

OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE SEBO BOVINO AISLADO DE LOS
RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL PROCESO DE DESCARNADO EN EL
CURTIDO DE CUERO

ANGEL ANTONIO DIAZ BURGOS

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIA EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUIMICA
SAN JUAN DE PASTO
2019

OBTENCIÓN DE BIODIÉSEL A PARTIR DE SEBO BOVINO AISLADO DE LOS
RESIDUOS SÓLIDOS PRODUCIDOS EN EL PROCESO DE DESCARNADO EN EL
CURTIDO DE CUERO

ANGEL ANTONIO DIAZ BURGOS

Trabajo de grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Químico

Director
JUAN JOSE LOZADA CASTRO
Doctor en ciencias químicas

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE CIENCIA EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE QUIMICA
SAN JUAN DE PASTO
2019

Las ideas y conclusiones aportadas en el presente trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de los autores.

Artículo 1° del acuerdo No. 324 del 11 de octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Nota de aceptación

JUAN JOSE LOZADA CASTRO

Director

WILLIAM ALFREDO PÉREZ

Jurado

FREDDY PANTOJA TIMARÁN

Jurado

San Juan de Pasto, 24 de abril del 2019.

RESUMEN

En el proceso de curtido de cuero, particularmente en la etapa de descarnado se produce el sebo, residuo que contiene grandes cantidades de grasas, en la mayoría de plantas industriales este residuo puede contaminar aguas y suelos por la mala disposición, para aprovechar este recurso se han aplicado procesos químicos para transformar las grasas extraídas del sebo en biodiésel. Para ello se aplicó la técnica de extracción con disolventes presurizados, a una presión de 15 PSI usando gasolina como disolvente. En el proceso de extracción se alcanzaron porcentajes de recuperación de grasa de 51,0 %. La calidad de la grasa extraída se determinó analizando: la densidad, la viscosidad, el punto de fusión, la humedad, la acidez, el índice de acidez, los peróxidos, la saponificación y el índice yodo. Se obtuvo biodiesel mediante transesterificación con metanol e hidróxido de sodio, el contenido de metil ésteres producidos en la reacción se caracterizó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas en donde se encontraron como componentes mayoritarios los esteres metílicos de los ácidos grasos palmítico y oleico. Mediante los principales parámetros fisicoquímicos como lo son la densidad, viscosidad, punto de inflamación, poder calorífico, humedad, índices de acidez e índices de yodo se caracterizó el biodiesel obtenido el cual se perfila como un potencial producto para ser aplicado en motores de combustión interna.

ABSTRACT

In the leather tanning process, particularly in the fleshing stage, the tallow residue that contains large amounts of fats is produced. In most industrial plants, this waste can contaminate water and soil due to the unwillingness to take advantage of this resource. Chemical processes to transform fats extracted from sebum into biodiesel. For this, the technique of extraction with pressurized solvents was applied at a pressure of 15 PSI using gasoline as solvent. In the extraction process, percentages of fat recovery of 51.0% were reached. The quality of the extracted fat was determined by analyzing: the density, the viscosity, the melting point, the humidity, the acidity, the acidity index, the peroxides, the saponification and the iodine index. Biodiesel was obtained by transesterification with methanol and sodium hydroxide, the content of methyl esters produced in the reaction was characterized by gas chromatography coupled to mass spectrometry where methyl esters of palmitic and oleic fatty acids were found as major components. Through the main physicochemical parameters such as density, viscosity, flash point, calorific value, humidity, acidity index and iodine index, the biodiesel obtained was characterized, which is outlined as a potential product to be applied in combustion engines internal.

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

1. TABLAS Y LISTAS.....	9
2. GLOSARIO	12
3. ABREVIATURAS Y ACRONIMOS.....	13
4. INTRODUCCIÓN	15
5. OBJETIVOS	17
4.1 Objetivo general.....	17
4.2 Objetivos específicos	17
6. ESTADO DEL ARTE.....	18
6.1 Marco teórico	18
6.1.1 Biocombustibles.....	18
6.1.2 Tipos de biomasa	18
6.1.3 Tipos de biocombustibles	19
6.1.4 Biodiésel	20
6.1.5 Aceites y grasas.....	20
6.1.7 Materias primas para la producción de biodiésel.....	23
6.1.8 Métodos para la obtención de biodiésel.....	25
6.1.9 Transesterificación.....	26
6.1.10 Mecanismo de reacción de la transesterificación en medio básico.....	27
6.1.11 Propiedades de biodiésel.....	29
6.2 Antecedentes	33
6.2.1 Uso y producción de biodiésel en Colombia	35
6.2.2 Sebo bovino como alternativa para la producción de biodiésel.....	36
6.2.3 Biodiésel producido a partir de desechos grasos provenientes de la industria del cuero.	39
7. MATERIALES Y METODOS.....	42
7.1 MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS.....	42
7.2 PRETRATAMIENTO DE LA MUESTRA.....	43
7.3 EXTRACCION DE GRASA CON SOLVENTE PRESURIZADO	43
7.3.1 Determinación de los factores relevantes en el proceso de extracción.	44
7.3.2 Optimización del proceso de extracción	45
7.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SEBO BOVINO AISLADO.....	45
7.4.2 Identificación de ácidos grasos presentes en el sebo bovino.	46

7.5 OBTENCION DE BIODIÉSEL	46
7.5.1 Optimización del proceso de obtención de biodiésel.....	47
7.5.2 Purificación del biodiésel.....	49
7.5.3 Cuantificación de metil ésteres presentes en el biodiesel	49
7.6 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BIODIÉSEL OBTENIDO.....	49
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
8.1 TRATAMIENTO DE MUESTRA	51
8.2 EXTRACCION DE GRASA CON SOLVENTE PRESURIZADO	51
8.2.1 Determinación de los factores relevantes en el proceso de extracción.	51
8.2.2 Optimización del proceso de extracción	56
8.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SEBO BOVINO AISLADO.....	60
8.3.1 Propiedades fisicoquímicas del sebo bovino	60
8.3.2 Identificación de ácidos grasos presentes en el sebo bovino.	63
8.4 OBTENCION DE BIODIÉSEL	64
8.4.1 Optimización del proceso de obtención de biodiésel.....	64
8.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BIODIÉSEL OBTENIDO.....	75
9. CONCLUSIONES	80
10. RECOMENDACIONES.....	82
11. BLIOGRAFIA	83
12. ANEXOS	90

1. TABLAS Y LISTAS

Lista de tablas

Tabla 1. Ácidos grasos que estructuran los triacilglicérido	21
Tabla 2. Comparación propiedades de combustibles.....	23
Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas biodiésel de palma y <i>Jatropha curcas</i>	24
Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas biodiésel producido con aceite residual de cocina y diésel comercial.....	24
Tabla 5. Sustituyentes para triacilglicéridos	26
Tabla 6. Sustituyentes para alcohol	26
Tabla 7. Especificaciones biodiésel	30
Tabla 8. Producción de biodiésel y materia primas usadas	34
Tabla 9. Ácidos grasos presentes en el sebo bovino y aceite de soya	37
Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de sebo bovino.....	38
Tabla 11. Ácidos grasos presentes en el aceite de descarnado	39
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del aceite de descarnado antes y después del pretratamiento	40
Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas biodiésel obtenido a partir de aceite de descarnado	40
Tabla 14. Equipos, materiales y reactivos	42
Tabla 15. Factores diseño experimental recuperación de grasa (sebo bovino).....	44
Tabla 16. Variable de respuesta diseño experimental recuperación de grasa.....	44
Tabla 17. Matriz diseño factorial completo 2^4	44
Tabla 18. Factores y niveles diseño central compuesto 2^2 + puntos estrella	45
Tabla 19. Ejecuciones experimentales diseño central compuesto 2^2 + puntos estrella	45
Tabla 20. Parámetros y métodos para la caracterización del sebo bovino.....	46
Tabla 21 Factores diseño experimental obtención de biodiésel.....	47
Tabla 22. Variables de respuesta diseño experimental obtención de biodiésel.	47
Tabla 23. Matriz diseño experimental obtención de biodiésel	48
Tabla 24. Parámetros físicos y métodos para la caracterización de biodiésel	49
Tabla 25. Parámetros químicos y métodos para la caracterización de biodiésel	50
Tabla 26. Diseño experimental 2^4 para la extracción de grasa con solvente presurizado	52
Tabla 27. ANOVA diseño experimental 2^4 para la extracción de grasa.....	54
Tabla 28. Diseño experimental compuesto central 2^2 + puntos estrella	56
Tabla 29. ANOVA Diseño experimental compuesto central 2^2 + puntos estrella.....	57
Tabla 30. Condiciones óptimas para la recuperación de grasa (sebo bovino)	59
Tabla 31. Propiedades químicas grasa extraída (sebo bovino)	61
Tabla 32. Ésteres metílicos de ácidos grasos presentes en sebo bovino extraído con gasolina....	63
Tabla 33. Diseño experimental completo 2^4 para optimización en la obtención de biodiésel.....	68
Tabla 34. ANOVA diseño experimental 2^4 + puntos estrella.....	69
Tabla 35. Condiciones óptimas para la obtención de ésteres metílicos (biodiésel).....	75
Tabla 36. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel	76

Lista de figuras

Figura 1. Estructura del glicerol y un triacilglicérido	21
Figura 2. Estructura ácido graso (Ácido esteárico).....	21
Figura 3. Ejemplo de un ácido graso saturado (ácido palmítico)	22
Figura 4. Ejemplos de ácidos grasos insaturados (ácido Trans- elaidico, ácido Cis- oléico) (Brown, 2011)	22
Figura 5. Reacción de transesterificación (da Silva & Sousa, 2013).....	26
Figura 6. Formación de un alcóxido (Bhuiya et al., 2016)	27
Figura 7. Ataque nucleófilico sobre el triacilglicérido (Bhuiya et al., 2016)	28
Figura 8. Formación del éster alquílico y un anión triacilglicérido (Bhuiya et al., 2016)	28
Figura 9. Formación del diacilglicérido y recuperación de la base (Bhuiya et al., 2016)	29
Figura 10. Proceso de obtención de biodiésel en Colombia	36
Figura 11. Reacción de transesterificación de triacilglicéridos (Meher, Vidyasagar, & Naik, 2006)	37
Figura 12. A.) Olla a presión convencional, B.) Portamuestras con residuos grasos	43
Figura 13. Residuos sólidos de descarnado. A.) Antes del tratamiento y B.) Después del tratamiento	51
Figura 14. Probabilidad normal para residuos en la recuperación de grasa.....	52
Figura 15. Residuos para la recuperación de grasa (sebo bovino).....	53
Figura 16. Residuos para la recuperación de grasa (sebo bovino).....	53
Figura 17. Diagrama de Pareto recuperación de grasa diseño factorial completo 2^4	54
Figura 18. Diagrama proceso de extracción con solvente presurizado.....	55
Figura 19. Diagrama de Pareto recuperación de grasa diseño compuesto central 2^2 + puntos estrella	57
Figura 20. Superficie de respuesta interacción entre tipo de disolvente y tiempo.....	58
Figura 21. Superficie de respuesta interacción entre tipo de disolvente y cantidad de disolvente	58
Figura 22. Ripio de cuero desengrasado	59
Figura 23. Residuos de descarnado degradados	60
Figura 24. Sebo bovino (grasa) fundido	61
Figura 25. Cromatograma metil ésteres de ácidos grasos (Biodiésel)	63
Figura 26. Mezcla de reacción transesterificación de ácidos grasos	65
Figura 27. Montaje de reacción para la obtención de biodiésel.....	65
Figura 28. Separación de componentes en la mezcla de reacción	66
Figura 29. Biodiésel	66
Figura 30. Diagrama de Pareto diseño experimental 2^4 + puntos estrella para la obtención de biodiésel	70
Figura 31. Gráfico de Probabilidad Normal para Residuos	70
Figura 32. Gráfico de Residuos para Metil ésteres	71
Figura 33. Gráfico de Residuos para Metil ésteres	71
Figura 34. Efectos principales para Metil ésteres	72
Figura 35. Superficie de Respuesta para la interacción Temperatura – Tiempo	73
Figura 36. Superficie de Respuesta para la interacción Cantidad KOH - Temperatura	73
Figura 37. Superficie de Respuesta Cantidad de metanol – Tiempo	74

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Modelo ajustado para la recuperación de grasa a partir de sebo bovino.....	59
Ecuación 2. Cálculo porcentaje total de ésteres metílicos EN14103.....	67
Ecuación 3. Modelo ajustado para el porcentaje de metil ésteres formados	75

Lista de anexos

ANEXO 1. Cálculos recuperación de grasa diseño experimental completo 2 ⁴	90
ANEXO 2. Cálculos recuperación de grasa diseño experimental 2 ² + puntos estrella.....	91
ANEXO 3. Gráfico de residuos vs predichos para recuperación de grasa	91
ANEXO 4. Gráfica de Probabilidad Normal para predichos.....	92
ANEXO 5. Gráfico de Residuos vs número de ejecución para recuperación de grasa	92
ANEXO 6. Cálculos para la determinación del índice de acidez y la acidez	92
ANEXO 7. Cálculos para la determinación del índice de yodo	93
ANEXO 8. Cálculos para la determinación de índice de peróxidos.....	94
ANEXO 9. Cálculos para la determinación del índice de saponificación	94
ANEXO 10. Cálculo determinación de humedad.....	95
ANEXO 11. Cálculo porcentaje de ésteres metílicos	95

2. GLOSARIO

Biodiesel. Biocombustible producido a partir de aceites vegetales y grasa animales.

Biocombustible: Mezcla de sustancias orgánicas que se utilizan como combustible.

Biomasa: Material orgánico animal o vegetal susceptible a ser aprovechado.

Combustión: Proceso de oxidación acompañado de desprendimiento de energía.

Bioetanol: Biocombustible producido a partir de la fermentación de azúcares.

Curtido de cuero: Proceso fisicoquímica realizado para preservar las pieles.

Recorte: Proceso en el cual se recortan parte de las extremidades, cuello y cola en el cuero.

Salado: Adición de cloruro de sodio al cuero para que se conserve.

Remojo: Proceso llevado a cabo para tener pieles rehidratadas.

Pelambre: Proceso en el cual se depila el cuero con ayuda de agentes químicos como sulfuro de sodio y cal.

Descarnado: Proceso mecánico se retira de la piel los restos de grasa y tejido conjuntivo de la piel.

Desencalado: se lleva a cabo el lavado de la piel para liberarla de agentes químicos principalmente la cal, las pieles se tratan con sales de amonio y ácidos orgánicos.

Rendido: Proceso en el cual se aflojan las fibras de colágeno con ayuda enzimática

Precurtido: Se hace interaccionar la piel con ácido sulfúrico y cloruro de sodio

Curtido: La piel se trata con sulfato de cromo (III) como agente de curtido.

Recurtido: Se efectúa en el partes del cuero que han quedado blandas en donde se agregan agentes re curtientes vegetales y resinas.

Engrasado: Este proceso se lleva a cabo impregnando la piel curtida con anilinas y aceites

Secado: Proceso en el cual la piel curtida se expone al sol para terminar su tratamiento.

Triacilglicérido: Compuestos formados por tres ácidos grasos enlazados al glicerol.

Catalizador: Sustancia que modifica la velocidad de una reacción

Nucleófilo: Especie química que reacciona cediéndole un par de electrones a otra especie.

Saponificación: proceso químico por el cual un cuerpo graso, unido a un álcali y agua, da como resultado jabón y glicerina

Extracción: Procedimiento de separación de una sustancia

Solvente: La sustancia en la que se diluye un soluto

Diseño factorial: Es el estudio simultáneo de los efectos de varios factores que pueden influir en una variable respuesta.

Factores: Cualquier influencia que afecta la variable respuesta (excluyendo a los tratamientos) estos son controlados casi completamente por el investigador.

Cromatografía: Conjunto de métodos de separación para la caracterización de mezclas complejas.

Optimización: Método para determinar los valores de las variables que intervienen en un proceso o sistema para que el resultado sea el mejor posible.

Espectrometría de masas: es una técnica de análisis microanalítica que permite fragmentar especies moleculares y atómicas separando los fragmentos en función de la relación masa-carga.

3. ABREVIATURAS Y ACRONIMOS

RO⁻: Ion alcóxido
 ROH: Alcohol
 B: Base
 BH: Base protonada
 ASTM: Sociedad Americana de prueba de materiales
 EN: Comité europeo de normalización
 B20: Mezcla de diésel 80% diésel y 20% biodiesel
 B100: Biodiesel 100%
 B5: mezcla de diésel, 95% diésel y 5% biodiesel
 °C: Grados centígrados
 C_{18:0}: Ácido esteárico
 C_{14:0}: Ácido mirístico
 C_{16:0}: Ácido palmítico
 C_{16:1}: Ácido palmitoleico
 C_{18:1}: Ácido oleico
 C_{20:0}: Ácido araquídico
 ANP: Agencia nacional de petróleo, gas natural y biocombustibles de Brasil
 %W: Porcentaje en peso
 Min: Mínimo
 Max: Máximo
 mm²/S: milímetros al cuadrado por segundos, unidades de viscosidad
 Kg/m³: Kilogramos sobre metro al cubo, unidades de densidad
 mg KOH/ g: miligramos de hidróxido de potasio por gramo de muestra
 g de yodo/ 100g: gramo de yodo por 100g de muestra
 mL: Volumen en mililitros
 µL: Volumen en microlitros
 µm: Longitud en micrómetros
 mm: Longitud en milímetros
 cm: Longitud en centímetros
 g: Peso en gramos
 ppm: Partes por millón
 N/m²: Presión en Newton por metro al cuadrado
 SM: Suma de cuadrados
 CM: Cuadrado medio
 Gl: Grados de libertad
 CO: Monóxido de carbono
 NO_x: Óxidos de Nitrógeno
 SO_x: Óxidos de azufre
 PSI: Unidad de presión
 ICONTEC: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
 ANOVA: Análisis de Varianza
 R²: Coeficiente de determinación
 %V/V: porcentaje volumen - volumen
 KJ/Kg: Kilojulios por kilogramo

meq de O₂/Kg: Miliequivalentes de oxígeno por kilogramo de muestra.

4. INTRODUCCIÓN

En el departamento de Nariño principalmente en el municipio de Belén se ha venido desarrollando un renglón bastante amplio en la economía fundamentado en el curtido de cuero. Este proceso consiste en el tratamiento fisicoquímico de las pieles para conservarlas, desarrollándose en etapas como: recorte y salado, remojo, pelambre, descarnado y dividido, desencalado, rendido o purga, precurtido o piquel, curtición, recurtición, teñido, engrasado, secado y tensado (Lozada, 2014) .

El descarnado y dividido consiste en la eliminación de sebo (grasa) y restos de tejido conjuntivo mediante métodos mecánicos, estos residuos representa un 30% del peso de la piel.

Las grasas eliminadas son triglicéridos que tienen principalmente ácidos grasos como mirístico, palmítico, palmitoleico, oleico, linoleico y araquidónico, este desecho producto del proceso de curtido del cuero no presenta muchas aplicaciones y genera un alto impacto por la gran cantidad de residuos producidos en este tipo de industria (Encinar, Sánchez, Martínez, & García, 2011; Moraes et al., 2008).

Al ser aproximadamente 29.000 pieles tratadas al mes (Lozada, 2014) las grasas de desecho generadas en el proceso, causan un gran impacto en el ambiente por la mala disposición que se le da, fundamentalmente en las fuentes hídricas ya que al ser inmisible y estables en el agua dan origen a la formación de natas o espumas lo que causa grandes inconvenientes dispersándose en mayor magnitud contaminación (Vidales-Olivo, Leos-Magallanes, & Campos-Sandoval, 2010). Por tal razón es recomendable propiciar el desarrollo de metodologías con las cuales se aprovechen las grasas como materia prima para la producción de biocombustibles (García, Laura, & Etter, 2012) disminuyendo el uso excesivo de combustibles fósiles y mitigando así el impacto provocado en el medio ambiente.

Uno de los biocombustibles con alto impacto en la economía actual es el biodiésel, siendo este una mezcla de ésteres alquílicos derivados de los ácidos grasos provenientes tanto de aceites vegetales como de grasas animales (IICA, 2010), los cuales presentan propiedades importantes como viscosidad cinemática, el punto de inflamación, el poder calorífico y su composición carbonada (El-Araby, Amin, El Morsi, El-Ibiari, & El-Diwani, 2018). Estas propiedades guardan similitudes con respecto a los valores determinados para el diésel convencional por lo que se considera como un sustituyente idóneo del diésel, por otra parte al tener origen biológico es considerado un combustible no toxico, renovable y amigable con el medio ambiente además de ellos las emisiones hacia la atmosfera se reducen en 15% CO, 38,5% NO_x, 72,7% SO_x y la opacidad de los humos en un 56,8% (Alptekin, Canakci, & Sanli, 2012).

El biodiésel se produce mediante transesterificación en donde los triacilglicéridos presentes en los aceites vegetales y las grasas animales se hacen reaccionar en presencia de un catalizador el cual puede ser una base, un ácido o una enzima con un alcohol de cadena corta (1 a 4 carbonos) (Bhuiya, Rasul, Khan, Ashwath, & Azad, 2016) obteniéndose así una mezcla de alquilésteres y glicerina como subproducto (IICA, 2010). Para llevar a cabo este tipo de procesos se utilizan varias fuentes de materia prima convencionales siendo las más comunes: las plantas tales como la colza, la soya, las semillas de girasol, el aceite de palma y otras fuentes de origen animal como el sebo bovino, grasa de cerdo y pollo provenientes de la industria alimentaria (Knothe, G.; Krahl, J.; Van Gerpen, 2005).

5. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Obtener biodiésel a partir de sebo bovino, generado en el proceso de curtido del cuero para aplicarlo en motores vehiculares de combustión interna.

4.2 Objetivos específicos

- Aislar el sebo bovino de los residuos sólidos generados en el proceso de descarte haciendo uso de extracción solido - liquido.
- Caracterizar el sebo bovino mediante la determinación de sus propiedades químicas.
- Implementar un proceso químico para producir biodiésel promoviendo la interacción del sebo bovino con metanol.
- Determinar las propiedades físicas y químicas del biocombustible obtenido con el fin de establecer su idoneidad para ser usado en motores de combustión interna.

6. ESTADO DEL ARTE

6.1 Marco teórico

6.1.1 Biocombustibles

Para hacer referencia a los biocombustibles es necesario remontarse a los conceptos de las materia primas usadas para su producción, así se puede definir a un biocombustibles como un combustibles obtenido a partir de materia orgánica la cual ha tenido origen en los procesos biológicos ya sea de especies animales o vegetales a los cuales se les ha denominado biomasa (Duarte, Dessuy, Vale, Welz, & De Andrade, 2013). La biomasa comprende diferentes grupos de sustancias energéticas y de carácter renovable producidas por seres vivos y que se pueden clasificar según la fuente de la cual se adquieren.

6.1.2 Tipos de biomasa

Primaria: Es el conjunto de sustancias potencialmente energéticas producidas en los procesos metabólicos de los seres autótrofos, ya sean semillas o frutos (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009), así como también los residuos del sector agrícola resultantes de los tratamientos de estos productos y en el aprovechamiento de sus propiedades.

Secundaria: Es la producida por los seres heterótrofos los cuales se proveen de biomasa primaria como fuente alimenticia en este caso se pueden mencionar sustancias producidas por efectos metabólicos como lo son las heces fecales, así como también el musculo o carne provenientes de los animales (US-EPA, 2007).

Terciaria: Es considerada biomasa terciaria a las sustancias de origen biológico y degradable producida por seres que se alimentan con biomasa secundaria (Rosendahl, 2013).

Natural: Se producen en todos los ecosistemas de manera silvestre debido a los procesos biológicos llevados a cabo por los seres vivos sin ningún tipo de intervención de actividades humanas como lo son residuos leñosos de árboles que cumplieron su ciclo de vida, semillas o frutos silvestres, prados y pastos secos entre otros (Salinas Callejas & Gasca Quezada, 2009).

Cultivos energéticos: En cuanto a los tipos de biomasa en los cuales hace presencia la actividad humana se considera un tipo de biomasa específica en la producción de biocombustibles a la generada por los cultivos energéticos los cuales son una serie de productos los cuales se cultivan de manera intensiva para fines energéticos entre ellos se pueden mencionar a la soya, la colza, la palma, caña de azúcar entre otros (López-Bellido, Wery, & López-Bellido, 2014). Estos pueden tener un mayor provecho siendo usados como fuentes alimenticias, considerándose su sustitución por tipos de biomasa en donde se pueda alcanzar el máximo aprovechamiento de los residuos provenientes de las actividades humanas y que generan un gran impacto en el medio ambiente (Rahman, B. Mostafiz, Paatero, & Lahdelma, 2014)

Biomasa residual: En la actualidad una de los tipos de biomasa más estudiados y que pueden tener grandes ventajas con respecto a las anteriormente mencionadas son las fuentes de biomasa residual. Dicha biomasa se produce debido las actividades antrópicas en las cuales se utiliza materia orgánica para llevarse a cabo y que generan sustancias de desecho con propiedades favorables para ser usadas en la producción energética (Antonio Bizzo, Lenço, Carvalho, & Veiga, 2014) y con ventajas considerables en la preservación del medio ambiente.

6.1.3 Tipos de biocombustibles

Sólidos: Estos se encuentran entre los más usados desde la antigüedad, siendo en su mayoría obtenidos a partir de material lignocelulósico producto de las actividades agroindustriales y forestales, entre los más comunes se pueden mencionar a los pastos secos, las pajas, restos de poda, la leña y cortezas, residuos sólidos orgánicos de desecho de la industria alimenticia como cáscaras de semillas, frutos y madera proveniente del sector industrial ya sea para la construcción, fabricación de muebles o como embalaje para diversos productos (Romero Salvador, 2010).

Otro tipo de biocombustibles sólidos son los elaborados a partir de tratamiento térmicos y químicos los materiales anteriormente mencionados con el fin de maximizar sus propiedades como es el caso del carbón vegetal, las briquetas y los pellets (Fernandez, 2004) Este tipo de materia prima es de gran importancia en el sector energético debido al potencial elevado que tiene al momento de proveer energía a partir de su combustión, la cual posteriormente se convierte en energía eléctrica capaz de suplir la demanda en el desarrollo de diversas actividades diarias.

La gran importancia y el extendido uso de estos dando origen a un foco de contaminación latente, ya que sin tener unas condiciones particulares para llevar a cabo el proceso de combustión, estos no solo van a proveer energía sino una serie de compuestos químicos (dióxido de carbono, monóxido de carbono, benceno, butadieno, formaldehído, hidrocarburos poliaromáticos) perjudiciales tanto para la salud como para el medio ambiente cuyos efectos podrían compararse con los causados por el uso de combustibles convencionales de origen fósil (K.R. Smith, 2006).

Gaseosos: Su producción se lleva a cabo a partir de materia orgánica en descomposición en condiciones que conllevan ausencia de oxígeno, el ejemplo más común de este tipo de biocombustibles es el denominado biogás el cual es una mezcla de gases como el dióxido de carbono, monóxido de carbono y metano. Los mencionados gases son el producto de la acción de microorganismos (Ganduglia et al., 2009). Este tipo de biocombustibles es uno de las soluciones amigables con el medio ambiente debido a que no solamente se produce para satisfacer las necesidades energéticas sino que también la materia orgánica residual puede ser usada como nutriente para el suelo usado en los procesos agrícolas, de igual forma la combustión del compuesto mayoritario metano (50% a 75%) no promueven la producción de sustancias que provoquen un gran impacto en el medio ambiente (Romero Salvador, 2010).

