

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA**

**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE CIENCIAS DE LOS**

**RECURSOS NATURALES RENOVABLES**



**TRANSESTERIFICACIÓN DE LOS ÁCIDOS GRASOS DE (*Elaeis guineensis* Jacq) "ACEITE DE PALMA" CON METANOL PARA LA OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL**

**Tesis**

Para optar el título de:

**INGENIERO EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES**

**MENCIÓN FORESTALES**

**JUAN AUGUSTO SAAVEDRA DA SILVA**

**PROMOCIÓN 2008 – I**

**Tingo María – Perú**

**2009**

K50

S11

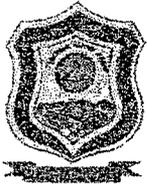
Saavedra Da Silva, Juan A.

Transesterificación de los Ácidos Grasos de (*Elaeis guineensis* Jacq) “Aceite de Palma” con Metanol para la Obtención de Biodiésel. Tingo María, 2009

52 h.; 9 cuadros; 19 fgrs.; 21 ref.; 30 cm.

Tesis ( Ingeniero en Recursos Naturales Renovables Mención: Forestales)  
Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María ( Perú ). Facultad  
de Recursos Naturales Renovables.

ELAEIS GUINEENSIS JACQ / ACIDOS GRASOS / OBTENCIÓN  
BIODIÉSEL / TRANSESTERIFICACIÓN / ACEITE – PALMA / TINGO  
MARÍA / RUPA RUPA / LEONCIO PRADO / HUÁNUCO / PERÚ.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA  
Tingo María – Perú



FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

## ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS

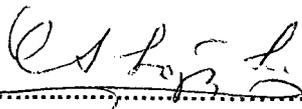
Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 11 de Febrero de 2009, a horas 07:20 p.m. en la Sala de Conferencias de la Facultad de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, para calificar la tesis titulada:

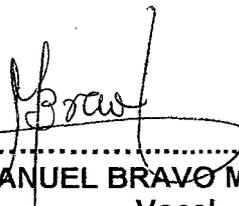
# TRANSESTERIFICACION DE LOS ACIDOS GRASOS DE *Elaeis guineensis* Jacq "ACEITE DE PALMA" CON METANOL PARA LA OBTENCION DE BIODIESEL

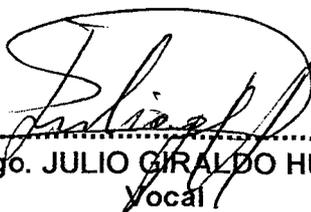
Presentado por el Bachiller: **JUAN AUGUSTO SAAVEDRA DA SILVA**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara aprobado con el calificativo de "MUY BUENO".

En consecuencia el sustentante queda apto para optar el Título de **INGENIERO en RECURSOS NATURALES RENOVABLES, mención FORESTALES**, que será aprobado por el Consejo de Facultad, tramitándolo al Consejo Universitario para la otorgación del título correspondiente.

Tingo María, 17 de abril de 2009

  
.....  
Mtblgo. M.Sc. CESAR SAMUEL LOPEZ LOPEZ  
Presidente

  
.....  
Ing. MANUEL BRAVO MORALES  
Vocal

  
.....  
Blgo. JULIO GIRALDO HUAYTA  
Vocal

  
.....  
Ing. M.Sc. TANIA ELIZABETH GUERRERO VEJARANO  
Asesora

## DEDICATORIA

A DIOS por cuidar de mi familia y de mi persona, por escuchar mis oraciones, estando conmigo en cada momento de mi vida.

A mis hermanos: Carla Celeste, Carlos Javier y Milagros del pilar, por darme la fuerza para seguir adelante en los momentos más difíciles de mi carrera.

Con mucho cariño a mis padres: Carlos Augusto y Rosario de Fátima, gracias por darme la oportunidad de formarme como profesional y como persona.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Agraria de la Selva, por darme la oportunidad de formar parte de la gran familia de unasinos y adquirir los conocimientos sabios que me ayudaron a desarrollarme como profesional.

A la Facultad de Recursos Naturales Renovables, a sus destacados profesionales.

A la Ing., M.Sc. Tania E. Guerrero Vejarano, asesora del presente trabajo de investigación, por el apoyo desinteresado e incondicional en la orientación profesional durante la ejecución de la investigación.

Al Ing., M.Sc. Casiano Aguirre Escalante, por ser un profesional que tiene la bondad de ayudar al estudiante y brindar las facilidades del caso.

Al Blgo. M.Sc. Cesar S. López López, por brindar el apoyo necesario y la facilidad en la ejecución del presente trabajo.

Al Ing., M.Sc. Ronald Puerta Tuesta, por su apoyo como profesional y como persona.

A Lyli Mayleen Rojas Acosta por brindarme su apoyo desinteresado hacia mi persona, durante la formación de mi carrera.

A mis amigos (as), y todas aquellas personas que de alguna manera me brindaron su apoyo y su ayuda para salir adelante.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	01
1.1. Objetivo general.....	02
1.1.2. Objetivos específicos.....	02
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	03
2.1. El Biodiésel.....	03
2.2. Ventajas del uso del biodiésel.....	04
2.2.1. Ventajas del biodiésel en el Perú.....	04
2.2.2. Desventajas del biodiésel en el Perú.....	06
2.3. Avances de la producción de biodiésel en América latina.....	07
2.4. El biodiésel en el Perú.....	07
2.4.1. Materias primas: aceites y grasas.....	07
2.4.2. Palma aceitera o aceite de palma.....	07
2.4.3. Taxonomía de ( <i>Elaeis guineensis</i> Jacq) palma aceitera.....	08
2.4.4. Producción actual de palma aceitera en el Perú.....	09
2.5. Determinación del índice de acidez de un aceite.....	09
2.5.1. Índice de acidez.....	09
2.5.2. Fundamento químico del índice de acidez .....	10
2.6. Insumos: catalizadores y alcoholes .....	11
2.6.1. El alcohol.....	11
2.6.2. El catalizador.....	12

2.7. Preparación del metóxido de sodio .....	13
2.8. Transesterificación.....	14
2.9. Proceso de producción del biodiésel.....	15
2.10. Rendimiento teórico de la reacción.....	17
2.11. Rendimiento experimental del biodiésel.....	18
2.12. Unidad de separación.....	18
2.13. Control de calidad del biodiésel.....	19
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
3.1. Lugar de ejecución.....	21
3.2. Materiales y equipos.....	21
3.2.1. Materiales de laboratorio.....	21
3.2.2. Equipos.....	22
3.2.3. Reactivos.....	22
3.3. Recurso vegetal.....	22
3.4. Metodología experimental.....	23
3.4.1. Determinación del índice de acidez del aceite de palma.....	23
3.4.2. Transesterificación del aceite de palma .....	24
3.4.2.1. Preparación del Metóxido de sodio.....	24
3.4.2.2. Obtención del biodiésel de aceite de palma..	25
3.4.2.3. Separación del biodiésel y glicerina.....	26
3.4.2.4. Lavado del biodiésel.....	26
3.4.2.5. Secado del biodiésel.....	27
3.4.2.6. Pruebas de calidad del biodiésel.....	28

3.4.3.	Diagrama de flujo del proceso.....	29
3.4.4.	Diseño experimental.....	30
3.4.5.	Tratamientos.....	30
3.4.6.	Estructura del diseño experimental.....	31
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	32
4.1.	Índice de acidez de ( <i>Elais guineensis</i> Jacq) "Aceite de palma".....	32
4.2.	Temperatura óptima para obtener mayor rendimiento de biodiésel..	34
4.3.	Cantidad de metanol óptimo para obtener mayor rendimiento de biodiésel.....	36
4.4.	Interacción de temperatura y cantidad de metanol adecuado para tener un mayor rendimiento de biodiésel a partir del aceite de palma.....	38
4.5.	Pruebas de calidad del biodiésel obtenido a partir de aceite de palma.....	41
V.	CONCLUSIONES.....	43
VI.	RECOMENDACIONES.....	45
VII.	ABSTRACT.....	46
VIII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
IX.	ANEXOS.....	52
X.	GLOSARÍO.....	63

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Página
1. Comparación del rendimiento Proyecto A vs Journey to forever.....	18
2. Normas de calidad para el uso del biodiésel como combustible.....	20
3. Determinación del índice de acidez del aceite de palma.....	32
4. Prueba DUNCAN para el factor temperatura a ( $\alpha= 0.05$ ).....	34
5. Prueba DUNCAN para el factor Metanol a ( $\alpha= 0.05$ ).....	36
6. Prueba DUNCAN para la combinación de temperatura y metanol ( $\alpha= 05$ ).....	38
7. Prueba de calidad de viscosidad, densidad y pH.....	41
8. Análisis de varianza del diseño factorial 3 A x 5 B completamente al azar.....	53
9. Análisis de varianza para los 15 tratamientos.....	54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Reacción de transesterificación del aceite vegetal para obtener biodiésel.....	16
2. Flujo del proceso para el trabajo de investigación.....	29
3. Diseño experimental para la obtención del biodiésel.....	31
4. Cantidad en gramos de NaOH por litro de aceite.....	32
5. Influencia del factor temperatura en el rendimiento de biodiésel.....	34
6. Influencia del factor metanol en el rendimiento de biodiésel.....	37
7. Combinación de temperatura y cantidad de metanol en el rendimiento de biodiésel.....	39
8. Preparación del metóxido de acuerdo al tratamiento (NaOH y metanol).....	57
9. Agregando el metóxido después del calentamiento del aceite a 55 °C.....	57
10. Proceso de transesterificación de los ácidos grasos del aceite de palma para la obtención de biodiésel, manteniendo la temperatura, según el tratamiento.....	58
11. Separación del biodiésel de la glicerina.....	58
12. Primer, segundo y tercer lavado del biodiésel con agua destilada a una temperatura de 40 °C.....	59
13. Secado del biodiésel manteniendo una temperatura de 48 °C hasta la evaporación total del agua.....	59

14. Obtención de biodiésel puro y seco por tratamiento y repeticiones.....	60
15. Pruebas previas de calidad del biodiésel por tratamiento (viscosidad 40 °C, densidad a 15 °C y pH).....	60
16. Probando el biodiésel en un volumen de 20 % en un automóvil Toyota Station Wagon.....	61
17. Ingresando la mezcla de biodiésel y diesel al automóvil.....	61
18. El automóvil encendido con la mezcla de biodiésel.....	62
19. El automóvil en movimiento con el biocombustible.....	62

## RESUMEN

Se logró la transesterificación de los ácidos grasos del aceite de palma con metanol, obteniendo como producto "biodiésel", utilizando como catalizador hidróxido de sodio, para ello se determinó el índice de acidez del aceite, que fue 6,6 g de NaOH/L de aceite, es decir para neutralizar los ácidos grasos libres de un litro de aceite de palma crudo, se necesita 6,6 g de NaOH, posterior a ello se procedió con los tratamientos donde se utilizó para cada tratamiento 100 ml de aceite de palma y cuyos tratamientos fueron en combinación de dos factores: Temperatura (45 °C, 55 °C y 65 °C) y cantidad de metanol (20 ml, 30 ml, 40 ml, 50 ml y 60 ml), utilizando un diseño factorial completamente al azar (3A x 5B), haciendo un total de 15 tratamientos o combinaciones, los resultados obtenidos en el ANVA y corroborando con la prueba DUNCAN ( $p < 0,05$ ), determinó que el factor temperatura óptima para un mayor rendimiento de biodiésel fue a 65 °C, con un rendimiento de 86,1% y el factor cantidad de metanol óptimo para un mayor rendimiento fue a 20 ml y 60 ml obteniendo rendimientos de 86,1 % y 87,8 %, siendo estos estadísticamente iguales. Así mismo, la combinación o tratamiento de (temperatura y metanol) adecuada para obtener un mayor rendimiento y una mejor calidad de biodiésel es el tratamiento 11 (65 °C y 20 ml ) con un rendimiento de 88,9 % debido a que no consume un exceso de metanol para obtener rendimientos altos de biodiésel, resultando de baja calidad la combinación de (45 °C y 60 ml).

## I. INTRODUCCIÓN

El deterioro de la capa de ozono, la contaminación del aire, son algunos de los efectos negativos que tienen los combustibles fósiles sobre el medio ambiente. Sin embargo, además de este problema ambiental, la disminución de las reservas mundiales de petróleo y gas natural, está llevando a buscar nuevas alternativas de abastecimiento energético. Una opción son los combustibles no fósiles y renovables, como el biodiésel, obtenidos de aceites vegetales y animales, al proceder de compuestos orgánicos no contribuyen a la contaminación de nuestro ambiente. A diferencia de los combustibles tradicionales (petróleo, carbón, gas natural), el biodiésel tiene un impacto notorio en la reducción o eliminación de las emisiones gaseosas nocivas como: SO<sub>2</sub> y sulfatos; principales componentes de la lluvia ácida, polihidrocarburos aromáticos (PHA), identificados como compuestos potencialmente cancerígenos y una serie de sustancias que afectan de forma negativa la salud de los seres vivos (COELLO y CASTRO, 2007).

