

UCUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

“Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniera Química

Autoras:

Lourdes María Buestán Guamán

CI: 0302719240

Correo electrónico: lourdesbuestan97@gmail.com

Jennifer Elizabeth Ramírez Córdova

CI:0105141923

Correo electrónico: jennifer.ramireziq@gmail.com

Directora:

Ing. Verónica Patricia Pinos Vélez

CI:0103550711

Cuenca, Ecuador

20 de octubre de 2022

RESUMEN

El impacto ambiental debido al uso de combustibles fósiles ha desembocado en la investigación de nuevas fuentes de energía renovables y la generación de biocombustibles. Por lo que en los últimos años se ha estudiado la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado. Actualmente la Empresa de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP) se encarga de la recolección y almacenamiento de este desecho. Una alternativa es emplear este residuo como materia prima. Por lo que este trabajo tiene como objetivo obtener biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores. Primero, el aceite vegetal reciclado fue sometido a un pretratamiento de filtración, lavado y secado y al determinar las propiedades fisicoquímicas se obtuvo: una densidad de 0.9422 ± 0.018 g/mL, 0.3114 ± 0.003 % de ácidos grasos libres, 0.3102 ± 0.003 mg KOH/g de índice de acidez, humedad de 0.02422 ± 0.021 %, viscosidad de 39.8700 ± 0.010 mm²/s y 30.2334 % ácido oleico C18:1. Para la obtención de biodiesel se realizó la reacción de transesterificación a 55 °C, 1.5h, 350 rpm y relación molar 6:1 alcohol/aceite. En el caso de los catalizadores se trabajó con concentraciones de 0.5 y 1% tanto de NaOH y KOH. Posteriormente se determinaron sus principales propiedades fisicoquímicas y según el análisis de varianza ANOVA, post hoc el KOH obtuvo un mayor rendimiento (93.19 ± 1.6689 % y 93.31 ± 3.0218 % al 0.5 % y 1% de concentraciones respectivamente). Al analizar el costo, accesibilidad al reactivo y rendimiento se determinó que el KOH al 0.5 % resulta ser óptimo en la obtención de biodiesel. Este biocombustible presenta las siguientes propiedades: densidad de 0.8807 ± 0.0011 g/mL, viscosidad de 4.6936 ± 0.07680 mm²/s, índice de acidez 0.3550 ± 0.0856 mg KOH/g y corrosión 1a. Mismas que cumplen con la Norma de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) D6751, Norma Técnica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización (NTE INEN) 2482 y la Norma Europea (EN)14214. Además, su poder calorífico fue de 39726 ± 364.91 J/g. Sin embargo, el porcentaje de FAMES de 93.0840 ± 0.9571 %, no cumplió con lo mínimo de 96.5% establecido en las normas EN 14214 y NTE INEN 2482.

Palabras Clave: Aceite vegetal reciclado. Catálisis básica. Biodiésel. NaOH y KOH.

ABSTRACT

The environmental impact due to the use of fossil fuels has led to the research of new renewable energy sources and the generation of biofuels. So in recent years the obtaining of biodiesel from recycled vegetable oil has been studied. Currently, the Telecommunications, Drinking Water, Sewerage and Sanitation Company of Cuenca (ETAPA EP) is responsible for the collection and storage of this waste. An alternative is to use this waste as raw material. Therefore, this work aims to obtain biodiesel from recycled vegetable oil by transesterification applying NaOH or KOH as catalysts. First, the recycled vegetable oil was subjected to a pretreatment of filtration, washing and drying and when determining the physicochemical properties it was obtained: a density of 0.9422 ± 0.018 g/mL, 0.3114 ± 0.003 % of free fatty acids, 0.3102 ± 0.003 mg KOH/g of acidity index, humidity of 0.02422 ± 0.021 %, viscosity of 39.8700 ± 0.010 mm²/s and 30.2334 % oleic acid C18:1. To obtain biodiesel, the transesterification reaction was carried out at 55 °C, 1.5h, 350 rpm and molar ratio 6:1 alcohol / oil. In the case of catalysts, we worked with concentrations of 0.5 and 1% of both NaOH and KOH. Subsequently, its main physicochemical properties were determined and according to the ANOVA analysis of variance, post hoc KOH obtained a higher yield (93.19 ± 1.6689 % and 93.31 ± 3.0218 % at 0.5% and 1% concentrations respectively). When analyzing the cost, accessibility to the reagent and performance, it was determined that the KOH at 0.5% turns out to be optimal in obtaining biodiesel. This biofuel has the following properties: density of 0.8807 ± 0.0011 g/mL, viscosity of 4.6936 ± 0.07680 mm²/s, acid number 0.3550 ± 0.0856 mg KOH/g and corrosion 1a. They comply with the Standard of the American Society for Testing and Materials (ASTM) D6751, Ecuadorian Technical Standard of the Ecuadorian Institute for Standardization (NTE INEN) 2482 and European Standard (EN) 14214. In addition, its calorific value was 39726 ± 364.91 J/g. However, the percentage of FAMES of 93.0840 ± 0.9571 %, did not meet the minimum of 96.5% established in the EN 14214 and NTE INEN 2482 standards.

Keywords: Recycled vegetable oil. Basic catalysis. Biodiesel. NaOH and KOH.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
LISTA DE TABLAS, FIGURAS Y ANEXOS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE ANEXOS.....	9
AGRADECIMIENTOS	14
AGRADECIMIENTOS	15
DEDICATORIA.....	16
DEDICATORIA.....	17
INTRODUCCIÓN.....	18
OBJETIVOS	19
1. MARCO TEÓRICO.....	20
1.1. El aceite vegetal comestible.....	20
1.1.1. Definición	20
1.1.1.1. Características fisicoquímicas de los aceites vegetales	20
1.1.2. El aceite vegetal comestible reciclado.....	21
1.1.3. Reacciones químicas durante el proceso de fritura.....	22
1.1.4. Reciclaje del aceite vegetal comestible	22
1.1.5. Aceite vegetal reciclado en la producción de biodiesel.....	22

1.2. Biodiesel	24
1.2.1. Definición.....	24
1.2.2. Ventajas del uso de biodiesel.....	24
1.3. Obtención del biodiesel	26
1.3.1. Tipos de catálisis empleadas en la reacción de transesterificación.....	26
1.3.1.1. Catálisis enzimática.....	26
1.3.1.2. Catálisis ácida.....	26
1.3.1.3. Catálisis básica.....	27
1.3.2. Proceso de obtención de biodiesel.....	28
1.3.2.1. Pretratamiento del aceite.....	29
1.3.2.3. Separación de las fases.....	31
1.3.2.4. Post tratamiento del biodiesel.....	31
1.3.2.5. Control de calidad de biodiesel.....	32
1.3.2.6. Caracterización de los parámetros más importantes del biodiesel.....	33
1.3.3. Variables que afectan la reacción de transesterificación en la obtención de biodiesel.....	34
1.3.3.1. Tipo de Alcohol y relación molar alcohol / aceite.....	34
1.3.3.2. Porcentaje de Ácidos grasos libres y humedad.....	34
1.3.3.3. Temperatura, velocidad de agitación y tiempo de reacción.....	35
1.3.3.4. Tipo y cantidad de catalizador.....	35
2. METODOLOGÍA	36
2.1. Pretratamiento y caracterización del aceite vegetal reciclado	36
2.1.1. Densidad.....	36
2.1.2. Porcentaje de Ácidos grasos Libres.....	36
2.1.3. Acidez Libre.....	37
2.1.4. Humedad.....	39
2.1.5. Viscosidad cinemática.....	39
2.1.6. Análisis cromatográfico del aceite vegetal reciclado.....	41
2.2. Reacción de transesterificación con catálisis básica	43
2.3. Caracterización del biodiésel	46
2.3.1. Propiedades fisicoquímicas.....	46

2.3.1.2.	Poder calorífico	46
2.3.1.3.	Viscosidad.....	46
2.3.1.4.	Índice de acidez	47
2.3.1.5.	Corrosión al cobre.....	47
2.3.2.	Análisis cromatográfico del biodiesel	48
2.4.	Análisis Estadístico	49
2.5.	Determinación del porcentaje de rendimiento del biodiesel.....	49
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
3.1.	Resultados y discusión: Características del Aceite Vegetal Reciclado	50
3.2.	Resultados y discusión: Características del Biodiesel Obtenido.....	52
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	65
4.1.	Conclusiones.....	65
4.2.	Recomendaciones.....	66
5.	BIBLIOGRAFÍA.....	67
ANEXOS	77