Líquidos: Son sustancias orgánicas obtenidas a partir de materias primas de origen vegetal, por su gran importancia en la producción de energía han ido remplazando paulatinamente a los combustibles convencionales, ya sea gasolina o diésel (IRENA, 2016) o se han usados como

aditivos. La ventaja más importante en el uso de biocombustibles líquidos en motores vehiculares de combustión interna radica en la disminución de las emisiones de gases como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x) los cuales provocan contaminación atmosférica, así se ha reportado una reducción de 15% CO, 38,5% NO_x, 72,7% SO_x y la opacidad de los humos en un 56,8% (Adewale, Dumont, & Ngadi, 2015). En la actualidad solo dos tipos de biocombustibles cuentan con la reglamentación para poder ser aplicados como generadores de energía uno de ellos es el bioetanol el cual se produce mediante procesos de fermentación de las azúcares y el biodiésel producido a partir de aceites y grasas (Romero Salvador, 2010).

6.1.4 Biodiésel

Se ha denominado biodiesel a la mezcla de esteres metílicos provenientes de ácidos grasos, estando este catalogado como un biocombustible líquido de carácter biodegradable y con niveles de toxicidad bajos para los seres vivos y el medio ambiente, esto como consecuencia de una presencia mínima de compuestos azufrados (Budžaki, Miljić, Tišma, Sundaram, & Hessel, 2017; Knothe & Razon, 2017). Se considera al biodiesel el reemplazo perfecto del diésel debido a que sus propiedades tanto físicas (densidad, viscosidad cinemática, punto de inflamación y punto de fluidez) como químicas (índice de Cetano, contenido de cenizas, contenido de agua y la energía de calentamiento) y la eficiencia energética son comparables entre ambos (Budžaki et al., 2017) (Knothe, G.; Krah, J.; Van Gerpen, 2005).

Uno de los aspectos más importantes en el momento de hacer una comparación entre el biodiesel y el diésel convencional es la presencia de oxígeno en las estructuras de los compuestos químicos, ya que el biodiesel posee una cantidad de oxígeno que ronda entre un 10 y un 11 % esto permite que el proceso de combustión sea considerablemente más completo que el observado para los combustibles de origen fósil y por lo tanto las emisiones tanto de gases de efecto invernadero (dióxido y monóxido de carbono) como los causante de lluvia ácida (óxidos de nitrógeno y azufre) y el material particulado disminuyan (Balat, 2011).

6.1.5 Aceites y grasas

Son denominados aceites y grasas a las sustancias de origen lipídico provenientes tanto de fuentes vegetales como de animales las cuales en su mayoría se encuentran constituidas en su estructura por ésteres de glicerol (Figura 1.) que a su vez se componen por ácidos grasos (Figura 2.) en su mayoría de cadena larga, llamados también triglicéridos siendo estos los componentes mayoritarios tanto en los aceites y como en las grasas (da Silva & Sousa, 2013)

Se denomina grasa a la sustancia producida en los tejidos animales y aceite a la sustancia que se produce en el metabolismo por los tejidos de origen vegetal, las grasas a temperatura ambiente siempre se encuentra como sólidos, los aceites en cambio a temperatura ambiente son líquidos, esto debido a las estructuras químicas de los ácidos grasos que componen el triacilglicérido siendo ácidos grasos saturados o insaturados (Tabla 1.).

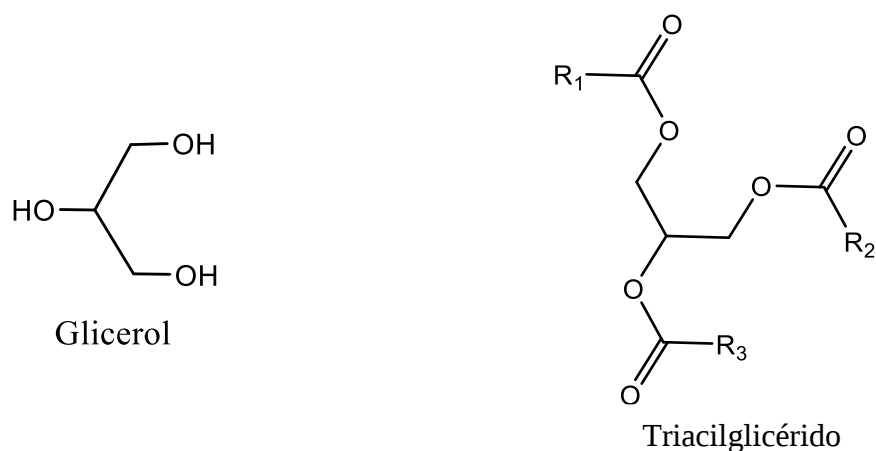


Figura 1. Estructura del glicerol y un triacilglicérido

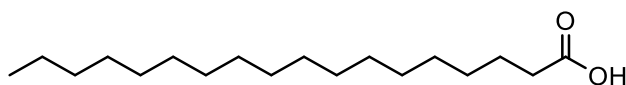


Figura 2. Estructura ácido graso (Ácido esteárico)

Tabla 1. Ácidos grasos que estructuran los triacilglicérido

ÁCIDOS GRASOS	FORMULA MOLECULAR R_1 , R_2 Y R_3
Mirístico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{12}\text{COOH}$
Esteárico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$
Palmítico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$
Oleico	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$
Linoleico	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_4-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-(\text{CH}_2)_7-\text{COOH}$

Fuente: Knothe, G.; Krah, J.; Van Gerpern, 2005

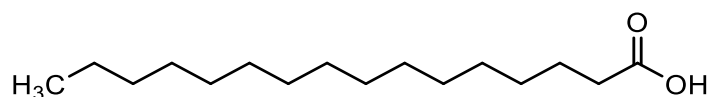
6.1.6 Ácidos grasos

Los ácidos grasos (Figura 3.) son los componentes estructurales básicos de los triacilglicéridos, dichos compuestos tiene la constitución básica de una ácido carboxílico, una cadena carbonada con un grupo metilo a uno de sus extremos y un grupo carboxilo en el otro (Brown, 2011).

La cadena carbonada en los ácidos grasos suele estar compuesta entre 12 a 22 carbonos aunque hay algunos con cadena más corta o más larga según se produzcan en el metabolismo ya sea de animales o vegetales (da Silva & Sousa, 2013). Los ácidos grasos suelen diferenciarse

entre sí de acuerdo al número de carbonos que los constituyen, el tipo de enlaces y su ubicación, de esta forma podemos abordar su estudio en dos grandes grupos

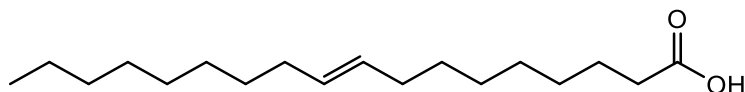
Ácidos grasos saturados: Son ácidos grasos los cuales presentan enlaces simples uniendo a los carbonos de la cadena alifática esto otorga una gran estabilidad estructural permitiendo aglomeración por lo tanto es común observar que las grasas estructuradas en mayor proporción por este tipo de ácidos grasos se encuentren en estado sólido a temperatura ambiente (Carbajal, 2013)



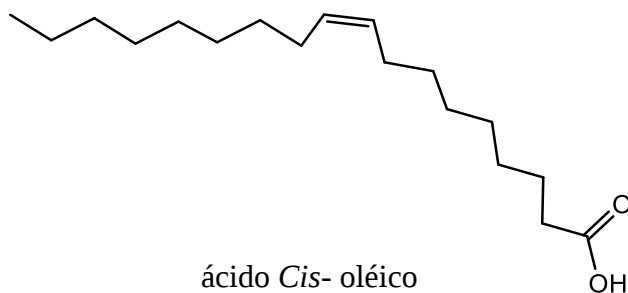
Ácido Palmítico

Figura 3. Ejemplo de un ácido graso saturado (ácido palmítico)

Ácidos grasos insaturados. Son lo que poseen uno o más dobles enlaces estructurando la cadena alifática, estos dobles enlaces hacen que el ácido graso no sea estable y reaccione fácilmente en presencia de oxígeno provocando el enranciamiento de las grasas, por otra parte al ser sometidos a temperaturas altas se promueve la desnaturalización de los dobles transformándose en ácidos grasos saturados propiciandando así la solidificación de estos. Debido a la presencia de los dobles enlaces los ácidos grasos pueden tener una conformación *cis* o *trans* (Figura 4.) dependiendo de la ubicación de los hidrogeno en los carbonos adyacente unidos por el doble enlace por otra parte ácidos grasos con el mismo número de carbonos y el mismo número de instauraciones pueden diferenciarse debido a la posición de los dobles enlaces (Brown, 2011)



ácido *Trans*-elaídico



ácido *Cis*-oléico

Figura 4. Ejemplos de ácidos grasos insaturados (ácido *Trans*-elaídico, ácido *Cis*-oléico)
(Brown, 2011)

La curvatura que adquiere la estructura del ácido graso en posición *Cis* (Cerrillo, 2009) provoca que no hayan aglomeraciones por lo tanto los aceites compuestos por este tipo de ácidos

grasos podrán encontrarse en estado líquido a temperatura ambiente; este tipo de ácidos grasos se pueden encontrar en mayor proporción en las fuentes vegetales.

6.1.7 Materias primas para la producción de biodiésel

Entre las principales fuentes de triacilglicéridos que son empleadas convencionalmente en mayor proporción a nivel industrial y en investigación para la producción de biodiésel se encuentran las siguientes:

Aceites vegetales comestibles: Los vegetales oleaginosos que proveían aceites con fines alimenticios (Aceite de Girasol, Aceite de colza, Aceite de soya, Aceite de coco, Aceite de palma, Aceite de maní, Aceite de oliva, Aceite de maíz) (Bergmann et al., 2013) fueron las primeras fuentes en el campo de la investigación en la producción de biodiésel siendo hasta el momento las más usadas en la industria el aceite de palma y soya debido a su perfil lipídico y las proporciones en ácidos grasos como el palmitoleico, linoleico, esteárico y oleico (Issariyakul & Dalai, 2014).

En la tabla 2 se observan las propiedades del biodiesel obtenido a partir de las dos fuentes que hasta el momento ha sido usadas en mayor proporción en la industria y se hace una comparación con el diésel (Hoekman, Broch, Robbins, Cenicerros, & Natarajan, 2012).

Propiedades del combustible	Diésel	Biodiésel Palma	Biodiésel Soya
Composición	C10 - C21 HC	C12 - C22 FAME	C16 – C18 FAME
Densidad a 15°C (g/mL)	0,848	0,978	0,885
Viscosidad cinemática a 40° C (mm ² /s)	1,3 – 4,1	4,43	4,13
Punto de inflamación (° C)	60 – 80	196	159
Poder calorífico (MJ/Kg)	42,90 – 45,9	37,25	39,7

Fuente. El-Araby et al., 2018; Hoekman et al., 2012

Tabla 2. Comparación propiedades de combustibles

Aceites vegetales no comestibles: Entre los más usados con fines investigativos están *Jatropha*, *Polanga*, *Caranja*, *Nem*, *Mahua*, *Castor*, *Coriander*, *Hingan* y *Mongongo* los cuales no son usadas con fines alimenticios por la presencia de sustancias toxicas como por ejemplo ésteres de forbol presentes en el aceite de *Jatropha* (Pabón & Hernández-rodríguez, 2012). Estos aceites han ido ganando mayor relevancia debido a que pueden reemplazar de excelente manera a los aceites comestibles en la producción de biodiésel (Yang, Takase, Zhang, Zhao, & Wu, 2014). En el continente Africano se usa a nivel industrial el aceite proveniente de *Jatropha*, ya que es una planta de la cual se puede extraer un contenido de aceite de más del 36 % y el biodiesel producido tiene propiedades similares (tabla 3.) a las del producto de materias primas convencionales como el aceite de palma (Verma & Sharma, 2016). La principal ventaja que representa el uso de este tipo de materias primas es la seguridad alimentaria que se propicia, ya que al ser los aceites vegetales comestibles una fuente importante de nutrición se desaprovecha su finalidad primordial; así este tipo de aceites un tanto no convencionales en sus usos en

principio pueden mitigar la competencia generada entre el alimento y la producción de energía (Yang et al., 2014).

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas biodiésel de palma y Jatropha curcas

Propiedades Biodiésel	Palma	Jatropha Curcas
Contenido de esteres (%)	99,8	99,4
Densidad a 15°C (Kg/m ³)	875	881
Viscosidad cinemática a 40°C (mm ² /s)	4,43	4,33
Índice de acidez (mg KOH/g)	0,129	0,120
Índice de yodo (g de yodo/100 g)	49,56	96,60
Punto de inflamación (°C)	196	135

Fuente: El-Araby et al., 2018; Verma & Sharma, 2016; Yang et al, 2014; Yuan et al., 2017

Aceites residuales de cocina: Este tipo de materia prima se puede clasificar como una fuente de producción de biodiesel emergente y muy importante debido a que promueve la conservación del medio ambiente dando disposición a sustancias de desechos las cuales se generan tanto en restaurantes como en cada una de las casas debido al uso que se les da en la preparación de alimentos a los aceites vegetales y las grasas animales (Bhuiya et al., 2016), las cuales producen una carga contaminante bastante densa hacia las fuentes hídricas por la mala disposición que se les da al momento de desecharlos. Llevando a cabo una comparación de las propiedades fisicoquímicas entre el diésel comercial y el biodiesel producido a partir de aceites residuales de cocina se puede observar una similitud (Tabla 4.) por lo cual es una gran alternativa para ser un potencial sustituto del diésel.

Tabla 4. Propiedades fisicoquímicas biodiésel producido con aceite residual de cocina y diésel comercial

Propiedades Combustible	Biodiesel aceite residual de cocina	Diésel comercial
Densidad (kg/m ³)	897	848
Viscosidad cinemática 40° C (mm ² /s)	5.3	1,9 – 4,1
Punto de inflamación (°C)	196	60 - 80
Contenido de cenizas (%)	0,004	0,008 – 0,010
Carbono residual (%)	0,33	0,35 – 0,40
Contenido de agua (%)	0,04	0,02 – 0,05
Poder calorífico (MJ/Kg)	42,65	42,90 – 45,90

Fuente: Bhuya et al., 2016

Las ventajas de este tipo de materias primas en la producción de biodiesel se ven opacadas por la presencia de contaminantes en los aceites residuales, ya que al ser preparados los alimentos en estos aceites quedaran como remanentes agua y ácidos grasos libres, los cuales

pueden producir procesos de hidrólisis llevando a estos aceites a la saponificación y no a la transesterificación en el proceso de producción de biodiésel. (Bhuiya et al., 2016).

Grasas animales: La mayor cantidad de este tipo de materia prima se genera en la industria alimenticia, provenientes de pollo, cerdo y res (Bhuiya et al., 2016) son generadas al día debido a los diferentes tratamientos que se les da a las carnes con fines de comercialización esto conlleva a que se produzcan grandes cantidades de estos residuos sólidos (Atadashi, Aroua, Abdul Aziz, & Sulaiman, 2012) los cuales pueden provocar un gran impacto en el medio ambiente por lo que se han propuesto alternativas para su uso como material de partida en la producción de energía concretamente como biodiesel.

Países como Malasia, Indonesia, Argentina, Estados Unidos, Brasil, Holanda, Alemania, Filipinas, Bélgica y España los cuales producen aproximadamente el 80 % del biodiesel usan entre sus materia primas grasas animales en un porcentaje aproximado del 20% siendo Estados Unidos con 4,9 millones de toneladas al año el mayor productor. Este material graso en comparación con el uso de materias primas convencionales como el aceite de palma y soya tiene un costo menor lo cual es ventajoso teniendo en cuenta que presentan las mismas características al encontrarse estructurados por ácidos grasos como el mirístico, palmítico y esteáricos en mayor proporción, en estudios económicos realizados se ha determinado que el costo para las grasas en el mercado se encuentra en una cuantía de aproximadamente entre 200 y 400 dólares por tonelada comparado con el valor aproximado para un aceite virgen, ya sea de palma o de soya que se encuentra entre los 500 y 800 dólares por tonelada, junto a ello los costos de producción disminuyen también, ya que al llevar a cabo la transesterificación a un aceite vegetal se gastan aproximadamente entre 0,6 – 0,8 dólares por litro en comparación al uso de grasas animales de desecho en donde el costo es de 0,4 – 0,5 dólares por litro, este tipo de diferencia en los valores han llevado a países como Canadá a adoptar las grasas animales en la producción de biodiesel en un porcentaje cercano al 90% (Banković-Ilić, Stojković, Stamenković, Veljkovic, & Hung, 2014). Debido a lo anteriormente expuesto surge la necesidad y el interés de iniciar el proceso de investigación de estas materias primas para la producción de biodiesel justificando su importancia medioambiental y económica al dar un valor agregado a estas sustancias de desecho realizando un estudio químico a escala de laboratorio promoviendo la caracterización tanto de la materia prima como del producto (biodiésel) siendo este un paso fundamental y llevar a cabo estudios de viabilidad económica en proyectos que se deseen formular y ejecutar a futuro.

6.1.8 Métodos para la obtención de biodiésel

El crecimiento paulatino del interés tanto en el desarrollo como en la aplicación de biocombustibles como el biodiesel radica esencialmente en sus propiedades físicas y químicas de las cuales contrastan de manera positiva con respecto a las observadas para el diésel convencional (Budžaki et al., 2017) por lo que se han determinado ventajas a su uso masificando así su aplicación. Por lo tanto los procesos de investigación en su desarrollo han avanzado en la búsqueda de plantear diversos métodos para la obtención de este tipo de biocombustibles como lo son la formación de mezclas, microemulsificación, pirolisis y la transesterificación (Verma & Sharma, 2016). La transesterificación es la reacción química más aplicada en los procesos industriales y el pilar en el desarrollo investigativo actual.

6.1.9 Transesterificación

La transesterificación es una reacción química de carácter orgánico bastante conocida y usada ampliamente en la obtención de biodiésel dicha reacción consiste en la interacción entre triacilglicéridos con un alcohol usualmente de cadena corta (metanol, etanol, propanol y butano) en presencia de un catalizador obteniéndose como productos ésteres de los ácidos grasos que estructuraban el triacilglicérido y glicerol (Bhuiya et al., 2016) (Figura 5).

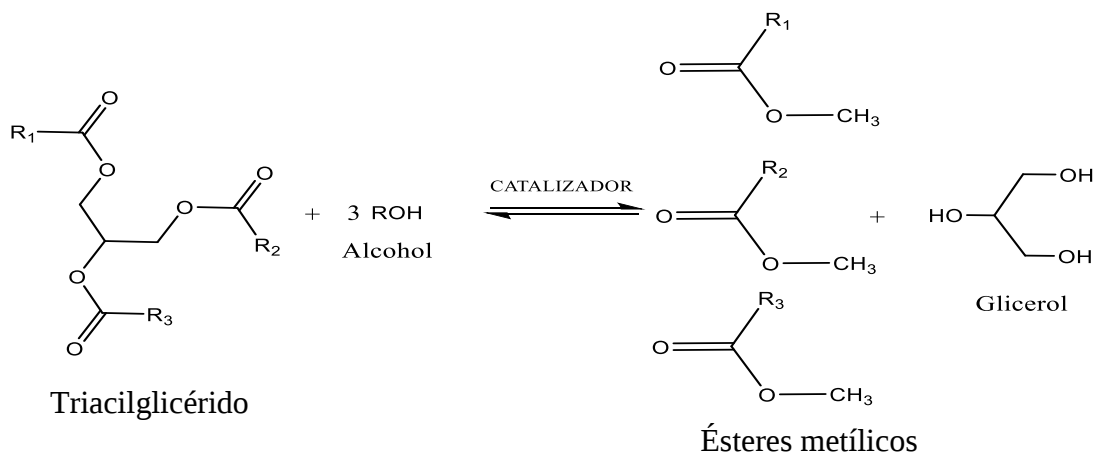


Figura 5. Reacción de transesterificación (da Silva & Sousa, 2013)

Tabla 5. Sustituyentes para triacilglicéridos

Ácidos grasos	Sustituyentes R ₁ , R ₂ , R ₃
Mirístico	CH ₃ -(CH ₂) ₁₁ -CH ₂ -
Esteárico	CH ₃ -(CH ₂) ₁₅ -CH ₂ -
Palmítico	CH ₃ -(CH ₂) ₁₃ -CH ₂ -
Oleico	CH ₃ -(CH ₂) ₇ -CH=CH-(CH ₂) ₆ -CH ₂ -
Linoleico	CH ₃ -(CH ₂) ₄ -CH=CH-CH ₂ -CH=CH-(CH ₂) ₆ -CH ₂ -

Fuente: Knothe, G.; Krahl, J.; Van Gerpern, 2005

Tabla 6. Sustituyentes para alcohol

Alcoholes	Sustituyentes R
Metanol	CH ₃ -
Etanol	CH ₃ -CH ₂ -
Propanol	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -
Butanol	CH ₃ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -

Fuente: Knothe, G.; Krahl, J.; Van Gerpern, 2005

Para que la reacción química se produzca es necesaria la intervención de un catalizador, en los diversos estudios realizados se han llevado a cabo el uso de diferentes tipos de catalizadores, siendo los más empleados en investigación el ácido sulfúrico, en cuando a bases los hidróxidos

de sodio y potasio y las enzimas lipasas producidas por organismos como *Mucor miehei*, *Candida rugosa*, *Penicillium camembertii*, *Penicillium roqueforti*, *Pseudomonas fluorescens*, *Pseudomonas cepacia*, *Candida polytica*, *Candida Antarctica*, and *Bacillus subtilis* (Adewale et al., 2015). La catálisis mediada con especies básicas es considerablemente más rápida que la llevada a cabo por ácidos, de igual forma al saber que estos pueden ser adquiridos de manera más sencilla así como también sus costos no muy altos en comparación a las enzimas, se pueden plantear metodologías acordes con las necesidades que requiere la solución de un problema ambiental (Knothe & Razon, 2017).

Otro de los aspectos a tratar en la reacción de transesterificación es la concerniente a los alcoholes usados, los cuales proveen el grupo alquílico en la estructura de los ésteres de los ácidos grasos producidos en la reacción, para ello usualmente se han venido utilizando alcoholes de cadena corta los cuales tienen entre uno y cuatro carbonos, siendo el metanol el más usado debido a las ventajas en cuando a su manipulación tanto en la ejecución de la reacción como en la preparación previa de los reactivos logrando una disolución fácil de las bases debido a su carácter un tanto polar, por otra parte se ha podido evidenciar que posee una capacidad de reaccionar fácilmente con los triacilglicéridos los cuales estructuran ya sean a las grasas o los aceites usados como materia prima de partida (Bhuiya et al., 2016).

Llevándose a cabo el estudio de la reacción de transesterificación y su estequiometría se puede deducir que la interacción entre un mol de triglicérido con 3 moles de alcohol formaran una mol de cada uno de los ésteres provenientes del respectivo ácido graso y 1 mol de glicerol (Issariyakul & Dalai, 2014). Ya que la reacción es reversible se ha optado por trabajar con cantidades en exceso del respectivo alcohol involucrado en la reacción con el fin de llevar el equilibrio químico hacia la formación de productos y así se mejore considerablemente la obtención de ésteres alquílicos en la producción de biocombustibles para este caso específico el biodiésel, por lo tanto se han hecho estudios experimentales los cuales dilucidan el mecanismo de reacción para los procesos de transesterificación

6.1.10 Mecanismo de reacción de la transesterificación en medio básico.

La reacción se a cabo en tres pasos sucesivos en los cuales el triacilglicérido en cada una de las etapas se convierte en diacilglicérido, monoacilglicérido y glicerol debido a las interacción sucesivas y al rompimientos de los enlaces en su estructurando dando origen así a los ésteres de los ácidos grasos respectivos.

6.1.10.1 Formación del nucleófilo (ion alcoxido)

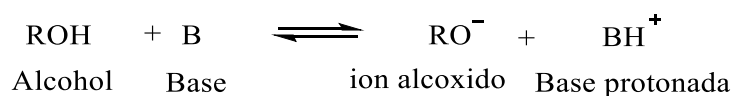


Figura 6. Formación de un alcoxido (Bhuiya et al., 2016)

En la primera etapa de la reacción en donde se prepara el catalizador se hace reaccionar inicialmente el catalizador básico en un cantidad de alcohol con el fin de propiciar la producción del ion alcoxi (RO^-) (Bhuiya et al., 2016)

6.1.10.2 Ataque nucleófilico

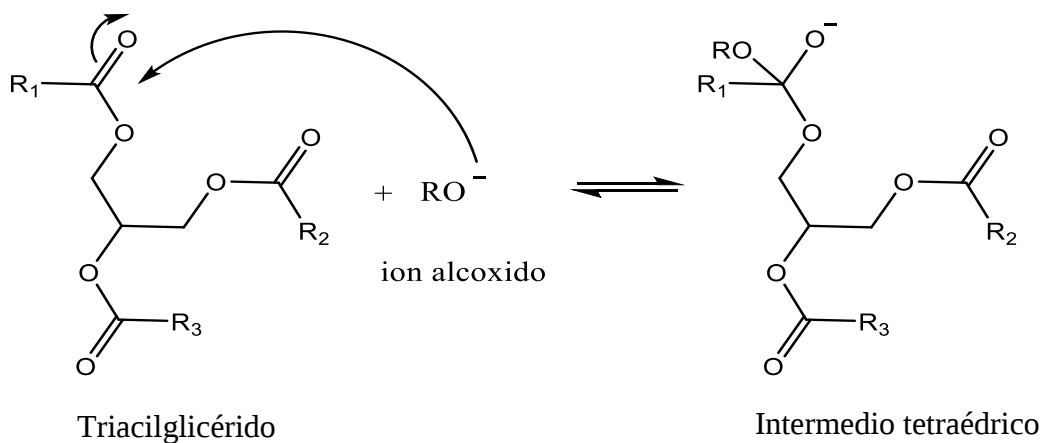


Figura 7. Ataque nucleófilico sobre el triacilglicérido (Bhuiya et al., 2016)

Formando el ion alcoxi este realiza un ataque nucleófilico (Figura 7.) al carbono carbonílico propiciando el desplazamiento de la densidad electrónica al oxígeno carbonílico dando paso a la formación un intermediario de reacción tetraédrico de baja estabilidad (Issariyakul & Dalai, 2014).

6.1.10.3 Formación del éster alquílico

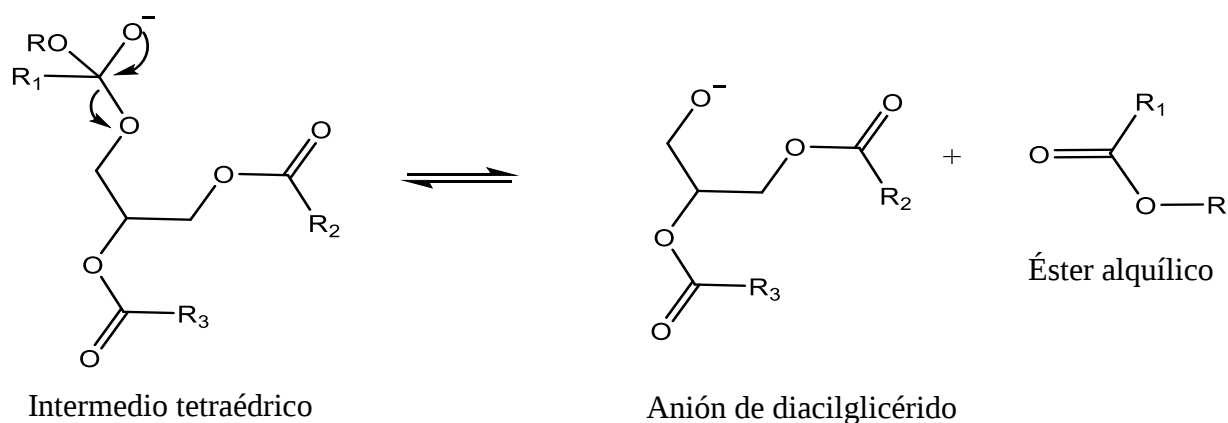


Figura 8. Formación del éster alquílico y un anión triacilglicérido (Bhuiya et al., 2016)

Debido a la inestabilidad del intermediario de reacción se presenta un re arreglo en la molécula en donde la densidad electrónica vuelve al carbono carbonílico para compensar este fenómeno hay una ruptura de enlace produciendo así formación de un éster alquílico.

