



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN ALIMENTOS

CARRERA INGENIERÍA BIOQUÍMICA



**Aprovechamiento de la grasa bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato
para la obtención de biodiésel como combustible de origen animal**

Trabajo de Titulación, modalidad de Experiencias Prácticas de Investigación y/o Intervención, previo a la obtención del Título de Ingeniero Bioquímico, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos

Autor: Diego Hernán Gómez Miranda

Tutor: Ing. Mg. Manolo Alexander Córdova Suárez

Ambato-Ecuador

Julio 2016

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. Mg. Manolo Alexander Córdova Suárez

CERTIFICA:

Que el presente trabajo de titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación, modalidad de Experiencias Prácticas de Investigación y/o Intervención, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad.

Ambato, 09 de Junio del 2016



Ing. Mg. Manolo Alexander Córdova Suárez

C.I. 180284250-8

TUTOR

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Diego Hernán Gómez Miranda, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Proyecto de Investigación, previo a la obtención del título de Ingeniero Bioquímico son absolutamente originales, auténticos y personales; a excepción de las citas.



Diego Hernán Gómez Miranda

C.I. 180463846-6

AUTOR

APROBACIÓN DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos profesores Calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad de Experiencias Prácticas de Investigación y/o Intervención, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia en Ingeniería en Alimentos de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a large, loopy oval. The signature appears to be "MA-AZAR" followed by some illegible scribbles.

Presidente de Tribunal

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a large, loopy oval. The signature appears to be "Dayana Morales Acosta" followed by some illegible scribbles.

Ph. D. Dayana Cristina Morales Acosta
C.I. 180413557-0

A handwritten signature in blue ink, enclosed in a large, loopy oval. The signature appears to be "Isabel Pazmiño" followed by some illegible scribbles.

Ing. Mg. Isabel Cristina Pazmiño Mayorga
C.I. 171608417-1

Ambato, 06 de Julio del 2016

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto de Investigación o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este Proyecto dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.



Diego Hernán Gómez Miranda

C.I. 180463846-6

AUTOR

AGRADECIMIENTO

La vida se encuentra plagada de retos y uno de ellos ha sido la universidad. Tras verme dentro de ella me he dado cuenta que más allá ser un reto ha sido una base no solo para el entendimiento del campo del cual me visto inmerso, sino para lo que concierne mi vida y futuro.

Este logro les agradezco a mis padres y a mis hermanos por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, por ser parte de mis alegrías y el apoyo incondicional.

También agradezco al Ingeniero Manolo Córdova y al Ingeniero Iñaki Angós, quienes me ayudaron con este trabajo y lograr este objetivo.

ÍNDICE DEL CONTENIDO

Introducción	1
--------------------	---

CAPITULO I

EL PROBLEMA

1.1.- Tema	4
1.2.- Justificación	4
1.3.- Objetivos	5
1.3.1.- Objetivo general.....	5
1.3.2.- Objetivos específicos	5

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- Antecedentes investigativos.....	7
2.2.- Hipótesis	8
2.3.- Señalamiento de variables de la hipótesis.....	9

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Materiales y métodos	10
3.1.1.- Obtención de la materia prima.....	10
3.1.2.- Extracción de la grasa	11
3.1.3.- Refinamiento de la grasa.....	12
3.1.4.- Evaluación de parámetros fisicoquímicos	13
3.1.4.1.- Determinación de la densidad.....	13
3.1.4.2.- Determinación de la viscosidad cinemática.....	14
3.1.4.3.- Determinación del índice de refracción	14
3.1.4.4.- Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres	15
3.1.4.5.- Determinación del índice de peróxidos	15
3.1.5.- Estudio de las condiciones de transesterificación.....	16
3.1.6.- Proceso de transesterificación con calor.....	16
3.1.7.- Purificación del biodiésel.....	17
3.1.8.- Evaluación de las propiedades fisicoquímicas.....	18
3.2.- Diseño experimental	21
3.2.1.- Análisis estadístico	22

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Análisis y discusión de resultados	23
--	----

4.1.1.- Análisis del método de extracción de grasa por fusión seca.....	23
4.1.2.- Análisis del refinamiento de la grasa.....	23
4.1.3.- Análisis de los parámetros de la grasa extraída mediante fusión en seco.....	25
4.1.4.- Elección de las condiciones de la reacción de transesterificación.....	26
4.1.4.1.- Determinación de la relación molar alcohol/grasa	26
4.1.4.2.- Determinación de la temperatura y tiempo de reacción	26
4.1.4.3.- Elección del tipo de catalizador	27
4.1.4.4.- Determinación de la concentración óptima de catalizador	27
4.1.5.- Ajuste del proceso de transesterificación con calor.....	28
4.1.6.- Determinación del proceso de purificación del biodiésel.....	28
4.1.7.- Selección del mejor tratamiento de transesterificación	28
4.1.7.1.- Análisis estadístico del rendimiento de biodiésel	31
4.1.8.- Propiedades fisicoquímicas del biodiésel elaborado mediante el tratamiento de mayor rendimiento	36
4.1.8.1.- Determinación de la densidad relativa a 15 °C.....	37
4.1.8.2.- Determinación de la viscosidad cinemática a 40 °C.....	37
4.1.8.3.- Determinación del punto de inflamación.....	37
4.1.8.4.- Cuantificación de la glicerina total, libre y ligada presente en la fase glicérica.....	37
4.1.8.5.- Análisis del olor, color y apariencia del biodiésel	38
4.1.8.6.- Análisis del biodiésel como combustible.....	38
4.1.9.- Análisis del balance de materia del proceso de producción de biodiésel	39
4.1.10.- Estimación del costo de producción de biodiésel a partir de grasa bovina...	41
4.2.- Verificación de hipótesis	43

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones.....	45
5.2.- Recomendaciones	46

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
-------------------------------------	----

ANEXOS.....	52
-------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Requisitos del biodiésel en Ecuador establecidos por la norma INEN 2482.	8
Tabla 2. Factores y niveles de estudio para la obtención de biodiésel.....	21
Tabla 3. Resultados de los parámetros fisicoquímicos de la grasa extraída por el método de fusión en seco	25
Tabla 4. Datos de densidad, viscosidad cinemática y rendimiento de biodiésel obtenido a partir de la grasa bovina	30
Tabla 5. Análisis de varianza del rendimiento de biodiésel para diferentes procesos de transesterificación.....	32
Tabla 6. Rendimientos de las fases del proceso de producción de biodiésel a partir de la grasa bovina del Camal Ambato	39
Tabla 7. Costos de los materiales, reactivos e insumos para la obtención de biodiésel	41
Tabla 8. Costos de los materiales, reactivos e insumos necesarios para la obtención de biodiésel a partir de 1000 kg de grasa bovina, mediante cada tratamiento del diseño experimental.	42
Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos de la grasa bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato	52
Tabla 10. Datos de densidad, viscosidad cinemática y rendimientos de obtención de biodiésel a partir de la grasa bovina.....	53
Tabla 11. Rendimientos de producción de biodiésel agrupados por factores e interacciones dobles	54
Tabla 12. Materiales y equipos para el proceso de extracción de grasa	55
Tabla 13. Materiales, reactivos y equipos para el proceso de refinamiento de la grasa extraída.....	55
Tabla 14. Materiales y equipos para la determinación de la densidad de la grasa extraída.....	55
Tabla 15. Materiales y equipos para la determinación de la viscosidad cinemática de la grasa	56
Tabla 16. Materiales y equipos para la determinación del índice de refracción de la grasa	56
Tabla 17. Materiales, reactivos y equipos para la determinación del porcentaje de ácidos grasos libres de la grasa	56
Tabla 18. Materiales, reactivos y equipos para la determinación del índice de peróxidos de la grasa.....	57
Tabla 19. Materiales, reactivos y equipos para el proceso de transesterificación con calor.....	57
Tabla 20. Materiales, reactivos y equipos para el proceso de purificación del biodiésel	57
Tabla 21. Materiales, reactivos y equipos para los procesos de determinación de glicerina total, libre y ligada.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Reacción de transesterificación.	2
Figura 2. Punto de recolección de la grasa bovina en el CFMA.....	10
Figura 3. Proceso de extracción de la grasa.	11
Figura 4. Proceso de refinamiento de la grasa	13
Figura 5. Proceso de transesterificación con calor.....	17
Figura 6. Proceso de purificación del biodiésel	18
Figura 7. Proceso de determinación de glicerina total	19
Figura 8. Proceso de determinación de glicerina libre.....	20
Figura 9. Proceso de determinación de glicerina total y libre en el blanco	21
Figura 10. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes relaciones molares metanol/grasa. Intervalos de confianza hsd tukey al 95 %.....	33
Figura 11. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes relaciones tiempos de reacción. Intervalos de confianza HSD tukey al 95 %.....	33
Figura 12. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes concentraciones de catalizador. Intervalos de confianza HSD tukey al 95 %.....	34
Figura 13. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes tipos de catalizador. intervalos de confianza HSD tukey al 95 %.....	34
Figura 14. Interacción entre la relación molar y el porcentaje de catalizador empleado en el rendimiento de generación de biodiésel mediante transesterificación. valores medios e intervalo de confianza al 95 % HSD de tukey.....	35
Figura 15. Interacción entre el tiempo de reacción y el porcentaje de catalizador empleado en el rendimiento de generación de biodiésel mediante transesterificación. Valores medios e intervalo de confianza al 95 % HSD de tukey.....	36
Figura 16. Balance de materia del proceso de producción de biodiésel a partir de la grasa bovina.	40
Figura 17. Proceso de obtención de biodiésel a partir de la grasa bovina	59

Resumen

En esta investigación se aprovechó la grasa bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato para la obtención de biodiésel como combustible de origen animal. Mediante el método de fusión en seco y un proceso de refinamiento se extrajo grasa con características fisicoquímicas adecuadas para la producción de biocombustible. La obtención de biodiésel se realizó mediante una reacción de transesterificación en la que se controlaron los siguientes factores; relación molar de metanol/grasa, tiempo de reacción y tipo y concentración de catalizador. Dichos factores fueron analizados mediante un diseño experimental factorial 2^n . La generación de biodiésel mediante una relación molar 9:1, durante 60 minutos, y empleando una concentración de 0,40 % de KOH como catalizador, permitió alcanzar el mayor rendimiento del proceso de transesterificación (67,75 %) y un beneficio de 0,05 USD por litro producido. El biodiésel elaborado mediante dicha combinación de factores, permitió obtener un biodiésel limpio y brillante con un punto de inflamación de 132,4 °C, asegurando su desempeño como combustible según la norma ASTM D 93 vigente en Ecuador.

Palabras clave: Biodiésel, grasa bovina, fusión en seco, refinamiento, transesterificación, combustible de origen animal, punto de inflamación, Camal Frigorífico Municipal Ambato.

Abstract

In this research the bovine fat from “Camal Frigorífico Municipal Ambato” was used for obtaining biodiesel as a fuel of animal origin. Fat was extracted with good physicochemistry characteristics for the production of biofuel, using the dry fusion method and a refining process. Obtaining biodiesel was accomplished by a transesterification reaction in which some factors were controlled; such as: molar ratio of methanol/fat, reaction time and catalyzer type and concentration. These factors were analyzed with a factorial experimental design 2ⁿ. The biodiesel production by a molar ratio 9:1, during 60 minutes, and using KOH 0,40 % as a catalyzer gave place to the best transesterification process yield (67,75 %) and a 0,05 USD benefit per liter produced. The biodiesel produced by the mentioned factors combination allowed to have a clean and shiny biodiesel with a flash point of 132,4 °C, ensuring its quality as a fuel according to ASTM D 93 standards.

Key words: Biodiesel, bovine fat, dry fusion, refining, transesterification, fuel of animal origin, ASTM standards, Camal Frigorífico Municipal Ambato.

INTRODUCCIÓN

La sustitución de los combustibles de origen fósil por los de origen biológico, representa uno de los grandes retos en la actualidad (**Avellaneda Vargas, 2010**). Una de las alternativas más factibles para reemplazar el diésel fósil es la producción de biodiésel. El biodiésel es un combustible renovable derivado de aceites vegetales (comestibles o no, nuevos o usados) y grasas animales que poseen propiedades similares al diésel (**Chávez, Medina, y Rincón, 2012**).

Diversos estudios recientes, han explorado la posibilidad de utilizar como materia prima los residuos grasos vegetales para la producción de biodiésel mediante una reacción de transesterificación (**Bulla, 2014; Rodríguez, 2006**). Sin embargo existen pocos estudios de utilización de los residuos grasos animales, a pesar de que tienen mayor contenido de ácidos grasos saturados y proporcionan mayor estabilidad al producto final, esto se ha dado porque en la composición de la grasa animal existe una gran cantidad de ácidos grasos de cadena larga (más de 8 átomos de carbono), como el ácido esteárico que tiene una temperatura de fusión mayor a 40 °C (**Vivas, 2010**). Por otro lado, independientemente del catalizador empleado, los residuos grasos animales pueden aumentar la temperatura de fusión del biodiésel, lo que puede ser una desventaja en climas fríos (**Rivera, Sandoval, y Villanueva, 2009**).

El método de fusión en seco es uno de los procesos más utilizados para la extracción de grasa debido a que se obtienen rendimientos altos y el producto final no contiene humedad a diferencia del método de fusión húmeda trabajada con agua directa. Además, en el método de fusión en seco se obtiene una grasa con menor viscosidad haciéndola más fluida, se coagulan y desnaturalizan las proteínas y disminuye su carga microbiana (**Marcilla Gomis, 1998**). Finalmente, tras la extracción es conveniente llevar a cabo un proceso de refinamiento para obtener una grasa con mejores características como olor suave, aspecto limpio y color claro. Dado que el olor y el color del biodiésel dependen de la materia prima que se utilice, mientras mejor sea la calidad de la grasa, mejor será la calidad del producto final a obtenerse (**Avellaneda Vargas, 2010; Yaulema, 2014**).

La reacción de transesterificación de una grasa se da cuando los triglicéridos reaccionan con metanol (disolvente más utilizado, puesto que permite obtener un mayor porcentaje de metilésteres y además es de bajo costo), bajo la acción de NaOH o KOH (catalizadores básicos que aceleran la reacción de transesterificación), para producir una mezcla de metilésteres de ácidos grasos y glicerina, además para obtener un mayor rendimiento en la producción de biodiésel se utiliza un tiempo de reacción de 60 minutos y en el caso de la grasa bovina se tiende a utilizar concentraciones mínimas de catalizador de 0,35 y 0,4 % (Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Arévalo, Astudillo, y Ulloa, 2008). Esta reacción consta de tres etapas donde el triglicérido es convertido consecutivamente en diglicérido, monoglicérido y glicerina (Dinis, 2012). La reacción global de transesterificación se ilustra en la Figura 1.

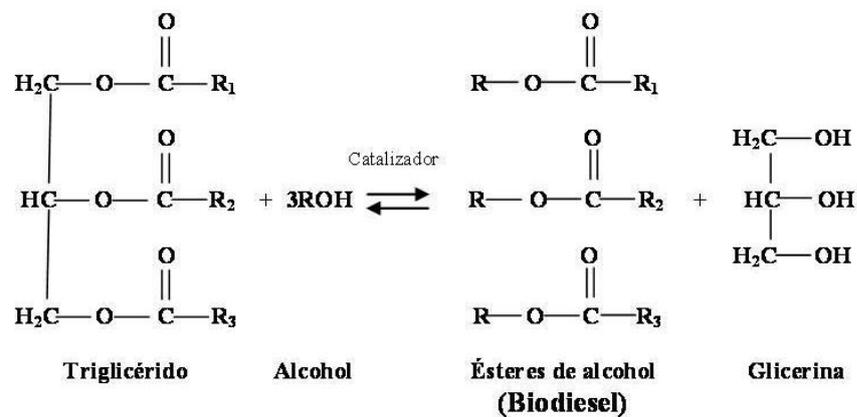


Figura 1. Reacción de transesterificación.
Adaptado de Dinis (2012)

En la producción de biodiésel, un proceso de purificación es necesario para eliminar impurezas como: trazas de glicerol, jabones, ácidos y humedad, que no se eliminan en el proceso de transesterificación (Orantes Letrán, 2008). El proceso de purificación con agua fría es el más utilizado debido a que se obtiene un mejor producto, gracias a los lavados consecutivos que se realizan hasta que el producto quede limpio y libre de impurezas (Beteta, Castillo, Césare, Calle, y León, 2016).