LISTA DE TABLAS, FIGURAS Y ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del aceite vegetal.....	21
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas aceites, grasas residuales y la mezcla de estos de obtenido de los diferentes tipos de restaurante.....	23
Tabla 3. Condiciones de la reacción de transesterificación.....	27
Tabla 4. Propiedades del biodiesel.....	32
Tabla 5. Cromatógrafo y parámetros de uso.	43
Tabla 6. Diseño experimental.....	43
Tabla 7. Características organolépticas del aceite vegetal reciclado.....	50
Tabla 8. Resultados de la caracterización del aceite vegetal reciclado.....	50
Tabla 9. Resultados del cromatógrafo: aceite vegetal reciclado.	51
Tabla 10. Densidades del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones ...	52
Tabla 11. Resultados del ANOVA de la densidad del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.	53
Tabla 12. Resultados del poder calorífico del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.....	54
Tabla 13. Resultados del ANOVA del poder calorífico del biodiesel.	54
Tabla 14. Viscosidad cinemática del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.....	55
Tabla 15. Resultados del ANOVA de la viscosidad cinemática del biodiesel.	56
Tabla 16. Índice de acidez del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.	57
Tabla 17. Resultados del ANOVA del índice de acidez del biodiesel.....	57
Tabla 18. Porcentaje de FAMES y contenido de ácido linolénico del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.....	59
Tabla 19. Resultados del ANOVA de la composición química de FAMES del biodiesel.	60
Tabla 20. Estadísticos descriptivos del porcentaje de C18:3 presentes en el biodiesel.	60
Tabla 21. Valor promedio del rendimiento de cada catalizador y concentración.....	61
Tabla 22. Resultados del ANOVA de la caracterización del biodiesel.....	62
Tabla 23. Análisis Post Hoc del porcentaje de rendimiento.	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de catálisis empleadas en la reacción de transesterificación.	26
Figura 2. Esquema de la producción de biodiesel a partir de aceite reciclado.	29
Figura 3. Reacción de transesterificación en etapas.	30
Figura 4. Reacción de transesterificación.	31
Figura 5. Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite vegetal reciclado. Nota. Autoría Propia.	37
Figura 6. Determinación de la acidez libre. Nota. Autoría Propia	38
Figura 7. Muestra en el viscosímetro sumergida. Nota. Autoría Propia	40
Figura 8. Muestra que fluye en el viscosímetro	40
Figura 9. Incubación de las muestras.	41
Figura 10. Mezclado de las muestras en el vortex.	42
Figura 11. Remoción de agua.	42
Figura 12. Solución de Metóxido de sodio 1 %.	43
Figura 13. Decantación del biodiesel y glicerina. Nota. Autoría Propia.	44
Figura 14. Lavado del biodiesel.	44
Figura 15. Biodiesel después del secado en estufa.	45
Figura 16. Síntesis del biodiesel. Nota. Autoría Propia.	45
Figura 17. Medición del poder calorífico de las muestras.	46
Figura 18. Determinación índice de acidez.	47
Figura 19. Escala de colores de corrosión al cobre.	48
Figura 20. Determinación a la corrosión del cobre.	48
Figura 21. Muestras derivatizadas	49
Figura 22. Corrosión: Biodiesel obtenido con NaOH 0.5 %.	58
Figura 23. Corrosión: Biodiesel obtenido con NaOH 1 %	58
Figura 24. Corrosión: Biodiesel obtenido con KOH 0.5 %.	59
Figura 25. Corrosión: Biodiesel obtenido con KOH 1 %	59

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Caracterización del aceite vegetal reciclado.....	77
ANEXO 2: Determinación del aceite y metanol a emplear.....	79
ANEXO 3: Registro del blanco	80
ANEXO 4: Caracterización del biodiesel obtenido.....	80
ANEXO 5: Determinación del rendimiento.....	92
ANEXO 6: Informes de los estadísticos realizados en R y R-Studio.....	93

CLÁUSULAS

Cláusula de Propiedad Intelectual

Lourdes María Buestán Guamán, autor del trabajo de titulación "Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 20 de octubre de 2022



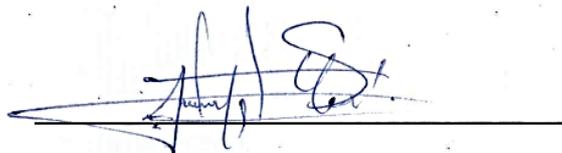
Lourdes María Buestán Guamán

C.I: 0302719240

Cláusula de Propiedad Intelectual

Jennifer Elizabeth Ramírez Córdova, autor del trabajo de titulación "Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 20 de octubre de 2022



Jennifer Elizabeth Ramírez Córdova

C.I: 0105141923

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Lourdes María Buestán Guamán en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de octubre de 2022



Lourdes María Buestán Guamán

C.I: 0302719240

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Jennifer Elizabeth Ramírez Córdova en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado mediante transesterificación aplicando NaOH ó KOH como catalizadores", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de octubre de 2022



Jennifer Elizabeth Ramírez Córdova

C.I: 015141923

AGRADECIMIENTOS

A Dios que por ser la luz que guía mi camino y la fortaleza que me brindó para alcanzar mi meta.

A mi mamá y hermanos por apoyarme siempre y alentarme a seguir adelante por más difícil que pareciese la situación.

A la Universidad de Cuenca y a los docentes de Ingeniería Química por formarme como un profesional a partir de sus cátedras impartidas.

A mi tutora, Ing. Verónica Pinos por brindarnos su apoyo, conocimientos, paciencia y orientación en el desarrollo y culminación del presente proyecto de titulación.

A la Dra. Johanna Ortiz e Ing. Verónica Saetama por su apoyo y disponibilidad para el desarrollo de esta investigación.

A mi grupo de amigas y trabajo chicas Z fue un gusto y un placer haberlas conocido y trabajado con Uds. en el transcurso de la carrera.

Jennifer

AGRADECIMIENTOS

A Dios, que ha sido mi guía y mi fortaleza en este camino.

A mi mamá que me ha apoyado y dado su amor incondicionalmente, por ser una gran madre y mujer.

A mi papito que está en el cielo.

A todos y cada uno de mis hermanos que me alentaron a salir adelante y que de alguna u otra manera me apoyaron.

A mi tutora, Ing. Verónica Pinos por su paciencia, dedicación y orientación en el desarrollo de esta tesis.

A la Dra. Johanna Ortiz, Ing. Verónica Saetama e Ing. Jaime Cuenca por su predisposición y apoyo en los diferentes laboratorios para el desarrollo y culminación de esta investigación.

Lourdes

DEDICATORIA

A mi amada mamá que siempre estuvo en todo momento para mí brindándome su amor y apoyo incondicional, que me enseñó que a pesar de las dificultades que se nos presenten podemos alcanzar nuestros sueños.

A mis queridos hermanos Michelle y Anthony que con su cariño y paciencia me han acompañado en esta larga travesía, aprendiendo el uno del otro.

A Gabriel y mi tío Napoleón que fueron como un padre para mí, al siempre estar allí para mí.

A Jonnathan que me brindo su amor y motivación a seguir hacia adelante.

A mis mascotas Giro y Oso por hacerme siempre compañía y entregarme su cariño.

Jennifer

DEDICATORIA

Este logro se lo dedico de manera especial a mi papi Reinaldo, que fue un padre que siempre me apoyó, aconsejó y que aun desde el cielo me sigue guiando. Sé que estaría muy orgulloso de esta meta y me hubiera gustado compartirlo con él. A mi mamita Nube, que ha sido incondicional en todo momento y un ejemplo de mujer y madre trabajadora y digna de admiración. Papi, mami uds han sido mi mayor motivación.

A mi abuelita, mamita Rosario que siempre la llevo en mi corazón por que fue un pilar fundamental en mi vida, me dejó grandes enseñanzas y el recuerdo de una gran mujer.

A todos mis hermanos, familia y seres queridos.

Lourdes

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los combustibles fósiles y la energía nuclear proporcionan anualmente el 90 % de la energía que se emplea a nivel mundial (Martínez Ullate, 2016). Sin embargo, según la compañía británica de energía BP (2021) las reservas mundiales en el 2020, eran suficientes para abastecer 50 años de demanda según los patrones de consumo y producción. Esto es un indicativo de que este recurso se encuentra limitado. Además, estudios han detectado que se encuentran afectadas las zonas en las que se extrae petróleo y gas natural dando origen a una problemática ambiental (B.P., 2021).

En los últimos años el aprovechamiento de los residuos ha ganado importancia, debido a que se busca encontrar otras fuentes de energía que sean renovables y con un enfoque ambientalista (Martínez Ullate, 2016). Es así como nace la alternativa de obtener biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado. Se considera este tipo de aceite debido a su alto contenido de ácidos grasos de diferentes tipos que pueden ser sometidos a un proceso de transesterificación. Otra de las razones es que, al ser un producto de alto consumo, provoca grandes cantidades de desechos. Los cuales suelen terminar en desagües, ríos, e inclusive en la tierra. (Pantoja Cabrera, 2018). Tal es el caso de Ecuador en donde anualmente 9.45 millones de galones de aceite vegetal usado son desechados (ARC, 2021).

En base a esta necesidad, se busca aprovechar estos residuos para integrarlos nuevamente al ciclo económico y productivo mediante la reutilización (Piña Contreras, 2020). Por lo que, este estudio tiene el propósito de obtener biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado proporcionado por la empresa municipal de Cuenca ETAPA EP, empleando dos tipos de catalizadores básicos a diferentes concentraciones para realizar la reacción de transesterificación.

OBJETIVOS

Objetivos Generales

- Obtener y caracterizar el biodiesel producto de la reacción de transesterificación en aceite vegetal reciclado aplicando NaOH ó KOH como catalizadores.

Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades fisicoquímicas del aceite vegetal reciclado.
- Producir biodiesel aplicando diferentes concentraciones de NaOH ó KOH como catalizadores en la reacción de transesterificación.
- Caracterizar las principales propiedades fisicoquímicas del biodiesel.
- Analizar estadísticamente y determinar el catalizador y concentración óptima del proceso.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. El aceite vegetal comestible

1.1.1. Definición

El aceite vegetal es una sustancia orgánica constituida principalmente por ésteres de ácidos grasos y glicerol. Su obtención se da a partir específicamente de fuentes vegetales, aplicando distintos métodos de extracción como: prensado, extracción por solventes o la combinación de los dos (Miranda Peña, 2021). Según Carrión (2019) debido a que existen diferentes fuentes de origen, la composición final del aceite no es estándar. Es decir, el aporte de ácidos grasos mono y poliinsaturados y otros componentes que puedan tener el aceite, dependerá de la especie vegetal, semilla o fruto del cual se extraiga. Sin embargo, de manera general el aceite vegetal está compuesto en un 95 % por triglicéridos y el 5 % ácidos grasos libres, ceras y otros componentes que dependen de la fuente de la cual se obtenga (Tabio García et al., 2017).

1.1.1.1. Características fisicoquímicas de los aceites vegetales

Densidad: Se define como la masa de una sustancia por unidad de volumen a una temperatura determinada, es medido con un densímetro (Beltrán Velásquez & Gaviria Navarro, 2020; Tordecilla, 2021). Los aceites vegetales generalmente tienen una densidad menor a la del agua (Rojas Ramos, 2019).

Humedad: Se establece la cantidad de agua presente en el aceite, que podría producir hidrólisis de los triglicéridos, generando ácidos grasos libres, mono glicéridos, di glicéridos y glicerol (Ramírez Nieves, 2018). El contenido de agua presente en el aceite debe ser inferior al 0.5 % para obtener un mejor rendimiento del biodiesel (Barbosa Reina et al., 2014; Rojas Ramos, 2019).

Viscosidad: En el caso de los aceites la viscosidad disminuye a medida que se incrementa la saturación de los ácidos grasos presentes. Mientras que, en el proceso de fritura esta tiende a aumentar debido a las reacciones de oxidación y polimerización (Miranda Peña, 2021).

Acidez Libre: El índice de acidez libre mide la cantidad de ácido graso libre y es definido por el número de miligramos de KOH que se requiere para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en 1 g de muestra (García Muentes et al., 2018). Las concentraciones

superiores a 3 mg KOH/g disminuye el rendimiento de la reacción de transesterificación básica debido a que los ácidos grasos libres se saponifican (Rojas Ramos, 2019).

A continuación, en la tabla 1 se indican las propiedades de algunos aceites vegetales:

Tabla 1. *Propiedades del aceite vegetal.*

Aceite	Densidad (kg/m ³)	Acidez (mg KOH/g)	Índice de Yodo (g I ₂ /100g)	Referencia
Jatropha curcas L	938	2.73	99	(García Muentes et al., 2018)
Jatropha curcas L	919.7	-	109.9	(Franco-Pérez et al., 2018)
Semillas de papaya	946.4	5.54	68.4	(Dorado et al., 2017)
Ricino (Higuerilla)	-	-	85	(Echeverría Echeverría, 2018)
Moringa Oleífera (ecotipo criolla-rechazada)	885.2	-	-	(Ferrer Serrano et al., 2020)
Refinado de Canola	-	0.112	-	(Fuentes Campos et al., 2016)
Crudo de Linaza	-	0.668	-	(Reyes Vargas, 2018)
Soya	-	-	190-194	
Semilla de algodón	-	-	192-200	
Girasol	-	-	189-194	
Palma	-	-	196-206	
Coco	-	-	252-260	
Canola	-	-	170-180	
Ricino	-	-	177-187	

Nota. Autoría Propia.

1.1.2. El aceite vegetal comestible reciclado

El aceite vegetal residual es el desecho que generalmente se obtiene después del proceso de fritura en la preparación de alimentos. Durante dicho proceso se da la interacción entre los componentes del alimento, el agua y el aceite sometido a temperaturas entre los 150-200 °C. En consecuencia, se da su desnaturalización provocando cambios en las características fisicoquímicas y organolépticas (Morocho, 2019).

1.1.3. Reacciones químicas durante el proceso de fritura

La pérdida de las propiedades originales del aceite se da principalmente debido a las reacciones de hidrólisis, oxidación, termo oxidación y polimerización durante la fritura.

Hidrólisis: En este caso el agua que contiene el alimento reacciona con los triglicéridos del aceite produciendo diglicéridos, monoglicéridos y glicerol. Otra de las causas en menor grado es el uso de polvos leudantes en los alimentos. En consecuencia, esta reacción aumenta la acidez del aceite (Juárez & Sammán, 2007).

Oxidación: Esta reacción se da entre los ácidos grasos insaturados y el oxígeno atmosférico en la superficie de contacto. El aceite vegetal sufre un proceso de auto y fotooxidación natural a temperatura ambiente el cual es un proceso lento y de bajo riesgo (Lázaro Vela, 2018).

Termo oxidación: En esta reacción se forman compuestos polares, volátiles y polímeros, su principal causa son las altas temperaturas y la exposición al aire. Sin embargo, en la velocidad de oxidación también intervienen el tipo, calidad de aceite y la presencia de pro y antioxidantes (Villegas Córdoba & Martínez Rojas, 2021).

Polimerización: Esta reacción se da en los puntos de insaturación de las cadenas de ácidos grasos o en la unión del glicerol con ácidos grasos, dando como resultados dímeros, polímeros y triglicéridos. Esta reacción es proporcional al número de frituras al cual es expuesto el aceite, así también interviene la temperatura, el tipo y calidad del aceite (Lázaro Vela, 2018).

1.1.4. Reciclaje del aceite vegetal comestible

En Ecuador la empresa Aceite Reciclado de Cocina (ARC) se dedica a la compra y acopio de aceite vegetal reciclado a nivel nacional, para posteriormente exportarlo a Europa para la producción de biodiesel (ARC, 2021). En el caso de la ciudad de Cuenca la empresa municipal ETAPA EP dispone de un programa de "Recolección de aceites vegetales usados" con el objetivo de cuidar la salud de la población, además precautelar el funcionamiento normal de la planta de tratamiento de aguas residuales y sus sistemas de conducción (Ordoñez, 2021).

1.1.5. Aceite vegetal reciclado en la producción de biodiesel

Las materias primas utilizadas en la producción de biodiesel dependen del lugar en el que se produce; por ejemplo, en Europa es muy común la utilización de colza, en Asia

el aceite de palma, en Estados Unidos de América y Argentina el aceite de soja, pero también se pueden aprovechar el aceite de maní, girasol, coco, etc. (Corach, 2018). Sin embargo, para la producción de biodiesel se necesitan grandes cantidades de aceite vegetal lo cual podría desencadenar una crisis en el suministro de alimentos y a un desequilibrio económico (Tacias Pascacio et al., 2016). Debido a esto el aceite vegetal reciclado es una alternativa económica para la producción de biodiesel (Laborde et al., 2017).

Los aceites vegetales que se consideran las principales materias primas para la producción de biodiesel luego de su uso son (Ramírez Nieves, 2018; Reyes Vargas, 2018):

- Aceites vegetales convencionales: girasol, colza, maíz, soya, coco, palma y ricino
- Aceites vegetales alternativos: de brassica carinata, cynara curdunculus, camelina sativa, crambe abyssinica, pogianus y jatopha curcas
- Aceites de semillas modificadas genéticamente: de girasol de alto oleico
- Aceites de otras fuentes: de producción microbianas, microalgas, algas productoras de aceite, grasas residuales provenientes de plantas de tratamiento de aguas o trampas de separación de grasas.

A continuación, la tabla 2 muestra las propiedades fisicoquímicas de diferentes tipos de aceites residuales:

Tabla 2. *Propiedades fisicoquímicas de aceites, grasas residuales y la mezcla de estos de obtenido de los diferentes tipos de restaurantes.*

Restaurantes	Acidez (mg KOH/g)	Ácidos grasos libres (%)	Saponificación (mg KOH/g)	Éster (%)	Humedad (%)	Estabilidad oxidativa (h)	Viscosidad (mPa/s)
Antojitos	0.45 (0.01)	0.22 (0.01)	185.62 (1.76)	99.76	0.02 (0.01)	2.78 (0.06)	37.869
Bares	1.00 (0.01)	0.50 (0.01)	193.06 (2.33)	99.48	0.03 (0.02)	5.69 (0.07)	39.611
Cocinas	0.81 (0.01)	0.40 (0.01)	1.83.75 (1.66)	99.56	0.02 (0.00)	4.74 (0.09)	31.763
Comida rápida	4.98 (0.15)	2.51 (0.08)	195.07 (4.33)	97.44	0.01 (0.00)	2.78 (0.07)	39.727

	0.94	0.47			0.01	0.86	
Gorditas	(0.01)	(0.01)	196.31 (0.27)	99.52	(0.00)	(0.03)	50.027
	1.62	0.81			0.02	3.89	
Formal	(0.01)	(0.01)	194.66 (2.04)	99.17	(0.00)	(0.02)	52.205
	0.99	0.50			0.03	0.44	
Rosticerías	(0.14)	(0.07)	185.55 (4.95)	99.46	(0.01)	(0.04)	34.104
	1.89	0.95			0.05	2.94	
Taquerías	(0.14)	(0.07)	192.53 (1.29)	99.02	(0.00)	(0.04)	36.949
	2.09	1.05			0.04	3.29	
MWCOF	(0.09)	(0.04)	198.54 (0.71)	98.95	(0.00)	(0.04)	40.098
	0.10	0.05			0.04	7.56	
Aceite puro	(0.00)	(0.00)	196.23 (1.65)	99.95	(0.02)	(0.30)	299.932

Nota. *MWCOF: aceites, grasas residuales y la mezcla de estos. Fuente: (Tacias Pascacio et al., 2016).