6.1.10.4 Protonación del ion diacilglicérido

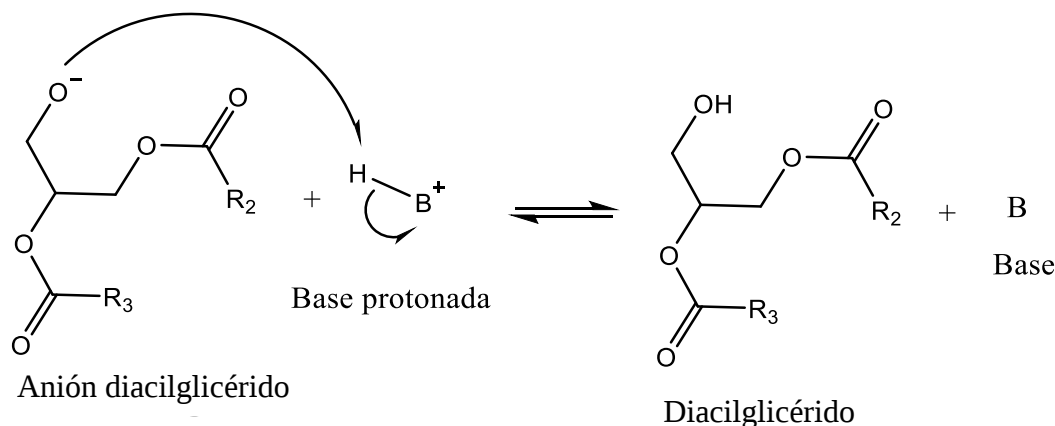


Figura 9. Formación del diacilglicérido y recuperación de la base (Bhuiya et al., 2016)

Finalmente el ion diacilglicérido formado se protona debido a la interacción de una molécula de agua formada como subproducto en la etapa inicial de formación de ion alcoxi permitiendo así la regeneración de la base usada inicialmente conservando así las propiedades del catalizador, el cual realiza nuevamente el ciclo catalítico reaccionando con el diacilglicérido (Bhuiya et al., 2016) y finalmente con el monoacilglicérido para completar así la reacción de transesterificación.

6.1.11 Propiedades de biodiésel

Estas especificaciones surgen en conjunto de un consenso entre todos los actores que hacen parte de la cadena de producción y consumo de biocombustibles.

Entre las especificaciones que se tienen como referencia en la producción de biodiesel a nivel mundial se encuentran la norma aplicada en Europa la cual se denomina con la sigla EN 14214, la aplicada en Estados Unidos norma ASTM D 6751 (Ganduglia et al., 2009) y los parámetros regulados por la RESOLUCION NUMERO 90963 del 10 de Octubre de 2014 promulgada por el MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, norma técnica NTC 5444 (Tabla 7.). Las normas anteriormente mencionadas difieren entre si debido a la aplicaciones y a las proporciones de biodiesel que son empleadas en motores vehiculares de combustión interna, es así como la norma ASTM 6751 tiene en cuenta solamente a mezclas de biodiesel y diésel convencional en proporciones 20:80 (B20) o en menor cuantía debido a que en el momento no se ha reglamentado el uso de biodiesel puro, por otra parte la norma europea EN 14214 consigna las especificaciones para un biodiesel puro (B100) por lo que los parámetros permitidos para el uso de este tipo de biocombustibles

tienden a ser más exigentes y diferenciados para el caso de mezclas en donde los parámetros fisicoquímicos se comparan con los consignados por la norma EN 590 para mezclas hasta 5:95 (B5) biodiesel y diésel convencional respectivamente (Ganduglia et al., 2009).

Tabla 7. Especificaciones biodiésel

Propiedad	EN 14214	ASTM D 6751	NTC 5444
Contenido de ésteres (% m/m)	Mínimo 96,5	-	Mínimo 96,5
Viscosidad cinemática (mm²/s)	1,9 – 6	3,5 – 5	1,9 - 6
Densidad 15° C (kg/m³)	860 - 900	-	860 - 900
Punto de inflamación	Mínimo 101	Mínimo 93	Mínimo 120
Numero de Cetano	Máximo 51	Mínimo 47	Mínimo 47
Contenido de agua (mg/Kg)	Máximo 500	Máximo 500	Máximo 500
Índice de yodo (g de yodo/100g)	Máximo 120	-	Máximo 120
Corrosión lámina de cobre	N° 1	N° 3	N° 1
Metanol residual (% m/m)	Máximo 0,2	Máximo 0,2	Máximo 0,2
Glicerina libre y total (% m/m)	0,25/0,02	0,25/0,02	0,25/0,02
Carbono residual (% m/m)	Máximo 0,3	Máximo 0,05	Máximo 0,3

A continuación se desarrolla una breve descripción de las principales propiedades a tener en cuenta en la producción de biodiesel con el fin de evaluar su calidad en motores vehiculares de combustión interna.

Contenido de ésteres: Según la norma EN 14214 debe ser de mínimo un 96,5%. Es un parámetro de referencia que podría considerarse uno de los más importantes en la producción de biodiesel, ya que junto con el índices de acidez y el de saponificación brinda información acerca del proceso de la reacción de transesterificación, así valores altos (mayores a 96,5%) en contenido de esteres metílicos serán encontrados debido a que la reacción se ha llevado a cabo satisfactoriamente, mientras que a valores bajos (menores a 96,5%) se podría considerar que la reacción se ha desarrollado de manera parcial y en el producto que se ha obtenido se encontrara presencia de aceite sin reacción, esto conlleva a que se presenten inconveniente en su uso debido a que la viscosidad aumentara esto hace que el efecto spray en el inyector del motor disminuya debido a las obstrucciones por carbonilla y se produzcan combustiones incompletas (Ganduglia et al., 2009).

Densidad: Esta propiedad se reporta a una temperatura de 15°C y se encuentra referenciada en publicaciones indistintamente de la gravedad específica. Solo hay reporte de valores para esta propiedad en un intervalo entre 860 – 900 kg/m³ según la norma técnica EN 14214 (Hoekman et al., 2012). Esta propiedad varía dependiendo del material graso de partida así como también del proceso de transesterificación que se aplicó en la obtención del biodiesel, valores excesivamente bajos de esta propiedad pueden deberse a presencia de alcohol sin reacciones remanente en la mezcla de esteres metílicos (Ganduglia et al., 2009).

Viscosidad: La viscosidad se define como la resistencia de un líquido al movimiento debido a la fricción interna que se genera cuando una parte del fluido se mueve sobre otra (Knothe, G.; Krah, J.; Van Gerpen, 2005). En los biocombustibles valores menores a $1,9 \text{ mm}^2/\text{s}$ o mayores a $6 \text{ mm}^2/\text{s}$ recomendado por las normas internacionales podrían propiciar inconvenientes en el funcionamiento de los motores de combustión interna para ser más precisos en los inyectores, en los cuales al no presentarse de manera adecuada su atomización pequeñas cantidades de biocombustible se van a ir depositando generando obstrucciones lo que provocara una combustión deficiente reflejándose en la disminución de la potencia del motor produciendo su deterioro prematuro (Ganduglia et al., 2009).

La viscosidad del biodiesel es una propiedad que se encuentran bastante relacionada y tiene una magnitud más baja con respecto a la viscosidad del aceite o grasa usada como material de partida en la producción de biodiésel (Knothe, G.; Krah, J.; Van Gerpen, 2005), esta relaciona se presenta debido a que la magnitud de la viscosidad depende de la cadena carbonada de los componentes de las sustancias, para este caso los ésteres metílicos componentes del biodiesel estas estructurados por cadenas carbonadas de menor longitud en comparación a las que estructuran a los triacilgliceridos que componen a las grasas (Knothe & Razon, 2017).

Valores de viscosidad de biodiesel se pueden deber a presencia de metanol sin reaccionar haciendo parte de la mezcla de esteres, valores muy alto se relacionan con presencia de aceite sin reaccionar así como degradación térmica oxidativa del biodiesel.

Punto de inflamación: Es un parámetro de mucha importancia en la producción de biodiesel, debido a que es un indicador de la magnitud de la reacción de combustión por lo tanto se toma como referencia en el manejo que se debe dar a esta sustancia tanto para su uso como su almacenamiento y transporte. También se puede tener en cuenta como una referencia sobre la cantidad de metanol que ha quedado sin reaccionar al finalizar el tiempo de producción (Hoekman et al., 2012).

Numero de Cetano: La determinación del número de Cetano en la producción de cualquier combustibles convencional es uno de los procesos más exhaustivos y por lo tanto más costoso que se puede llevar a cabo, esto debido a que es el parámetro principal para evaluar el desempeño del motor al llevarse a cabo la combustión interna (Knothe & Razon, 2017), ya que esta propiedad adimensional permite conocer al calidad de la ignición del combustible y depende principalmente de la composición de este. La medición de esta propiedad se lleva a cabo teniendo en cuenta ciertos compuestos, químicos es así como para un numero de Cetano de 100 se tienes como referencia un alcano lineal sin ramificaciones como el hexadecano y para un índice de Cetano con valor de 15 se considera el 2,2,4,4,6,8,8-heptametilnonano (Knothe, G.; Krah, J.; Van Gerpen, 2005), las ramificaciones hacen que el número tenga una variación drástica.

Teniendo en cuenta que los componentes del diésel y su naturaleza son factores importantes en su número de Cetano, se compara los valores de los combustibles convencionales por la presencia en mayor proporción de alcanos lineales, lo cual tiene relación con los componentes principales del biodiesel (ácidos grasos de cadenas larga sin ramificaciones). Por lo que se puede considerar a esto una gran ventaja con respecto a la calidad de ignición que pueda tener este

biocombustible con respecto al diésel derivado del petróleo y sea uno de los factores principales que lleva a que el biodiesel se pueda aplicar como una alternativa en la obtención de energía con un menor impacto en el medio ambiente y sin tener ningún tipo de inconveniente mecánico en los motores de combustión interna (Knothe, G.; Krah, J.; Van Gerpen, 2005).

Contenido de agua: El método más aplicado con el fin de limpiar las impurezas al finalizar la etapa de producción de biodiesel es el uso de agua caliente con el fin de realizar lavados sucesivos al producto de reacción y aunque se apliquen productos desecantes, es necesario realizar una determinación y un control de la cantidad de agua remante (Mata, Cardoso, Ornelas, Neves, & Caetano, 2011). Tener en cuenta esto es importante, si las cantidades de agua son considerables el biocombustible tendrá inconvenientes en su uso el poder calorífico de este disminuirá considerablemente haciendo que el motor no cuente con la potencia necesaria para poder llevar a cabo su función normal, por otra parte también los componentes metálicos en el motor se verán afectados por la corrosión, así como también estas cantidades de agua pueden ser un foco de proliferación bacteriana, el accionar de estas bacterias promueven un cambio en la composición del biodiesel llevándose a cabo procesos oxidativos y de hidrólisis de los ésteres metílicos (Ganduglia et al., 2009) e impedir que se mantenga su calidad en tiempos de almacenamiento largos.

Índice de yodo: Esta propiedad química se relaciona estrechamente con la presencia de insaturaciones debido a que el yodo promueve reacciones de adición en los dobles enlaces en la estructura de los ácidos grasos de los triacilglicéridos componentes principales de los aceites y grasas usados como materia prima en la producción de biodiesel, así si se tiene como reactivos triacilglicéridos estructurados por ácidos grasos insaturados producirán ésteres metílicos con insaturaciones.

Valores excesivamente altos en el índice de yodo confirman la presencia de una gran cantidad de metil ésteres insaturados y que serán susceptibles a favorecer procesos de polimerización así como también de hidrólisis, provocando así la pérdida de las propiedades de la sustancia como biocombustible debido al cambio en la composición química (Lapuerta, Rodríguez-Fernández, & de Mora, 2009).

Corrosión de la lámina de cobre: Esta determinación se realiza mediante un test en donde se observan los cambios de una lámina de cobre la cual se pone en contacto directo con una cantidad de biodiesel, esto con el fin de evaluar y proyectar el deterioro que los componentes metálicos de los motores tendrán con el paso del tiempo. Si como consecuencia de las etapas en la producción de biodiesel hay presencia de ácidos grasos libres o contaminantes como el azufre en la mezcla de ésteres se determinarían valores altos para esta propiedad (Ganduglia et al., 2009).

Metanol residual: Como se ha mencionado en apartados anteriores las cantidades de metanol sin reaccionar al finalizar la producción del biodiesel, acarrearán consigo una serie de dificultades en el momento de hacer uso de este en motores vehiculares de combustión interna y alteran los valores de las diferentes propiedades físicas y químicas. Uno de los efectos negativos al tener presentes grandes cantidades de metanol remanentes es la disminución considerable de la temperatura de inflamación (Hoekman et al., 2012), así como también de la viscosidad y la

densidad provocando que el proceso de atomización en los inyectores se lleve a cabo de manera ineficiente, dando combustiones incompletas y depósitos de carbón deteriorando los componentes del motor y un aumento considerable de dióxido de carbono y monóxido de carbono que son liberados hacia la atmosfera (Ganduglia et al., 2009).

Glicerina total y libre: En la reacción de transesterificación se generan principalmente dos productos teniendo en cuenta la reacción global (ésteres metílicos y glicerina), pero si el proceso no se lleva a cabo completamente según el mecanismo de reacción estudiado se producirán diacilglicérido, monoacilglicérido (Bhuiya et al., 2016) y triacilglicéridos que no reaccionan; la presencia de este tipo de especies químicas en la mezcla de ésteres alquílicos va a promover una serie de problemas en torno al funcionamiento normal del motor debido a que si las cantidades estas especies químicas son altas y si la operación del motor se lleva a cabo a temperatura bajas se originaran depósitos en el sistema de inyección provocando el taponamiento de los cilindros así como también emisiones de aldehídos y acroleínas hacia el medio ambiente (Ganduglia et al., 2009).

La determinación de este parámetro químico ayuda a determinar que tan bien se llevó a cabo tanto el proceso de obtención como la purificación del producto final.

Carbono residual: La determinación de esta propiedad puede brindar información acerca de las impurezas que contaminan el biodiesel y que si la cantidad es tan significativa como para dar origen a depósitos de carbón en el motor, esto puede ser provocado por presencia de triacilglicéridos, diacilglicéridos, monoacilglicéridos, restos de catalizador, jabones que se hayan formado como producto secundario de la reacción de transesterificación (Ganduglia et al., 2009)

Punto de niebla: El punto de niebla es la determinación de la temperatura a la cual es biodiesel inicia su paso de un estado líquido a sólido, observándose la aparición de pequeñas partículas sólidas similares a la niebla dispersas en el líquido, este factor es bastante importante debido a que según su valor se establece en que climas es posible su empleo sin que haya problemas mecánicos debido al taponamiento de los inyectores del motor por la precipitación del biodiesel (Ganduglia et al., 2009).

6.2 Antecedentes

En la actualidad el desarrollo mundial de la economía y la globalización provoca que el consumo de combustibles fósiles en la producción de energía aumente continuamente, así para el 2013 se consideró un aumento de 1,4 millones de barriles por día generando un total de consumo de crudo global de 91,3 millones de barriles por día (Su, Zhang, & Su, 2015). Este uso desmesurado de crudo en el mundo ha llevado a que se realicen estudios de proyección hacia futuro con lo cual se ha llegado a estimar las reservas de crudo en 1687,9 billones de barriles, concluyendo así que solamente se podrán abastecer las actividades mundiales en un periodo de 53,3 años, relacionado al consumo de petróleo y sus derivados se encuentra la problemática ambiental ocasionada por las emisiones de gases que promueven el efecto invernadero así se ha considerado un aumento de temperatura entre 1,4 y 5,8 °C en el clima mundial (Su et al., 2015), por estas razones en los últimos años se han venido planteando alternativas al uso de combustibles fósiles remplazándolos por biocombustibles.

Los biocombustibles hasta el momento han cubierto cerca de un 2% de las fuentes de energía usadas convencionalmente para el transporte, así se ahondan esfuerzos para que la investigación siga su avance en busca del desarrollo tecnológico con el fin de que el porcentaje usado vaya creciendo permitiendo así la independencia energética basada en el petróleo.

En los inicios del desarrollo de los vehículos de combustión interna (diésel) se empezaron a promover algunos ensayos haciendo uso de sustancia como los aceites vegetales puros con el fin de ser usados como combustibles de esta forma ya se mostraba el interés en las propiedades que podían tener este tipo de sustancias al momento de obtener energía y se podría decir que es el origen de la era de los biocombustibles, ya que para las décadas de 1930 y 1940 estos eran sustitutos circunstanciales de los combustibles fósiles (Fangrui & Milford, 1999). Solo hasta la década de 1980 surge una demarcada preocupación en torno al aumento en las emisiones de dióxido de carbono causantes de la polución en las grandes ciudades, es en ese momento en donde se inicia el proceso investigativo en busca de sustancias sustitutas con el fin de mitigar el gran impacto ambiental originado por este tipo de gases es así como se origina el concepto de “comida como combustible” (Hymavathi. D, 2014), haciendo referencia a los trabajos realizados con el fin de promover el uso aceites vegetales provenientes de fuentes alimenticias oleaginosas y alcoholes obtenido de los azúcares, con el fin de producir energía siendo estas sustancias fuentes combustibles renovables que pueda tomar el lugar de los recursos no renovables que hasta el momento se usaban como combustibles. Avanzando con las investigaciones la propiedad primordial en el uso de aceites vegetales a modificar empezó a ser la viscosidad, se buscaba que esta sea similar a la de los combustibles derivados del petróleo usados hasta el momento, por lo que fue necesario implementar algunos procesos como la formación de micro emulsiones mezclando los aceites con solventes como metanol, etanol, 1-butanol y la pirolisis observándose no muy buenos resultados (Bora, Boro, Konwar, & Deka, 2016). Es así como se planteó el uso de un proceso desarrollado durante el siglo XIX por E. Duffy y J. Patrick, dicho proceso consiste en reemplazar el glicerol que hace parte de la estructura de los triacilglicéridos componentes principales de los aceites vegetales y las grasas animales, por un alcohol usualmente metanol o etanol propiciando la formación de ésteres metílicos o etílicos, dicha mezcla (biodiésel) tendrá entre sus propiedades físicas una viscosidad similar a la del diésel derivado de petróleo (Budžaki et al., 2017).

Tabla 8. Producción de biodiésel y materia primas usadas

<i>Ranking</i>	<i>Productor</i>	<i>Producción</i>
Producción mundial en base a aceite de soya		7,29
1°	Estados unidos	2,27
2°	Brasil	2,16
3°	Argentina	2,05
4°	Unión europea	0,40
Producción mundial en base a aceite de colza		6,41
1°	Unión Europea	5,76
2°	Estados Unidos	0,33
Producción en base a aceite de palma		9,56
1°	Indonesia	3,80
2°	Unión europea	2,28

3°	Tailandia	1,00
4°	Malasia	0,63
5°	Colombia	0,56
6°	Singapur	0,42

Fuente: Oil World Statistics

La producción de biodiésel en el ámbito mundial para 2014, se ha incrementado en un 7%, pasando de producirse 27,06 millones de toneladas en 2013 a 29,12 millones en 2014 (Infinita Renovables, 2015), esto deja en evidencia en gran crecimiento que ha tenido el desarrollo de este sector industrial en busca de la producción energética en la cual ahondan esfuerzos varios países, destacándose como grandes potencias mundiales Estados Unidos, integrantes de la unión europea, Indonesia y Brasil debido a su contribución a la producción global.

Así se cultivan en mayor proporción soya, palma y colza (75%) en la producción de biodiésel y en una producción más baja (menor de 25%) cultivos de maní, algodón, oliva y girasol, esto muestra la gran demanda que hay por parte de la industria con respecto a cultivos que cumplen un papel muy importante en la alimentación por lo que hay un gran contraste en torno a si este tipo de semillas oleaginosas son más importante en el ámbito alimenticio o el sector energético, muchas veces se puede llegar a la conclusión que debido a como se ha orientado el desarrollo mundial en la actualidad es muy importante el asegurar recursos alimenticios, por lo tanto se pretende buscar nuevas fuentes de materia prima para la producción de energía que no afecte la seguridad alimentaria.

6.2.1 Uso y producción de biodiésel en Colombia

En Colombia el programa de biocombustibles se creó con la finalidad de diversificar la canasta energética en busca del mejoramiento en el medio ambiente así como también pesando en el desarrollo agrícola, por lo tanto el uso y producción de biodiésel se reglamentó mediante la ley 939 de 2004 (García et al., 2012) en donde se considera que el combustibles diésel que tenga como fin usarse en el país en las diferentes actividades que lo requieran podrán contener biocombustibles ya sea de origen animal o vegetal siempre y cuando cumplan con la calidad exigida tanto por el ministerio de minas y energía como el ministerio de medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Dichas exigencia en las características del biodiésel usado en mezclas con combustible diésel se especifican mediante la resolución número 90963 (Ministerio de Minas y Energía, 2014).

La producción iniciada en el país en 2008, usa como materia prima el aceite de palma africana, por lo que se ha promovido el cultivo de dichos producto en grandes extensiones y se ha observado un gran desarrollo en este campo, siendo los mayores productores de aceite de palma en Latinoamérica (Herrera Jaime, Leyva Rolon, Ortiz Ceron, Cardenas Valderrama, & Garzon Lozano, 2009), contando con seis empresas consolidadas encargadas de producir en su totalidad de 506.000 toneladas al año.

Según lo reportado por la Federación Nacional de biocombustibles de Colombia, en el país se produce biodiésel usando el proceso de transesterificación (Figura 10.). En el proceso primero se introduce el catalizador y el metanol a un mezclador, posteriormente se incorpora el aceite

vegetal iniciando así la etapa de transesterificación terminada esta etapa se neutraliza el producto y se separan las fases, el biodiésel por una parte se purifica, posteriormente se elimina el metanol que haya quedado sin reaccionar y termina su ciclo de producción realizando control de calidad. Por otra parte como residuo se tiene glicerina la cual es purificada para su uso en la industria farmacéutica.

Finalizado el proceso de obtención para su uso el biodiésel debe cumplir políticas acordes al programa de mezclas instaurado por el ministerio de minas y energía en donde el porcentaje aceptado en territorio nacional es de 20% biodiésel 80% diésel esto desde el 2012.

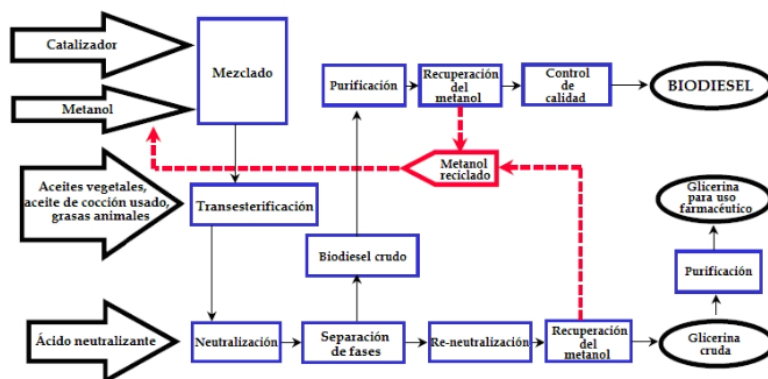


Figura 10. Proceso de obtención de biodiésel en Colombia
Fuente: Federación Nacional de biocombustibles de Colombia

6.2.2 Sebo bovino como alternativa para la producción de biodiésel.

Debido a las consideraciones que se plantean por la gran demanda creciente en los últimos años de biodiésel y las pocas extensiones de tierra adecuadas para la producción de semillas oleaginosas, en el mundo se vienen haciendo esfuerzos en busca de adecuar nuevas extensiones de tierra con el fin de suplir dicha demanda, ya que se necesitan grandes cantidades de materia prima únicamente para poder cubrir una pequeña fracción en el combustible invertido en la generación de energía para el transporte. Algunos países de la región tropical se han visto beneficiados en la producción de materia prima como el aceite de palma debido a que este representa un bajo costo de producción con respecto a las otras semillas oleaginosas aunque todo esto se matiza ya que se puede evaluar si sería de mayor beneficio aprovechar las grandes extensiones de tierra en la generación de productos agrícolas asegurando la alimentación del país o si por el contrario estas extensiones de tierra serían más productivas en el proceso de obtención de energía cultivando materias primas para dicho fin, incluso llegar a devastar zonas boscosas y selváticas deteriorando el equilibrio en la biodiversidad (Castro, Coello, & Castillo, 2007)

En Asia la deforestación con el fin de la plantación de monocultivos de palma africana llegó a cubrir una extensión de 10,5 millones de hectáreas siendo la mitad de estas en el pasado zonas boscosas, en América del Sur específicamente en la región de la amazonia en donde se han dado

consideraciones de países como Brasil y Perú de hacer uso de grandes extensiones para el cultivo de palma aceitera y soya con el fin de producir biodiésel. En Colombia hasta el momento se plantea el uso de grandes extensiones de tierras en la sabana de la Orinoquia con el fin de expandir el cultivo de palma aceitera (Su et al., 2015).

Por estas razones se han venido llevando a cabo proceso de investigación con el fin de determinar las propiedades diversas sustancias como sustituyente de los aceites vegetales en la producción de biodiésel, entre ellas se ha destacan el uso de residuos grasos de origen animal considerando a estos como materia prima económica (Rivera, Villanueva, & Sandoval, 2009), sobre todo en países como lo estados unidos en donde en la industria del procesamiento de carne se han generado al año en un periodo comprendido entre 1997-2001 cerca de 4 mil millones de libras de sebo, con lo cuales se produjeron al menos 2.8 millones de galones de biodiésel supliendo así el 1% de la demanda de todo el territorio nacional en cuanto al uso de combustibles (Nelson & Schrock, 2006).

El sebo de origen bovino es uno de los residuos grasos que se ha considerado con grandes ventajas ya que la presencia de ácido grasos saturados le da gran estabilidad hacia procesos oxidación al producto final, esto por la presencia de ácido esteárico ($C_{18:0}$) en porcentajes de 33,69% (Tabla 9.) siendo este considerablemente mayor al reportado para aceites vegetales como el de soya con un porcentaje entre 3,9 – 4,2% (Tabla 9.) por lo que se puede afirmar que el biodiesel producido a partir de sebo bovino tendrá una capacidad mayor en cuanto a estabilidad hacia procesos oxidativos (Moraes et al., 2008).

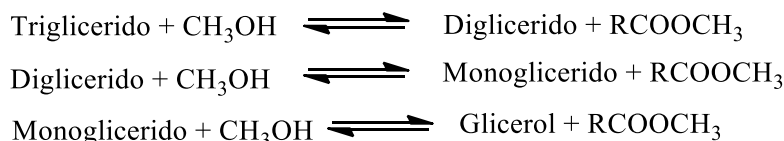


Figura 11. Reacción de transesterificación de triacilglicéridos (Meher, Vidyasagar, & Naik, 2006)

Tabla 9. Ácidos grasos presentes en el sebo bovino y aceite de soya

Ácidos grasos	Sebo bovino (W%)	Aceite de soya (W%)
Mirístico ($C_{14:0}$)	2,68	0,1
Palmítico ($C_{16:0}$)	26,18	10,6-13,2
Palmitoleico ($C_{16:1}$)	1,90	0,1
Esteárico ($C_{18:0}$)	33,69	3,9-4,2
Oleico ($C_{18:1}$)	30,09	22,9-24,4
Linoleico ($C_{18:2}$)	0,76	1,8-7,6
Araquídico ($C_{20:0}$)	0,30	0,3

Fuente: Moraes, M. S. A., Krause, L. C., da Cunha, M. E., Faccini, C. S., de Menezes, E. W., Veses, R. C., Caramão, E. B. (2008). Tallow Biodiesel: Properties Evaluation and Consumption Tests in a Diesel Engine. Energy & Fuels, 22(3), 1949–1954.