El Comité D02 sobre productos y lubricantes derivados del petróleo ha desarrollado un juego de normas para un combustible no derivado del petróleo: el biodiésel. La ASTM (American Society for Testing Materials) International está

fomentando el uso de una fuente de energía alternativa con la publicación de octubre de 2008 de especificaciones nuevas y revisadas para el biodiésel (**Fajardo Hernández, 2015**). Las nuevas normas le dan a la industria una herramienta valiosa reconocida y aceptada del mismo modo por compradores y vendedores que garantiza la calidad y el comportamiento del producto porque establece parámetros claramente definidos (**Kessel, 2009**).

Además, en esta investigación como estudio adicional se realizó un análisis de costo y beneficio de la producción de biodiesel a partir de la grasa bovina del Camal Ambato, con el fin de evaluar su rentabilidad (**Castro Quijano, Morales Gutierrez, y Yepiz Salazar, 2011**). La grasa bovina es un problema a priori para el Camal y los lugares donde es desechada, pero puede generar un valor adicional, debido a que a partir de la grasa bovina a más de obtener biodiésel también se obtiene como producto residual glicerina impura que podría ser vendida a un precio menor a lo establecido en el mercado para la glicerina grado analítico. De esta manera se aprovecharía un residuo que causa problemas al medio ambiente y se generaría recursos económicos al camal.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1.- Tema

“Aprovechamiento de la grasa bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato para la obtención de biodiésel como combustible de origen animal”

1.2.- Justificación

Los aspectos de contaminación asociados al proceso del faenado de ganado en el Camal Frigorífico Municipal Ambato (CFMA) son: el alto consumo de agua, la descarga de efluentes líquidos llenos de residuos, el consumo de energía eléctrica, ruido y contaminación del aire (**Guevara, 2011**). Los efluentes líquidos contienen una gran cantidad de grasa proveniente del faenado de bovinos, ya que en el camal no es común el faenado de porcinos y ovinos.

La gestión inadecuada de esta grasa puede provocar enfermedades a las personas, animales y vegetación de los alrededores de los sectores donde se desecha. Además, podría causarle problemas legales al camal, porque según el Artículo 89 de la Constitución del Ecuador, el estado ha de tomar medidas para promover en el sector público y privado el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes (**Asamblea Nacional de la Republica del Ecuador, 2008**). De no tomarse las medidas respectivas, la actividad comercial de las personas que laboran en el camal así como del personal de servicio podría verse afectada, en caso de penalizaciones a dicho establecimiento por el mal manejo de desechos.

En el presente trabajo se estableció un proceso para la obtención de biodiésel a partir de la grasa bovina del camal, como alternativa para disminuir la contaminación y, adicionalmente, valorizar dichos residuos.

Inicialmente, se recolectó la grasa bovina en la sala de oreo. Posteriormente, mediante el método de fusión en seco se extrajo la grasa líquida y se determinaron sus características fisicoquímicas.

La producción de biodiésel se llevó a cabo mediante una reacción de transesterificación de la grasa líquida con metanol. Para determinar el mejor tratamiento de obtención se tuvieron en cuenta los siguientes factores experimentales: nivel de relación molar metanol/grasa, tiempo de reacción, y concentración y tipo de catalizador. Finalmente, se llevó a cabo la purificación del biodiésel mediante agua destilada y ácido cítrico.

Tras ello, se realizó el análisis estadístico del efecto de los factores experimentales controlados en el proceso de transesterificación, empleando el programa estadístico Statgraphics Centurion XV.

Se escogió como mejor tratamiento la combinación experimental que proporcionó el rendimiento más elevado de producción de biodiésel. En el biodiésel generado de esta forma se evaluaron las propiedades fisicoquímicas para determinar la calidad del combustible mediante las normas ASTM. Estos análisis se realizaron en el Departamento de Petróleos, Energías y Contaminación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador.

1.3.- Objetivos

1.3.1.- Objetivo general

Aprovechar la grasa bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato para la obtención de biodiésel como combustible de origen animal.

1.3.2.- Objetivos específicos

- Establecer las características fisicoquímicas de la grasa bovina extraída por el método de fusión en seco, para la producción de biodiésel.

- Seleccionar la combinación de factores implicados en la reacción de transesterificación de la grasa líquida que permita alcanzar el máximo rendimiento de producción de biodiésel.
- Determinar la calidad del combustible obtenido, a partir de sus propiedades fisicoquímicas.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.- Antecedentes investigativos

El camal cuenta con un estudio de impacto ambiental realizado por UNICONMAC Cía. Ltda. en 2005, que determinó la existencia de diversas alternativas para disminuir la afección medioambiental de los efluentes de dichas instalaciones (**Guevara, 2011**). En la actualidad, la grasa bovina proveniente del despiece genera efluentes para los que aún no existe un adecuado modelo de gestión.

El empleo de materia de origen orgánico como recurso energético para la producción de biocombustibles está siendo muy utilizado en la actualidad, ya que reduce el uso de los recursos de origen fósil y permite idear nuevos procedimientos tecnológicos (**Bulla, 2014**). La materia orgánica puede ser líquida, sólida o gaseosa, y su uso como biocombustible es gracias a la liberación de la energía contenida en sus componentes químicos mediante una reacción de combustión (**Álvares Maciel, 2009**).

El Gobierno del Ecuador, como parte de su estrategia de transformación de la matriz productiva, ha generado en el mercado de los combustibles una expectativa elevada de demanda de bioetanol y biodiésel. El Gobierno está convencido de que la producción de biodiésel estimula la actividad agrícola y genera beneficios ambientales (**Petroecuador, 2015**).

El biodiésel es un combustible que se utiliza como sustituto del diésel convencional en motores de combustión interna (**Arévalo et al. 2008**). Este biocombustible es considerado de primera generación, ya que se utiliza como materia prima o insumo la grasa animal y aceites vegetales. Las ventajas del biodiésel

frente al diésel convencional son su mayor facilidad de procesamiento y sus bajas emisiones de gases de efecto invernadero (**Dinis, 2012**).

A partir de investigaciones experimentales, **Vivas (2010)** expresó que la grasa bovina puede ser fácilmente transesterificada, obteniendo una sustancia con propiedades similares a los ésteres de aceites vegetales. Adicionalmente, se ha comprobado que los metilésteres elaborados a partir de la grasa bovina tienen mayor estabilidad frente a la oxidación, esto quiere decir que el biodiésel procedente de grasa bovina tiene una vida útil más larga.

La norma de calidad ecuatoriana **INEN 2482 (2009)** establece los requisitos que deben cumplir los ésteres metílicos o etílicos de ácidos grasos (FAME o FAEE) que van a ser usados como combustible para motores de ciclo Diésel (Tabla 1).

Tabla 1. Requisitos del biodiésel en Ecuador establecidos por la norma INEN 2482

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de Ensayo
Densidad a 15 °C	kg/m ³	850	900	ASTM D1298
Punto de inflamación	°C	120	---	ASTM D93
Agua y sedimento	%	---	0,05	ASTM D1796
Contenido de agua	mg/kg	---	500	ASTM D95
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	3,5	5	ASTM D445
Número de cetano	---	49	---	ASTM D613
Temperatura de destilación al 90 % recuperado	°C	---	360	ASTM D1160
W Glicerina libre	%	---	0,02	ASTM D6584
W Glicerina total	%	---	0,25	ASTM D6584
W Contenido de ésteres	%	96,5	---	EN 14103
Índice de yodo	g I ₂ /100 ml	---	120	EN 14111

*Adaptado de: **INEN (2009)**

2.2.- Hipótesis

- Hipótesis Nula (H₀): El rendimiento de la generación de biodiésel por transesterificación de grasa bovina no se ve afectado por la relación molar metanol/grasa, el tiempo de reacción, el tipo de catalizador o la concentración de catalizador.

- Hipótesis Alternativa (Ha): El rendimiento de la generación de biodiésel por transesterificación de grasa bovina se ve afectado por la relación molar metanol/grasa, el tiempo de reacción, el tipo de catalizador o la concentración de catalizador.

2.3.- Señalamiento de variables de la hipótesis

Variables dependientes:

- Rendimiento de producción de biodiésel

Variables independientes:

- Relación molar metanol/grasa
- Tiempo de reacción (de transesterificación)
- Tipo de catalizador
- Concentración de catalizador

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1.- Materiales y métodos

3.1.1.- Obtención de la materia prima

La grasa bovina fue recolectada del camal, que forma parte de la Corporación de Empresas del Parque Industrial Ambato (CEPIA).

En la sala de oreo se corta y se separa la grasa de la carne, que se filtra a través de las rejillas que están en el piso. La grasa bovina fue recolectada de esta sala antes que se mezcle con los efluentes líquidos en el sistema de alcantarillado. El punto de recolección se indica en la Figura 2. Tras la recolección, la grasa se lavó con agua y se eliminaron los restos de carne. A continuación, se cortó hasta formar trozos de un centímetro y finalmente se almacenó en recipientes cerrados mantenidos en refrigeración.

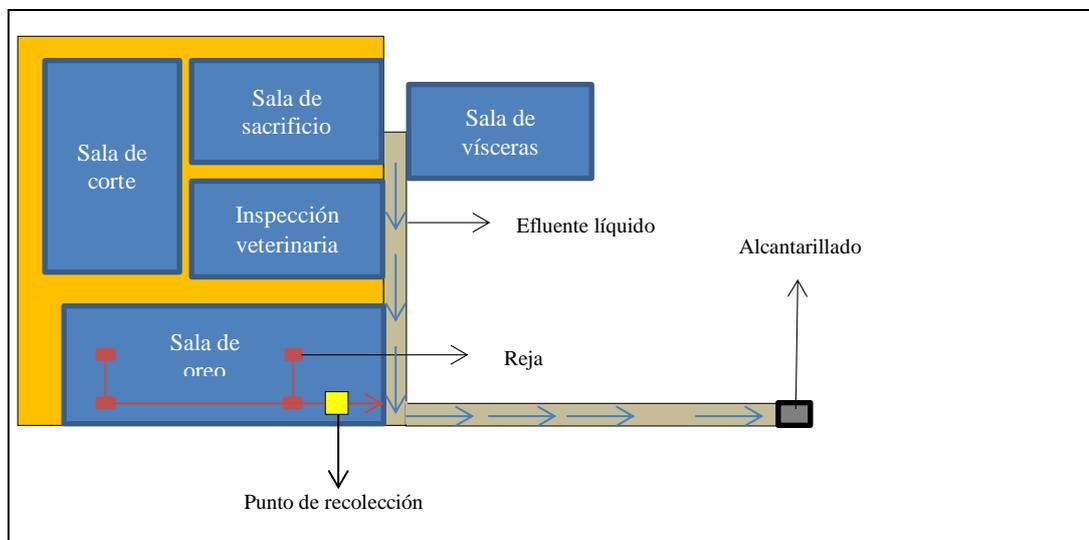


Figura 2. Punto de recolección de la grasa bovina en el CFMA

3.1.2.- Extracción de la grasa

Para llevar a cabo la extracción de la grasa se empleó una adaptación de la metodología descrita por **Marcilla Gomis (1998)**. En este proceso se utilizó grasa bovina triturada proveniente del CFMA. Se pesaron 200 g de grasa triturada, a continuación se colocó la grasa en una olla y se cocinó a una temperatura superior a 80 °C, evitando que ésta se quemara. Finalmente, la grasa líquida fue filtrada dos veces a través de un cedazo metálico y un lienzo de tela separando la grasa de la materia residual (chicharrones).

El proceso de extracción de la grasa se ilustra en la Figura 3.

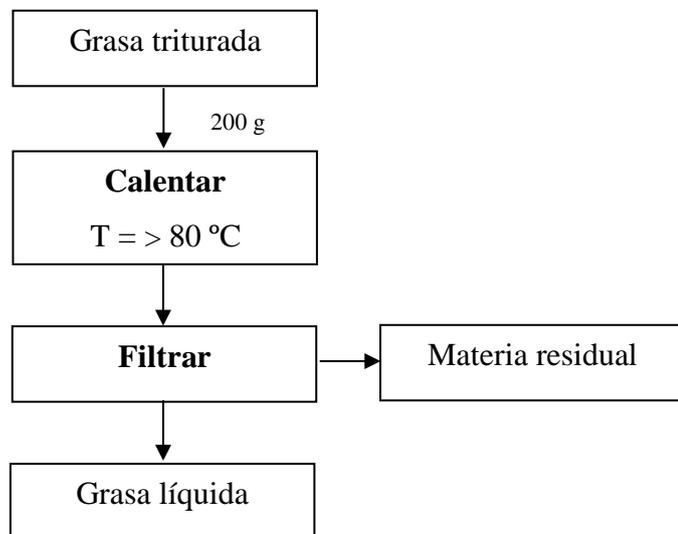


Figura 3. Proceso de extracción de la grasa.
Adaptado de **Marcilla Gomis (1998)**.

3.1.3.- Refinamiento de la grasa

En el proceso de refinamiento se utilizó grasa líquida extraída del proceso anterior. Este proceso se realizó mediante cuatro etapas:

- **Primera etapa:** En el desgomado se agregaron 25 mL de agua destilada a la grasa líquida y se calentó la mezcla a una temperatura de 80 a 90 °C por 10 minutos, con agitación constante.
- **Segunda etapa:** Se agregaron 2 g de ácido cítrico en la solución caliente de grasa y agua destilada. Luego se calentó a una temperatura de 80 a 90 °C por 10 minutos, con agitación constante. Por último se dejó enfriar la grasa por 1 hora y se separó la fase sólida de la líquida (lecitina).
- **Tercera etapa:** En el blanqueado, se colocó grasa sólida en una jarra con una solución de 500 mL de agua destilada y 10 % de peróxido de hidrogeno a 10 volúmenes y se dejó en reposo por 7 días a temperatura ambiente.
- **Cuarta etapa:** Finalmente en el secado, se tomaron los pedazos de grasa sólida y se calentaron a una temperatura de 120 °C por 30 minutos con agitación, evitando que la grasa se quemara (**Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Yaulema, 2014**).

El proceso de refinamiento de la grasa extraída se ilustra en la Figura 4.