1.2. Biodiesel

1.2.1. Definición

El biodiesel se define como la mezcla de ésteres monoalquílicos de ácido grasos de cadena larga (FAME), obtenidos a partir de materias primas renovables como: aceites vegetales, grasas animales o aceites usados (Issariyakul & Dalai, 2014). Por su parte, Mofijur (2016) describe el biodiesel como una sustancia renovable, biodegradable y no tóxica, que durante su combustión produce una baja emisión de gases de efecto invernadero como son: CO₂, NO_x, SO_x y material particulado.

Este biocombustible puede ser usado en motores de combustión interna convencional, actuales sin o con pequeñas modificaciones. Además, que al ser usado en cualquier proporción junto a petrodiesel los motores no presentan problema alguno (Llanes et al., 2017).

1.2.2. Ventajas del uso de biodiesel

Disminución de emisiones contaminantes: El uso de biodiesel disminuye en un 78 % la emisión de CO₂ comparado con el diésel de petróleo. Otro de las reducciones significativas es de: 68 % de PM10, 46 % de CO y debido a que no contiene azufre no hay emisión de SO_x. Además, se considera al biodiesel como libre de benceno, considerado cancerígeno.

Seguridad: El biodiesel comparado con el diésel de petróleo presenta un mayor punto de ignición, siendo del biodiesel de aproximadamente 150 °C la del diésel y 52 °C. (Paredes & Vidal, 2017).

Biodegradabilidad y toxicidad: El biodiesel es considerado altamente degradable en el agua, comparado con el diésel su degradación es 4 veces más rápida y similar a la de la dextrosa. La mezcla de biodiesel con diésel o gasolina incrementa la biodegradabilidad del combustible, esto se da debido al efecto sinérgico de cometabolismo (Avellaneda, 2010).

Este biocombustible es considerado no tóxico en caso de ingestión en mamíferos o peces, su dosis letal es de 17.4 g/Kg de peso corporal. En el caso de la toxicidad acuática sería necesario una concentración mayor a los 1000 mg/L. Por otra parte, también se debe considerar la toxicidad en el suelo. En este caso se ha encontrado que el diésel es tóxico en una concentración del 3 % en peso. Mientras que, el biodiesel no muestra toxicidad hasta concentraciones del 12 % en peso (Llanes et al., 2017).

Lubricidad: El biodiesel contiene alrededor del 11 % de oxígeno en peso, esto mejora el proceso de combustión y por ende disminuye el potencial de oxidación. Por otra parte, la viscosidad cinemática es mayor y debido a estas características el biodiesel puede extender la vida útil mejorando la capacidad de lubricar el motor (Avellaneda, 2010).

1.2.3. Desventajas del uso de biodiesel

Desempeño mecánico: El contenido de oxígeno provoca la disminución del poder calorífico, en consecuencia, se reduce el calor de combustión. Esto provoca un mayor consumo de combustible ya que no se logra el mismo desempeño (Avellaneda, 2010).

Emisiones de NO_x: El uso de biodiesel puro provoca que la emisión de NO_x aumente en un 10 %, favoreciendo de esta manera la formación de lluvia ácida (Lamoureux, 2007).

Comportamiento a bajas temperaturas: El biodiesel presenta problemas de fluidez bajo a bajas temperaturas, provocando que se genere depósitos en el motor o incluso congelarse. Esto provoca que su uso en climas fríos o en temporadas de invierno se complique. Sin embargo, se puede corregir agregando aditivos especiales (Santana, 2019).

Estabilidad a la oxidación: Comparado con el diésel de petróleo la estabilidad oxidativa es menor. Esto provoca una rápida degradación con un almacenamiento máximo de 6 meses. El uso de depósito que contengan material de cobre, cinc, plomo o sus aleaciones afectan de manera negativa la estabilidad. Por lo que, se recomienda que los depósitos sean de cinc o acero (Avellaneda, 2010).

1.3. Obtención del biodiesel

1.3.1. Tipos de catálisis empleadas en la reacción de transesterificación

En la figura 1 se muestran los diferentes tipos de catálisis que se emplean en la reacción de transesterificación.

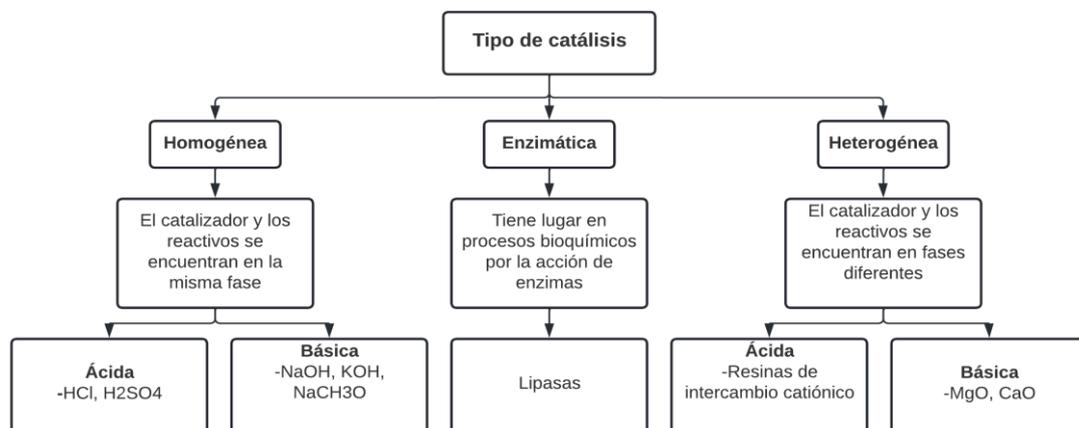


Figura 1. Tipos de catálisis empleadas en la reacción de transesterificación.

Nota. Fuente: (Castillo Fernández, 2018; Claramunt Vallespí & Santos, 2017; Diniz Vicente Pardal, 2012).

1.3.1.1. Catálisis enzimática

Se encuentra en la etapa de investigación el uso de los biocatalizadores en la reacción de transesterificación, debido a que las lipasas son capaces de sintetizar ésteres y glicéridos (Castillo Fernández, 2018). Los biocatalizadores pueden ser potencialmente buenos catalizadores y muy selectivos, pero presentan inconvenientes como el problema de su separación y reutilización, además de ser muy costosos (Diniz Vicente Pardal, 2012).

1.3.1.2. Catálisis ácida

Los catalizadores ácidos pueden ser utilizados tanto para la esterificación de ácidos grasos libres con el fin de convertirlos directamente en ésteres o para la transesterificación de los triglicéridos (Flores Patiño, 2017). Esta es una catálisis más

lenta pero más conveniente para los glicerolos que presentan ácidos grasos libres y con un mayor contenido acuoso evitando así que se produzca la reacción de saponificación (Medina Pérez et al., 2019), esta catálisis requiere de una mayor cantidad de alcohol (De La Cruz López & Trujillo Luna, 2017).

1.3.1.3. Catálisis básica

La catálisis básica puede llegar a ser hasta 400 veces más rápida que la ácida y menos corrosiva, aunque los glicerolos y alcoholes deben ser anhidros, para evitar que se produzcan las reacciones de saponificación y disminución del rendimiento (Medina Pérez et al., 2019); además se puede operar en condiciones moderadas de presión y temperatura (De La Cruz López & Trujillo Luna, 2017). Este tipo de catálisis ha sido empleado exitosamente para la obtención de biodiesel con aceite vegetal reciclado, algunos resultados de investigaciones pueden ser visualizados en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones de la reacción de transesterificación.

Nº	Tipo de Aceite	Variables								Fuente
		a	b	C	d	e	f	g	H	
1	Aceite usado de cocina	NaOH	1 % w/v	Metanol	12:1	60	1h 30min	300	86.046 ± 0.641 98.40	(Caro Becerra et al., 2017)
2	Aceite usado de cocina	KOH	1 % w/w	Metanol	6:1	60	2h	-	79.43	(Rodríguez Rodríguez et al., 2016)
3	Aceite usado de cocina	KOH	1 %w/w	Metanol	6:1	60	1h30 min	350	96.00	(Tovar Torres, 2019)
4	Aceite usado de cocina	NaOH	1 %w/w	Metanol	12:1	60	2h	200	98.00 88.00	(López et al., 2015)
5	Aceite de fritura	KOH	0.5 % w/w	Metanol	6:1	55	2h	500	91.789	(Miranda Peña, 2021)

6	Aceite vegetal residual	KOH	0.4 % en relación peso del aceite	Metanol	3:7	60	3h 30min	-	85.97	(Zavaleta Palomino & Suavo Carrión, 2016)
7	Aceite comestible residual	NaOH	1g en 40ml	Metanol	1:5	60	1h	600	87.00	(De La Cruz López & Trujillo Luna, 2017)
8	Aceite usado	NaOH	1.2g	Metanol	74 ml:1 24ml	37	1h 30min	300	66.00	(Chamorro Portilla et al., 2018)
9	Aceite de cocina usado	KOH	1 % w/w	Metanol	6:1	60	1h 10min	200	96.00	(Acevedo Páez et al., 2019)
10	Aceite vegetal usado	KOH	1 % w/w	Metanol	6:1	-	2h	300	99.00	(Flores Patiño, 2017)
		NaOH	1 % w/w	Metanol					93.75	

Nota. * a: catalizador, b: cantidad de catalizador, c: tipo de alcohol, d: relación molar alcohol: aceite, e: temperatura (°C), f: tiempo de reacción, g: velocidad de agitación (rpm), h: rendimiento (%). Autoría Propia.

