en la mayoría de motores modernos sin modificaciones mientras mantiene la durabilidad del motor. Incluso cuando se usan mezclas de bajos niveles con petrodiesel, se espera que el biodiesel se encuentre en estándar antes de ser mezclado. Aunque algunas propiedades en el estándar, tales como número de cetano y densidad, refleja las propiedades de los componentes químicos que componen el biodiesel, otras propiedades proveen indicaciones de la calidad del proceso de producción. Generalmente, los parámetros dados en ASTM D6751 son definidos por otros estándares ASTM y esos en EN 14214 por otros estándares europeos o internacionales. Sin embargo, otros métodos de prueba, son desarrollados por organizaciones profesionales oleoquímicas tales como la Sociedad Americana de Aceites Químicos, que pueden ser apropiados porque ellos han sido desarrollados para grasas y aceites y no para materiales derivados de petróleo. ASTM D6751 requiere que el total de glicerol sea menor que el 24 % en el biodiesel final usando cromatografía de gas método descrito en ASTM D 6584 (Knothe, *et.al*, 2005).

**5. Glicerol libre.** El glicerol es esencialmente insoluble en biodiesel por lo que casi todo el glicerol es fácilmente removido por asentamiento o centrifugación. El glicerol libre puede quedar como gotas suspendidas o como cantidades pequeñas que se disuelve en el biodiesel. Los alcoholes puede actuar como cosolventes para incrementar la solubilidad del glicerol en el biodiesel. La mayoría del glicerol debería ser removido del biodiesel durante el proceso de lavado con agua. El combustible lavado con agua es generalmente bajo en glicerol libre, especialmente si es usada agua caliente para lavar. El biodiesel con glicerol excesivo produce problemas en tanques de almacenamiento creando una mezcla muy viscosa que puede tapar los filtros de combustible y causar problemas de combustión en el motor (Knothe, *et.al*, 2005).

**6. Alcohol y catalizador residuales.** Debido a que los alcoholes son más solubles en la fase del glicerol, la mayoría se remueven cuando el glicerol es separado del biodiesel. Sin embargo, el biodiesel

típicamente contiene de 2-4 % de metanol después de la separación, este metanol en exceso se puede recuperar usando trampas de vacío, lo que queda se puede quitar por un lavado con agua. Después el biodiesel debería contener poco alcohol. El valor específico del contenido de alcohol es especificado en los estándares europeos (EN 14214), pero no es incluido en el estándar ASTM. Pruebas muestran que 1% de metanol en el biodiesel puede bajar su punto de inflamación de 170°C a menos de 40°C. El estándar ASTM limita este contenido a menos del 0.1 %. Al tener un punto de inflamación menor hace que el combustible sea menos peligroso y más seguro de tratar que el combustible diesel. La mayoría del catalizador residual es removido con el glicerol, y este es removido en su mayor parte en el lavado con agua. Los estándares se basan en el contenido de ceniza sulfatada. Ceniza excesiva en el combustible podría originar depósitos en el motor y altos niveles de abrasión (Knothe, *et.al*, 2005).

**7. Agua y sedimentos.** El agua puede estar presente en dos formas, como agua disuelta o como gotas de agua suspendidas. Aunque el biodiesel es generalmente insoluble en agua, este contiene más que el petrodiesel. Biodiesel puede contener como mucho 1500 ppm de agua disuelta, mientras que el combustible diesel tiene solamente 50 ppm. La mayoría de tanques de almacenamiento de diesel tienen agua en la parte inferior debido a la condensación. Agua suspendida es un gran problema porque contribuye a la corrosión en sistemas de inyección de combustible. El agua puede también contribuir al crecimiento microbiano en el combustible. Este problema puede ocurrir tanto en biodiesel como en petrodiesel y puede resultar en un combustible ácido y lodos que podrían tapan los filtros. Los sedimentos pueden consistir en óxidos suspendidos y partículas sucias o compuestos insolubles que se forman durante la oxidación del combustible. Al cambiar de petrodiesel a biodiesel causa un incremento en el origen de sedimentos en las paredes de los depósitos, esto es porque las propiedades de los dos combustibles son diferentes (Knothe, *et.al*, 2005).

**8. Estabilidad de almacenamiento.** Esta se refiere a la habilidad del combustible de resistir cambios químicos durante un plazo de almacenamiento largo. Los factores que más afectan la estabilidad son el aire y el agua. La oxidación es acompañada por el incremento del valor ácido y viscosidad del combustible. Casi siempre estos cambios van acompañados por el oscurecimiento del color del biodiesel de amarillo a café y el desarrollo de un olor a "pintura". En presencia de agua, los ésteres pueden hidrolizarse a ácidos grasos libres de cadena larga, que es lo que causa que el valor ácido se incremente. Los métodos generalmente aplicados a los combustibles diesel para tratar este tema tales como ASTM D 2274, estuvieron demostrados que son incompatibles con biodiesel. Aditivos antioxidantes tales como butil hidroxitolueno y t-butil-hidroquinona fueron encontrados para mejorar la estabilidad de almacenamiento del biodiesel. Biodiesel producido de aceite de soya contiene algunos antioxidantes (tocoferoles, por ejemplo, vitamina E), proveyendo alguna protección contra la corrosión (algunos tocoferoles son perdidos durante el refinamiento del aceite antes de la producción del biodiesel). Cualquier combustible que va a ser almacenado por un período de tiempo largo debe ser tratado con un aditivo antioxidante (Knothe, *et.al*, 2005).

**9. Control de calidad.** Es muy importante monitorear la calidad de las materias primas (aceites), con pruebas tales como el valor ácido o el contenido de agua, pruebas que no son muy caras. Otra estrategia usada por muchos productores es tomar una muestra del aceite (o alcohol) y usarla para producir biodiesel a nivel laboratorio. Esta prueba puede ser rápida y puede indicar los problemas que podrían ocurrir en la planta (Knothe, *et.al*, 2005).

**10. Ventajas.** El biodiesel es un sustituto o suplemento para el diesel y no necesita bombas especiales o equipo de alta presión para aprovisionar de combustible, por lo tanto puede ser utilizado en motores diesel convencionales sustituyendo directamente productos de petróleo y reduciendo la dependencia a los mismos. El biodiesel (B100) es biodegradable, no tóxico y esencialmente libre de azufre y compuestos aromáticos, sin importar significativamente el alcohol y el aceite vegetal que se utilice en el proceso de transesterificación. Las emisiones netas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y de dióxido sulfuroso (SO<sub>2</sub>) se reducen un 100% y un 95% respecto al diesel convencional. La emisión de hollín se reduce un 40-60%, y las de hidrocarburos (HC) un 10-50%. La emisión de monóxido de carbono (CO) se reduce un 10-50%. Se reduce igualmente la emisión de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), y en particular de los siguientes derivados, de comprobada acción cancerígena: Fenantreno- 97%; Benzofluorantreno-56%; Benzopirenos-71%.

Finalmente, la emisión de compuestos aromáticos y aldehídos se reduce un 13%, y las de óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) se reducen, o aumentan, 5-10% de acuerdo con el desgaste del motor, y la calibración de la bomba inyectora. Al utilizar una mezcla de 20 por ciento de biodiesel (B20) se reducen las emisiones de dióxido de carbono en el orden del 15%. El biodiesel ofrece ventajas de seguridad sobre el diesel del petróleo ya que tiene un punto de inflamación mayor (150°C en promedio), comparado al diesel del petróleo (77°C). Esto lo hace más seguro de almacenar y transportar. La lubricidad del biodiesel es notable; aumenta la vida útil de los motores que lo utilizan. Por este motivo se usa mezclado con gasoil de bajo contenido de azufre, para mejorar la lubricidad de éste. Esto produce menos partículas de desgaste como hierro (Larosa, 2007).

Por lo general los ésteres derivados de ácidos grasos y sus mezclas mejoran el índice de cetano del diesel derivado del petróleo ya que durante el proceso de precombustión de los ésteres en el motor se forman diferentes compuestos: alcanos, alquenos, ésteres, bencenos sustituidos y furanos entre otros. Además, se ha comprobado que los compuestos aromáticos poseen un número de cetano menor, por eso el diesel tiene un número de cetano inferior al biodiesel que apenas posee aromáticos. Los ésteres que más cantidad de compuestos aromáticos poseen son los insaturados (Larosa, 2007).

Otro factor que influye en el número de cetano es la estructura (ramificación, presencia y número de dobles enlaces en la molécula). Cuanto mayor se la longitud de la cadena mayor será el número de cetano, así como la ausencia de dobles enlaces. La posición del doble enlace también va a influir en la formación de especies de precombustión (los cis generan menos aromáticos que los trans) y por lo tanto modificará el número de cetano (Larosa, 2007).

**Tabla 4 Características típicas del biodiesel y del diesel petrolífero.**

<b>Datos fisicoquímicos</b>	<b>Biodiesel</b>	<b>Diesel</b>
Composición combustible	Ester metílico. Ácidos Grasos C <sub>12</sub> -C <sub>22</sub>	Hidrocarburo C <sub>10</sub> -C <sub>12</sub>
Poder calorífico inferior, Kcal/kg	9500	10800
Viscosidad cinemática cSt (a 40°C)	3.5-5.0	3.0-4.5
Peso específico, g/cm <sup>3</sup>	0.875-0.900	0.850
Azufre, % peso	0	0.2
Punto de ebullición, °C	190-340	180-335
Punto de inflamación, °C	120-170	60-80
Punto de escurrimiento, °C	-15/+16	-35/-15
Número de cetano	48-60	46
Relación estequiométrica Aire/comb	13.8	15

Fuente: Rodolfo J. Larosa. *Proceso para la producción de biodiesel.*

El biodiesel es el primer y único combustible alternativo que posee una evaluación completa de emisiones y efectos potenciales sobre la salud de las personas, aprobado por E.P.A. (Environmental Protection Agency) según lo dispuesto en el artículo 211 (b) del Clean Air Act. Estos programas incluyen las más rigurosas pruebas sobre emisiones de combustibles y aditivos hechas por E.P.A. en los EE.UU. Los datos recogidos a través de estas pruebas concluyen el más completo inventario sobre salud humana y medioambiental que la tecnología actual permite. Un resumen de los resultados se proporciona en la siguiente tabla:

**Tabla 5 Emisiones de biodiesel respecto al diesel convencional**

<b>Tipo de emisión</b>	<b>B100 (%)</b>	<b>B20 (%)*</b>
<b>Reguladas</b>		
Hidrocarburos totales sin quemar	-93	-30
Monóxido de carbono	-50	-13

Continuación Tabla 5

Partículas en suspensión	-30	-22
Óxidos de Nitrógeno	+13	+2
<b>No reguladas</b>		
Sulfatos	-100	-20
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH)	-80	-13
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos nitrogenados. (nPAH)	-90	-50
Potencial de destrucción de la capa de Ozono	-50	-10
*Estimado del resultado de B100		

Fuente: Ing.Agr. Jorge A. Hilbert. *Empleo de los biocombustibles en motores*. (13)

**11. Desventajas.** El principal problema es que la cadena de producción del biodiesel es tan larga que el precio final se incrementa mucho. Para conseguir un precio competitivo se debe optimizar el proceso uniendo varias fases como la extracción, trituración y transesterificación en una sola instalación. Otro problema es la necesidad de aditivos para arrancar a bajas temperaturas cuando se utiliza biodiesel puro (B100) además se encuentra un aumento en las emisiones de óxido de nitrógeno en algunas ocasiones dependiendo del desgaste del motor. El problema de la emisión de olores por el escape, que ha llegado a provocar dolores de cabeza y náuseas a los conductores y personas de mantenimiento es causado por la acroleína procedente de los hidrocarburos incombustibles. Con la introducción del catalizador los olores desaparecen completamente, sin que se lleguen a notar diferencias con respecto a los motores que trabajan con gasoil, salvo en los primeros momentos de funcionamiento con los motores en frío, ya que el catalizador requiere un mínimo de temperatura para que actúe correctamente (Larosa, 2007).

**a. Otros problemas del biodiesel respecto al diesel**

- ✓ Incompatibilidad a bajas temperaturas: El biodiesel posee malas propiedades a bajas temperaturas. Tanto los puntos de Congelación (PC), Puntos de Nube (PN), como el Punto de Obstrucción por Filtros Fríos (POFF) son desde ligeramente superiores a muy superiores dependiendo del origen del éster (aceite de maíz, oliva, etc.). Para un biodiesel procedente de un aceite residual el POFF esta entre -7 y 0 °C, lo cual es insuficiente para el invierno riguroso de algunos países. Utilizando un biodiesel de origen animal el POFF es todavía superior. En Guatemala, estas incompatibilidades son despreciables ya que las temperaturas no son tan drásticas en ninguna época del año.

- ✓ Mayor viscosidad: Debido a que el biodiesel tiene una viscosidad mayor que el diesel pueden existir problemas de pérdidas de flujo a través de los filtros e inyectores. Si el spray es alterado por el flujo de combustible se puede generar una coquización del inyector o dilución del lubricante.
- ✓ Coquización del inyector: Se incrementa con el aumento de la viscosidad, del peso molecular y del poder calorífico. Aunque esta disminuye con el grado de insaturación.
- ✓ Dilución del lubricante: Se necesita un lubricante que tenga una capacidad dispersante superior a la utilizada con el diesel (TBN alto). Existen estudios que indican que un aceite de motor se degrada mucho más rápido si el combustible utilizado es biodiesel en vez de diesel y por lo tanto se recomiendan cambios en el aceite en períodos más cortos de tiempo que para un diesel normal.
- ✓ Problemas de corrosión: Pueden aparecer algunos problemas debido a corrosiones y partículas de desgaste en el aceite, que puede afectar al motor y se deben hacer consideraciones respecto a la instalación. El contenido de agua acelera la presencia de microbios que puede provocar la corrosión del sistema y una colmatación de los filtros prematura.
- ✓ Presencia de K y Na: Puede causar la precipitación de jabones obstruyendo los filtros. Estos se presentan en el biodiesel debido a un defectuoso proceso de lavado en su producción.
- ✓ Colmatación de filtros: Como el biodiesel es un buen disolvente, disuelve toda la suciedad que haya en el circuito de combustible hasta dejarlo limpio. Por ello, al principio, puede que se colmaten los filtros rápidamente.
- ✓ Problemas de estabilidad: Posee menor estabilidad a la oxidación que el diesel debido a que posee dobles enlaces y oxígeno en su molécula. Esto es importante a la hora de almacenar durante mucho tiempo el biodiesel (Larosa, 2007).

La desventaja social más importante radica en que se prevé que la producción de biodiesel a gran escala supondrá un aumento del uso de tierras agrícolas fértiles y por lo tanto el cultivo de grandes extensiones de terreno pone en riesgo la salud alimentaria de la población, debió a esto se deberá legislar priorizando la alimentación sobre la producción de energía.

**12. Principios técnicos de la producción de biodiesel.** Para producir biodiesel a partir de aceite o grasas vegetales, el aceite se extrae de la semilla cultivada, dejando atrás harina de semilla que puede usarse como forraje animal. El aceite o grasa es refinado y desgomado y se hace reaccionar químicamente con un alcohol para producir los compuestos químicos conocidos como ésteres alcohólicos del ácido graso. Biodiesel es el nombre dado a estos ésteres cuando se piensan para el uso como combustible. El glicerol (usado en productos farmacéuticos y cosméticos, entre otros mercados) se produce como subproducto que puede ser útil en diversas industrias (Castro, 2007).

Cuando los ácidos grasos libres del aceite están presentes, pueden ser transformados en biodiesel usando tecnologías especiales en el tratamiento previo. Los aceites y las grasas pretratados entonces se mezclan con un alcohol (generalmente metanol o etanol) y un catalizador (generalmente hidróxido de sodio o de

potasio). Las moléculas del aceite (triglicéridos) son separadas, quebradas y reformadas en los ésteres y el glicerol, que después se deberán separar y purificar. Aproximadamente el 55 % de la industria del biodiesel puede utilizar cualquier materia de base de la grasa o del aceite, incluyendo la grasa reciclada al cocinar. La otra mitad de la industria se limita a los aceites vegetales, el menos costoso de los cuales es el aceite de la soja (Castro, 2007).

En esta investigación se plantea la obtención de biodiesel a partir de un aceite oxidado a nivel laboratorio y planta piloto, proceso que puede ser observado en la siguiente figura:

**13. Fuentes de materia prima.** Las dos fuentes más comunes de aceites y grasas para producir biodiesel son: Cultivos oleaginosos y tejidos adiposos (grasos) de animales beneficiados. Además, se está experimentando en diversos lugares para obtener biodiesel a partir de: Algas productoras de aceites, aceites residuales de cocina y grasas residuales (de plantas de tratamiento de agua o de separación de grasas).

Los cultivos oleaginosos provienen de diferentes familias botánicas y se han adaptado a las diferentes regiones climáticas del planeta, aunque las regiones tropicales son las que albergan la mayor cantidad de variedades de ellas. Solamente una decena de especies se usa con propósitos comerciales, existiendo centenares de cultivos oleaginosos de los que se tiene poco conocimiento pero que son excelentes fuentes de aceite (Castro, 2007).

#### **D. Extracción de aceite.**

Los aceites vegetales se obtienen a partir de las semillas o frutos que los contienen mediante extracción química con solventes (se utiliza principalmente hexano como solvente) o, en menor medida, por medios físicos como la aplicación de grandes presiones. La extracción por solventes es el medio más eficiente para obtener el aceite de soja o de la semilla de algodón, lográndose un 9% a 12% más de aceite y con menos impurezas que mediante la presión mecánica. Con la extracción por solventes se requiere menos calentamiento, obteniéndose un aceite de mejor calidad y ahorrando energía (Castro, 2007).

**1. Pretratamiento de aceites vegetales crudos.** La mayor parte del biodiesel se produce a partir de aceites comestibles semi-refinados con buenas características de acidez y humedad. Sin embargo, existe gran cantidad de aceites y grasas de menor calidad y menor costo que también podrían ser convertidos en biodiesel (por ejemplo, aceites vegetales crudos, grasas animales y aceites usados o residuales) (Rosales, 2009).

El problema para procesar estas materias primas baratas es que suelen tener grandes cantidades de ácidos grasos libres, gomas, humedad y otras impurezas que afectan el proceso de transesterificación alcalina. Por eso, el aceite para producir biodiesel debe ser refinado parcialmente para:

- ✓ Eliminar gomas, que podrían resultar en formación de emulsiones durante el proceso.
- ✓ Eliminar fosfátidos, de manera que los efluentes del proceso no tengan fosfatos y se reduzcan sus costos de tratamiento.
- ✓ Eliminar ácidos grasos libres, para facilitar la transesterificación y posteriormente la purificación de la glicerina.

- ✓ Eliminar ceras, para mejorar el desempeño en frío del biodiesel.
- ✓ Eliminar otros contaminantes, y obtener una mejor calidad de la glicerina (Rosales, 2009)

Esta refinación parcial (pretratamiento) puede incluir los siguientes procesos:

**2. Desgomado.** Casi todos los aceites de semilla contienen en mayor o menor proporción impurezas tales como mucílagos, fosfátidos, peróxidos, glúcidos, tocoferoles; dependiendo esto de la planta de la que ha sido obtenido. La operación de librar al aceite crudo de estas sustancias se llama desgomado. El desgomado con agua es la forma más simple de reducir la cantidad de fosfolípidos y fosfátidos en los aceites. El aceite se calienta a aproximadamente 90 °C, se agrega pequeñas cantidades de agua para hidratar las gomas y hacerlas insolubles en el aceite. La cantidad de agua a usar debe ser similar al peso seco de las gomas a remover. Después de unos 5 minutos las gomas hidratadas pueden ser removidas por centrifugación. Las impurezas que se pueden eliminar por este método son fosfátidos hidratables, triglicéridos ocluidos y otros compuestos solubles en agua como azúcares. El proceso arriba descrito sólo permite la remoción de las gomas hidratables. Por eso, a veces se utiliza ácido cítrico y/o ácido fosfórico para mejorar la velocidad y la eficacia del proceso y permitir la separación de las gomas no hidratables. El ácido puede estar disuelto en agua para facilitar la separación y luego el aceite es lavado con agua. Los aceites crudos casi nunca se comportan de la misma manera. Cada tipo de aceite es único, y dependiendo de qué especie de vegetal haya sido extraído, se puede decir que tienen cada cual una “personalidad” distinta, por decirlo de alguna manera. En muchos casos lo que resulta bueno para un tipo determinado de aceite, no lo es para otro. Debido a este hecho la conducción del desgomado es bastante delicada. Para el desgomado hacen falta contenedores dotados de un potente sistema de agitación. En todos los métodos de desgomado es fundamental una agitación intensa y vigorosa para el buen fin de la operación. Se necesita en promedio 1 Kw de potencia de motor por cada 200 litros de aceite a agitar (Rosales, 2009).

**3. Neutralización, lavado y secado.** Aceites con un contenido de hasta 5% de ácidos grasos libres pueden ser procesados con catálisis alcalina añadiendo mayor cantidad de catalizador para compensar las pérdidas en el jabón. El jabón que se produce es eliminado en el glicerol y/o durante el proceso de lavado con agua, y la única desventaja de este proceso es la pérdida de materia prima en jabones en lugar de biodiesel. Aceites con más del 5 % de ácidos grasos libres no pueden ser transesterificados por catálisis alcalina, porque los jabones inhibirían la separación del biodiesel de la glicerina y además llevarían a la formación de emulsiones durante el lavado. Para superar este problema existen dos alternativas: la neutralización del aceite o la esterificación ácida de los ácidos grasos libres. La neutralización consiste en hacer reaccionar el aceite con una sustancia alcalina como el hidróxido de sodio para eliminar los ácidos grasos libres, responsables de su acidez. El aceite se calienta a 85 °C (en caso de aceites muy ácidos a 65 °C) y se aplica hidróxido de sodio diluido en una cantidad tal que neutralice los ácidos en el aceite y con un exceso que favorezca la separación de los jabones y evite la formación de emulsiones. Este exceso puede variar entre 10% y 30% para aceites poco ácidos (hasta 1%) y entre 30% y 50% para aceites de alta acidez (Rosales, 2009).

## E. El alcohol

Es el principal insumo para la producción de biodiesel. En volumen, representa alrededor del 10-15 % de los insumos consumidos. Los alcoholes que más comúnmente se utilizan para producir biodiesel son metanol y etanol. Se puede utilizar otros alcoholes como propanol, isopropanol, butanol y pentanol – pero estos son mucho más sensibles a la contaminación con agua (es decir, la presencia de agua en mínimas cantidades inhibe la reacción). El metanol es tóxico cuando se ingiere, se inhala o al contacto con la piel y además altamente inflamable –sus gases se encienden a una temperatura de 12 °C. Por encima de esta temperatura las mezclas de aire y vapor de metanol (con al menos 6% de metanol) son explosivos. Existe riesgo de explosión e incendio cuando el metanol está expuesto al calor, chispas, llamas o descargas de energía estática. Además, el metanol arde con una llama incolora, de manera que no es fácil notar si se enciende. Medidas de seguridad contra incendios son necesarias al trabajar con metanol, así como adecuada ventilación, etiquetado, sistemas cerrados de manipulación y equipo de protección personal para evitar el contacto, inhalación o ingestión. El etanol es menos tóxico, aunque puede tener efectos negativos (ebriedad, como etílico) cuando se ingiere en grandes cantidades, pero también es altamente inflamable. Su uso requiere de menores medidas de seguridad ocupacional, pero sí de seguridad contra incendios. La desventaja de su uso para producir biodiesel es que es mucho menos reactivo que el metanol, y la transesterificación se ve afectada principalmente por cualquier cantidad de agua presente en los insumos.

Se requiere entonces que el etanol utilizado tenga una pureza superior al 99 %, y que los otros insumos (aceite y catalizador) sean igualmente de muy alta pureza. Es por esto que en la mayoría de plantas de producción de biodiesel aún se utiliza metanol pese a su toxicidad. Cabe mencionar además que el metanol se obtiene principalmente de fuentes fósiles no renovables: del gas natural o gas metano. También es posible obtenerlo mediante destilación seca de la madera, pero este proceso aún no se aplica a gran escala. El etano, en cambio, proviene de materias primas renovables: caña de azúcar, remolacha azucarera, papa, otros vegetales celulósicos, etc. Una de las variables más importantes que afectan el rendimiento de la transesterificación es la razón molar entre el alcohol y los triglicéridos. Por razón molar se entiende la cantidad de moléculas de alcohol necesarias para reaccionar con una molécula de triglicérido o aceite. Cuando se trabaja con metanol se recomienda una razón molar de 6:1 para asegurar una conversión máxima de los triglicéridos a ésteres. En el caso de etanol, algunos estudios indican que una razón molar de 9:1 sería la más apropiada. Si la cantidad de alcohol no es suficiente, el producto contendrá monoglicéridos y diglicéridos (productos intermedios de la transesterificación), los cuales cristalizan muy fácilmente en el biodiesel y pueden causar taponamientos de los filtros y otros problemas en el motor (Blanco, 2004).

## F. El catalizador

La transesterificación de los triglicéridos puede ser realizada mediante diferentes procesos catalíticos. Los catalizadores utilizados pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ✓ Catalizadores alcalinos – hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), metilato de sodio (NaOMe).
- ✓ Catalizadores ácidos –ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico, ácido sulfónico.

- ✓ Catalizadores enzimáticos –lipasas
- ✓ Catalizadores heterogéneos –catalizadores en fase sólida.

El proceso más conocido, utilizado y hasta el momento más efectivo es el que emplea catalizadores alcalinos. Sin embargo, si el aceite tiene un alto contenido de ácidos grasos libres, la catálisis alcalina no es apropiada debido a que los hidróxidos reaccionan con los ácidos grasos formando jabones, lo cual reduce el rendimiento de producción de biodiesel. En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pretratamiento con catalizadores ácidos (Blanco, 2004).

En el caso de la catálisis alcalina, es muy importante que los catalizadores se mantengan en un estado anhidro. Debe evitarse su contacto prolongado con el aire, pues éste disminuye su efectividad debido a la interacción con la humedad y con el dióxido de carbono. Los tres catalizadores cáusticos tienen ventajas y desventajas:

**1. Hidróxido de sodio (NaOH).** Viene en forma de cristales que deben ser disueltos en el alcohol antes de la transesterificación. Es un producto muy barato y fácil de conseguir, pero es cáustico e irritante, y su manipulación directa sin protección respiratoria y para la piel debe evitarse. Al igual que en el caso del KOH, la manipulación de este insumo sólido puede ser complicada (especialmente en plantas de producción grandes, donde se quieren evitar operaciones manuales). Además, el NaOH es muy higroscópico (absorbe humedad del ambiente), lo cual hace que los cristales se peguen, sean más difíciles de manipular, y además reduce su eficacia. Finalmente, la reacción con el alcohol es exotérmica, genera calor, y el tanque donde se realiza esta disolución debe mantenerse frío para evitar que se evapore el alcohol (Blanco, 2004).

**2. Hidróxido de potasio (KOH).** Muy similar al hidróxido de sodio, el hidróxido de potasio viene también en forma de cristales que deben ser disueltos antes de la transesterificación. Es un producto barato y disponible en la mayoría de lugares. Debido a su mayor peso molecular, se necesita mayor cantidad de KOH que de NaOH para hacer el mismo trabajo, lo cual puede elevar costos. Las dificultades de operación y riesgos son similares a los que existen con NaOH, sin embargo, algunos estudios han demostrado que utilizando KOH se obtienen mejores rendimientos de transformación que con NaOH. Además, el KOH se disuelve más fácilmente que el NaOH en el etanol, lo cual facilita el primer paso previo a la transesterificación. Los jabones de potasio son líquidos, a diferencia de los de sodio que son sólidos. Esto hace que el glicerol crudo sea más fácil de drenar luego de la separación del biodiesel cuando se trabaja con KOH. Por otra parte, las sales de potasio obtenidas como subproducto de la purificación de la glicerina pueden ser utilizadas como fertilizante agrícola (Blanco, 2004).

**3. Metilato de sodio.** El metilato de sodio no está disponible en estado puro, debido a que es muy inflamable. Se presenta entonces comercialmente como una solución al 30% en metanol. Esta solución es un líquido, lo cual constituye la principal ventaja: su manipulación (pese a su alta inflamabilidad y toxicidad) es sencilla, puede ser adaptada a un proceso continuo y realizarse mecánicamente sin necesidad de intervención de los operarios. El metilato de sodio parece ser un muy buen catalizador con materias primas adecuadas, pero su costo es alto y su disponibilidad limitada (Blanco, 2004).