Bajo este contexto se realizó una investigación para la producción de biodiésel, utilizando como materia prima el aceite de (*Elaeis guineensis* Jacq) “aceite de palma”, lo cual viene a ser ecológicamente viable en comparación con el petróleo y también al ser aceptado por los ambientalistas

debido a que su combustión produce valores menores entre 40 y un 80 % de dióxido de carbono que los combustibles fósiles tradicionales (CASTRO *et al.*, 2007). Es necesario realizar investigaciones para la obtención de biodiésel, a partir de aceites vegetales de esta parte de la amazonia peruana para aprovechar nuestros recursos y utilizarlo como un producto alternativo sustentable, por tal motivo surge la siguiente interrogante, ¿será posible la transesterificación de los ácidos grasos del aceite de palma con el metanol para obtener biodiésel, utilizando como catalizador el hidróxido de sodio?

### **1.1. Objetivo general**

- Transesterificar los ácidos grasos del aceite de palma con metanol para obtener biodiésel.

#### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Determinar el índice de acidez del aceite de palma.
- Determinar la temperatura óptima, así como también la cantidad de metanol óptimo para obtener mayor rendimiento de biodiésel.
- Determinar la interacción de temperatura y cantidad de metanol adecuado para tener un mayor rendimiento de biodiésel a partir del aceite de palma.
- Efectuar pruebas de calidad del biodiésel obtenido.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. El Biodiésel

El biodiésel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales o grasas animales. La Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) define al biodiésel como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de insumos grasos renovables, como los aceites vegetales o grasas animales. El término bio hace referencia a su naturaleza renovable y biológica en contraste con el combustible diésel tradicional derivado del petróleo; mientras que diésel se refiere a su uso en motores de este tipo. Como combustible, el biodiésel puede ser usado en forma pura o mezclado con diésel de petróleo (GONZÁLES, 2003; IIDEPROQ y CASTRO, 2007).

IIDEPROQ (2007), el National Biodiésel Board (la asociación de productores norteamericanos de biodiésel) lo define como un combustible compuesto de ésteres mono - alquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites o grasas, vegetales o animales. Este biocombustible se obtiene mediante un proceso químico llamado transesterificación, en el cual los aceites orgánicos son combinados con un alcohol y alterados químicamente

para formar un éster etílico o metílico, el cual recibe finalmente el nombre de biodiésel.

## **2.2. Ventajas del uso del biodiésel**

Según Grupo técnico de biocombustibles (2002) manifiesta:

- Su transporte es más seguro, al tener un punto de inflamación muy superior al diesel.
  
- No contamina los suelos, las aguas subterráneas y superficiales, en el caso de un derrame accidental, es biodegradable y en pocos días desaparece todo rastro de contaminación.
  
- Los proyectos agroindustriales orientados a la producción de biodiésel pueden ser calificados para ser considerados dentro del alcance del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), lo que permitiría incrementar la rentabilidad de los proyectos.

### **2.2.1. Ventajas del biodiésel en el Perú**

- Palanca de desarrollo del agro peruano.

- Reduce las emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado en comparación con el diesel.
  
- No produce emisión de óxidos de azufre (SO<sub>2</sub> + SO<sub>3</sub>) porque el biodiésel no contiene azufre.
  
- Reduce en un 90 % la cantidad de hidrocarburos totales no quemados.
  
- El biodiésel no contiene productos orgánicos aromáticos (benceno y derivados) que son sustancias cancerígenas.
  
- El biodiésel recicla el CO<sub>2</sub> de la atmósfera a través del proceso de fotosíntesis de la atmósfera, contribuyendo a detener el efecto invernadero que genera la combustión de combustibles fósiles.
  
- Al tener un punto de inflamación superior al diesel, su transporte es más seguro.
  
- No contamina los suelos y aguas subterráneas en caso de derrame accidental. Es biodegradable y en 28 días desaparece todo rastro de contaminación en caso de derrame.

### **2.2.2. Desventajas del biodiésel en el Perú**

- Problemas con el arranque de los motores al usarse puro debajo de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , teniendo que adaptarle un calentador de aceite o agregarle un aditivo.

- Reseca las conexiones o mangueras de caucho si se usa puro.

- Incremento en óxidos de nitrógeno en motores que no hayan sido diseñados para el uso de biodiésel.

- Menor poder calorífico que el diesel (9 % menos de energía por similar unidad de volumen.

- Reseca las conexiones o mangueras de caucho si se usa puro.

Los proyectos agro industriales que generen biodiésel tendrán como incentivos los bonos MDL.

### **2.3. Avances de la producción de biodiésel en América latina**

IIDEPROQ (2007), Brasil es un país pionero en América Latina en la implementación de un programa de biodiésel a escala comercial. La cual mediante una ley promulgada el 13 de enero del 2005, establece que la mezcla B2, es decir 2 % de biodiésel mezclado con diesel de petróleo será obligatoria dentro de tres años de aprobada la ley de enero y la mezcla de B5 será obligatoria 8 años más de aprobada esta ley.

### **2.4. El biodiésel en el Perú**

#### **2.4.1. Materias primas: aceites y grasas**

CASTRO *et al.* (2007), las materias primas – aceites y grasas vegetales y animales disponibles para producir biodiésel en el Perú son variadas: Aceites vegetales, grasas animales (sebo), aceite de pescado, aceites y mantecas comestibles usadas. Sin embargo, su cantidad no es suficiente para satisfacer una posible demanda a gran escala de biodiésel.

#### **2.4.2. Palma aceitera o aceite de palma**

RAIGADA (2007) señala que el principal cultivo oleaginoso en el Perú es la palma aceitera (*Elaeis guineensis*), que se produce principalmente en la región amazónica, y tendría aún un amplio potencial de crecimiento.

Según cifras oficiales, la superficie instalada con plantaciones de palma aceitera en el Perú asciende a 21 200 has; de las cuales alrededor del 60 % (12 400 has.) se encuentran en producción. La productividad de estas plantaciones tiene una gran variación según el nivel de tecnología que se emplee. Su rendimiento se encuentra en un rango entre 1,7 a 5,7 toneladas de aceite crudo por hectárea. Se estima que habría alrededor de 32 mil productores de palma, ubicados en diferentes zonas de Loreto, San Martín, Huánuco y Ucayali, quienes se encuentran organizados en la Confederación Nacional de Palmicultores y Empresas de Palma Aceitera (CONAPAL).

#### **2.4.3. Taxonomía de *Elaeis guineensis* Jacq (palma aceitera)**

CHAVEZ (2008) menciona que el aceite de palma tiene la siguiente clasificación taxonómica:

Reino	: Plantae.
División	: Maynoliophyta.
Clase	: Liliopsida.
Orden	: Arecales.
Familia	: Arecaceae.
Género	: <i>Elaeis</i> .
Especie	: <i>Guineensis</i> .
Nombre científico	: <i>Elaeis guineensis</i> Jacq.
Lugar de origen	: Palmera nativa de África Central y Oriental.

#### **2.4.4. Producción actual de palma aceitera en el Perú**

RAIGADA (2007), el Perú cuenta con condiciones edafoclimáticas favorables para el cultivo de palma en la amazonía, lo cual ha impulsado diversas iniciativas en torno a este cultivo. Este plan contempla la zonificación económica – ecológica (ZEE), con el fin de identificar las tierras con potencial para este cultivo: de acuerdo con el Ministerio de Agricultura, existen alrededor de 1,4 millones de hectáreas con capacidad para soportar plantaciones de palma aceitera aunque recientemente el INRENA determinó una disponibilidad de tierras aptas de 4,8 millones de hectáreas, de las cuales 510 mil hectáreas (casi un 10 %) se encuentran en zonas sin bosque.

#### **2.5. Determinación del índice de acidez de un aceite**

##### **2.5.1. Índice de acidez**

ZAPATA *et al.* (2007) manifiesta que el índice de acidez (IA), es el número de mg de KOH o NaOH necesario para neutralizar los ácidos grasos libres (es decir, que no se encuentran unidos a un glicérido) de 1 g de aceite. Se determina mediante la titulación o valoración del aceite disuelto en alcohol con una solución estándar de KOH o NaOH. Un valor elevado para este índice muestra que el aceite contiene una alta cantidad de ácidos grasos libres, ya que ha sufrido un alto grado de hidrólisis. Puede expresarse también como porcentaje de ácido oleico, palmítico o láurico, según el ácido graso que

predomine en la grasa en cuestión. Los aceites y grasas refinados deben tener un nivel de ácidos grasos libres inferior al 0,2 % como ácido oleico para ser aptos para su uso en la alimentación, sin embargo, los aceites crudos y los usados previamente en frituras, comúnmente tienen un contenido de ácidos grasos libres significativamente superior a éste (2 % o más). Este índice es particularmente importante para el proceso de producción de biodiésel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH ó KOH) formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiésel. La saponificación no sólo consume el catalizador necesario para la transesterificación, sino que además los jabones producidos promueven la formación de emulsiones que dificultan la purificación de biodiésel.

### **2.5.2. Fundamento químico del índice de acidez**

ZAPATA *et al.* (2007) señala que los enlaces éster de grasas y aceites se hidrolizan por *efecto* de lipasas microbianas y liberan ácidos grasos en mayor o menor grado. Para cuantificar este proceso, se define el índice de acidez de un aceite, que puede expresarse, entre otras formas, como el número de miliequivalentes de hidróxido potásico o hidróxido de sodio que consume 1 g de aceite para neutralizar los ácidos libres ejemplo:



Para evitar la saponificación de los glicéridos por el hidróxido de potasio o hidróxido de sodio, la determinación debe hacerse en frío y cuidando de no añadir un exceso de base.

## **2.6. Insumos: catalizadores y alcoholes**

### **2.6.1. El alcohol**

CASTRO *et al.* (2007) indica que el alcohol es el principal insumo para la producción de biodiésel. En volumen, representa alrededor del 10 - 15 % de los insumos consumidos. Los alcoholes que comúnmente más se utilizan para producir biodiésel son metanol y etanol. Así mismo se puede utilizar otros alcoholes – 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 es ingerible, se inhala o al hacer 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 explosivas. El etanol es menos tóxico pero la desventaja de su uso para producir biodiésel 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 contenga 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 biodiésel aún se utiliza metanol pese a su toxicidad.

### **2.6.2. El catalizador**

CASTRO *et al.* (2007), la transesterificación de los triglicéridos puede ser realizada mediante diferentes procesos catalíticos, 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 biodiésel. En este caso, se requiere otro tipo de transesterificación, o un pretratamiento con catalizadores ácidos.

#### **2.6.2.1. Catalizadores alcalinos**

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.

### **2.6.2.2. Hidróxido de sodio (NaOH)**

El NaOH viene en forma de cristales que deben ser disueltos en el metanol 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 de gran escala, donde se quieren evitar operaciones manuales).

### **2.7. Preparación del metóxido de sodio**

CALERO (2007) menciona que la cantidad de metanol generalmente, es del 20 % en masa de la cantidad de aceite. Las densidades de los dos líquidos son bastantes parecidas; también debería funcionar con el 20 % en volumen. Para estar completamente seguro, se mide medio litro de cada líquido, pesarlos y calcula exactamente el 20 % en masa. Distintos aceites pueden tener distintas densidades dependiendo de su procedencia y de cómo hayan sido cocinados, por ejemplo para 100 l de aceite falta 20 l de metanol.

Cuando se mezcla el metanol con el hidróxido de sodio (NaOH) se produce una reacción exotérmica cuyo resultado es el metóxido de sodio.

## 2.8. Transesterificación

CASTRO *et al.* (2007) señala que la reacción química de la transesterificación, hemos visto que químicamente ésta equivale a:



Sin embargo, en la práctica se necesita más de 3 alcoholes por cada triglicérido para que la reacción ocurra completamente. Si no se usa este exceso de alcohol, el producto obtenido no será biodiésel puro: consistirá en una mezcla de biodiésel, triglicéridos sin reaccionar, y productos intermedios como los monoglicéridos y diglicéridos. Estas impurezas pueden afectar las características del combustible, de manera que no cumpla con las normas técnicas de calidad, además de tener efectos indeseados como producir depósitos carbonosos en el motor, taponeo de los filtros, combustión incompleta, etc. Igualmente, para que la reacción se lleve a cabo, también hemos visto que se necesita la presencia de un catalizador y de ciertas condiciones de reacción (tiempo, temperatura, agitación). Asimismo, hemos visto que la calidad del aceite es uno de los condicionantes más importantes para que la transesterificación se lleve a cabo adecuadamente y que debe asegurarse con un análisis químico previo y, si es necesario, con un pretratamiento adecuado.