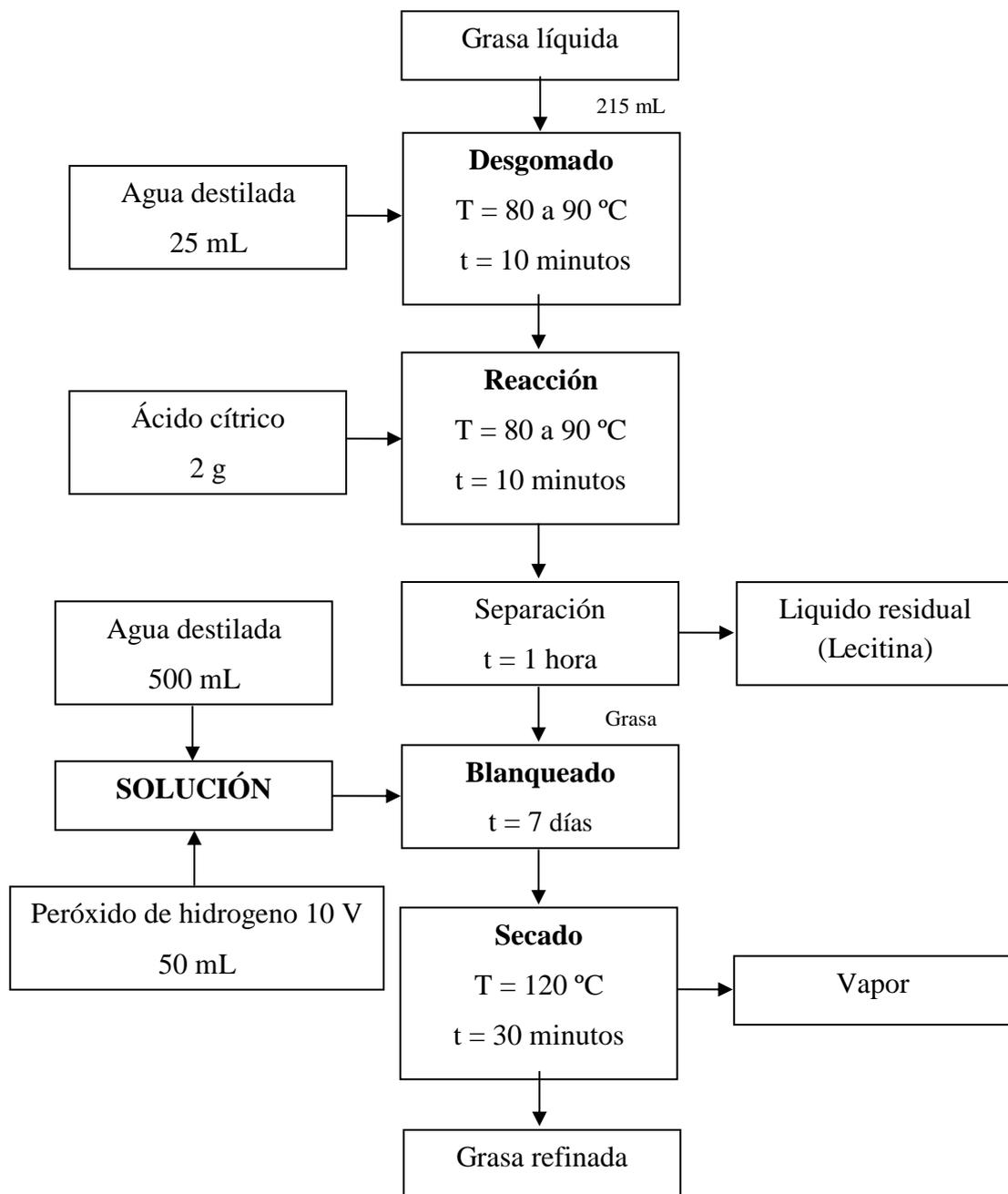


Figura 4. Proceso de refinamiento de la grasa
Adaptado de **Yaulema (2014)**.

3.1.4.- Evaluación de parámetros fisicoquímicos

3.1.4.1.- Determinación de la densidad

Se llevó a cabo según la norma **NTE INEN 0035 (2012)**. Para la determinación de la densidad, se pesó el picnómetro limpio y seco. Este resultado fue registrado

como **m**. A continuación se llenó el picnómetro con agua destilada hervida a 65 °C, y se sumergió en un baño de agua a 65 °C ± 0,2 °C durante 30 minutos, evitando la inclusión de burbujas de aire. Se secó el exterior del picnómetro y se pesó. Este resultado fue registrado como **m₁**. Luego se realizó el mismo procedimiento utilizando la grasa, y el peso que se obtuvo fue registrado como **m₂**. El cálculo se realizó con la ecuación Ec. 1:

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{m_2 - m}{m_1 - m} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

ρ = densidad relativa.

m = masa del picnómetro vacío (g)

m_1 = masa del picnómetro con agua destilada (g)

m_2 = masa del picnómetro con muestra, (g)

3.1.4.2.- Determinación de la viscosidad cinemática

Se llevó a cabo según la norma **NTE INEN 0810 (1987)**. Para la determinación de la viscosidad cinemática, se utilizó un viscosímetro Cannon-Fenske en baño de agua a 65 °C y se tomó el tiempo de flujo de la grasa. El cálculo se realizó con la ecuación Ec. 2:

$$\mu = k * t \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

μ = viscosidad cinemática (centistokes)

k = constante del viscosímetro (centistokes·s⁻¹)

t = tiempo de flujo del aceite (s)

3.1.4.3.- Determinación del índice de refracción

Se llevó a cabo según la norma **NTE INEN ISO 6320 (2013b)**. Para la determinación del índice de refracción, primero se verificó la limpieza y sequedad de los prismas del refractómetro. Luego se colocaron 2 o 3 gotas de grasa a 40 °C sobre el prisma inferior, se cerraron los prismas y se ajustó el instrumento hacia la luz para obtener una lectura clara.

3.1.4.4.- Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres

Se llevó a cabo según la norma **NTE INEN ISO 660 (2013a)** modificando el ácido graso de referencia, que pasó de ser oleico, a esteárico, mayoritario en el tejido graso vacuno. Para la determinación del porcentaje de ácidos grasos libres, se pesaron 10 g de grasa y se colocaron en 50 mL de etanol neutralizado. Después se titularon los ácidos grasos libres con una solución de NaOH 0,1 N previamente estandarizada y utilizando fenolftaleína como indicador. El cálculo se realizó con la ecuación Ec. 3:

$$\%AGL = \frac{V * M * N}{10 * m_{(grasa)}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

V= volumen de NaOH usado para la titulación (mL)

M= peso molecular ácido esteárico ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)

N= normalidad de la solución de NaOH ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

m_{grasa} = peso de la muestra de aceite (g)

3.1.4.5.- Determinación del índice de peróxidos

Se llevó a cabo según la norma **NTE INEN ISO 27107 (2013c)**. Para la determinación del índice de peróxidos, se pesaron 5 g de grasa en un matraz y se añadieron 10 mL de cloroformo. Después se añadieron 15 mL de ácido acético glacial y 1 mL de disolución saturada de yoduro de potasio. Luego se tapó el matraz agitándolo por 1 minuto y se dejó en reposo por 5 minutos en un lugar oscuro. Finalmente se añadieron 75 mL de agua destilada y se valoró el yodo liberado con una solución de tiosulfato de sodio 0,01 N utilizando almidón como indicador. Paralelamente, se efectuó un ensayo en blanco. El cálculo se realizó con la ecuación Ec. 4:

$$IP = \frac{(V - V_B) * N * 100}{m_{(grasa)}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

V = volumen de tiosulfato de sodio consumido en la muestra (mL)

V_B = volumen de tiosulfato de sodio consumido en el blanco (mL)

N = normalidad de la disolución de tiosulfato de sodio ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)

m = peso de la muestra (g)

3.1.5.- Estudio de las condiciones de transesterificación

Los factores que se estudiaron en el proceso de transesterificación fueron los siguientes:

- Relación molar alcohol:grasa.
- Temperatura y tiempo de reacción.
- Tipo de catalizador.
- Concentración de catalizador.

3.1.6.- Proceso de transesterificación con calor

En la transesterificación con calor se utilizó grasa extraída por el método de fusión en seco. Se realizaron ensayos con 100 mL de grasa donde varió la relación molar, el tiempo de reacción y el tipo y concentración de catalizador (**Dinis, 2012**). Dicho proceso de transesterificación se ilustra en la Figura 5.

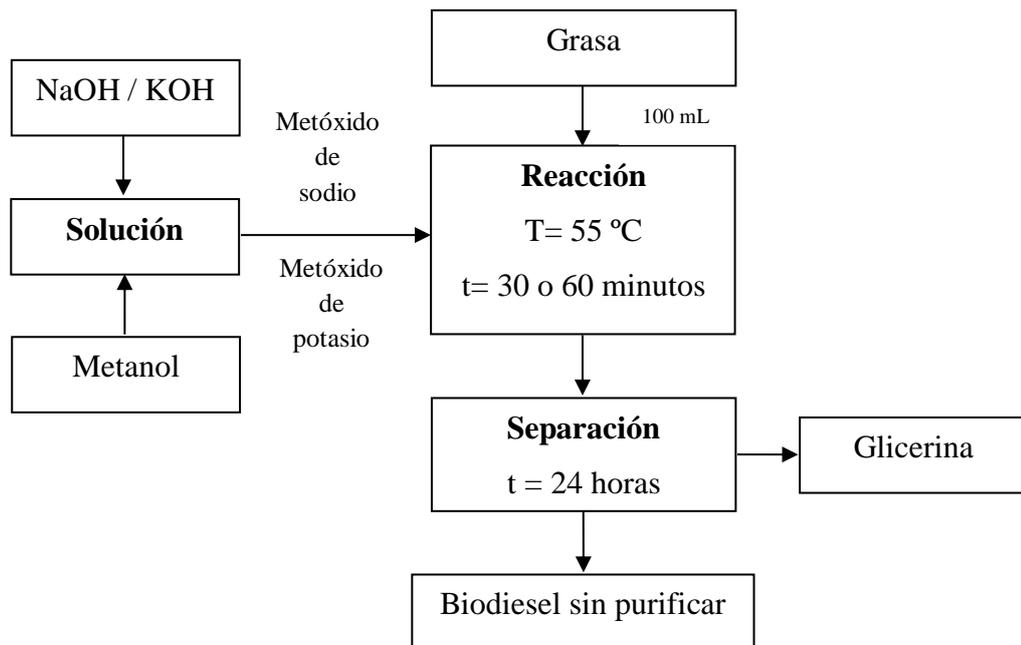


Figura 5. Proceso de transesterificación con calor
Adaptado de **Dinis (2012)**.

3.1.7.- Purificación del biodiésel

En este proceso, en un matraz Erlenmeyer se agregó biodiésel sin purificar y una solución de agua acidulada con ácido cítrico en proporción 5:1 (p/p). Luego se agitó la solución por un minuto y se separó el biodiésel a las dos horas de reposo. Se repitió tres veces este proceso, obteniendo de esta forma un líquido residual (agua y catalizador) de color blanquecino en el primer lavado. En el último lavado el líquido fue más claro con pH casi neutro. Finalmente se realizó el secado del biodiésel a una temperatura de 100 °C por 4 horas para eliminar el exceso de agua y metanol (**Beteta et al., 2016**).

El proceso de purificación del biodiésel se ilustra en la Figura 6.

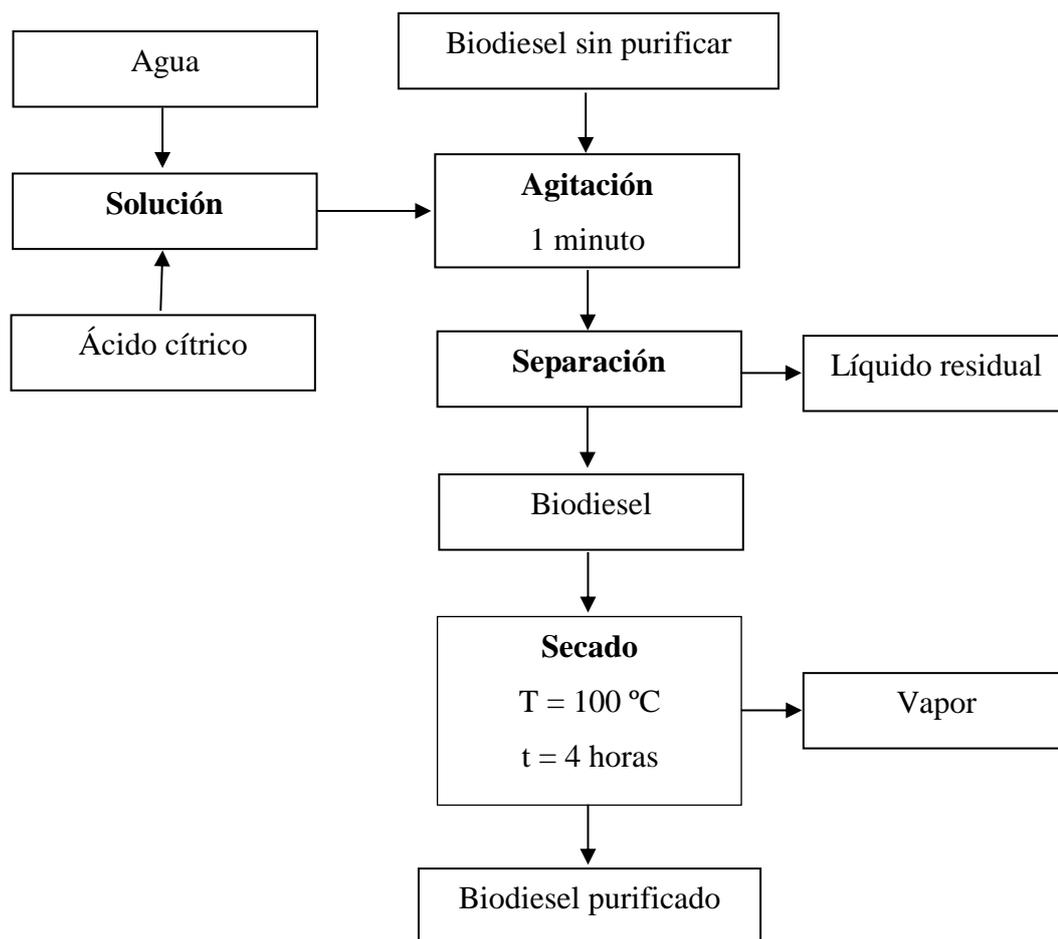


Figura 6. Proceso de purificación del biodiésel
Adaptado de **Beteta et al. (2016)**.

3.1.8.- Evaluación de las propiedades fisicoquímicas

Una vez determinado el tratamiento de máximo rendimiento de generación de biodiésel, se elaboró 1 L de combustible mediante dicho tratamiento. De esta muestra se realizaron análisis de densidad relativa, viscosidad cinemática y determinación del punto de inflamación. Estos análisis se realizaron en el Departamento de Petróleos, Energías y Contaminación de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, siguiendo los métodos recogidos en la norma **INEN 2482 (2009)** (Tabla 1).

Por último, se cuantificó la glicerina total, libre y ligada presente en la fase glicérica según la norma Ca 14-56 de la **AOCS (2011)**. Estos procesos están ilustrados en las figuras 7, 8 y 9.