En cuanto a los parámetros principales de control en la reacción de transesterificación (Figura 11.) (Meher et al., 2006), usada para la producción de biodiésel se han evaluado la relación molar entre el sebo bovino usado y el metanol, la cantidad y tipo de catalizador usado, obteniéndose así mediante un proceso de transesterificación en medio ácido, biodiésel con un porcentaje de 89% en contenido de esteres usando como catalizador ácido sulfúrico a una concentración de 0,5% y razón molar entre metanol y sebo bovino 6:1. El mismo procedimiento se realizó en medio básico reportando porcentajes en contenido de esteres de 97,3 % a igual concentración de catalizador 0,5% pero en esta ocasión empleando hidróxido de potasio, usando la misma razón molar entre metanol y sebo bovino, (Encinar et al., 2011) esto permite comparar cuál de los dos procesos de transesterificación puede conducir a la obtención de una mayor porcentaje en la conversión de los triacilglicéridos en ésteres metílicos.

En cuanto a la influencia que cada uno de los factores controlables en la reacción de transesterificación se ha podido identificar que cada uno de ellos puede mostrar mayor o menor influencia en el porcentaje en contenido de esteres así en procesos de optimización se ha demostrado que los factores que mayor influencia pueden ejercer son la razón molar entre metanol y sebo bovino, así como también la cantidad de catalizador y su relación con el metanol usado, de igual forma se han identificado dos factores controlables más, en la reacción como son el tiempo y la temperatura un factor considerado como negativo en cuanto más se eleve ya que disminuye considerablemente la pureza del biocombustible (Mendonça et al., 2011).

Determinadas las condiciones y determinados los factores con mayor influencia se lleva a cabo la obtención del producto y su respectiva caracterización fisicoquímica (Tabla 10.) y así determinar la calidad del biocombustibles y si este es comparable con el biodiesel obtenido a partir de materias primas convencionales.

Tabla 10. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel obtenido a partir de sebo bovino

Propiedad	Resultado	Estándares ANP
Contenido de esteres (%)	99,6	96,5 (min.)
Glicerina libre (%)	0,001	0,02 (max.)
Glicerina total (%)	0,05	0,25 (max.)
Sulfuros (mg/Kg)	< 30	50 (max.)
Punto de inflamación (°C)	156	100 (min.)
Viscosidad 40° C (sCt)	4,9	3,0 – 6,0
Densidad 20° C (Kg/m ³)	830	850 – 900
Corrosión lámina de cobre (por 3h a 50° C)	1	1
Punto de nube (° C)	15	19 (max.)
Agua	470	500 (max.)

Fuente: MENDONÇA, Daniel, et al. Application of full factorial design and Doehlert matrix for the optimisation of beef tallow methanolysis via homogeneous catalysis. *En: Fuel Processing Technology*. Octubre, 2010; 92; 342-348 p.

En general el biodiésel obtenido a partir de sebo bovino muestra una buenas propiedades fisicoquímicas cumpliendo con los parámetros de calidad a excepción de su densidad por lo que es necesario evaluar esta propiedad física promoviendo una mezcla con otros tipos de biodiésel

esto con el fin de atenuar su valor y así llevarlo al rango permitido por los estándares de calidad y poder ser aplicado en motores vehiculares de combustión interna.

6.2.3 Biodiésel producido a partir de desechos grasos provenientes de la industria del cuero.

El punto de partida en cuanto a la investigación sobre los desechos de la industria de cuero se ha dado en Turquía (Adewale et al., 2015), en donde juega un papel importante en la economía ya que ha ido creciendo paulatinamente en los últimos años con un gran potencial de proyección hacia el mercado mundial. En países como este, en los cuales se cuenta tanto con la técnica tecnología y personal calificado para el trabajo se ha visto un interés fundamental en torno a la disposición que se les da a los desechos generados como producto del curtido del cuero, en particular a los generados en los procesos de pre descarte, descarte, afeitado, pulido y proceso de recorte (Alptekin et al., 2012), debido a que se generan grandes cantidades de aceites y grasas los cuales provocan un impacto ambiental importante, por tal razón se han involucrado procesos de investigación con el fin de encontrar soluciones a esta problemática medioambiental dándole un valor agregado a dichos residuos.

Este tipo de residuos han sido extraído con métodos convencionales como el sistema soxhlet con hexano como disolvente en donde no se han logrado buenos porcentajes de extracción cuantificando en mayor proporción 23 g de grasa a partir de 200 g de residuos sólidos provenientes del curtido de cuero lo que equivale a un 11,5% de recuperación de grasa (Sandhya, Abinandan, Vedaraman, & Velappan, 2016)

Tabla 11. Ácidos grasos presentes en el aceite de descarte

Ácidos grasos	Porcentaje en peso (%)
Mirístico (C _{14:0})	1,5
Palmítico (C _{16:0})	46,6
Palmitoleico (C _{16:1})	0,9
Esteárico (C _{18:0})	16
Oleico (C _{18:1})	32,3
Linoleico (C _{18:2})	0,8
Araquídico (C _{20:0})	0,4
Behénico (C _{22:0})	0.6

Fuente: Sandhya, K. V., Abinandan, S., Vedaraman, N., & Velappan, K. C. (2016). Extraction of fleshing oil from waste limed fleshings and biodiesel production. Waste Management, 48, 638–643.

Una de las soluciones que se han venido planteando es el uso de este tipo de residuos como fuentes de materia prima para la producción de biodiésel, para ellos se ha hecho uso principalmente de aceites obtenidos del proceso de descarte y pre descarte (Šánek, Pecha, Kolomazník, & Bařinová, 2015), este tipo de desechos contienen abundante agua debido al tratamiento que se le da al cuero en cada una de las etapas, por lo que es importante que se lleve a cabo un pretratamiento con el cual se pueda remover en una forma ideal la totalidad de los residuos de agua con el fin de que no se presentes reacciones de saponificación las cuales entorpecerán en gran medida la obtención de biodiésel mediante transesterificación, así como

también tener un amplio conocimiento de los ácidos grasos (Tabla 11.) de los cuales está constituida la materia prima (Sandhya et al., 2016).

Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas del aceite de descarnado antes y después del pretratamiento

Propiedad	Unidades	Aceite de descarnado	Aceite de descarnado pretratado
Densidad (25° C)	Kg/m ³	907,1	902,2
Viscosidad (40° C)	mm ² /s	43,33	24,91
Índice de acidez	mg KOH/g	24,30	1,52
Índice de yodo	g de yodo/100 g	75	68

Fuente: ALPTEKIN, Ertan, et al. *Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production*. *En: Fuel*. Septiembre, 2011; 95; 214-220 p.

Como se observa en la tabla 12 el pretratamiento del aceite de descarnado atenúa de manera muy eficiente las propiedades fisicoquímicas debido a que los aceites de descarnado fueron tratados con ácido sulfúrico 10%, a una razón molar entre metanol y aceite 30:1, durante 1 hora a reflujo a temperatura de 60°C, esto evita la formación de jabones durante la reacción de transesterificación así como también aumenta la calidad de la materia prima en la producción de biodiésel.

Tabla 13. Propiedades fisicoquímicas biodiésel obtenido a partir de aceite de descarnado

Propiedad	Unidades	Resultado	Estándares
Contenido de ésteres	% w/w	96,6	96,5 (min.)
Densidad a 15° C	Kg/m ³	878	860-900
Viscosidad a 40° C	mm ² /s	4,7	3,5-5,0
Punto de inflamación	°C	161,5	120 (min.)
Carbono residual	% w/w	0,19	0,3 (max.)
Numero de Cetano	-	67,4	0,51 (min.)
Corrosión lámina de cobre (3 horas a 50°C)	-	1	1
Índice de acidez	mg KOH/g	0,16	0,50 (max.)
Índice de yodo	g de yodo/100g	69,2	120 (max.)
Metanol residual	% w/w	<0,01	0,2 (max.)
Glicerina libre	% w/w	<0,01	0,02 (max.)
Glicerina total	% w/w	0,09	0,25 (max.)

Fuente: ŠANEK, Lubomir, et al. *Biodiesel production from tannery fleshings: Feedstock pretreatment and process modeling*. *En: Fuel*. Febrero, 2015; 148; 16-24p.

Posteriormente al pretratamiento que ha brindado muy buenos resultados en el mejoramiento de la calidad de la materia prima se procede a desarrollar el proceso de transesterificación, en donde se han llevado a cabo diseños experimentales con el fin de optimizar el proceso de obtención de biodiesel para ellos ha sido necesario controlar cuatro factores fundamentales de igual manera como se realizó usando como materia prima sebo bovino, llevándose a cabo el proceso con ayuda de un catalizador básico y metanol que se han observado como sustancias primordiales en la mayoría de investigaciones, así para la obtención de biodiesel fueron necesarias razones molares que entre 6:1 – 8:1 metanol: aceite de descarnado, concentraciones de catalizador entre los 0,5 a 1 % tiempos de reacciones de 30 a 60 minutos y temperaturas alrededor de los 60° C (Alptekin et al., 2012; İşler, Sundu, Tüter, & Karaosmanoğlu, 2010) obteniéndose un producto de excelente calidad (Tabla 13.) y cumple en general con las disposiciones internacionales para fines de ser usado como combustibles en motores de combustión interna (Alptekin et al., 2012).

Observados los resultados y la evaluación del producto obtenido haciendo uso de materia prima la cual se disponía de forma inadecuada se puede concluir que la calidad del biodiesel aumenta considerablemente y sería un importante sustituto de los combustibles de origen fósil en el desarrollo energético actual debido a sus grandes propiedades y ventajas al ser un combustible amigable con el medio ambiente, sustentable en su producción, el cual posee una buena capacidad de adaptación sin necesidad de hacer ningún tipo de modificación a los sistemas vehiculares de combustión interna lo que trae beneficios en cuanto a los costos de implementación.

Los estudios previamente revisados de cada una de las investigaciones en el estado del arte fueron de bastante utilidad al momento de establecer los factores que afectarían la reacción de transesterificación en el proceso de obtención de biodiesel a partir del sebo aislado de los residuos de descarnado en el municipio de Belén en el departamento de Nariño en donde se tratan aproximadamente 29.000 pieles al mes esta cantidad deja como residuos de descarnado (sebo) aproximadamente 60 toneladas en el mes (Lozada, 2014). Estos residuos son entregados a la empresa metropolitana de aseo EMAS a cambio de un pago cercano a \$3'000.00 mensuales para que sean llevados al relleno sanitario en donde no se obtiene ningún beneficio. Si estos no son recogidos son dispuestos enterrándolos en el campo o abandonándolos a la intemperie provocando efectos negativos en el medio ambiente.

Por lo expuesto anteriormente es importante promover el desarrollo de un proyecto de investigación a nivel de laboratorio que a futuro pueda escalarse y desarrollarse industrialmente buscando beneficios para la comunidad, brindando una solución a la problemática generada por el desaprovechamiento de estos residuos y mitigando el impacto ambiental provoca.

7. MATERIALES Y METODOS

7.1 MATERIALES, EQUIPOS Y REACTIVOS

Tabla 14. Equipos, materiales y reactivos

<i>Equipos</i>		
Equipo	Marca	Modelo
Olla a presión express	Universal	No aplica
Plancha de agitación	Magnetic Stirrer SBS	ACS 160
Balanza analítica	RADWAG AS 220/C/2 366202	MR HEI-STANDARD
Cromatógrafo de gases acoplado a masas	SHIMADZU GCM-S- QP2010S	O203849
<i>Materiales</i>		
Instrumento	Material	Capacidad
Balón 3 bocas fondo redondo	Vidrio	500 mL
Condensador espiral	Vidrio	No aplica
Bureta	Vidrio	25 mL
Balon aforado	Vidrio	50, 100 y 250 mL
Vaso de precipitado	Vidrio	50, 100, 150, 250, 500 mL
Erlenmeyer	Vidrio	150 y 250 mL
Pipeta volumétrica	Vidrio	1, 5 y 10 mL
Termómetro	Vidrio	300 °C
Probeta	Vidrio	100 mL
Embudo de separación	Vidrio	250 mL
Embudo de filtración	Vidrio	No aplica
Capsula	Porcelana	No aplica
<i>Reactivos</i>		
Nombre	Marca	Pureza (%)
Hexano	PanReac AppliChem®	95
Sulfato de amonio	MERCK®	99,5
Ácido clorhídrico	PanReac AppliChem®	37
Ácido acético glacial	PanReac AppliChem®	99,5
Hidróxido de potasio	PanReac AppliChem®	85
Metanol	PanReac AppliChem®	99,8
Etanol	MERCK®	99,98
Sulfato de sodio	PanReac AppliChem®	100
Yoduro de potasio	EMSURE®	100
Yodato de potasio	MERCK®	99,5
Fenolftaleína	PanReac AppliChem®	1
Almidón	PanReac AppliChem®	1
Cloroformo	PanReac AppliChem®	99
Isopropanol	SIGMA-ALDRICH	99.5
Carbonato de sodio	CARLO ERBA®	100

Eter etílico	Mallinckrodt ®	100
Eter de petróleo	PanReac AppliChem®	99

Fuente: El autor

7.2 PRETRATAMIENTO DE LA MUESTRA

El sebo fue recolectado al finalizar el proceso de descarnado, en una de las tenerías pertenecientes a LA SOCIEDAD CURTIMEBRES DE CUEROS BELEN SAS del municipio de Belén Nariño en Colombia, se recolectó en bolsas plásticas cantidades de 1 Kg, se congeló para evitar el proceso de descomposición hasta el momento de su procesamiento.

Los residuos sólidos se lavaron con: agua destilada y sulfato de amonio 99,5% por 30 minutos, se adicionó ácido acético, hasta observarse un valor de pH cercano a 7, los residuos se picaron en trozos de 1 cm aproximadamente, se empacaron y almacenados en un refrigerador a -4 °C.

7.3 EXTRACCION DE GRASA CON SOLVENTE PRESURIZADO

Para llevar a cabo la extracción de la grasa se implementó la técnica de extracción con solvente presurizado, para lo cual se modificó una olla a presión express convencional (Figura 12A), a esta le fue incorporado un portamuestras y un recipiente en el que se recoge la grasa extraída. Los residuos tratado se ubicaron al interior del recipiente (Figura 12B), seguido a ello se depositó el solvente indicado y el volumen determinado de cada uno para llevarse a cabo el diseño experimental (tabla 17.) finalmente el recipiente se tapó y se calentó hasta alcanzar una presión de 15 PSI, en el momento de establecerse estas condiciones se inicia con el conteo del tiempo (tabla 17.).



Figura 12. A.) Olla a presión convencional, B.) Portamuestras con residuos grasos

Finalmente el solvente usado se liberó por la válvula de la tapa y se recuperó mediante su condensación para su uso posterior, se retiró la tapa, se sacó el portamuestras del interior de la olla a presión y se depositó la grasa extraída en un vaso de precipitado dejando enfriar por un tiempo de 60 minutos para posteriormente determinar su respectivo peso

El procedimiento descrito fue llevado a cabo de similar forma para la optimización del proceso de extracción en donde la cantidad de residuos de descarnado usada fue de 100 g para todas las ejecuciones experimentales (Tabla 17.).

7.3.1 Determinación de los factores relevantes en el proceso de extracción.

Se aplicó un diseño experimental 2^4 en donde los factores fueron, el tiempo, la cantidad de residuos sólidos, el tipo de disolvente, cantidad de disolvente y la variable de respuesta fue el porcentaje de recuperación de grasa. En la tabla 11. Se han incluido los niveles para cada uno de los factores así como sus respectivas unidades.

Tabla 15. Factores diseño experimental recuperación de grasa (sebo bovino)

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
A:Cantidad de disolvente	100	300	2	mL
B:Tiempo	1,0	3,0	2	Horas
C:Cantidad residuo descarnado	100	300	2	g
D:Tipo disolvente	-1,0	1,0	2	-1 Gasolina 1 Hexano

Fuente: El autor

Tabla 16. Variable de respuesta diseño experimental recuperación de grasa

Respuestas	Unidades
Recuperación de grasa	%

Fuente: El autor

Tabla 17. Matriz diseño factorial completo 2^4

Cantidad de disolvente (mL)	Tiempo (Horas)	Cantidad de sebo (g)	Tipo de disolvente 1 Hexano, 1 Gasolina
300	3	300	1
100	3	300	1
300	1	300	1
300	3	100	-1
100	3	100	-1
100	1	300	-1
300	3	100	1
300	1	100	1
100	3	100	1
100	3	300	-1
300	1	100	-1
100	1	100	1
100	1	100	-1
300	3	300	-1
100	1	300	1
300	1	300	-1

Fuente: El autor

7.3.2 Optimización del proceso de extracción

Definidos los factores más relevantes para optimizar la extracción se propone la aplicación de un diseño compuesto central 2^2 + puntos estrella usándose 5 disolventes diferentes, isopropanol (-2), éter de petróleo (-1), hexano (0), gasolina (1) y Cloroformo (2). Los factores se especifican en la Tabla 18. Considerando la misma variable respuesta del diseño factorial completo 2^4 (Tabla 16.).

Tabla 18. Factores y niveles diseño central compuesto 2^2 + puntos estrella

Factores	Nivel bajo	Nivel Alto	Unidades
A:Tipo solvente	-1,0	1,0	-1 Éter de petróleo 1 Gasolina
B:Tiempo	1,0	3,0	Horas
C:Cantidad de solvente	50,0	150,0	mL

Fuente: El autor

Tabla 19. Ejecuciones experimentales diseño central compuesto 2^2 + puntos estrella

Tipo de disolvente	tiempo (horas)	Cantidad de disolvente (mL)
-1	3	150
1	3	150
-2	2	100
0	2	175
-1	1	50
1	3	50
1	1	50
-1	1	150
0	0,5	100
1	1	150
0	3,5	100
0	2	100
-1	3	50
0	2	100
2	2	100
0	2	25

Fuente: El autor

7.4 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DE SEBO BOVINO AISLADO.

7.4.2 Propiedades fisicoquímicas del sebo

Inicialmente se realizó una observación para la determinación de las propiedades organolépticas más relevantes como lo fueron el olor y el color, esto tanto para el sebo bovino sólido como para este mismo material en su estado líquido al alcanzar el punto de fusión.

La densidad de la grasa se midió mediante el método para la determinación de la densidad con una probeta en donde se pesó la probeta vacía posteriormente se fundió la grasa, llevándose al interior de la probeta se dejó enfriar hasta los 20°C y se pesó nuevamente.

Para la determinación de la viscosidad dinámica la determinación se llevó a cabo con ayuda de un viscosímetro la medición se realizó a 60°C a una velocidad de 20 rpm y con una fuerza de cizalla de 0,14 N/m².

El Punto de fusión se determinó usando un fusímetro digital Electrothermal modelo 1001D la muestra fue introducida dentro de un capilar, este se ubicó dentro del fusímetro y se inició el proceso hasta que observó el cambio de estado.

La caracterización química del sebo bovino extraído se llevó a cabo mediante la aplicación de las normas del Instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC) como se muestra en la (Tabla 16) en donde se especifica tanto el método como los materiales y reactivos que fueron utilizados en cada una de las determinaciones

Tabla 20. Parámetros y métodos para la caracterización del sebo bovino

Parámetro	Método
Índice de acidez	ICONTEC NTC 218
Índice de saponificación	ICONTEC NTC 335
Índice de yodo	ICONTEC NTC 283
Índice de peróxido	ICONTEC NTC 236
Humedad	ICONTEC NTC 287

Fuente: El autor

7.4.2 Identificación de ácidos grasos presentes en el sebo bovino.

Con el fin de identificar los ácidos grasos que constituyen los triacilglicéridos que estructuran las grasas fue necesario transformarlos en sus metil esterres correspondientes, para ello en una baño maría inicialmente la grasa aislada se fundió a una temperatura de 50 °C, se tomó un volumen inicial de muestras para el análisis de 200 µL llevándose a un tubo de ensayo en donde se adicionaron 5 mL de una disolución al 5 % Metanol - ácido clorhídrico usándose este como agente derivatizante, el tubo de ensayo se calentó en baño maría a una temperatura de 55 °C durante 18 horas. Transcurrido el tiempo fueron agregados 5 mL de agua destilada tipo 1 al tubo de ensayo y 1 mL de hexano. De la fracción orgánica (esteres metílicos) se tomó 1 µL con el fin de analizar la muestra mediante cromatografía de gases acoplado a espectrometría de masas (Lozada. J, Delgado. O, Diaz. W, 2006)

7.5 OBTENCION DE BIODIÉSEL

Teniendo en cuenta la etapa experimental llevada a cabo por varios autores (Araújo et al., 2010; Bhatti, Hanif, Qasim, & Ata-ur-Rehman, 2008; Jain, Sharma, & Rajvanshi, 2011; Mata et al., 2011; Moura, 2008; Vivas Castaño, 2010) se determinaron los factores experimentales en el

diseño factorial completo 2^4 + puntos estrella esto con el fin de optimizar el proceso de obtención de biodiesel.

7.5.1 Optimización del proceso de obtención de biodiésel

Inicialmente fue disuelta la cantidad de hidróxido de potasio necesaria para cada uno de las reacciones en metanol (Tabla 23.), posteriormente se calentaron 30 g del sebo bovino hasta una temperatura de 110 °C durante 10 minutos, en un balón de fondo redondo equipado con un condensador. Finalizados los 20 minutos se dejó enfriar la mezcla de reacción hasta que alcanzó la temperatura determinada para cada ejecución, se adicionó al reactor el 30 % del volumen de metanol como se indica en la matriz de experimentos, se dejó en agitación durante 10 minutos con agitación a 300 rpm, al término de los 10 minutos, se adicionó la solución preparada con el catalizador y el porcentaje restante de metanol, finalmente se continua con la reacción a reflujo con una agitación constante durante el tiempo indicado para cada reacción

Tabla 21 Factores diseño experimental obtención de biodiésel

Factores	Bajo	Alto	Niveles	Unidades
Cantidad de metanol	30	40	2	mL
Cantidad catalizador	0,3	1,5	2	g KOH
Temperatura	70	100	2	°C
Tiempo	1	2	2	Horas

Fuente: El autor

Tabla 22. Variables de respuesta diseño experimental obtención de biodiésel.

Respuestas	Unidades
Contenido de esteres metílicos	%

Fuente: El autor

Tabla 23. Matriz diseño experimental obtención de biodiésel

<i>Ejecución</i>	<i>Cantidad de KOH (g)</i>	<i>Cantidad de Metanol (mL)</i>	<i>Temperatura (° C)</i>	<i>Tiempo (Horas)</i>
1	0,4	35	100	1,5
2	0,5	30	70	2
3	0,4	35	85	2
4	0,5	35	85	1,5
5	0,3	35	85	1,5
6	0,5	40	100	1
7	0,5	40	70	1
8	0,3	30	70	1
9	0,3	40	70	1
10	0,4	35	85	1
11	0,4	30	85	1,5
12	0,5	30	100	1
13	0,4	35	70	1,5
14	0,4	40	85	1,5
15	0,3	40	70	2
16	0,5	30	100	2
17	0,3	30	70	2
18	0,5	40	70	2
19	0,3	40	100	1
20	0,5	30	70	1
21	0,5	40	100	2
22	0,3	40	100	2
23	0,3	30	100	1
24	0,3	30	100	2
25	0,4	35	85	1,5
26	0,4	35	85	1,5
27	0,4	35	85	1,5
28	0,4	35	85	1,5
29	0,4	35	85	1,5

Fuente: El autor

Desarrollado cada uno de los experimento del diseño factorial completo 2^4 + puntos estrella y finalizados en los tiempos establecido se procedió a realizar la purificación del producto obtenido.

7.5.2 Purificación del biodiésel

La mezcla de reacción se llevó a un embudo de separación y se dejó en reposo durante 3 horas. Se conservó la parte superior (biodiésel) se ejecutaron cinco lavados con agua destilada caliente (85 °C) en porciones de 10 mL hasta que el pH del agua usada tuvo un valor cercano a 7. Para eliminar el agua remanente se adiciono al 1 g de sulfato de sodio anhidro, agitándose durante 60 minutos, se filtró y almaceno en recipientes de vidrio ámbar hasta el momento de llevarse a cabo la determinación de las variables de respuesta planteadas en el diseño

7.5.3 Cuantificación de metil ésteres presentes en el biodiesel

La identificación de los metil ésteres formados en la reacción de transesterificación se realizó con ayuda de un cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas SHIMADZU GCMS-QP2010S con un puerto de inyección Splitt relación 1:50 a una temperatura de 250 °C, interface detector de masas a una temperatura de 300 °C, columna cromatográfica DB-5MS, con una longitud de 30m, diámetro interno 0.25mm y un espesor de película de 0.25µm:

Programa de temperatura: 40 °C a 130°C con una rata de 15°C/min

Flujo de gas carrier: 1 mL/min.

Temperatura del inyector: 250 °C

Temperatura del detector: 300 °C

Volumen de inyección. 1 µL

Para la cuantificación de los metil ésteres, se preparó la muestra adicionando 200 µL de octanoato de metilo usado como patrón interno a una concentración de 8770 ppm, 775 µL Hexano y 25 µL de cada una de los productos obtenidos según el diseño experimental (Tabla 19.) planteado.

7.6 CARACTERIZACIÓN FISICOQUÍMICA DEL BIODIÉSEL OBTENIDO

La caracterización se realizara con el fin de determinar las propiedades primordiales que debe cumplir el biodiésel con respecto a los combustibles convencionales y así determinar su potencial uso como combustibles en motores vehiculares de acuerdo a las normas del Instituto colombiano de normas técnicas y certificación (ICONTEC) y la asociación americana de prueba de materiales (ASTM) .

Tabla 24. Parámetros físicos y métodos para la caracterización de biodiésel

Parámetro	Método
Densidad	ASTM D1298
Viscosidad cinemática	ASTM D88
Punto de inflamación	ASTM D5865
Poder calorífico	ASTM D240

Fuente: El autor

Tabla 25. Parámetros químicos y métodos para la caracterización de biodiésel

<i>Parámetro</i>	<i>Método</i>
Índice de yodo	ICONTEC NTC 283
Índice de acidez	ICONTEC NTC 218
Humedad	ASTM D4006

Fuente: El autor

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 TRATAMIENTO DE MUESTRA

Mediante la aplicación de los procesos químicos y los lavados con agua se observó un gran cambio en los residuos grasos, al tratarse el sebo se observa un cambio en sus propiedades organolépticas, así la coloración grisácea (esto debido a la presencia hidróxido de calcio remante de la etapa de pelambre y algunas impurezas sólidas de gran tamaño como: arena, piedra y material vegetal) (Figura 13A) desaparece dando como resultado del tratamiento una coloración blanca y limpia (Figura 13B), una pérdida de olor fue bastante notoria ya que el fuerte olor característico de material biológico en descomposición después de los lavados se dejó de percibir.