## 2.9. Proceso de producción del biodiésel

WHITMAN (2007), el proceso de producción de biodiésel se basa en la reacción de transesterificación del aceite. Los aceites están compuestos principalmente por moléculas denominadas triglicéridos, las cuales se componen de tres (03) cadenas de ácidos grasos unidas a una (01) molécula de glicerol. La transesterificación consiste en reemplazar el glicerol por un alcohol simple, como el metanol o el etanol, de forma que se produzcan ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos. Este proceso permite disminuir la viscosidad del aceite, la cual es principalmente ocasionada por la presencia de glicerina en la molécula. La alta viscosidad del aceite impide su uso directo en motores diésel, desventaja que se supera mediante este proceso. Para lograr la reacción se requiere de temperaturas que oscilan entre 40 y 60 °C, así como la presencia de un catalizador, que puede ser la soda o potasa cáustica (NaOH o KOH), respectivamente.

CASTRO *et al.* (2007) señala que el biodiésel es un biocombustible derivado de aceites o grasas ya sea vegetal o animal, que puede ser usado en forma pura o mezclado con diésel de petróleo. Se compone de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos mediante la transesterificación de aceites o grasas vegetales o animales con un alcohol, la idea del proceso de transesterificación es reemplazar el glicerol de los triglicéridos por alcoholes simples, como el metanol o etanol. De esta manera, se obtienen moléculas en forma de cadena larga, muy similares en su forma y

sus características físicas a las moléculas de los hidrocarburos. La principal ventaja que se logra con este proceso es reducir la viscosidad del aceite hasta un nivel muy cercano al del diésel 2.

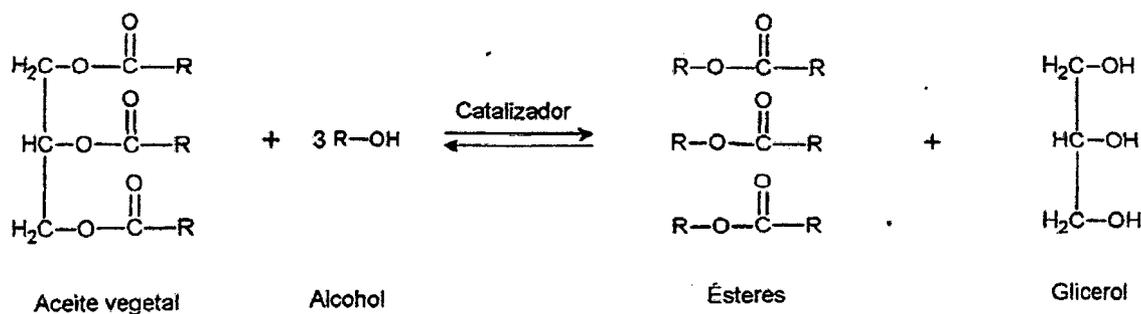


Figura 1. Reacción de transesterificación del aceite vegetal para obtener biodiésel.

A pesar de que esta reacción química puede parecer muy simple en el esquema – finalmente, es sólo cuestión de reemplazar el glicerol por un alcohol (metanol o etanol). Así mismo, existen diversos factores que influyen como:

- La calidad de las materias primas.
- El tipo, la calidad y cantidad de alcohol utilizado.
- El tipo de catalizador utilizado.
- Las condiciones físicas del proceso: Temperatura, agitación, presión, tiempo.

RECINOS *et al.* (2005), la síntesis de biodiésel puede ser efectuada a partir de tres procesos. La primera opción es la transesterificación del aceite,

empleando una base como catalizador. Esta metodología es ampliamente usada debido a que tiene un alto porcentaje de rendimiento y representa un proceso de conversión directa. El segundo proceso es la transesterificación del aceite empleando un ácido como catalizador. La tercera opción es la conversión de los ácidos grasos del aceite en esteres y posteriormente en biodiésel lo cual posee la ventaja de evitar la formación de jabón en la reacción. Sin embargo ésta opción presenta la desventaja de requerir mayor tiempo de proceso, debido a que involucra un proceso de esterificación seguido de un proceso de transesterificación.

## 2.10. Rendimiento teórico de la reacción

IIDEPROQ (2007), este rendimiento se calcula tomando en cuenta el contenido total de glicerol o glicerina que debe tener el producto final, que según la norma ASTM debe ser de 0,24 % como máximo. La glicerina total es igual a la glicerina libre más la glicerina ligada que se encuentra en la forma de monoglicéridos y diglicéridos que son los productos parciales de la reacción de conversión de los triglicéridos a metilésteres. El contenido de glicerina en la trioleína es de 10,24 % y en el producto final el valor máximo permitido es de 0,24 %.

$$\text{Rendimiento} = (10,24 - 0,24)/10,24$$

$$\text{Rendimiento} = 97,7 \%$$

## 2.11. Rendimiento experimental del biodiésel

CALERO *et al.* (2007) indica por cada litro de aceite se obtiene una cantidad de 900 ml de biodiésel y cerca de 100 ml de glicerina pura, siendo el resto metanol sin reaccionar, jabón y algunos ácidos grasos, lo cual corresponde a cerca de 200 ml.

Cuadro 1. Comparación del rendimiento Proyecto A vs Journey to forever

Producto	Journey to forever	Proyecto ° "A"	Rendimiento
Biodiésel (ml)	900	887	98,5 %
Glicerina (ml)	100	135	135 %
Impurezas (ml)	200	178	89 %

Fuente: Escuela de bioquímica y farmacia "Universidad Central del Ecuador".

## 2.12. Unidad de separación

IIDEPROQ (2007) indica que la separación de las fases glicerínica y éster es el primer paso en la recuperación del biodiésel. La separación se basa en la diferencia significativa que existe entre las densidades de ambas fases. Para ello, durante la reacción se aplica una agitación intensa, el glicerol es dispersado en gotas muy finas dentro la mezcla. Esta dispersión requiere de varias horas (al menos 8 horas) para permitir que las gotas de glicerina dispersas puedan coalescer. Cuando la reacción es incompleta, se presenta cantidades importantes de mono - di y triglicéridos, que son emulsificantes que

impiden la separación de las fases formadas. En este caso se deberá reevaluar la reacción entera y evitar así la formación de dichas emulsiones que son perjudiciales en la obtención de un producto de calidad.

### **2.13. Control de calidad del biodiésel**

COELLO y CASTRO (2007) menciona que la calidad del biodiésel es generalmente controlada en base a ciertos parámetros físicos y químicos establecidos por normas técnicas aprobadas en cada país. Las principales normas técnicas para el biodiésel son la europea (EN 14214) y la estadounidense (ASTM D6751 - 07). Los estándares de calidad deben estar de acuerdo con la realidad nacional. Copiar estándares extranjeros puede constituir una barrera, ya que en muchos casos estos estándares son diseñados con el objetivo de controlar el mercado en lugar de facilitar su implementación. Por ejemplo, la norma ASTM está orientada principalmente a la producción de biodiésel a partir de aceite de soya, producto abundante en los Estados Unidos pero con muy limitada producción en el Perú. CALERO *et al.* (2007), la calidad del producto acabado puede comprobarse visualmente y midiendo su pH. El pH puede medirse con papel tornasol o con un medidor electrónico. Debe ser neutro (pH 7). Debe tener el aspecto del aceite vegetal, pero con un matiz marrón, parecido a la sidra.

Cuadro 2. Normas de calidad para el uso del biodiésel como combustible

Parámetro	Unidad	Especificaciones	
		14214 - 03	A.S.T.M. D - 02
Contenido de esteres	% masa	Mín. 96,5	-----
Densidad a 15 °C	g/cm <sup>3</sup>	0,86 – 0,90	-----
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm <sup>2</sup> /s	3,50 – 5,00	1,90 – 6,00
Punto de Inflamación	°C	Mín. 120	Mín. 130
Punto de obstrucción de filtro frío (P.O.F.F)	° C verano	Máx. 0	-----
	°C invierno	Máx. -20	-----
Azufre total	% masa	Máx. 0,001	Máx. 0,05
Residuo carbonoso Conradson al 100%	% masa	Máx. 0,05	Máx. 0,05
Número de cetano	----	Mín. 51	Mín. 47
Contenido en cenizas	% masa	Máx. 0,03	Máx. 0,02
Contenido en agua	mg/Kg.	Máx. 500	-----
Agua y sedimentos	% volumen	-	Máx. 0,05
	Grado de		
Corrosión al cobre (3h/50 °C)	Corrosión	Máx. 1	Máx. 3
Estabilidad a la oxidación	horas	Mín. 6	-----
Índice de acidez	mg KOH/g	Máx. 0,50	Máx. 0,80
Contenido en metanol	% masa	Máx. 0,20	-----
Contenido en monoglicéridos	% masa	Máx. 0,80	-----
Contenido en diglicéridos	% masa	Máx. 0,20	-----
Contenido en triglicéridos	% masa	Máx. 0,20	-----
Glicerol libre	% masa	Máx. 0,02	Máx. 0,02
Glicerol total	% masa	Máx. 0,25	Máx. 0,24
Índice de yodo	----	Máx. 120	-----
Fósforo	ppm.	Máx. 10	Máx. 10
Sales Metálicas (Na+K)	mg/Kg.	Máx. 5	-

Fuente: Instituto de Investigación y desarrollo de procesos químicos (IIDEPROG).

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Lugar de ejecución**

El presente trabajo de investigación se realizó en el laboratorio de fitoquímica de la Facultad de Recursos Naturales Renovables “Universidad Nacional Agraria de la Selva”, ubicada a 1,5 km. de la carretera Tingo María – Huánuco, políticamente se encuentra ubicado en el distrito de Rupa Rupa, provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco, región Andrés Avelino Cáceres, a una altitud de 660 m.s.n.m. presenta una temperatura media de 24,2 °C y una humedad relativa media de 80 %.

#### **3.2. Materiales y equipos**

##### **3.2.1. Materiales de laboratorio**

- Vasos de precipitación, frascos con tapa rosca, matraz erlenmeyer, fiolas y probetas de varias escalas, pera de decantación, bureta, pipetas, perilla de succión, termómetro de 0 – 100 °C y viscosímetro de Ostwald.

### **3.2.2. Equipos**

- Agitador magnético, cocina eléctrica, estufa “Memmert”, balanza analítica “Sartius” y peachímetro “Lida”.

### **3.2.3. Reactivos**

- Solución etanólica de NaOH 0,1 N, solución alcohólica de fenolftaleina al 1 %, mezcla etanol - éter etílico 1:1, neutralizada con el álcali en presencia de fenolftaleina, metanol al 99 % mínimo, hidróxido de sodio (99 %), agua destilada.

### **3.3. Recurso vegetal**

Se utilizó el aceite de palma crudo, suministrado por la planta de procesamiento y producción de aceite crudo de la empresa “Asociación de Palmicultores del Valle de Shambillo” (ASPSH), ubicado en el centro poblado del “boquerón” a 172 km, en la carretera Federico Basadre.

### 3.4. Metodología experimental

#### 3.4.1. Determinación del índice de acidez del “aceite de palma”

(Rutprac, 2006).

##### Procedimiento

1. Se preparó una solución etanólica (96 °) de hidróxido de sodio (NaOH) de 0,1 N; para la respectiva valoración.
2. Luego en un matríz se añadió 5 g de aceite de palma crudo.
3. Seguidamente se disolvió en el matraz, 50 ml de la solución alcohol - éter, previamente neutralizada con fenolftaleina.
4. Continuación a esto se añadió 5 ml de solución fenolftaleina, y continuamente se realizó la valoración con la solución álcali utilizada (NaOH 0.1 N). La fórmula utilizada para determinar el índice de acidez, se detalla:

$$\text{Índice de acidez} = \frac{V \times N \times 40}{P}$$

Donde:

V = Volumen en mililitros de solución de álcali utilizado.

N = Normalidad de la solución de NaOH.

P = Peso en gramos de muestra utilizada.

40 = Peso molecular del NaOH.

Se realizó tres repeticiones, para tener un promedio con mayor exactitud y menor error.