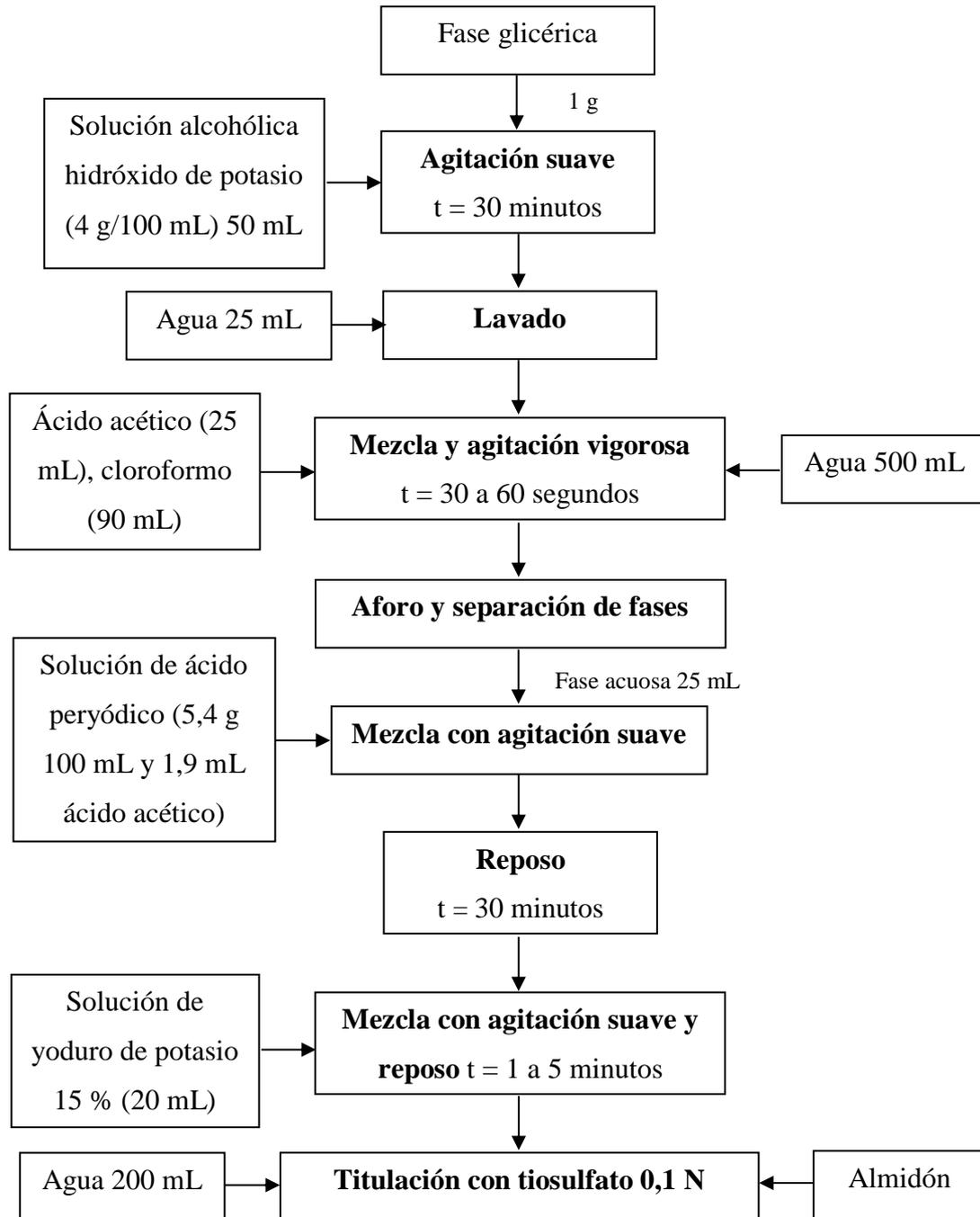


Figura 7. Proceso de determinación de glicerina total
Adaptado de **AOCS (2011)**.

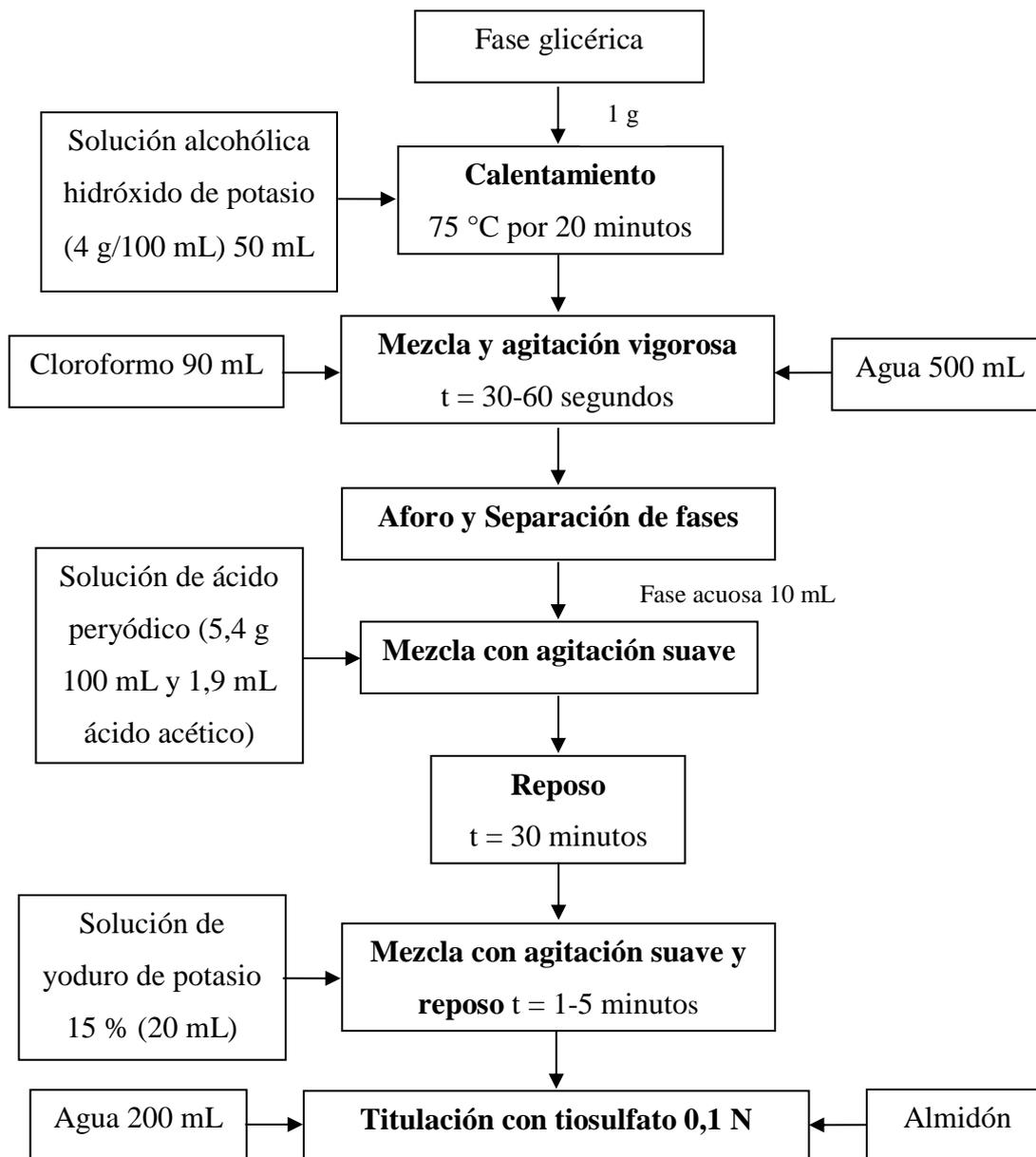


Figura 8. Proceso de determinación de glicerina libre
Adaptado de AOCS (2011).

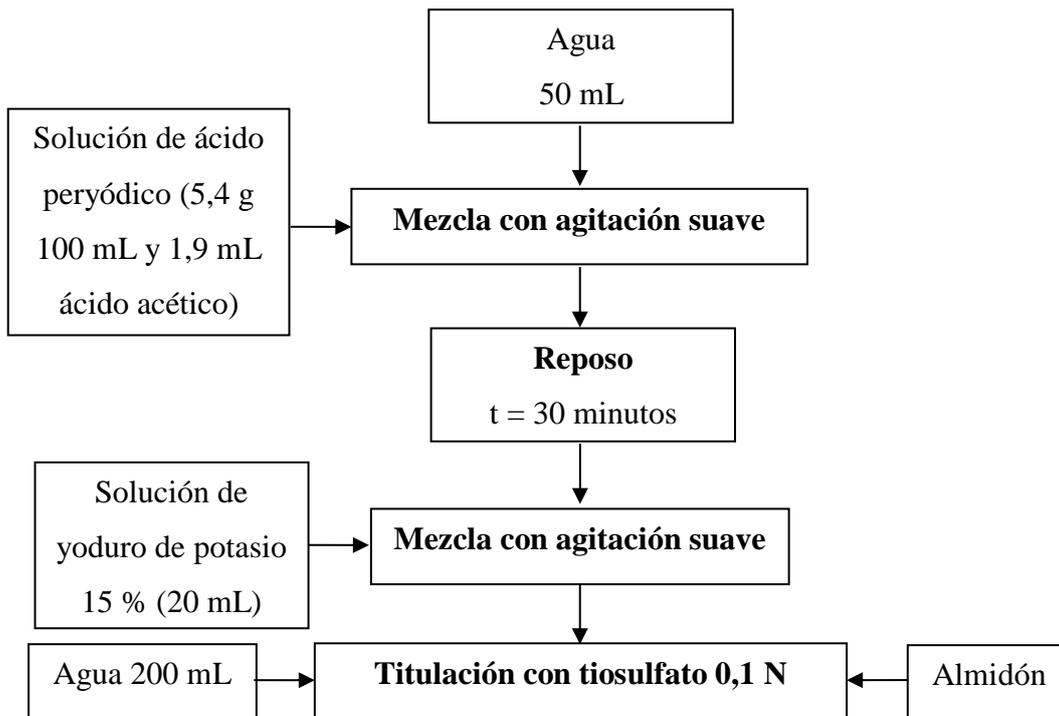


Figura 9. Proceso de determinación de glicerina total y libre en el blanco Adaptado de AOCS (2011).

3.2.- Diseño experimental

Se aplicó un diseño factorial 2^n de cuatro factores con dos niveles cada uno y dos réplicas para cada tratamiento experimental. En la Tabla 2 se detallan los factores y niveles para la obtención de biodiésel.

Tabla 2. Factores y niveles de estudio para la obtención de biodiésel

Factores	Niveles
A. Relación molar metanol:grasa	A1: 6:1 A2: 9:1
B. Tiempo de reacción	C1: 30 minutos C2: 60 minutos
C. Concentración de catalizador	B1: 0,35 % B2: 0,40 %
D. Tipo de catalizador	D1: Hidróxido de Sodio D2: Hidróxido de Potasio

3.2.1.- Análisis estadístico

Las características fisicoquímicas de la grasa se analizaron por triplicado, mientras que las propiedades fisicoquímicas del biodiésel, en razón de su mayor coste y complejidad, se analizaron por duplicado. Para todos los parámetros se calculó la media y la desviación típica. A partir de dichos estadísticos, se calculó el coeficiente de variación de Pearson como medio de comparación de la dispersión de los datos de cada variable. La comparación entre tratamientos (separación de medias) se llevó a cabo mediante análisis de varianza (ANOVA), empleando el test de Tukey con un nivel de confianza del 95 %. Los cálculos estadísticos fueron efectuados mediante el software Statgraphics Centurion XV.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.- Análisis y discusión de resultados

4.1.1.- Análisis del método de extracción de grasa por fusión seca

En este proceso, los tejidos grasos se descomponen, la grasa sube a la superficie del recipiente mientras que en el fondo quedan los residuos formados por los restos del tejido del que se ha extraído la grasa. Como la grasa fue tratada a una temperatura de cocción superior a 80 °C las proteínas se desnaturalizaron y se disminuyó su carga microbiana y viscosidad, obteniendo así una grasa más fluida, aspecto observado también por otros autores (**Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Marcilla Gomis, 1998**).

Con este método se obtuvieron rendimientos de 90,3 % de grasa y 9,7 % de materia residual (chicharrones) y fue considerado como el método más viable. Durante la experimentación también se extrajo grasa por el método de fusión húmeda trabajada con agua directa, pero al realizar varias pruebas preliminares se obtuvieron rendimientos bajos que, adicionalmente, requerían una gran cantidad de agua y tiempos de extracción elevados, por lo que dicho método fue descartado.

4.1.2.- Análisis del refinamiento de la grasa

En la primera etapa del refinamiento de la grasa (desgomado con agua destilada) se eliminaron los fosfolípidos hidratables perjudiciales para la elaboración del biodiésel y como producto residual de este proceso se obtuvo lecitina de color blanquecino, que desde el punto de vista químico es un éster fosfórico enlazado con diglicéridos esteáricos, palmíticos u oleicos que se encuentra en cualquier grasa de origen vegetal o animal (**Fuentes Rojas y Núñez Barreto; Yaulema, 2014**).

En la segunda etapa, al añadir pequeñas cantidades de ácido cítrico en la grasa desgomada, los fosfolípidos no hidratables (fosfolípidos que forman sales con metales como calcio o magnesio, insolubles en agua) se convirtieron en fosfolípidos hidratables (**Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Yaulema, 2014**). Al final de esta etapa se dejó enfriar la grasa y se separó del líquido residual (lecitina), obteniendo una grasa de olor desagradable y color amarillento.

En la tercera etapa, se eliminaron los pigmentos carotenoides que estructuralmente están constituidos por cadenas unidas de hidrocarburos altamente insaturados, y se disminuyó el mal olor producido por el oxígeno del aire y las bacterias presentes (**Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Bailey, 1984**), obteniendo una grasa de olor agradable y color blanquecino. Estos parámetros son índices de calidad importantes en la producción de biodiésel debido a que determinan el aspecto y la aceptabilidad del producto terminado.

En la cuarta etapa, el secado de la grasa, se eliminó un 2,3 % de agua residual de las etapas anteriores. La eliminación de agua en la grasa es importante, debido a que su presencia durante la elaboración de biodiésel origina la formación de subproductos de bajo valor añadido (jabones) y disminuye el rendimiento de producción de biodiésel.

Es importante aclarar, que no se realizó la neutralización de la grasa en el refinamiento, porque al utilizar hidróxido de sodio durante la transesterificación, la solución se saponificaba por el exceso de hidróxido. Además, el proceso de neutralización es generalmente utilizado para eliminar los ácidos grasos libres presentes y la grasa que se obtuvo no tenía un porcentaje de ácidos grasos libres elevado, se decidió prescindir de dicha etapa en el refinamiento.

Al final del proceso de refinamiento se obtuvo un 97,7% de grasa libre de agua, fosfátidos, metales, pigmentos o sustancias que producían mal olor, siendo adecuada para la producción de biodiésel.

4.1.3.- Análisis de los parámetros de la grasa extraída mediante fusión en seco

Los resultados que se obtuvieron de los parámetros fisicoquímicos de la grasa se indican en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados de los parámetros fisicoquímicos de la grasa extraída por el método de fusión en seco

Parámetro	Unidades	Promedio ¹	Desviación típica ¹
Densidad a 65 °C	(g·mL ⁻¹)	0,852	0,002
Viscosidad cinemática a 65 °C	(cSt)	9,730	0,035
Índice refracción a 40 °C	-	1,942	0,001
Ácidos grasos libres* ²	(%)	0,892	0,003
Índice de peróxidos* ²	mEq O ₂ ·kg ⁻¹ grasa	4,388	0,018

*¹Los valores de los parámetros fisicoquímicos corresponden a un promedio de tres repeticiones por determinación: (¹N= 3). *²Para determinar el porcentaje de ácidos grasos libres y el índice de peróxidos, se utilizó una temperatura de 40 a 50 °C (temperatura de fusión de la grasa animal) y además dicha temperatura no influyó en los reactivos que se utilizaron en los ensayos.

La densidad y la viscosidad cinemática de la grasa fueron 0,852 g·mL⁻¹ y 9,730 cSt respectivamente. Estos parámetros fueron determinados a una temperatura de 65 °C, para evitar que la grasa animal, al contener una cantidad elevada de ácidos grasos saturados, se solidificara a temperatura ambiente (**Bailey, 1984; Darensbourg, Darensbourg, Dickerson, y Gray, 1992**), estos resultados al ser comparados con varias investigaciones demostraron que presentaron similitud, comprobando así la validación de los datos (**Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Bada, Cedeño, Prieto, y Suárez, 1999; Vivas, 2010**). Además, con la densidad de la grasa líquida se calculó el peso de la grasa, que sirvió para calcular el porcentaje de catalizador a utilizar en la reacción de transesterificación.

El índice de refracción fue de 1,942 el mismo que se encuentra próximo a la investigación realizada por **Vivas (2010)**, la cual reporta un valor de 1,956 indicando la alta calidad de la grasa obtenida. Este dato se obtuvo a una temperatura de 40 °C debido a limitaciones técnicas del equipo de medición (idealmente, debería haberse medido a 65 °C).