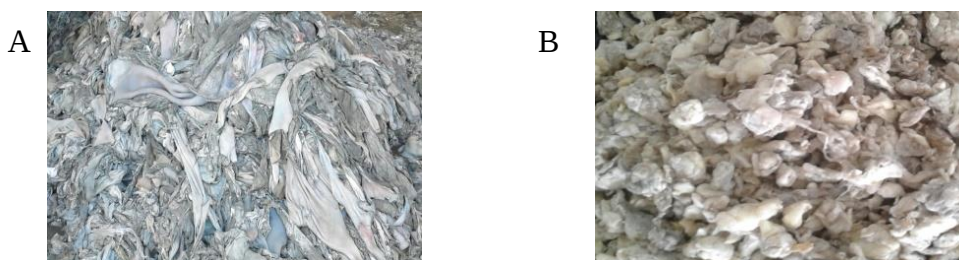


Figura 13. Residuos sólidos de descarnado. A.) Antes del tratamiento y B.) Después del tratamiento

8.2 EXTRACCION DE GRASA CON SOLVENTE PRESURIZADO

8.2.1 Determinación de los factores relevantes en el proceso de extracción.

El diseño factorial completo 2^4 permitió identificar los factores que afectan en mayor magnitud la extracción de grasa ejecutando 16 experimentos, para los cuales se reporta su respectivo porcentaje en la recuperación de grasa (Tabla 26) (ANEXO 1.).

La verificación de los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia es de gran importancia debido a que con ello se determina la certeza de que los datos que se obtienen a partir del diseño experimental desarrollado tengan validez y la información brindada por el análisis de varianza ANOVA sea confiable para explicar el fenómeno observado para los experimentos y la influencia que cada uno de los factores o las interacciones entre ellos tenga sobre la variable respuesta que en este caso es el porcentaje en la recuperación de sebo (grasa).

El cumplimiento del supuesto de normalidad se verifica mediante el gráfico de probabilidad normal de los residuos (Figura 14.), en donde se observa que cada uno de los residuos se ajusta a una línea recta.

Tabla 26. Diseño experimental 2^4 para la extracción de grasa con solvente presurizado

Exper.	Cantidad de disolvente (mL)	Tiempo (Horas)	Cantidad de sebo (g)	Tipo de disolvente 1 Hexano, -1 Gasolina	Recuperación de grasa (mL)
1	300	3	300	1	48,00
2	100	3	300	1	42,33
3	300	1	300	1	38,39
4	300	3	100	-1	51,50
5	100	3	100	-1	50,18
6	100	1	300	-1	48,63
7	300	3	100	1	44,50
8	300	1	100	1	38,00
9	100	3	100	1	37,50
10	100	3	300	-1	49,10
11	300	1	100	-1	48,20
12	100	1	100	1	44,25
13	100	1	100	-1	47,58
14	300	3	300	-1	49,77
15	100	1	300	1	49,94
16	300	1	300	-1	41,50

Disolvente 1=Gasolina , -1= Hexano

Fuente: El autor

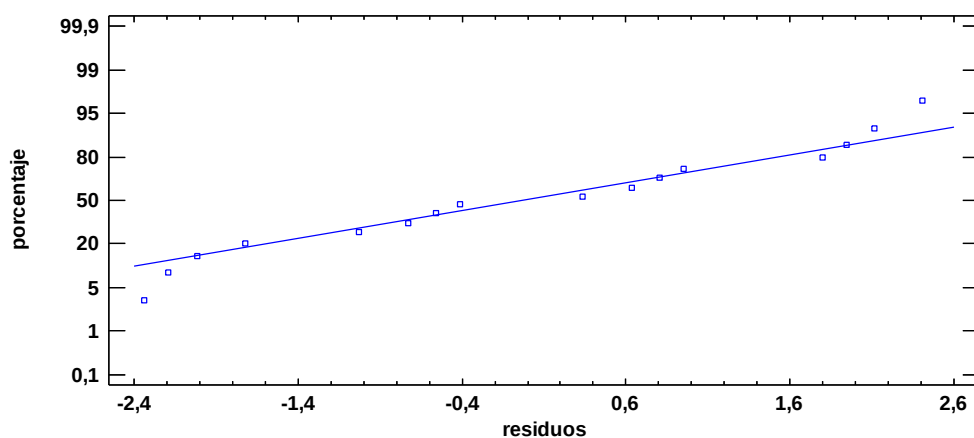


Figura 14. Probabilidad normal para residuos en la recuperación de grasa

En cuanto al supuesto de varianza constante se cumple ya que todos los puntos en el gráfico de residuos para la recuperación de sebo (grasa) se distribuyen de manera aleatoria sobre la línea horizontal concluyendo así que todos los tratamientos tienen la misma varianza.

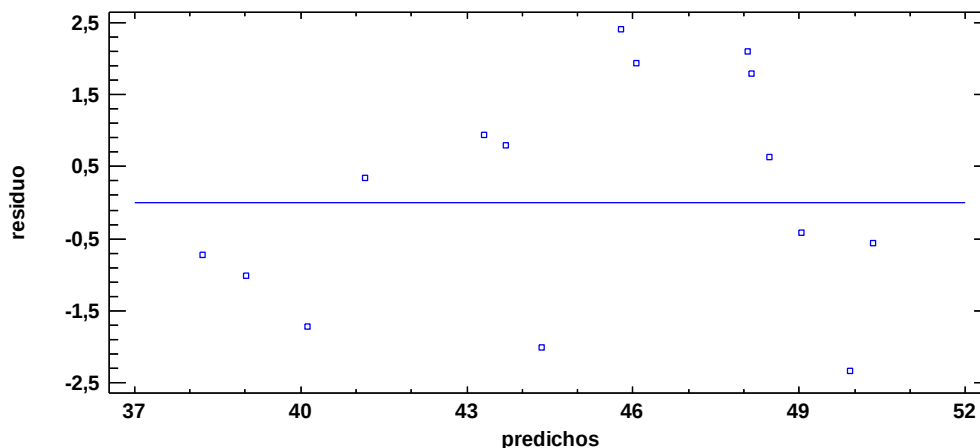


Figura 15. Residuos para la recuperación de grasa (sebo bovino)

Se verificó el supuesto de independencia esto para determinar el principio de aleatoriedad en la ejecución de cada uno de los experimentos así como la eficiencia en la planeación del diseño experimental. En el Figura 15. Se observa que cada uno de los puntos se comporta aleatoriamente ubicándose sobre una línea horizontal dicho patrón de aleatorización determina que cada una de las ejecuciones llevadas a cabo en el diseño experimental son independientes

Verificados los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia se puede validar los datos y resultados presentados en el análisis de varianza para poder identificar los factores o la interacción entre ellos que afectan en mayor medida al proceso de recuperación de sebo (grasa).

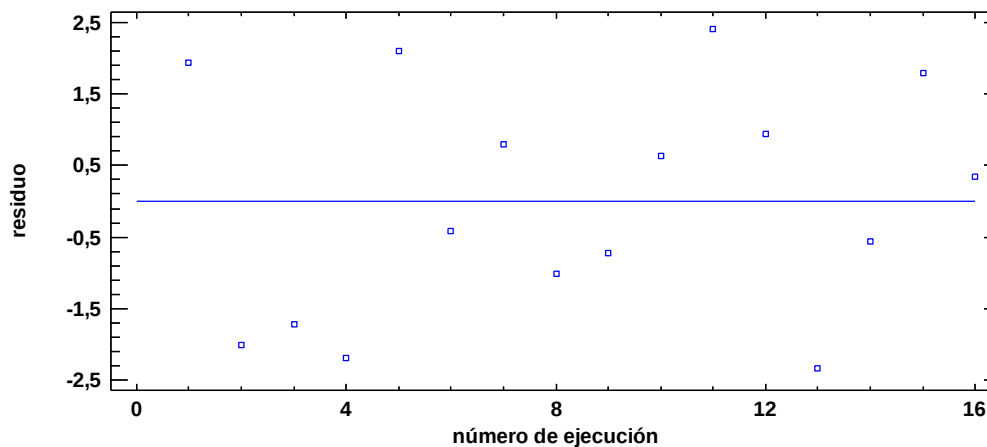


Figura 16. Residuos para la recuperación de grasa (sebo bovino)

Tabla 27. ANOVA diseño experimental 2^4 para la extracción de grasa

Factores	SC	Gl	CM	Razón-F	Valor-P
A	5,82016	1	5,82016	0,75	0,4253
B	16,7895	1	16,7895	2,17	0,2006
C	2,21266	1	2,21266	0,29	0,6156
D	118,538	1	118,538	15,33	0,0112
AB	94,9163	1	94,9163	12,28	0,0172
AC	14,1188	1	14,1188	1,83	0,2345
AD	0,0232563	1	0,0232563	0,00	0,9584
BC	1,61926	1	1,61926	0,21	0,6664
BD	10,3845	1	10,3845	1,34	0,2988
CD	32,6898	1	32,6898	4,23	0,0949
Error total	38,6565	5	7,7313		
Total (corr.)	335,768	15			

SC: suma de cuadrados, CM: Cuadrado medio, Gl: Grados de libertad

Fuente: El autor

De acuerdo al análisis de varianza (ANOVA) para el diseño factorial completo se puede determinar que D: Tipo de disolvente es el factor más relevante para la extracción de la grasa, así como también la interacción AB: tiempo y cantidad de disolvente, para los cuales se determinó Valor-P de 0,0112 y 0,0172 (Tabla 27) respectivamente menores a 0,05 a un nivel de confianza de 95%

En el diagrama de Pareto se ubican de mayor a menor significancia los factores y las interacciones experimentales, en donde los que sobrepasan la línea vertical son los de mayor relevancia. De esta manera la gráfica confirma lo presentado en el análisis de varianza (ANOVA), en donde los factores que afectando en mayor magnitud a la variable de respuesta son el tipo de disolvente y la interacción entre el tiempo y la cantidad de disolvente.

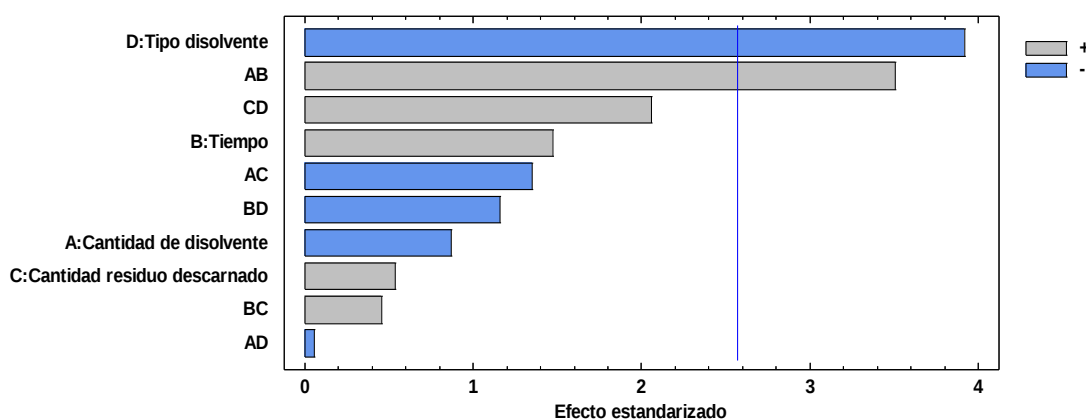


Figura 17. Diagrama de Pareto recuperación de grasa diseño factorial completo 2^4

Con el fin de garantizar una buena extracción de grasa a partir de los residuos sólidos provenientes del proceso de descarnado fue necesario implementar el método extracción con

solvente presurizado en donde la interacción de los solventes con la muestra se desarrolla como se observa en la Figura 18.

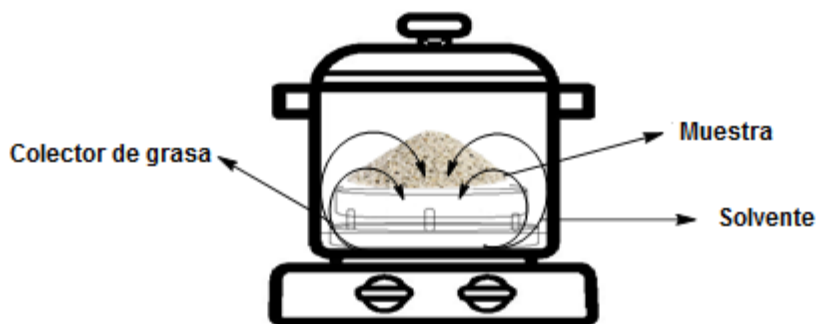


Figura 18. Diagrama proceso de extracción con solvente presurizado

El solvente ubicado en la parte del fondo de la olla a presión cuando se calienta pasa de su estado líquido a estado gaseoso provocando así el aumento en la presión y generándose un equilibrio en las dos fases, la interacción de los solventes en forma de vapor disperso en el interior de la olla junto a la temperatura distribuida en todo el sistema inducen la fundición y solubilidad de la grasa, la cual se va depositando poco a poco dentro del recipiente ubicado bajo el portamuestras. Al finalizar el tiempo de extracción el solvente es liberado por la válvula mientras se sigue aplicando calor, para separarlo de la grasa esto por el efecto de sus diferentes puntos de ebullición, este proceso se puede comparar con el que se lleva a cabo mediante un equipo de rota evaporación, recuperando el solvente en casi un 70 % para ser usado en posteriores extracciones y logrando obtener la grasa en el recipiente ubicado para tal fin libre del solvente usado.

La técnica de extracción se ejecutó utilizando como solventes de extracción gasolina y un hidrocarburo puro como lo es el hexano el cual es referenciado con mayor frecuencia en la extracción de grasas específicamente siendo usado en sistemas de extracción Soxhlet.

La influencia en mayor magnitud del tipo de disolvente en la recuperación de grasa se observa debido a que las cuantificaciones porcentuales realizadas haciendo una comparación entre los dos tipos de disolvente muestran que cuando fue usada la gasolina comercial en el desarrollo de la experimentación los porcentajes fueron superiores a los alcanzados al momento de usar hexano (Tabla 26.). La mayor evidencia del fenómeno antes descrito se observa al llevar a cabo comparaciones entre los dos procesos experimentales en las mismas condiciones para los cuales haciendo uso de gasolina comercial se pudieron cuantificar cantidades de grasa recuperadas hasta de un 51,50% (Experimento 4), contrastando este resultado con un cantidad que representa un 49,94% (Experimento 15) cuando fue empleado solamente hexano para llevar a cabo la extracción. El uso de la gasolina siendo esta una mezcla de hidrocarburos alifáticos, los cuales están estructurados por cadenas carbonadas de entre 4 a 10 carbonos propician un ambiente lipofílico y apolar eficiente para la recuperación de ácidos grasos de cadena larga por esta razón los porcentajes de recuperación observados son mayores.

8.2.2 Optimización del proceso de extracción

Identificados los factores de mayor relevancia en la extracción de sebo (grasa) se propuso el desarrollo de un diseño compuesto central 2^2 + puntos estrella realizándose 16 experimentos (Tabla 28). En donde nuevamente se observa la tendencia favorable que conlleva el uso de la gasolina comercial (1) como disolvente esto es bastante relevante en comparación a los otros disolventes usados. Los cálculos para el porcentaje de recuperación de grasa se consignan en el ANEXO 2.

Tabla 28. Diseño experimental compuesto central 2^2 + puntos estrella

Tipo de disol.	Tiempo (horas)	Cant. de disol. (mL)	Recup. de grasa (%)
-1	3	150	36,91
1	3	150	51,65
-2	2	100	28,34
0	2	175	46,35
-1	1	50	33,67
1	3	50	49,81
1	1	50	48,24
-1	1	150	30,39
0	0,5	100	39,57
1	1	150	49,17
0	3,5	100	46,86
0	2	100	44,08
-1	3	50	33,45
0	2	100	44,08
2	2	100	40,98
0	2	25	42,17

-2: Isopropanol, -1: Éter etílico, 0: Hexano, 1: Gasolina, 2: Cloroformo

Fuente: El autor

El ANOVA (Tabla 29.) para el diseño compuesto central 2^2 + puntos estrella se ha determinado que el tipo de disolvente A es el factor más relevante y la interacción AA eso debido a que el p-valor calculado es menos a 0,05 a un nivel de confianza de 95%, esto se confirma con el diagrama de Pareto en donde de manera gráfica el factor con mayor significancia y la interacción sobrepasan la línea vertical.

Tabla 29. ANOVA Diseño experimental compuesto central 2^2 + puntos estrella

<i>Fuente</i>	<i>SC</i>	<i>Gl</i>	<i>CM</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A	537,887	1	537,887	43,16	0,0006
B	37,4335	1	37,4335	3,00	0,1338
C	7,29289	1	7,29289	0,59	0,4733
AA	86,8407	1	86,8407	6,97	0,0385
AB	0,632813	1	0,632813	0,05	0,8292
AC	0,838513	1	0,838513	0,07	0,8040
BB	0,0126995	1	0,0126995	0,00	0,9756
BC	7,31531	1	7,31531	0,59	0,4726
CC	1,02382	1	1,02382	0,08	0,7840
Error total	74,7678	6	12,4613		
Total (corr.)	789,957	15			

SC: suma de cuadrado CM: Cuadrado medio Gl: grados de libertad

Fuente: El autor

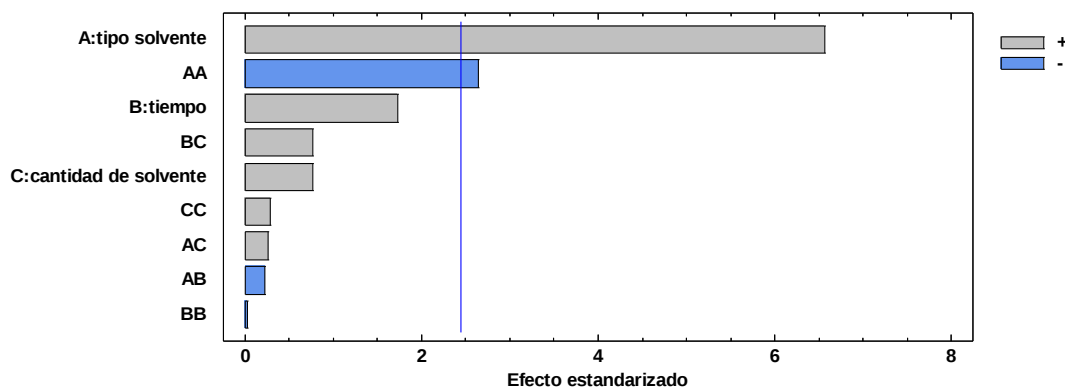
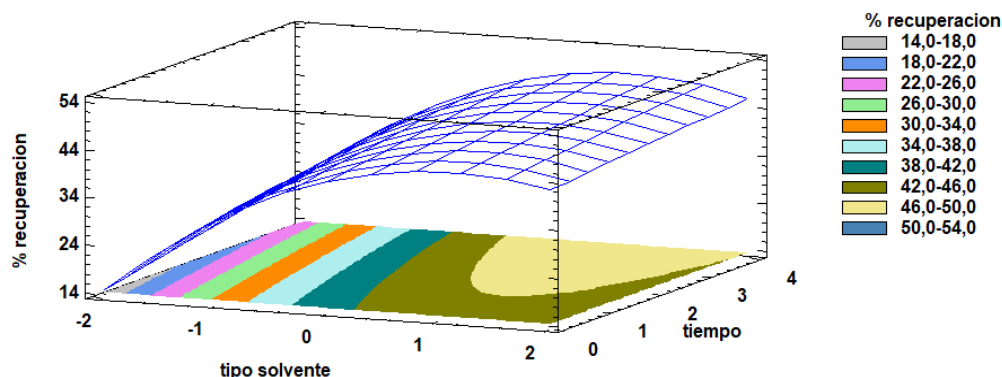


Figura 19. Diagrama de Pareto recuperación de grasa diseño compuesto central 2^2 + puntos estrella

De acuerdo al diseño experimental desarrollado se ha determinado un valor de R^2 de 90,53 % y de R^2 ajustado de 76,33 % siendo este mayor al 70 % indica que la variabilidad en el porcentaje de recuperación de grasa explicada en gran medida por los factores estudiados. Para todos los datos y resultados obtenidos gracias a la aplicación del diseño experimental se tuvo en cuenta el cumplimiento de los supuesto de varianza constate, normalidad e independencia.

En los ANEXOS 3 a 5 se observan las gráficas con los cuales se comprueban los supuestos en donde para el análisis de varianza constante en los tratamiento todos los puntos en el grafico se distribuyen de forma aleatoria en torno a la línea horizontal determinado así que si se cumple. El supuesto de normalidad se concluye ya que en el gráfico se observa que todos los puntos se ajustan de una manera adecuada a una línea recta. La independencia en los resultados se determina gracias a que en el gráfico de residuos para el porcentaje de recuperación de grasa los puntos se distribuyen de manera aleatoria sobre una banda horizontal con ello se concluye que

los experimentos se llevaron a cabo de manera aleatoria. Determinado el tipo de disolvente como el factor relevante en la recuperación de grasa se ha elaborado un gráfico de superficie de



respuesta en donde se muestra su efecto y su interacción con el tiempo.

Figura 20. Superficie de respuesta interacción entre tipo de disolvente y tiempo

En la Figura 20 se puede observar que a tiempos mayores a una hora y cuando el disolvente usado es 1 (gasolina comercial) los porcentajes de recuperación alcanzan un máximo de 50 %.

Por otra parte el Figura 21 nos muestra el efecto que tiene el tipo de disolvente versus la cantidad de disolvente en donde se observa que cuándo 1 (gasolina comercial) es usada en cantidades cercanas a los 200 mL, los porcentajes de recuperación alcanzarían un porcentaje máximo de 54%.

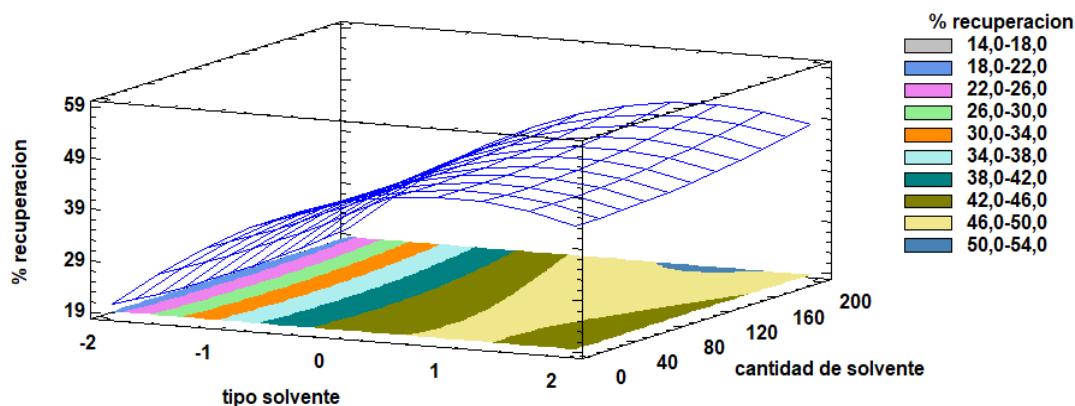


Figura 21. Superficie de respuesta interacción entre tipo de disolvente y cantidad de disolvente

Para el diseño experimental compuesto central y según el modelo ajustado, se definen cada uno de los coeficientes de regresión para el proceso en donde la ecuación de regresión describe el comportamiento del porcentaje de recuperación de grasa en cualquier punto cuando son variados los factores experimentales.

$$\% \text{ Recuperación} = 44,2026 + 6,19082*A - 0,108802*B - 0,0502297*C - 3,06168*A^2 - 0,28125*AB + 0,006475*AC - 0,0370247*B^2 + 0,019125*BC + 0,000132974*C^2$$

En donde: A Tipo de disolvente, B Tiempo, C Cantidad de disolvente y AA, AB, AC, BB, BC Y CC siendo las interacciones entre los factores

Ecuación 1. Modelo ajustado para la recuperación de grasa a partir de sebo bovino

Mediante la aplicación de la Ecuación 1 se han podido determinar las condiciones óptimas (Tabla 30.) para alcanzar el máximo porcentaje en la recuperación de grasa 54,80 %

Tabla 30. Condiciones óptimas para la recuperación de grasa (sebo bovino)

<i>Factor</i>	<i>Óptimo</i>
Tipo solvente	Gasolina comercial
Tiempo (Horas)	3.5
Cantidad de solvente (mL)	350

.Fuente: El autor

Finalizado el trabajo de optimización los resultados obtenidos se pueden comparar con otras técnicas que han sido empleadas para la extracción de grasa en este tipo de residuos en donde empleando hexano en un equipo soxhlet solamente se han logrado recuperar un porcentaje máximo de 11,5 % de grasa (Sandhya et al., 2016) y con la propia experiencia desarrollada en donde a partir de 150 gramos de residuos sólidos solamente se alcanzaron a obtener 29,02 gramos de grasa que equivalen a 19,34% de recuperación, en donde el tiempo empleado fue de aproximadamente 16 horas la cantidad de solvente usado fue de 600 mL de hexano, comparando todo esto cabe recalcar que el método propuesto tiene características demasiado positivas al momento de desarrollar este tipo de extracciones ya que requiere cantidades pequeñas de disolvente, se necesita de un tiempo de ejecución experimental más corto en comparado con lo descrito anteriormente, de igual forma el solvente usado se recupera en casi un 70% para poder ser usado en posteriores extracciones, con esto se asegura que no haya ningún tipo de desechos de carácter contaminante ya que todo es reutilizado inclusive el ripio desengrasado (Figura 22) que queda como residuo después de la extracción de la grasa se ha abordado como un material con potencial uso para el tratamiento de aguas residuales que se originan en las curtiembres así como materia prima para la producción de carbón activado.



Figura 22. Ripio de cuero desengrasado

Evaluable la implementación de la técnica con una gama importante de solventes también se ha podido evidenciar que con solventes orgánicos cuya polaridad no es tan marcada como la de los hidrocarburos con los cuales se obtuvieron mejores recuperaciones de grasa, se alcanzaron porcentajes relevantes de recuperación aunque en algunos casos se observaron inconvenientes bastante marcados como la degradación de los residuos de descarnado lo que hizo que fuera defectuosa la extracción de grasa cuando fue usado éter de petróleo como solvente (Figura 23.) esto pudo deberse a que el solvente degradó las proteínas del colágeno el cual es el componente principal del ripio desengrasado.



Figura 23. Residuos de descarnado degradados

8.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SEBO BOVINO AISLADO.

8.3.1 Propiedades fisicoquímicas del sebo bovino

La caracterización fisicoquímica de las sustancias de carácter graso es de gran importancia en la industria y en el desarrollo de los procesos para los cuales se utilizan como materias primas este tipo de sustancias, mediante cada una de sus propiedades se puede evaluar su calidad y así definir tanto sus beneficios en la obtención de un determinado producto o los inconvenientes que sus propiedades acarrearán buscando ya sea por métodos físicos o químicos atenuarlas para propiciar su uso sin disminuir las características y la calidad del producto.



Figura 25. Sebo bovino recuperado (grasa)

En la producción de biodiésel es de gran importancia tener un amplio conocimiento de las propiedades de material graso que se utiliza como materia de partida para la producción es por ello que se ha llevado a cabo la determinación de la propiedades más relevantes para determinar el estado de la grasa recuperada en donde se ha tomado para realizar este trabajo únicamente el sebo bovino recuperado en el proceso de extracción realizado con gasolina comercial, debido a que con este disolvente se alcanzaron los mayores porcentajes de recuperación y así valorar su uso potencial como materia prima en la producción de biodiésel.

Se evaluaron las principales características del sebo bovino recuperado, el cual a temperatura ambiente (15°C) es un sólido amarillento (Figura 24.), con textura suave, olor suave casi imperceptible. Se determinó su punto de fusión el cual se encuentra en un intervalo entre 38-39 °C, el sebo fundido presento un color amarillo traslucido (Figura 25) y sin presencia de ningún tipo de precipitados ni de impurezas solidas incorporadas, su densidad tiene valor de 893,2 Kg/m³ y una viscosidad dinámica de 6,93 cP a una temperatura de 60°C.