### **3.4.2. Transesterificación de los ácidos grasos del aceite de palma**

#### **3.4.2.1. Preparación del metóxido de sodio (CALERO *et al.*, 2007)**

##### **Procedimiento**

1. Con cuidado se procedió a colocar el hidróxido de sodio en una fiola de 100 ml totalmente seco sin contacto con la humedad ambiental.
2. Posteriormente se agregó un volumen determinado de metanol según el tratamiento (Figura 3).
3. Se activó el agitador magnético hasta que se disuelva totalmente el hidróxido de sodio, formando el metóxido.
4. Cubriendo totalmente la fiola donde se encuentra el metóxido para evitar su hidratación con la humedad ambiental y la evaporación del metanol.

### **3.4.2.2. Obtención del biodiésel de aceite de palma**

(CALERO *et al.*, 2007)

#### **Procedimiento:**

1. En un frasco se calentó 100 ml de aceite de palma sobre una cocina eléctrica hasta encontrarse en un rango de 50 a 55 °C.
2. Se agregó el metóxido de sodio según el volumen del tratamiento (Figura 2).
3. Luego se procedió agitar durante 2 horas, procurando que el medio de reacción se encuentre a una temperatura constante, según el tratamiento (Figura 3). Controlando la temperatura de la cocina, utilizando un termómetro de 0 - 100 °C.
4. Pasando las dos horas se dejó enfriar a temperatura ambiente, posteriormente se colocó la mezcla en un embudo de separación por un lapso mínimo de 8 horas para su separación respectiva.

### **3.4.2.3. Separación del biodiésel y glicerina**

(CALERO *et al.*, 2007)

#### **Procedimiento:**

1. El biodiésel obtenido se encuentra en la parte superior del embudo de separación, de un color similar al aceite crudo pero con una tonalidad más clara y cristalina que el aceite normal, mientras que la glicerina con otras impurezas se encuentra en la segunda capa de un color marrón oscuro.

2. Se separan las dos fases, como mencionamos anteriormente, el biodiésel impuro y la glicerina impura.

### **3.4.2.4. Lavado del biodiésel (CALERO *et al.*, 2007)**

#### **Procedimiento:**

1. Del embudo de separación se retiró el volumen de glicerina quedando el volumen de biodiésel impuro variando para cada tratamiento, agregando agua destilada en un 40 % al volumen de biodiésel obtenido (biodiésel impuro), agitando durante 30 minutos.

2. A esta mezcla se le coloca un embudo de separación, se deja reposar durante un día (primer lavado).

3. Transcurrido un día se puede observar en la parte inferior del embudo de separación una fase acuosa que contiene una gran cantidad de impurezas, mostrando un color blanco lechoso.

4. Repitiendo el mismo procedimiento del lavado hasta obtener en la parte inferior el agua incolora, indicando que el biodiésel se encuentra sin impureza. Se realizó tres lavados por cada tratamiento, el primer lavado dura un día de reposo, mientras que el segundo y el tercer lavado se realizó en un tiempo de reposo de 1 hora.

#### **3.4.2.5. Secado del biodiésel (CALERO *et al.*, 2007)**

##### **Procedimiento:**

1. Es la parte final del proceso de obtención del biodiésel puro, la poca agua que aún tiene el biodiésel se debe quitar, para lo cual se calentó a 48 °C manteniéndose por un lapso de 2 horas a más, hasta la evaporación y el secado total del agua, repitiendo el mismo procedimiento para todos los tratamientos.

### 3.4.2.6. Pruebas de calidad del biodiésel

Se realizaron tres pruebas de calidad (pH, densidad a 15 °C y viscosidad a 40 °C) siendo las más importantes para su utilidad en los motores diésel.

- **Determinación de pH:** Se determinó el pH por cada tratamiento con sus respectivas repeticiones para ello se utilizó un peachímetro digital.
- **Densidad a 15 °C:** Se determinó la densidad del biodiésel por cada tratamiento y sus respectivas repeticiones, utilizando una fiola de 100 ml, determinando la densidad con la fórmula siguiente:

$$d = \frac{m}{v}$$

Donde:

d = densidad en g/ml.

m = Masa en g.

v = Volumen en ml.

- **Viscosidad a 40 °C**

Se determinó la viscosidad a 40 °C, utilizando el método de Ostwald, citado por VALDERRAMA (2007).

### 3.4.3. Diagrama de flujo del proceso

Podemos observar el flujo del proceso que se realizó en el presente trabajo de investigación.

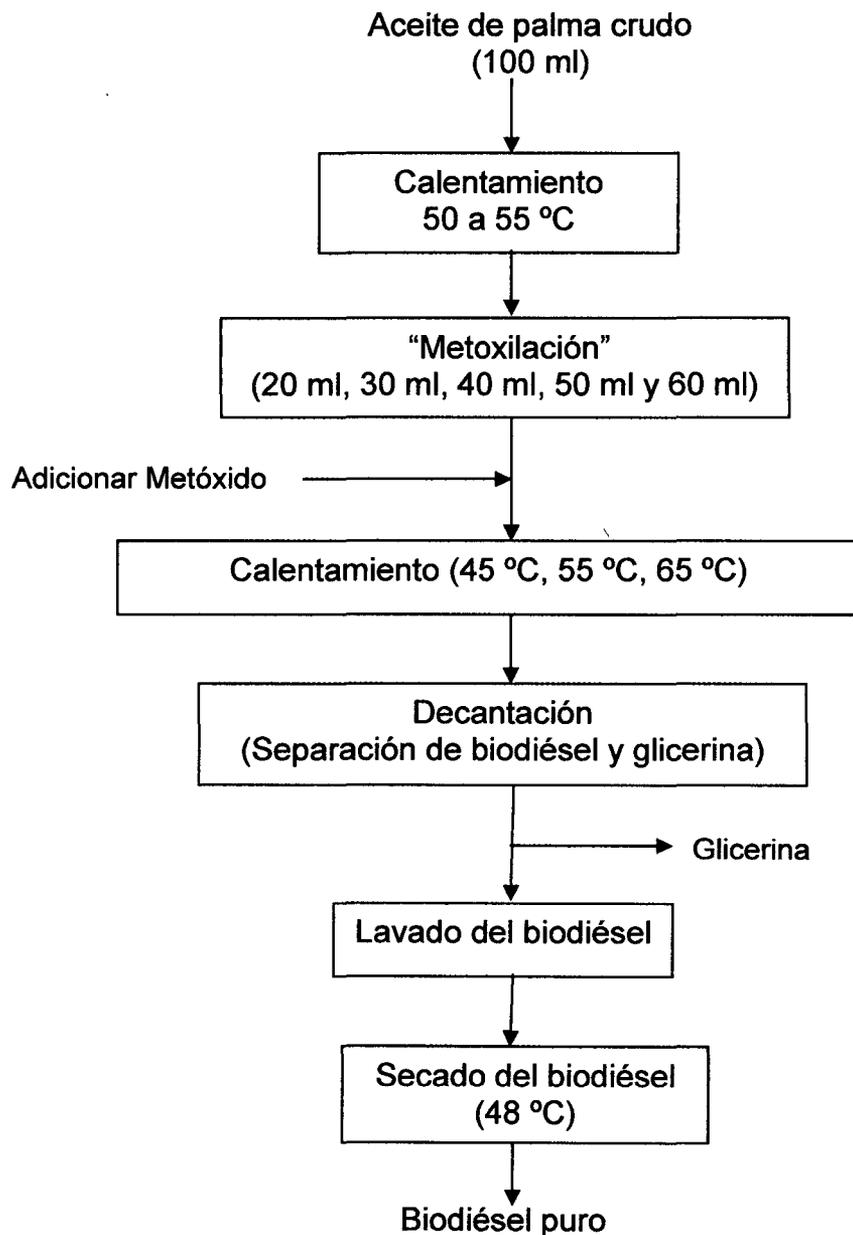


Figura 2. Flujo del proceso para el trabajo de investigación.

#### 3.4.4. Diseño experimental

Se aplicó el diseño factorial 3A x 5B completamente al azar, utilizando el programa estadístico SPSS 15 para el procesamiento de los datos, siendo un total de 15 tratamientos evaluados. Modelo aditivo lineal del diseño factorial:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + e_{ij}$$

Con la ayuda del programa estadístico SPSS 15, se realizó un análisis de varianza (Anexo 1) con un diseño factorial completamente al azar (DCA) para determinar si existe diferencia estadística entre los tratamientos, corroborando los resultados del análisis de varianza con la prueba DUNCAN para determinar cual de ellos es el de mayor significancia, lo cual determinó el tratamiento donde se obtuvo el mayor rendimiento del biodiésel.

#### 3.4.5. Tratamientos

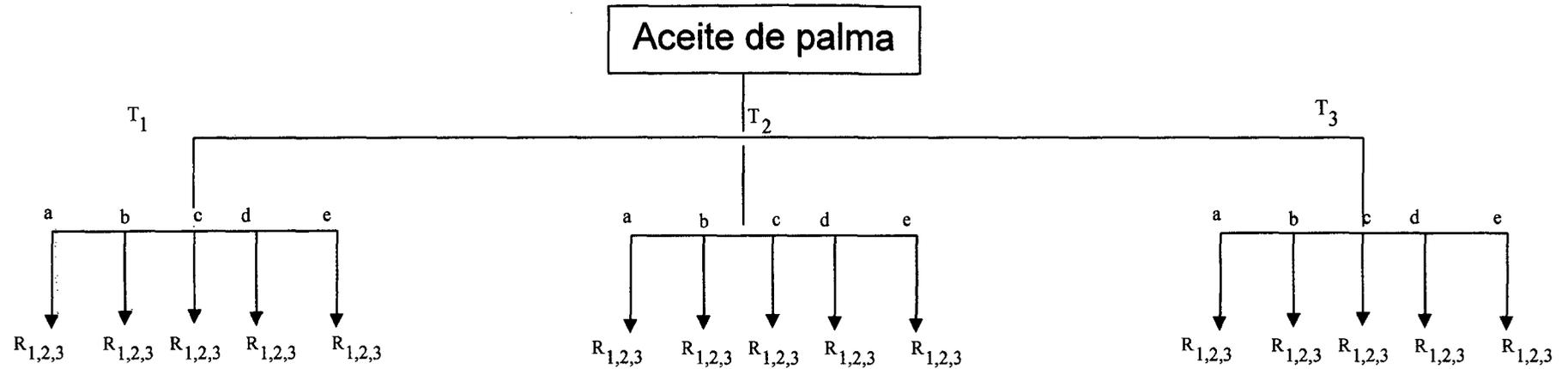
– **Factor “temperatura”**

(T1 = 45 °C, T2 = 55 °C, T3 = 65 °C).

– **“Factor cantidad de metanol”**

a = 20 ml, b = 30 ml, c = 40 ml, d = 50 ml, e = 60 ml.

### 3.4.6. Estructura del diseño experimental



#### Leyenda:

- Aceite de palma = 100 ml por cada combinación.
- T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> y T<sub>3</sub> = Factor Temperatura (T<sub>1</sub> = 45 °C; T<sub>2</sub> = 55 °C; T<sub>3</sub> = 65 °C).
- a, b, c, d y e = Factor Cantidades de metanol (20 ml, 30 ml, 40 ml, 50 ml y 60 ml).
- R<sub>1,2,3</sub> = 3 repeticiones.
- Total de tratamientos = 15.

Figura 3. Diseño experimental para la obtención del biodiésel.

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Índice de acidez de (*Elais guineensis* Jacq) “Aceite de palma”

Cuadro 3. Determinación del índice de acidez del aceite de palma.

Nº de repeticiones	Índice de acidez g de NaOH/L de aceite
1	6,8
2	6,5
3	6,6
Promedio	6,6

Se observa las tres repeticiones realizadas para la determinación del índice de acidez del aceite de palma, obteniéndose los siguientes resultados (6,8; 6,5; 6,6) g de NaOH por litro de aceite con un promedio de 6,6 g de NaOH/L de aceite que viene hacer el índice de acidez promedio del aceite de palma crudo.

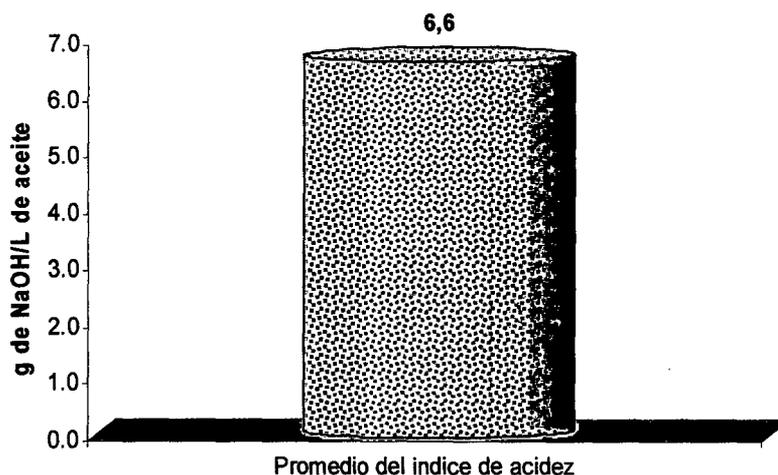


Figura 4. Cantidad en gramos de NaOH por Litro de aceite.