### **a. Triglicéridos como combustibles**

Los aceites sin procesar y las grasas también pueden ser utilizados por los motores diesel, pero requieren ajustes en los motores y en los hábitos de conducción. Son demasiado densos, por lo que no se inyectan bien y se vuelven sólidas a temperaturas próximas a los 10 °C. Si la máquina se arranca con diesel convencional, se pasa a aceites vegetales después de que haya sido calentado a conciencia y se cambia de nuevo a diesel para el apagado, se aumenta la vida de los motores (Barraza,2007).

### **G. Oxidación de los aceites y grasas**

Las sustancias grasas sufren, por la acción del aire, el agua y las bacterias, fenómenos complejos de descomposición llamados de rancidez o enranciamiento. Ocurren reacciones de hidrólisis lentas, catalizadas por enzimas, que dan lugar a la formación de aldehídos y cetonas. El oxígeno del aire ataca a los dobles enlaces y, en un proceso progresivo, termina por romper la cadena de carbonos produciendo compuestos de mal olor. En la manteca, esta alteración provoca la aparición del ácido butírico o butanoico, causante del sabor y del olor que toma esta sustancia cuando se altera. Existen compuestos antioxidantes, como el 3-t-butil-4-hidroxianisol (BHA), que retardan la reacción de oxidación. Suelen ser agregados a los aceites empleados en la fritura de papas y otros alimentos. La oxidación de aceites vegetales altamente no saturados en aire puede provocar también la polimerización en películas duras, tenaces y secas. A causa de esta reacción los aceites vegetales no saturados (aceites secantes) se emplean en la manufactura de pinturas y barnices. Para la manufactura de linóleo y hule se agrega a la tela una mezcla de aceites secantes, pigmentos y rellenos (corcho, resina). Por lo tanto el almacenamiento prolongado de un aceite permite su descomposición natural, provocando en él un olor y sabor rancio característico, cambiando sus propiedades físicas y disminuyendo su capacidad de ser utilizado en la producción de alimentos, medicinas, etc. Además de esto, la degradación de los aceites se puede provocar por agentes externos que favorezcan la oxidación, por ejemplo: reacciones con medios oxidantes, escasez de preservantes, trasiego sucesivo en procesos, uso indirecto como lubricante, etc. (Mayorga, 2009).

**1. Filtrado.** Se realiza con el fin de quitarle restos sólidos en suspensión al aceite crudo. Para mejorar esta operación se calienta el aceite a 37 °C (100 °F) para disminuir su viscosidad. Esto se realiza a manera de limpieza y por lo tanto se puede utilizar cualquier papel filtro o manta para el filtrado (Mayorga, 2009).

**2. Secado.** El aceite suele contener agua y la presencia de ésta baja la velocidad de la reacción y favorece la saponificación, formando una mayor cantidad de jabón indeseable (Mayorga, 2009).

Si el aceite crudo está libre de agua no se realiza la operación de secado y con esto se logrará un ahorro significativo en tiempo y en energía. Por el contrario, si existe un gran porcentaje de agua en el aceite, se puede drenar según se va depositando en el fondo, recuperando después el aceite que se haya ido con ella. A través del calentamiento se busca minimizar la cantidad de agua presente en el aceite. Para ello se calienta el aceite hasta 100 °C (212 °F) y se mantiene la temperatura mientras el agua se evapora. Durante el calentamiento se agita constantemente el aceite para evitar la formación de burbujas de vapor, que

puedan explotar y salpicar el aceite caliente. Luego de un tiempo de calentamiento, cuando disminuya la evaporación, se aumenta la temperatura hasta 130 °C aproximadamente durante diez minutos para luego dejar enfriar. Para determinar la eficiencia se pueden practicar pruebas cuantitativas para medir la cantidad de agua al inicio y al final de la operación de secado. Para los fines de esta investigación se utiliza el método ASTM 1796 para agua y sedimento en aceites combustibles (Mayorga, 2009).

**3. Valoración.** Para saber cuanto hidróxido de sodio es necesario, se debe medir la acidez del aceite con un método de valoración. Es la parte más importante del proceso y deberá ser lo más exacta posible ya que de ella depende la cantidad de catalizador básico (hidróxido) que se ha de utilizar. El hidróxido a utilizar deberá estar deshidratado para evitar problemas y reacciones alternas indeseables como la saponificación. Se prepara una solución al 1 % de hidróxido de sodio o potasio en agua destilada, la cual servirá de titulante en la valoración y por lo tanto no deberá ser contaminada. Se mezclan 10 mL de alcohol isopropílico con 1 mL del aceite para diluirlo. Se añade el indicador ácido-base a utilizar (fenolftaleína) y se procede a titular lentamente con la solución de hidróxido al 1 % agitando constantemente hasta obtener el color rosa característico del medio básico para este indicador. El objetivo es averiguar el volumen de la solución de hidróxido de sodio necesario para alcanzar un pH de entre 8 y 9. Este procedimiento de valoración es recomendable hacerlo varias veces para descartar cualquier error de operación y comprobar que la medida es correcta. Dependiendo del tipo de aceite, de la temperatura que alcanzó al ser utilizado, del proceso de obtención y del tiempo de uso, la cantidad de solución de hidróxido en la valoración suele ser de entre 1.5 y 5 mL. Si la valoración da más de 2 mL (usando solución de NaOH al 0.1 %) puede que los ácidos grasos libres reaccionen con la glicerina formando geles. También se puede utilizar papel tornasol y los medidores de pH digitales en sustitución de la fenolftaleína. Previo conocimiento de las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos. Para calcular la cantidad adicional de hidróxido de sodio necesario para la reacción se multiplica el número de mL obtenidos en la valoración por el número de litros de aceite que se convertirán en biodiesel. Además, cada litro de aceite nuevo necesita 7 g de hidróxido para la reacción, por lo tanto hay que sumar 7 g por cada litro de aceite usado u oxidado que se vaya a transesterificar (Romero, 2005).

## H. Preparación de etóxido/metóxido

Al mezclar el etanol o metanol con el hidróxido de sodio se produce una reacción exotérmica cuyo resultado es el etóxido de sodio que es muy corrosivo. Se deben utilizar recipientes de vidrio, de acero inoxidable, o esmaltados. Además se debe agitar continuamente debido a su baja solubilidad. Generalmente la cantidad de etanol necesaria es del 25%-30% en masa de la cantidad de aceite. Las densidades de los dos líquidos son bastante parecidas y por lo tanto también puede funcionar como porcentaje en volumen. Teóricamente hay que usar 180 mL de etanol por litro de aceite, el resto es un exceso necesario para que la reacción se desarrolle correctamente. La reacción de etoxilación que se lleva a cabo, es una reacción reversible y por lo tanto al llegar al equilibrio se pueden presentar remanentes de alcohol o hidróxido, que pueden afectar los pasos siguientes del mecanismo de reacción. Esto hace

necesario un análisis de conversión o avance de la reacción para estimar el contenido de alcohol e hidróxido en la mezcla. Dichos análisis se pueden realizar a través de técnicas analíticas cuantitativas instrumentales como Espectrometría de Infrarrojo, Cromatografía en fase líquida o cromatografía en fase gaseosa; así como con técnicas volumétricas o valorativas. Para los fines de esta investigación se procura reducir el contenido de alcohol calentando la mezcla para evaporar el alcohol remanente en el etóxido sódico; además, la valoración pretende optimizar la cantidad de hidróxido para disminuir la presencia de excesos en el producto final (Romero, 2005).

**1. Mezclado.** Se debe calentar el aceite hasta 48 - 54 °C (120-130 °F) a modo de preparación y mezclar firmemente ajustando la velocidad (400 rpm aproximadamente) a fin de evitar salpicaduras y burbujas que perjudiquen el resultado final. El etóxido preparado anteriormente se vierte en el aceite mientras se mezcla; continuando con la agitación durante 50 ó 60 min. La reacción suele completarse en media hora, pero es mejor mantener la agitación durante más tiempo para dejar que llegue al equilibrio. En el mezclado es donde se realiza la transesterificación: se separan los ácidos grasos de la glicerina y el etanol se une a los ácidos grasos formando etilésteres (biodiesel). El hidróxido de sodio estabiliza la glicerina (Romero, 2005).

**2. Separación.** Para poder obtener el biodiesel se deja reposar y enfriar la mezcla por lo menos durante ocho horas (preferiblemente más). La glicerina y otros subproductos forman una masa gelatinosa en el fondo y los etilésteres (biodiesel) forman la fase superior. Otra alternativa consiste en dejar que la mezcla repose al menos durante una hora después de la reacción, manteniendo la temperatura por encima de 38 °C (100 °F). Así, la glicerina se mantiene semilíquida y se hunde antes. Luego de la separación se deberá decantar el biodiesel, eliminando la glicerina y otros subproductos. La glicerina semilíquida es de color marrón oscuro; el biodiesel es más claro. Si al separarlos cae algo de biodiesel en el recipiente de la glicerina, luego se hace fácil recuperarla cuando se solidifica. Si la glicerina se solidifica antes de la separación del biodiesel, se deberá calentar para que vuelva a su estado semilíquido, cuidando de no agitarla por ningún motivo para evitar mezclar los productos obtenidos (Romero, 2005).

**3. Lavado.** El objetivo del lavado es separar los jabones del combustible lavándolo con agua una o varias veces. En el primer lavado es mejor añadir un poco de ácido acético diluido (5%). Con este se consigue que el pH del biodiesel sea casi neutro ya que se une a restos de hidróxido y los neutraliza. Agregar agua al biodiesel, después de agitar con cuidado y dejar que repose entre 12 y 24 horas. El biodiesel limpio queda encima del agua y el agua con los jabones disueltos se saca por el fondo. Puede que haya que repetir este proceso dos o tres veces para retirar todos los jabones presentes. El segundo lavado y el tercero pueden hacerse sólo con agua. Después del tercer lavado el agua que quede puede separarse calentando lentamente. El agua y otras impurezas se hundirán hasta el fondo. El producto final deberá tener un pH 7. El agua del tercer lavado puede usarse para el primer o segundo lavado del siguiente lote. Las impurezas se separarán cuando se caliente el siguiente lote. Los jabones pueden aprovecharse concentrándolos ya que lo que queda es un jabón biodegradable que tiene muchas aplicaciones industriales. El biodiesel tiene un aspecto más limpio y cristalino después de lavarlo. También se puede

enfriar el biodiesel para que los restos de jabón y de hidróxido sedimenten más rápido. Con este método el biodiesel queda bastante limpio en poco tiempo (Romero, 2005).

Otras técnicas de lavado pueden ser:

- Lavado con niebla: Consiste en rociar una nube de gotas minúsculas que caen sobre la superficie sin perturbar el líquido y lo atraviesan arrastrando al fondo las impurezas. Es lento y necesita mucha agua, que no suele reutilizarse.
- Lavado con burbujas: El lavado con burbujas fue desarrollado en la universidad de Idaho. Hace falta una pequeña bomba de aire y una piedra difusora. Se ponen agua y biodiesel en el tanque de lavado. Tiene que haber entre  $\frac{1}{4}$  y  $\frac{1}{2}$  más de agua que de biodiesel (Romero, 2005).

El agua está en el fondo, donde se encuentra la piedra difusora, y el combustible flota encima. Las burbujas de aire suben atravesando primero el agua y luego el biodiesel. Cada gota queda cubierta por una fina película de agua y la eleva a través del biodiesel, lavándolo por el camino. Cuando la burbuja llega a la superficie estalla y deja una gota de agua que vuelve al fondo atravesando de nuevo el biodiesel y lavándolo más. Hacen falta tres o cuatro lavados consecutivos, de entre seis y ocho horas de duración cada uno, con un reposo intermedio de al menos una hora entre lavado y lavado. Después del reposo el agua se saca por un desagüe del fondo para sustituirla por agua limpia. Al final del último lavado el agua debe estar cristalina, con pH 7 aproximadamente. Este tipo de lavado es fácil, funciona y da pocos problemas. Los inconvenientes pueden ser la tardanza del proceso y la posible oxidación del combustible es delicada y puede ocultar una reacción incompleta, que se haría evidente agitando la mezcla.

Otro problema es que el lavado con burbujas oxida el combustible. Cada aceite tiene sus características. Algunos son aceites secantes, como el de linaza, que se usa en pinturas, cuando se seca se polimeriza y forma un sólido parecido al plástico. Con las altas temperaturas que hay en los motores de combustión interna la polimerización se acelera. Esta polimerización ocurre cuando el oxígeno atmosférico rompe los enlaces dobles de los aceites insaturados. No sólo afecta a los aceites secantes, también a los semisecantes, muchos de los cuales se emplean como materia prima para el biodiesel. Los aceites saturados no se polimerizan, los insaturados sí. El grado de insaturación se llama índice de iodo. El aceite de linaza, el de tung, y algunos aceites de pescado tienen el índice de iodo entre 170 y 185. El aceite de coco tiene un índice de iodo de diez. La conversión de los aceites insaturados en biodiesel reduce la polimerización, pero no la evita (Romero, 2005).

- **Lavado por agitación:** Este es el lavado más efectivo, aunque al mezclar mecánicamente el biodiesel con agua se formará una emulsión si se intenta lavar combustible que no ha terminado de reaccionar.

Es un lavado rápido y efectivo, no oculta las reacciones incompletas y no oxida el combustible. No tiene inconvenientes si se hace todo bien desde el principio. Es mejor tener un depósito de lavado independiente. Otra opción para la agitación en el lavado es usar una bomba y un aspersor. No es nada delicado. La mezcla queda tan homogénea como con la agitación mecánica, aunque tarda un poco más. Este tipo de lavado será el utilizado en este trabajo de investigación (Romero, 2005)

### III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años, Guatemala se ha visto afectada por factores económicos globales relacionados a las fluctuaciones y rápido ascenso en los precios del petróleo crudo y sus derivados.

Al igual que muchos países en desarrollo, Guatemala, es netamente un importador de combustibles fósiles y estas alzas repercuten directa e indirectamente en la mayoría de aspectos económicos del país (precio del transporte, energía eléctrica, producción de bienes y servicios, etc.).

El petróleo y sus derivados son recursos no renovables cuyas reservas disminuyen y su exploración y explotación son cada vez más costosas. Además, el aumento demográfico e industrial que el planeta ha experimentado en las últimas décadas ha originado una enorme demanda energética. Esta relación oferta-demanda es la principal causa del efecto de precios al alza.

Para satisfacer los mercados y la demanda energética per cápita, se ha hecho necesario el uso de grandes cantidades de energía no renovable. Es conocido que el uso de este tipo de energía trae consigo efectos acumulativos y perjudiciales al medio ambiente generando contaminación y arriesgando la salud y el bienestar de la población mundial.

Dicho de otra manera, el planeta Tierra está mostrando en la actualidad las consecuencias negativas de la actividad humana e industrial que se ha desarrollado en los últimos siglos. Ante esta problemática económica y ambiental surge la necesidad de buscar alternativas energéticas que sean más económicas y que, sobre todo, contribuyan a mejorar la calidad del medio ambiente.

Guatemala es un país netamente agrícola y las características de sus suelos lo convierten en un país con un alto potencial de generación de energía a través de biocombustibles (biodiesel, alcohol carburante, biogás, etc.) Entre este tipo de combustibles se encuentra el biodiesel, que es una opción viable para darle solución a los problemas citados anteriormente. Este biocombustible representa una alternativa energética renovable, limpia y accesible para los países en desarrollo como el nuestro.

Estos hechos han sido reconocidos y analizados por empresas e instituciones que han comenzado a invertir en la investigación y desarrollo de proyectos que permitan desarrollar la industria del biodiesel a partir de cultivos nacionales.

La semilla de *Jatropha Criolla* se ha convertido en una vía de síntesis de aceite para la obtención de biodiesel, con el fin de que en un futuro reemplace a los combustibles fósiles y por consiguiente lograr disminuir costos en combustibles o lograr sustituir los combustibles no renovables por renovables. En este sentido, el piñon (*Jatropha Criolla*) se ha convertido en una de las plantas oleaginosas más rentables y adaptables a las características de los suelos guatemaltecos. Además, es uno de los cultivos que producen mejor rendimiento en volumen de biodiesel por hectárea cultivada. Esto lo convierte en una de las alternativas principales para los proyectos de biodiesel en Guatemala.

El país tiene un fuerte potencial para la producción de piñon que, se supone, sería la materia prima para la generación del carburante, cuya producción cubriría el 25 % de la demanda de diesel en Guatemala y que

actualmente asciende a 1,300 millones de galones. (Emmanuel Seidner, Comisionado Presidencial para la Inversión y Competitividad de Guatemala, entrevista sobre la Cumbre del Plan Puebla-Panamá, celebrada en Campeche México, 2007).

## IV. OBETIVOS

### A. Generales

Realizar el proceso de extracción de aceite de piñon, *Jatropha Criolla*, para la producción de biodiesel y lograr especificar las características químicas tanto del aceite como del biodiesel por medio de dos procesos, a nivel de laboratorio y Planta Piloto.

### B. Específicos

- Encontrar la composición del fruto y semilla del piñon, *Jatropha Criolla*, de los lugares de Cuilco y Cuyotenango.
- Extraer y cuantificar los rendimientos de aceite de la semilla del piñon, *Jatropha Criolla*, a nivel de planta piloto y laboratorio para comparar los rendimientos a partir de éstos dos métodos.
- Caracterizar el aceite crudo obtenido de la semilla de piñon, *Jatropha Criolla*, obtenido a nivel de laboratorio y planta piloto para obtener sus características químicas.
- Encontrar los rendimientos del biodiesel a nivel laboratorio a distintas velocidad de agitación.
- Obtener las propiedades químicas del biodiesel en función de las normas ASTM.
- Comparar el biodiesel obtenido a partir del aceite extraído a nivel laboratorio y Planta Piloto principalmente por el poder calorífico.
- Obtener el costo total del proceso de extracción de aceite a nivel de laboratorio y Planta Piloto.
- Obtener el costo de producción del biodiesel obtenido a partir de la semilla de *Jatropha Criolla*.

## **V. PROBLEMA A RESOLVER**

Realizar un estudio completo de investigación de la semilla de *Jatropha* variedad Criolla para cuantificar el rendimiento de aceite que ésta tiene a nivel de dos procesos, escala laboratorio y a nivel de Planta Piloto con el fin de buscar una nueva fuente de materia prima para obtener biocombustibles que sean menos dañinos hacia al ambiente, para decidir si es o no económicamente viable actualmente para sustituir a los combustibles fósiles y conforme al análisis de sus propiedades fisicoquímicas darle aplicación en motores de combustión interna.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Secuencia de actividades

- Obtener la composición porcentual promedio en peso de los componentes del fruto de *Jatropha* Criolla de dos lugares, Cuilco y Cuyotenango, a nivel laboratorio mediante la extracción con hexano.
- Caracterizar el aceite obtenido a nivel laboratorio mediante Cromatografía de gases, ácidos grasos libres, densidad y viscosidad.
- Obtener biodiesel a nivel de laboratorio a partir del aceite obtenido en la extracción con hexano.
- Determinar las propiedades de viscosidad y densidad del biodiesel a partir del aceite extraído con hexano.
- Realizar el análisis de poder calorífico en el Ministerio de Energía y Minas del biodiesel obtenido del aceite extraído con hexano.
- Extracción de aceite a escala industrial en la maquinaria de Technoserve localizada en Cuyotenango.
- Caracterizar el aceite obtenido de la planta piloto.
- Obtención de biodiesel a nivel de laboratorio a partir del aceite obtenido en la Planta Piloto de Technoserve.
- Obtener las propiedades fisicoquímicas del biodiesel en el Ministerio de Energía y Minas obtenido del aceite extraído en Planta Piloto, tales como el poder calorífico, viscosidad cinemática, gravedad API, contenido de metanol y contenido de agua y sedimentos.

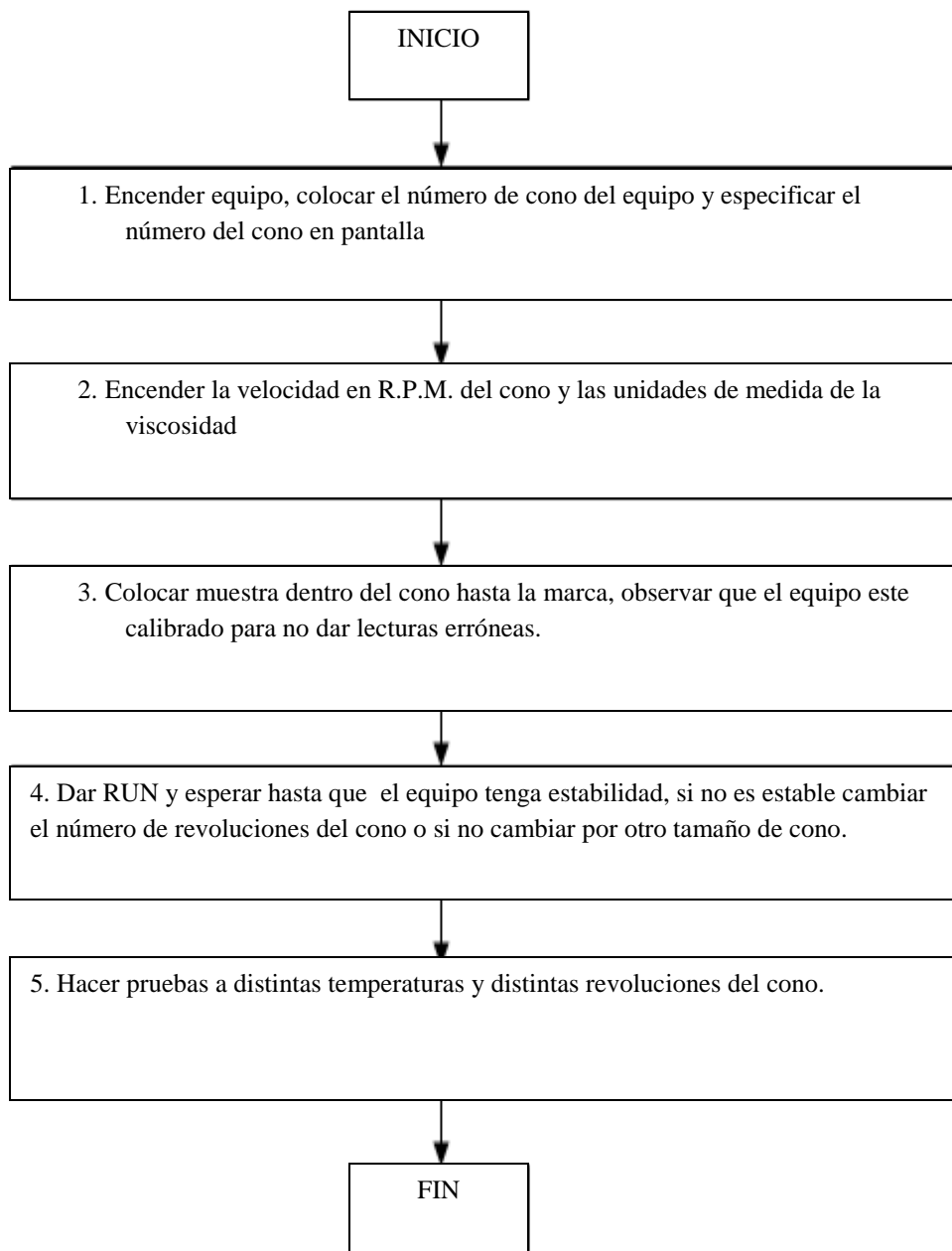
### B. Materiales y métodos para pruebas de caracterización al biodiesel y aceite

Para obtener la viscosidad del biodiesel y del aceite se utilizaron los siguientes equipos y materiales

- Viscosímetro de Brookfield DV-E de la Universidad del Valle de Guatemala
- Viscosímetro de Brookfield DCA-2000 del Laboratorio de PINCASA situada en Villanueva
- Viscosímetro Cannon-Fenske
- Cronómetro
- Beacker 50,100 y 250 mL
- Termómetro

Para el uso del viscosímetro de Brookfield modelos DV-E y DCA-2000 se siguió el siguiente procedimiento:

**Figura 9 Diagrama de bloques para el uso de los viscosímetros de Brookfield**



### **C. Materiales y método para cromatografía de gases**

#### **1. Procedimiento para preparación de soluciones:**

- Solución Babcock 17.5 g hexametáfosfato de sodio en 150 mL de H<sub>2</sub>O. Agregar 8 mL de triton x100 y 1 mL metanol. Aforar a 250 mL
- 50 mL de NaOH 0.5 N disuelto en metanol

- 50 mL Trifloruro de boro al 20 % en metanol
- 150 mL Solución saturada de coluro de sodio en agua.

## **2. Preparación de la muestra**

- Colocar 20 gotas de la grasa o aceite en un balón de 25 mL.
- Agregar 5 mL de NaOH 0.5 N aforado con metanol.
- Colocar en una estufa y calentar a 70 °C por 10 minutos hasta que se saponifique totalmente.
- Agregar 3 mL de BF<sub>3</sub> en metanol al 20 %.
- Agregar 5 mL de heptano.
- Agregar 5 mL de heptano.
- Agregar solución saturada de NaCl hasta el aforo.
- Trasvasar la capa superior (heptano + ácidos grasos) a un vial de 4 mL que contenga 0.5 g de sulfato de sodio anhidro.

## **3. Determinación por cromatografía**

- Utilizar columna semicapilar
- Utilizar el equipo cromatógrafo de gases de alta resolución con Software HP Chem Station
- Ajustar el equipo a las siguientes condiciones:
- Columna SPB-5 (30 m x 0.53 mm x 1 microm)
- Nitrógeno (43 psi) con split 94.1, acarreador 2.4 mL/min, 2 psi in col
- Inyector 245 °C, Detector FID, Ionización de llama 260 °C (H<sub>2</sub> 13 psi, Aire 36 psi)
- Horno 100 °C, 10 °C/min hasta 250 °C, 10 min.
- Sistema cromatográfico HP 5890 II/ChemStation.
- Inyectar 0.4 µl de las muestras a analizar.

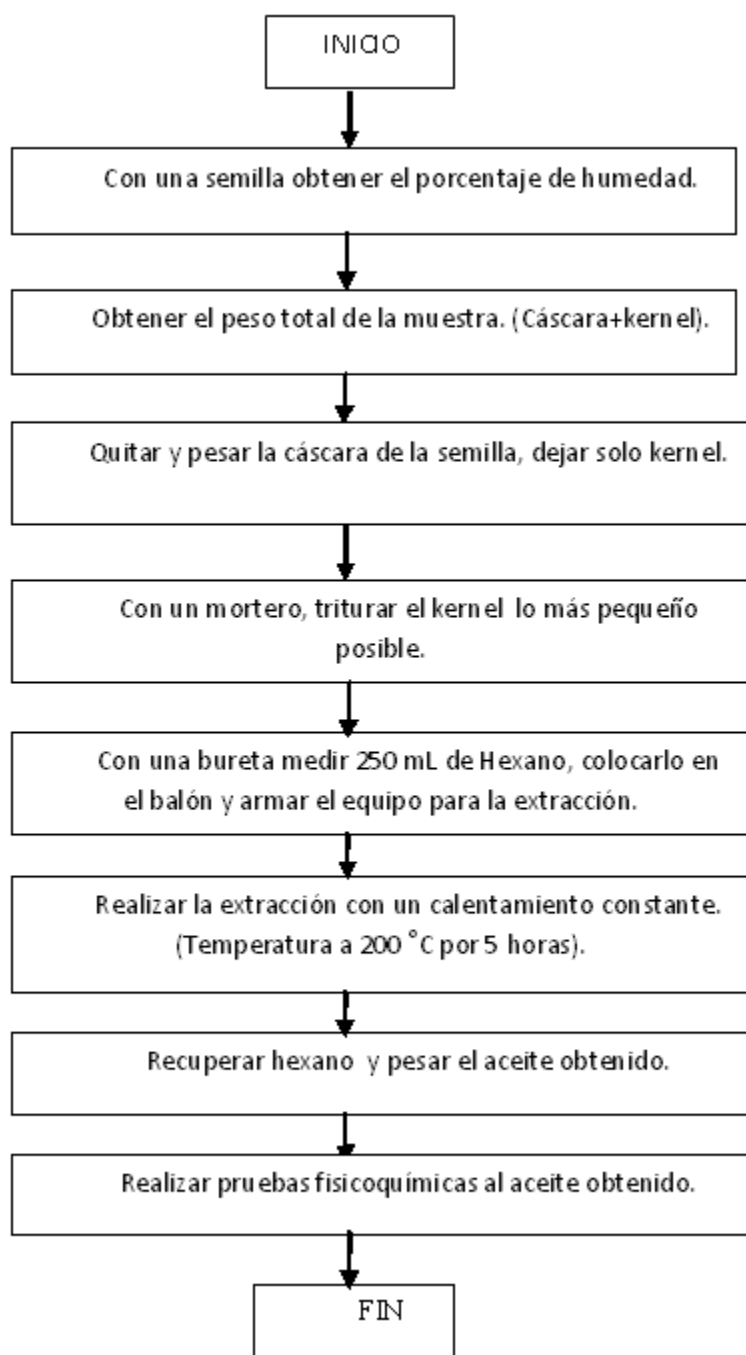
## **D. Medición del valor ácido**

Se realizó el procedimiento usando el método de la American Oil Chemists` Society, este es equivalente al método descrito en el estándar ASTM

- Preparar 2 erlenmeyer de 250 mL adicionando 75 mL de solvente (alcohol isopropilico) a cada uno
- Añadir 5 gramos de muestra a uno de los beackers
- Añadir 5 gotas de fenolftaleína para servir de indicador en ambos beackers.
- Titular ambos beackers con una solución de KOH 0.1 N hasta aparecer el primer color rosado.
- Calcular el valor ácido con la fórmula respectiva
- Para encontrar la relación del porcentaje de ácidos grasos libres dividir entre dos el resultado anterior.