1.3.2. Proceso de obtención de biodiesel

De manera general el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado se detalla en la figura 2. Al ser una materia prima previamente usada, es necesario un pretratamiento antes del proceso de transesterificación. Mientras que, una vez obtenido el biodiesel es necesario que el mismo sea sometido a un post tratamiento para garantizar su calidad.

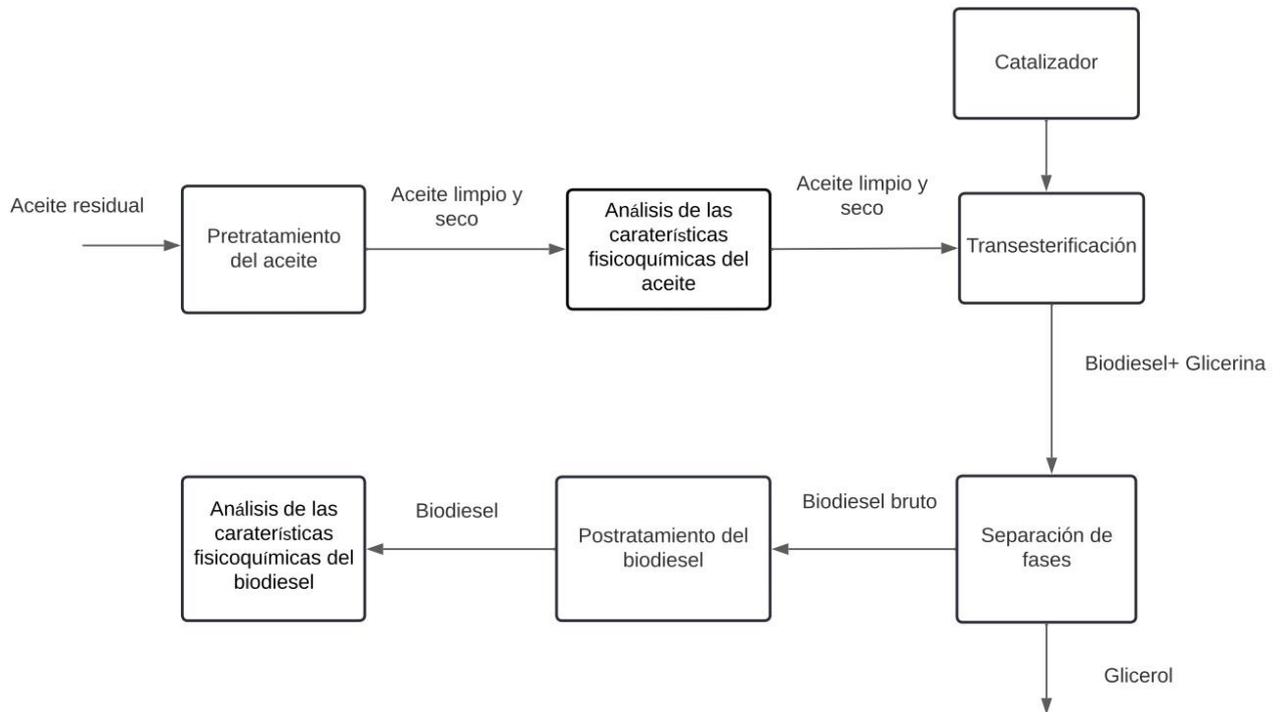


Figura 2. Esquema de la producción de biodiesel a partir de aceite reciclado.

Nota. Fuente: (De La Cruz López & Trujillo Luna, 2017).

1.3.2.1. Pretratamiento del aceite

El objetivo del pretratamiento del aceite reciclado es acondicionarlo para ser usado en la reacción de transesterificación. De manera principal se da la eliminación de impurezas sólidas y humedad, factores que influyen de manera negativa en la producción de biodiesel.

Filtrado: El aceite vegetal reciclado proviene de un proceso de fritura, donde se da la interacción entre el alimento y el aceite. Como consecuencia al finalizar la cocción del alimento, hay la posibilidad de que el aceite contenga residuos sólidos (Morocho, 2019). Por lo que, para la eliminación de dichos residuos es necesario la filtración. Esta se puede realizar con un previo calentamiento del aceite entre los 40-60 °C, para agilitar el flujo a través del filtro. O en otros casos se realiza a bajas temperaturas para eliminar ceras. Por lo general, este proceso se lleva a cabo a través de un tamiz de 5 micras (Alvarez, 2013).

Desgomado: Según Avellaneda (2010) este pretratamiento sirve en el aceite para eliminar fosfátidos hidratables, triglicéridos ocluidos y compuestos solubles en agua como azúcares. Mientras que, también disminuye la cantidad de fosfátidos y

fosfolípidos. El proceso consiste en hidratar las gomas con agua, de tal manera que se vuelvan insolubles en el aceite y luego sean separadas por decantación.

Secado: El contacto del aceite y los alimentos provoca que el aceite adquiera humedad, la cual debe ser eliminada a través de un proceso de evaporación. Por lo que, el aceite es sometido a temperaturas entre los 95-110 °C con el objetivo que se dé una evaporación completa del agua (Yépez & Vidal, 2017).

1.3.2.2. Transesterificación

La transesterificación es una reacción de alcoholisis debido a que interviene grasa o aceite con un alcohol de cadena corta para la producción de ésteres y glicerol, en presencia de un catalizador para acelerar la velocidad de reacción y mejorar el rendimiento (Castillo Fernández, 2018; Miranda Peña, 2021). Esta reacción consta de 3 etapas consecutivas y reversibles, transformándose los triglicéridos en diglicéridos, monoglicéridos y glicerina (Guerrero De La A & Kocher Solano, 2019) tal y como se indica en la figura 3.

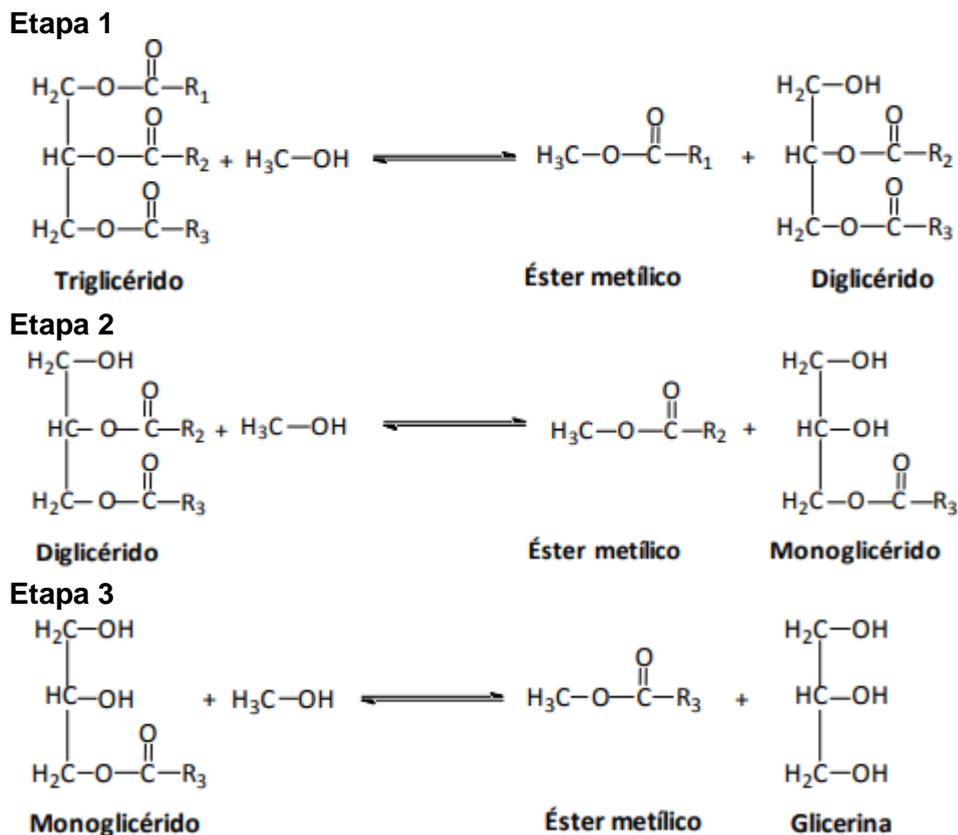


Figura 3. Reacción de transesterificación en etapas.

Nota. Fuente: (Guerrero De La A & Kocher Solano, 2019).

La reacción global de transesterificación está descrita en la figura 4.