Por lo tanto para neutralizar un litro de aceite de palma crudo se necesita 6,6 g de NaOH, se menciona que el índice de acidez es importante para el proceso de producción de biodiésel (transesterificación), ya que los ácidos grasos libres reaccionan con el catalizador de la transesterificación (NaOH o KOH), formando jabones (saponificación), lo cual lleva a un menor rendimiento en la producción de biodiésel, ZAPATA *et al.* (2007) menciona que cuando hay un exceso de catalizador (NaOH), se forma una pasta inservible, menciona también que si no hay suficiente catalizador, la reacción no se completa, quedando mezclado el aceite con biodiésel y glicerina. Ahora comparando con otros trabajos realizados, CALERO *et al.* (2007), determinó el índice de acidez para el aceite usado de palma que tuvo un valor de 6,25 g de NaOH por litro de aceite y 3,5 g de NaOH por litro de aceite nuevo, CALLE *et al.* (2004) obtuvo el índice de acidez del aceite de palma crudo con un valor de 5,9 g de NaOH por litro de aceite, podemos señalar que el índice de acidez del aceite varía comparando con los datos de otros trabajos, demostrando así que el índice de acidez, depende mucho de los ácidos grasos libres que se encuentran en el aceite a evaluar.

## 4.2. Temperatura óptima para obtener mayor rendimiento de biodiésel

Cuadro 4. Prueba DUNCAN para el factor temperatura a ( $\alpha=0.05$ ).

Factor temperatura (°C)	Promedio biodiésel (ml)	Rendimiento (%)	Significancia
65	86,1	86,1	a
55	85,5	85,5	b
45	83,9	83,9	c

a, b, c : Representan diferencias significativas. En el análisis de varianza (Anexo 1), nos muestra que el factor temperatura resultó significativo por lo tanto se realizó una comparación de medias (Prueba DUNCAN), para saber cual de las temperaturas resultó con mayor significancia.

Podemos observar el efecto del factor temperatura en los rendimientos de biodiésel, mostrando que existe diferencia significativa, en las tres temperaturas evaluadas de (45 °C, 55 °C y 65 °C), presentando promedios de (86,1 ml; 85,5 ml y 83,9 ml) de biodiésel, obteniéndose el promedio más alto a una temperatura de 65 °C con un rendimiento de 86,1 % frente a las demás temperaturas. Observando con mayor detalle en la Figura 5.

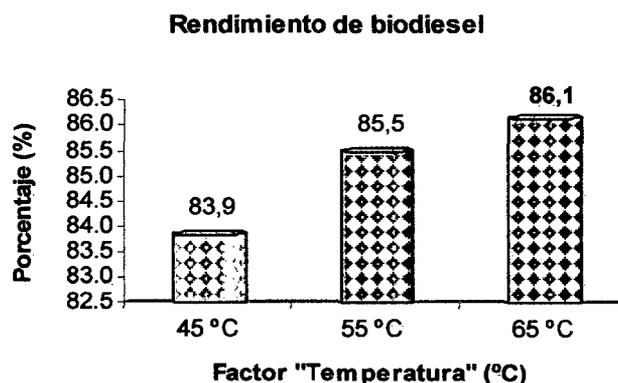


Figura 5. Influencia del factor temperatura en el rendimiento de biodiésel.

Se puede apreciar detalladamente en la figura 5, que al aumentar la temperatura, se logra mayores rendimientos de biodiésel observando que la mejor temperatura resultó a 65 °C con un rendimiento de 86,1 %, seguido por la temperatura de 55 °C con un rendimiento de 85,5 %, siendo el nivel de temperatura de menor significancia a 45 °C, con un rendimiento bajo de 83,9 % resultando la temperatura óptima para obtener un mayor rendimiento de biodiésel a 65 °C, CASTRO *et al.* (2007) menciona que para lograr un buen rendimiento de biodiésel a partir de aceites vegetales y utilizando como catalizador una base (NaOH ó KOH), se necesita un rango de temperatura entre 50 °C a 80 °C, logrando así, mejores resultados a una temperatura de 60 °C, ZADRA (2006) realizó estudios en producción de biodiésel a partir de aceite de girasol utilizando NaOH como catalizador, obteniendo un rendimiento de 86,71 % a una temperatura de 65 °C, resultando similar al rendimiento obtenido en la investigación. Así mismo, IIDEPROQ (2007) obtuvo resultados confiables y mayores rendimientos de biodiésel a partir de residuos de grasas de ganado vacuno y cerdos a un rango de temperatura de 60 a 75 °C, obteniendo un rendimiento de 100 % de biodiésel. El factor de temperatura es fundamental en el rendimiento de biodiésel, tal como menciona CASTRO *et al.* (2007), una condición muy importante para que se lleve a cabo la reacción de transesterificación de los ácidos grasos es un adecuado nivel de temperatura.

### 4.3. Cantidad de metanol óptimo para obtener mayor rendimiento de biodiésel

Cuadro 5. Prueba DUNCAN para el factor Metanol a ( $\alpha = 0.05$ ).

Factor Metanol ( ml )	Promedio biodiésel (ml)	Rendimiento (%)	Significancia
60	87,82	87,8	a
20	86,06	86,1	a
50	84,63	84,6	b
40	83,87	83,9	b
30	83,40	83,4	b

a, b: Representa diferencia significativas. En el análisis de varianza (Anexo 1), nos muestra que el factor Metanol resultó también significativo por lo tanto se realizó una comparación de medias (Prueba DUNCAN), para saber cual de las cantidades resultó con mayor significancia.

Se observa en la prueba DUNCAN, las diferencias significativas entre las cantidades de metanol , resultando el mayor promedio de biodiésel a una cantidad de metanol de 60 ml con un rendimiento de 87,8 % ,obteniendo el valor más alto frente a las demás cantidades de metanol, por lo tanto es el promedio con mayor significancia, seguidamente la cantidad de 20 ml de metanol obtuvo un rendimiento de 86,1 % siendo este el segundo valor más alto y no muy distante del resultado obtenido a 60 ml. Estadísticamente el rendimiento obtenido a 60 ml y 20 ml no son significativos entre sí, pero si hay diferencia significativa comparando con las demás cantidades de metanol ( Figura 6).

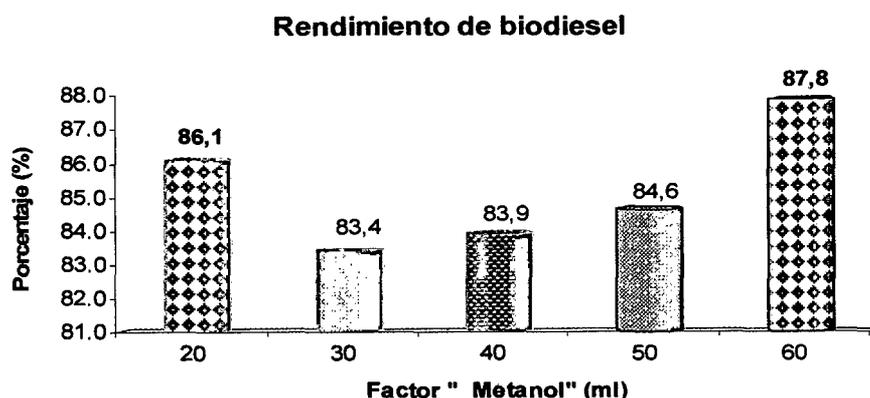


Figura 6. Influencia del factor metanol en el rendimiento de biodiésel.

En la figura 6 se aprecia el mayor rendimiento obtenido de biodiésel a una cantidad de 60 ml con un valor de 87,8 %, seguido por la cantidad de 20 ml con un rendimiento de 86,1 %, siendo estos dos valores los más altos obtenidos a diferencia de las demás cantidades como se muestra en la prueba DUNCAN, estos dos valores obtenidos no son significativos entre ellos pero si comparando con las cantidades de (30 ml, 40 ml, y 50 ml) que obtuvieron promedios bajos. Con estos resultados se deduce estadísticamente que es suficiente una cantidad de 20 ml de metanol para obtener rendimientos similares a la cantidad de 60 ml de metanol, por lo tanto no existe diferencia significativa entre ellos, según lo revisado CALERO *et al.* (2007) reportó en su investigación que generalmente la cantidad de metanol necesaria para producir biodiésel de aceite de cocina nuevo o usado es un 20 % referente al volumen del aceite, es decir para un litro de aceite, utilizó 0,2 litros de metanol. Así mismo hace referencia IIDEPROQ (2007), que para convertir 100 ml de aceite o grasa en biodiésel, solo es necesario como máximo 25 ml de metanol, obteniendo un rendimiento de 100 %.

**4.4. Interacción de temperatura y cantidad de metanol adecuado para tener un mayor rendimiento de biodiésel a partir del aceite de palma.**

**Cuadro 6. Prueba DUNCAN para la combinación de temperatura y metanol a ( $\alpha = 0,05$ ).**

Tratamiento	Vol. de aceite	Factores		Biodiésel puro (ml)	Rendimiento (%)	Significancia	
		Temperatura (°C)	Metanol (ml)				
T5	100	45	60	89,3	89,3	a	
T10	100	55	60	89,1	89,1	a	
T11	100	65	20	88,9	88,9	a	
T8	100	55	40	87,4	87,4	b	
T14	100	65	50	86,3	86,3	b	c
T12	100	65	30	85,6	85,6		c
T1	100	45	20	85,3	85,3		c
T15	100	65	60	85,1	85,1		c
T13	100	65	40	84,9	84,9		c d
T6	100	55	20	84,0	84,0		d
T9	100	55	50	83,9	83,9		d
T4	100	45	50	83,6	83,6		d
T7	100	55	30	83,0	83,0		d
T2	100	45	30	81,6	81,6		d
T3	100	45	40	79,3	79,3		e

a, b, c, d, e: representan diferencias significativas. En el análisis de varianza (Anexo 1), nos muestra que la interacción o la combinación de los factores de "temperatura y cantidad de metanol" también resultó significativo por lo tanto se realizó una comparación de medias (Prueba DUNCAN), para saber cual de las combinaciones resultó con mayor significancia.

Observamos como varía el rendimiento de biodiésel en volumen de esteres metílicos, resultante de la reacción de transesterificación, en cada uno de los 15 tratamientos que viene hacer la combinación de los factores de (temperatura y cantidad de metanol), observando que existe diferencia significativa.

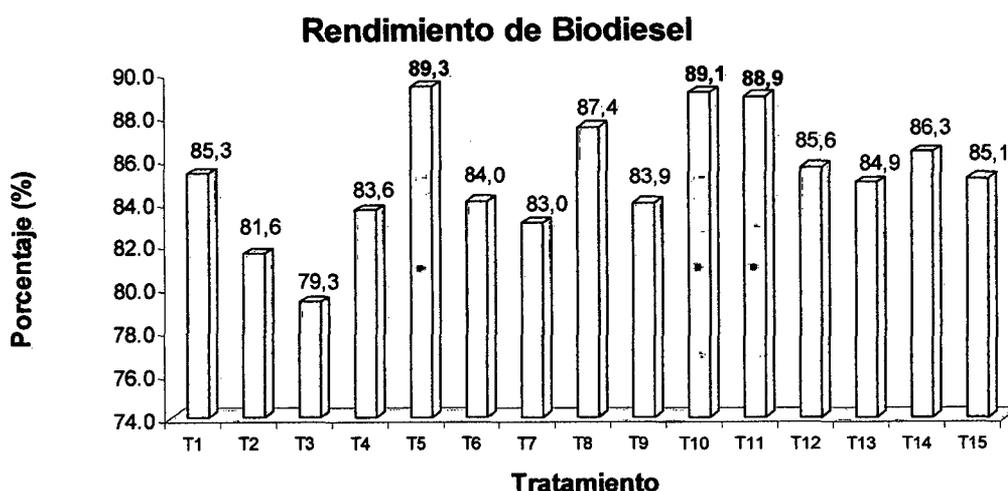


Figura 7. Combinación de temperatura y cantidad de metanol en el rendimiento de biodiésel.