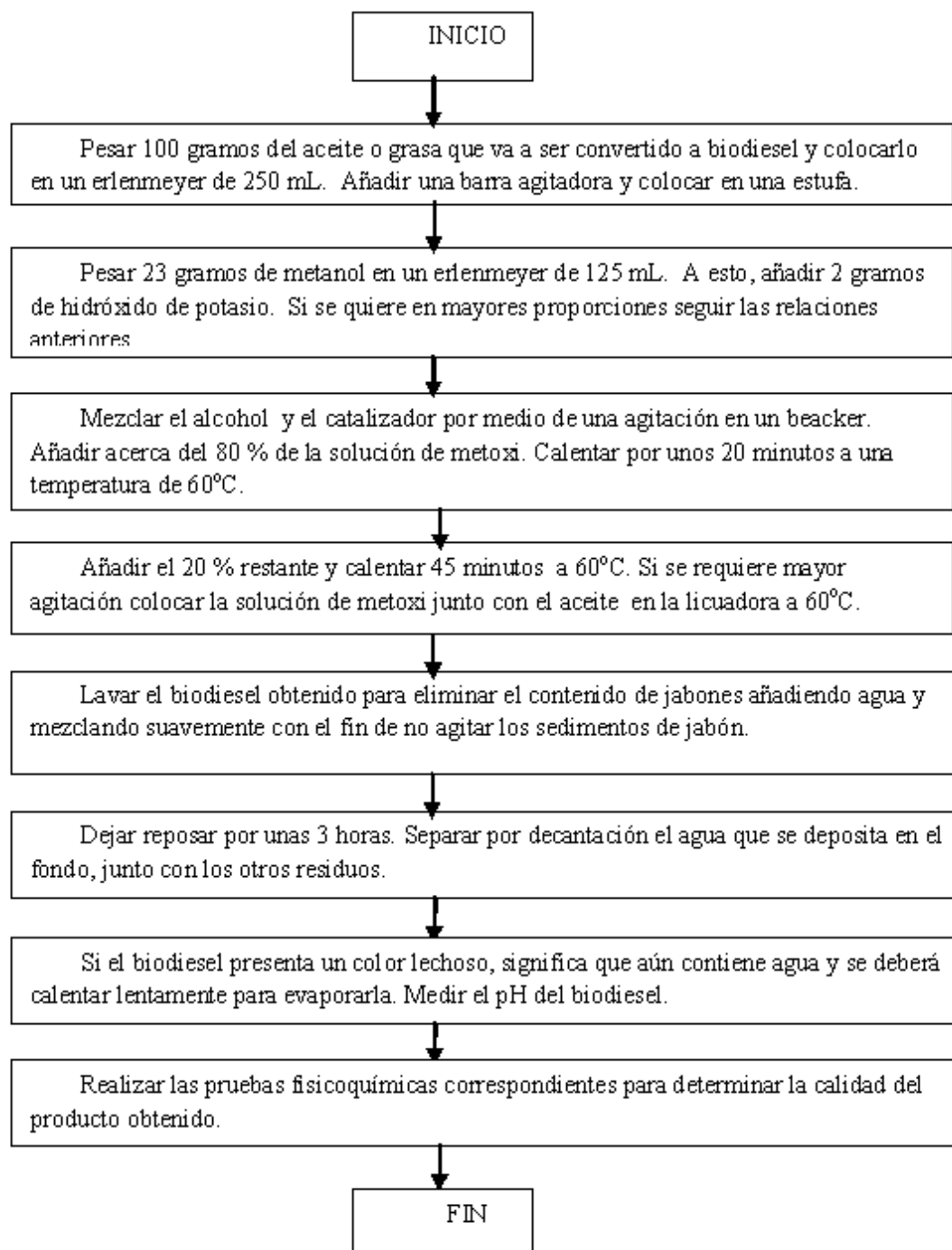
### E. Obtención de aceite a nivel laboratorio

Figura 10 Diagrama de bloques para la extracción de aceite mediante hexano a nivel de laboratorio



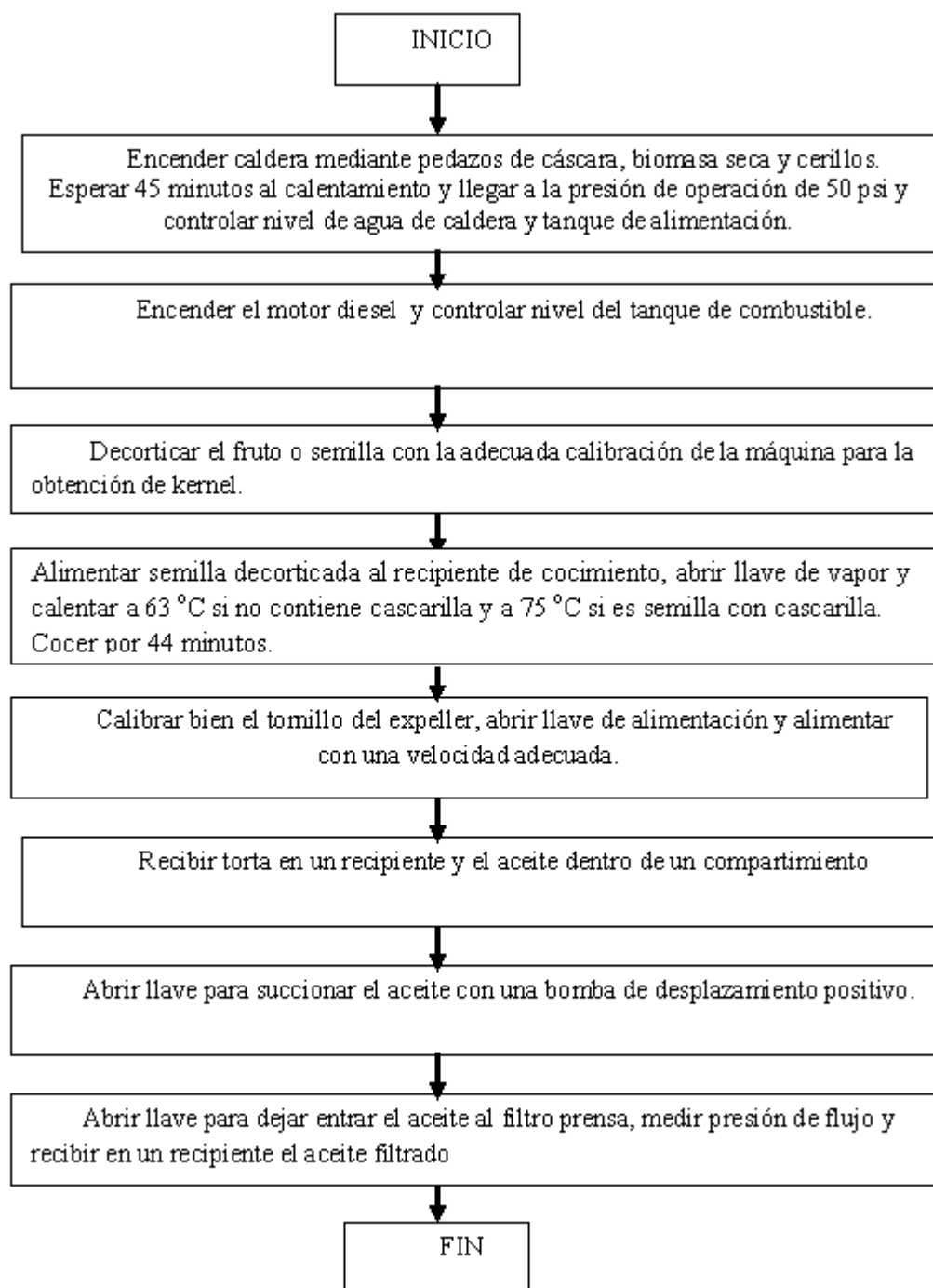
## F. Obtención de biodiesel a nivel laboratorio

Figura 11 Diagrama de bloques para la producción de biodiesel a nivel de laboratorio



## G. Extracción de aceite en planta piloto en Cuyotenango

Figura 12 Diagrama de procedimiento para la extracción de aceite a nivel de Planta Piloto.



## VII. RESULTADOS

### A. Composición de frutos de *Jatropha Criolla*

Tabla 6 Análisis a nivel laboratorio de la composición promedio de los frutos de las muestras 1, 2, 3 de Cuyotenango y la muestra de Cuilco

Componentes	Muestra 1 (%)	Muestra 2 (%)	Muestra 3 (%)	Muestra Cuilco (%)
Humedad	64.60 ± 0.82	-----	15.31 ± 0.25	41.97 ± 0.53
Pulpa	23.63 ± 0.33	-----	55.29 ± 0.46	19.78 ± 0.29
Cáscara	4.11 ± 0.21	-----	11.89 ± 0.23	17.39 ± 0.28
Kernel	5.62 ± 0.24	-----	8.59 ± 0.21	14.29 ± 0.22
Aceite	2.04 ± 0.11	-----	8.92 ± 0.19	6.57 ± 0.19

### B. Composición de las semillas de *Jatropha Criolla*

Tabla 7 Análisis a nivel laboratorio de la composición promedio de las semillas de las muestras 1, 2, 3 de Cuyotenango y la muestra de Cuilco

Componentes	Muestra 1 (%)	Muestra 2 (%)	Muestra 3 (%)	Muestra Cuilco (%)
Humedad	28.50 ± 0.51	10.16 ± 0.34	11.29 ± 0.26	10.87 ± 0.31
Cáscara	24.95 ± 0.58	31.57 ± 0.55	35.41 ± 0.47	40.41 ± 0.48
Kernel	34.15 ± 0.66	24.69 ± 0.39	26.41 ± 0.44	23.77 ± 0.27
Aceite	12.40 ± 0.52	33.59 ± 0.51	26.89 ± 0.48	24.94 ± 0.51

### C. Análisis del aceite obtenido a partir de la extracción con hexano en laboratorio

Tabla 8 Valores de ácidos grasos libres del aceite extraído con hexano a nivel laboratorio

Clase de prueba	Valor	Valor permitido (%)
Ácidos grasos libres Muestra 1 Cuyotenango (%)	5.21 ± 0.25	5
Ácidos grasos libres Muestra 2 Cuyotenango (%)	3.42 ± 0.25	5

Tabla 9 Composición de los tipos de ácidos grasos analizados mediante Cromatografía de gases que se encuentran en el aceite de *Jatropha Criolla* tomados de la muestra 2 de Cuyotenango

Composición de las cadenas de ácidos grasos del fruto del piñón	
Componentes	Composición (%)
Ácido Esteárico	13.46 ±0.28
Acido Oleico	77.85 ±0.76
Acido Linoleico	8.69 ±0.15

(Ver en Apéndice, en sección de Imágenes, páginas número 115-117 para la visualización de los cromatogramas).

#### D. Análisis del aceite obtenido en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango

Tabla 10 Valores de viscosidad, ácidos grasos libres y densidad del aceite extraído en planta piloto obtenido a partir de la muestra 3 de Cuyotenango

Clase de prueba	Valor experimental	Método de análisis	Valores de literatura/ Permitidos según normas
Ácidos grasos libres (%)	4.65 ± 0.23	American Oil Chemists Society	5 %
Densidad 40 °C (g/mL)	0.923 ± 0.028	-----	0.918
Viscosidad obtenida por Cannon-Fenske, 40°C, (cSt)	34.174 ±0.004	ASTM- D445	43-49
Viscosidad obtenida por Brookfield, 50 r.p.m, 40°C, (cSt)	15.35 ±0.67 cSt	ASTM- D445	43-49
Viscosidad obtenida por Brookfield, 60 r.p.m, 40°C, (cSt)	14.14 ±0.63 cSt	ASTM- D445	43-49

#### E. Pruebas al biodiesel obtenido del aceite extraído, laboratorio y en Planta Piloto

Tabla 11 Valores de viscosidad, densidad y poder calorífico del biodiesel obtenido del aceite extraído con hexano de la muestra 2 de Cuyotenango

Clase de prueba	Valor	Método de análisis	Valores permitidos según normas
Densidad 40 °C (g/mL)	0.898 ± 0.020	ASTM-D1298	.860-0.900
Viscosidad obtenida por Brookfield, CAP 2000, 40°C, (cSt)	7.0167 ±0.1121	ASTM- D445	1.9-6.5
Calor de combustión superior, BTU/lb	17,101	ASTM- D240	16,900-17,900

Tabla 12 Caracterización del biodiesel obtenido del aceite extraído de la muestra 3 de Cuyotenango en Planta Piloto

Descripción de la prueba	Método de análisis	Resultados	Valores permitidos según normas
Punto de Inflamabilidad, °C	ASTM-D-93	78	130
Calor de Combustión Superior, BTU/lb	ASTM-D240	16,838	16,900-17,900
Gravedad API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	29	-----
Gravedad específica, 15.56 °C	ASTM D-287	0.8822	0.860-0.900
Viscosidad cinemática, 40 °C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D-445	4.6	1.9-6.5
Densidad, 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	ASTM-D-1298	882	0.860-0.900
Agua y Sedimento, % volumen	ASTM D-1796	<0.05	<0.05

Tabla 13 Rendimientos obtenidos del biodiesel a nivel laboratorio mediante transesterificación alcalina con agitación por medio de magnetos y en licuadora

Rendimiento muestra 2 Cuyotenango (%) Agitación magneto	Rendimiento muestra 3 Cuyotenango (%) Agitación magneto	Rendimiento muestra 3 Cuyotenango (%) Agitación licuadora
48.71 ±0.54	25.58 ±0.21	61.55 ±0.95

## F. Costos de extracción y producción obtenidos de la investigación

Tabla 14 Resumen de producción y costos de la investigación, tipo batch, por quintal de fruto procesado de *Jatropha Criolla*, en base a la muestra 3 de Cuyotenango y en función de los días de extracción en Planta Piloto

Resumen de costos y producción	Cantidad
Costo del galón de aceite (Q)	60.05
Costo por kg de fruto procesado (Q)	1.49
L aceite/100 libras fruto	4.25
Rendimiento por fruto procesado (% p/p)	8.648± 0.355
Galones aceite/100 libras fruto	1.12
Costo por 100 libras de fruto (Q)	50.00
Costo por procesar 100 libras Fruto (Q)	67.45

Tabla 15 Costos de investigación para realizar una extracción de aceite de la semilla de jatropha criolla con hexano y el equipo Soxhlet en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala

Rubros	Quetzales (Q)
Hexano (100 mL de pérdida en cada extracción)	1.32
Semilla (100 gramos en cada extracción)	0.11
Agua (5 horas) Q.3.33/m <sup>3</sup>	0.043
Energía Eléctrica (Secador Bandejas), 5-6 horas de secado, 28 % a 8 %, 48-53 °C. Q.1.36kW/h.	173.31
Total por extracción	174.38

Tabla 16 Costo de investigación para la producción de biodiesel a escala laboratorio a partir de un galón del aceite de Jatropha Criolla

Componente	Q
Aceite (galón)	60.05
Metanol (Grado Industrial), Q 33/galón	8.69
KOH (Grado industrial, 56 % pureza),	4.28
Costo total	73.02

### G. Comparación de rendimientos del aceite del piñón, laboratorio y Planta Piloto

Tabla 17 Comparación de los rendimientos obtenidos por fruto a nivel laboratorio y en planta piloto

	Valor (%p/p)
Rendimiento máximo por fruto en extracción por planta piloto	8.648 ± 0.355
Rendimiento máximo por fruto en extracción con solventes, hexano	8.920 ± 0.190

## H. Comparación de las propiedades del biodiesel

Tabla 18 Comparación mediante el poder calorífico del biodiesel obtenido del aceite extraído a nivel laboratorio y en Planta Piloto

	Valor (MJ/kg)
Poder calorífico biodiesel obtenido a partir del aceite extraído con hexano	39.78
Poder calorífico biodiesel obtenido a partir del aceite extraído en planta piloto	39.16

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo extraer y caracterizar el aceite extraído del fruto del piñon, *Jatropha Criolla* a nivel de dos procesos, a nivel laboratorio y planta piloto, con el fin de obtener biodiesel para obtener una nueva fuente de biocombustibles. En la primera etapa de este trabajo se obtuvo el método para extraer aceite a partir de disolventes orgánicos, en este caso fue hexano. La extracción o lixiviación hecha dependió de diversos factores tales como la temperatura de extracción, humedad de semilla y la forma de molienda del kernel. Se analizaron tres muestras de Cuyotenango y una muestra de Cuilco.

La muestra 1 de Cuyotenango suministrada por Technoserve venía húmeda, ésta estuvo 5 semanas en este estado, la humedad promedio determinada el día que se recibió fue de  $64.60 \pm 0.82$  %, con un peso promedio del fruto de  $21.789 \pm 1.240$  g, ésta tenía pedazos de ramas entre los frutos y era fuente de cultivo para microorganismos, para evitar esto es imprescindible que la semilla posea contenidos bajos de humedad, 10-12 %, para su correcto almacenamiento, si se quitan las impurezas y se secan se evita que se produzcan procesos de descomposición que afecten la calidad de las semillas; el proceso más importante para el tratamiento previo de una semilla es el secado puesto que las impurezas ya secas son eliminadas con la decorticadora, con el secado se facilita el decortinado, el manejo mecánico y su almacenamiento.

Se encontró la composición promedio del fruto de la muestra 1 de Cuyotenango al momento de recibirla, se obtuvieron los siguientes resultados: La humedad fue del  $64.6 \pm 0.82$ %, la pulpa o cáscara del fruto representó el  $23.63 \pm 0.33$  %, el kernel el  $5.62 \pm 0.24$  %, la cáscara de la semilla el  $4.11 \pm 0.21$  % y el aceite solamente el  $2.04 \pm 0.11$ %. La capa exterior del fruto es la que posee mayor humedad debido a que su pared tiene mayor porosidad, la recolección de la semilla con elevado contenido de humedad planteó problemas inmediatos y graves, ya que con niveles de humedad arriba del 12 % la semilla se calentó y se deterioró muy rápidamente.

Se obtuvo la relación de fruto seco/fruto húmedo, al tener el fruto una humedad del 64.6 %, la relación obtenida fue de 0.354 g fruto seco/g de fruto húmedo, este análisis se realizó con el fin de observar la composición promedio que tiene el fruto con base seca y también con el fin de observar que al momento de transportar semilla con humedad alta se aumentan los costos de producción. En este análisis la humedad implicó el mayor componente del fruto por lo que degradó las demás partes del fruto disminuyendo su porcentaje en peso.

La semilla resultante después de quitar la cáscara del fruto, se secó por medio del equipo de transferencia de calor del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala a una temperatura promedio de 40-48 °C hasta una humedad promedio del  $28.50 \pm 0.51$  %. La extracción del aceite se obtuvo a partir de hexano por medio de un equipo de extracción (Soxhlet), pero antes de extraer, a esta semilla se le dio un pretratamiento térmico por medio de un recipiente plano sobrepuesto en una estufa, se esperó hasta que la semilla empezara a explotar a una temperatura de 200 °C, dándose en promedio un porcentaje en peso de aceite de  $12.40 \pm 0.52$  %, un promedio del kernel de  $34.15 \pm 0.66$  % y un

promedio de cáscara de semilla del  $24.95 \pm 0.58$  %. El porcentaje de aceite obtenido fue bajo en comparación de los porcentajes promedios que se han obtenido en otros lugares que es del 40-60 % en peso de semilla.

El aceite obtenido fue bajo debido a que las semillas almacenadas con humedades alrededor del 13 % en adelante propicia el desarrollo de hongos, degradándose la semilla así también se produce mayores niveles de respiración del fruto perdiéndose materia seca, se pierde materia seca porque en su proceso de respiración la semilla tiene que quemar parte de su endospermo produciendo calor, oxígeno y dióxido de carbono. Por lo tanto se observó que los bajos rendimientos de aceite se dieron porque el tratamiento previo de la humedad no fue la adecuada y la forma de secado no fue eficiente.

El tipo de secado fue mediante temperatura controlada, para muestras de 500 gramos en este equipo fue de 7 horas en promedio para bajar 10.5 % de humedad, dando en promedio una evaporación del 1.5 % por hora, por lo que representó una velocidad muy baja de secado y además de la poca área de contacto entre el aire caliente y la semilla. La humedad influyó en una mala calidad del aceite, ya que al analizar los ácidos grasos libres fue del  $5.21 \pm 0.21$  %, para que tenga una buena calidad del aceite, éste debe contener  $\leq 5$  % de ácidos grasos libres para que sea un aceite adecuado para la producción de biodiesel. Cuando el nivel de ácidos grasos libres en el aceite es arriba del 5 %, durante el proceso transesterificación, la sopa que se forma inhibe la separación del glicerol de los metil ésteres y contribuye a la formación de emulsificación durante el lavado con agua del biodiesel.

Los posibles factores que dieron el bajo rendimiento en la muestra 1 de Cuyotenango fue la forma del pretratamiento térmico que hizo que el aceite y el kernel se pegará a la cáscara de la semilla dificultándose quitar por lo que hubo demasiadas pérdidas; otro factor que influyó en el bajo rendimiento, como se mencionó anteriormente, fue que el fruto estuvo 5 semanas con una humedad muy alta y al momento de extraer el aceite estuvo desgastado. Otro factor que influyó fue el arreglo de la semilla dentro del cono de papel filtro en el sistema de extracción, el área de contacto fue relativamente poca con el hexano por dos causas: a) el kernel se cortó en pedazos muy grandes que dificultó al hexano pasar completamente a través de ella y b) la temperatura de calentamiento fue muy alta por lo que el hexano pasó demasiado rápido disminuyendo el tiempo de retención del solvente con el lecho. El kernel en este análisis representó el mayor porcentaje de la semilla debido a que no se le extrajo todo el aceite. Un factor muy importante que se observó en la extracción con hexano es que se debe maximizar el tiempo de residencia a 43-45 min para obtener el mayor contacto posible para inundar el material en el baño de solvente que se forma en cada etapa, este tiempo es el tiempo que tarda la mezcla, mezcla aceite-solvente, para lograr el mojado completo del lecho. El tiempo de residencia trabajado fue de alrededor de 17 minutos siendo muy corto con el normal mencionado anteriormente, esto fue porque se trabajó a una temperatura mayor de  $60^{\circ}\text{C}$  dentro de la mezcla, con esto se logró llegar mas rápido al punto de equilibrio pero no fue eficiente el sistema, es decir se obtuvo problemas de seguridad, ambientales y costos de operación debido a la evaporación del hexano.

La trituración y molienda del kernel también influyó bastante en la extracción, se realizaron con tres instrumentos para picarla o molerla que fueron con un cuchillo, un molino y un mortero, el mejor equipo

fue el mortero puesto que este trituró el sólido uniformemente y con menores pérdidas de kernel. En el molino se obtuvieron muchas pérdidas que quedaron en las paredes de éste obteniendo poca muestra cada vez que se molía. Con el cuchillo no se tuvo un corte uniforme y se tuvieron pedazos grandes de kernel entonces al momento de pasar el solvente este no tuvo un acceso eficaz en la semilla, entonces a medida que se reduce el tamaño de partícula se obtiene un mayor rendimiento en la extracción, lo recomendable sería reducirlo hasta el tamaño de harina. La trituración a partículas finas facilita la extracción por la disminución de las distancias que deben recorrer el aceite y el disolvente, dentro y afuera de la semilla. Se ha demostrado que el factor que regula la velocidad de la extracción es, con toda seguridad, la resistencia interna de las partículas, a la difusión molecular del aceite y el disolvente.

También el espesor del papel filtro influyó en la extracción, el papel filtro utilizado fue No. 5, se debió haber utilizado un No. 3, mientras más grande es el número más se tarda en llegar al equilibrio y más dificulta el paso del solvente por las paredes y por consiguiente se aumenta el tiempo de extracción, el tiempo de extracción que se dio fue de 6-7 horas siendo lo normal 5 horas.

El fruto de Cuilco fue cosechado y almacenado con una humedad muy alta, éste al recibirse tenía dos semanas de haberse cortado. El problema que se obtuvo en la extracción de aceite a partir de la semilla de Cuilco fue su tratamiento previo. Se encontró la composición promedio del fruto al momento de recibirla, se obtuvieron los siguientes resultados: La humedad fue del  $41.97 \pm 0.53$  %, la pulpa o cáscara del fruto representó el  $19.78 \pm 0.29$  %, el kernel el  $14.29 \pm 0.22$  %, la cáscara de la semilla el  $17.39 \pm 0.28$  % y el aceite solamente el  $6.57 \pm 0.19$  %. Una observación muy importante es que el fruto por el alto contenido de humedad que traía, se predispuso al ataque de plagas y enfermedades fúngicas por lo que favoreció a la invasión de hongos a sus tejidos y por consiguiente su degradación degenerativa. La semilla después de secada para su correcta conservación debe ser almacenada en silos con ventilación, se acepta que un 12 % es el contenido de humedad confiable para poder almacenar; entonces éste se debió de haber secado lo más pronto posible, pero por falta de disponibilidad del secador no se pudo secar rápido. Es muy importante dejar la semilla en un lugar con humedad controlada, porque se observó que el fruto absorbe bastante humedad del ambiente debido a que es muy higroscópico.

El peso promedio del fruto a ésta humedad fue de  $5.233 \pm 0.720$  g, comparando con el peso promedio de la muestra 1 de Cuyotenango que es de  $21.789 \pm 0.32$  g, se observó que el tamaño del fruto de Cuilco es menor comparado con el fruto de Cuyotenango, pero tal diferencia en pesos pudo haber sido mas corta si el fruto de Cuilco no hubiera estado atacado por gusanos, este ataque fue en el interior de la semilla, específicamente en el endospermo, el cual contiene la mayoría de la proteína de la semilla, es por esto que la humedad y el contenido de proteína propicia un ambiente sensible al ataque de insectos, hongos y gusanos. El rendimiento del aceite hubiera sido más alto si la degradación por gusanos no hubiera ocurrido, se observó que las semillas estuvieron picadas y algunas sin kernel dando un porcentaje alto la cáscara de la semilla.

La relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo al momento de recibirla fue de  $0.5803 \pm 0.1221$ , lo cual comparando con la muestra 1 de Cuyotenango dio  $0.2263 \pm 0.1131$ g más, esto nos dice que al

disminuir la humedad se aumenta la materia seca y se disminuye la degradación de la semilla, en términos económicos se disminuye costos de transporte.