El porcentaje de ácidos grasos libres fue de 0,892 %, aspecto que coincide con la opinión de diversos autores en el sentido de que las grasas frescas o recién preparadas no contienen ácidos grasos libres o contienen pequeñas cantidades (**Angarita Arias y Herrera Dávila, 2008; Yagüe Aylón, 2003**). Considerando que el porcentaje de ácidos grasos libres fue menor a 3 %, por lo que no afecta a la eficiencia de conversión de metilésteres y se determinó que el proceso de esterificación no fue necesario (**Cantero Vergara y Faber Archila, 2010; Vivas, 2010**).

El índice de peróxidos fue de 4,378 mEq O₂·kg⁻¹ grasa. Este parámetro indica la el grado de oxidación o rancidez de los ácidos grasos relacionado al grado de envejecimiento de un compuesto lipídico (**García Tenorio, 2013**). Según **Bou, Codony, Guardiola, y Tres (2010)**, los aceites y grasas recicladas presentan un valor de 7,6 mEq O₂·kg⁻¹, y al ser una grasa recién preparada este valor fue bajo

4.1.4.- Elección de las condiciones para la reacción de transesterificación

4.1.4.1.- Determinación de la relación molar alcohol/grasa

Para el proceso de transesterificación el alcohol más adecuado fue el metanol, ya que reacciona rápidamente con los triglicéridos a bajas temperaturas, disuelve fácilmente los catalizadores alcalinos y es económico.

En el análisis de la relación molar alcohol/grasa, la relación estequiométrica mínima metanol/grasa para la formación de metilésteres ha de ser 3:1 (**Vivas, 2010**). Sin embargo, al ser una reacción de equilibrio y con el fin de favorecer la formación de metilésteres se optó por trabajar con una relación molar metanol/grasa de 6:1 y de 9:1.

4.1.4.2.- Determinación de la temperatura y tiempo de reacción

Se observó que la temperatura en el proceso de transesterificación aumentaba la solubilidad de la grasa en el metanol originando una mayor velocidad de reacción. La

grasa a temperatura ambiente se solidificaba, debido a esto se decidió utilizar una temperatura superior a 55 °C sin exceder los 60 °C para que el metanol no se evaporara.

La reacción de transesterificación era lenta al inicio y el rendimiento aumentaba con el tiempo. Teniendo en consideración esto, se utilizaron tiempos de 30 y 60 minutos de reacción.

4.1.4.3.- Elección del tipo de catalizador

Los catalizadores que se utilizaron fueron NaOH y KOH. Dichos catalizadores son los más comunes en la obtención de biodiésel, debido a que proporcionan una buena calidad y alto rendimiento de producción a bajo costo. Por otro lado, dichos catalizadores presentaron algunos inconvenientes:

- Fueron difíciles de separar al momento de realizar la purificación del biodiésel.
- Provocaron la formación de jabón.
- Resultaron muy sensibles a la humedad (higroscópicos), de forma que la presencia de agua provocó un aumento del consumo de catalizador.

4.1.4.4.- Determinación de la concentración óptima de catalizador

Para determinar la concentración de catalizador se realizaron ensayos con concentraciones de 0,5 y 1,0 % de catalizador y con una relación molar de metanol/grasa 9:1. Los resultados que se obtuvieron no fueron favorables ya que la solución se saponificaba por el exceso de catalizador. A continuación se realizaron ensayos con porcentajes de 0,4, 0,35, 0,3, 0,25 y 0,2 % de catalizador y se determinó que los porcentajes de 0,4 y 0,35 %, después de 24 horas de terminar la reacción de transesterificación, permitían obtener biodiésel con mayor rendimiento siendo estos los más adecuados. El resto de las concentraciones no permitió obtener biodiésel con un rendimiento adecuado, por lo que estos ensayos fueron descartados.

4.1.5.- Ajuste del proceso de transesterificación con calor

Para preparar las soluciones de metóxido de sodio o potasio, los catalizadores fueron pesados rápidamente y en materiales completamente secos, porque la humedad del medio y el agua provocaban el consumo de catalizador. Después, la grasa se colocó en un matraz seco y se tapó con papel aluminio para evitar coger la humedad del medio. La grasa se mantuvo entre 55 y 60 °C, mediante una plancha eléctrica para impedir que la grasa se solidificase. Al agregar la solución de metóxido de sodio o potasio se controló que la temperatura de reacción no excediese los 60 °C para evitar la evaporación del metanol. Por último, la solución se dejó en reposo en una estufa a una temperatura de 37 °C, verificándose la separación del biodiésel después de 24 horas.

4.1.6.- Determinación del proceso de purificación del biodiésel

La purificación del biodiésel se desarrolló mediante dos pasos. El primer paso fue el lavado del biodiésel; en este paso se observó la formación de una capa blanca al fondo del recipiente que contenía trazas de jabón y glicerol que no se eliminaron en el proceso de transesterificación. Se realizaron tres lavados y se comprobó que este proceso fue eficiente, ya que el líquido residual del último lavado fue transparente y de pH 7,02.

El segundo paso fue el secado del biodiésel, que se realizó para eliminar el agua remanente. Para evitar la degradación del biodiésel hubo que respetar el tiempo de 4 horas y una temperatura de 100 °C previstas para el secado. De esta forma, se pudo obtener un biodiésel brillante y traslúcido, de olor agradable y color amarillo.

4.1.7.- Selección del mejor tratamiento de transesterificación

El biodiésel generado a partir de cada una de las combinaciones experimentales del proceso de transesterificación se analizó teniendo en cuenta las siguientes variables:

- **Densidad.** La densidad se determinó a una temperatura de 15 °C según la norma **NTE INEN 0035 2012**.
- **Viscosidad cinemática.** La viscosidad se determinó a una temperatura de 40 °C según la norma **NTE INEN 0810 2013**.
- **Rendimiento de biodiésel.** Para calcular el porcentaje de biodiésel se midió el volumen obtenido a partir de 100 mL de grasa para cada tratamiento.

Los datos de densidad, viscosidad cinemática y rendimiento de biodiésel que se obtuvieron en cada uno de los tratamientos, y los cálculos de la media, desviación estándar y coeficiente de Pearson se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Datos de densidad, viscosidad cinemática y rendimiento de biodiésel obtenido a partir de la grasa bovina

	Concentración Molar (MetOH:Grasa)	Tiempo de Reacción (min)	Catalizador (%)	Tipo de Catalizador	Densidad a 15 °C (g*mL ⁻¹)		Viscosidad Cinemática a 40 ° C (cSt)		Rendimiento Biodiesel (%)	
					Promedio	Desviación típica	Promedio	Desviación típica	Promedio	Desviación típica
T1	6 a 1	30	0,35	NaOH	0,896	0,004	6,24	0,007	49,85	0,495
T2	6 a 1	30	0,35	KOH	0,895	0,004	6,24	0,035	51,70	0,566
T3	6 a 1	30	0,40	NaOH	0,895	0,001	6,23	0,021	52,05	1,061
T4	6 a 1	30	0,40	KOH	0,895	0,006	6,24	0,007	53,05	0,212
T5	6 a 1	60	0,35	NaOH	0,898	0,001	6,26	0,042	53,85	1,485
T6	6 a 1	60	0,35	KOH	0,899	0,001	6,27	0,035	54,80	0,424
T7	6 a 1	60	0,40	NaOH	0,895	0,001	6,25	0,021	55,60	1,131
T8	6 a 1	60	0,40	KOH	0,893	0,001	6,22	0,014	58,10	0,283
T9	9 a 1	30	0,35	NaOH	0,896	0,002	6,26	0,021	60,05	0,919
T10	9 a 1	30	0,35	KOH	0,896	0,002	6,25	0,028	63,05	0,212
T11	9 a 1	30	0,40	NaOH	0,894	0,003	6,24	0,000	61,00	0,990
T12	9 a 1	30	0,40	KOH	0,893	0,001	6,24	0,007	61,95	0,212
T13	9 a 1	60	0,35	NaOH	0,893	0,003	6,24	0,007	63,70	0,849
T14	9 a 1	60	0,35	KOH	0,894	0,003	6,24	0,007	66,35	0,636
T15	9 a 1	60	0,40	NaOH	0,898	0,001	6,26	0,000	65,60	1,131
T16	9 a 1	60	0,40	KOH	0,892	0,001	6,22	0,007	67,75	0,919
Media global (g*mL⁻¹)					0,895		6,24		58,65	
Desviación típica global (cSt)					0,003		0,021		5,720	
Coefficiente de Variación de Pearson global (%)					0,295		0,332		9,752	

*Los valores de densidad, viscosidad y rendimiento corresponden a un promedio de dos repeticiones por determinación (N=2)

El conjunto de combustibles elaborados presentó una densidad promedio de $0,895 \pm 0,003$ g/mL. Con estos datos se obtuvo un coeficiente de variación de Pearson de $0,295$ %. Este resultado señala que existió poca dispersión de los datos, lo cual significa que las diferentes combinaciones de los niveles de cada tratamiento influyeron mínimamente en la densidad del biodiésel elaborado, además las densidades obtenidas de cada tratamiento estuvieron dentro del rango permitido por la norma ASTM D 1298.

El valor promedio de viscosidad cinemática de los combustibles fue de $6,24 \pm 0,021$ cSt. Con estos datos se obtuvo un coeficiente de variación de Pearson de $0,332$ %. Este resultado señala que existió poca dispersión en los datos, lo cual significa que las diferentes combinaciones de los niveles de cada tratamiento no influyeron en la viscosidad del biodiésel. A pesar de ello, es importante señalar que ninguno de los combustibles elaborados cumplió con la norma ASTM D 445 (rango permitido: 3,5-5). Para solucionar este problema sería necesario realizar una mezcla de biodiesel bovino con diésel fósil, para poder utilizarlo como combustible en motores de explosión.

Por último se obtuvo un valor promedio de rendimiento del $58,653 \pm 5,72$ % de biodiésel. Con estos datos se obtuvo un coeficiente de variación de Pearson de $9,752$ %, significativamente más elevado que para las dos variables anteriormente estudiadas. Este resultado señala la posible existencia de diferencias significativas entre los tratamientos experimentales, que pasaron a analizarse con detalle mediante un análisis de varianza multifactorial, para determinar la importancia relativa de cada uno de los factores implicados en el proceso de transesterificación.

4.1.7.1.- Análisis estadístico del rendimiento de biodiésel

Para determinar la combinación experimental de mayor rendimiento, se sometieron los datos a un análisis de varianza (ANOVA) multifactorial para determinar qué factores e interacciones influyeron en el rendimiento de producción de biodiésel. Los resultados que se obtuvieron en este análisis se indican en la Tabla 5.

Tabla 5. Análisis de varianza del rendimiento de biodiésel para diferentes procesos de transesterificación

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A:Relación Molar _MetOH:Grasa	809,025	1	809,025	1172,58	0,0000
B:Tiempo de Reacción _min	136,538	1	136,538	197,89	0,0000
C:Catalizador _%	17,2578	1	17,2578	25,01	0,0001
D:Tipo de Catalizador	28,3128	1	28,3128	41,04	0,0000
INTERACCIONES					
AB	0,340313	1	0,340313	0,49	0,4902
AC	3,71281	1	3,71281	5,38	0,0305
AD	0,750313	1	0,750313	1,09	0,3089
BC	3,06281	1	3,06281	4,44	0,0473
BD	0,262813	1	0,262813	0,38	0,5438
CD	0,427813	1	0,427813	0,62	0,4398
RESIDUOS	14,4891	21	0,689955		
TOTAL (CORREGIDO)	1014,18	31			

*Los valores-P de color rojo menores a 0,05 prueban significancia estadística.

El ANOVA multifactorial determinó que los efectos principales A (relación molar), B (tiempo de reacción), C (concentración de catalizador), D (tipo de catalizador) y las interacciones dobles AC (relación molar x concentración de catalizador) y BC (tiempo de reacción x concentración de catalizador) tenían un efecto significativo sobre el rendimiento de biodiésel con un 95 % de confianza.

A continuación, se realizó el cálculo de los valores promedio de rendimiento de biodiésel para cada nivel de factor estudiado, así como el intervalo de confianza HSD Tukey al 95 % asociado a dichas medias.

El proceso de transesterificación mediante una relación molar 9:1 de metanol:grasa produjo un rendimiento de 18,75 % superior a cuando se empleó una relación molar 6:1. Esta diferencia se puede observar en la Figura 10.

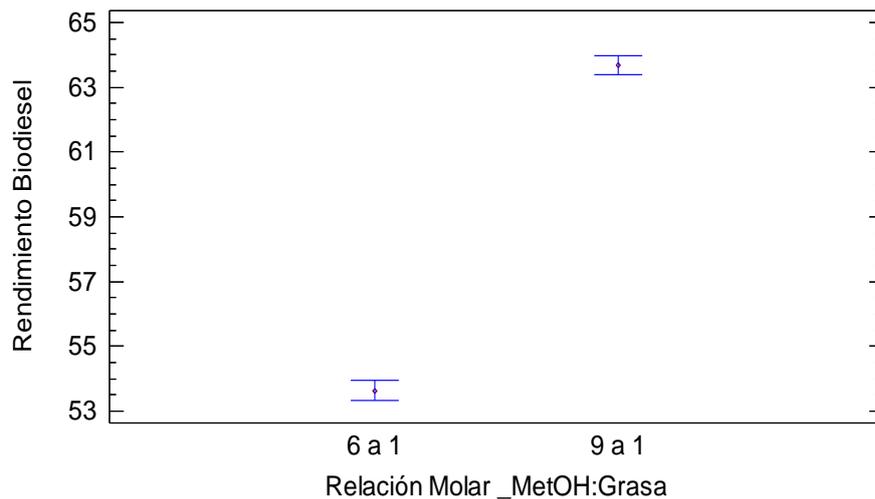


Figura 10. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes relaciones molares Metanol/Grasa. Intervalos de confianza HSD Tukey al 95 %.

En relación al tiempo de reacción, cuando el proceso de transesterificación se llevó a cabo durante un periodo de 60 minutos, generó un rendimiento 7,3 % superior a cuando se empleó un tiempo de 30 minutos. Esta diferencia se puede observar en la Figura 11.

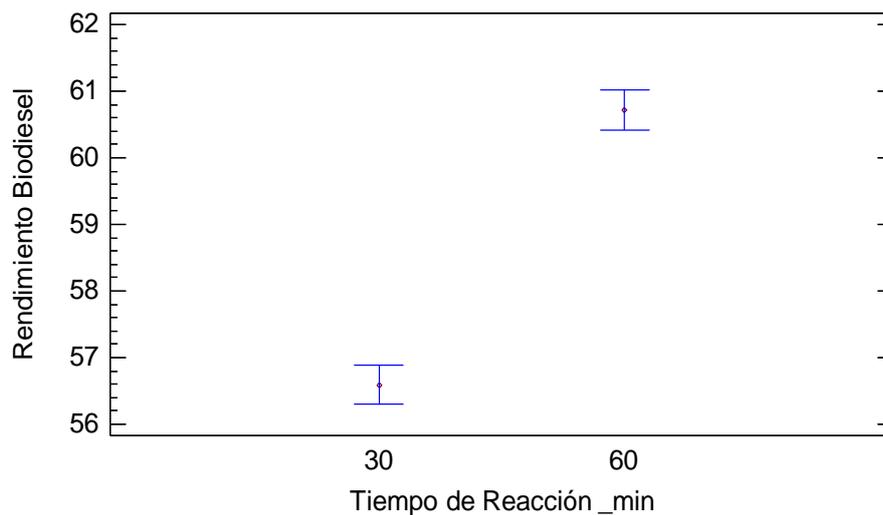


Figura 11. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes relaciones de tiempo de reacción. Intervalos de confianza HSD Tukey al 95 %.

Al observar el efecto de la concentración de catalizador, se apreció que el empleo de una concentración de 0,4 % de KOH o NaOH produjo un incremento del 2,54 % en el rendimiento de producción de biodiésel al ser comparado con la concentración del 0,35 %. Esta diferencia se puede observar en la Figura 12.