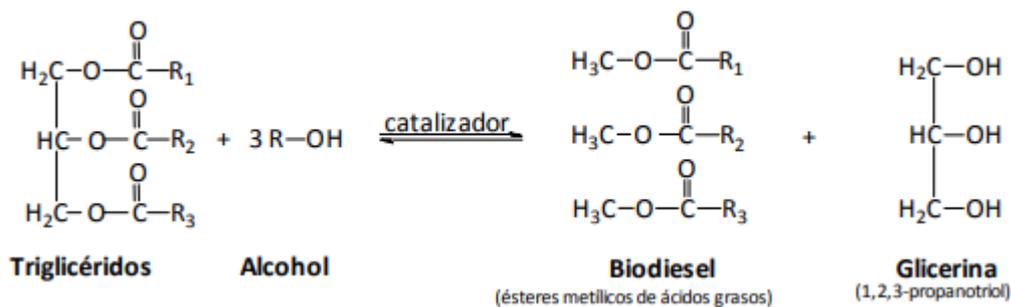


Figura 4. Reacción de transesterificación.

Nota. Fuente: (Diniz Vicente Pardal, 2012).

A su vez dentro de esta reacción los factores que determinan el rendimiento de la reacción son el tiempo de reacción, tipo de catalizador, temperatura, contenido de agua y tipo de ácidos grasos que presenta la materia prima.

1.3.2.3. Separación de las fases

Según Alvarez (2013) la reacción de transesterificación se da en constante agitación. Esto provoca que la glicerina formada se disperse en la mezcla en forma de gotitas. Por lo que, al final de la reacción será necesario la separación de la glicerina y el biodiesel. Al ser estos dos productos inmiscibles entre sí, su separación se da mediante decantación o centrifugación.

1.3.2.4. Post tratamiento del biodiesel

Una vez obtenido el biodiesel es necesario un post tratamiento ya que contiene impurezas que disminuyen su calidad. Por lo general, el biodiesel luego de la separación de fases contiene trazas de catalizador, jabón, glicerina o metanol (Gaspar & Zorrilla, 2019). Por lo que, es necesario someterlo a los siguientes post tratamientos:

Lavado: Este post tratamiento permite eliminar las impurezas del biodiesel que tienen una alta solubilidad en agua como son; residuos de catalizador, glicerina y jabones. El proceso consiste en la aspersion de agua acidulada o agua destilada a temperaturas entre 50-60 °C sobre el biodiesel que luego se somete a una separación mediante decantación. Dicho proceso se repite hasta que el agua obtenida sea neutra (De La Cruz López & Trujillo Luna, 2017).

Secado: Durante el proceso de lavado, el biodiesel puede llegar a adquirir hasta 1500 ppm de agua disuelta, valor que excede el límite de 50 ppm de agua (Lamoureux, 2007). Debido a esto, es necesario que el biodiesel se someta a un proceso de secado. La temperatura a la cual se da el secado varía entre los 90-110 °C por un tiempo determinado (De La Cruz López & Trujillo Luna, 2017).

Filtración: La filtración es una parte esencial en la purificación del biodiesel debido a que evita que impurezas presentes en el combustible puedan llegar al motor. El proceso se realiza con el combustible frío, esto permitirá capturar esteres saturados cuando cristalicen. Así mismo se debe realizar a través de una abertura de 5 µm (Lamoureux, 2007).

1.3.2.5. Control de calidad de biodiesel

Para que sea posible el uso de biodiesel en motores, es necesario que sus propiedades sean similares a los del diésel de petróleo. De esta manera, puede ser usado de manera total o parcial (Alarcón, 2014). La calidad final del biodiesel está en función del proceso de producción y su control se da en base a normas que especifican los parámetros necesarios para su uso. Para garantizar la calidad del biodiesel y su uso seguro los países líderes han establecido estándares. De los cuales destacan la norma ASTM para EE. UU. y EN para la Unión Europea (Alvarez, 2013).

En el caso de Ecuador la norma que establece los rangos y las propiedades del biodiesel es la NTE INEN 2482 (2009). Mismo que está basada en la norma ASTM D6751 (2020) y la EN 14214 (2003). A continuación, la tabla 4 muestra las principales propiedades del biodiesel.

Tabla 4. *Propiedades del biodiesel.*

Propiedad	Unidades	Estándares del biodiesel		
		NTE INEN 2482	EN14214	ASTM D6751
Viscosidad cinemática a 40 °C	mm ² /s	3.5-5		1.9-6
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	860-900		-
Índice de acidez	mg KOH/g	0.5 máx.		0.8 máx.
Corrosión al cobre	Clasificación	1 ^a	3 horas	3 ^a
Contenido de éster	%(m/m)	96.5 min	96.5 min	-
Punto de inflamación	°C	120 min		130 min
Punto de nube	°C	-		Reportar

Índice de cetano	-	49 min	51 min	47 min
Contenido de azufre		10 (mg/Kg)	0.001 máx.	0.0015 máx.
			%(m/m)	%(m/m)
Éster metil de ácido linolénico	%(m/m)	-	12.0 máx.	-

Nota. Fuente: NTE INEN 2482 (2009), EN 14214 (2003) y ASTM D6751 (2020).

1.3.2.6. Caracterización de los parámetros más importantes del biodiesel

A continuación, se muestra la caracterización de los parámetros más importantes del biodiesel.

Densidad

La materia prima usada para la obtención de biodiesel define en gran parte su densidad. Esto se da debido a que al final del proceso, la composición y contenido de esteres influyen directamente sobre su valor. Otros factores que afectan son la cantidad de alcohol remante y en menor medida las etapas de purificación aplicadas (Zamora Burbano, 2015).

Según (Miranda Peña, 2021) altas densidades en el biodiesel indican mayor energía. Sin embargo, al exceder el valor máximo permitido puede causar daños en el sistema de inyección del motor y en caso de estar expuesto a bajas temperaturas podría presentar problemas de solidificación o congelamiento.

Poder calorífico

El poder calorífico superior también conocido como energía bruta es la cantidad de calor liberada durante la combustión de un gramo de combustible para producir CO₂ y H₂O a su temperatura inicial. Dicho de otra manera, es la energía que contiene el combustible (Ramírez-Verduzco et al., 2012). El valor del poder calorífico es directamente proporcional a la eficiencia del trabajo en motores o máquinas. La determinación del mismo, se realiza a través de un método matemático o con el uso de un equipo estandarizado conocido como bomba calorimétrica (López Quiñones, 2017).

Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática se define como la resistencia a fluir de los líquidos. En el caso del biodiesel una alta viscosidad afecta la atomización del chorro de combustible en la inyección de este en la cámara. Por lo general, el biodiesel presenta mayores viscosidades que el diésel. Mientras este valor se encuentre dentro de la norma resulta

una ventaja ya que le da la característica de lubricidad al sistema de combustible (Avellaneda, 2010).

Índice de acidez

El índice de acidez se define como la cantidad de mg KOH necesarios para neutralizar los ácidos grasos libres y los ácidos minerales presentes en un gramo de muestra de biodiesel. Los altos valores de acidez causan la degradación del biodiesel. Además, puede provocar corrosión de algunas partes del motor. Sus principales causas son; origen de la materia prima, proceso de producción, uso de catalizadores y presencia de agua después de largos periodos de almacenaje (Avellaneda, 2010).

Contenido de metilésteres

El porcentaje de FAME's o contenido de metilésteres permite conocer la pureza del biodiesel. En el caso de que haya un bajo porcentaje de metilésteres indica que no se ha trabajado en las condiciones de reacción apropiadas o hay presencia de contaminantes. Por lo que, el valor mínimo de metilésteres debe ser de 96.5 % p/p cuando este se encuentra puro. La técnica usada para la determinación de este parámetro es la cromatografía de gases.

1.3.3. Variables que afectan la reacción de transesterificación en la obtención de biodiesel

1.3.3.1. Tipo de Alcohol y relación molar alcohol / aceite

Los alcoholes que se suelen emplear comúnmente para la producción de biodiesel son el etanol y metanol, siendo el último el más usado debido a sus propiedades fisicoquímicas, requiere menor cantidad de alcohol, mayor eficiencia de conversión, temperaturas menores, menor tiempo de reacción (Zannol, 2016). En cuanto a la relación molar alcohol/aceite, estequiométricamente la reacción se produce en una relación 3:1 para convertir triglicéridos a alquilésteres, siendo esta una reacción reversible se debe añadir en exceso el alcohol para la formación de ésteres (Tejada Tovar et al., 2013).

1.3.3.2. Porcentaje de Ácidos grasos libres y humedad

Barbosa Reina et al. (2014) recomienda que el porcentaje de ácidos grasos libres y el contenido de agua deben ser inferiores al 0.1 % y al 0.5 % en peso respectivamente, para evitar que se dé la saponificación en la reacción.

1.3.3.3. Temperatura, velocidad de agitación y tiempo de reacción

A fin de que se produzca una óptima transferencia de masa y energía, los factores de temperatura y velocidad de agitación son muy importantes (Miranda Peña, 2021). Castillo et al. (2017) indica con respecto a la temperatura de reacción lo ideal es 60 °C en caso de emplearse metanol como alcohol, debido a que la temperatura de ebullición del metanol es de 64 °C. La reacción de transesterificación es llevada a cabo en torno al punto de ebullición del alcohol con esto se aumenta la solubilidad del alcohol en el aceite originando así un aumento de la velocidad de reacción, por otra parte, trabajar con temperaturas elevadas que se encuentren encima de la óptima tienden a aumentar las tasas de saponificación (Diniz Vicente Pardal, 2012).