La semilla con y sin pulpa o cáscara del fruto, se secó en el secador de Bandejas a una temperatura entre 43-53 °C, lo cual fue una temperatura alta debido a que un fruto a 42 % de humedad se debería secar a una temperatura de 30 °C con el fin de no rajarlas y cambiar sus propiedades fisicoquímicas. La semilla después de secarse tuvo una humedad promedio al momento de extraer el aceite de  $10.87 \pm 0.31$  %,  $23.77 \pm 0.27$  % de kernel,  $40.41 \pm 0.48$  % de cáscara y  $24.94 \pm 0.51$  % de aceite. El valor de la cáscara de la semilla fue alto debido a la gran cantidad de semilla que no contenía el kernel debido a la degradación de insectos y gusano.

La densidad aparente de la semilla de Cuilco dio un valor de  $346.640 \pm 7.141$  kg/m<sup>3</sup>, esta densidad nos dice la cantidad de semilla que se puede almacenar por m<sup>3</sup> de espacio en un tanque con ventilación controlada.

La muestra 2 de Cuyotenango analizada fue solamente semilla, el rendimiento del aceite mejoró en un 21.19 % en peso con respecto a la muestra 1 de Cuyotenango, debido a que la semilla desde el momento del corte fue secada al sol, la semilla se recibió con un promedio de humedad del 18 %, en esta muestra se cambió de equipo de secado, en este caso se utilizó el secador de bandejas, puesto que en este se observó un mayor tiempo de contacto y fue más eficiente; además que este secador tuvo un mejor control de la temperatura y un mayor área de contacto, puesto que su velocidad de evaporación fue mayor en un 0.7 % en comparación del equipo de transferencia de calor, dando una velocidad de reducción de humedad de 2.2 % por hora; la temperatura manejada para el secado fue de 48-53°C, siendo lo óptimo 38 °C. En esta etapa no se dio un precalentamiento a diferencia de la muestra 1 de Cuyotenango, puesto que no es necesario, ya que lo más importante es haberle dado un tratamiento previo de la humedad y obtener la mejor área de contacto entre la semilla y el solvente, la humedad promedio a la que se llegó fue del  $10.16 \pm 0.34$  %, la cual fue óptima. Otro factor importante mejorado en comparación del procedimiento hecho con la muestra 1 de Cuyotenango, fue que el kernel obtenido se trituró con un mortero, con esto se logró obtener un kernel más fino y por lo tanto un área mayor de contacto con el hexano. El porcentaje de kernel obtenido fue del  $24.69 \pm 0.39$  % y de la cáscara de la semilla fue del  $31.57 \pm 0.55$  %, con esto se puede observar que el porcentaje del kernel disminuyó en un 9.46 % en comparación a la muestra 1 de Cuyotenango por lo que se concluyó que la composición final del kernel en la semilla depende de cuanto aceite se le extraiga. El porcentaje de la cáscara de la semilla fue mayor que el kernel en este análisis en comparación la muestra 1 de Cuyotenango, esto fue porque en la prueba de la muestra 1 de Cuyotenango el kernel se quedó con más aceite que en esta prueba.

El aceite de piñon, es un tipo de lípido vegetal formado por triacilgliceroles, los cuales son compuestos formados por tres ácidos grasos unidos por enlace éster con un solo glicerol; con el fin de saber que tipo de ácidos grasos están unidos al enlace éster se realizó el análisis de Cromatografía de gases para poder separar las distintas especies mediante una columna semicapilar y acarrear mediante un gas los distintos compuestos del aceite de piñon y obtener sus tiempos de retención, alturas y áreas de los picos conforme

éstos se fueron evaporando. Según el análisis de la Cromatografía, se comparó el área de los picos de las especies, ya que estos varían en forma lineal con la concentración.

Al obtener la comparación de la cromatografía del aceite con el estándar se observaron los ácidos grasos más representativos. Según el análisis hecho, el aceite de *Jatropha Criolla* consta de tres tipos de ácidos grasos, todos conformados por cadenas de 18 carbonos, pero con la diferencia que uno es saturado (ácido esteárico), otro insaturado (ácido Oleico) y el otro poliinsaturado (ácido Linoleico), de estos tres la estructura que más se pareció a los picos de retención y área del estándar fue la del ácido oleico porque en la comparación de los picos tuvo menor porcentaje de error. Encontrar el tipo de ácido graso sirvió para conocer las propiedades físicoquímicas del aceite y encontrar que tipo de ácido graso contiene mayoritariamente el aceite de *jatropha criolla*. Se obtuvieron los siguientes resultados: el ácido oleico tuvo un porcentaje en concentración del  $77.85 \pm 0.76$  %,  $13.46 \pm 0.28$  % de ácido esteárico y  $8.69 \pm 0.15$  % de ácido linoleico. Esto nos dice que el aceite está conformado de triacilglicérolos mixtos y lo cual coincide con la literatura que dice que la mayoría de aceites vegetales son de cadenas distintas, por lo tanto en este análisis, el 13 % de los ácidos grasos son saturados y el 87 % es insaturado, debido al alto porcentaje de ácidos grasos insaturados se puede decir que este va perdiendo su calidad y tiende a tener problemas de rancidez oxidativa, olores desagradables y pérdida de vida funcional conforme pasa el tiempo. En otros estudios realizados a la *Jatropha Criolla* se ha encontrado que este aceite está constituido por 20 % de ácidos grasos insaturados y 80 % de saturados, dichos porcentajes se asemejan en gran parte a los resultados obtenidos en la cromatografía de gases hechos en el Laboratorio de Instrumental Avanzado de la Universidad del Valle de Guatemala, la variación en porcentaje es debido a la gran variedad de *jatropha* que existen y los diferentes tratos hechos a la semilla desde su fase de crecimiento, su cosecha hasta el momento de la extracción.

El aceite obtenido de la muestra 2 de Cuyotenango, fue analizado según el método de la American Oil Chemists's Society para medir el porcentaje de los FFA (free fatty acid) o ácidos grasos libres, el resultado promedio obtenido fue del  $3.42 \pm 0.25$  % con una desviación del  $0.35 \pm 0.02$ , este valor en el aceite es recomendable para obtener biodiesel de buena calidad y por lo tanto un combustible que pueda consumir motores modernos. La densidad del biodiesel obtenido a  $40$  °C a partir de la muestra 2 de Cuyotenango fue de  $0.898 \pm 0.02$  g/mL, lo cual entra todavía en parámetros aceptables por las siguientes normas: Austrian Standard C1190, DIN 51606 y la Euro Standard EN 14214, aunque en las normas ASTM no se especifique. Según el Reglamento Técnico Centroamericano, Norma RTCA, la viscosidad cinemática a  $40$  C, con el método ASTM- D445 debe estar en el rango de  $1.9-6.5$  mm<sup>2</sup>/s, según las pruebas experimentales, la viscosidad obtenida del biodiesel a partir de la muestra 2 de Cuyotenango fue de  $7.0167 \pm 0.1121$  mm<sup>2</sup>/s, lo cual supera en un 7.95 % a lo permitido, esta viscosidad se tomó con el viscosímetro de Brookfield modelo CAP-2000, este pudo haber dado un margen de error considerable puesto que el equipo especificado según el método ASTM D445 es el viscosímetro Cannon-Fenske.

Para obtener el biodiesel a nivel laboratorio se siguió el método de Jon Van Gerpen, demostrado en la Universidad del Valle de Guatemala en una práctica dada el 11 de agosto del 2008, la reacción consistió en

una transesterificación alcalina en donde el aceite vegetal reaccionó en presencia de un catalizador, hidróxido de potasio (KOH), y un alcohol en este caso fue el metanol para producir metil ésteres de ácidos grasos. Los rendimientos obtenidos a partir del aceite de la muestra 2 de Cuyotenango fueron del 47.6 % y en una segunda prueba fue del 48.71 % con una desviación estándar de 1.57 dando un rendimiento promedio del  $48.71 \pm 0.54$ .

La reacción necesita un calentamiento a  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una velocidad de agitación elevada, según se cumplan estos parámetros de reacción más eficiente será la cinética de reacción, esto se traduce a que los di y monoacilglicérols, los cuales son intermediarios en la reacción de transesterificación, reaccionen más rápido hacia la formación de metil ésteres.

Se obtuvo la capacidad calorífica medida para el biodiesel obtenido a escala de laboratorio de la muestra 2 de Cuyotenango. Según el Reglamento Técnico Centroamericano, Norma RTCA, la energía de combustión, con el método ASTM- D240 debe ser 16900-17900 BTU/lb, el valor obtenido según el Ministerio de Energía y Minas fue de 17101 Btu/lb (39.78 MJ/kg), lo cual es un valor que entra en parámetros para un buen biodiesel. El biodiesel contiene alrededor de 8 % menos de contenido de energía que el diesel, por ser de origen vegetal contienen más oxígeno por lo que la menor energía se compensa con una mayor eficiencia en la combustión y además brinda una reducción de pérdida de potencia por la disminución de fricción interna del motor.

La mayor parte de los frutos lo constituye el endospermo, en este caso es la cáscara de la semilla y el kernel, y en la mayoría de los granos esto representa alrededor del 80 %, en el análisis obtenido a nivel de laboratorio se obtuvo que el  $71.04 \pm 0.94\%$  lo constituye el endospermo y el  $28.96 \pm 0.45\%$  lo constituye la capa exterior o pulpa.

El fruto de la muestra 3 de Cuyotenango tuvo un tratamiento diferente a las demás muestras de Cuyotenango, éste fruto no se cosechó en el momento de madurez fisiológica sino que se dejó secar en los árboles y se terminó de secar al sol, esto fue con el fin de evitar costos de secado, transporte y porque la maduración de la *Jatropha* no es uniforme. El problema que se obtuvo por su mayor exposición en el campo fue que algunos frutos fueron atacados por insectos lo que dio por resultado pérdidas de rendimiento; por consiguiente, cuanto antes se coseche el fruto después de estar maduro, mejor será la calidad de la semilla, suponiendo que éste pueda secarse eficazmente para un seguro almacenamiento con contenido de humedad que oscile entre el 10 y 12 por ciento. Entonces el secado se puede dar de tres formas: a) Una directamente en el árbol, b) Cortarla en su período de maduración con una humedad alta y secarla al sol y c) Cortarla en su período de maduración y secarla con una temperatura controlada. Según lo anterior, el análisis obtenido del fruto dieron los siguientes resultados:  $8.59 \pm 0.21\%$  es kernel;  $15.31 \pm 0.25\%$  es humedad; cáscara del fruto o pulpa dio  $55.29 \pm 0.46\%$ , la cáscara de la semilla dio  $11.89 \pm 0.23\%$  y el porcentaje de aceite  $8.92 \pm 0.19\%$ . Comparando con el fruto de Cuilco y la muestra 1 de Cuyotenango, el porcentaje de aceite fue superior en 2.37 % con respecto a la de Cuilco y fue superior en 6.88 % a la muestra 1 de Cuyotenango, entonces con esto se puede decir que se obtiene mejor rendimiento cortando la semilla después de su período de maduración y secarla al sol hasta una humedad promedio entre el 10-12 %, aunque no es más

eficiente que cortarla en su período de madurez a una humedad alta y después secarla a una temperatura controlada mediante equipos, es un método más económico.

Los rendimientos en porcentaje peso de aceite de la muestra 3 con respecto a la de Cuilco no estuvieron muy alejados entonces se puede decir que si a la semilla de Cuilco se le hubiera dado un tratamiento adecuado antes de la extracción, sería una fuente igual o de mayor rendimiento de aceite.

La relación de g fruto seco/g fruto húmedo fue de  $0.847 \pm 0.114$ , al comparar con la muestra 1 de Cuyotenango y la de Cuilco, se observó que la humedad juega un papel muy importante en el consumo y degradación del endospermo ya que a mayores humedades la semilla genera calor, oxígeno y dióxido de carbono con el fin de respirar. Según Boyd, *et.al.*, “Secado y procesamiento de semilla”, cuando el lote de semillas posee un porcentaje de humedad superior al 20 %, la temperatura no podrá pasar de 30 °C; entre 10 y 20 % de humedad la temperatura debe mantenerse no mayor de 38 °C; mientras que por debajo de 10 % de humedad la temperatura podrá alcanzar 43 °C, esto se hace con el fin de evitar pérdidas importantes, puesto que como las semillas son entidades biológicas que son extremadamente sensibles a la acción de calor y temperatura, cuando son excesivos pueden producir daños tales como niveles de rajaduras, la integridad de los tejidos, la acidez, dañar los niveles de proteínas y la apariencia.

El análisis de la semilla 3 de Cuyotenango dieron los siguientes valores: 26.89  $\pm$  0.48 % de aceite, 11.29  $\pm$  0.26 de humedad, 26.41  $\pm$  0.44 % de kernel y 35.41  $\pm$  0.47 % de cáscara. Comparando este rendimiento de aceite con la semilla de Cuilco, esta la supera en un 1.95 % de rendimiento más, con esto podemos decir que los métodos de extracción fueron exactamente iguales, por lo que no fue un factor que influenciara en los rendimientos, también se trituraron las dos semillas hasta el mismo tamaño de partículas y en términos generales el método de extracción se hizo igual; entonces lo que influyó en sus variaciones de rendimientos fue que la semilla de Cuilco no recibió ningún tratamiento de la humedad ni de secado antes de recibirla y en cambio la muestra 3 de Cuyotenango si la tuvo, ésta se cosechó después de estar seca en el árbol y se secó al sol hasta una humedad de la semilla del 11 %, los dos tipos de semilla se llegaron entre el 10-12 % de humedad que es adecuada para su almacenamiento y extracción, pero la diferencia estuvo en que la semilla de Cuilco estuvo más degradada por gusanos, tuvo mayor respiración que hizo que se quemara el endospermo, factor que no tuvo en exageración la semilla 3 de Cuyotenango, aunque si tuvo en algunos frutos por el tiempo que estuvo después de su maduración en los campos de cultivo, los que hizo que insectos también la picaran. La semilla de Cuilco a pesar de su incorrecto manejo, estuvo casi a la par en rendimientos con la muestra 3 de Cuyotenango, lo que se puede predecir que si se le da un mejor trato a ésta puede llegar a superar en rendimiento a las semillas que se siembran en las Parcelas del ICTA en Cuyotenango. Otro factor que influyó en el rendimiento de aceite fue el tamaño promedio de las semillas, el peso promedio de semilla de Cuilco dio un valor de  $0.444 \pm 0.013$  g y la muestra 3 de Cuyotenango dio un valor de  $0.972 \pm 0.029$  g. Esta diferencia fue en parte por la mayor degradación sufrida por la semilla de Cuilco a raíz de microorganismos.

Comparando la semilla 2 de Cuyotenango con respecto a la muestra 1 de Cuyotenango, muestra 3 de Cuyotenango y la muestra de Cuilco, fue la que mayor rendimiento de aceite en % peso tuvo, superándolas

en un 21.19 %, 6.7 % y 8.65 % respectivamente. Todas las muestras analizadas no tuvieron el mismo tratamiento desde el momento de la cosecha hasta el momento de extraer con disolventes. La muestra 2 de Cuyotenango se cortó en su período de maduración y se secó inmediatamente al sol, la muestra 3 de Cuyotenango se cortó después de su maduración y se secó también al sol. La muestra 2 de Cuyotenango tuvo mejor rendimiento que la muestra 3 porque ésta tuvo un mejor control de la humedad desde el momento que se recibió, la muestra 3 se secó al sol y la muestra 2 se secó con temperatura controlada, aunque la muestra 2 tuvo mejor rendimiento, esto no quiere decir que en términos económicos fue mejor, el mejor rendimiento de la muestra 2 de Cuyotenango se compensa en que su proceso de secado fue más caro que el de la muestra 3 de Cuyotenango, se puede decir que el mejor método de secado en términos económicos fue el de la muestra 3. Lo que se puede hacer con el método de secado que se siguió con la muestra 3 de Cuyotenango es mejorar el control de insectos en el campo para evitar que el fruto sea dañado y así mejorar el rendimiento del aceite.

La muestra 1 de Cuyotenango y la muestra de Cuilco tuvieron el mismo tratamiento previo, se cortaron en su período de cosecha y tardaron por lo menos 3 semanas húmedas, con la diferencia que la muestra 1 de Cuilco debido a su incorrecto almacenamiento estuvo degradada en mayor proporción por organismos tales como gusanos.

Los costos de investigación calculados fueron subjetivos, tiene que saberse que de por sí los costos de investigación son elevados, y conforme se van realizando más pruebas y mejoramientos éstos van disminuyendo. Para calcular los costos se tomó en cuenta el costo de la materia prima, hora-hombre para operar la planta extractora y el costo de la energía que consume el motor. Entre los costos estimados se encuentran los siguientes: El costo para la producción de biodiesel a escala laboratorio a partir de un galón del aceite de *Jatropha Criolla* dio un valor de Q. 70.85, siendo el rubro más caro el costo del aceite de piñón. El costo por realizar una extracción de aceite de la semilla de *Jatropha Criolla* con hexano y el equipo Soxhlet en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala dio un valor de Q. 174.38, siendo el costo mayor el secado en el secador de Bandejas, para evitar costos de secado en vez de utilizar este equipo, se debe secar al sol, sin este costo el costo por el experimento sería Q. 1.47. La maquinaria de extracción de aceite utilizada, que se encuentra en Cuyotenango es de marca Tinytech, constó de 5 equipos principales que fueron: la caldera, el motor diesel, la decorticadora, el expeller y el filtro prensa, aparte estuvieron las bombas de desplazamiento positivo que alimentaron agua al motor diesel, la bomba mecánica que alimentó agua a la caldera y la bomba de desplazamiento positivo que mandó el aceite con sedimentos al filtro prensa.

En la primera corrida con 24 kilos de semilla entera de Cuilco, kernel +cáscara, se realizó una curva de calentamiento en el recipiente de cocimiento, en la temperatura interior del recipiente subió de una temperatura de 28 a 77 °C, se llegó a tal temperatura porque la semilla hasta esta temperatura tuvo un aspecto chicloso, el cual es el punto ideal para alimentar al expeller y tardó 44 min en llegar a este punto. La alimentación del vapor llegó hasta una temperatura de 119 ±0.01 °C. El cocimiento fue muy importante con el fin de hacer que las paredes y las proteínas de las células oleaginosas fueran permeables

al paso del aceite y obtener éste en mayor libertad; la semilla ganó cierta humedad con el vapor, la cocción produjo una película delgada de agua líquida que adsorbió la superficie de la semilla, que obligó al desplazamiento del aceite. La humedad óptima de las semillas cocidas varía ampliamente según las distintas clases de éstas y el método de prensado que se emplee, pero en este experimento la semilla ganó en promedio 7 % de humedad. Como las materias oleaginosas no están nunca completamente secas, fue un hecho que la presencia de ésta fuera necesaria para que se produjera la coagulación proteínica.

Entonces el grado de humedad si es un factor que afecta al momento de extraer el aceite a la semilla, pero sin ésta el aceite no se puede extraer eficazmente por lo tanto se tiene que predecir según el tipo de semilla que se esta extrayendo qué grado de humedad inhibe la acción humectante del aceite y por consiguiente evitar la formación de sustancias tenso-activas tales como los fosfátidos y ácidos grasos libres que se forman en presencia de agua.

La maquinaria de extracción utilizada en Cuyotenango se ha utilizado para dos tipos de semillas: la semilla de jatropha y la semilla de hule. El primer día de extracción en la Planta de Extracción de Cuyotenango, la maquinaria estuvo configurada para la extracción de semilla de hule. Al comparar el tamaño del fruto de hule con el de jatropha fueron parecidos, debido a que no se habían hecho pruebas experimentales para decorticar y extraer la semilla de jatropha con la configuración para la semilla de hule, se realizaron pruebas experimentales de la muestra 3 de Cuyotenango, los resultados fueron los siguientes:

Se alimentó  $135.17 \pm 1.23$  kg de fruto y las salidas fueron  $72.69 \pm 1.56$  kg de cáscara de fruto, 53.78 % de las salidas,  $55.72 \pm 1.21$ kg de semilla, 41.22 % de las salidas y  $6.76 \pm 0.65$  kg de pérdidas que representó el 5 %; comparando esto con el análisis hecho en laboratorio el promedio de cáscara de fruto fue de 28.96  $\pm 0.33$  % y el 71.04  $\pm 0.62$  % fue semilla. La gran diferencia en lo que se obtuvo en la decortadora y lo que se hizo a nivel laboratorio fue principalmente la inexactitud de la calibración de la máquina decortadora y porque parte de las cáscaras de semilla y kernel salió con la cáscara del fruto siendo muy difícil recolectarlo.

En la decortadora, se logró obtener muy poco kernel sin cáscaras, se logró quitar la mayoría de la cáscara del fruto pero no así la cáscara de la semilla; los  $55.72 \pm 1.21$ kg de semilla que se obtuvieron era principalmente kernel más cáscara, no le logró cuantificar exactamente cuanto kernel tenía,  $33.28 \pm 0.81$  kg de esta semilla se introdujeron en el recipiente de cocimiento el primer día de extracción.

Antes de introducir los  $33.28 \pm 0.81$  kg de la muestra 3 de Cuyotenango, se realizaron dos corridas de la semilla completa de Cuilco, una con  $24 \pm 0.41$  kilos y la otra con  $16.1 \pm 0.12$  kilos. En la primera corrida con 24 kilos de semilla entera de Cuilco se hizo con la configuración del tornillo incorrecta, las partes internas del tornillo tenían partes con posiciones en contra, donde se atascó y no dejaba pasar el aceite. El tiempo total en promedio para la extracción de 24 kilos de semilla fue de 1 hora con 17 minutos, dando una velocidad de extracción de 18.70 kilos/hora, se alcanzó una temperatura del expeller de  $95.6^{\circ} C$ . Como el material a granel fue prensado a altas presiones, la fricción hizo que el expeller se calentara, mientras más dura es la semilla mayor es la temperatura que alcanza. La torta del expeller salió en promedio a  $50.6^{\circ} C$  y

el aceite mientras fue pasando el tiempo llegó hasta los  $93^{\circ}C$ . Cuando se tuvo 56.9 minutos de extracción, el aceite que salió alcanzó una temperatura de  $84.4^{\circ}C$ , y al tener 1 hora con 6 minutos subió hasta  $95.6^{\circ}C$ , por lo que se observó que se tardó en promedio  $1.23^{\circ}C/\text{min}$  en incrementarse la temperatura del expeller desde el comienzo de la extracción.

En la segunda corrida con 16.1 kilos de semilla completa de Cuilco, debido a que el expeller y la maquinaria estuvieron ya calientes, solo se dio un cocimiento de 21 minutos, en esta corrida se cambió la configuración del expeller, se tuvo que cambiar las posiciones del tornillo, se colocaron todas las partes de este en una misma dirección, con esto se observó que el expeller si se debe configurar de diferente manera para el fruto de hule y de *Jatropha*. Al cambiar la configuración se logró mejorar el proceso de extracción. El expeller tuvo dos salidas principales, una donde salió el aceite y la otra donde salió la torta exprimida. En el lugar donde salió el aceite, se obtuvieron demasiadas impurezas, es decir aceite con torta, debido al alto contenido de aceite que esta tenía, se volvió a reprocessar introduciéndola de nuevo en el recipiente de cocimiento, esto se hizo las veces que fueron necesarias hasta obtener una torta completamente seca.

Después de procesar los 40.1 kilos de semilla de Cuilco, se introdujeron los  $33.28 \pm 0.81$  kg de la muestra 3 de Cuyotenango, en tres corridas, debido a la falta de tiempo, estas semillas no recibieron el cocimiento adecuado, conforme se fueron alimentando al recipiente de cocimiento se fueron alimentado al expeller, no se hizo el cocimiento adecuado ya que se aprovechó que el expeller estuvo caliente a la temperatura de  $83^{\circ}C$  y el recipiente de cocimiento a  $119^{\circ}C$ .

El total de semilla ingresada al expeller el primer día de extracción, al sumar las semillas de Cuilco y la de muestra 3 de Cuyotenango fue de  $73.38 \pm 0.87$  kg más el agua ganada por la semilla que fue de  $6.60 \pm 0.52$  kg, esta humedad ganada se obtuvo con la diferencia de la humedad inicial y la tomada al final del cocimiento. Las salidas en porcentajes fueron: 79.26 % de torta, 7.22 % de perdidas, 3.76 % de torta o sedimentos en el aceite y 1.5 % de aceite. Debido al alto porcentaje de torta obtenida, se obtuvieron solamente  $2.73 \pm 0.18$  L de aceite sin impurezas. Se observó que la torta resultante se dejó con bastante cantidad de aceite, entonces se hubiera necesitado un prensado adicional de esta torta y una extracción con solventes para que se hubiera podido disminuir la cantidad de aceite lo más que se pueda, lo recomendable es 1 % en peso. Aún en los prensados más eficaces, la torta retiene, del 4 al 7 % de su peso. La desventaja de utilizar disolventes es su elevado costo inicial de instalación y la tendencia de las semillas oleaginosas a desintegrarse. La torta debe utilizarse para otros fines tales como un medio de consumo energético mediante su quema.

Para el segundo día de extracción en la planta de Cuyotenango, se calibró la decortadora a una criba más pequeña para obtener menos cáscara negra dentro del kernel. Se alimentó  $22.45 \pm 0.76$  kg de la semilla decortada de la muestra 3 de Cuyotenango y los porcentajes en peso de los componentes de salida fueron 70.91 % de kernel, 21.93 % de cáscara y 7.16 % de pérdidas, claramente se observó que a mayor calibración se obtiene mejores resultados. Las pérdidas obtenidas fueron porque se quedó kernel y cáscara dentro de la máquina y por restos que quedaron en el suelo. El kernel obtenido del decortado se ingresó

en el expeller, esta kernel contenía cáscaras de semilla, en esta prueba se tuvo una mejor estructuración de las partes internas del tornillo con respecto a la primera corrida con semilla de Cuilco, se le colocaron piezas nuevas por las desgastadas aumentando la eficiencia de éste, la caldera trabajó en el rango de 45-50 psi, se le dio un cocimiento de 37 min y se llegó a la temperatura de 65 °C, el tiempo de cocimiento y extracción total fue de 1.45 horas. En las salidas se obtuvo 39.06 % de torta, 29.08 % de aceite, 22.97 % de pérdidas, estas pérdidas se dieron por la cantidad de aceite regado en el recipiente recolector y restos que se quedaron en el equipo y suelo. El rendimiento del aceite se mejoró de 3.76 % en peso a 29.08 % con respecto del primer día de extracción, esto se debió a que en la primera corrida se saturó tanto el sistema de torta que absorbió una gran cantidad de aceite y a parte que la configuración del tornillo estuvo en mejores condiciones. Otro factor importante que influyó en el mejor rendimiento el segundo día de extracción, fue que el fruto se decortizó dos veces, un decortizado fue a partir de fruto completo y la otra fue a partir de la semilla resultante del decortizado del fruto.

En el análisis hecho a nivel de laboratorio el aceite obtenido de la planta piloto tuvo un porcentaje de ácidos grasos libres de  $4.65 \pm 0.23$ , con esto se predijo que el aceite obtenido dará una buena transesterificación y por lo tanto cuando se de el proceso de limpieza del biodiesel no se dará tanta emulsificación. Tanto los ácidos grasos libres como los fosfátidos presentes en el aceite de las semillas actúan con carácter tenso-activo, es por esto que es muy importante que éstos sean bajos y que al momento de la cocción no tiendan a adsorber y retener aceite.

La densidad obtenida del aceite clarificado de planta piloto a 40 °C fue de  $0.923 \pm 0.028$  g/mL, la densidad a 32 °C fue de  $0.925 \pm 0.025$  g/mL y a la temperatura ambiente de 23.5 °C fue de  $0.928 \pm 0.001$  g/mL. La densidad obtenida fue parecida a la obtenida en la literatura que es de 0.9186 g/mL, las diferencias se debieron a la inexactitud del método empleado y por errores en la medición de los pesos y volúmenes. La densidad del aceite antes de prensar los sedimentos y obtenido de la planta piloto fue de  $1.17 \pm 0.11$  g/mL, este aceite fue más denso porque éste salió contaminado, tuvo aspecto de lodo por todos los sedimentos que poseía y que se formaron por la cáscara negra que tuvo la semilla. La densidad estuvo afectada por los sedimentos que traía el aceite, se utilizó el filtro prensa para obtener el aceite que quedó en la torta, esta torta tuvo un porcentaje de rendimiento de aceite del 55 (% v/v), a la torta resultante se le extrajo más aceite por medio de solventes subiendo un 4.97 % obteniendo un rendimiento de aceite de la torta sedimentada del 59.97 (% v/v). Con esto se puede ver que es muy importante obtener el aceite sin impurezas ya que cambia significativamente sus propiedades normales para sus usos posteriores, también que la extracción de los aceites a partir de semillas oleaginosas contienen considerables cantidades de productos sólidos o sedimentos asociados con el aceite.