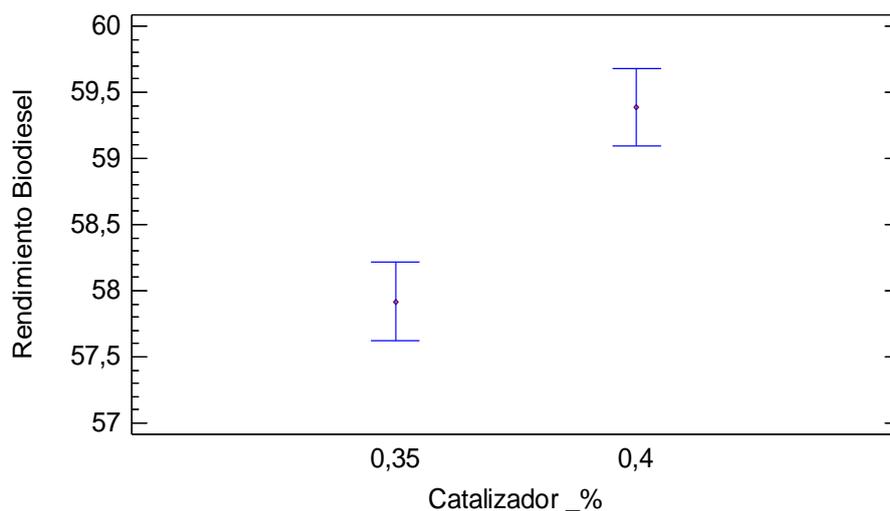


Figura 12. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes concentraciones de catalizador. Intervalos de confianza HSD Tukey al 95 %.

Analizando el tipo de catalizador, se observó que el empleo de KOH produjo, en promedio, un rendimiento de producción de biodiésel un 3,26 % superior al generado al usar NaOH. Ello puede apreciarse en la Figura 13.

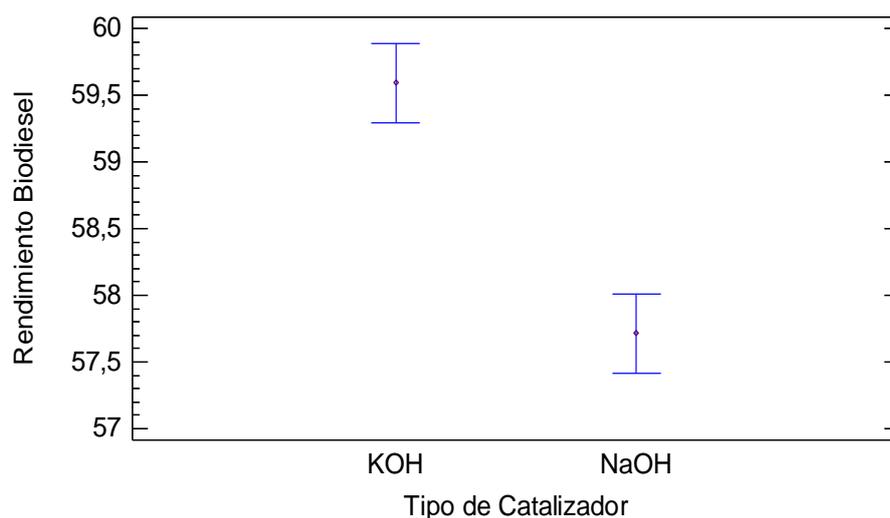


Figura 13. Rendimiento de producción de biodiésel del proceso de transesterificación empleando diferentes tipos de catalizador. Intervalos de confianza HSD Tukey al 95 %.

Al estudiar las interacciones, se observó la significancia del efecto combinado entre la relación molar metanol/grasa y las concentraciones de catalizador. Concretamente, se apreció que al emplear la mayor relación molar (9:1), era poco indiferente el empleo de una concentración de catalizador alta o baja, no así al

emplear una relación molar inferior (6:1). A priori, parecería factible escoger la concentración de catalizador más baja (0,35 %) como idónea para producir biodiésel, al permitir un ahorro del 14,29 % en el uso de catalizador. Esto se interpretó mediante el gráfico de interacción que se indica en la Figura 14

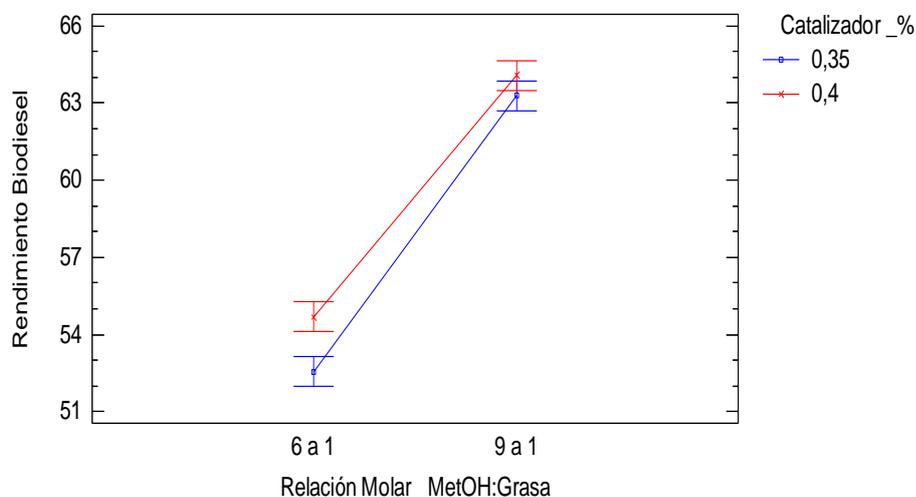


Figura 14. Interacción entre la relación molar y el porcentaje de catalizador empleado en el rendimiento de generación de biodiésel mediante transesterificación. Valores medios e intervalo de confianza al 95 % HSD de Tukey.

En la Figura 15 se puede observar que los tiempos más largos de reacción permitieron desarrollar todo su potencial a las concentraciones más elevadas de catalizador, lo cual no es recomendable rebajar dicha concentración, tal como se podía inferir en el párrafo anterior.

En relación al análisis de la interacción anterior, se puede observar que los mayores rendimientos de producción de biodiésel se produjeron mediante una combinación de largo tiempo (60 min) y altas concentraciones de catalizador (0,4 %). Al pasar de mantener la reacción de 30 a 60 minutos, el rendimiento se incrementó en 2,08 % al emplear una concentración más elevada de catalizador. Esto se dio porque 30 minutos de reacción, probablemente no fue suficiente para que el catalizador acelere la formación de metilésteres en la reacción de transesterificación de forma significativa.

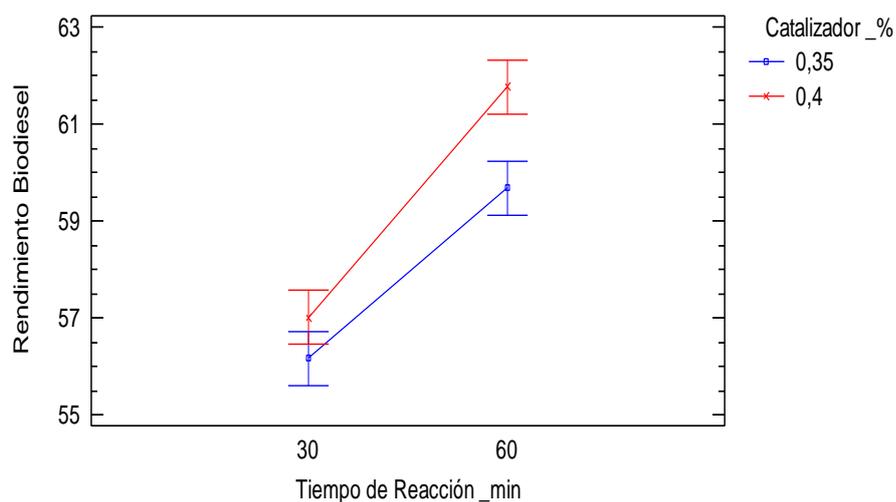


Figura 15. Interacción entre el tiempo de reacción y el porcentaje de catalizador empleado en el rendimiento de generación de biodiésel mediante transesterificación. Valores medios e intervalo de confianza al 95 % HSD de Tukey.

Las interpretaciones están fundamentadas de forma numérica en la Tabla 11. (ANEXO C), donde se muestran los promedios por mínimos cuadrados para rendimiento del biodiésel con intervalos de confianza del 95,0%

Teniendo en cuenta todo lo anterior, el tratamiento que generó el mayor rendimiento de producción de biodiésel resultó ser el T16 (67,75 %), que tiene los siguientes factores y niveles:

- Relación molar metanol/grasa de 9:1.
- Tiempo de reacción de 60 minutos.
- Concentración molar de 0,40 %.
- KOH como catalizador.

4.1.8.- Propiedades fisicoquímicas del biodiésel elaborado mediante el tratamiento de mayor rendimiento

Para evaluar las propiedades fisicoquímicas del biodiésel como combustible se elaboró 1 L de biodiésel del tratamiento **T16**. En él, se determinó la densidad relativa a 15 °C, la viscosidad cinemática a 40 °C y el punto de inflamación. Estos análisis se realizaron en el Departamento de Petróleos, Energías y Contaminación de la Facultad

de Ingeniería Química de la Universidad Central del Ecuador, mediante las normas ASTM recogidas en la norma INEN 2498 (2009).

4.1.8.1.- Determinación de la densidad relativa a 15 °C

La densidad relativa del biodiésel fue determinada según la norma ASTM D 1298 (rango permitido: 0,85–0,90 g/mL), obteniéndose una densidad de 0,899 g/mL. Dato que estuvo dentro del rango permitido por la norma pero muy cerca del límite superior, por lo que si el biodiésel estuviera a temperaturas inferiores a 15 °C podría llegar a gelificarse (**Vivas, 2010**).

4.1.8.2.- Determinación de la viscosidad cinemática a 40 °C

La viscosidad cinemática del biodiésel fue determinada a una temperatura de 40 °C según la norma ASTM D 445 (rango permitido: 3,5-5). Se obtuvo una viscosidad cinemática de 6,23 cSt, valor que fue superior al rango establecido por la norma. Este resultado probablemente se obtuvo debido a que en la composición de la grasa bovina existe un alto porcentaje de ácido esteárico que tiene una temperatura de fusión de 40 ° C (**Bailey, 1984**).

4.1.8.3.- Determinación del punto de inflamación

El punto de inflamación se determinó según la norma ASTM D 93 (valor mínimo: 120 °C), obteniéndose un punto de inflamación de 132,4 °C que está dentro del rango permitido por la norma.

4.1.8.4.- Cuantificación de la glicerina total, libre y ligada presente en la fase glicérica

Después del proceso de transesterificación se realizó el análisis de la glicerina total, libre y ligada presente en la fase glicérica. Se obtuvieron porcentajes de 40,5 % de glicerina total, 32 % de glicerina ligada y un 8,5 % de glicerina libre. Tras la transesterificación, se observó que la fase glicérica contenía una alta cantidad de

glicerina ligada debido a la existencia de un alto porcentaje de monoglicéridos, diglicéridos y triglicéridos no transformados durante el proceso.

4.1.8.5.- Análisis del olor, color y apariencia del biodiésel

Después de la transesterificación se observó que el biodiésel impuro tenía un fuerte olor a metanol y un color 2,5 según la norma ASTM D 1500. Luego de la purificación se obtuvo un biodiésel de olor agradable, ya que el metanol se evaporó en el proceso de secado. También paso a tener un color 1,5 siendo este un indicativo de buena calidad, debido a que si se obtenía un producto de color oscuro esto quería decir que el biodiésel todavía contenía gliceroles y trazas de jabón (ASTM, 2012; Avellaneda Vargas, 2010). En definitiva, se obtuvo un combustible limpio y brillante.

4.1.8.6.- Análisis del biodiésel como combustible

Según Vivas (2010), en el proceso de obtención de biodiésel a partir de grasa bovina hay formación de palmitato de metilo (40,83 %), de estearato de metilo (34,81 %) y de metilésteres de cadena más corta (24,36 %). Teniendo en consideración esto, el estearato de metilo es uno de los componentes de mayor porcentaje que se da biodiésel bovino, según Bailey (1984) el estearato de metilo es un metiléster de cadena larga que tiene una temperatura de fusión de 40 °C, esta información sustenta la explicación del porqué el biodiésel bovino obtuvo una densidad muy cercana al límite y una viscosidad fuera del rango establecida por la norma. Una solución en este caso, sería realizar una mezcla de biodiésel bovino con diésel fósil, ya que en estudios realizados anteriormente se demuestra que la densidad y la viscosidad se pueden regular con una mezcla con diésel fósil, otra opción es utilizar el biodiésel bovino en climas cálidos (Cerón, 2010; Dinis, 2012). Así de esta manera se evitaría problemas mecánicos que afecten al flujo del combustible en las tuberías y el inyector del motor.

El punto de inflamación indicó que a una temperatura de 132,4 °C los vapores que se desprendía del biodiésel empezaban a arder y mantener una llama sin necesidad de calor. Con esto se comprobó el desempeño del biodiésel bovino como combustible.

4.1.9.- Análisis del balance de materia del proceso de producción de biodiésel

El proceso de obtención de biodiésel a partir de la grasa bovina del camal tuvo cuatro etapas, de los cuales se obtuvieron los rendimientos que se indican en la Tabla 6. Además, el balance de materia y los rendimientos del proceso de producción de biodiésel se ilustra en la Figura 16.

Tabla 6. Rendimientos de las fases del proceso de producción de biodiésel a partir de la grasa bovina del camal Ambato

Fases	Rendimientos
1. Método de fusión en seco	90,3 % de grasa
2. Refinamiento de la grasa	97,7 % de grasa refinada
3. Transesterificación de la grasa	86 % de biodiésel impuro
4. Purificación del biodiésel	83,3 % de biodiésel puro
Rendimiento final	63,3 % de biodiésel puro

*Estos cálculos fueron realizados con el tratamiento **T16**, que fue el tratamiento de mayor rendimiento de obtención de biodiésel.