Se puede identificar que las 3 combinaciones que producen mayor rendimiento de biodiésel, las cuales son el tratamiento 5 (temperatura de 45 °C y 60 ml de Metanol), obteniendo el rendimiento más alto de 89,3 %, seguido por el tratamiento 10 (temperatura de 55 °C y 60 ml de Metanol), con un rendimiento de 89,1 % y el tratamiento 11 (temperatura de 65 °C y 20 ml de metanol), siendo el tercer valor más alto, obteniendo un rendimiento de 88,9 % y el tratamiento que obtuvo el menor rendimiento de todos los tratamientos evaluados es el tratamiento 3 (temperatura de 45 °C y 40 ml de

Metanol), con un rendimiento bajo de 79,3 %, la prueba DUNCAN nos muestra que no existe diferencia significativa entre los tratamientos (T5, T10 y T11), resultando rendimientos estadísticamente iguales, estos tres tratamientos fueron los que obtuvieron mayor rendimiento de biodiésel, comparando con los demás, el T5 y T10, utilizaron una cantidad de 60 ml de metanol en su combinación, este exceso de metanol, desde el punto de vista económico no es recomendable comparando con el tratamiento T11 que utiliza una cantidad de 20 ml, siendo recomendable por la poca cantidad de metanol que se combina para obtener rendimientos estadísticamente iguales a los tratamientos T5 y T10, por lo tanto la temperatura y la cantidad de metanol adecuado para un mayor rendimiento es el T11, obteniendo un rendimiento de 88,9 %, comparando dichos resultados con otros trabajos bibliográficos CALERO *et al.* (2007) utilizó aceite de palma refinado para la producción de biodiésel, lo cual realizó una combinación de temperatura con metanol de (54 °C y 20 ml) obteniendo un rendimiento mayor de 88,7 %. Así mismo, IIDEPROQ (2007), al realizar combinaciones de temperatura con metanol (75 °C y 25 ml), obtuvo un rendimiento mayor de 99 %, RIVEROS y MOLANO (2006) utilizaron combinaciones exploratorias de temperatura con metanol de (135 °C y 30 ml), obteniendo un rendimiento bajo de 75 %. Por lo tanto al no realizar una combinación de temperatura y cantidad de metanol adecuada, esto va influenciar en el rendimiento del biodiésel de manera negativa.

#### 4.5. Pruebas de calidad del biodiésel obtenido a partir de aceite de palma

Cuadro 7. Prueba de calidad de viscosidad, densidad y pH.

Nº de tratamiento	Biodiésel puro (ml)	Rendimiento (%)	pH	Densidad a 15 ° C (g/ml)	Viscosidad a 40 ° C mm <sup>2</sup> /s
T5	89,3	89,3	6	0,865	2,81
T10	89,1	89,1	7	0,867	2,92
T11	88,9	88,9	7	0,868	2,80
T8	87,4	87,4	7	0,868	2,89
T14	86,3	86,3	7	0,865	2,72
T12	85,6	85,6	6	0,870	2,85
T1	85,3	85,3	7	0,862	2,94
T15	85,1	85,1	7	0,865	2,60
T13	84,9	84,9	6	0,865	2,89
T6	84,0	84,0	7	0,870	2,81
T9	83,9	83,9	7	0,867	2,93
T4	83,6	83,6	6	0,865	2,90
T7	83,0	83,0	6	0,862	2,93
T2	81,6	81,6	7	0,867	2,81
T3	79,3	79,3	7	0,865	3,03

Los tratamientos que resultaron con mayores rendimientos de biodiésel, según las pruebas de calidad que se realizaron a todos los tratamientos (densidad a 15 ° C, viscosidad a 40 ° C y pH), siendo pruebas necesarias para el uso del biodiésel en motores diesel, se puede observar que el T5 tiene una densidad de 0,865 g/ml, viscosidad de 2,81 mm<sup>2</sup>/s y un pH de 6, el T10, obtuvo una densidad de 0,867 g/ml, viscosidad de 2,92 mm<sup>2</sup>/s y un pH de 7 y el T11, una densidad de 0,868 g/ml, viscosidad de 2,80 mm<sup>2</sup>/s y un pH de 7, según las normas de calidad para el uso del biodiésel como combustible, los tratamientos T5, T10 y T11 cumplen con el rango de

densidad a 15 °C, aceptable según la Norma Europea, pero no cumple con respecto al rango de viscosidad a 40 °C según esta norma, pero sí a la Norma de Estados Unidos, encontrándose dentro del rango aceptable, con respecto al pH el T10 y el T11 resultaron con un pH neutro, a comparación con el T5, que resultó con un pH relativamente ácido, como menciona CALERO *et al.* (2007), la calidad del producto acabado puede comprobarse visualmente y midiendo su pH, para ello debe ser neutro (pH = 7), según COELLO y CASTRO (2007), las principales normas técnicas para el biodiésel son la Europea (En 14214) y la Estadounidense (ASTM). Del mismo modo, según estas dos normas podemos mencionar que los tratamientos de mayor rendimiento y mejor calidad son el T10 y T11, debido a que estos cumplen con las normas de calidad establecidas. Así mismo, es importante recalcar lo que menciona COELLO y CASTRO (2007), que los estándares de calidad deben estar de acuerdo con la realidad nacional, copiar estándares extranjeros puede constituir una barrera, ya que en muchos casos estos estándares están diseñados para controlar el mercado.

## V. CONCLUSIONES

1. Los valores obtenidos del índice de acidez en las tres repeticiones fueron (6,8; 6,5 y 6,6) g de NaOH/L de aceite, obteniendo un promedio de 6,6 g de Hidróxido de sodio (catalizador alcalino) por litro de aceite de palma crudo.
2. La temperatura óptima para obtener un mayor rendimiento de biodiésel, a partir de aceite de palma crudo es de 65 °C obteniendo un rendimiento de 86,1 % y las cantidades de metanol óptimas para un mayor rendimiento de biodiésel, es de 60 ml y 20 ml con rendimientos de 87,8 % y 86,1 % obteniendo el rendimiento mas bajo a una cantidad de 30 ml de metanol con 83,4 %.
3. El tratamiento 11 es el más adecuado para obtener un mejor rendimiento y esterés metílicos (biodiésel), resultando el tratamiento con más bajo valor el tratamiento 3 (45 °C y 40 ml), obteniendo un rendimiento de 79,3 %.

4. Los tratamientos de mayor rendimiento que cumplieron con las pruebas de calidad fueron los tratamientos 10 y 11 con densidades de (0,867 g/ml y 0,868 g/ml) y viscosidades de (2,92 mm<sup>2</sup>/s y 2,80 mm<sup>2</sup>/s) y un pH neutro.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Se recomienda que luego de efectuada la reacción de transesterificación durante la dos horas, se debe dejar reposar durante 24 horas o a más tiempo para que se decante totalmente la glicerina y obtener un biodiésel con menos impurezas.
2. Los lavados con agua deben ser realizados con agua destilada, ya que el agua corriente contiene sales de sodio y potasio, que pueden producir jabones debido que en el biodiésel impuro todavía hay pequeñas cantidades de ácidos grasos sin reaccionar.
3. Realizar este tipo de investigaciones con otras especies oleaginosas con la posibilidad de obtener biodiésel a partir de ellas, de esta manera fomentar el desarrollo sostenible de nuestra amazonia.
4. La glicerina obtenida como subproducto del proceso de biodiésel se debe aprovechar y tomarlo como un producto que puede ser utilizado en las industrias para múltiples beneficios.
5. Se recomienda realizar un análisis económico en el proceso de obtención de biodiésel para ver su rentabilidad.

## VII. ABSTRACT

It achieved won the transesterification of acids fatty of palm oil with methanol, giving as an "biodiésel, using sodium hydroxide as catalyst, for it was determined the acid oil, which was 6,6 g NaOH / L oil or to neutralize free fatty acids of a liter of crude palm oil requires 6,6 g of NaOH, this was after the treatments, each treatment was used for 100 ml of palm oil and treatment was the combination of Two factors, temperature (45 °C, 55 °C and 65 °C) and of methanol (20 ml, 30 ml, 40 ml, 50 ml and 60 ml), using a completely randomized factorial design (3A x 5B), making a total of 15 treatments or combinations, the results obtained in the ANVA and with corroborating evidence DUNCAN ( $p < 0,05$ ), determined that the optimum temperature factor for increased performance of biodiésel was 65 °C, with a yield of 86,1% and optimum amount of methanol factor for increased performance was 20 ml and 60ml yields of 86,1% and 87,8%, is statistically equal, and the combination or treatment (temperature and methanol to obtain adequate yields and higher quality of biodiésel is the treatment 11 ( 65 °C y 20 ml) with a yield of 88,9% because that does not consume too much methanol to obtain high yields of biodiésel, resulting of the combination of low quality (45 °C y 60 ml).

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CALERO, W., CHICAIZA, E., CHICAIZA, W., VIZUETE, D. 2007. Síntesis y Refinación de biodiésel y glicerina obtenidos a partir de grasa vegetal. [En línea]: Universidad Central de Ecuador Facultad de Ciencias Químicas. (<http://www.monografias.com/trabajos-pdf/sintesis-refinacion-biodiesel/sintesis-refinacion-biodiesel.pdf>, Informe, 06 nov. 2008).
- CALLE, J., COELLO, J., CASTRO, P., NAZARIO, M., ACOSTA, F. 2004 Opciones para la producción de biodiésel a pequeña escala en el Perú. ITDG – UNALM. [En línea]: CONCYTEC. (<http://www.slideshare.net/peyg/biodiesel.pdf> Informe, 30 nov 2008).
- CASTRO, P., COELLO, J., CASTILLO, L. 2007. Opciones para la producción y uso del biodiésel en el Perú. [En línea]: Soluciones Prácticas-ITDG; Lima (<http://www.scielo.org.pe/pdf/mc/v2n2/a06v2n2.pdf>, informe, 05 oct. 2008).
- COELLO, J., CASTRO, P. 2007. Oportunidades (y puntos por resolver) para la Producción y Uso de Biodiésel en el Perú s.n.t [En línea] (<http://www>.

itdg.org.pe/publicaciones/pdf/articulo%20biodiesel.pdf informe, 09 nov 2008).

CHAVEZ, M. 2008. Cultivos industriales tropicales "Café, Cacao y Palma Aceitera" (Eco fisiografía de la palma aceitera) 2ed unas Tingo Maria, Perú 15 -20 p.

GARRIDO, A. 2007. La producción de biodiésel en el Perú. Dirección General de Hidrocarburos Ministerio de Energía y Minas Lima, Perú [En línea] (<http://www.olade.org.ec/biocombustibles/Documents/ponencias/d%C3%ADa3/Sesion%2010%20-%20Dia%203/AngieGarrido.pdf>, documentos, 22 oct. 2008).

GONZALES, M. 2003. Usando restos para movernos. Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, paraguay [En línea]. (<http://www.dei.uc.edu.py/tai2003-2/biodiesel/Index.pdf>. documento 05 dic 2008).

GRUPO TÉCNICO de BIOCMBUSTIBLES. 2002. Propuesta para la promoción del uso de biocombustibles líquidos en el Perú. Consejo Nacional del Ambiente. [En línea] ([http://www.conam.gob.pe/documentos/N\\_biocombustibles/inf\\_final\\_ct\\_biocomb.pdf](http://www.conam.gob.pe/documentos/N_biocombustibles/inf_final_ct_biocomb.pdf), Informe, 23 oct. 2008).

GUERRERO, J., RODRIGUEZ, D., SERRATTO, L. 2006. Producción de biodiésel a partir de aceite de palma crudo, Escuela de Ingeniería Química Universidad de valle 2 ed Bogotá, Colombia 24 p.

IIDEPROQ, 2007. Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos. Universidad Mayor de San Andrés.[En línea]:([http://www.pncc.gov.bo/esp/pqpncc/PRIMERA%20CONVOCATORIA/UMSA-IIDEPROQ/doc%20biodiesel\\_UMSA\\_IIDEPROQ\\_PNCC.pdf](http://www.pncc.gov.bo/esp/pqpncc/PRIMERA%20CONVOCATORIA/UMSA-IIDEPROQ/doc%20biodiesel_UMSA_IIDEPROQ_PNCC.pdf), proyecto,20 agosto. 2008).

MARTINEZ, M. 2006. Utilización de aceites vegetales usados para la obtención de biodiésel; Laboratorio de Procesos Químicos y Bioquímicos Integrados Universidad Complutense de Madrid. 1 ed. Madrid, España, Bioquímicos 51 p.

RAIGADA, R. 2007. Manual técnico para el cultivo de la palma aceitera; Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas, DEVIDA. 1ra ed Lima, Perú. Asociación de Promoción Agraria. 24 p.