Según el manual del viscosímetro de Brookfield, Modelo CAP 2000, hay ciertas variables que pueden afectar la medida de la viscosidad y que los fluidos tienen características reológicas que pueden ser descritas por la medida del viscosímetro. Al interpolar a 40 °C la viscosidad del aceite obtenido en planta piloto en la gráfica a 50 y 60 r.p.m. dieron los siguientes resultados: A 50 r.p.m. de agitación dio una viscosidad de  $15.35 \pm 0.67$  cSt y a 60 r.p.m. de agitación dio  $14.14 \pm 0.63$  cSt, con estos datos se pudo decir

que el aceite tuvo un comportamiento no-Newtoniano porque tiene diferentes viscosidades a diferentes velocidades de agitación y también se puede decir que es un fluido No-Newtoniano del tipo pseudoplástico puesto que presenta una disminución de la viscosidad al aumentar la velocidad de agitación.

Se utilizó el viscosímetro de Cannon-Fenske, el cual fue un equipo certificado, con el fin de corroborar la viscosidad obtenida del Brookfield, y al comparar resultados si hubo una gran diferencia en las lecturas, en este equipo se obtuvo una viscosidad promedio de  $34.1743 \pm 0.004$  cSt y en el Brookfield a 50 r.p.m dio  $15.35 \pm 0.67$  cSt, esta gran diferencia que se dio fue por dos razones muy importantes que fueron: a) porque el Brookfield se especializa en otros tipos de líquidos tales como las pinturas y porque quizás en el momento de tomar las lecturas el equipo no se encontraba calibrado y b) el viscosímetro de Cannon-Fenske es ampliamente utilizado en las industrias de aceites y lubricantes y por lo tanto se especializan y se calibran hacia este tipo de medidas.

Entonces se puede decir que se obtiene el máximo rendimiento en aceite cuando se logra la mayor separación posible del kernel con la cáscara de la semilla pero si se intenta separar totalmente la cáscara de la semilla del kernel, se pierde aceite en la porción de kernel que se va con la cáscara de la semilla. Si, por el contrario, se deja una cantidad excesiva de cascarilla, se perderá aceite por absorción en ésta. Entonces lo que se debe hacer es calibrar por medio de corridas, que nuestro producto final contenga 40 % de cáscara de semilla y 60 % de kernel, se observó que en el segundo día de extracción en la planta piloto, el kernel alimentado al tornillo poseía muy poca cáscara de semilla, por lo que se alimentó cáscara extra en el tornillo para hacer que este tuviera una presión más fuerte sobre el kernel alimentado.

El biodiesel obtenido a partir del aceite extraído en Planta Piloto dio los siguientes resultados: El punto de inflamabilidad dio un valor de  $78$  °C, comparando con el Reglamento Técnico Centroamericano RTCA 75.02.43:07 y por el método de análisis ASTM D-93, este debe ser como mínimo  $130$  °C, entonces el biodiesel obtenido tiende a vaporizarse rápido en el aire para inflamarse instantáneamente cuando se le acerca una llama.

El análisis de agua y sedimentos dio un valor menor al 0.05 % volumen, este fue determinado mediante el método ASTM D-1796, el biodiesel fue de buena calidad y libre de impurezas perjudiciales al momento de pruebas en motores estacionarios. La viscosidad cinématica a  $40$  °C con el método de análisis ASTM D-445 dio un valor 4.6 cSt, según el reglamento este debe estar en el rango de 1.9-6.0 cSt, entonces el biodiesel estaría en rango para su uso en motores y por lo tanto no daría mucha resistencia a fluir en el sistema interno de un motor y daría una buena lubricidad.

Según el Reglamento Técnico Centroamericano, Norma RTCA, la energía de combustión, con el método ASTM- D240 debe ser 16900-17900 BTU/lb, el valor obtenido según el Ministerio de Energía y Minas del biodiesel obtenido a partir del aceite extraído en Planta Piloto fue de 16838 Btu/lb ( $39.78$  MJ/Kg), lo cual es un valor que entra en parámetros para un buen biodiesel. Comparando con el biodiesel obtenido a partir del aceite extraído con hexano y de la muestra 2 de Cuyotenango, cuyo valor fue de 17101 BTU/lb ( $39.16$  MJ/Kg), se concluyó que el biodiesel obtenido a partir del aceite de jatropha si cumple con los parámetros necesarios para aplicarlo en motores diesel y también que la forma en extraer el aceite no varía en forma

significativa en el valor del poder calorífico final, siempre y cuando el aceite que se procese no contenga demasiadas impurezas.

En la pruebas de obtención de biodiesel a partir del aceite obtenido en planta piloto, se observó que tiene mayor influencia la agitación que el control de la temperatura en la conversión de los triacilgliceroles a metil ésteres, los resultados fueron los siguientes: Se tuvo un valor promedio de rendimiento de biodiesel de  $25.58 \pm 0.21$  % con una agitación moderada por medio de un magneto y se obtuvo un promedio de  $61.55 \pm 0.95$  % con agitación fuerte en una licuadora, lo cual demuestra que es más eficiente realizar las reacciones de transesterificación a una agitación fuerte.

El costo total por procesar 100 libras de fruto se obtuvo a partir de las condiciones que se tuvieron en los dos días que se tuvo extracción en la Planta Piloto de Cuyotenango, entonces el costo de hora-hombre para decorticar se obtuvo mediante el tiempo gastado para decorticar el fruto completo y el decorticado de la semilla dando un costo de Q. 7.34, también se tomó en cuenta la hora-hombre para el cocimiento y extracción lo cual dio Q. 4.60, el costo del diesel se tomo a partir del parámetro que gasta 0.75 L/h y se obtuvo el valor de Q. 5.51 y también el costo de la materia prima que es Q. 50.00 por quintal de fruto. Se obtuvieron los siguientes datos de costo y producción sobre 100 lbs de fruto: se tuvo un costo de galón de aceite de Q. 60.05, un costo por kg de fruto procesado de Q. 4.25, 4.25 L o 1.12 galones por quintal de fruto, lo cual comparando con corridas hechas por Technoserve y Biocombustibles de Guatemala no se aleja de los rendimientos obtenidos por ellos, lo cual es 5 L por 100 libras de fruto. Comparando el rendimiento obtenido por fruto a nivel de los dos procesos realizados, se obtuvo un rendimiento máximo de  $8.92 \pm 0.19$  % p/p de aceite a nivel laboratorio mediante extracción con hexano y a nivel de planta piloto se obtuvo un rendimiento de  $8.648 \pm 0.355$  % p/p, lo cual comprueba que se obtiene mejor rendimiento mediante extracción por solventes.

También se obtuvieron los costos de producción a partir de la alimentación máxima que se puede alimentar al expeller lo cual es 24 kilos de kernel, también se tomo en cuenta que para obtener esta cantidad de kernel se necesitan 82.10 kg de fruto, esta cantidad de fruto se calculó a partir de los rendimientos de la decorticatora para el proceso de fruto completo y semilla, según los datos obtenidos del balance de masa. La hora-hombre para cocimiento y extracción se obtuvo según las condiciones obtenidas en la extracción con  $22.45 \pm 0.76$  kg de kernel, se asumió que las horas gastadas es proporcional a la cantidad de semilla procesada. La hora-hombre para decorticar el fruto y la semilla para obtener kernel, se calcularon a partir de las horas gastadas para decorticar ambas y a partir de los rendimientos de la decorticatora en ambos tipos de forma de la semilla. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: Q. 8.32 es el costo de la hora-hombre para cocimiento y extracción, Q 13.29 es el costo de la hora-hombre para decorticar, Q. 9.96 fue el costo del Diesel, y Q. 90.50 el costo del fruto.

Se obtuvieron los siguientes resultados de producción a carga máxima en el expeller que es 24 kg de kernel en el cilindro de cocimiento: En relación peso, se obtuvieron 6.98 kg de aceite; en volumen 7.70 L de aceite y en galones 2.03 galones.

## IX. CONCLUSIONES

1. La composición promedio por fruto que dio el mejor rendimiento en aceite fue la muestra 3 de Cuyotenango y dio los siguientes resultados:  $8.59 \pm 0.21$  % es kernel;  $15.31 \pm 0.25$  % es humedad; cáscara del fruto o pulpa dio  $55.29 \pm 0.46$  %, la cáscara de la semilla dio  $11.89 \pm 0.23$  % y el porcentaje de aceite  $8.92 \pm 0.19$  %.
2. La composición de la semilla que mayor rendimiento de aceite dio fue la muestra 2 de Cuyotenango dando los siguientes resultados: El porcentaje de kernel obtenido fue del  $24.69 \pm 0.39$  % y de la cáscara de la semilla fue del  $31.57 \pm 0.55$  %, el de humedad fue de  $10.16 \pm 0.34$  % y el rendimiento de aceite fue de  $33.59 \pm 0.51$ .
3. Dentro de las pruebas realizadas al aceite obtenido por medio de hexano en el sistema soxhlet se obtuvieron los siguientes resultados: Para la muestra 1 de Cuyotenango se obtuvo  $5.21 \pm 0.21$  % de ácidos grasos libres, y para la muestra 2 de Cuyotenango se obtuvo  $3.42 \pm 0.25$  %.
4. Las pruebas realizadas al biodiesel obtenido del aceite extraído con hexano dieron los siguientes resultados: La densidad a  $40^\circ\text{C}$  fue de  $0.898 \pm 0.020$  g/mL; la viscosidad obtenida por Brookfield, modelo CAP 2000, a  $40^\circ\text{C}$ , fue de  $7.0167 \pm 0.1121$  cSt y el poder calorífico fue de  $39.78$  MJ/kg.
5. La composición de los tipos de ácidos grasos, analizados mediante cromatografía de gases que se encuentran en el aceite de *Jatropha Criolla* tomados de la muestra 2 de Cuyotenango dieron los siguientes resultados:  $13.46 \pm 0.28$  % es de ácido Esteárico,  $77.85 \pm 0.76$  % es de ácido Oleico y  $8.69 \pm 0.15$  % es de ácido Linoleico.
6. Los valores de viscosidad, ácidos grasos libres y densidad del aceite extraído en planta piloto obtenido a partir de la muestra 3 de Cuyotenango dieron los siguientes valores:  $4.65 \pm 0.23$  % fueron ácidos grasos libres,  $0.923 \pm 0.028$  g/mL la densidad a  $40^\circ\text{C}$ ; la viscosidad obtenida por el equipo Cannon-Fenske, a  $40^\circ\text{C}$ , fue de  $34.174 \pm 0.004$  cSt; la viscosidad obtenida por Brookfield a  $50$  r.p.m y  $40^\circ\text{C}$  fue de  $15.35 \pm 0.67$  cSt y la viscosidad obtenida por Brookfield a  $60$  r.p.m y  $40^\circ\text{C}$  fue de  $14.14 \pm 0.63$  cSt.
7. La caracterización del biodiesel obtenido del aceite extraído de la muestra 3 de Cuyotenango en planta piloto dieron los siguientes valores: El punto de inflamabilidad fue de  $78^\circ\text{C}$ ; el calor de combustión superior fue de  $39.16$  MJ/kg; la gravedad API a  $15.56^\circ\text{C}$  fue de  $29^\circ\text{API}$ ; su viscosidad cinemática a  $40^\circ\text{C}$  fue de  $4.6$  mm<sup>2</sup>/s; la densidad a  $15^\circ\text{C}$  fue de  $882$  kg/m<sup>3</sup> y el porcentaje de agua y sedimentos fue  $< 0.05$  % en volumen.
8. El rendimiento del biodiesel obtenido a nivel de laboratorio de la muestra 2 de Cuyotenango con agitación moderada con magneto fue de  $48.71 \pm 0.54$  %; el rendimiento de la muestra 3 de Cuyotenango con agitación moderada con magento fue de  $25.58 \pm 0.21$  % y el rendimiento de la muestra 3 de Cuyotenango con agitación fuerte con licuadora fue de  $61.55 \pm 0.95$  %.
9. Los costos de investigación calculados fueron subjetivos, tiene que saberse que de por sí los costos de investigación son elevados. Para calcular los costos se tomó en cuenta el costo de la materia prima, hora-hombre para operar la planta extractora y el costo de la energía que consume el motor. El costo de la

producción de biodiesel a partir de 1 galón de aceite de piñón fue de Q. 70.85; el costo por realizar una prueba de extracción de aceite con el equipo soxhlet fue de Q. 174.38. El costo por galón de aceite fue de Q. 60.05; el costo por procesar 100 libras de fruto fue de Q. 67.45; los galones aceite/100 libras de fruto fue de 1.12 y se produjeron 4.25 L aceite/100 libras de fruto.

## **X. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda contar con equipos regulados por las normas ASTM tales como el viscosímetro Cannon-Fenske para la medición de valores más exactos de las propiedades de los biocombustibles.
2. Se recomienda que la torta resultante de la extracción de aceite mediante la prensa en la planta piloto se reprocese hasta estar lo más seca posible puesto que a la torta seca se le recupera mediante solventes alrededor de 4 % mas de aceite.
3. Debido a que el biodiesel obtenido tiene 8 % menos de energía que el diesel convencional, se recomienda usar el biodiesel como aditivo al 20 % para lograr una sinergia entre ambos combustibles.
4. Para diferentes tipos de semillas, cambiar el tipo de calibración del extrusor para lograr el mayor rendimiento posible aunque se parezcan en tamaño y textura.
5. Debido a la gran cantidad de torta que se obtiene resultante de la extracción del aceite de piñon, se recomienda usar esta torta como una fuente de energía mediante su quema en hornos.
6. En el cocimiento, el grado de humedad si es un factor que afecta al momento de extraer el aceite a la semilla, se tiene que predecir según el tipo de semilla que se esta extrayendo qué grado de humedad inhibe la acción humectante del aceite y así evitar sustancias tenso-activas tales como los fosfátidos y ácidos grasos libres que influyen en una mala calidad del aceite.
7. Si se quiere aumentar la producción para fines lucrativos, se debe realizar mayores estudios agronómicos para lograr que se produzcan frutos en tiempos de sequía, implementar tecnología en el sistema de recolección de frutos y realizar mayor investigación en la calibración de las prensas.
8. Realizar pruebas en motores mediante adaptaciones utilizando el aceite como combustible debido a que resulta más económico que el biodiesel y así también evitar contaminación por la evaporación del metanol.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Addison, Keith. *Biocombustibles*. <http://journeytoforever.Org/es/biocombustibles.html>
2. Barraza, Nelsón. 2007. *Análisis Comparativo de la Elaboración de Biodiésel a partir de aceite crudo de palma africana por medio de dos procesos, a nivel laboratorio y planta piloto*. Trabajo de tesis para optar al grado de Ingeniero Químico en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
3. *Biodiésel*. Marzo 2007. [www.biodiesel.org/pdf\\_files/fuelfactsheets/BDSPEpec.PDF](http://www.biodiesel.org/pdf_files/fuelfactsheets/BDSPEpec.PDF).
4. Biodiésel Uruguay. *Jatropha. Fuente de biodiesel*.  
<http://www.biodieseluruguay.com/articulos/jatropha.php>.
5. Blanco R.G., G.E. Chavarría y C.L. Salazar. 2004. *Obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales*. Trabajo de tesis para optar al grado de Ingeniero Químico en la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”. San Salvador. El Salvador.
6. Calero Cáceres, et.al. 2007. *Síntesis y refinación de biodiesel y glicerina obtenidos a partir de grasa vegetal*. Universidad Central de Ecuador. Facultad de Ciencias Químicas.
7. Castro, Paula. 2007. *Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Soluciones prácticas*. Lima Perú. [www.scielo.org.pe/pdf/mc/v2n2/a06v2n2.pdf](http://www.scielo.org.pe/pdf/mc/v2n2/a06v2n2.pdf)
8. Ciria, J. Ignacio. 2007. *Propiedades y características de diesel y biodiesel*.  
<http://www.fiagro.org.sv/archivos/0/997.pdfm>
9. Cordero López, Jorge Alejandro. 2003. *Evaluación de las propiedades físicoquímicas del biodiesel obtenido a partir de aceite de palma y etanol, como combustible alternativo del Diesel 2D*. Trabajo de Graduación. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, Guatemala.
10. Estrada, Rodolfo. 2008. *Jatropha C. Algunas experiencias de su cultivo en Guatemala*. Presentación en Power Point en Universidad del Valle de Guatemala.
11. Hilbert, Jorge A. 2007. Documento: *Empleo de los biocombustibles en motores*. Guatemala.
12. *Jatropha World*. Centro para la promoción de Jatropha. [www.jatrophabiodiesel.Org](http://www.jatrophabiodiesel.Org)
13. Knothe Gerhard, Van Gerpen Jon, and Krahl Jürgen. 2005. *The Biodiesel Handbook*. Estados Unidos.
14. Larosa, Rodolfo J. 2007. *Proceso para la producción de biodiesel (metilester o esteres metílicos de ácidos grasos)*. Refinación de glicerina. [www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf](http://www.biodiesel-uruguay.com/articulos/Biod-rev2.pdf).
15. Lecaros, Pablo y Hero Morales. 2006. *Biocombustibles en Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Eléctrica. Chile.
16. Lehninger, David y M.M. Cox. 2005. *Principios de Bioquímica*. 4ta. Edición. McGraw Hill, Madrid, España. 1119 págs.
17. Mayorga, Héctor. 2009. *Procesamiento de Aceites, Grasas Vegetales y Biocombustibles*. Ciclo de Conferencias del Grupo Farner de Expertos en Proceamiento de grasas y aceites en Universidad del Valle de Guatemala.

18. Ministerio de Energía y Minas, Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Suplemento IX Foro Regional. *Oportunidades Financieras para los proyectos de Energía Renovable y Ambiente en Centro América*. Hotel Marriot. Guatemala, 19-21 de febrero del 2007. Anexo.
19. Morrison, Robert y Robert Boyd. *Química Orgánica*. Quinta Edición. Pearson Educación. México, 1998. Pág. 868.
20. Reglamento Técnico Centroamericano. RTCA 75.02.43:06. *Biocombustibles. Biodiésel (B100) y sus mezclas con aceite combustible diesel*. Especificaciones. Noviembre 2006. Editado por COGUANOR, CONACYT y otros.
21. Romero, Herbert. 2005. *Elaboración, análisis y comparación de Biodiesel a partir de aceite de Palma Usado, mediante dos procesos a nivel de planta piloto*. Trabajo de tesis para optar al grado de Ingeniero Químico en la Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
22. Rosales, Jaime. 2009. *Procesamiento de Aceites, Grasas Vegetales y Biocombustibles*. Ciclo de Conferencias del Grupo Farner de Expertos en Proceamiento de grasas y aceites en Universidad del Valle de Guatemala.
23. Torres, Calos A. 2009. *Cultivos Energéticos SRL & Cooperativa El Rosario Ltda*. Provincia de Santiago del Estero, Argentina, *Jatropha Curcas*. <http://jatrophaargentina.blogspot.com>.
24. Villanueva Gretel. 2007. *Aspectos fundamentales en la producción de biodiesel*. Universidad Marta Abreu de las villas. Conferencia dictada en el Seminario de Biocombustibles, agosto 2007. Dirección General de Energía Guatemala.

## **XII. APÉNDICE**

## A. Datos originales

**Tabla 19 Datos originales para la corrida utilizando 24 kg de semilla entera (kernel+cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco hecha el primer día de extracción en la planta piloto**

Pcaldera (psi)	55
T cocimiento total (min)	44
tiempo total de Extracción (min)	77
Temperatura de semilla inicial (Celsius)	30
Temperatura final de semilla (Celsius)	67.8
Cantidad de semilla alimentada al Expeller (kg)	24.00

**Tabla 20 Temperaturas de entrada de vapor, del exterior e interior del recipiente de cocimiento al realizar la corrida con semilla entera (kernel+ cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco el primer día de extracción en la Planta Piloto**

T <sub>entradaVapor</sub> (°C)	T <sub>interior</sub> (°C)	T <sub>exterior</sub> (°C)	tiempo (min)
35 ±0.01	28 ±0.01	32 ±0.01	0 ±0.01
99 ±0.01	45 ±0.01	77 ±0.01	6.32 ±0.05
105 ±0.01	53.9 ±0.01	91 ±0.01	16.47 ±0.05
106.9 ±0.01	56.8 ±0.01	100.4 ±0.01	19.2 ±0.05
109.8 ±0.01	58.2 ±0.01	113 ±0.01	24.62 ±0.05
116 ±0.01	63.6 ±0.01	116 ±0.01	27.23 ±0.05
117 ±0.01	67.8 ±0.01	117 ±0.01	32.9 ±0.05
119 ±0.01	77 ±0.01	119 ±0.01	44 ±0.05

## B. Cálculos de muestra

### 1. Cálculo del porcentaje de componentes de la semilla de *Jatropha Criolla* obtenidos de la muestra 3 de Cuyotenango, extracción 1

$$\% \text{Peso}_\text{Componentes} = \frac{\text{Gramos}_\text{Aceite}}{\text{Gramos}_\text{Muestra}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Ejemplo: Para el cálculo del % peso del aceite,

$$\% \text{Peso}_\text{Aceite} = \frac{26.4 \pm 0.1}{99.4 \pm 0.1} \times 100 = 26.56 \pm 0.46 \text{ \% Peso}$$

### 2. Obtención de los componentes en % peso del fruto de *Jatropha Criolla* a partir de los datos obtenidos de la muestra 3 de Cuyotenango

Se analizó una muestra total de frutos de 1,265.56 ±0.1 g y se analizó para el componente de humedad,

$$\text{GramosSemilla} = \text{Peso}_\text{Total}_\text{Muestra} - \text{Peso}_\text{pulpa} \quad (\text{Ecuación 7})$$

$$\text{GramosSemilla} = 1,265.56 \pm 0.1 - 847.48 = 418.08 \pm 0.12 \text{ g semilla}$$

Se obtuvo la humedad promedio de la semilla lo cual dio un porcentaje de  $11.29 \pm 0.26 \%$  y un porcentaje de humedad promedio de la pulpa lo que dio un valor de  $17.44 \pm 0.35 \%$

$$\text{Humedad}_{\text{total}_\text{fruto}} = \% H_{\text{promedioPulpa}} \times \text{PesoPulpa} + \% H_{\text{promedioSemilla}} \times \text{PesoSemilla} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$\text{Humedad}_{\text{total}_\text{fruto}} = 17.44\% \times 847.48 \text{ g} + 11.29\% \times 418.08 = 195.001 \pm 0.95 \text{ g}$$

$$\% \text{Peso}_\text{Humedad} = \frac{195.001 \pm 0.95 \text{ g}}{1265.56 \pm 0.1 \text{ g}} \times 100\% = 15.31 \pm 0.25\%$$

### 3. Obtención del porcentaje de composición de la pulpa y la semilla a partir de la muestra 3 de Cuyotenango.

Se analizó por cada fruto, entonces

$$\text{GramosSemilla} = \text{Peso}_{\text{Total}_\text{Muestra}} - \text{Peso}_{\text{pulpa}}$$

$$\text{GramosSemilla} = 3.6827 \pm 0.0001 - 0.9906 \pm 0.0001 = 2.6921 \pm 0.0013$$

$$\% \text{Peso}_\text{Semillas} = \frac{\text{Gramos}_\text{Semillas}}{\text{Gramos}_\text{Muestra}} \times 100$$

$$\% \text{Peso}_\text{Semillas} = \frac{2.6921 \pm 0.0013}{3.6827 \pm 0.001} \times 100 = 73.10 \pm 0.67\%$$

Luego se realizaron tres pruebas más y se obtuvo el valor promedio que fue 28.96% de pulpa y 71.04% de semilla.

### 4. Determinación del flujo del vapor requerido para trabajar en el expeller a capacidad máxima mediante una caldera que trabaja a 50 Psi

- Calor de Caldera hacia Cocimiento, asumiendo solamente 25 % del calor que entra es absorbido por la semilla

$$Q_{\text{caldera}} = m \times \lambda = m \times (H_{\text{vapor}} - H_{\text{liquido}}) \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$m_{\text{ker}} \text{ nel } C_{p_{\text{ker}} \text{ nel } \Delta T_{\text{Cocimiento}}} = Q_{\text{semilla}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

$$m_{\text{vapor}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Caldera}}}{H_{\text{vapor}} - H_{\text{liquido}}} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$\eta = \frac{Q_{\text{Semilla}}}{Q_{\text{Caldera}}} \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$\text{FlujoMásicoVapor} = \frac{\dot{m}}{\text{tiempo}} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Ejemplo: Se realizó para el kernel y con un peso de 24 kilos

$$Q_{\text{semilla}} = 24 \text{ kg} \times 30.1 \pm 0.80 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ \text{C}} \times (77 - 28)^\circ \text{C} = 35,397.6 \text{ KJ}$$

$$Q_{Caldera} = \frac{35,397.6KJ}{0.25} = 141,590.4 \text{ KJ}$$

$$m_{vapor} = \frac{141,590.4KJ}{(2720.7 - 548.858) \frac{KJ}{kg}} = 65.1936kgVapor$$

$$\dot{Q}_{Caldera} = \frac{141,590.4KJ}{2587.08S} = 54.729KJ / s$$

$$\dot{m} = \frac{65.1936Kg}{2587.2s} = 0.02519kgVapor / s$$

- **Porcentaje de flujo de vapor con que se trabajó con respecto del nominal**

$$FlujoMásico(\%) = \frac{FlujoOperación}{FlujoNominal} \times 100 \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$FlujoMásico(\%) = \frac{0.02519kgVapor / s}{\frac{125kg}{hora} \times \frac{1hora}{3600s}} \times 100 = 72.55\%$$

## 5. Determinación del balance de energía en el cocimiento

- **Energía suministrada por la caldera:**

La energía suministrada por la caldera se determinó encontrando el tiempo de cocimiento de la semilla dentro del recipiente que fue 43.12 min = 2587.08 s, la energía suministrada por la caldera en este tiempo fue de 141,590.4 KJ, entonces:

$$\dot{Q}_{Caldera} = \frac{Q_{entregado}}{tiempoCocimiento} \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$\dot{Q}_{Caldera} = \frac{141,590.4KJ}{2587.08S} = 54.729KJ / s$$

- **Energía entrante en el recipiente de cocimiento, 20 % de pérdidas del flujo por la fricción en tuberías PVC, codo de 90° y la llave de paso (Válvula de Compuerta semiabierta):**

$$\dot{Q}_{entradaCocimiento} = (1 - Pérdidas) \times Q_{Caldera} \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$\dot{Q}_{entradaCocimiento} = 0.80 \times 54.729KJ / s = 43.784KJ / s$$

- **Flujo de calor acumulado en el recipiente de cocimiento**

$$\dot{Q}_{Entregado} = \frac{Q_{absorbido\&nel}}{tiempo} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$\dot{Q}_{Entregado} = \frac{35,397.6KJ}{2,587.08s} = 13.682KJ / s$$

- **Calor de pérdidas en el recipiente de cocimiento, asumiendo un 26 % de pérdidas del calor entrante**

$$\dot{Q}_{Pérdidas} = 0.26 \times Q_{entradaCocimiento} \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$\dot{Q}_{P\acute{e}rdidas} = 0.26 \times 43.784 \text{ KJ} / \text{s} = 11.384 \text{ KJ} / \text{s}$$

- **Balance de energí para la salida del condensado**

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{Acumulado} + \dot{Q}_{P\acute{e}rdidas} + \dot{Q}_{SalidaCondensado} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Despejando  $\dot{Q}_{SalidaCondensado}$ ,

$$43.784 \text{ KJ} / \text{s} = 13.682 \text{ KJ} / \text{s} + 11.384 \text{ KJ} / \text{s} + \dot{Q}_{SalidaCondensado}$$

$$\dot{Q}_{SalidaCondensado} = 18.72 \text{ KJ} / \text{s}$$

## 6. Balance energético en el motor

- **Eficiencia del motor según capacidades nominales**

$$\eta_{motor} = \frac{\dot{W}_{SalidaNominal}}{\dot{Q}_{EntradaNominal}} \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$\eta_{motor} = \frac{12 \text{ hp} \times \frac{746 \text{ W}}{1 \text{ hp}}}{129,050 \frac{\text{Btu}}{\text{galón}} \times \frac{1 \text{ galón}}{3.785 \text{ L}} \times \frac{1.25 \text{ L}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ W}}{9.49 \times 10^{-4} \text{ Btu} / \text{s}}} = 0.7176$$