Con respecto a la velocidad de agitación según la bibliografía consultada en la tabla 4 estas se encuentran entre los rangos de 120-600 rpm. Dependiendo del tiempo de reacción efectuado se obtienen diferentes rendimientos, tal es el caso de que al emplearse 1h de reacción se tiene un rendimiento del 80 %, mientras que con 1h 30min el rendimiento oscila de 93-98 % (Hinojosa Campoverde, 2015).

1.3.3.4. Tipo y cantidad de catalizador

Los catalizadores que se emplean comúnmente en el proceso de transesterificación básico son el metóxido e hidróxido de sodio y potasio, estos son homogéneos (Barbosa Reina et al., 2014). El catalizador empleado se encuentra en un rango entre 0.5 % y 2 %, considerándose como un valor óptimo 1, debido a que con valores superiores el rendimiento disminuye y se produce la reacción de saponificación (Tejada Tovar et al., 2013).

2. METODOLOGÍA

2.1. Pretratamiento y caracterización del aceite vegetal reciclado

La materia prima con la cual se obtuvo biodiesel fue aceite vegetal reciclado. Este fue recolectado por la empresa ETAPA a través de diferentes puntos de acopio en la ciudad de Cuenca. Luego, fue trasladado a la planta de aguas residuales en el sector de Ucubamba donde recibió un tratamiento de separación por densidad entre material sólido y aceite. Finalmente, fue depositado en un tanque de almacenamiento del cual se retiró 6 litros como materia prima.

Con el objetivo de eliminar residuos sólidos y humedad del aceite, este fue sometido a un pretratamiento. El cual consistió primero en la filtración de la materia prima a través de papel filtro Whatman N° 40. Luego, un lavado con agua a 40 °C y una ligera agitación manual. Después se procedió a su decantación y separación para finalmente ser sometido a calentamiento en una estufa a 110 °C durante 4 horas.

Una vez realizado este proceso se determinó las principales características fisicoquímicas del aceite vegetal reciclado.

2.1.1. Densidad

Para obtener la densidad del aceite vegetal reciclado se tomó en cuenta la norma NTE INEN 35 (2012). Durante del proceso se evitó la inclusión de burbujas de aire tanto en la muestra como el agua destilada.

Para realizar el cálculo de la densidad relativa se aplicó la ecuación 1:

$$d_{25} = \frac{m_2 - m}{m_1 - m}$$

Ecuación 1

Siendo:

d_{25} = densidad relativa a 25 °C

m = masa del picnómetro vacío, g

m_1 = masa del picnómetro con agua destilada, g

m_2 =masa del picnómetro con la muestra, g.

Número de ensayos: 3.

2.1.2. Porcentaje de Ácidos grasos Libres

En un matraz se mezcló 10 gramos de aceite con 50 mL de etanol y 4 gotas de fenolftaleína. Por otra parte, se preparó 250 mL de una solución de hidróxido de sodio

0.1N. La cual se colocó en una bureta y se procedió a valorar la mezcla que contiene el aceite hasta que esta cambie a color rosa. Finalmente, se registró el volumen consumido de hidróxido de sodio (De La Cruz & Trujillo, 2017).

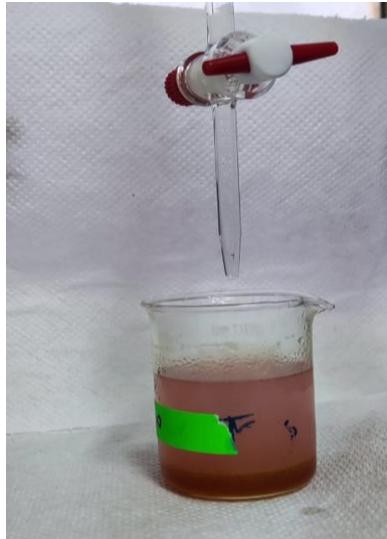


Figura 5. Determinación del porcentaje de ácidos grasos libres en el aceite vegetal reciclado.

Nota. Autoría Propia.

Para el cálculo del porcentaje de ácidos grasos se aplicó la ecuación 2:

$$\%AGL = \frac{N_{NaOH} \times fc \times V_{gastado(NaOH)} \times mg_{\text{Ácido Oleico}} \times 100}{m_{aceite}}$$

Ecuación 2

Siendo:

N_{NaOH} = Normalidad de NaOH, 0.1N

fc = factor de corrección

$V_{gastado(NaOH)}$ =volumen consumido de NaOH, mL

$mg_{\text{Ácido oleico}}$ =Peso molecular del Ácido oleico

m_{aceite} = muestra de aceite, en g.

Número de ensayos: 3.

2.1.3. Acidez Libre

La determinación del índice de acidez se basó en la norma NTE INEN 38 (1973). Se prepararon 3 soluciones (M1, M2 y M3). La solución M1 fue la mezcla de éter dietílico y etanol de 95 % (V/V), en proporción 1:1. Mientras que, M2 fue la disolución de hidróxido

de sodio 0.1 N. En el caso de M3, se disolvió 1g de fenolftaleína en 100 mL etanol de 95-96 % (V/V).

Luego, en un matraz se colocó M1 y se añadió 0.33 mL de M3. Con la ayuda de una bureta se agregó M2 hasta obtener un color rosado por 30 s. Esta se denominó solución neutralizada. Finalmente, como última etapa en un matraz erlenmeyer se pesó de 5 a 10 g de muestra de aceite. A la cual se agregó 50ml de solución neutralizada y se procedió a titular con M2.

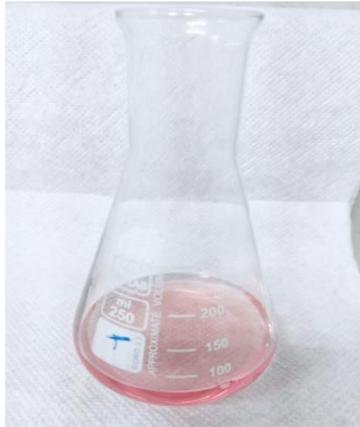


Figura 6. *Determinación de la acidez libre.*

Nota. Autoría Propia.

Para realizar el cálculo de la acidez libre se aplicó la ecuación 3.

$$A = \frac{M \times V \times N}{10 \times m}$$

Ecuación 3

Siendo:

A=acidez del producto, en porcentaje de masa

M=masa molecular del aceite usado para expresar el resultado

V=volumen de la solución de hidróxido de sodio o potasio empleado en la titulación en mL

N= normalidad de la solución de hidróxido de sodio o potasio.

m=masa de la muestra analizada en g.

Número de ensayos: 3.

2.1.4. Humedad

La determinación de la humedad se realizó aplicando la norma NTE INEN 39 (1973) con el método de la estufa, para ello:

Pesar en un crisol aproximadamente 5 g de la muestra. Colocar el crisol con la muestra en la estufa a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 h. A continuación enfriarlos hasta temperatura ambiente en el desecador y pesarlos. Repetir el calentamiento y enfriamiento, pero reduciendo el periodo de calentamiento a 30 min, hasta que la diferencia entre los resultados de dos operaciones de pesaje sucesivas no exceda de 0.002 g.

Para realizar el cálculo del contenido de humedad se aplicó la ecuación 4:

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} \times 100$$

Ecuación 4

Siendo:

%H = contenido de humedad, en porcentaje de masa

m = masa del crisol vacío

m_1 = masa del crisol con la muestra antes del calentamiento, en g

m_2 = masa del crisol con la muestra después del calentamiento, en g.

Número de ensayos: 3.

2.1.5. Viscosidad cinemática

En la determinación de la viscosidad se empleó el método del viscosímetro capilar de vidrio según la norma ASTM D445 (2021), se siguió el siguiente procedimiento:

Se calentó el agua y se la mantuvo una constante temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Luego, se colocó 6.5 mL de la muestra aproximadamente en el viscosímetro. A continuación, en un soporte se sujetó el viscosímetro de tal manera que se encontrase vertical y sumergido en el agua a baño maría.



Figura 7. Muestra en el viscosímetro sumergida.

Nota. Autoría Propia.

Se esperó un mínimo de 30 minutos hasta que la muestra que se encontraba en el viscosímetro alcanzó la temperatura de 40 °C. Transcurrido este tiempo, se succionó la muestra hasta lograr que este pase por el punto A. Luego, se retiró la pera y se cronometró el tiempo que tarda en fluir por el tramo AB y se registró este dato. Este proceso se hace por duplicado hasta que la diferencia sea de máximo 0.02 s.

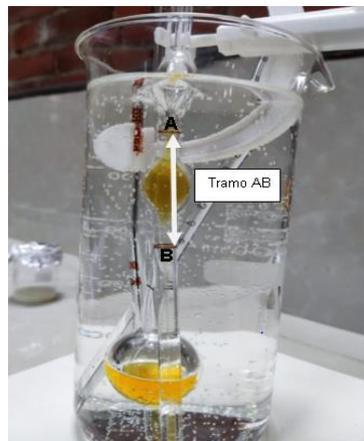


Figura 8. Muestra que fluye en el viscosímetro.