RIVEROS, L., MOLANO, M. 2006. Transesterificación del aceite de palma con metanol por medio de una catálisis heterogénea empleando un catalizador ácido "Departamento de Ingeniería Química, Universidad de los Andes" 1 ed. Bogotá D.C., Colombia 44 p.

RECINOS, G., RODRIGUEZ, A., EAOMANS, J. 2005. Metodología para la fabricación de biodiésel a partir del aceite de palma africana (*Elais guineensis*). Universidad Earth. Costa Rica 51-59 p.

RUTPRAC. 2006. "Manual técnico para la determinación de grasas y aceites" s.n.t [En línea] ([http://www.webs.ulpgc.es/hica/PRAC/RUTPRAC/ACEIT PDFs/TEORPRACEI.pdf](http://www.webs.ulpgc.es/hica/PRAC/RUTPRAC/ACEIT%20PDFs/TEORPRACEI.pdf), documentos, 26 oct. 2008).

RYAN, D. 2004. Biodiésel - A Primer "FARM ENERGY TECHNICAL NOTE" [En línea]: ATTRA (<http://attra.ncat.org/attra-pub/PDF/biodiesel.pdf>. documento 01 dic 2008).

SETIÉN, Á. 2005. Girasoles generadores de energía [En línea]: Proyecto ([http://www.jccm.es/museociencias/ecer/trabajos%20ECER2006/N\\_S\\_Mercedes\\_girasoles.pdf](http://www.jccm.es/museociencias/ecer/trabajos%20ECER2006/N_S_Mercedes_girasoles.pdf). documento 03 dic 2008).

VALDERRAMA, L. 2007. Concentración de minerales laboratorio N° 4 "Determinación de viscosidad" [En línea]: Universidad de Atacama de Chile (<http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Valderrama/LAB%204%20VISCOSIDAD.pdf> boletín técnico, 28 nov 2008).

WHITMAN, D. 2007. Biodiésel. Producción y aplicaciones s.n.t [En línea] ([http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide\(español\).pdf](http://www.whitmandirectaction.org/downloads/documents/biodieselguide(espa%20ol).pdf) informe, 08 nov 2008).

ZADRA, R. 2006. Improving Process Efficiency by the Usage of Alcoholates in the Biodiesel Production "Marketing and Sales Industrial Chemicals – BASF" [En línea]: IV Fórum Brasil, Alemanha sobre Biodiésel – ARACATUBA.(<http://www.ahkbrasil.com/inwent/IVForum/RogérioZadra.pdf>. documento. 01 dic 2008).

ZAPATA, C., MARTÍNEZ, I., ARENAS, E., ENERO, C. 2007. Producción de biodiésel a partir de aceite crudo de palma: segunda evaluación económica. [En línea]: Medellín, Colombia [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0012-73532007000100009&script=sci\\_arttext,journals](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0012-73532007000100009&script=sci_arttext,journals), 14 nov. 2008).

## IX. ANEXOS

## Anexo 1. Análisis de varianza

Cuadro 8. Análisis de varianza del diseño factorial 3 A x 5 B completamente al azar

Fuente de variación	Suma de cuadrados	g.l.	Cuadrado medio	F. cal.	Significación n
Factor temperatura	41,61	2	20,80	3,32	,049
Factor metanol	116,35	4	29,09	3,49	,019
Temperatura * Metanol	170,74	8	21,34	2,56	,029
Error	250,02	30	8,33		
Total corregido	578,74	44			

CV = 3.4 %

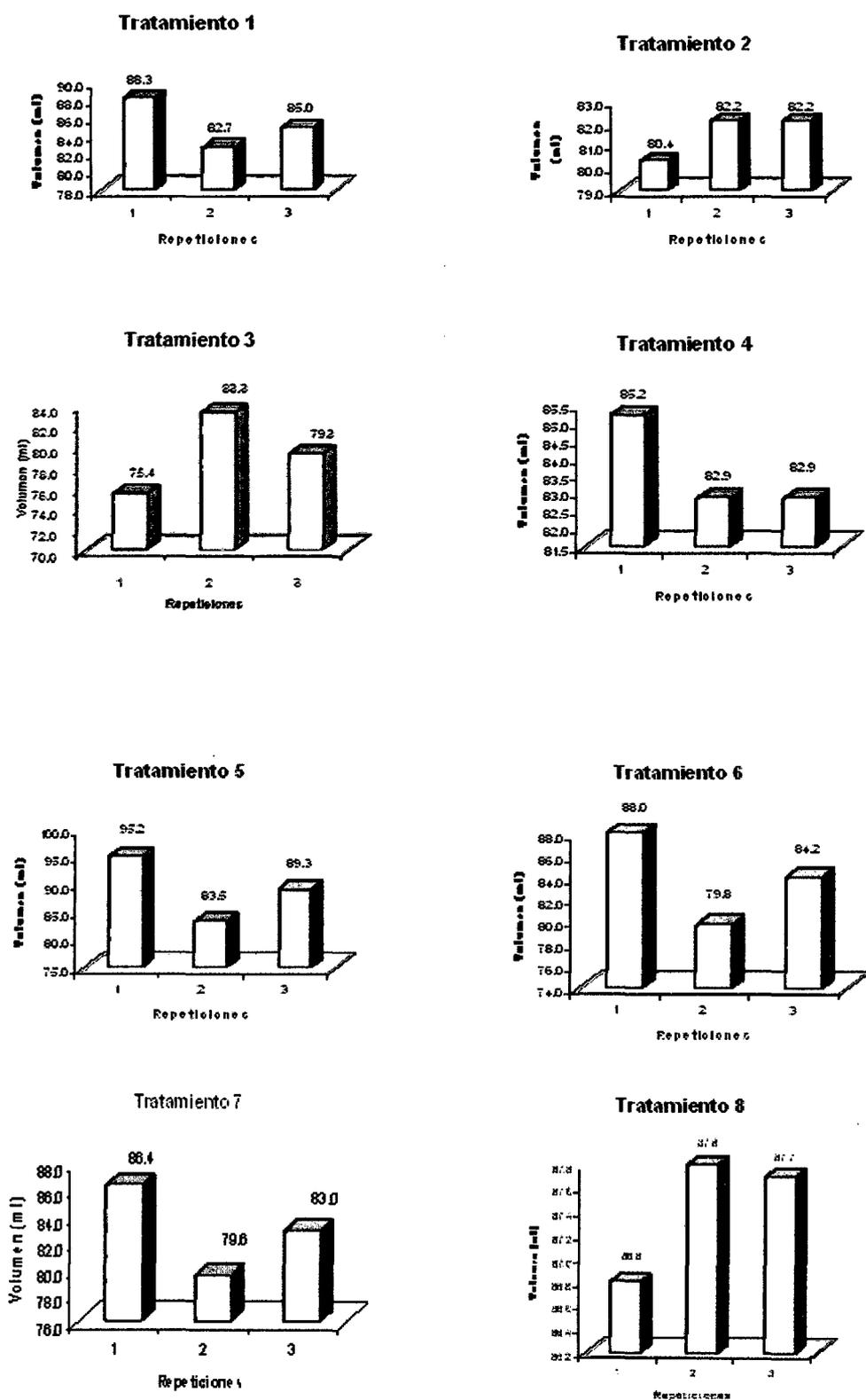
Podemos observar que en la última columna de la tabla se reporta la significación, es decir, la probabilidad (valor P) de cometer error en la prueba de significación estadística. Una cifra ampliamente utilizada en ingeniería como riesgo aceptable de falla en la prueba es el nivel 0,05. Por tanto se considera efecto significativo cuando el valor de significación reportado sea menor de 0,05; aplicando este criterio, resulta como efecto significativo el nivel de temperatura (valor P = 0,049), la cantidad de metanol utilizada (valor P = 0,019) y existe una interacción significativa (valor P = 0,029), Por lo cual se analizó cada uno de los factores.

Cuadro 9. Análisis de varianza para los 15 tratamientos

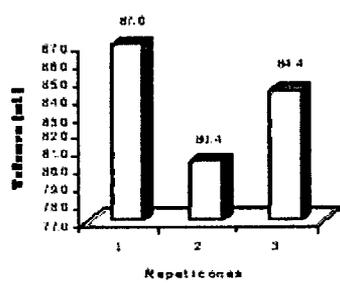
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tratamientos	328,72	14	23,48	2,817	,008
Error	250,02	30	8,33		
Total	578,74	44			

Resulta muy significativa la diferencia de promedios para los 15 tratamientos por que es menor a 0,05.

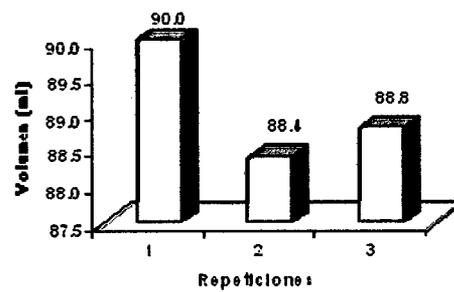
## Anexo 2. Volumen de biodiésel por tratamiento con sus respectivas repeticiones



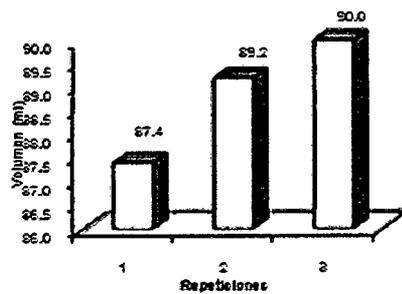
Tratamiento 9



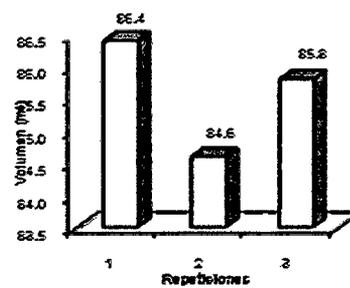
Tratamiento 10



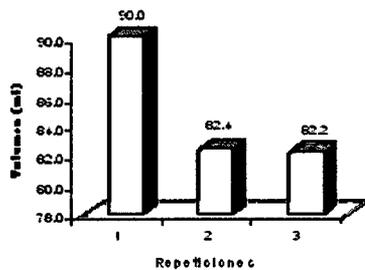
Tratamiento 11



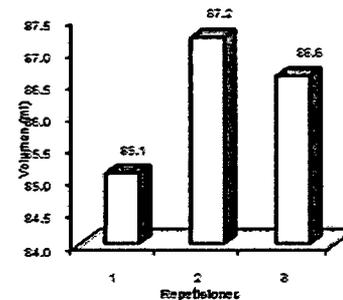
Tratamiento 12



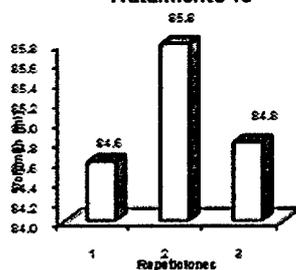
Tratamiento 13



Tratamiento 14



Tratamiento 15



## Anexo 3. Imágenes del proceso de ejecución de la investigación

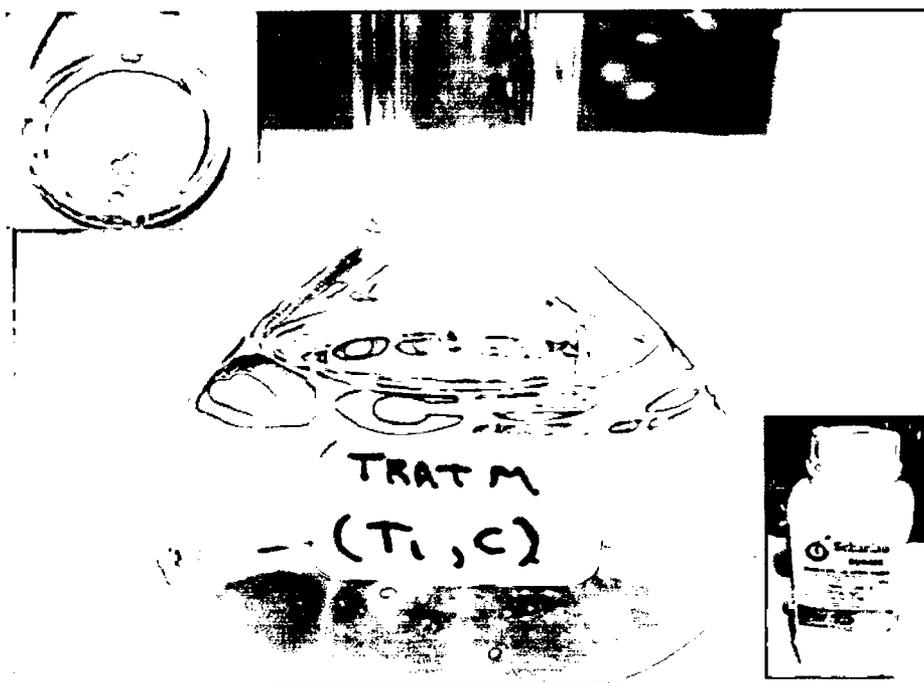


Figura 8. Preparación del metóxido de acuerdo al tratamiento (NaOH y metanol).