-  $\dot{Q}_{EntradaReal}$  **al motor Diesel**

$$\dot{Q}_{EntradaMotor} = 129,050 \frac{\text{Btu}}{\text{galón}} \times \frac{1 \text{ galón}}{3.785 \text{ L}} \times \frac{0.75 \text{ L}}{1 \text{ h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ W}}{9.49 \times 10^{-4} \text{ Btu} / \text{s}} = 7484.88 \text{ J} / \text{s}$$

-  $\dot{W}_{Salida}$  **real del motor**

$$0.7176 = \frac{\dot{W}_{SalidaReal}}{7484.88 \text{ J} / \text{s}}$$

Despejando se obtiene,

$$\dot{W}_{SalidaReal} = 5,371 \text{ J} / \text{s}$$

## 7. Rendimiento en la obtención de biodiesel con agitación en licuadora en la prueba 1

$$\text{Rendimiento} (\% p / p) = \frac{\text{PesoBiodiesel}}{\text{PesoAceite}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 21})$$

Entonces se obtuvo el siguiente valor

$$\text{Rendimiento} (\% p / p) = \frac{240 \pm 0.01 \text{ g}}{401.2 \pm 0.01 \text{ g}} \times 100 = 59.82 \pm 0.41 \%$$

## 8. Cálculo de la viscosidad en el viscosímetro de Cannon-Fenske

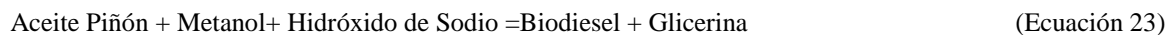
Se utilizó un equipo estandarizado, con una constante del sistema de 0.0329 (cSt/s), el tiempo del aceite en el equipo dio en promedio 1038.73 (s), dando el siguiente resultado

$$\text{Viscosidad cinemática} = t \times k_{\text{Sistema}} \quad (\text{Ecuación 22})$$

$$\text{Viscosidad cinemática} = 1038.73 \pm 0.05s \times 0.0329 \frac{cSt}{s} = 34.1743 \pm 0.0040cSt$$

### 9. Balance de masa para la producción de biodiesel

Se determinó el balance de masa para el proceso de transesterificación, mediante la siguiente ecuación



Para la producción con agitación con licuadora se obtuvieron los siguientes datos para la primera corrida  
 $401.2 \pm 0.01g \text{Aceite} + 9.41 \pm 0.01g \text{KOH} + 92.93 \pm 0.01g \text{Metanol} = 214.1 \pm 0.01g \text{Glicerina} + 240 \pm 0.01g \text{Biodiesel}$

### C. Datos Calculados

**Tabla 21 Porcentaje de humedad promedio del fruto de la muestra 1 de Cuyotenango al momento de recibirla**

Peso del fruto (g)	Humedad (%)
16.761 ±0.005	66.20 ±0.81
15.962 ±0.005	63.72 ±0.85
19.459 ±0.005	64.82 ±0.78
29.200 ±0.005	63.41 ±0.71
21.850 ±0.005	65.83 ±0.89
27.503 ±0.005	63.59 ±0.87
Humedad promedio (%)	<b>64.60 ±0.82</b>
Desviación estándar	<b>1.11 ±0.02</b>
Peso promedio fruto (g)	<b>21.789 ±0.32</b>

**Tabla 22 Composición promedio del fruto de la muestra 1 de Cuyotenango**

Composición promedio del fruto teniendo un 64.6 % de humedad		
Componentes	Gramos (g)	Datos en porcentaje (%)
Humedad	1171.26 ±5.21	64.60 ±0.82
Pulpa	428.52 ±2.12	23.63 ±0.33
Cáscara	74.45 ±0.92	4.11 ±0.21
Kernel	101.88 ±1.01	5.62 ±0.24
Aceite	36.99 ±0.41	2.04 ±0.11
<b>Total gramos</b>	<b>1813.1±0.89</b>	

**Tabla 23 Relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo de la muestra 1 de Cuyotenango**

Relación	g fruto seco/g de fruto húmedo
Relación	0.354 ±0.011

**Tabla 24 Composiciones promedio de extracciones hechas con hexano de la semilla, muestra 1 de Cuyotenango**

Número extracción	Componentes			
	Aceite (%)	Humedad (%)	Kernel (%)	Cáscara (%)
1	6.61 ±0.51	33.81 ±0.52	35.39 ±0.61	24.19 ±0.62
2	12.31 ±0.41	34.24 ±0.51	19.98 ±0.64	33.47 ±0.61
3	15.06 ±0.39	23.50 ±0.46	38.19 ±0.65	23.25 ±0.56
4	14.70 ±0.45	27.44 ±0.48	39.07 ±0.66	18.79 ±0.55
5	13.29 ±0.36	23.51 ±0.49	38.14 ±0.65	25.06 ±0.59
<b>Promedio</b>	<b>12.40 ±0.52</b>	<b>28.50 ±0.51</b>	<b>34.15 ±0.66</b>	<b>24.95 ±0.58</b>
Desviación estándar	0.030 ±0.001	0.050±0.002	0.080 ±0.003	0.050 ±0.002

**Tabla 25 Datos de valor de acidez del aceite obtenido a nivel de laboratorio de la muestra 1 de Cuyotenango**

Número de prueba	Valor de acidez (%)
1	5.25 ±0.22
2	4.86 ±0.18
3	5.52 ±0.31
Promedio	5.21 ±0.25
Desviación estándar	0.332±0.04

**Tabla 26 Porcentaje de humedad promedio de los frutos húmedos de la única muestra de Cuilco**

Peso del fruto (g)	Humedad (%)
5.750 ±0.015	51.77 ±0.83
5.341 ±0.035	43.50 ±0.82
4.875 ±0.017	35.70 ±0.53
4.530 ±0.005	27.40 ±0.31
5.890 ±0.014	55.78 ±0.85
5.010 ±0.016	36.50 ±0.82
<b>Humedad promedio (%)</b>	<b>41.78 ±0.72</b>

Continuación Tabla 26

<b>Desviación estándar</b>	<b>10.68 ±0.45</b>
<b>Peso promedio del fruto (g)</b>	<b>5.233 ±0.72</b>

**Tabla 27 Composición promedio de los frutos de la única muestra de Cuilco**

<b>Composición promedio del fruto de Cuilco con 41.68% de humedad</b>		
<b>Componente</b>	<b>Muestra (lbs)</b>	<b>Porcentaje promedio de los componentes</b>
Humedad	67.57 ±0.81	41.97±0.53
Pulpa o cáscara de fruto	31.85 ±0.34	19.78 ±0.29
Cáscara de semilla	28.00 ±0.32	17.39±0.28
Kernel	23.00 ±0.28	14.29±0.22
Aceite	10.58 ±0.23	6.57 ±0.19
Libras totales	161.00 ±1.32	

**Tabla 28 Relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo de la muestra de Cuilco**

<b>Relación</b>	<b>g fruto seco/g de fruto húmedo</b>
Relación	0.5803 ±0.1221

**Tabla 29 Composiciones promedio de las extracciones de semilla de la única muestra de Cuilco**

<b>Número extracción</b>	<b>Componentes</b>			
	<b>Aceite (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Kernel (%)</b>	<b>Cáscara (%)</b>
1	21.88 ±0.45	11.44 ±0.31	24.48 ±0.35	42.21 ±0.53
2	24.15 ±0.49	10.66 ±0.27	25.39 ±0.31	39.80 ±0.42
3	28.80 ±0.41	10.52 ±0.21	21.45 ±0.22	39.23 ±0.39
<b>Promedio</b>	<b>24.94 ±0.51</b>	<b>10.87 ±0.31</b>	<b>23.77 ±0.27</b>	<b>40.41 ±0.48</b>
Desviación estándar	0.040 ±0.003	0.005 ±0.001	0.020 ±0.002	0.020 ±0.001

**Tabla 30 Densidad aparente a granel promedio de la única semilla de Cuilco**

Densidad en lb/L	0.764±0.112
Densidad en lb/pie <sup>3</sup>	21.629±1.251
Densidad en kg/m <sup>3</sup>	346.640±7.141

**Tabla 31 Composiciones promedio de extracciones de la semilla de la muestra 2 de Cuyotenango**

Número extracción	Componentes			
	Aceite (%)	Humedad (%)	Kernel (%)	Cáscara (%)
1	29.45 ±0.45	11.28 ±0.32	30.03±0.42	29.25±0.49
2	32.79 ±0.49	12.50 ±0.26	23.78±0.36	30.93±0.43
3	36.19 ±0.41	9.07 ±0.27	20.88±0.25	33.86±0.44
4	35.92 ±0.43	7.78 ±0.25	24.05±0.38	32.25±0.48
<b>Promedio</b>	<b>33.59 ±0.51</b>	<b>10.16 ±0.34</b>	<b>24.69±0.39</b>	<b>31.57±0.55</b>
Desviación estándar	0.030 ±0.001	0.020 ±0.001	0.040 ±0.002	0.020 ±0.001

**Tabla 32 Cromatografía de gases de las cadenas de ácidos grasos de los aceites estándares**

Componentes más representativos	Tiempo de retención (min)	Anchura (min)	Altura (pA)	Área (%)
Ácido Esteárico	6.1400	0.0407	539.6886	4.4825
Acido Oleico	7.7760	0.0758	4182.7930	73.2986
Acido Linoleico	7.8900	0.0410	434.1326	3.6470

**Tabla 33 Cromatografía de gases de las cadenas de ácidos grasos del aceite extraído de la muestra 2 de Cuyotenango**

Componentes más representativos	Tiempo de retención (T, min)	Anchura (min)	Altura (pA)	Área (%)	Porcentaje de error con respecto a tiempo de retención estándar
Ácido Esteárico	6.1725	0.0440	1742.7902	11.5397	0.53
Acido Oleico	7.7905	0.0898	4343.5667	66.7537	0.19
Acido Linoleico	7.9215	0.0428	1248.7398	7.4525	0.40

**Tabla 34 Composición de lo tipos de ácidos grasos que se encuentran el aceite de jatropha tomados de la muestra 2 de Cuyotenango**

Composición de las cadenas de ácidos grasos del fruto del piñón	
Componentes	Composición (%)
Ácido Esteárico	13.46 ±0.28
Acido Oleico	77.85 ±0.76
Acido Linoleico	8.69 ±0.15

**Tabla 35 Datos de valor de acidez del aceite obtenido a nivel de laboratorio de la muestra 2 de Cuyotenango**

Número de prueba	Valor de acidez (%)
1	3.04 ±0.21
2	3.72 ±0.26
3	3.52 ±0.24
Promedio	3.42 ±0.25
Desviación estándar	0.35 ±0.02

**Tabla 36 Valores de densidades en g/mL a diferentes temperaturas del biodiesel obtenido de la muestra 2 de Cuyotenango**

Temperaturas (°C)	Densidades g/mL
15	0.907 ±0.02
20	0.906 ±0.02
25	0.906 ±0.02
30	0.900 ±0.02
40	0.898 ±0.02
Promedio	0.903 ±0.02
Desviación estándar	0.004 ±0.001

**Tabla 37 Medidas en el viscosímetro de Brookfield, modelo CAP-2000, del biodiesel obtenido de la muestra 2 de Cuyotenango**

T (°C)	kg/m*s	mm <sup>2</sup> /s (cSt)
15	0.0143 ±0.0021	15.7877 ±0.2811
20	0.0118 ±0.0017	13.0179 ±0.3114
25	0.0100 ±0.0015	11.0791 ±0.2729
30	0.0085 ±0.0011	9.4172 ±0.4021
35	0.0067 ±0.0009	7.3860 ±0.1130
40	0.0063 ±0.0008	7.0167 ±0.1121
45	0.0060 ±0.0010	6.6474 ±0.1921

**Tabla 38 Rendimientos obtenidos del biodiesel a nivel laboratorio a partir de la muestra 2 de Cuyotenango**

Número de prueba	Rendimiento (%)
1	47.6 ±0.56
2	49.82 ±0.58
Promedio	48.71 ±0.54
Desviación estándar	1.57 ±0.05

**Tabla 39 Capacidad calorífica medida para el biodiesel obtenido a escala de laboratorio de la muestra 2 de Cuyotenango**

	Valores
Capacidad en MJ/Kg	39.78
Capacidad en Kcal/kg	9501
Capacidad en Btu/lb	17101

**Tabla 40 Composición en porcentaje de la semilla y cáscara de fruto de la muestra 3 de Cuyotenango**

Corrida	Cáscara fruto (%)	Semilla (%)
1	26.90 ±0.31	73.10 ±0.67
2	28.49 ±0.34	71.51 ±0.64
3	27.04 ±0.30	72.96 ±0.65
4	33.40 ±0.35	66.60 ±0.61
<b>Promedio</b>	<b>28.96 ±0.33</b>	<b>71.04 ±0.62</b>
Desviación	0.0305 ±0.0001	0.0305 ±0.0002

**Tabla 41 Composición completa del fruto de la muestra 3 de Cuyotenango**

Distribución de pesos por fruto		
Tipo de componente	Gramos (g)	Composición (%)
Kernel	108.70 ±1.01	8.59 ±0.21
Humedad	193.75 ±1.05	15.31±0.25
Cáscara semilla	150.51 ±1.03	11.89 ±0.23
Cáscara fruto	699.72 ±1.95	55.29 ±0.46
Aceite	112.88 ±1.15	8.92 ±0.19
Peso total muestra	1265.56 ±3.24	

**Tabla 42 Relación de gramos de fruto seco/g de fruto húmedo de la muestra 3 de Cuyotenango**

Relación	g fruto seco/g de fruto húmedo
Relación	0.847 ±0.114

**Tabla 43 Componentes promedio de la semilla, muestra 3 de Cuyotenango**

Número extracción	Componentes			
	Aceite (%)	Humedad (%)	Kernel (%)	Cáscara (%)
1	26.56 ±0.46	11.29 ±0.26	26.74 ±0.45	35.41 ±0.47
2	26.86 ±0.47	11.36 ±0.27	26.10 ±0.43	35.67 ±0.43
3	27.26 ±0.46	11.23 ±0.25	26.37 ±0.42	35.14 ±0.41
<b>Promedio</b>	<b>26.89 ±0.48</b>	<b>11.29 ±0.26</b>	<b>26.41 ±0.44</b>	<b>35.41 ±0.47</b>
Desviación estándar	0.0035 ±0.0005	0.0007 ±0.0001	0.0032 ±0.0003	0.0027 ±0.0002

**Tabla 44 Comparación entre los pesos promedio de la semilla de Cuilco y la muestra 3 Cuyotenango**

	Muestra de Cuilco	Muestra 3 Cuyotenango
Peso promedio por grano de semilla (g)	0.444 ± 0.013	0.972 ± 0.029

**Tabla 45 Costos para realizar una extracción de aceite de la semilla de Jatropha Criolla con hexano y el equipo Soxlet en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala**

Rubros	Quetzales (Q)
Hexano (100 mL de pérdida en cada extracción)	1.32
Semilla (100 gramos en cada extracción)	0.11
Agua (5 horas) Q.3.33/m <sup>3</sup>	0.043
Energía Eléctrica (Secador Bandejas), 5-6 horas de secado, 28 % a 8 %, 48-53 °C. Q.1.36kW/h.	173.31
Total por extracción	174.38

**Tabla 46 Costo para la producción de biodiesel a escala laboratorio a partir de un galón del aceite de Jatropha Criolla**

Componente	Q
Aceite (galón)	57.88
Metanol (Grado Industrial), Q 33/galón	8.69
KOH (Grado industrial, 56 % pureza),	4.28
Costo total	70.85

**Tabla 47 Balance de masa en decortadora para la corrida con fruto completo de la muestra 3 de Cuyotenango**

Entradas	Cantidad (kg)	Salidas	Cantidad (kg)	Peso (%)
Fruto	135.17±1.23	Cáscara del fruto	72.69 ±1.56	53.78
		Semilla	55.72 ±1.21	41.22
		Pérdidas	6.76 ±0.65	5.00

**Tabla 48 Balance de masa global de las corridas hechas el primer día de extracción en la Planta Piloto a partir de la muestra 3 de Cuyotenango y de Cuilco**

Entradas	Cantidad	Salidas	Cantidad	Peso (%)
Semilla Cuyotenango (kg)	33.28 ±0.81	Torta (kg)	63.39 ±1.34	79.26
Semilla de Cuilco (kg)	40.1 ±0.76	Residuos en el aceite (kg)	1.20 ±0.31	1.50

Continuación Tabla 48

Semilla total (kg)	73.38 ±0.87	Pérdidas (kg)	5.78 ±0.58	7.22
Agua ganada por semilla (kg)	6.60 ±0.52	Aceite+ agua ganada (kg)	3.01 ±0.23	3.76

**Tabla 49 Cantidad de aceite sin sedimentos, impurezas del aceite obtenido el primer día de extracción en la planta extractora a partir de las semillas completas de Cuilco y la semilla decortificada de la muestra 3 de Cuyotenango**

Componente	Cantidad
Aceite obtenido sin impurezas (L)	2.73 ±0.18
Impurezas totales por 2.73 L (kg)	1.20 ±0.11
Impurezas por aceite (Kg/L)	0.44 ±0.02

**Tabla 50 Balance de masa en decortificadora utilizando la semilla decortificada del fruto de la muestra 3 de Cuyotenango el segundo día de extracción en Planta Piloto**

Entradas	Cantidad (kg)	Salidas	Cantidad (kg)	Peso (%)
Semilla de entrada	22.45±0.76	kernel (kg)	15.92 ±0.46	70.91
		Cascarilla (kg)	4.92 ±0.36	21.93
		Pérdidas (kg)	1.61 ±0.18	7.16

**Tabla 51 Balance de masa global en expeller del segundo día de extracción en Planta Piloto utilizando kernel de la semilla 3 de Cuyotenango**

Entradas	Cantidad (kg)	Salidas	Cantidad (kg)	Peso (%)
Semilla Decortificada (kernel)	15.92	Torta	6.59	39.06
Agua ganada por semilla	0.96	Aceite +agua ganada	4.91	29.08
		Pérdidas	3.88	22.97
		Residuos en aceite	1.50	8.89

**Tabla 52 Balance de energía en el motor diesel para el primer y segundo día de extracción en Cuyotenango**

Entradas (KJ/s)	Salidas (KJ/s)
7.485 ± 0.84	5.371± 0.71

**Tabla 53 Balance de energía en el recipiente de cocimiento, corrida con capacidad máxima, 24 kilos de semilla**

$Q_{\text{entrada}}$ (kJ/s)	$Q_{\text{Acumulado}}$ (kJ/s)	$Q_{\text{pérdida}}$ (kJ/s)	$Q_{\text{Salida}}$ (kJ/s)
43.784 $\pm$ 0.410	10.946 $\pm$ 0.140	11.384 $\pm$ 0.11	21.454 $\pm$ 0.190

**Tabla 54 Cantidad total de aceite sin sedimentos, impurezas del aceite y kg impurezas por L de aceites obtenidos a partir de 15.92  $\pm$ 0.78 kg de kernel obtenidos del fruto de la Muestra 3 de Cuyotenango el segundo día de extracción**

Componente	Cantidad
Aceite obtenido sin impurezas (L)	5.41 $\pm$ 0.29
Impurezas totales por 5.41 L (kg)	1.50 $\pm$ 0.02
Kg impurezas por L aceite	0.28 $\pm$ 0.05

**Tabla 55 Caracterización del biodiesel obtenido del aceite extraído en Planta Piloto de Cuyotenango**

Descripción de la prueba	Método de Análisis	Resultados
Punto de inflamabilidad, °C	ASTM-D-93	78
Calor de combustión Superior, MJ/Kg	ASTM-D240	39.16
Gravedad API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287	29
Gravedad específica, 15.56 °C	ASTM D-287	0.8822
Viscosidad cinemática, 40 °C, mm <sup>2</sup> /s	ASTM D-445	4.6
Densidad, 15 °C, kg/m <sup>3</sup>	ASTM-D-1298	882
Agua y sedimento, % volumen	ASTM D-1796	<0.05

**Tabla 56 Costos para procesar un 1 quintal, tipo batch, de fruto de Jatropha Criolla en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango en función de los dos días de extracción en Planta Piloto**

Costo por procesar 100 lb de fruto	Q
hora-hombre para cocimiento y extracción	4.60
hora-hombre para decorticar	7.34
Diesel	5.51

Continuación Tabla 56

Fruto	50.00
Costo total	67.45

**Tabla 57 Resumen de costos y producción, tipo batch, por quintal de fruto procesado de Jatropha Criolla, Muestra 3 de Cuyotenango, en función de los días de extracción en Planta Piloto**

Resumen de costos y producción	Cantidad
Costo del galón de aceite (Q)	60.05
Costo por kg de fruto procesado (Q)	1.49
L aceite/100 libras fruto	4.25
Galones aceite/100 libras fruto	1.12
Costo por 100 libras de fruto (Q)	50.00
Costo por procesar 100 libras Fruto (Q)	67.45

**Tabla 58 Resumen de costos y producción en tipo batch a capacidad máxima del Expeller, 24 kilos de kernel y por 82.10 kg de fruto procesado de Jatropha Criolla, muestra 3 de Cuyotenango en función de los dos días de extracción en Planta Piloto**

Detalle de costos por procesar 82.10 kg de fruto	Q
hora-hombre para cocimiento y extracción	8.32
hora-hombre para decorticar	13.29
Diesel	9.96
Fruto	90.50
Costo total	122.07

**Tabla 59 Producción de aceite en tipo batch a capacidad máxima del Expeller, 24 kilos de kernel y por 82.10 kg de fruto procesado de Jatropha Criolla, muestra 3 de Cuyotenango, en función de los dos días de extracción en Planta Piloto**

Producción de aceite por 82.10 kg fruto	
kg aceite	6.98
L aceite	7.70
Galones	2.03

**Tabla 60 Rendimiento del biodiesel del aceite obtenido en Planta Piloto con agitación moderada**

No. Prueba	Aceite (g)	Glicerina (g)	Biodiesel (g)	Rendimiento (%)
1	400 ±0.01	333.8 ±0.01	97.4 ±0.01	24.35 ±0.30
2	400.1 ±0.01	289.8 ±0.01	107.3 ±0.01	26.82 ±0.34
Promedio	400.05 ±0.01	311.8 ±0.01	102.35 ±0.01	25.58 ±0.29
Desviación estándar	0.0707 ±0.0102	31.1127 ±0.0110	7.0004 ±0.9121	0.0175 ±0.0101

**Tabla 61 Rendimiento del biodiesel del aceite obtenido en Planta Piloto con agitación en licuadora**

No. Prueba	Aceite (g)	Glicerina (g)	Biodiesel (g)	Rendimiento (%)
1	401.2 ±0.01	214.1 ±0.01	240 ±0.01	59.82 ±0.41
2	402.8 ±0.01	199.1 ±0.01	254.9 ±0.01	63.28 ±0.45
Promedio	402 ±0.01	206.6 ±0.01	247.45 ±0.01	61.55±0.43
Desviación estándar	1.1314 ±0.6101	10.6066 ±1.5211	10.5359 ±1.5111	0.0245 ±0.0101

**Tabla 62 Valores de densidad del aceite después de clarificado y centrifugado a temperaturas de 23.5, 32 y 40 °C del aceite obtenido a nivel de Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango**

No. Prueba	Densidad a 23.5 °C (g/mL)	Densidad a 32 °C (g/mL)	Densidad 40 °C (g/mL)
1	0.933 ± 0.031	0.927 ± 0.031	0.925 ± 0.021
2	0.924 ± 0.027	0.924 ± 0.027	0.924 ± 0.027
3	0.927 ± 0.025	0.924 ± 0.025	0.920 ± 0.026
Promedio	0.928 ± 0.025	0.925 ± 0.025	0.923 ± 0.028
Desv. Estándar	0.005 ± 0.001	0.002 ± 0.002	0.002 ± 0.002

**Tabla 63 Prueba de Prensado de los sedimentos del aceite obtenidos en Planta Piloto y extracción con solventes de la torta obtenida, muestra 3 de Cuyotenango**

Componentes	Cantidad
Residuos del aceite (mL)	2450.00±1.01
Aceite extraído con prensa (mL)	1350.00 ±1.01
Recuperación (% v/v)	55
Recuperación con solventes (% p/p)	4.35

**Tabla 64 Recuperación total de aceite de los sedimentos obtenidos en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango**

Residuos iniciales del aceite	2450.00±1.01
mL totales Recuperados (Solventes más prensado)	1469.16 ±0.95
Recuperación con Solventes (% v/v)	4.97
Recuperación total (%)	59.97

**Tabla 65 Recuperación total de aceite de los sedimentos obtenidos en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango**

Residuos iniciales del aceite (mL)	2450.00±1.01
mL totales recuperados (Solventes más prensado)	1469.16 ±0.95
Recuperación con Solventes (% v/v)	4.97
Recuperación total (%)	59.97

**Tabla 66 Densidades del aceite obtenido a nivel de Planta Piloto antes y después de prensado de la muestra 3 de Cuyotenango**

	(g/mL)
Densidad aceite después prensado	0.99 ±0.07
Densidad antes de prensado	1.17 ±0.11

**Tabla 67 Porcentaje de los valores de ácidos grasos libres en el aceite, (FFA, free faty acid), obtenido en Planta Piloto, muestra 3 de Cuyotenango.**

No. Prueba	% FFA
1	4.57 ± 0.22
2	4.72 ± 0.25
3	4.67 ± 0.21
Promedio	4.65 ± 0.23
Desviación estándar	0.081 ± 0.001

**Tabla 68 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, 50 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango**

Temperatura (°C)	Velocidad r.p.m	Centipoises (cP)	Cinemática (cSt)
26.5 ±0.01	50	15.41	17.12 ± 0.74
37.5 ±0.01	50	14.21	15.79 ± 0.62
50 ±0.01	50	13.52	15.02 ± 0.58
60 ±0.01	50	12.97	14.41 ± 0.51

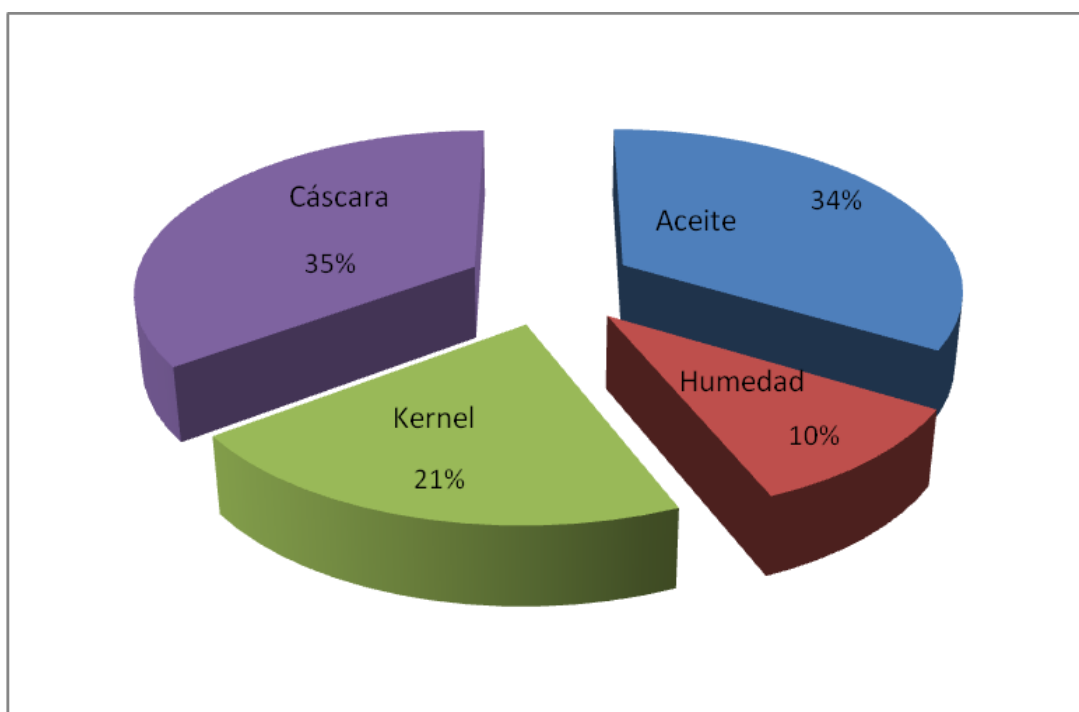
**Tabla 69 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, 60 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango**