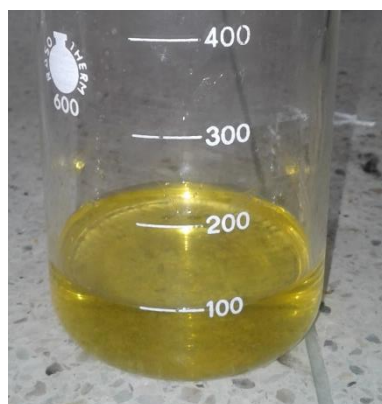


Figura 24. Sebo bovino (grasa) fundido

Determinadas las principales características organolépticas y físicas, se valoraron sus propiedades químicas las cuales proveen información importante sobre las estructuras de los compuestos químicos presentes en la grasa, como también la degradación que estos han sufrido por diversas condiciones ya sea la temperatura, la interacción con humedad o aire y con la luz. Los cálculos para la determinación de las propiedades se plasman en los ANEXOS 6 a 10.

Tabla 31. Propiedades químicas grasa extraída (sebo bovino)

Parámetro	Método	Unidades	Resultado
Índice de acidez	ICONTEC NTC 218	mg KOH/g	1,64
Acidez		% ácido oleico	0,82
Índice de saponificación	ICONTEC NTC 335	mg KOH/g de grasa	188,43
Índice de yodo	ICONTEC NTC 283	g I ₂ /100 g	68,24
Índice de peróxido	ICONTEC NTC 236	meq de O ₂ /Kg	5,47
Humedad	ICONTEC NTC 287	%	1,54

Fuente: El autor

EL índice de acidez y el índice de saponificación son parámetros importantes en la evaluación del estado de degradación debido a procesos de hidrólisis o descomposición lipolítica. Los valores consignados en el Tabla 31 permiten determinar que la grasa recuperada ha sufrido un proceso de degradación en una mínima medida, por lo cual se afirma que la grasa extraída tiene una cantidad muy baja de ácidos grasos libres, esto contribuye en gran medida a la obtención de biodiesel por lo cual se considera una materia prima más adecuada ya que sus componentes principales, los triacilglicéridos, están en mayor proporción y esto dará como resultado que la reacción se lleve a cabo de manera satisfactoria y no se evidencie el desarrollo de reacciones químicas secundarias las cuales propicien la producción de especies químicas como son las sales de ácidos grasos las cuales pueden traer inconvenientes en el proceso de separación del biodiesel de la glicerina en la etapa de purificación disminuyendo así su calidad.

El índice de yodo indica un número de insaturaciones considerables las cuales no son muy altas en la estructura de los ácidos grasos, este hecho implica un gran beneficio en la producción, almacenamiento y conservación de la grasa y le confiere estas propiedades a los ésteres formados mediante la transesterificación en la producción de biodiesel. Cuando la cantidad de ácidos grasos con insaturaciones presentes en su estructura, están en pequeña proporción presentes en las grasas, los procesos oxidativos disminuyen esto otorga estabilidad a la grasa evitando así el enranciamiento. Por lo tanto la materia prima para la producción de biodiesel recuperada tiene una gran estabilidad lo que confiere grandes cualidades a la mezcla de metil ésteres producida

El índice de peróxidos fue determinado con la finalidad de conocer el estado de la grasa al momento de ser recuperada, ya que en ciertas condiciones se va a llevar a cabo procesos de oxidación debido a la interacción de la grasa con el aire este hecho produce la formación de hidroperóxidos los cuales van a producir la formación de radicales libres desatando así la formación de especies que alteran la composición química de la grasa, esto es evidente en cambios de color de olor. El valor bajo en la determinación del índice de peróxidos indica la gran conservación de la grasa recuperada concluyendo de esta manera que no se han desarrollado procesos oxidativos debido a su exposición a la luz solar, calor, humedad o aire y no se presentan alteraciones en su estructura química que puedan generar una influencia negativa en la producción de biodiesel.

El porcentaje de humedad adecuado y bajo indica que no hay presencia de grandes cantidades de agua en la estructura de la grasa, esto se evitó debido al sistema de extracción con solvente presurizado el cual propicia de una manera positiva la eliminación de agua en forma de vapor, con esto también se garantiza que el agua no actúe como interferente en la reacción de transesterificación y se lleve a cabo una obtención satisfactoria de la mezcla de metil ésteres, así como también no se afecten las propiedades de la grasa y esta pueda ser almacenada para utilizarse posteriormente ya que la presencia de agua puede conllevar a que se produzcan fenómenos de hidrólisis y oxidaciones debido a la proliferación de microorganismos.

8.3.2 Identificación de ácidos grasos presentes en el sebo bovino.

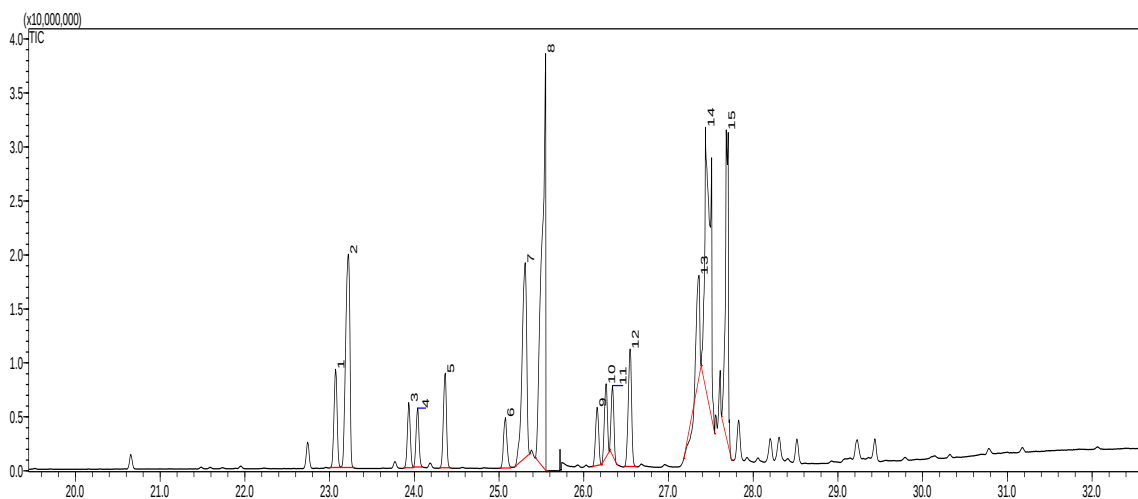


Figura 25. Cromatograma metil ésteres de ácidos grasos (Biodiésel)

Tabla 32. Ésteres metílicos de ácidos grasos presentes en sebo bovino extraído con gasolina

Pico cromatográfico	Ácido graso	Metil éster (%)
1	Miristoleico	3,40
2	Mirístico	11,20
3	16-metil heptadecanoico	2,35
4	12-metil tetradecanoico	2,20
5	Pentadecanoico	3,60
6	14-metil pentadecanoico	1,90
7	palmitoleico	10,00
8	palmítico	20,10
9	araquídico	2,20
10	14-metil hexadecanoico	3,2
11	8- (2-metilciclopropil) octanoico	2,75
12	margárico	5,1
13	elaídico	5,9
14	oléico	15,7
15	Esteárico	10,6

Fuente. El autor

De acuerdo al análisis cromatográfico y el cromatograma resultante del proceso de separación de los compuestos (Figura 25.) se evidenció la presencia de los ésteres metílicos consignados en

la Tabla 32. siendo los compuestos mayoritarios el éster metílico del ácido palmítico y el éster metílico de ácido oleico con un 20,10% y 15,7 % respectivamente, la presencia de este tipo de ácidos grasos es común también son reportados en trabajos como los de Sandhya et al., 2016 y Moraes et al., 2008, aunque con diferencias en los porcentajes indicando que la producción de biodiesel se ha encaminado de excelente manera y es posible su producción mediante materias primas de desecho con alto impacto contaminante hacia el medio ambiente. Estos resultados fundamentan el objetivo principal del proceso investigativo en primera instancia, encaminando así el desarrollo de los procesos de optimización posteriores en donde se emplea grasa de origen bovino extraída con gasolina sin tener ningún tipo de interferente o residuo que pueda provocar efectos negativos en la producción de biodiesel que puedan ser originados en el proceso de extracción con solvente presurizado.

8.4 OBTENCION DE BIODIÉSEL

8.4.1 Optimización del proceso de obtención de biodiésel

En el desarrollo de la optimización del proceso de obtención de biodiesel como se indica en el apartado metodológico descrito anteriormente fue necesario el identificar cada uno de los factores que pueden afectar específicamente la reacción de transesterificación que para este caso puntual es el proceso fundamental en la obtención de los esteres metílicos de los ácidos grasos como ha sido denominado biodiesel. Para tal fin han sido estudiados cuatro factores fundamentales los cuales se han evidenciado en la revisión bibliográfica realizada previamente, estos factores son la cantidad de hidróxido de potasio usada en la reacción como catalizador, la cantidad de metanol empleada como reactivo, la temperatura a la cual se lleva a cabo el reflujo y el tiempo en el cual se lleva a cabo la reacción, estos factores fueron estudiados con el fin de observar cuál de ellos afecta en mayor magnitud la conversión de los ácidos grasos presentes en la grasa extraída del sebo y que según esto nos permita predecir cuál es la combinación de factores idónea para obtener porcentajes de conversión altos que son los que interesan a nivel industrial para la implementación.

Es así como se llevaron a cabo cada una de las reacciones consignadas en el diseño experimental, al momento de incorporar la solución preparado con hidróxido de potasio y metanol la mezcla de reacción intensifica su coloración anaranjada la cual se mantiene durante todo el tiempo delimitado para cada una de las reacciones (Figura 26), el agitador magnético permitió que los componentes se mantengan en permanente contacto, el uso de un baño de aceite propicio que la temperatura a la cual se llevaron a cabo los experimentos se pueda llevar hasta 100° C (Figura 28) y así poder distribuir el calor homogéneamente alrededor del balón de fondo redondo en donde se llevó a cabo la reacción.



Figura 26. Mezcla de reacción transesterificación de ácidos grasos

Tanto el método usado para llevar a cabo las reacciones como la purificaciones fueron muy eficientes para el trabajo experimental, la implementación de un sistema de reflujo de agua propicio un ahorro notable del recurso hídrico el cual se usó como refrigerante eso con ayuda de hielo ubicado dentro de un termo lo que provoco que la temperatura baja se conserve por un periodo de tiempo largo. (Figura 27)



Figura 27. Montaje de reacción para la obtención de biodiésel

Terminado el tiempo de reacción y con el producto obtenido se observó la separación de dos fases bien definidas dentro del embudo de separación en donde fue conducida la mezcla. (Figura 28)



Figura 28. Separación de componentes en la mezcla de reacción

La separación de los componentes de la mezcla se llevó a cabo debido a que los componentes tienen densidades diferentes siendo los ésteres menos densos, ubicándose en la parte superior, por otra parte teniendo polaridades diferentes los ésteres y la glicerina se separan. Fue de gran ayuda a que estos proceso se lleven a cabo de manera eficiente el dejar en reposo la mezcla durante un lapso de tiempo de 12 horas esto fue beneficioso cuando se llevó a cabo la purificación en donde las pérdidas fueron considerablemente bajas y el compuesto de interés (biodiésel) se obtuvo en buenas cantidades. El biodiésel obtenido se caracterizó por ser un líquido a temperatura ambiente, con una coloración amarilla translúcida (Figura 29), al tacto es ligeramente viscoso con un aroma agradable cualidad particular de los ésteres que contrasta en gran manera con el olor desagradable que emanan las grasas de origen bovino, el subproducto de la reacción es glicerol el cual se eliminó junto al agua de los lavados y la base que cumplió con su función como catalizador de la reacción confirmando su presencia por el cambio en el color sobre el papel tornasol al contacto con el agua de los lavados.



Figura 29. Biodiésel

Llevadas a cabo las ejecuciones experimentales y recolectadas las muestras de biodiesel fue estudiado el comportamiento en el proceso de transesterificación de ácidos grasos en ésteres

metílicos según las condiciones a las cuales fueron sometidos los reactivos y la cantidad que de ellos fue usada. La cantidad de ésteres formados se caracterizó mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masa y fue necesaria la aplicación de la norma EN14103 con la cual se cuantificó cada uno de los porcentajes de esteres metílicos presentes en el biodiésel. Para cada una de las ejecuciones del diseño experimental se llevó a cabo el mismo procedimiento en donde se prepararon soluciones de 1 mL como se indica en el apartado 7.5.3 en la metodología, llevada a cabo la inyección de cada una de las muestras se obtuvieron los resultados cromatográficos correspondientes a cada una de las ejecuciones del diseño experimental.

Para cada ejecución se observaron cada uno de los picos cromatográficos corresponde a los compuestos caracterizados en el apartado 8.3.1, los cuales fueron consignados en la Tabla 28, determinadas las áreas tanto para el patrón interno octanoato de metilo como para los ésteres formados en su totalidad se cuantificaron los porcentajes de conversión empleando la ecuación 2.

$$C = \frac{(\sum A) - A_{EI}}{A_{EI}} \times \frac{C_{EI} \times V_{EI}}{m} \times 100\%$$

En donde:

C: Porcentaje de esteres totales

$\sum A$: Sumatoria Área total de los ésteres metílicos

A_{EI} : Área del estándar interno

C_{EI} : Concentración del estándar interno

V_{EI} : Volumen del estándar interno

m: masa de muestra

Ecuación 2. Calculo porcentaje total de ésteres metílicos EN14103

La sumatoria total de ésteres metílicos en la muestra analizada fue cuantificada por el equipo en 310507205, el área del estándar interno para todos los análisis fue de 45723770, la concentración de estándar interno que se usó se preparó a 8,77 mg/mL, el volumen de estándar interno adicionado en cada uno de los viales en donde se preparó la muestra fue de 0,2 mL y 21,81 mg de muestra analizada, con las condiciones el análisis anteriormente mencionadas se cuantifico para la primera ejecución experimental un porcentaje de conversión de esteres metílicos de 54,61 %, el mismo proceso se llevó a cabo para cada una de las ejecuciones en el diseño experimental, en el ANEXO 11 se muestran una tabla con los valores para cada uno de ellos. Los porcentajes encontrados reflejan el desarrollo de la reacción de transesterificación para las condiciones experimentales planteadas, estos se consignan en la tabla 33.

Tabla 33. Diseño experimental completo 2⁴ para optimización en la obtención de biodiésel.

Experimento	Cantidad de KOH (g)	Cant. de Metanol (mL)	Temperatura (° C)	Tiempo (Horas)	Metil esteres (%)
1	0,4	35	100	1,5	54,61
2	0,5	30	70	2	55,46
3	0,4	35	85	2	56,69
4	0,5	35	85	1,5	46,79
5	0,3	35	85	1,5	50,22
6	0,5	40	100	1	59,33
7	0,5	40	70	1	41,72
8	0,3	30	70	1	95,11
9	0,3	40	70	1	79,64
10	0,4	35	85	1	48,31
11	0,4	30	85	1,5	63,27
12	0,5	30	100	1	68,23
13	0,4	35	70	1,5	58,43
14	0,4	40	85	1,5	71,21
15	0,3	40	70	2	63,41
16	0,5	30	100	2	86,45
17	0,3	30	70	2	79,68
18	0,5	40	70	2	50,95
19	0,3	40	100	1	58,98
20	0,5	30	70	1	53,57
21	0,5	40	100	2	99,15
22	0,3	40	100	2	110,91
23	0,3	30	100	1	86,34
24	0,3	30	100	2	86,94
25	0,4	35	85	1,5	53,07
26	0,4	35	85	1,5	53,07
27	0,4	35	85	1,5	53,07
28	0,4	35	85	1,5	53,07
29	0,4	35	85	1,5	53,07

Fuente: El autor

Observando los resultados obtenidos realizando una comparación se observa que tanto para las experimentos 8, 21 y 22 los porcentajes de conversión alcanzan un porcentaje mayor al 90 %, de estos 3 mejores resultados se discriminan dos de ellos los enumerados como 21 y 22 ya que estos alcanzan porcentajes mayores al 99 %, cumpliendo por lo requerido en las normas ASTM D6751 y EN14214 en donde se estipula un mínimo en la cantidad de esteres convertidos de 96,5. La única diferencia notable en el procedimiento de obtención de biodiesel es la cantidad de hidróxido de potasio empleado como catalizador en la ejecución 21 la cantidad usada es mayor que en la experimento 22 siendo esta la observación inicial del comportamiento que tiene la especies químicas que interactúan afirmando que con pequeñas cantidades de hidróxido de

potasio la reacción se lleva a cabo con mejor eficiencia que en presencia de cantidades más grandes sobre estas conclusiones el análisis de varianza (Tabla 34) para el proceso experimental reveló más detalles sobre la reacción de transesterificación.

Para la ejecución 22 el resultado obtenido supera el 100%, en química analítica pueden presentarse estos fenómenos en donde se presentan excesos en la cuantificación la explicación más probable a esto es la transformación de los ácidos grasos libres los cuales en estas condiciones pueden convertirse en ésteres metílicos y así incrementar en magnitud las áreas cromatográficas de los ésteres analizados desembocando en el aumento por encima del 100% en la cuantificación.

Tabla 34. ANOVA diseño experimental 2⁴ + puntos estrella

<i>Fuente</i>	<i>SC</i>	<i>Gl</i>	<i>CM</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Cantidad de KOH	1243,01	1	1243,01	19,70	0,0006
B:Cantidad de Metanol	87,7813	1	87,7813	1,39	0,2579
C:Temperatura	982,279	1	982,279	15,57	0,0015
D:Tiempo	538,029	1	538,029	8,53	0,0112
AA	13,7342	1	13,7342	0,22	0,6480
AB	31,8378	1	31,8378	0,50	0,4892
AC	463,649	1	463,649	7,35	0,0169
AD	145,745	1	145,745	2,31	0,1508
BB	698,045	1	698,045	11,06	0,0050
BC	147,076	1	147,076	2,33	0,1491
BD	394,718	1	394,718	6,25	0,0254
CC	84,3169	1	84,3169	1,34	0,2671
CD	1074,36	1	1074,36	17,03	0,0010
DD	7,3882	1	7,3882	0,12	0,7373
Error total	883,466	14	63,1047		
Total (corr.)	8850,45	28			

SC: Suma de cuadrados, Gl: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio

Fuente: El autor

En la obtención de biodiésel mediante transesterificación en medio básico usando como materia prima grasa extraída empleando gasolina como disolvente de los cuatro factores estimados para su control en el desarrollo de los experimentos, tres presentaron mayor relevancia sobre la conversión de ácidos grasos en ésteres metílicos. Mediante el análisis estadísticos de varianza ANOVA se pudo determinar que la cantidad de hidróxido de potasio (A), la temperatura (C) y el tiempo (D) al tener un Valor-P menor a 0,05 a un nivel de confianza de 95 % son los que se consideran de mayor efecto acompañando a los factores principales también se tiene en cuenta las interacción entre los factores principales siendo en este caso las más relevantes en el proceso de transesterificación la interacción BB entre la cantidad de metanol, CD temperatura – tiempo, AC cantidad de hidróxido de potasio –temperatura, BD Cantidad de metanol - tiempo para estas interacciones se determinaron Valores-P menores a 0,05 a un nivel de confianza de 95 %, la información se puede confirmar mediante el grafico de Pareto (Figura 30)

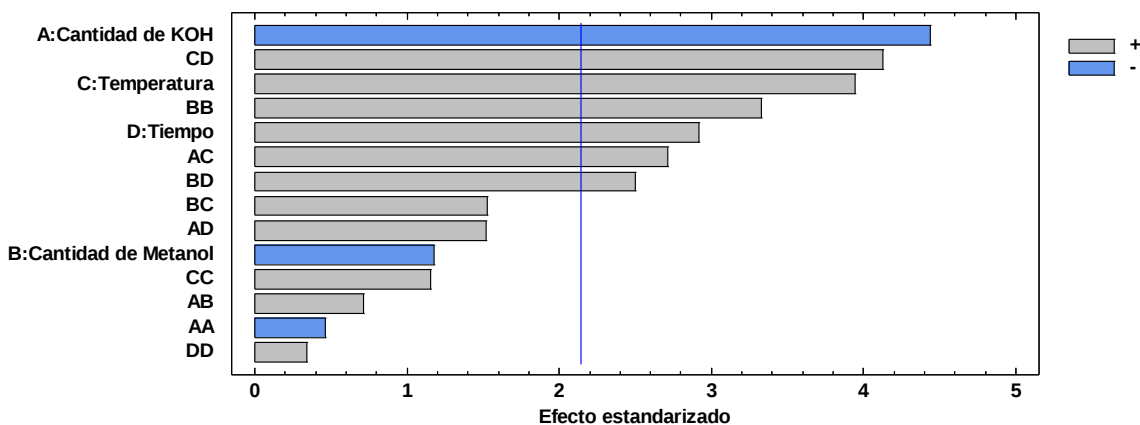


Figura 30. Diagrama de Pareto diseño experimental 2^4 + puntos estrella para la obtención de biodiésel

Los resultados observados tanto en el análisis de varianza como en el diagrama de Pareto tienen validez estadística si cumplen con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia.

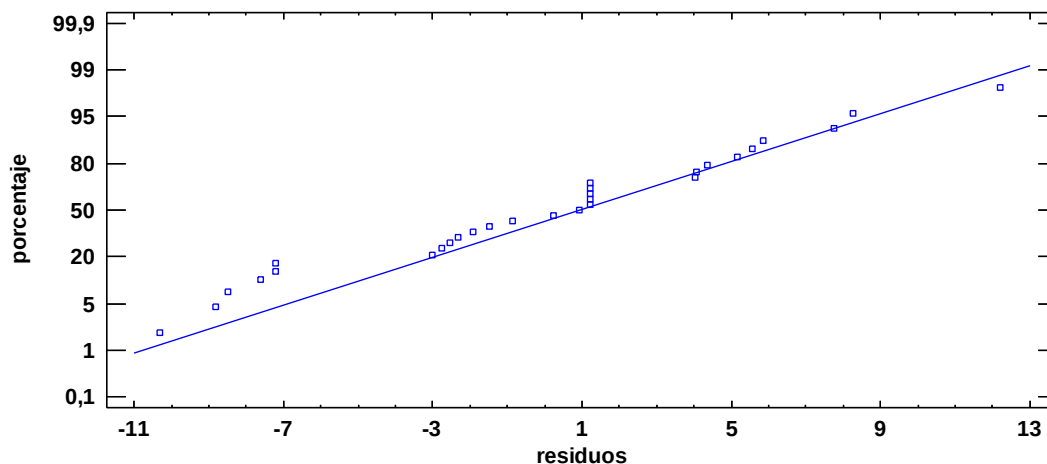


Figura 31. Gráfico de Probabilidad Normal para Residuos

En el gráfico (Figura 31.) de probabilidad para los residuos vs el porcentaje de ésteres metílicos se observa que cada punto correspondiente a cada una de las ejecuciones experimentales en la Tabla 33, se encuentran distribuidos siguiendo el patrón de una línea recta y se ajustan a ella, el comportamiento observado demuestra que el supuesto de normalidad para el diseño experimental aplicado en el estudio de la reacción de transesterificación se cumple satisfactoriamente.

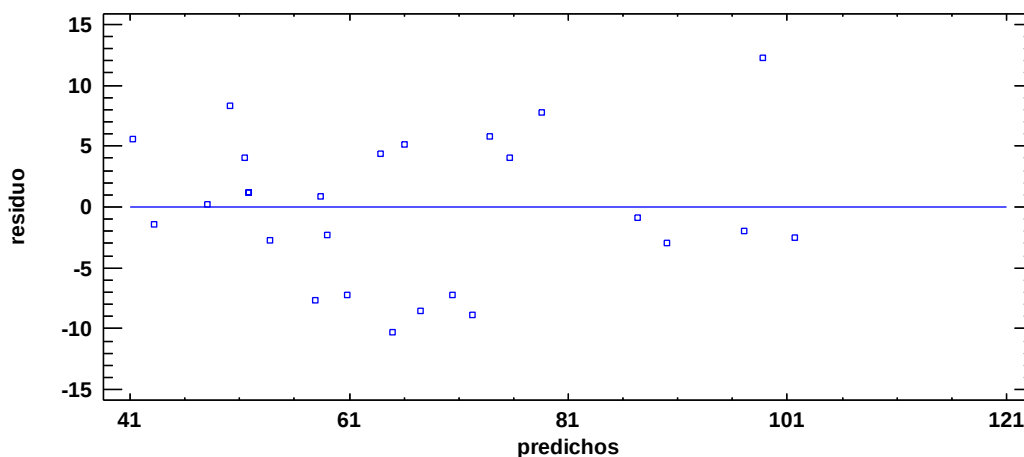


Figura 32. Gráfico de Residuos para Metil ésteres

A partir de la distribución de cada uno de los puntos sobre una línea horizontal en el gráfico (Figura 32.) de residuos para metil ésteres y su ubicación sin seguir ningún patrón de distribución en el espacio por tal razón se puede afirmar que el principio de varianza constante para los tratamientos en el diseño experimental se cumple.

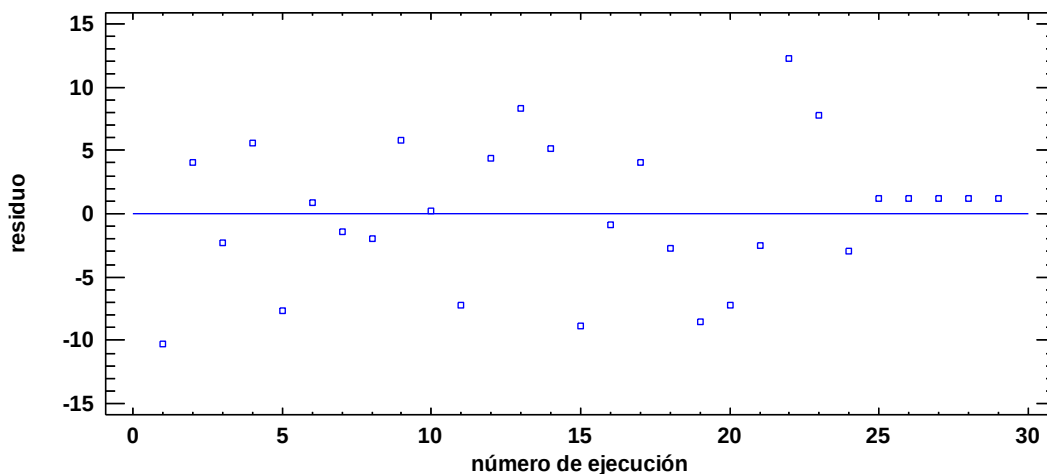


Figura 33. Gráfico de Residuos para Metil ésteres

El comportamiento aleatorio de cada una de las ejecuciones las cuales se distribuyen a lo largo de una línea horizontal en el gráfico (Figura 33.) en donde se relaciona el número de ejecución y los residuos permite identificar que cada uno de los experimentos es independiente de los demás y así el principio de independencia en los tratamientos experimentales se cumple para el diseño experimental completo 2^4 + puntos estrella.