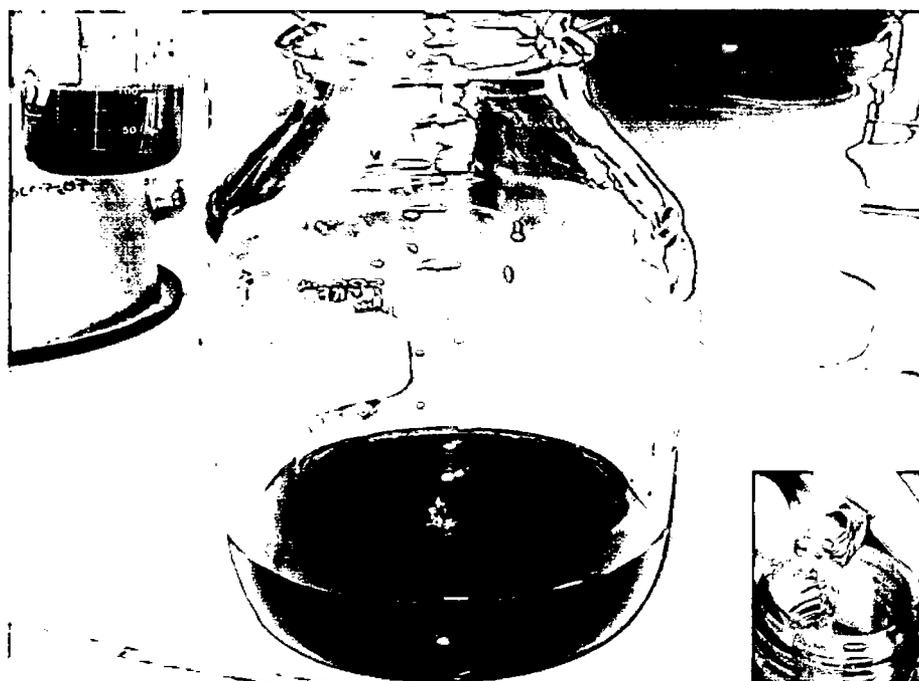


Figura 9. Agregando el metóxido después del calentamiento del aceite a 55 °C.



Figura 10. Proceso de transesterificación de los ácidos grasos del aceite de palma para la obtención de biodiésel, manteniendo la temperatura, según el tratamiento.

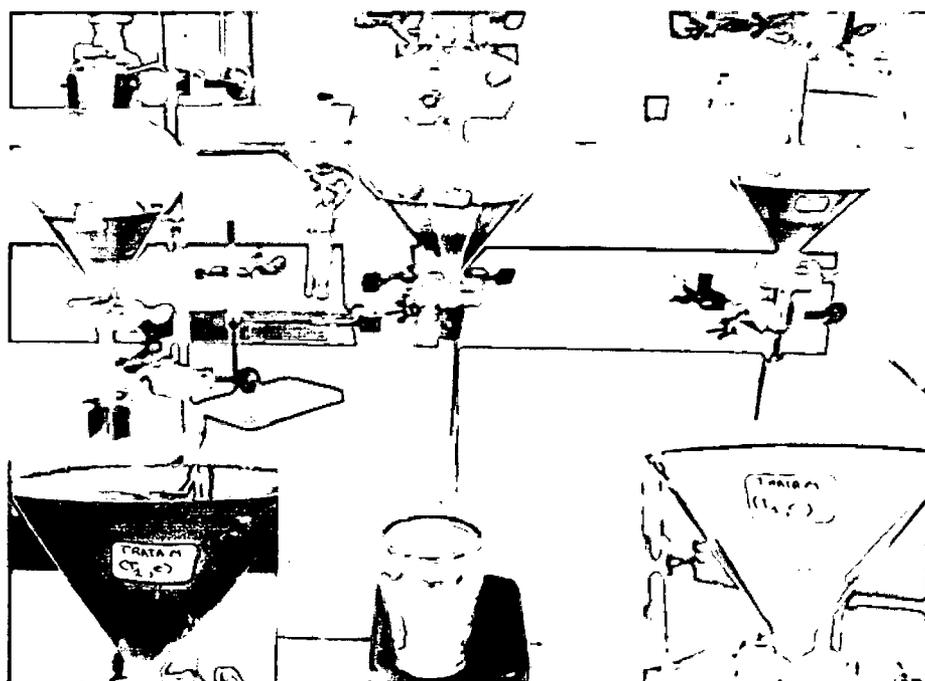


Figura 11. Separación del biodiésel de la glicerina.



Figura 12. Primer, segundo y tercer lavado del biodiésel con agua destilada a una temperatura de 40 °C.

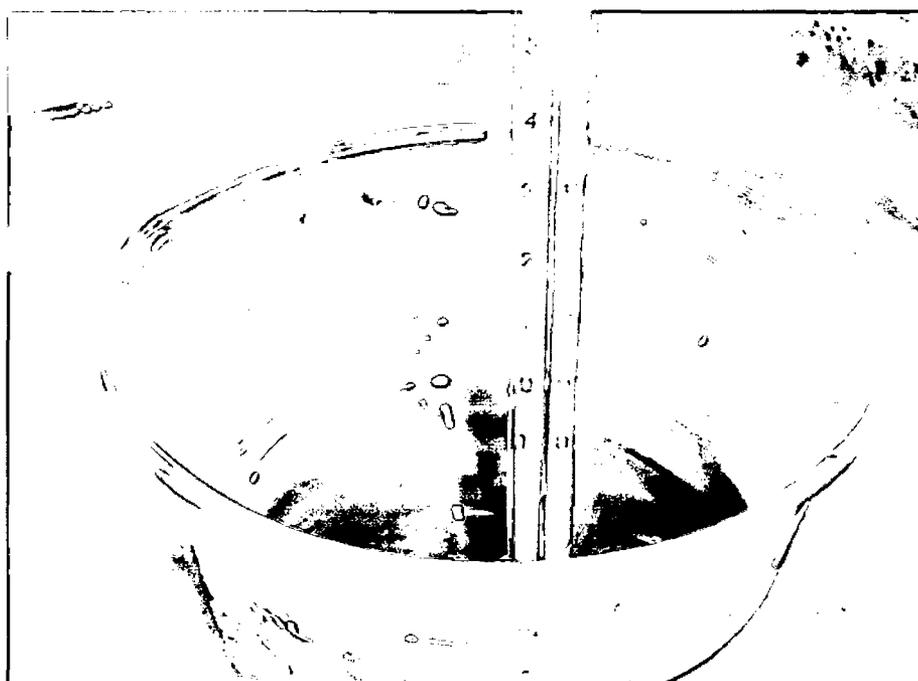


Figura 13. Secado del biodiésel manteniendo una temperatura de 48 °C hasta la evaporación total del agua.

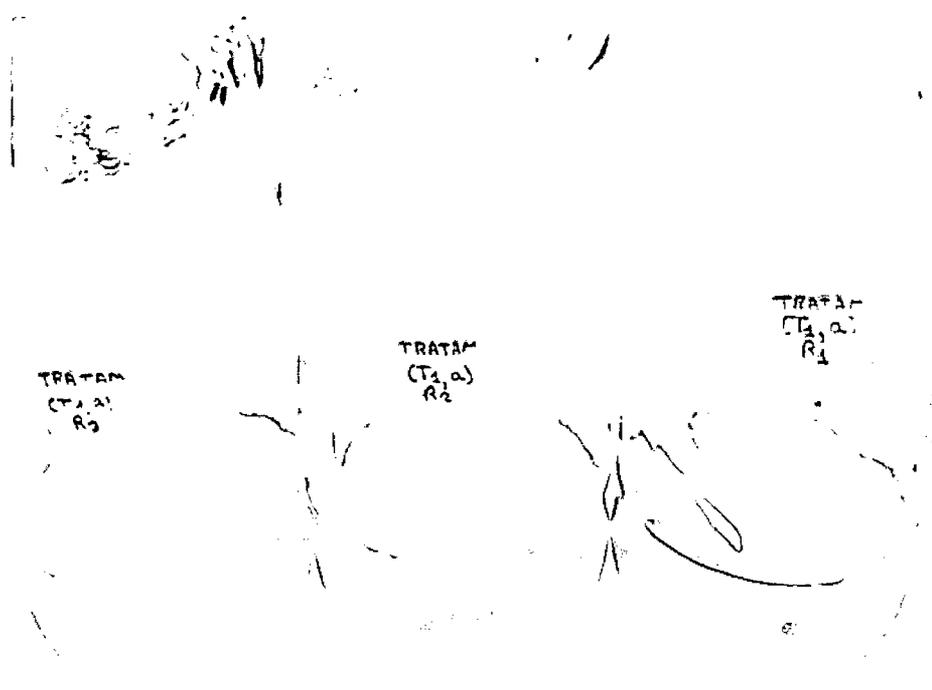


Figura 14. Obtención de biodiésel puro y seco por tratamiento y repeticiones.

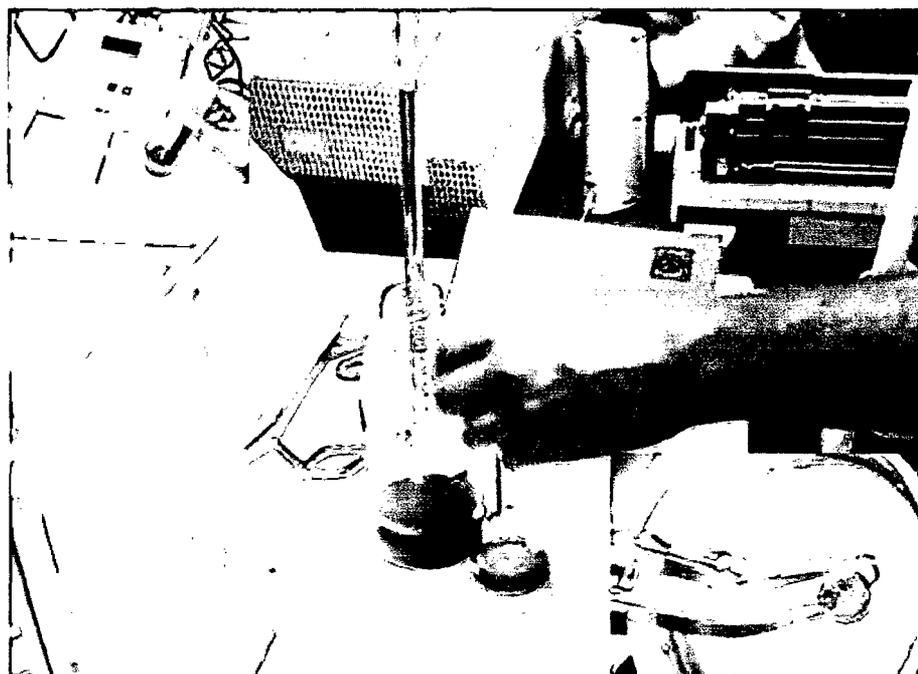


Figura 15. Pruebas previas de calidad del biodiésel por tratamiento (viscosidad 40 °C, densidad a 15 °C y pH).



Figura 16. Probando el biodiésel en un volumen de 20 % en un automóvil Toyota Station Wagon.



Figura 17. Ingresando la mezcla de biodiésel y diesel al automóvil.



Figura 18. El automóvil encendido con la mezcla de biodiésel.



Figura 19. El automóvil en movimiento con el biocombustible.

## X. GLOSARIO

1. **Ácidos grasos:** componentes más importantes de las grasas.
2. **Catalizador:** Sustancia que se añade a una reacción química con el fin de facilitarla o llevarla a cabo.
3. **Esteres Metílicos:** Compuestos formados por la combinación de ácidos y Metanol.
4. **Metóxido:** Es la disolución del hidróxido de sodio (NaOH) en el metanol.
5. **Rendimiento:** Resultado de dividir el volumen obtenido entre el volumen consumido, expresado en porcentajes.
6. **Transesterificación:** Es el proceso de intercambiar el grupo alcoxi de un éster por otro alcohol. Estas reacciones son frecuentemente catalizadas mediante la adición de un ácido o una base.
7. **Valoración:** Método para determinar la concentración de un sustrato o analito, las medidas de volumen juegan un papel importante en la titulación o valoración, por eso se llama también análisis volumétrico.