Temperatura (°C)	Velocidad r.p.m	Centipoises (cP)	Cinemática (cSt)
26.5 ±0.01	60	14.07	15.63 ± 0.74
37.5 ±0.01	60	13.03	14.48 ± 0.62
50 ±0.01	60	12.46	13.84 ± 0.58
60 ±0.01	60	11.81	13.12 ± 0.51

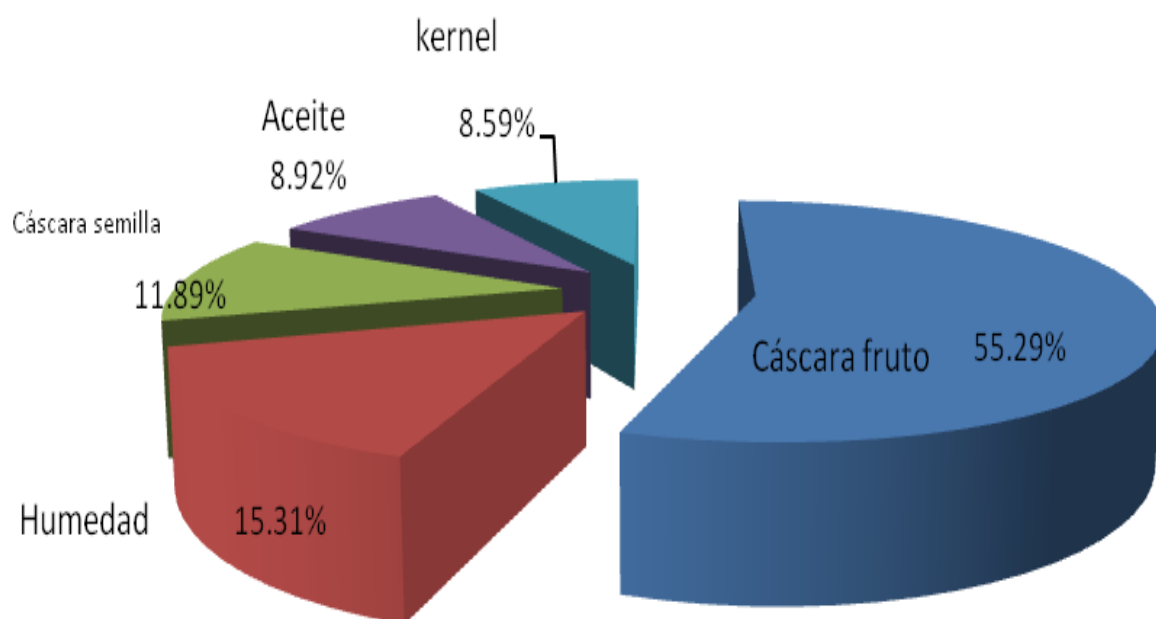
**Tabla 70 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Cannon-Fenske, muestra 3 de Cuyotenango**

	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3	Promedio	Desviación Estándar
Temperatura (°C)	40	40	40	40	
Constante del Sistema (cSt/s)	0.0329	0.0329	0.0329	0.0329	
Tiempo en el Sistema (s)	1038.74 ±0.05	1038.72 ±0.05	1038.74 ±0.05	1038.73 ±0.05	0.0115 ±0.0002
Viscosidad (cSt)	34.1745 ±0.0030	34.1739 ±0.0030	34.1745 ±0.003	34.1743 ±0.004	0.00038±0.00009

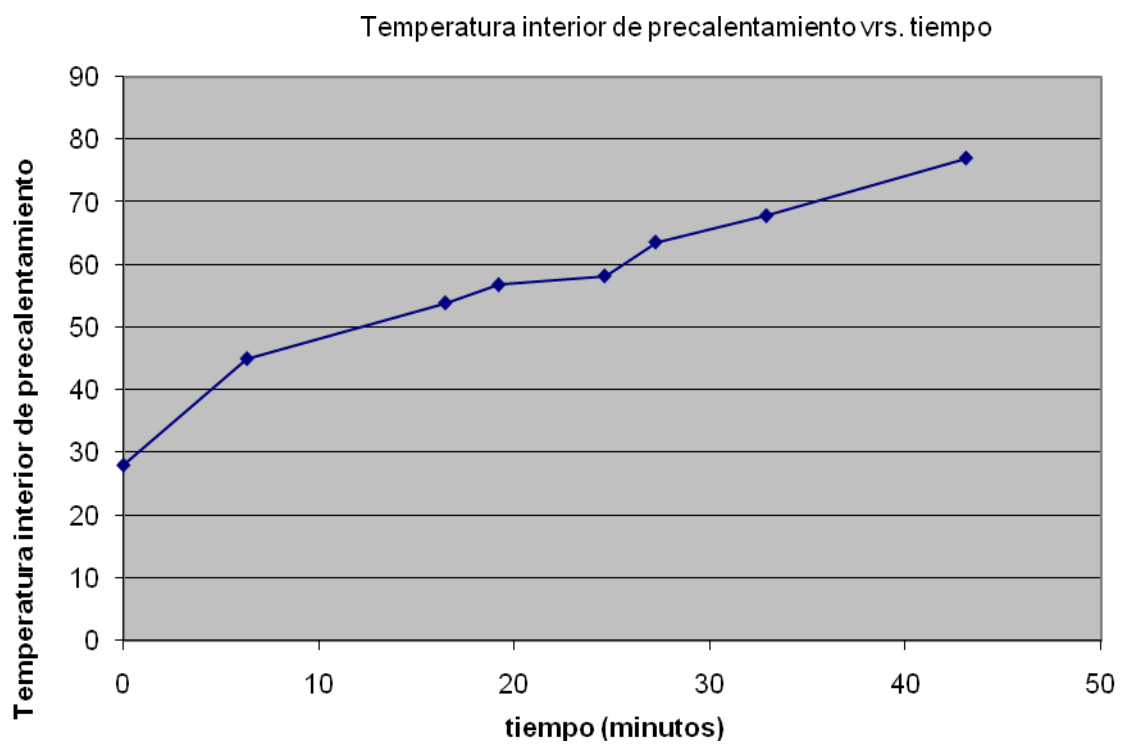
**Gráfica 1 Composición de la semilla donde se obtuvo el máximo rendimiento, muestra 2 de Cuyotenango**



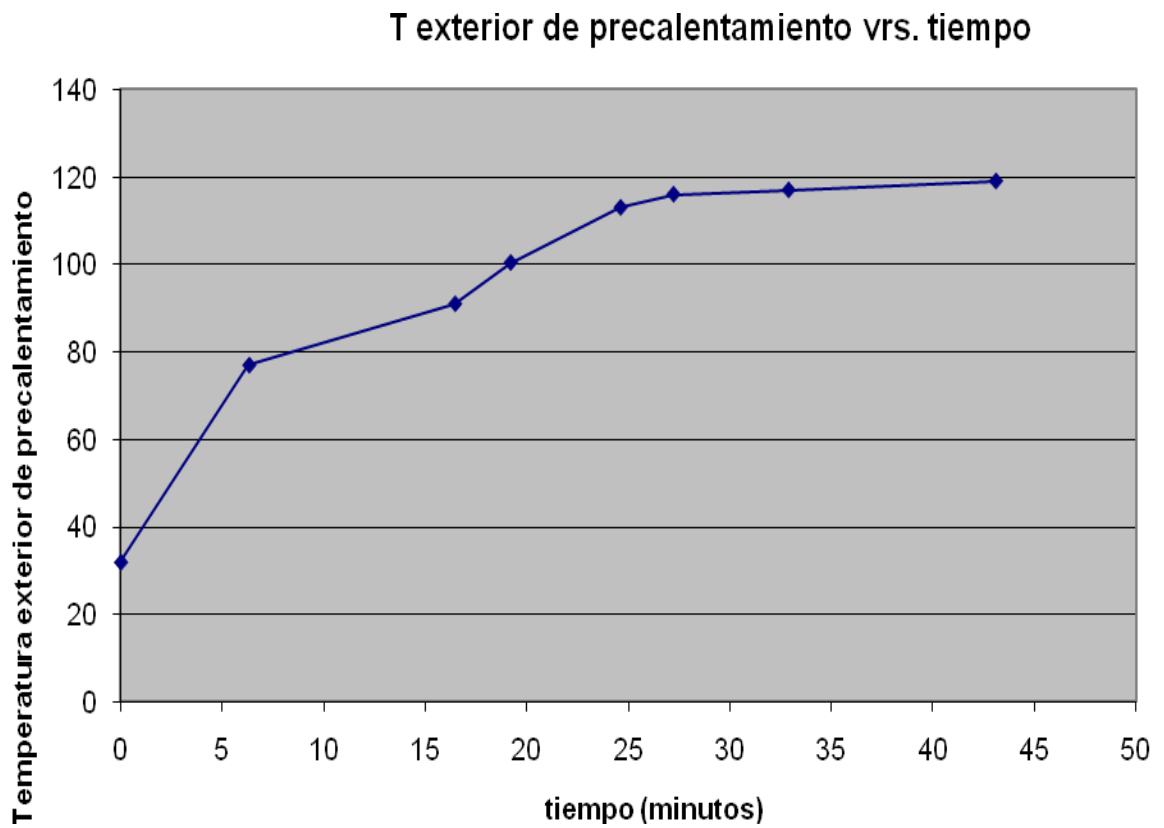
**Gráfica 2 Composición del fruto donde se obtuvo el máximo rendimiento, muestra 3 de Cuyotenango**



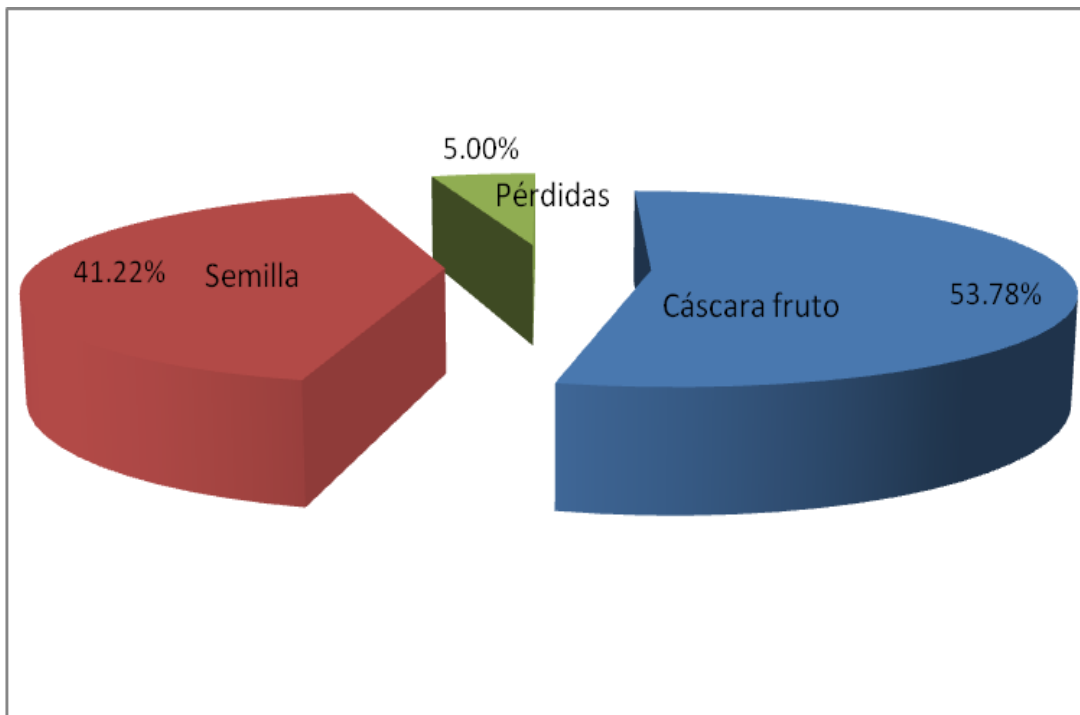
**Gráfica 3 Temperaturas del interior del recipiente en función del tiempo de cocimiento al realizar la corrida con semilla entera (kernel+ cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco el primer día de extracción en la Planta Piloto**



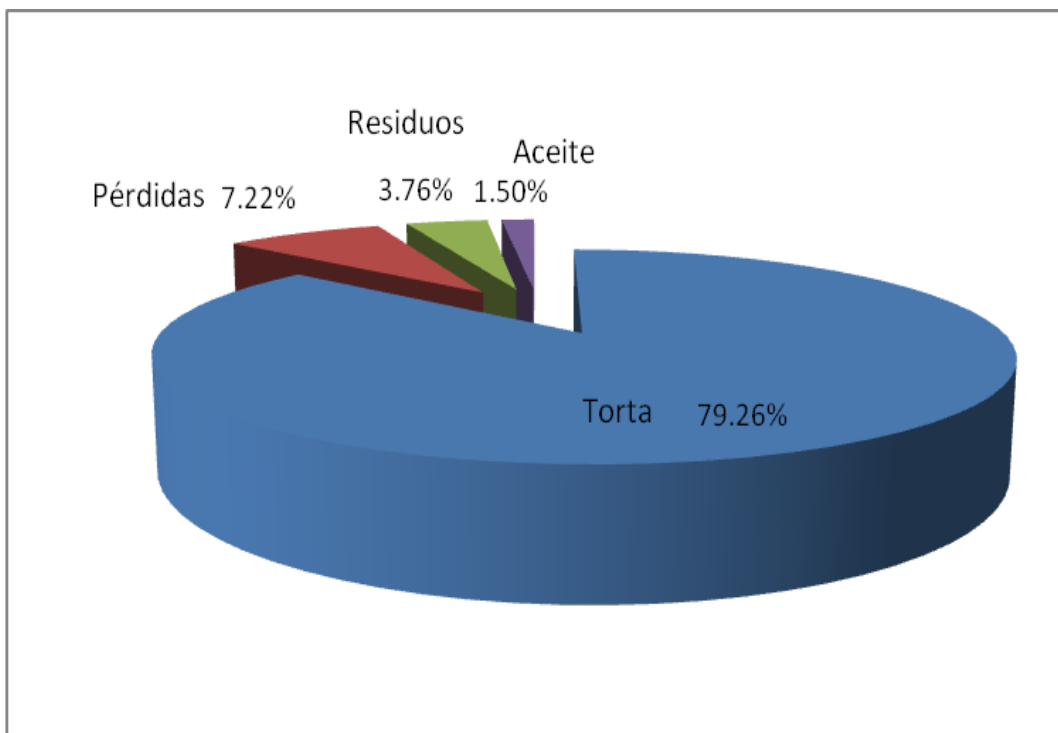
**Gráfica 4** Temperaturas del exterior del recipiente de cocimiento en función del tiempo al realizar la corrida con semilla entera (kernel+cáscara de semilla) de la muestra de Cuilco el primer día de extracción en la planta piloto



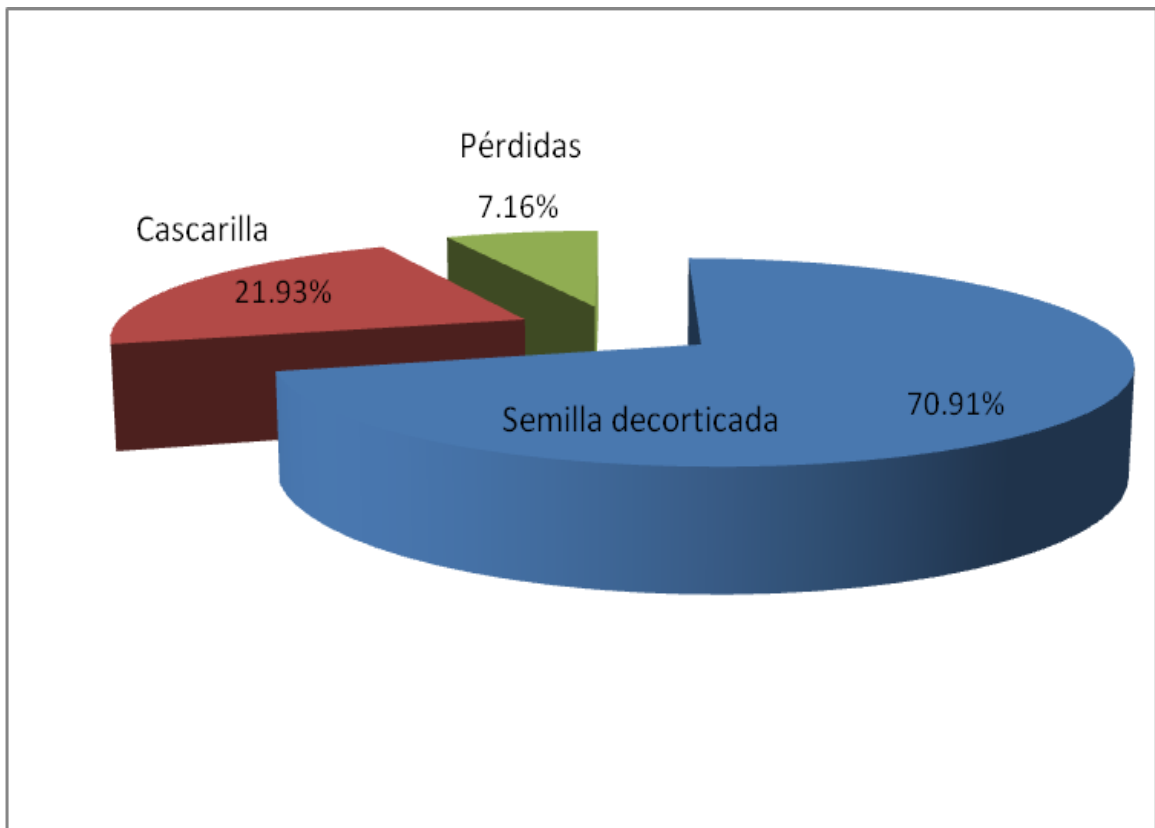
**Gráfica 5** Porcentaje en peso de los componentes que se obtuvieron de la decortadora para la corrida con fruto completo de la muestra 3 de Cuyotenango el primer día de extracción en Planta Piloto



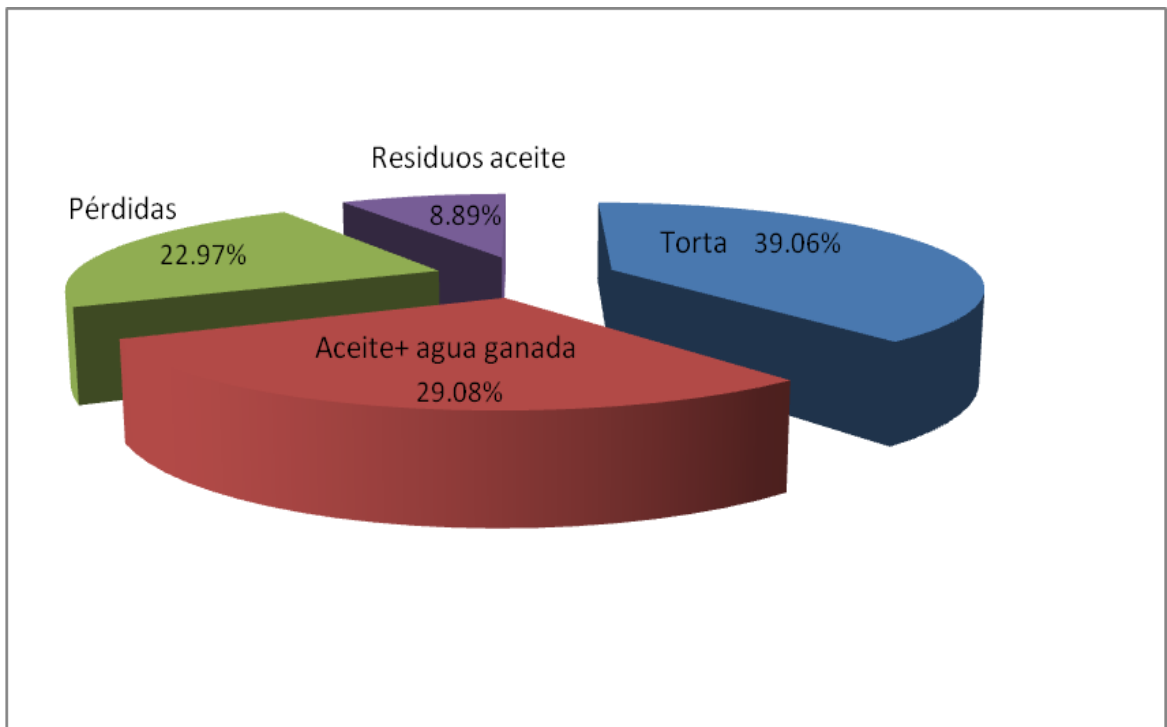
**Gráfica 6** Porcentajes totales que se obtuvieron en las salidas del expeller de las corridas hechas el primer día de extracción en la Planta Piloto a partir de la muestra 3 de Cuyotenango y la de Cuilco



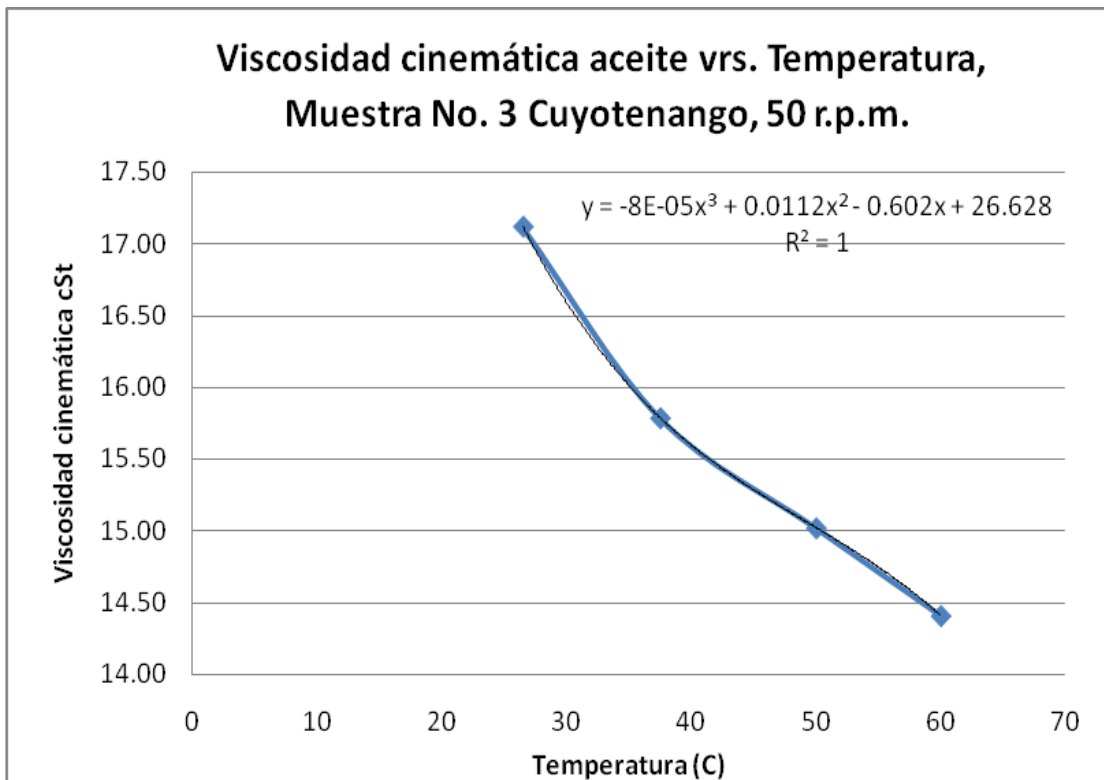
**Gráfica 7** Porcentaje en peso del total de los componentes obtenidos de la decortadora del segundo día de extracción en Planta Piloto utilizando la semilla decorticada del fruto de la muestra 3 de Cuyotenango



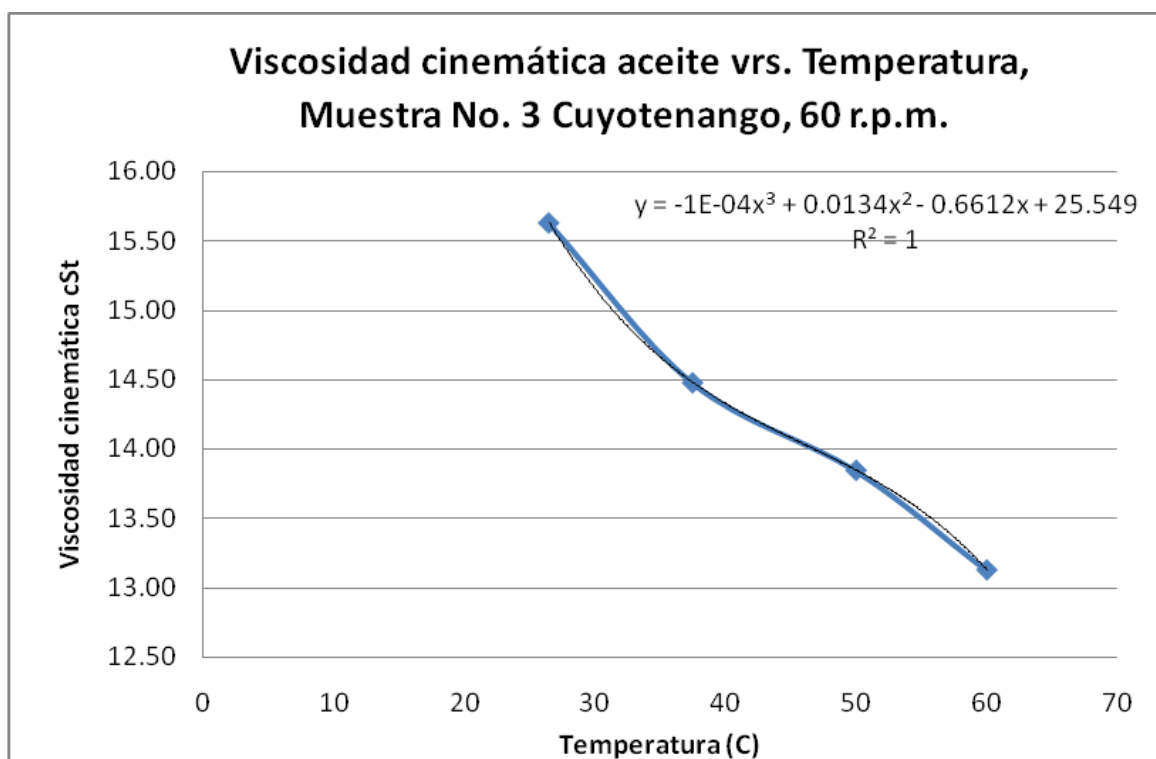
**Gráfica 8** Porcentaje en peso de las salidas de los componentes obtenidos del Expeller el segundo día de extracción en Planta Piloto utilizando kernel de la semilla 3 de Cuyotenango