Con los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia verificados gráficamente en donde cada uno de ellos se cumple el diseño experimental tiene validez para

llevar a cabo el análisis estadístico necesario para explicar el comportamiento de la reacción de transesterificación en la obtención de biodiesel, tanto los factores relevantes como las interacciones entre ellos con un estadístico R^2 el 90,01% y un R^2 ajustado de 80,03% siendo este mayor al 70% explican la variación en el porcentaje de metil ésteres formados en las condiciones descritas para cada una de las ejecuciones experimentales llevadas a cabo. En cuanto a los efectos principales que cada uno de los factores experimentales tienen sobre la variable respuesta se puede afirmar que para la cantidad de hidróxido de potasio empleado como catalizador a medida que la cantidad que se adiciona aumenta el porcentaje de ésteres formados va disminuyendo gradualmente lo que indica que la reacción se ve afectada de manera negativa con cantidades grandes de catalizador en el medio este fenómeno se presenta debido a que la reacción de transesterificación puede entrar en competencia con la reacción de saponificación. En cuanto a la cantidad de metanol adicionada como reactivo no presenta variaciones grandes en el porcentaje de ésteres formados entre los dos niveles evaluados en el diseño experimental en donde se observa que el porcentaje de metil ésteres disminuye hasta alcanzar un mínimo en el punto central en donde al seguir aumentando la cantidad el porcentaje sigue aumentando hasta llegar al nivel alto en donde el porcentaje no dista mucho del determinado inicialmente. Para la temperatura se observa un aumento bastante considerable después de un descenso hasta el punto central, entre los dos niveles del diseño experimental si se evidencia una gran diferencia con respecto al porcentaje de ésteres metílicos formados esto favorecido por el aumento en la temperatura. La tendencia en la formación de ésteres metílicos con respecto al tiempo es positiva conforme el tiempo transcurre el porcentaje de producto formado crece en gran medida.

Validado el análisis estadístico, demostrada la relevancia de los factores y la variación que ejerce cada uno de ellos en la variable de respuesta se lleva a cabo un análisis de las superficies de respuesta para las interacciones entre los factores y el comportamiento que el porcentaje de formación de ésteres tiene en cada una de las regiones representada en los gráficos.

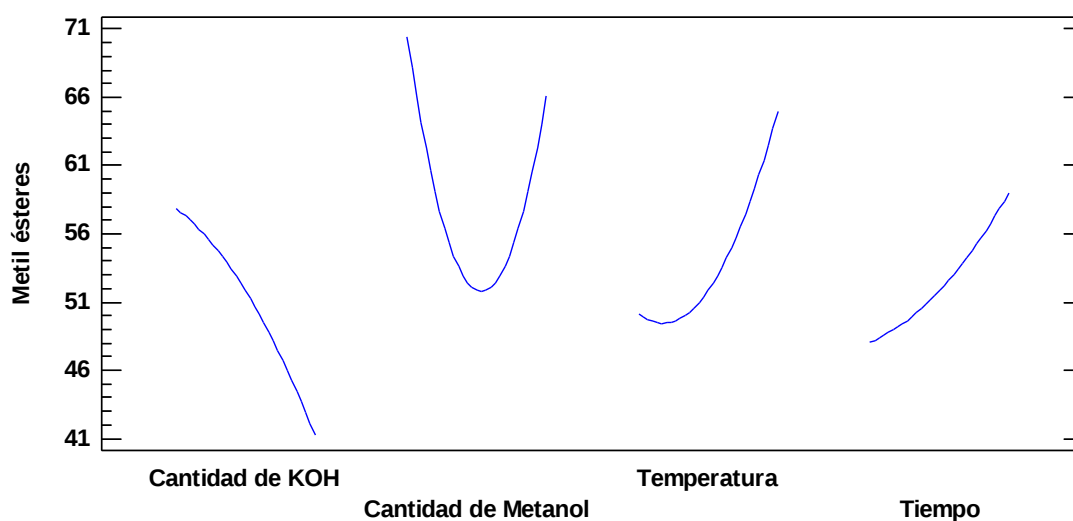


Figura 34. Efectos principales para Metil ésteres

Entre las interacciones más relevantes que se consideran para el estudio de la reacción de transesterificación se encuentra la interacción entre el tiempo de reacción y la temperatura a la cual se lleva a cabo la reacción.

Para la interacción en entre los factores temperatura y tiempo (Figura 35.) se observa que a temperaturas entre los 80 y 90 °C en un tiempo de una hora el porcentaje de ésteres formados se encontrara entre un 40 y un 48% y conforme el tiempo de reacción aumenta paulatinamente el porcentaje ira creciendo hasta llegar a su máximo en un tiempo de 2 horas y una temperatura de 100 °C.

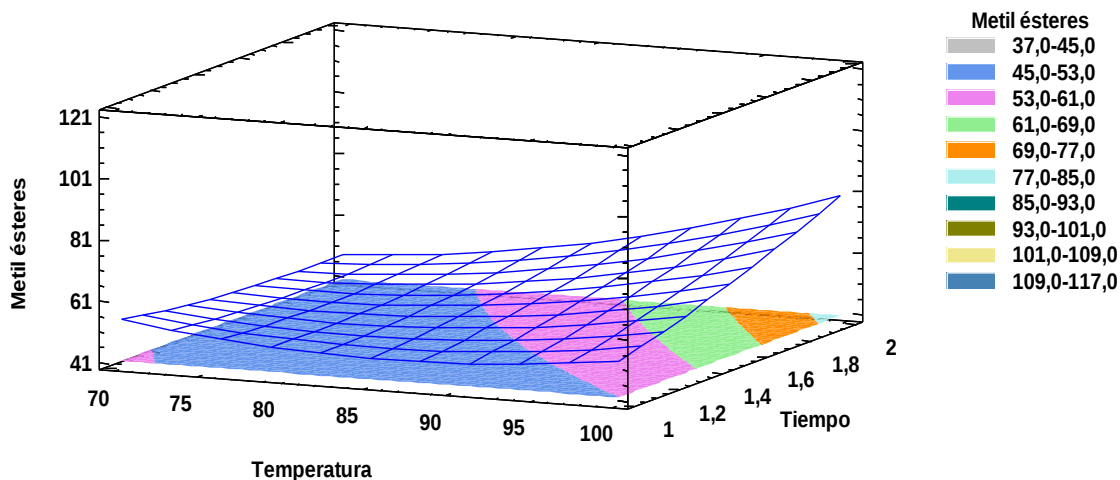


Figura 35. Superficie de Respuesta para la interacción Temperatura – Tiempo

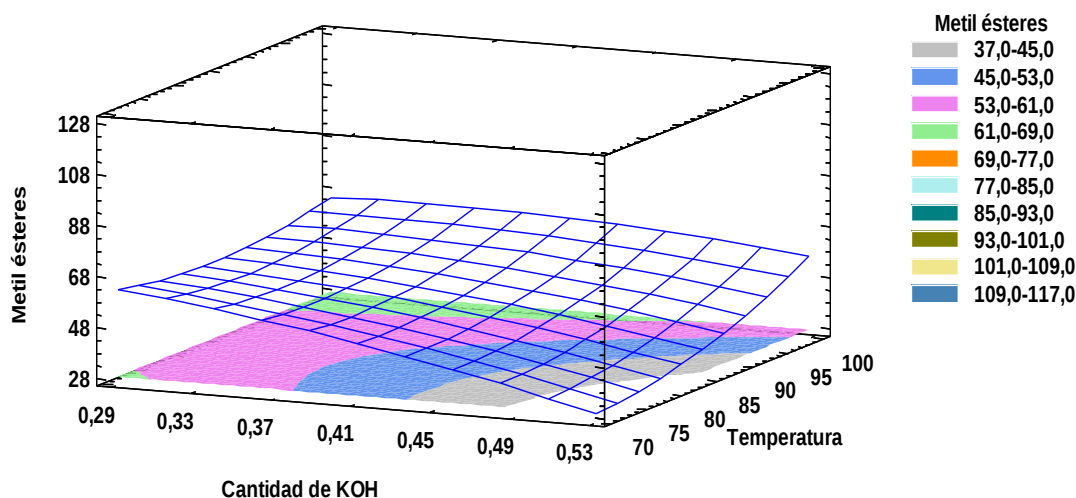


Figura 36. Superficie de Respuesta para la interacción Cantidad KOH - Temperatura

En el estudio de la influencia que tiene tanto la cantidad de hidróxido de potasio agregada a la mezcla de metanol-grasa bovina como la temperatura (Figura 36.) a la cual se lleva a cabo la reacción de transesterificación de los ácidos grasos se observa una tendencia a la formación de

más producto de reacción (ésteres metílicos) a temperaturas superiores a 95° C en la cantidad de hidróxido de potasio agregada no representa una gran influencia. Por otra parte si es de bastante interés el observar que a temperaturas cercanas a 70 °C y cantidades inferiores a 0,30 g de hidróxido de potasio se pueden obtener resultados similares a los observados a una temperatura alta lo que conlleva a que con un bajo gasto energético y con un consumo mínimo de catalizador se puedan obtener las mismas concentraciones de producto,

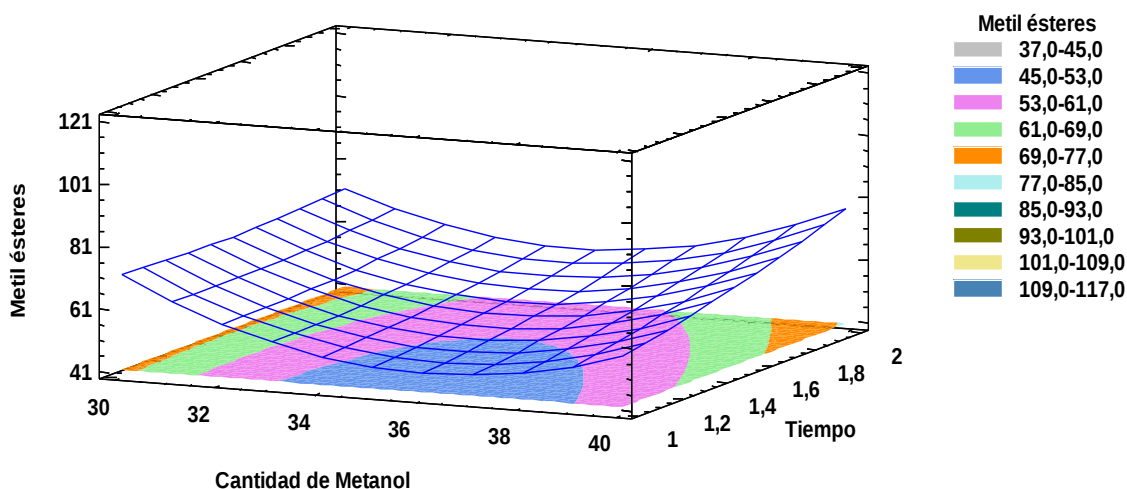


Figura 37. Superficie de Respuesta Cantidad de metanol – Tiempo

En la región en donde el volumen de metanol que se emplea está comprendida entre 34 y 39 mL con tiempos cercanos a una hora se obtendrán los mínimos porcentajes de conversión de ácidos grasos en ésteres metílicos, conforme se aumenta la temperatura el porcentaje de conversión va aumentando llegando a las regiones en donde con un volúmenes cercanos a 30 mL de metanol se obtienen porcentaje de conversión de entre un 69 a 77 %, el mismo fenómeno se observa con volúmenes cercanos a 40 mL de metanol pero a tiempos entre una 1,7 horas a 2 horas. Así se puede afirmar que con un menor gasto en metanol y a tiempos superiores a una hora se van a lograr buenas conversiones de ácidos grasos en esteres sin invertir en el proceso un exceso de energía ya que los tiempos pueden reducirse de la mejor forma en el intervalo de tiempo establecido (Figura 37).

Descrito el comportamiento de los factores más influyentes en la reacción de transesterificación mediante la ejecución de un diseño experimental y validados los resultados por el cumplimiento de los supuestos de normalidad, varianza constata e independencia y determinado un R^2 de 90,03% en donde se afirma que los factores relevantes y sus interacciones explican en un 90,03 % la variabilidad en la respuesta % de ésteres metílicos formados, el diseño experimental permite formular una ecuación la cual se estructura con coeficientes estimados (Ecuación 3.) mediante el cual se puede modificar los diferentes factores buscando la obtención de los mejores resultados en la obtención de biodiesel.

$$\% \text{ Metil ésteres} = 1570,67 - 393,058*A - 53,9914*B - 8,31125*C - 195,9*D - 230,466*A^2 + 2,82125*AB + 3,58875*AC + 60,3625*AC + 0,657214*B^2 + 0,040425*BC + 1,98675*BD + 0,0253793*C^2 + 1,09258*CD + 6,76136*D^2$$

En donde: A Cantidad de KOH, B Cantidad de metanol, C Temperatura y A^2 , AB, AC, AD, B^2 , BC, BD, C^2 , CD, D^2 siendo las interacciones entre los factores

Ecuación 3. Modelo ajustado para el porcentaje de metil ésteres formados

Tabla 35. Condiciones óptimas para la obtención de ésteres metílicos (biodiésel)

<i>Factor</i>	<i>Óptimo</i>
A. Cantidad de KOH (g)	0,43
B. Cantidad de .Metanol (mL)	40,0
C. Temperatura (°C)	100,0
D. Tiempo (Horas)	2,0

Fuente: El autor

Concluida la etapa experimental y analizados los resultados estadísticos para el proceso de obtención de biodiésel implementando en el grupo de investigación estudio de sistemas contaminantes se han identificado las condiciones óptimas (Tabla 35.) para cada uno de los factores experimentales en donde al emplearse una cantidad de 30 g de grasa obtenida a partir del sebo bovino extraído con gasolina en la primera etapa del proceso investigativo y hacerse reaccionar usando como catalizador 0, 43 g de hidróxido de potasio, como reactivo metanol en una cantidad de 40 mL a una temperatura de 100° C en un tiempo de 2 horas se alcanza un máximo de conversión de ácidos grasos en ésteres metílicos (biodiésel) de 100 % cumpliendo así con lo reglamentado por las normas internacionales, esta es la primera observación que se realiza en la síntesis de un biocombustible posteriormente se llevó a cabo la caracterización de las propiedades de la sustancia producida esto con el fin de evaluar la idoneidad para ser usada como combustibles en vehículos de combustión interna que es el objetivo primordial de la investigación.

8.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DEL BIODIÉSEL OBTENIDO

Posteriormente a identificar los valores óptimos para cada uno de los factores fue necesario realizar la caracterización al producto obtenido.

Los parámetros seleccionados para realizar cada una de las determinaciones son de gran importancia en el estudio de los biocombustibles y para este caso en particular el del biodiésel, con ello se busca comparar si las propiedades que tiene el biocombustible sintetizado a partir de desechos sólidos provenientes del curtido del cuero cumplen con los requerimientos de los estándares internacionales y así este se pueda considerar como una opción con gran impacto en el campo energético para convertirse en un sustituto de los combustibles fósiles o como aditivo de estos en los porcentajes requeridos por la legislación en cada país. Para ello se está dando con el planteamiento de este tipo de proyectos energéticos el primer paso en el departamento de

Nariño en donde se considera un aprovechamiento de las fuentes de contaminación como las generadas específicamente en el municipio de Belén debido a la extensiva actividad económica originada por el tratamiento de las pieles con los procesos de curtido de cuero.

Tabla 36. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel

Análisis	Método	Resultado
Humedad por destilación (% v/v)	ASTM D4006	0,05
Densidad (kg/m ³)	ASTM D1298	872,6
Gravedad API 60°F	ASTM D1298	30,5
Viscosidad cinemática a 50°C (mm ² /s)	ASTM D88	2,9
Punto de inflamación (°C)	ASTM D92	164
Poder calorífico superior (KJ/Kg)	ASTM D5865	39981
Índice de yodo (g yodo/100g)	ICONTEC 283	62,56
Índice de acidez (mg KOH/g)	ICONTEC 218	0,075

Fuente: El autor

En Colombia la normatividad para el uso de biodiésel se encuentra enmarcada por la la RESOLUCION NUMERO 90963 del 10 de Octubre de 2014 promulgada por el MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA, en esta resolución se aprecia que por el momento el uso de biodiesel B100 aún no se encuentra reglamentado pero si se dejan conocer los parámetros de calidad que debe tener el biocombustible para ser empleado como componentes de una mezcla, siendo el biodiesel un aditivo al diésel convencional intentado mitigar así un tanto la contaminación por emisiones hacia el medio ambiente ocasionadas por su combustión en motores vehiculares.

Las propiedades físicas determinadas para el biodiesel obtenido son de gran importancia debido a que según el valor que estas tengan como se indica en los parámetros de calidad tanto nacionales como internacionales se obtiene un buen o mal funcionamiento del motor y el tiempo de vida útil de este al ser operado con biocombustibles.

El porcentaje de humedad determinado para el producto deja en evidencia que la cantidad de agua que se ha incorporado en el biodiesel es considerablemente pequeña y se encuentra en el valor máximo permitido por la norma ASTM D9751 (Sundus, Fazal, & Masjuki, 2017), este porcentaje se puede deber a la conservación que se le dio al biodiesel al buen almacenamiento y principalmente al proceso de purificación llevado a cabo después de realizada la reacción de transesterificación en su obtención, a la buena separación debido al tiempo en el que se dejó en reposo la mezcla de reacción, así como también el tratamiento acorde con la cantidad necesaria de sulfato de sodio anhidro y el tiempo de interacción con el biodiesel pueden ser los factores fundamentales para que no haya un alto impacto contaminante provocado por el agua si esta se encuentra presente en grandes cantidades. La presencia de grandes cantidades de agua incorporada en los biocombustibles ejerce un impacto negativo en sus propiedades, para el caso específico del biodiesel según Sundus et al. “*el biodiésel tiene una naturaleza higroscópica*” esto deja en evidencia el carácter que tiene el biodiesel para incorporar agua del medio ambiente por lo que es fundamental practicar una buenas condiciones de almacenamiento, no prevenir esto puede traer serio problemas a los motores debido a que a grandes cantidades de agua la

degradación de las partes metálicas será mayor, el agua es un gran foco de proliferación microbiana esto provoca la degradación de los esteres metílicos haciendo que la combustión de estos no sea tan eficiente y los inyectores en el mecanismo de combustión sean bloqueados por residuos que sufren combustión incompleta generando depósitos de carbono, estas obstrucciones también se presentan en el filtro del combustible ya que es bastante probable el crecimiento de especies como hongos y levaduras desembocando en el colapso del sistema de combustión del motor ocasionando averías (Sundus et al., 2017).

La densidad tanto para la normatividad Colombiana (Ministerio de Minas y Energía, 2014) como la norma internacional EN14214 consideran un rango 860 y 900 Kg/m³, el biodiésel obtenido tiene una densidad de 872,6 Kg/m³ (Tabla 36.) cumpliendo así con este parámetro. Muchos autores consideran que la densidad del biodiésel es la propiedad clave a tener en cuenta debido a que de ella dependen otras propiedades como la viscosidad y punto de inflamación (Patel, Arora, Mehtani, Pruthi, & Pruthi, 2017). La densidad del biodiésel fundamentalmente afecta el proceso de combustión en los motores. Biocombustibles con valores de densidad altos tendrán viscosidades elevadas y su punto de inflamación será mayor esto trae consigo efectos negativos dado que el proceso de inyección del biocombustible no será eficiente y por lo tanto la combustión no se llevara a cabo de manera completa. El factor que afecta en gran medida a la densidad es la cantidad de ácidos grasos libres presentes en el biodiesel esto como consecuencia de una implementación deficiente en la obtención del biocombustibles así como también de la materia prima de carácter graso de la cual se parte para llevar a cabo la síntesis de los ésteres metílicos. Al determinar la densidad del biodiésel obtenido con un valor acorde a lo reglamentado en las normas se afirma que el proceso implementado para la obtención de este se llevó a cabo de manera eficiente esto ya que se parte de una materia prima con características benéficas para llevar a cabo estos procesos, junto a ello también es un buen parámetro para evaluar estos aspectos la determinación de la viscosidad cinemática para la cual se conoce un valor de 2,9 dicho valor se encuentra en el rango reportado por la normatividad colombiana y la norma ASTM D6751 (Patel et al., 2017) en comparación con materias primas convencionales como semillas oleaginosas tienen grandes ventajas debido a que tiene un valor menor a los determinados para esta propiedad, dichos valores se encuentran en un intervalo de entre 4 y 6 mm²/s (Mahmudul et al., 2017) como ya se ha mencionado antes junto con la densidad es fundamental en el proceso de combustión específicamente por la fluidez que puede tener el líquido en los inyectores en la etapa de atomización del biocombustible si la fluidez es alta los inyectores serán incapaces de atomizar el líquido esto va a ocasionar taponamiento de los inyectores y a largo plazo obstrucciones por la acumulación de biocombustible.

El punto de inflamación en el biodiésel es uno de los puntos de referencia para el conocimiento de la estabilidad que tiene el biocombustible cuando este se expone a temperaturas elevadas este parámetro es de gran importancia en los procesos de almacenamiento y transporte ya que según el valor que se determine se consideran las especificaciones para poder disponer de este. Cuando estos biocombustibles tienen valores bajos hay altas probabilidades de que se produzcan mezclas inflamables compuestas por vapor de biocombustible y aire lo que ocasionara fenómenos explosivos (Mahmudul et al., 2017), en la normas se especifica un valor mínimo para el poder calorífico de 120° C (Ministerio de Minas y Energía, 2014) para considerarse seguro en cuanto a la disposición que se le dé, para el producto obtenido se ha determinado un punto de inflamación de 164° C el valor se encuentra acorde a la norma considerándose un biocombustible

que no necesita protocolos de almacenamiento y transporte que ameriten acciones exhaustivas con el fin de evitar inconvenientes esto por su relativa estabilidad (Chen, Guo, Zhao, Xu, & Ma, 2016).

El poder calorífico superior es quizá la propiedad más relevante que se tiene en cuenta en el momento de realizar un análisis a un biocombustible producido, esto ya que mediante su cuantificaciones se puede saber la cantidad de energía que es liberada por unidad de masa cuando es quemado por completo y así evaluar su eficiencia cuanto mayor sea el valor más eficiente es el biocombustible en la producción de energía en los motores vehiculares (Mahmudul et al., 2017; Patel et al., 2017). Con el biodiésel obtenido se logran obtener 39981 KJ por cada Kg, es una producción energética considerable teniendo en cuenta un mínimo de 35000 KJ/Kg por la norma EN14213 (Mahmudul et al., 2017) el valor del parámetro determinado es similar al que se obtiene mediante el uso de materias primas convencionales en la obtención de biodiesel para los cuales se reportan poderes caloríficos comprendidos entre 39640 y 40450 KJ/Kg (Chen et al., 2016) por tal razón el sebo bovino proveniente del curtido del cuero se puede considerar un potencial sustituto de para los cultivos oleaginosos y las demás materias primas convencionales que se emplean en la industria de los biocombustibles en la actualidad.

Finalmente se evalúan dos parámetros que fundamentan los buenos resultados obtenidos para el biodiésel en donde se ha determinado un valor de 0,078 mg KOH/g para su índice de acidez esto explica en gran medida los valores determinados para la viscosidad y la densidad ya que para índices de acidez bajos se estima la presencia en pequeñas cantidades de ácidos grasos libres lo que provoca que la fluidez del líquido sea la conveniente así como la densidad esto trae beneficios como se afirmó anteriormente al sistema de filtros e inyección de los motores en donde se previene la degradación de ellos por depósitos generados por el biocombustible cuando los procesos llevados a cabo dentro del motor no se llevan a cabo eficientemente. Por otra parte es interesante el evaluar el proceso de transesterificación el cual se ha llevado a cabo de buena manera ya que si hay valores menores a 0,5 mg KOH/g es debido a que en el proceso de obtención se llevó a cabo de manera completa (Abdalla, 2017) en la normatividad tanto colombiana (Ministerio de Minas y Energía, 2014) como internacional EN14214 el valor máximo para el índice de acidez es precisamente 0,5 mg KOH/g. El otro parámetro es el índice de yodo el cual se encuentra muy relacionado con la estabilidad del biodiésel y la presencia de ácidos grasos con insaturaciones (Varatharajan & Pushparani, 2018) en su estructura para este parámetro se ha determinado un valor de 62,56 g de yodo/100g el valor máximo para el índice de yodo se ha establecido en 120 g de yodo/100 g comparado con este valor alto el índice de acidez del biodiésel es bajo esto confiere propiedades de estabilidad ya que la ausencia en gran medida de ácidos grasos insaturados no provocaran reacciones secundarias de auto oxidación, en presencia de ácidos grasos como oleico linoleico y linolénico los procesos de oxidación que se llevan a cabo pueden provocar la producción de especies químicas como los hidroperóxidos que a su vez producen cetonas, aldehídos ácidos carboxílicos e hidrocarburos (Knothe & Razon, 2017) de los ácidos anteriormente mencionados el único que hace parte del sebo bovino es el ácido oleico. Por otra parte se puede afirmar que la baja presencia de dobles enlaces en la estructura de los ésteres metílicos provoca que el calor específico sea alto debido a que el poder calorífico para un éster alquílico es considerablemente mayor que para un éster alquílico que tenga en su estructura carbonada dobles enlaces (Hong, Jeon, & Lee, 2014).

Realizando la evaluación a las principales propiedades fisicoquímicas que se debe tener en cuenta para evaluar la idoneidad el biodiésel obtenido se afirma que es un biocombustible con un alto potencial para ser un sustituto del biodiesel que se obtiene mediante materias primas convencionales en el territorio colombiano, esto contribuiría en gran medida a la disminución de la contaminación hacia el medio ambiente usando como materia prima las grasa provenientes del proceso de curtido de pieles las cuales son sustancias que causan un gran impacto al medio ambiente cuando no se les da un manejo adecuado, obteniendo así grandes beneficios en el campo energético que pueden traer gran desarrollo al país el cual necesita de políticas mediante las cuales se promueva el aprovechamiento de los residuos del sector agroindustrial en otros sectores de la economía propiciando así la auto sustentabilidad de los procesos, con el uso de energía renovables y amigables con el medio ambiente.

9. CONCLUSIONES

- La recuperación de sebo bovino (grasa) a partir de los residuos sólidos provenientes de la etapa de descarnado en el curtido del cuero produjo muy buenos resultados cuando fue usada gasolina comercial como solventes de extracción alcanzándose porcentajes de 51% y siendo este muy superior a lo determinado para otros solventes como el hexano, éter etílico, isopropanol y cloroformo, también es de gran relevancia el hecho de que la técnica implementada supera en gran medida los porcentajes de recuperación logrados por otras técnicas convencionales como los son el quipo soxhlet en donde se alcanzan máximos de recuperación de grasa de un 11,5%.
- En comparación con métodos de extracción convencionales usados en la recuperación de grasas el método de extracción con solvente presurizado disminuye el tiempo de extracción de 16 a 3 horas, los volúmenes empleados bajan en un 50% pasando de 600 mL a 350 mL y la energía necesaria para llevar a cabo los procesos, por otra parte el diseño implementado permite procesar cantidades de residuos sólidos de descarnado de un máximo de 400g así como también permite la recuperación de aproximadamente un 70 % del solvente usado para realizar la extracción.
- Para el proceso de extracción de grasa con solvente presurizado se han determinado tres factores influyentes tipo de disolvente, el tiempo de extracción y la cantidad de disolvente sobre la variable de respuesta porcentaje (%) de recuperación de grasa esto se logró mediante la optimización del proceso con base en un diseño experimental mediante el cual se formuló un modelo matemático determinándose así los valores óptimos para los factores experimentales en donde el tipo de disolvente seleccionado fue la gasolina comercial, el tiempo de extracción de 3,5 horas y el volumen de solvente de 350mL alcanzándose un porcentaje máximo de recuperación de grasa de 54,80%.
- La caracterización fisicoquímica de la grasa extraída describe la calidad que esta tiene para su uso como materia prima en la obtención de biodiésel al determinarse propiedades físicas como la densidad, viscosidad y punto de fusión acordes a lo reportado en la literatura y propiedades químicas como los índices de acidez saponificación, peróxidos y yodo cuyos valores fueron de 1,64 mg KOH/g, 188 mg KOH/g, 5,47 meq de O₂ y 68,24 g de yodo/100 g respectivamente mediante los cuales se conoce que el producto no ha sufrido un alto grado de degradación así como también el almacenamiento y la disposición adecuada que se le brindó en el proceso de extracción ha evitado que se lleven a cabo proceso de oxidación y de hidrólisis de los ácidos grasos los cuales pueden traer inconvenientes serios en la producción de biodiesel. Con características tan beneficiosas se llevó a cabo un proceso de transesterificación básica para el cual se optimizaron las condiciones experimentales según los factores (Cantidad de hidróxido de potasio, cantidad de metanol, tiempo y temperatura) estudiados en donde para lograr el

máximo porcentaje en esteres metílicos se hicieron reaccionar 30 g de grasa con un volumen de metanol de 40 mL todo esto en presencia de 0,43 g de hidróxido de potasio como catalizador a una temperatura de 100° C y en un tiempo de 2 horas alcanzándose un porcentaje de esteres metílicos de 100 %.