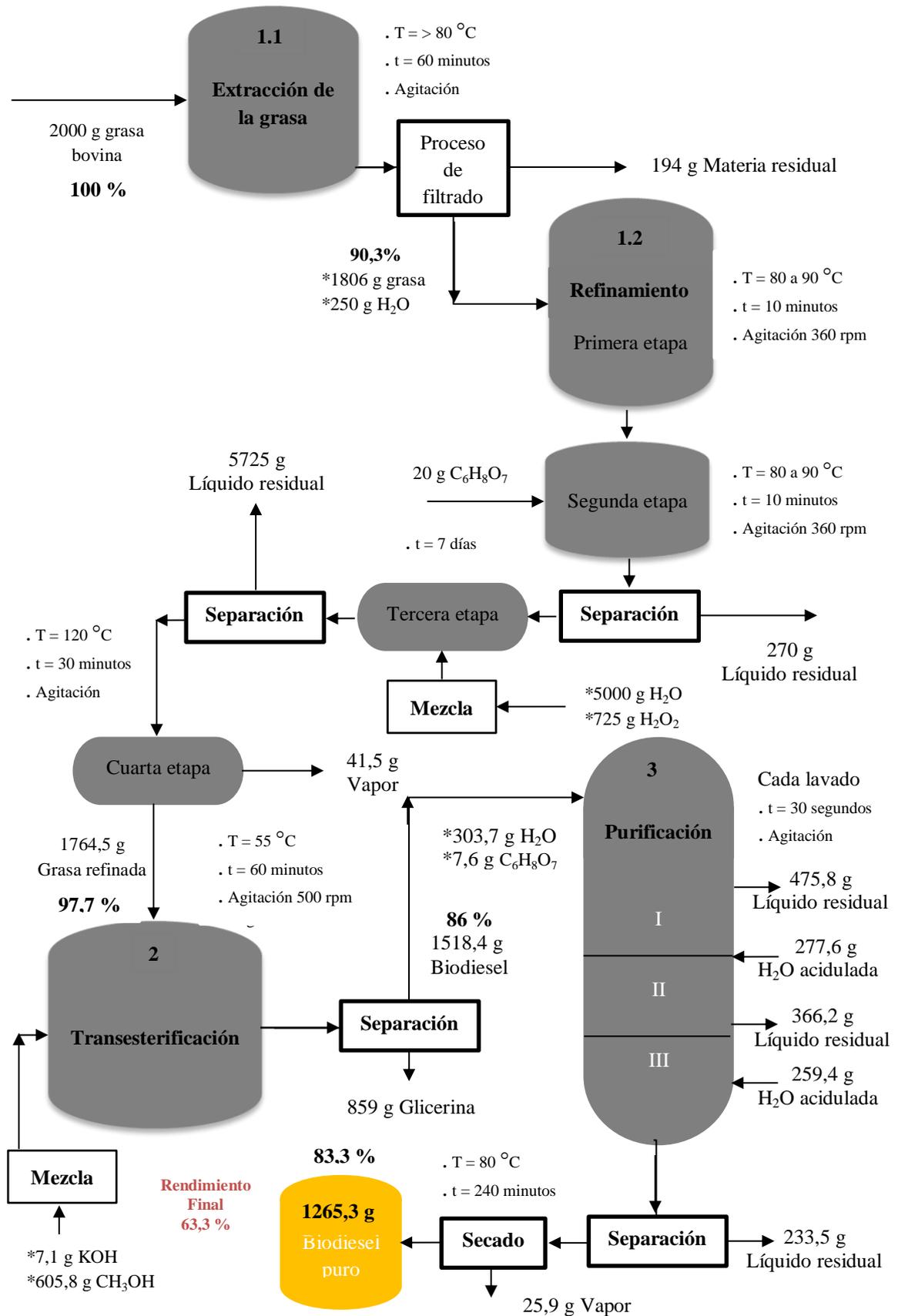


Figura 16. Balance de materia del proceso de producción de biodiésel a partir de la grasa bovina.

4.1.10.- Estimación del costo de producción de biodiésel a partir de grasa bovina

Para la estimación del costo del biodiésel mediante los diferentes tratamientos experimentales, se tomaron en consideración los costos de los materiales, reactivos e insumos que se utilizaron en el proceso de obtención. Estos precios se indican en la Tabla 7.

Tabla 7. Costos de los materiales, reactivos e insumos para la obtención de biodiésel

Descripción	Unidad	Costo (USD)
Grasa bovina en bruto	Kg	ND ¹
Glicerina impura	L	3,50
Agua destilada	L	0,90
Ácido cítrico	Kg	2,00
Peróxido de hidrogeno	L	2,50
Hidróxido de potasio	Kg	40,00
Hidróxido de sodio	Kg	30,00
Metanol	L	4,00
Energía eléctrica	kW·h	0,0937

¹*Se considera que la grasa bovina no tiene precio (producto de deshecho). ²*Para la estimación del cálculo de costos, se consideró que los reactivos e insumos eran de grado analítico.

El análisis del costo del biodiésel se realizó para cada tratamiento del diseño experimental, presentándose estos resultados en la Tabla 8.

Tabla 8. Costos de los materiales, reactivos e insumos necesarios para la obtención de biodiésel a partir de 1000 kg de grasa bovina, mediante cada tratamiento del diseño experimental.

Tto.	Salidas del proceso (USD)		Entradas del proceso (USD)										Beneficio (USD*L ⁻¹)	
	Biodiesel	Glicerina	Extracción y refinamiento de la grasa				Transesterificación			Purificación				
			Agua Destilada	Ácido cítrico	H ₂ O ₂	Elec.	Metanol	NaOH	KOH	Elec.	Agua Destilada	Ácido cítrico	Elec.	
T1	183,82	1055,25	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00	8,93		9,37	30,80	1,71	74,96	0,69
T2	188,68	990,50	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00		11,90	9,37	31,62	1,76	74,96	0,63
T3	189,61	978,25	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00	10,20		9,37	31,77	1,77	74,96	0,62
T4	192,24	943,25	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00		13,60	9,37	32,21	1,79	74,96	0,58
T5	194,34	915,25	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00	8,93		18,74	32,56	1,81	74,96	0,55
T6	196,84	882,00	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00		11,90	18,74	32,98	1,83	74,96	0,52
T7	198,95	854,00	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00	10,20		18,74	33,34	1,85	74,96	0,49
T8	205,53	766,50	227,61	2,00	60,25	37,48	92,00		13,60	18,74	34,44	1,91	74,96	0,41
T9	210,66	698,25	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00	8,93		9,37	35,30	1,96	74,96	0,32
T10	218,55	593,25	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00		11,90	9,37	36,62	2,04	74,96	0,21
T11	213,16	665,00	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00	10,20		9,37	35,72	1,99	74,96	0,26
T12	215,66	631,75	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00		13,60	9,37	36,14	2,01	74,96	0,25
T13	220,26	570,50	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00	8,93		18,74	36,91	2,05	74,96	0,19
T14	227,24	477,75	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00		11,90	18,74	38,08	2,12	74,96	0,10
T15	225,26	504,00	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00	10,20		18,74	37,74	2,10	74,96	0,12
T16	230,92	428,75	227,61	2,00	60,25	37,48	136,00		13,60	18,74	38,69	2,15	74,96	0,05

*Para el cálculo del consumo eléctrico se consideró que la potencia conjunta de los equipos empleados fue de 200 W (0,2 kW).

*El precio del biodiésel se calculó considerando que un galón de diésel cuesta 1 dólar.

*Para el precio de la glicerina impura se tomó un valor referencial de 3.5 USD por litro, considerando que la glicerina pura a nivel analítico cuesta 139 USD + IVA.

Para el análisis costo-beneficio se determinó que, además de aprovechar la grasa bovina del Camal para obtener biodiesel, también se obtuvo como producto residual glicerina impura. En el mercado libre, el precio promedio mínimo de la glicerina pura es de 10 USD por litro, mientras que la glicerina pura grado analítico comercializada por empresas que distribuyen reactivos (LABOMERSA y NOVACHEM) tiene un costo de 139 USD + IVA por litro. La glicerina que se obtuvo en el proceso de transesterificación fue impura, por lo que para realizar los cálculos de costo-beneficio se consideró un precio referencial de 3,50 USD por litro.

Teniendo en consideración los output y los input del proceso de obtención de biodiésel, se determinó que el tratamiento 1 (T1) fue el proceso que mayor beneficio generó en la elaboración de biodiésel ($0,69 \text{ USD}\cdot\text{L}^{-1}$) y el tratamiento 16 (T16) el que produjo menor beneficio ($0,05 \text{ USD}\cdot\text{L}^{-1}$). En todo caso, habrá que tener siempre presente que los resultados presentados dependerán, en cada momento, de la coyuntura de precios del mercado.

Según lo mencionado anteriormente, el tratamiento que mayor beneficio generó fue el T1, que tiene las siguientes características:

- Relación molar de metanol:grasa de 6:1
- Tiempo de reacción de transesterificación: 30 minutos
- Tipo y concentración de catalizador: NaOH al 0,35 %

En resumen, en esta investigación se pudo determinar que, en el aprovechamiento de la grasa bovina del Camal Ambato, el tratamiento de mayor rendimiento de obtención de biodiesel fue el T16 y que el tratamiento que generó el mayor beneficio económico fue el T1.

4.2.- Verificación de hipótesis

Después de haber realizado el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos en la producción de biodiesel se aceptó la hipótesis alternativa 1 (H_{a1}),

pudiéndose afirmar que el rendimiento de generación de biodiésel por transesterificación de grasa bovina se ve afectado por los cuatro factores estudiados: la relación molar metanol/grasa, el tiempo de reacción, el tipo de catalizador y la concentración de catalizador.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.- Conclusiones

En este trabajo de investigación se comprobó que la grasa bovina del CFMA puede ser aprovechada para obtener biodiésel como combustible.

Con los procesos de extracción de grasa por el método de fusión en seco y refinamiento, se determinó que se puede obtener una grasa con características fisicoquímicas adecuadas para la producción de biodiésel. El porcentaje de ácidos grasos libres resultó ser la característica más importante porque, a partir de dicho parámetro, se determinó que el proceso de esterificación no era necesario pudiéndose economizar de esta manera materiales y reactivos.

En cada una de las diferentes combinaciones de factores y niveles implicados en el proceso de transesterificación, se obtuvieron muestras de biodiésel de alto rendimiento, con densidades que estuvieron dentro del rango establecido por la norma ASTM D 1298, pero con viscosidades cinemáticas que no cumplieron con la norma ASTM D 445.

Mediante análisis estadístico se pudo determinar que el mejor tratamiento para la obtención de biodiesel tenía la siguiente combinación de factores y niveles: relación molar de metanol/grasa de 9:1, tiempo de reacción de 60 minutos, utilizando KOH como catalizador a una concentración de 0,40 %.

El biodiésel de mayor rendimiento obtenido (67,75 %) tuvo una densidad ($0,899 \text{ g}\cdot\text{mL}^{-1}$) y un punto de inflamación ($132,4 \text{ }^\circ\text{C}$) que cumplió con la norma INEN 2482 pero incumplió los requisitos de viscosidad (6,23 cSt), ligeramente alta, probablemente debido a la composición de la materia prima utilizada.

Mediante análisis de costes se pudo determinar que el proceso que generó mayor beneficio en la obtención de biodiésel ($0,69 \text{ USD}\cdot\text{L}^{-1}$) fue el siguiente: relación molar de metanol/grasa de 6:1, tiempo de reacción de 30 minutos y empleo de NaOH como catalizador a una concentración del 0,35 %.

5.2.- Recomendaciones

En el proceso de transesterificación hay que tener cuidado con la temperatura evitando, al agregar la solución de metóxido, el exceder los $60 \text{ }^\circ\text{C}$ para que el metanol no se evapore. Además, hay que utilizar materiales y reactivos secos y libres de humedad para evitar un consumo excesivo de catalizador.

Al finalizar el proceso de purificación del biodiésel convendría realizar un análisis de la composición de metilésteres formados durante el proceso, de forma que se conozca mejor sus características, para el proceso posterior de mezclado con aditivos que mejoren sus propiedades físico-químicas.

Se recomienda realizar ensayos con diferentes porcentajes de biodiésel y diésel fósil, para determinar cuál sería la mezcla idónea para ser utilizada en motores de combustión. Además, sería de interés realizar un análisis de emisión de CO_2 y SO_2 que generaría dicho combustible, aspecto importante para su futura comercialización.

Se recomienda llevar a cabo la determinación del índice de cetano de los biocombustibles elaborados en base a grasa bovina mediante el empleo de equipamiento específico para dicho tipo de combustibles.

Finalmente, se recomienda estudiar la posibilidad de llevar a cabo ensayos para la obtención de biodiésel a partir de mezclas de grasa bovina y aceites vegetales, ya que existirían beneficios como la disminución del porcentaje de ácidos grasos libres, la no necesidad de llevar a cabo el proceso de esterificación, la disminución de la densidad y viscosidad de la grasa bovina, el aumento de los rendimientos de producción y la obtención de un producto final más estable.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez Maciel, C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*, 1(359), 63-89
- Angarita Arias, D., y Herrera Dávila, H. (2008). *Evaluación de un proceso de transformación de grasa de pollo en materia prima óptima para la incorporación en procesos industriales*. (Especialista en transformación de residuos agroindustriales), Universidad de Pamplona, Pamplona (Colombia). Recuperado de http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portaIIIG/home_101/recursos/01general/27112014/proyectodianaheydi.pdf
- AOCS (2011). Official Method Ca 14-56. Total, Free and Combined Glycerol Iodometric-Periodic Acid Method: American Oil Chemist's Society.
- Arévalo, P., Astudillo, S., y Ulloa, J. (2008). Obtención de biodiesel a partir de grasa bovina. *La Granja*, 8(2), 9-16.
- Asamblea Nacional de la Republica del Ecuador. (2008). *Constitución de la Republica del Ecuador*. Quito (Ecuador): Recuperado de <http://pdba.georgetown.edu/Parties/Ecuador/Leyes/constitucion.pdf>.
- ASTM. (2012). ASTM D1500. Standard test method for ASTM color of petroleum products (ASTM color scale): ASTM International, West Conshohocken.
- Avellaneda Vargas, F. (2010). *Producción y caracterización de biodiésel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal*. (Tesis Doctoral), Universidad Rovira i Virgili, Tarragona. Recuperado de <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8588/Tesi.pdf;jsessionid=F951A413F2EE1D1994D264FAEFD27348.tdx1?sequence=1>
- Bada, J., Cedeño, F., Prieto, M., y Suárez, R. (1999). Estudio de la densidad y de la viscosidad de algunos ácidos grasos puros. *Grasas y aceites*, 50(5), 359-368.
- Bailey, A. E. (1984). *Aceites y grasas industriales* (Segunda ed.). Barcelona (España): Editorial Reverté S. A.,.
- Beteta, V., Castillo, L., Césare, M. F., Calle, J. L., y León, J. J. (2016). Evaluación de la Purificación de Biodiesel en la etapa final de producción. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(1), 25-33.
- Bou, R., Codony, R., Guardiola, F., y Tres, A. (2010). Valoración analítica y nutricional de grasas. *XXVI Curso de especialización FEDNA*, 4(5), 175-206.

Bulla, E. A. (2014). *Diseño del proceso de producción del biodiesel a partir de aceites de fritura* Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/45935/1/02300238.2014.pdf>

Cantero Vergara, K., y Faber Archila, J. (2010). Simulación de un proceso de producción de biodiésel por lotes a través de medios químicos. *Prospect*, 8(1), 35-42.

Castro Quijano, F., Morales Gutierrez, C., y Yepiz Salazar, A. (2011). Elaboración y determinación de un sistema contable de costos para una empresa artesanal. *Revista El Buzón de Paciol*, 73, 11.

Cerón, A. A. (2010). *Evaluación Experimental de la producción de Biodiesel por Destilación Reactiva*. (Tesis doctorado), Universidad Nacional sede Manizales, Manizales-Colombia. Recuperado de <http://www.bdigital.unal.edu.co/1892/1/anniealexandraceronsanchez.2010.pdf>

Chávez, N. A., Medina, I. E., y Rincón, J. J. (2012). Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 55(2), 62-70.

Darensbourg, D., Darensbourg, M., Dickerson, R., y Gray, H. (1992). *Principios de Química* (S. A. Reverte Ed. Tercera ed.). Barcelona (España).

Dinis, A. C. (2012). *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: nuevos métodos de síntesis.*, Universidad de Extremadura, Badajoz-España. Recuperado de http://dehesa.unex.es/bitstream/handle/10662/326/TDUEX_2012_Pardal.pdf?sequence=1

Fajardo Hernández, F. (2015). *Técnica de caracterización para el biodiésel basados en la normativa internacional ASTM*. (Tesis de Maestría de Fuentes Renovables de Energía y Eficiencia Energética), Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México. Recuperado de http://www.academia.edu/14518807/Caracterizaci%C3%B3n_de_Biodiesel_usando_normatividad_ASTM

Fuentes Rojas, N., y Núñez Barreto, V. *Evaluación del efecto del aceite de coroba en la elaboración de jabón cosmético*. (Traabajo de grado), Universidad de Oriente, Venezuela. Recuperado de <http://ri.bib.udo.edu.ve/bitstream/123456789/2761/1/066-TEISIS.%20IQ.pdf>

García Tenorio, E. (2013). Olivapedia. What indicates the peroxide index of an olive oil? http://www.olivarama.com/web/docs/articulo_1.pdf

Guevara, D. A. (2011). *Estudio de la contaminación del agua y el inadecuado manejo de los desechos líquidos en el área de faenamiento de*

bovinos del camal frigorífico Ambato. (Tesis Maestría), Universidad Técnica de Ambato, Ambato-Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/1779>

INEN (1987). Norma NTE INEN 0810. Productos de petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática y dinámica en líquidos transparentes y opacos. (pp. 14). Quito (Ecuador).