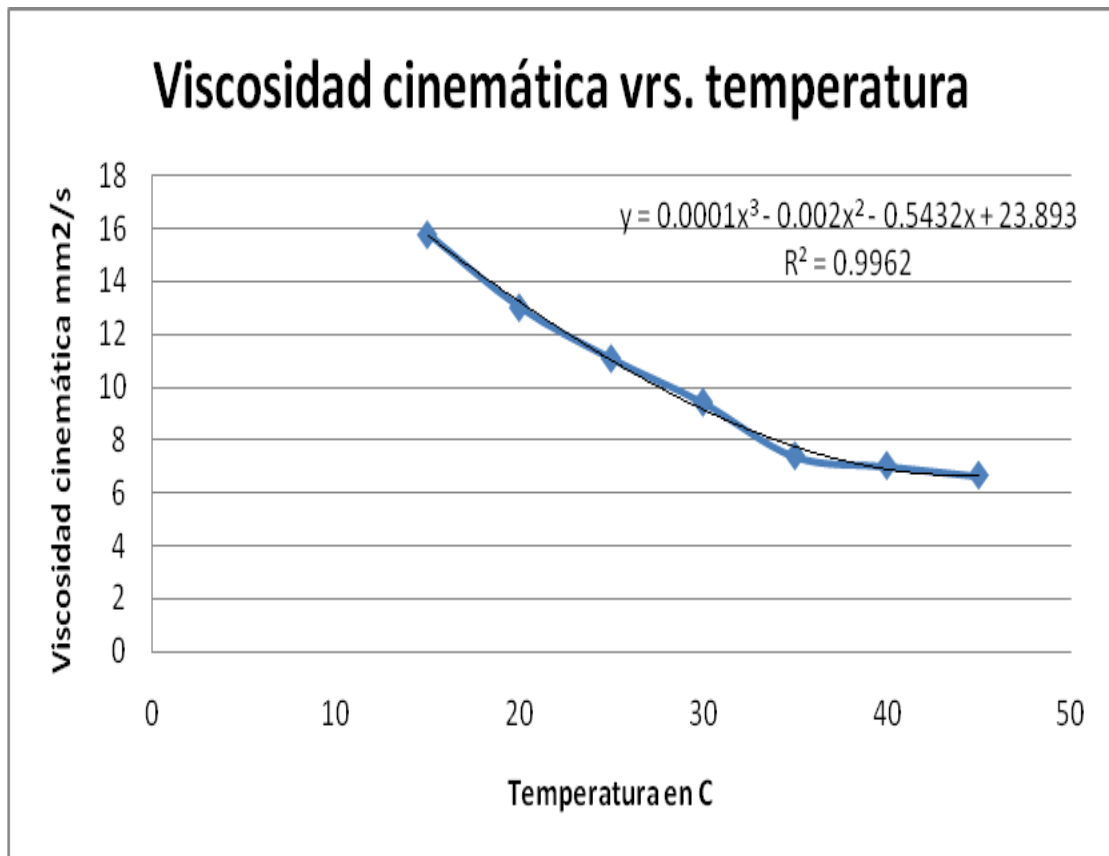
**Gráfica 9 Viscosidad del aceite en cSt vs. Temperatura (oC) obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, modelo DV-E, 50 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango**



Gráfica 10 Viscosidad del aceite obtenido en Planta Piloto utilizando el viscosímetro de Brookfield, modelo DV-E, 60 r.p.m., muestra 3 de Cuyotenango



Gráfica 11 Valores de la viscosidad del biodiesel obtenido del aceite extraído con hexano de la muestra 2 de Cuyotenango



**Figura 13 Capacidad calorífica del biodiesel obtenido a partir del aceite de piñón extraído con hexano**

<b>LABORATORIO TECNICO</b>	<b>MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS GUATEMALA C. A.</b>	PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-609-09 ORDEN No. L-291-09 GUATEMALA, 27-05-09	
<b>RESULTADOS DE ANALISIS</b>			
<p>MUESTRA: <b>Biodiesel</b>          PRESENTADA POR: Ramiro Cifuentes de León          RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ramiro Cifuentes de León          PROCEDENCIA: Ramiro Cifuentes de León          LOCALIZACION: 10 Calle 35-56, Zona 11, Las Charcas, Guatemala          FECHA DE MUESTREO: Desconocida          FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 21-05-09          FECHA DE ANALISIS: del 26 al 27-05-09          PRECIO DE ANALISIS: \$ 12.00          ANALISTA: Roderico Zapeta</p>			
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/kg	ASTM D-240	Mínimo: 40 (d)	(e) 39.78
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 265-2008 no existen especificaciones para este producto          b) El resultado es válido solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio          c) 39.78 MJ/Kg es equivalente a 9501 Kcal/Kg y a 17101 Btu/Lb.</p>			

**Figura 14 Caracterización del biodiesel obtenido del aceite de piñón extraído en Planta Piloto**

<b>LABORATORIO TECNICO</b>	<b>MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS GUATEMALA C. A.</b>	PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-1107-09 ORDEN No. L-534-09 GUATEMALA, 08-10-09	
<b>RESULTADOS DE ANALISIS</b>			
<p>MUESTRA: <b>Biodiesel</b>  PRESENTADA POR: Ramiro Cifuentes  RESPONSABLE DEL MUESTREO: Ramiro Cifuentes  PROCEDENCIA: Ramiro Cifuentes. Muestra Jatropha UVG  LOCALIZACION: Universidad del Valle de Guatemala  FECHA DE MUESTREO: Desconocida  FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 02-10-09  FECHA DE ANALISIS: del 05 al 10-10-09  PRECIO DE ANALISIS: \$ 42.00  ANALISTAS: Edgar Sandoval</p>			
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION (a)	RESULTADOS (b)
PUNTO DE INFLAMABILIDAD, °C	ASTM D-93		78
CALOR DE COMBUSTION SUPERIOR, MJ/Kg	ASTM D-240		(d) 39.16
GRAVEDAD API, 15.56 °C, °API	ASTM D-287		29.0
GRAVEDAD ESPECIFICA, 15.56°C	ASTM D-287		0.8822
VISCOSIDAD CINEMATICA, 40 °C, mm <sup>2</sup> /s (c)	ASTM D-445		4.6
DENSIDAD, 15 °C, Kg/m <sup>3</sup>	ASTM D-1298		882
AGUA Y SEDIMENTO, % volumen	ASTM D-1796		<0.05
<p><b>OBSERVACIONES:</b></p> <p>a) En el Acuerdo Ministerial No. 265-2008 no existen especificaciones para este producto  b) Los resultados son válidos solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio  c) 1 mm<sup>2</sup> /s es equivalente a 1 cSt  d) 39.16 MJ/Kg es equivalente a 9354 Kcal/Kg y a 16838 BTU/lb</p>			



Figura 15 Balance de masa con respecto al segundo día de extracción

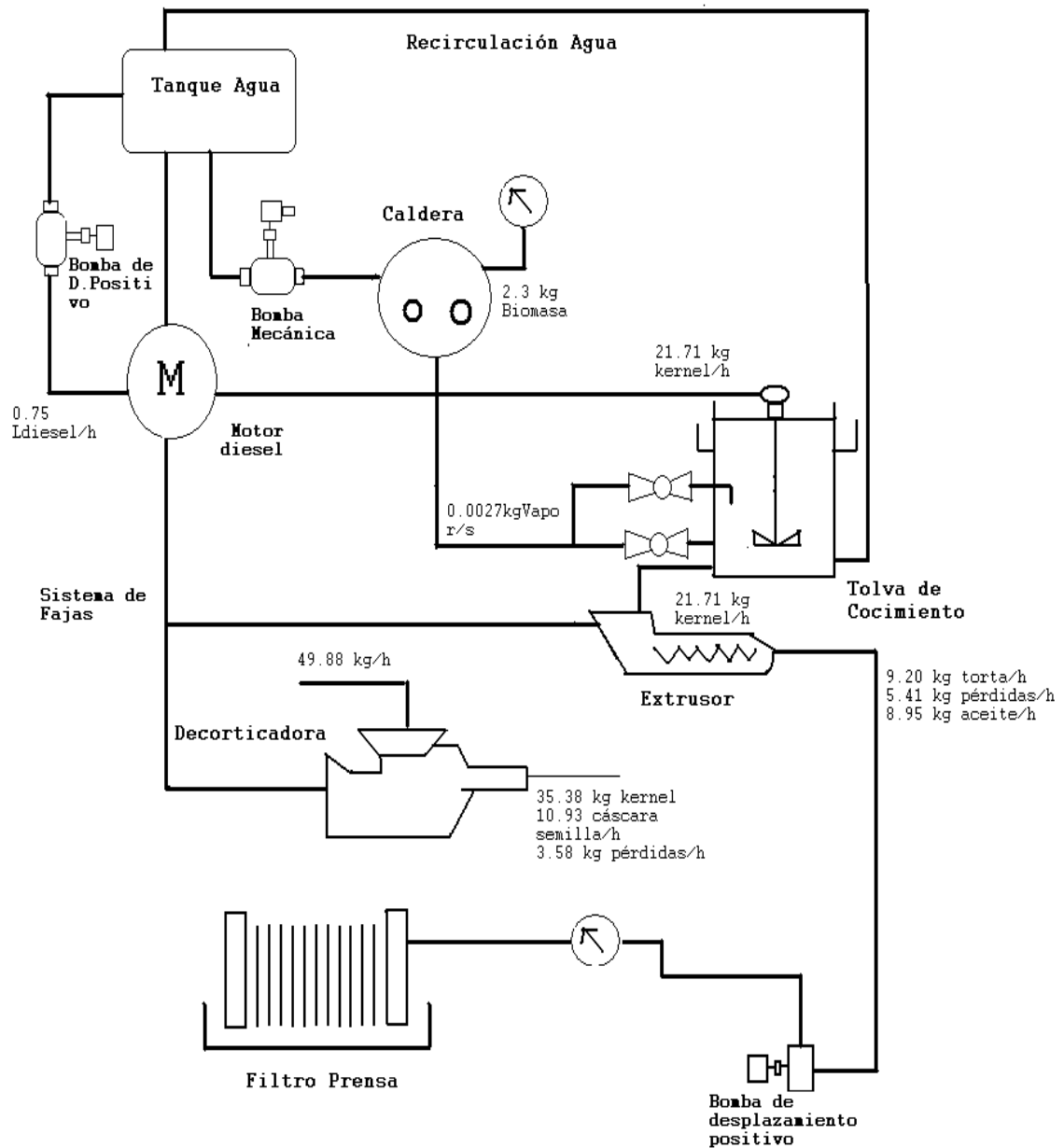
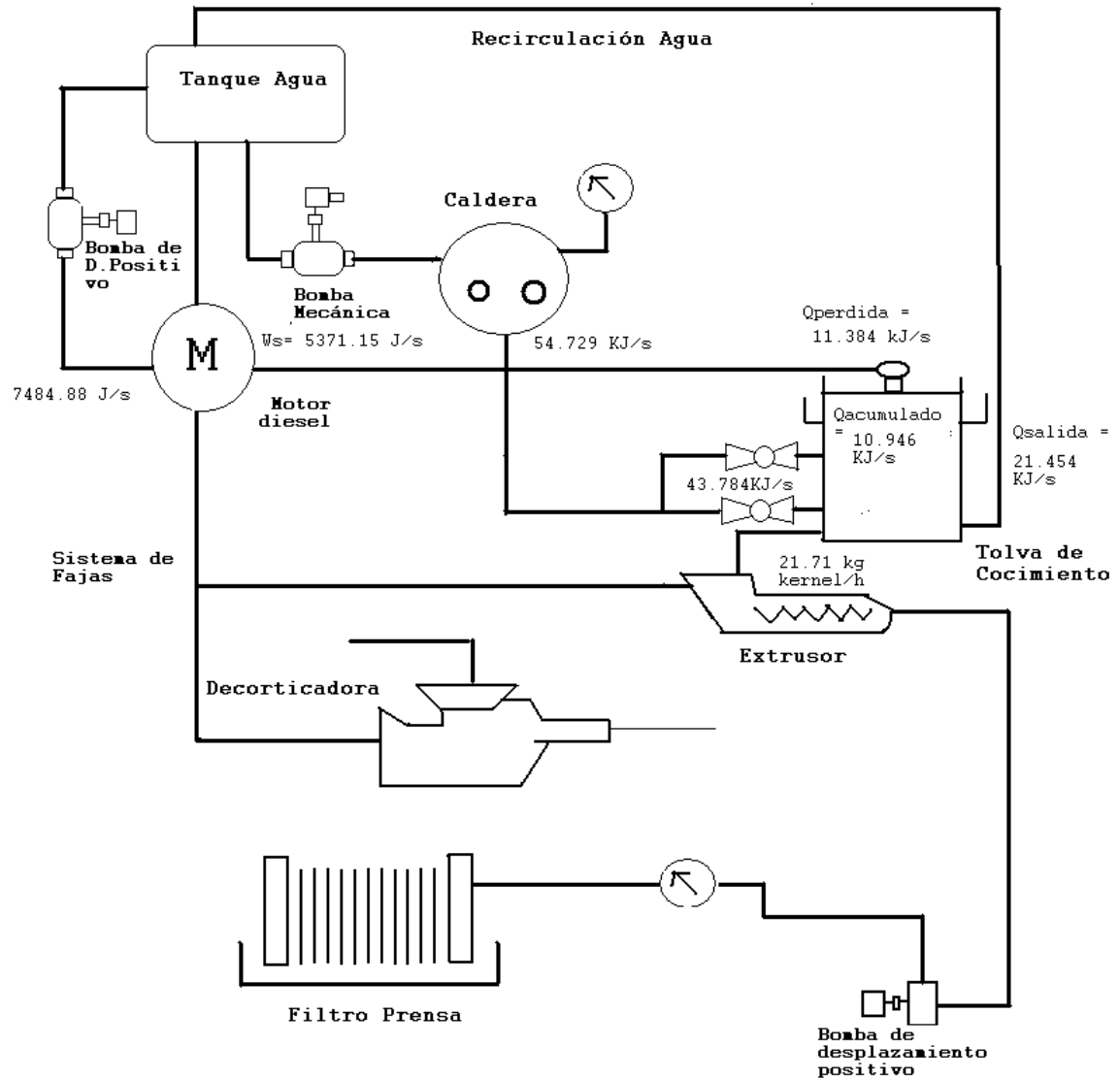


Figura 16 Balance de energía con respecto al segundo día de extracción



## D. Análisis de error

### 1. Análisis estadístico

#### a. Media

Se realizó el cálculo de media o promedio de los promedio de los componentes de las semillas y frutos a partir de la siguiente fórmula:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_n}{n} \quad (\text{Ecuación 24})$$

#### b. Desviación estándar

Se realizó el cálculo de la desviación estándar mediante programa de Excel mediante la función DESVEST (), esta se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$\text{Desviación Estándar } (s) = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (\text{Ecuación 25})$$

### 2. Propagación de error

#### a. Incertidumbres para sumas y restas

$$s_y = \sqrt{s_a^2 + s_b^2 + \dots + s_n^2} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Se realizó para las incertidumbres para todos los dos que conllevaron sumas

#### b. Incertidumbre para multiplicaciones y divisiones

$$s_y = y \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2 + \dots + \left(\frac{s_n}{n}\right)^2} \quad (\text{Ecuación 27})$$

## E. Imágenes de equipos utilizados en el trabajo experimental

Imagen 1 Viscosímetro de Brookfield modelo CAP 2000



**Imagen 2 Separación de fases biodiesel-glicerina**



**Imagen 3 Decortadora empleada en Planta Piloto**



**Imagen 4 Filtro prensa de la Planta Piloto utilizada**



**Imagen 5 Caldera tipo acuatubular de Planta Piloto**



**Imagen 6 Viscosímetro de Brookfield modelo DV-E**

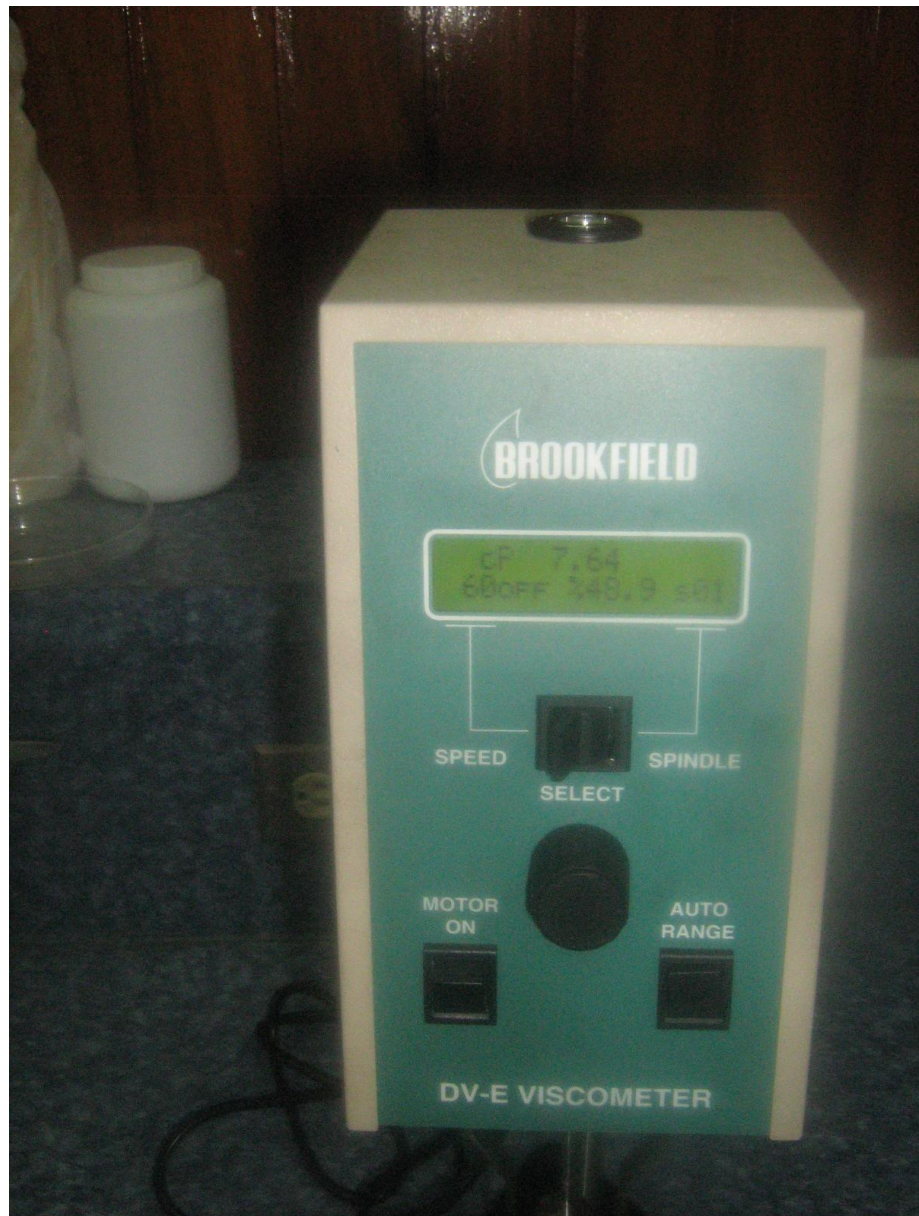


Imagen 7 Expeller utilizado en Planta Piloto



**Imagen 8 Salida del aceite en el expeller**



**Imagen 9 Viscosímetro Cannon-Fenske**



**Imagen 10 Cromatograma del análisis de los ácidos grasos mediante cromatografía de gases**

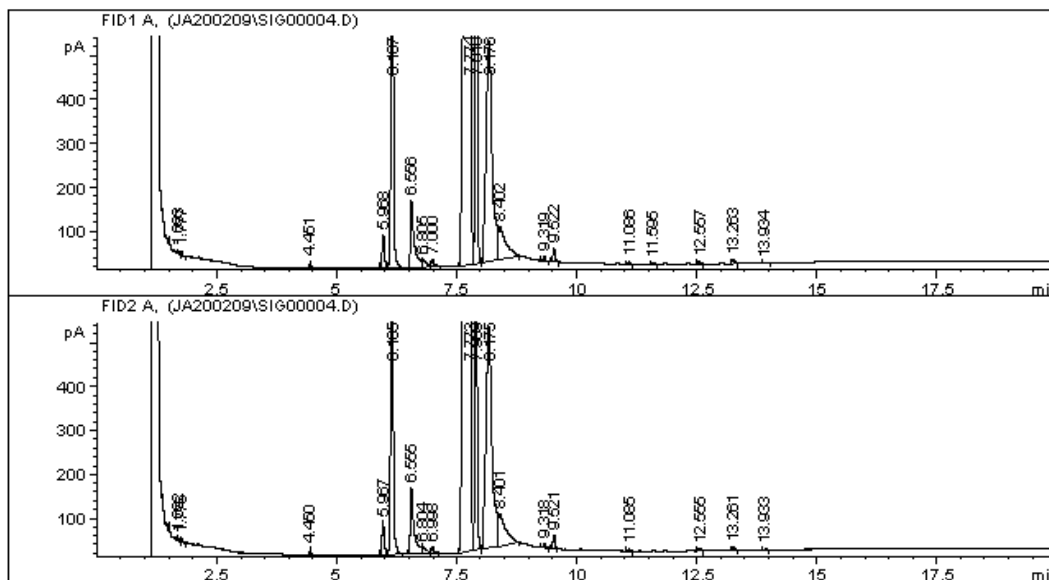
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\JA200209\SIG00004.D

Sample Name: Criolla 1

Se tomo 20 gotas de la grasa, se derivatizo y se extraj  
o en heptano

```

=====
Injection Date : 2/20/2009 10:14:25 AM
Sample Name    : Criolla 1                Location  : -
Acq. Operator  : AdeM                    Inj      : 1
Acq. Instrument : Instrument 1            Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\ACIGRAS.M
Last changed   : 2/20/2009 9:21:55 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\ACIGRAS.M
Last changed   : 2/20/2009 10:35:55 AM by AdeM
                (modified after loading)
Determinacion de Metil Esteres de Acidos Grasos
Columna HP-5 (30m x 0.32mm x 0.25um)
Nitrogeno con split acarreador 2.5psi en la cabeza de columna
Injector 250 C, Detector FID 260 C,
Horno 150C, 25C/min hasta 300C 5 min;
Vol de inyeccion lul
    
```



Area Percent Report

```

=====
Sorted By      : Signal
Multiplier    : 1.0000
Dilution      : 1.0000
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
    
```

Signal 1: FID1 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	1.693	PP	0.0285	10.35868	5.60877	0.02685
2	1.777	VP	0.0236	10.00352	6.64646	0.02593

**Imagen 11 Valores de los tiempos de retención, altura y área de los picos obtenidos de la cromatografía de gases**

Data File C:\HPCHEM\1\DATA\JA200209\SIG00004.D

Sample Name: Criolla 1

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [vA*s]	Height [vA]	Area %
3	4.451	PB	0.0365	39.26252	16.64748	0.10176
4	5.968	BV	0.0469	239.27086	75.59240	0.62014
5	6.167	VB	0.0432	4351.72363	1482.84131	11.27880
6	6.556	PV	0.0816	844.05750	152.47832	2.18763
7	6.805	VB	0.0818	97.69657	16.10671	0.25321
8	7.000	BB	0.0583	56.98890	14.35576	0.14770
9	7.774	PV	0.0830	2.48327e4	3809.68555	64.36130
10	7.910	VP	0.0420	2758.63208	1007.25439	7.14982
11	8.176	VV	0.1225	4383.06152	498.91281	11.36002
12	8.402	VB	0.1388	762.70142	72.44885	1.97677
13	9.319	BB	0.0535	34.07329	9.57854	0.08831
14	9.522	BB	0.0445	87.35614	30.43338	0.22641
15	11.086	PB	0.0463	12.36050	4.08869	0.03204
16	11.595	PB	0.0474	5.63465	1.80607	0.01460
17	12.557	PB	0.0494	17.36886	5.41655	0.04502
18	13.263	PB	0.0513	32.84446	10.00002	0.08513
19	13.934	PB	0.0493	7.16688	2.18551	0.01858

Totals : 3.85832e4 7222.08756

Results obtained with enhanced integrator!

Signal 2: FID2 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [vA*s]	Height [vA]	Area %
1	1.692	PP	0.0296	10.50111	5.65921	0.02722
2	1.776	VP	0.0236	10.19803	6.74713	0.02643
3	4.450	PB	0.0365	39.29534	16.69658	0.10184
4	5.967	BV	0.0479	239.25519	75.74165	0.62008
5	6.165	VB	0.0431	4351.97461	1488.74353	11.27898
6	6.555	PV	0.0815	843.71985	152.63754	2.18666
7	6.804	VB	0.0822	98.07246	16.07326	0.25417
8	6.998	BB	0.0558	54.95640	14.30833	0.14243
9	7.773	PV	0.0828	2.48381e4	3824.44263	64.37273
10	7.909	VP	0.0418	2759.62549	1011.58917	7.15210
11	8.175	VV	0.1154	4384.09033	499.30353	11.36221
12	8.401	VB	0.1379	763.89020	72.50922	1.97977
13	9.318	BB	0.0534	34.06707	9.59195	0.08829
14	9.521	BB	0.0444	87.43331	30.51583	0.22660
15	11.085	PB	0.0461	12.33102	4.09460	0.03196
16	12.555	PB	0.0482	17.30829	5.42738	0.04486
17	13.261	PB	0.0513	32.84402	10.00526	0.08512
18	13.933	PB	0.0492	7.15774	2.18548	0.01855

Totals : 3.85848e4 7246.27227

Results obtained with enhanced integrator!

\*\*\*\*\*  
\*\*\* End of Report \*\*\*

## Imagen 12 Cromatografía de gases del estándar utilizado como parámetro de comparación de los ácidos grasos

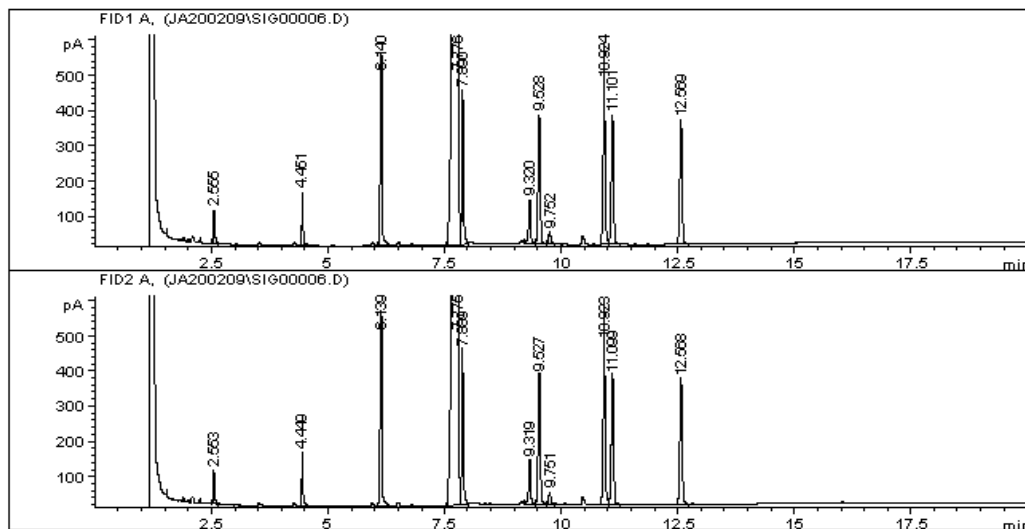
Data File C:\HPCHEM\1\DATA\JA200209\SIG000006.D

Sample Name: Estandar

Oil reference standard, AOAC 0-7756 Lot 74H8356

```

=====
Injection Date : 2/20/2009 11:03:36 AM
Sample Name    : Estandar                      Location   : -
Acq. Operator  : AdeM                          Inj        : 1
Acq. Instrument : Instrument 1                  Inj Volume : Manually
Acq. Method    : C:\HPCHEM\1\METHODS\ACIGRAS.M
Last changed   : 2/20/2009 9:21:55 AM by AdeM
                (modified after loading)
Analysis Method : C:\HPCHEM\1\METHODS\ACIGRAS.M
Last changed   : 2/20/2009 11:01:47 AM by AdeM
                (modified after loading)
Determination de Metil Esteres de Acidos Grasos
Columna HP-5 (30m x 0.32mm x 0.25um)
Nitrogeno con split acarreador 2.5psi en la cabeza de columna
Inyector 250 C, Detector FID 260 C,
Horno 150C, 25C/min hasta 300C 5 min;
Vol de inyeccion lul
  
```



### Area Percent Report

```

=====
Sorted By      :      Signal
Multiplier     :      1.0000
Dilution      :      1.0000
Use Multiplier & Dilution Factor with ISTDs
  
```

Signal 1: FID1 A,

Peak #	RetTime [min]	Type	Width [min]	Area [pA*s]	Height [pA]	Area %
1	2.555	PB	0.0303	184.91763	92.60955	0.56597
2	4.451	BB	0.0363	359.22488	148.17538	1.09947
3	6.140	BB	0.0407	1464.54504	539.68860	4.48249

Instrument 1 2/20/2009 11:24:20 AM AdeM

Page 1 of 2