- Las propiedades fisicoquímicas que caracterizan el biodiesel obtenido mediante la implementación de la interacción entre sebo bovino y metanol en presencia de hidróxido de potasio, se encuentran en los valores permitidos por RESOLUCION NUMERO 182087 del 17 de Diciembre de 2007 en la legislación colombiana y las normas internacionales ASTM D6751, EN14212 y EN14213, dichos valores constituyen el fundamento del estudio investigativo ya que el biodiesel obtenido pueden cumplir su tarea como biocombustible y promover el correcto funcionamiento de los motores vehiculares de combustión interna.

10. RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el proceso investigativo es necesario profundizar en algunos aspectos para lo cual se propone:

- Construir un sistema para llevar cabo extracciones con solvente presurizado el cual permita el tratamiento de residuos sólidos de descarnado a escala piloto evaluando el comportamiento de los factores experimentales.
- Evaluar los factores experimentales en la reacción de transesterificación para un modelo a escala piloto.
- Llevar a cabo un estudio de las funciones mecánicas del biodiésel obtenido al ser aplicado en motores vehiculares de combustión interna

11. BLIOGRAFIA

- Abdalla, I. E. (2017). Experimental studies for the thermo-physiochemical properties of Biodiesel and its blends and the performance of such fuels in a Compression Ignition Engine. *Fuel*, (x), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.10.064>
- Adewale, P., Dumont, M. J., & Ngadi, M. (2015). Recent trends of biodiesel production from animal fat wastes and associated production techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 574–588. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.039>
- Alptekin, E., Canakci, M., & Sanli, H. (2012). Evaluation of leather industry wastes as a feedstock for biodiesel production. *Fuel*, 95, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.08.055>
- Antonio Bizzo, W., Lenço, P. C., Carvalho, D. J., & Veiga, J. P. S. (2014). The generation of residual biomass during the production of bio-ethanol from sugarcane, its characterization and its use in energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 589–603. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.056>
- Araújo, B. Q., Nunes, R. C. da R., de Moura, C. V. R., de Moura, E. M., Citó, A. M. das G. L., & dos Santos Júnior, J. R. (2010). Synthesis and Characterization of Beef Tallow Biodiesel. *Energy & Fuels*, 24(8), 4476–4480. <https://doi.org/10.1021/ef1004013>
- Atadashi, I. M., Aroua, M. K., Abdul Aziz, A. R., & Sulaiman, N. M. N. (2012). Production of biodiesel using high free fatty acid feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3275–3285. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.063>
- Balat, M. (2011). Potential alternatives to edible oils for biodiesel production - A review of current work. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1479–1492. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.011>
- Banković-Ilić, I. B., Stojković, I. J., Stamenković, O. S., Veljkovic, V. B., & Hung, Y. T. (2014). Waste animal fats as feedstocks for biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 238–254. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.038>
- Bergmann, J. C., Tupinambá, D. D., Costa, O. Y. A., Almeida, J. R. M., Barreto, C. C., & Quirino, B. F. (2013). Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 411–420. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.058>

- Bhatti, H. N., Hanif, M. A., Qasim, M., & Ata-ur-Rehman. (2008). Biodiesel production from waste tallow. *Fuel*, 87(13–14), 2961–2966. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.04.016>
- Bhuiya, M. M. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Ashwath, N., & Azad, A. K. (2016). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel - Part: 1 Selection of feedstocks, oil extraction techniques and conversion technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1109–1128. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.163>
- Bora, P., Boro, J., Konwar, L. J., & Deka, D. (2016). Formulation of microemulsion based hybrid biofuel from waste cooking oil – A comparative study with biodiesel. *Journal of the Energy Institute*, 89(4), 560–568. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.07.001>
- Brown, A. (2011). Fats and Oils. *Understanding Food: Principles & Preparation*, 2, 453–477. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-375083-9.00097-0>
- Budžaki, S., Miljić, G., Tišma, M., Sundaram, S., & Hessel, V. (2017). Is there a future for enzymatic biodiesel industrial production in microreactors? *Applied Energy*, 201, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.062>
- Carbajal, Á. (2013). 6. Grasas y lípidos. *Manual de Nutrición y Dietética*, 1–8. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Castro, P., Coello, J., & Castillo, L. (2007). *Opciones para la producción y uso del Biodiesel en el peru.*
- Cerrillo, J. J. (2009). SINTESIS Y CARACTERIZACION DE CARBOXILATOS METALICOS. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6843/Memòria.pdf>
- Chen, H., Guo, Q., Zhao, X. yi, Xu, M. long, & Ma, Y. (2016). Influence of fuel temperature on combustion and emission of biodiesel. *Journal of the Energy Institute*, 89(2), 231–239. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2015.01.024>
- da Silva, V. T., & Sousa, L. A. (2013). *Catalytic Upgrading of Fats and Vegetable Oils for the Production of Fuels. The Role of Catalysis for the Sustainable Production of Bio-Fuels and Bio-Chemicals* (Vol. #volume#). © 2013 Elsevier B.V. All rights reserved. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56330-9.00003-6>
- Duarte, A. T., Dessuy, M. B., Vale, M. G. R., Welz, B., & De Andrade, J. B. (2013). Sequential determination of Cd and Cr in biomass samples and their ashes using high-resolution continuum source graphite furnace atomic absorption spectrometry and direct solid sample

- analysis. *Talanta*. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.04.036>
- El-Araby, R., Amin, A., El Morsi, A. K., El-Ibiari, N. N., & El-Diwani, G. I. (2018). Study on the characteristics of palm oil–biodiesel–diesel fuel blend. *Egyptian Journal of Petroleum*. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2017.03.002>
- Encinar, J. M., Sánchez, N., Martínez, G., & García, L. (2011). Study of biodiesel production from animal fats with high free fatty acid content. *Bioresource Technology*, 102(23), 10907–10914. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.09.068>
- Fangrui, M., & Milford, H. (1999). Biodiesel production: A review. *Bioresource Technology*, 70(1), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00025-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00025-5)
- Fernandez, J. (2004). La energía de la biomasa. *Energías Renovables*, 135.
- Ganduglia, F., León, J., Gasparini, R., Rodríguez, M., Huarte, G., & Estrada, J. (2009). *Manual de biocombustibles*. [https://doi.org/ISBN13: 978-92-9248-121-6](https://doi.org/ISBN13:978-92-9248-121-6)
- García, H., Laura, R., & Etter, C. (2012). Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia. Retrieved from http://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/338/Repor_Octubre_2012_Garcia_y_Calderon.pdf?sequence=3
- Herrera Jaime, B., Leyva Rolon, S., Ortiz Ceron, V., Cardenas Valderrama, J. F., & Garzon Lozano, E. (2009). Biocombustibles en Colombia. *Report*, 22. Retrieved from http://www.upme.gov.co/docs/biocombustibles_colombia.pdf
- Hoekman, S. K., Broch, A., Robbins, C., Cenicerros, E., & Natarajan, M. (2012). Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 143–169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.143>
- Hong, I. K., Jeon, G. S., & Lee, S. B. (2014). Prediction of biodiesel fuel properties from fatty acid alkyl ester. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(4), 2348–2353. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.10.011>
- Hymavathi, D, P. G. & S. B. B. (2014). Biodiesel Production From Vegetable Oils: an Optimization Process. *International Journal of Chemical & Petrochemical Technology (IJCPT)*, 4(2), 19–28. Retrieved from www.tjprc.org/view-archives.php
- IICA. (2010). *Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiésel. Programa hemisférico en agroenergía y biocombustibles. Iica*.
- Infinita Renovables. (2015). Informe Biodiesel.

- IRENA. (2016). Innovation Outlook Advanced Liquid Biofuels, 132. Retrieved from http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Innovation_Outlook_Advanced_Liquid_Biofuels_2016.pdf
- Işler, A., Sundu, S., Tüter, M., & Karaosmanoğlu, F. (2010). Transesterification reaction of the fat originated from solid waste of the leather industry. *Waste Management*, 30(12), 2631–2635. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.06.005>
- Issariyakul, T., & Dalai, A. K. (2014). Biodiesel from vegetable oils. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 31, 446–471. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.001>
- Jain, S., Sharma, M. P., & Rajvanshi, S. (2011). Acid base catalyzed transesterification kinetics of waste cooking oil. *Fuel Processing Technology*, 92(1), 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.08.017>
- K.R. Smith. (2006). El uso doméstico de leña en los países en desarrollo y sus repercusiones en la salud. *Unasylva*, 57(224), 41–44. <https://doi.org/41-44>
- Knothe, G.; Krahl, J.; Van Gerpen, J. (2005). *The Biodiesel Handbook*. AOCS Press (Vol. 1). <https://doi.org/10.1201/9781439822357>
- Knothe, G., & Razon, L. F. (2017). Biodiesel fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 58, 36–59. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.08.001>
- Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J., & de Mora, E. F. (2009). Correlation for the estimation of the cetane number of biodiesel fuels and implications on the iodine number. *Energy Policy*, 37(11), 4337–4344. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.05.049>
- López-Bellido, L., Wery, J., & López-Bellido, R. J. (2014). Energy crops: Prospects in the context of sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 60, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.07.001>
- Lozada, J, Delgado, O, Diaz, W, A. D. (2006). *Caracterización De Grasas Y Aceites en el agua potable del municipio de Pasto*. Universidad de Nariño.
- Lozada, J. J. (2014). Investigación y desarrollo tecnológico para disminuir la contaminación generada por la producción del cuero en el Departamento de Nariño hasta los niveles permitidos por la normatividad ambiental colombiana. Universidad de Nariño, Pasto, Colombia.
- Mahmudul, H. M., Hagos, F. Y., Mamat, R., Adam, A. A., Ishak, W. F. W., & Alenezi, R. (2017). Production, characterization and performance of biodiesel as an alternative fuel in

- diesel engines – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72(April 2016), 497–509. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.001>
- Mata, T. M., Cardoso, N., Ornelas, M., Neves, S., & Caetano, N. S. (2011). Evaluation of two purification methods of biodiesel from beef tallow, pork lard, and chicken fat. *Energy and Fuels*, 25(10), 4756–4762. <https://doi.org/10.1021/ef2010207>
- Meher, L., Vidyasagar, D., & Naik, S. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 10(3), 248–268. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.09.002>
- Mendonça, D. R., Andrade, H. M. C., Guimarães, P. R. B., Vianna, R. F., Meneghetti, S. M. P., Pontes, L. A. M., & Teixeira, L. S. G. (2011). Application of full factorial design and Doehlert matrix for the optimisation of beef tallow methanolysis via homogeneous catalysis. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 342–348. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.09.026>
- Ministerio de Minas y Energía. (2014). Resolucion 90963. Por la cual se modifica el artículo 4 de la Resolución 898 de 1995, modificado por la Resolución 182087 de 2007, en relación con los criterios de calidad de los biocombustibles para su uso en motores diésel como componente de mezcla con . Retrieved from <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivosSoporteRevistas/11820.pdf>
- Moraes, M. S. A., Krause, L. C., da Cunha, M. E., Faccini, C. S., de Menezes, E. W., Veses, R. C., ... Caramão, E. B. (2008). Tallow Biodiesel: Properties Evaluation and Consumption Tests in a Diesel Engine. *Energy & Fuels*, 22(3), 1949–1954. <https://doi.org/10.1021/ef7006535>
- Moura, K. R. M. (2008). Optimização do processo de produção de biodiesel metílico do sebo bovino aplicando um delineamento composto central rotacional (DCCR) e a avaliação da estabilidade térmica, 126.
- Nelson, R. G., & Schrock, M. D. (2006). Energetic and economic feasibility associated with the production, processing, and conversion of beef tallow to a substitute diesel fuel. *Biomass and Bioenergy*, 30(6), 584–591. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.09.005>
- Pabón, L. C., & Hernández-rodríguez, P. (2012). Importancia química de *Jatropha curcas* y sus aplicaciones biológicas , farmacológicas e industriales Chemical importance of *Jatropha curcas* and its biological , pharmacological and industrial applications, 17(2), 194–209.

- Patel, A., Arora, N., Mehtani, J., Pruthi, V., & Pruthi, P. A. (2017). Assessment of fuel properties on the basis of fatty acid profiles of oleaginous yeast for potential biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77(April), 604–616.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.016>
- Rahman, M. M., B. Mostafiz, S., Paatero, J. V., & Lahdelma, R. (2014). Extension of energy crops on surplus agricultural lands: A potentially viable option in developing countries while fossil fuel reserves are diminishing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 108–119. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.092>
- Rivera, I., Villanueva, G., & Sandoval, G. (2009). Producción de biodiesel a partir de residuos grasos animales por vía enzimática. *Grasas y Aceites*, 60(5), 470–476.
<https://doi.org/10.3989/gya.021409>
- Romero Salvador, A. (2010). APROVECHAMIENTO DE LA BIOMASA COMO FUENTE DE ENERGÍA ALTERNATIVA A LOS COMBUSTIBLES FÓSILES. *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, 104(2), 331–345. Retrieved from <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>
- Rosendahl, L. (2013). *Biomass combustion, technology and engineering*.
- Salinas Callejas, E., & Gasca Quezada, V. (2009). Los biocombustibles. *El Cotidiano*, (157), 75–82. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>
- Sandhya, K. V., Abinandan, S., Vedaraman, N., & Velappan, K. C. (2016). Extraction of fleshing oil from waste limed fleshings and biodiesel production. *Waste Management*, 48, 638–643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.033>
- Šánek, L., Pecha, J., Kolomazník, K., & Bařinová, M. (2015). Biodiesel production from tannery fleshings: Feedstock pretreatment and process modeling. *Fuel*, 148(148), 16–24.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.01.084>
- Su, Y., Zhang, P., & Su, Y. (2015). An overview of biofuels policies and industrialization in the major biofuel producing countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50(50), 991–1003. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.032>
- Sundus, F., Fazal, M. A., & Masjuki, H. H. (2017). Tribology with biodiesel: A study on enhancing biodiesel stability and its fuel properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70(November 2016), 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.217>
- US-EPA. (2007). 5: Biomass Conversion Technologies. *Biomass Combined Heat and Power Catalog of Technologies*, 30–61. <https://doi.org/10.1126/science.214.4523.864>

- Varatharajan, K., & Pushparani, D. S. (2018). Screening of antioxidant additives for biodiesel fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(August 2016), 2017–2028. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.020>
- Verma, P., & Sharma, M. P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 1063–1071. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054>
- Vidales-Olivo, M. P. A., Leos-Magallanes, M. Y., & Campos-Sandoval, M. G. (2010). Extracción de grasas y aceites en los efluentes de una Industria Automotriz. *Ciencia y Tecnología*, 40(40), 29–34.
- Vivas Castaño, A. M. (2010). Estudio y obtención de biodiesel a partir de residuos grasos de origen bovino.
- Yang, L., Takase, M., Zhang, M., Zhao, T., & Wu, X. (2014). Potential non-edible oil feedstock for biodiesel production in Africa: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 461–477. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.06.002>

12. ANEXOS

ANEXO 1. Cálculos recuperación de grasa diseño experimental completo 2⁴

Para realizar los cálculos del porcentaje de grasa recuperada para en el ANEXO 1. Como para el ANEXO 2. Fue empleada la siguiente ecuación

$$\%RG = \frac{GE}{RD} \times 100$$

Dónde: %RG: Recuperación de grasa (%)

GE: Grasa extraída (g)

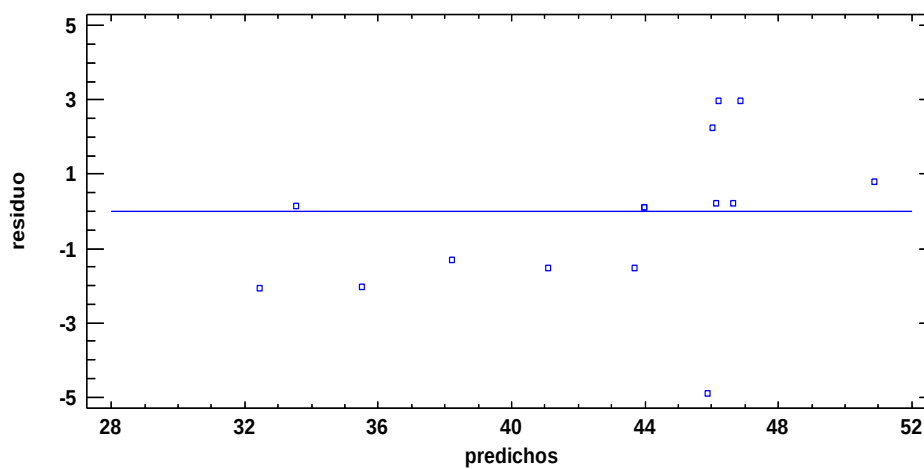
RD: Residuos de descarnado

<i>Experimento</i>	<i>Grasa extraída (g)</i>	<i>Resíduos de descarnado (Sebo) (g)</i>	<i>Recuperación de grasa (%)</i>
1	144,00	300	48,00
2	127,00	300	42,33
3	115,18	300	38,39
4	51,50	100	51,50
5	50,18	100	50,18
6	145,9	300	48,63
7	44,50	100	44,50
8	38,00	100	38,00
9	37,50	100	37,50
10	147,30	300	49,10
11	48,20	100	48,20
12	44,25	100	44,25
13	47,58	100	47,58
14	149,32	300	49,77
15	149,83	300	49,94
16	124,50	300	41,50

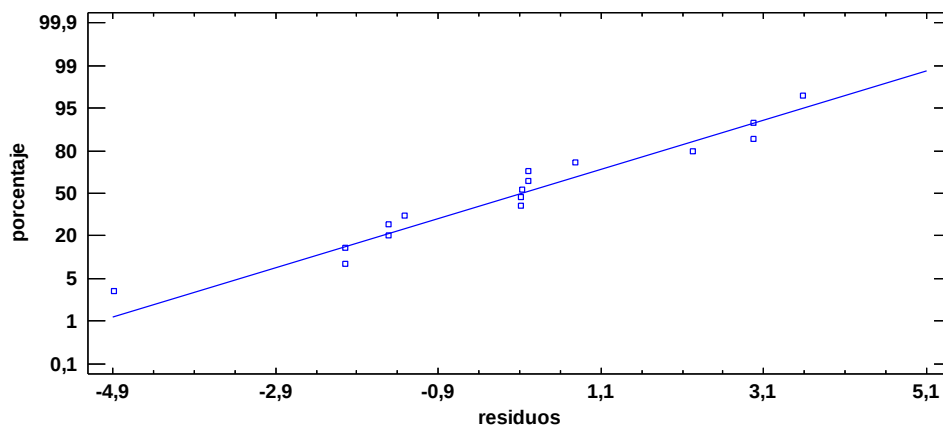
ANEXO 2. Cálculos recuperación de grasa diseño experimental 2^2 + puntos estrella

<i>Ejecución</i>	<i>cantidad de residuos de descarnado (g)</i>	<i>Grasa extraída (g)</i>	<i>Recuperación de grasa (%)</i>
1	100	36,91	36,91
2	100	51,65	51,65
3	100	28,34	28,34
4	100	46,35	46,35
5	100	33,67	33,67
6	100	49,81	49,81
7	100	48,24	48,24
8	100	30,39	30,39
9	100	39,57	39,57
10	100	49,17	49,17
11	100	46,86	46,86
12	100	44,08	44,08
13	100	33,45	33,45
14	100	44,08	44,08
15	100	40,98	40,98
16	100	42,17	42,17

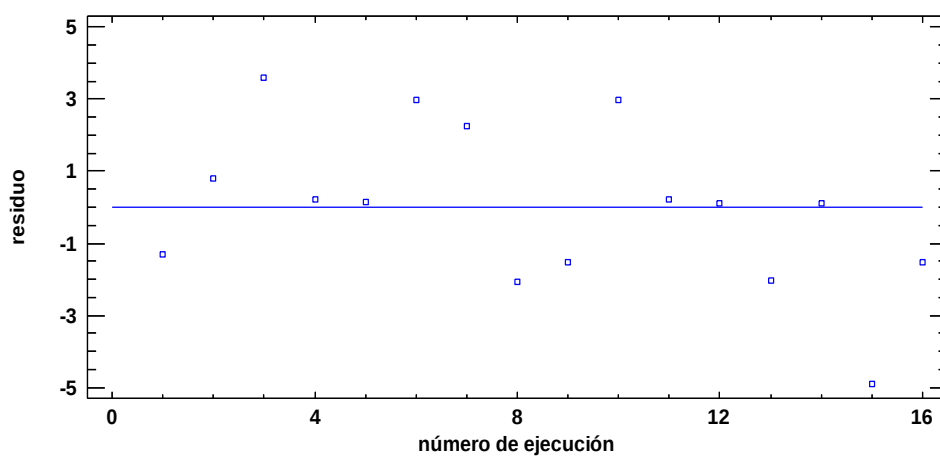
ANEXO 3. Gráfico de residuos vs predichos para recuperación de grasa



ANEXO 4. Gráfica de Probabilidad Normal para predichos



ANEXO 5. Gráfico de Residuos vs número de ejecución para recuperación de grasa



ANEXO 6. Cálculos para la determinación del índice de acidez y la acidez

Para el cálculo de la acidez como el índice de acidez fueron empleadas las siguientes ecuaciones según la norma ICONTEC NTC218.

$$I.A = \frac{56,1 \times V \times C}{m}$$

Dónde: I.A: Índice de acidez en mg KOH/g

V: Volumen en mililitros de la solución de hidróxido de potasio usada

C: Concentración en molaridad de la solución de hidróxido de potasio.

m: Masa de la porción de ensayo en gramos

$$A = \frac{Vx Cx M}{10xm}$$

Dónde: A: Acidez en % ácido oleico

V: Volumen en mililitros de la solución de hidróxido de potasio usada

C: Concentración en molaridad de la solución de hidróxido de potasio.

m: Masa de la porción de ensayo de la muestra en gramos

M: Masa molar del ácido oleico 282 g/mol

volumen de KOH (mL)	Concentración KOH (M)	Masa porción de ensayo (g)	Índice de acidez (mgKOH/g)	Acidez (% ácido Oleico)
18,7	0,011	7,01	1,646	0,827
18,5	0,011	7,01	1,629	0,819
18,7	0,011	7,01	1,646	0,827
Promedio			1,640	0,825

ANEXO 7. Cálculos para la determinación del índice de yodo

Los cálculos para la determinación se realizan de acuerdo a la ecuación reportada en la norma ICONTEC NTC283.

$$I. Y = \frac{12,69xCx(V_1 - V_2)}{m}$$

Dónde: I.Y: Índice de yodo

V₁: Volumen en mililitros de la solución tiosulfato de sodio usada en el blanco

V₂: Volumen en mililitros de la solución tiosulfato de sodio usada en la muestra

C: Concentración molar del tiosulfato de sodio.

m: Masa de la porción de ensayo de la muestra en gramos

volumen tiosulfato de sodio (mL)	Masa porción de ensayo (g)	Volumen tiosulfato de sodio Blanco (mL)	Concentración tiosulfato de sodio (M)	índice de yodo (g de Yodo/100g)
8,3	1	39,8	0,17	67,955
8,1	1	39,8	0,17	68,386
8,1	1	39,8	0,17	68,386
Promedio				68,243

ANEXO 8. Cálculos para la determinación de índice de peróxidos

La determinación del índice de peróxidos para el sebo extraído se realizó mediante la aplicación de la ecuación reportada por la norma ICONTEC NTC236.

$$I.P = \frac{(V_1 - V_0) \times C \times F \times 1000}{m}$$

Dónde: I.P: Índice de peróxidos

V_1 : Volumen en mililitros de la solución tiosulfato de sodio usada en la muestra

V_0 : Volumen en mililitros de la solución tiosulfato de sodio usada en el blanco

C: Concentración molar del tiosulfato de sodio.

F: factor de solución de tiosulfato de sodio 1,008

m: Masa de la porción de ensayo de la muestra en gramos

Volumen tiosulfato de sodio (mL)	Masa porción de ensayo (g)	Concentración tiosulfato de sodio (M)	índice de peróxidos meq de O_2/Kg
2,9	5	0,0098	5,730
2,8	5	0,0098	5,532
2,6	5	0,0098	5,137
Promedio			5,467

ANEXO 9. Cálculos para la determinación del índice de saponificación

El cálculo del índice de saponificación se llevó a cabo aplicando la ecuación referenciada en la norma ICONTEC NTC335.

$$I_s = \frac{(V_0 - V_1) \times C \times 56,1}{m}$$

Dónde: I_s : Índice de saponificación

V_1 : Volumen en mililitros de la solución ácido clorhídrico usado en la muestra

V_0 : Volumen en mililitros de la solución ácido clorhídrico usado en el blanco

C: Concentración molar de la solución de ácido clorhídrico

m: Masa de la porción de ensayo de la muestra en gramos

volumen solución HCl (mL)	Volumen HCL Blanco (mL)	Concentración HCl (M)	Masa porción de ensayo (g)	Índice de saponificación (mg de KOH/g)
4,5	24,8	0,5	3,002	189,68
4,8	24,8	0,5	3,002	186,88
4,6	24,8	0,5	3,002	188,74
promedio				\$188,43

ANEXO 10. Cálculo determinación de humedad

La humedad se cálculo aplicando la ecuación matemática como se reporta en la norma técnica ICONTEC NTC287.

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \times 100$$

Dónde: W: Humedad

m_0 : masa en gramos de la capsula de porcelana vacía

m_1 : masa en gramos de la porción de ensayo más la capsula de porcelana

m_2 : masa en gramos de la capsula de porcelana y el residuo después del calentamiento

<i>peso muestra + capsula</i> <i>(g) (M₁)</i>	<i>Peso capsula</i> <i>(g) (M₀)</i>	<i>peso capsula + residuo</i> <i>(g) (M₂)</i>	<i>Humedad</i> <i>%</i>
28,543	23,528	28,465	1,56
28,593	23,528	28,516	1,52
Promedio			1,54

ANEXO 11. Cálculo porcentaje de ésteres metílicos

<i>Experimento</i>	<i>Área del patrón interno</i> <i>(A_{El})</i>	<i>Área esterres metílicos</i> <i>((ΣA)-A_{El})</i>	<i>Esterres metílicos</i> <i>%</i>
1	45723770	310507205	54,61
2	45723770	315297299	55,46
3	45723770	322295488	56,69
4	45723770	266015129	46,79
5	45723770	285541884	50,22
6	45723770	337298980	59,33
7	45723770	237195839	41,72
8	45723770	540743948	95,11
9	45723770	452794995	79,64
10	45723770	274638911	48,31
11	45723770	359711359	63,27
12	45723770	387931586	68,23
13	45723770	332228973	58,43
14	45723770	404844892	71,21
15	45723770	360521953	63,41
16	45723770	491521720	86,45
17	45723770	453043741	79,68
18	45723770	289682849	50,95
19	45723770	335323500	58,98
20	45723770	304592521	53,57

21	45723770	563727759	99,15
22	45723770	630549821	110,91
23	45723770	490862206	86,34
24	45723770	494300373	86,94
25	45723770	301730189	53,07
26	45723770	301730189	53,07
27	45723770	301730189	53,07
28	45723770	301730189	53,07
29	45723770	301730189	53,07