INEN (2009). Norma NTE INEN 2482. Biodiésel. Requisitos. (pp. 29). Quito (Ecuador).

INEN (2012). Norma NTE INEN 0035. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación de la densidad relativa. (pp. 7). Quito (Ecuador).

INEN (2013a). Norma NTE INEN-ISO 660. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación de índice de acidez y de la acidez (IDT). (pp. 5). Quito (Ecuador).

INEN (2013b). Norma NTE INEN-ISO 6320. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de refracción (IDT). (pp. 5). Quito (Ecuador).

INEN (2013c). Norma NTE INEN-ISO 27107. Aceites y grasas de origen animal y vegetal. Determinación del índice de peróxido. Determinación potenciométrica del punto final (IDT). (pp. 6). Quito (Ecuador).

Kessel, N. (2009). ASTM establece las normas para el biodiésel http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html

Marcilla Gomis, A. (1998). *Introducción a las operaciones de separación. Cálculo por etapas de equilibrio*. Alicante (España).

Orantes Letrán, M. (2008). *Purificación de glicerina a pequeña escala como subproducto de reacción de la síntesis de biodiésel por el método de destilación a presión reducida*. (Título de grado), Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. Recuperado de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/06/06_2696.pdf

Petroecuador. (2015). Biocombustibles. 26. <http://www.proecuador.gob.ec/wp-content/uploads/2015/06/Perfiles-de-Inversiones-Promocion-de-Inversiones/Perfiles-de-Inversion/Biocombustibles.pdf>

Rivera, I., Sandoval, G., y Villanueva, G. (2009). Producción de biodiesel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. *Grasas y aceites*, 60(5), 468-474. doi: 10.3989/gya.021409

Rodriguez, J. R. (2006). *Producción y evaluación de biodiesel a partir de aceite de girasol (Heliantus annuus) de desecho del comedor estudiantil de Zamorano*. Honduras. Recuperado de <http://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/779/1/T2307.pdf>

Vivas, A. M. (2010). *Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino*. (Tesis grado), Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia. Recuperado de <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/2038/1/6626V856.pdf>

Yagüe Aylón, M. (2003). Estudio de utilización de aceites para fritura en establecimientos alimentarios de comidas preparadas *Observatori de la Seguretat Alimentària* (pp. 34). Barcelona (España): Universidad Autónoma de Barcelona.

Yaulema, D. H. (2014). *Regeneración de aceites comestibles*. (Tesis de Grado), Universidad de Guayaquil, Guayaquil-Ecuador. Recuperado de <http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/7212/1/YAULEMA.pdf>

ANEXOS

ANEXO A

Tabla 9. Parámetros fisicoquímicos de la grasa bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato

Parámetro	Unidades	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	Promedio	Desviación típica
Densidad a 65 °C	(g·mL ⁻¹)	0,852	0,854	0,851	0,852	0,002
Viscosidad cinemática a 65 °C	(cSt)	9,695	9,765	9,73	9,730	0,035
Índice refracción a 40 °C	-	1,942	1,941	1,942	1,942	0,001
Ácidos grasos libres*	(%)	0,894	0,889	0,892	0,892	0,003
Índice de peróxidos*	mEq O ₂ ·kg ⁻¹ grasa	4,401	4,375	4,358	4,388	0,018

ANEXO B

Tabla 10. Datos de densidad, viscosidad cinemática y rendimientos de obtención de biodiésel a partir de la grasa bovina

	Concentración Molar (MetOH:Grasa)	Tiempo de Reacción (min)	Catalizador (%)	Tipo de Catalizador	Densidad a 15 °C (g/mL)		Viscosidad Cinemática a 40 ° C (cSt)		Rendimiento Biodiesel (%)	
					R1	R2	R1	R2	R1	R2
T1	6 a 1	30	0,35	NaOH	0,898	0,893	6,23	6,24	50,2	49,5
T2	6 a 1	30	0,35	KOH	0,892	0,898	6,26	6,21	51,3	52,1
T3	6 a 1	30	0,4	NaOH	0,894	0,896	6,24	6,21	52,8	51,3
T4	6 a 1	30	0,4	KOH	0,891	0,899	6,24	6,23	52,9	53,2
T5	6 a 1	60	0,35	NaOH	0,899	0,897	6,29	6,23	52,8	54,9
T6	6 a 1	60	0,35	KOH	0,898	0,899	6,24	6,29	54,5	55,1
T7	6 a 1	60	0,4	NaOH	0,894	0,896	6,23	6,26	56,4	54,8
T8	6 a 1	60	0,4	KOH	0,893	0,892	6,21	6,23	58,3	57,9
T9	9 a 1	30	0,35	NaOH	0,897	0,894	6,27	6,24	59,4	60,7
T10	9 a 1	30	0,35	KOH	0,897	0,894	6,27	6,23	62,9	63,2
T11	9 a 1	30	0,4	NaOH	0,892	0,896	6,24	6,24	60,3	61,7
T12	9 a 1	30	0,4	KOH	0,893	0,892	6,23	6,24	62,1	61,8
T13	9 a 1	60	0,35	NaOH	0,895	0,891	6,24	6,23	63,1	64,3
T14	9 a 1	60	0,35	KOH	0,892	0,896	6,23	6,24	66,8	65,9
T15	9 a 1	60	0,4	NaOH	0,897	0,898	6,26	6,26	64,8	66,4
T16	9 a 1	60	0,4	KOH	0,893	0,891	6,21	6,22	67,1	68,4

ANEXO C

Tabla 11. Rendimientos de producción de biodiésel agrupados por factores e interacciones dobles

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	32	58,6531			
Relación Molar _MetOH:Grasa					
6 a 1	16	53,625	0,207659	53,1931	54,0569
9 a 1	16	63,6813	0,207659	63,2494	64,1131
Tiempo de Reacción _min					
30	16	56,5875	0,207659	56,1556	57,0194
60	16	60,7188	0,207659	60,2869	61,1506
Catalizador _%					
0,35	16	57,9188	0,207659	57,4869	58,3506
0,4	16	59,3875	0,207659	58,9556	59,8194
Tipo de Catalizador					
KOH	16	59,5938	0,207659	59,1619	60,0256
NaOH	16	57,7125	0,207659	57,2806	58,1444
Relación Molar _MetOH:Grasa por Tiempo de Reacción _min					
6 a 1,30	8	51,6625	0,293674	51,0518	52,2732
6 a 1,60	8	55,5875	0,293674	54,9768	56,1982
9 a 1,30	8	61,5125	0,293674	60,9018	62,1232
9 a 1,60	8	65,85	0,293674	65,2393	66,4607
Relación Molar _MetOH:Grasa por Catalizador _%					
6 a 1,0,35	8	52,55	0,293674	51,9393	53,1607
6 a 1,0,4	8	54,7	0,293674	54,0893	55,3107
9 a 1,0,35	8	63,2875	0,293674	62,6768	63,8982
9 a 1,0,4	8	64,075	0,293674	63,4643	64,6857
Relación Molar _MetOH:Grasa por Tipo de Catalizador					
6 a 1,KOH	8	54,4125	0,293674	53,8018	55,0232
6 a 1,NaOH	8	52,8375	0,293674	52,2268	53,4482
9 a 1,KOH	8	64,775	0,293674	64,1643	65,3857
9 a 1,NaOH	8	62,5875	0,293674	61,9768	63,1982
Tiempo de Reacción _min por Catalizador _%					
30,0,35	8	56,1625	0,293674	55,5518	56,7732
30,0,4	8	57,0125	0,293674	56,4018	57,6232
60,0,35	8	59,675	0,293674	59,0643	60,2857
60,0,4	8	61,7625	0,293674	61,1518	62,3732
Tiempo de Reacción _min por Tipo de Catalizador					
30,KOH	8	57,4375	0,293674	56,8268	58,0482
30,NaOH	8	55,7375	0,293674	55,1268	56,3482
60,KOH	8	61,75	0,293674	61,1393	62,3607
60,NaOH	8	59,6875	0,293674	59,0768	60,2982
Catalizador _% por Tipo de Catalizador					
0,35,KOH	8	58,975	0,293674	58,3643	59,5857
0,35,NaOH	8	56,8625	0,293674	56,2518	57,4732
0,4,KOH	8	60,2125	0,293674	59,6018	60,8232
0,4,NaOH	8	58,5625	0,293674	57,9518	59,1732

*Datos en rojo, diferencias significativas al 95 % de confianza (intervalo HSD Tukey)

ANEXO D

Tabla 12. Materiales y equipos para el proceso de extracción de grasa

Materiales	Equipos
Dos ollas	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Cedazo metálico	Cocineta eléctrica
Lienzo	
Grasa	

ANEXO E

Tabla 13. Materiales, reactivos y equipos para el proceso de refinamiento de la grasa extraída

Materiales	Reactivos	Equipos
Dos vasos de precipitación pyrex de 500 mL	Ácido cítrico	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Probeta de 50 mL	Agua oxigenada	Cocineta eléctrica
Varilla de agitación		
Jarra de 1L		
Olla		
Agua destilada		
Grasa		

ANEXO F

Tabla 14. Materiales y equipos para la determinación de la densidad de la grasa extraída

Materiales	Equipos
Picnómetro de 10 mL	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Termómetro	Cocineta eléctrica
Probeta de 50 mL	
Olla	
Agua destilada	
Grasa	

ANEXO G

Tabla 15. Materiales y equipos para la determinación de la viscosidad cinemática de la grasa

Materiales	Equipos
Viscosímetro de Cannon	Cocineta eléctrica
Termómetro	
Vaso de precipitación de 100 mL	
Olla	
Agua	
Grasa	

ANEXO H

Tabla 16. Materiales y equipos para la determinación del índice de refracción de la grasa

Materiales	Equipos
Gotero	Refractómetro
Grasa	

ANEXO I

Tabla 17. Materiales, reactivos y equipos para la determinación del porcentaje de ácidos grasos libres de la grasa

Materiales	Reactivos	Equipos
Matraz Erlenmeyer de 100 mL	Hidróxido de sodio	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Probeta de 250 mL	Etanol	Plancha eléctrica
Bureta de 25 mL	Fenolftaleína	
Agua destilada		
Grasa		

ANEXO J

Tabla 18. Materiales, reactivos y equipos para la determinación del índice de peróxidos de la grasa

Materiales	Reactivos	Equipos
Matraz Erlenmeyer de 100 mL	Cloroformo	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Probeta de 250 mL	Ácido glacial acético	Plancha eléctrica
Bureta de 25 mL	Yoduro de potasio	
Vaso de precipitación de 100 mL	Tiosulfato de sodio	
Agua destilada	Almidón	
Grasa		

ANEXO K

Tabla 19. Materiales, reactivos y equipos para el proceso de transesterificación con calor

Materiales	Reactivos	Equipos
Matraces Erlenmeyer de 250 y 500 mL	Metanol anhidro	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Probetas de 250 y 500 mL	Hidróxido de sodio	Plancha eléctrica
Pipeta de 10 mL	Hidróxido de potasio	
Vaso de precipitación de 1000 mL		
Papel aluminio		
Grasa		

ANEXO L

Tabla 20. Materiales, reactivos y equipos para el proceso de purificación del biodiésel

Materiales	Reactivos	Equipos
Matraces Erlenmeyer de 250 y 500 mL	Ácido cítrico	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Probetas de 250 y 500 mL		
Pipeta de 10 mL		
Vaso de precipitación de 1000 mL		
Agua destilada		
Biodiésel impuro		

ANEXO M

Tabla 21. Materiales, reactivos y equipos para los procesos de determinación de glicerina total, libre y ligada

Materiales	Reactivos	Equipos
Matraces erlenmeyer de 250 y 500 mL	Hidróxido de potasio	Balanza analítica de 0,1 mg de precisión
Probetas de 250 y 500 mL	Cloroformo	Plancha eléctrica
Pipeta de 10 mL	Ácido periódico	
Dos vasos de precipitación de 500 mL	Ácido acético	
Bureta de 25 mL	Yoduro de potasio	
Gotero	Almidón	
Agua destilada		
Biodiésel impuro		

ANEXO N FOTOGRAFÍAS

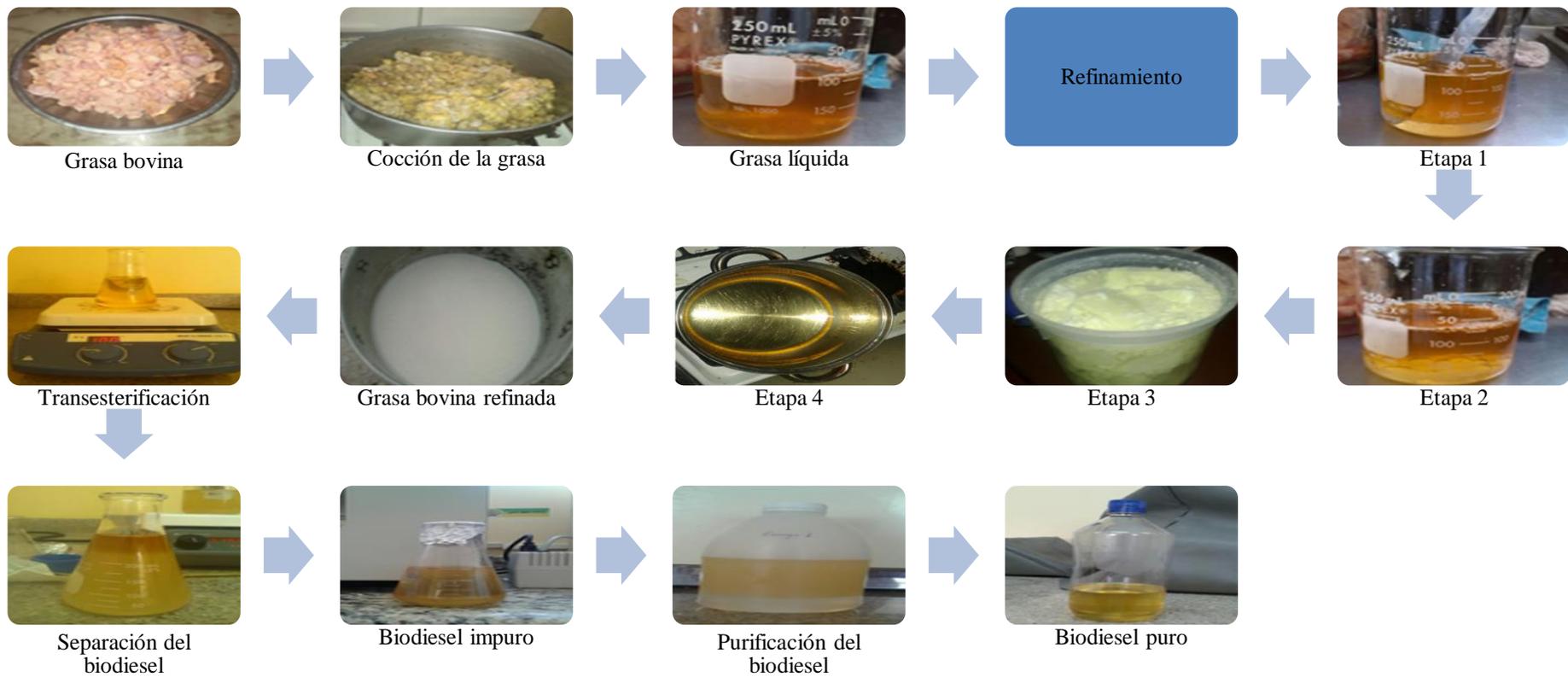


Figura 17. Proceso de obtención de biodiésel a partir de la grasa bovina