Nota. Autoría Propia.

Para realizar el cálculo de la viscosidad cinemática se aplicó la ecuación 5:

$$v_{40^{\circ}\text{C}} = k \times t$$

Ecuación 5

Siendo:

$v_{40^{\circ}\text{C}}$ = viscosidad cinemática a 40 °C, mm²/s

k = constante a 40 °C, 0.09143 mm²/s² ó (cSt/s)

T = tiempo en el que tardo en fluir la muestra el tramo AB, en s.

Número de ensayos: 2.

2.1.6. Análisis cromatográfico del aceite vegetal reciclado

La determinación de ácidos grasos se realiza mediante un análisis cromatográfico. Por lo que, primero fue necesario someter la muestra a un proceso de derivatización.

Se pesó 20 mg tanto de la muestra como del estándar interno (ácido nonadecanoico). En el caso del estándar se procedió a aforar con cloroformo y después se secó con nitrógeno gaseoso. Una vez el estándar listo, fue sometido al mismo proceso que la muestra principal. A las muestras previamente pesadas y el estándar se añadió 0.7 ml de KOH 1 M y 5.3 ml de metanol, se homogenizó y luego se incubó durante 1.5 horas a una temperatura constante de 55 °C. Cada 20 minutos se homogenizaba las muestras durante 5 segundos con la ayuda de un vortex. Una vez terminada la incubación se enfriaron hasta llegar a temperatura ambiente.



Figura 9. Incubación de las muestras.

Nota. Autoría Propia.

Una vez frías las muestras se añadió 0.58 ml de H₂SO₄ 12 M y se procedió a realizar un mezclado rotacional hasta que se forme un precipitado. Las muestras se someten a una incubación durante 1.5 horas a 55 °C en la cual cada 20 minutos se homogenizó durante 5 segundos con la ayuda de un vortex. Finalmente, las muestras se enfriaron hasta llegar a temperatura ambiente. A las muestras se le añade 3 ml de hexano y durante 5 minutos se someten a mezclado con la ayuda de un vortex.



Figura 10. Mezclado de las muestras en el vortex.

Nota. Autoría Propia.

Las muestras se sometieron a centrifugación durante 10 minutos a 3500 rpm. Luego se separó la fase acuosa del sobrenadante. Tomando en reserva el sobrenadante. Al sobrenadante previamente separado se le colocó 1 mm de capa de Na_2SO_4 y se mantuvo en reposo durante 10 minutos. Mientras tanto se adaptó un filtro al pivote de una jeringa y se sacó el émbolo. En el tubo de la jeringa previamente preparada se trasvasó el líquido sobrenadante y con la ayuda de su émbolo finalmente se filtró depositando el líquido en un vial. Obteniendo de esta manera la muestra lista para ser inyectada en el cromatógrafo.



Figura 11. Remoción de agua.

Nota. Autoría Propia.

Una vez obtenidas las muestras, se determina el contenido de ácidos grasos con el uso del cromatógrafo de gases. Esta determinación se realizó en el laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad de Cuenca, la muestra fue diluida 1:2 antes de inyectarse al equipo. Las condiciones y equipo que se usó se especifican en la tabla 5.

Tabla 5. *Cromatógrafo y parámetros de uso.*

Cromatógrafo Agilent Technologies 6890N network CG systems				
Inyector	Columna	Horno	Detector	Gas
250°C	Aplent CP7487	120 °C (4 min)	275°C	N2
Split	40:1, 60mx250umx2um	5 °C/min hasta 230 °C		175 °C
v=1ul	°C max	230 °C (10 min)		Vf=0.6 mL/min

Nota. Autoría Propia.

2.2. Reacción de transesterificación con catálisis básica

Para obtener el biodiesel por transesterificación con catálisis básica a partir de aceite vegetal reciclado se aplicaron los pasos indicados en la figura 16 y con las condiciones señaladas en la tabla 6.

Tabla 6. *Diseño experimental*

Catalizador	Concentración del catalizador (%)	Factores que se mantendrán constantes
NaOH	0.5	T:55 °C
	1	Agitación: 350 rpm Relación alcohol/aceite: 6/1
KOH	0.5	Tiempo de reacción: 1 h 30 min
	1	Un blanco Número de ensayos: 3 con cada catalizador y concentración

Nota. Fuente: Autoría Propia.

Se mezcló el catalizador (NaOH o KOH) con el metanol, y se sometió a calentamiento hasta alcanzar los 30 °C (Romanelli et al., 2016).



Figura 12. *Solución de Metóxido de sodio 1 %.*

Nota. Autoría Propia.

Se adicionó el metóxido alcalino al aceite vegetal reciclado previamente calentado hasta una temperatura de 30 °C, se controlaron las variables de temperatura, agitación y tiempo de reacción; los reactivos deben agregarse en el orden indicado. La reacción finalizó en 1h 30 min. Los productos obtenidos se separaron en un decantador durante 1 hora, trascurrido este tiempo se visualizó la formación de dos fases líquidas en la parte superior el biodiesel y en la inferior la glicerina.



Figura 13. *Decantación del biodiesel y glicerina.*

Nota. Autoría Propia.

El biodiesel obtenido se lavó 2 veces con abundante agua y se agitó fuertemente durante 5 minutos, debido a que el biodiesel es insoluble en agua destilada mientras que los otros compuestos (glicerina, sosa, jabón) son afines con la misma. Este lavado se realizó hasta alcanzar un pH de aproximadamente 7. Posteriormente el agua se separó del biodiesel, este último se encontró en la parte superior.



Figura 14. *Lavado del biodiesel.*

Nota. Autoría Propia.

Finalmente se eliminó el agua mediante calentamiento en estufa a 110 °C por 4 horas, luego se retiró y se dejó enfriar el biodiesel, para su posterior filtrado por papel Whatman N° 40.

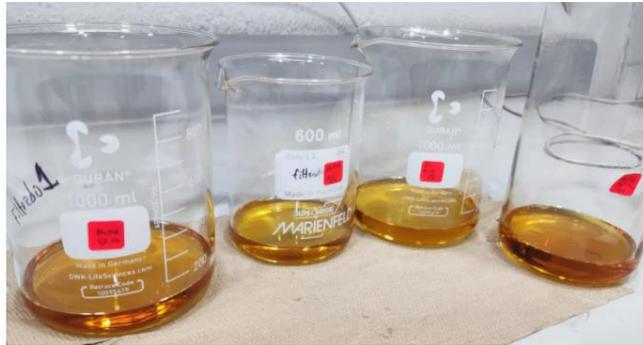


Figura 15. Biodiesel después del secado en estufa.

Nota. Autoría Propia.

A continuación, en la figura 16 se describe el procedimiento de la reacción de transesterificación:

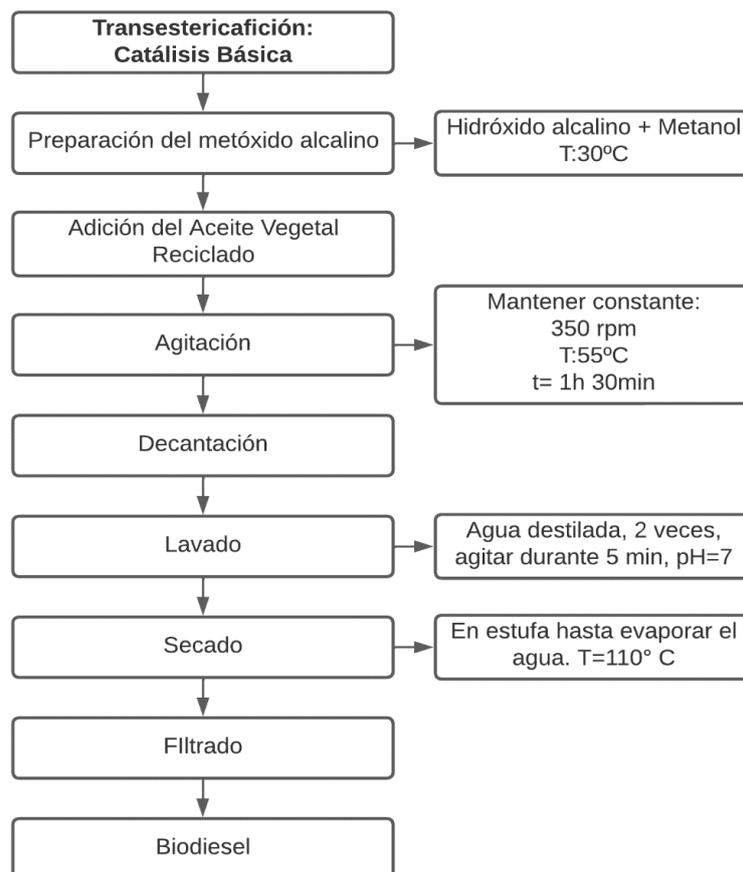


Figura 16. Síntesis del biodiesel.

Nota. Autoría Propia.

2.3. Caracterización del biodiésel

2.3.1. Propiedades fisicoquímicas

2.3.1.1. Densidad

Para la terminación de esta propiedad se usó el método del picnómetro descrito en la sección 2.1.1. El análisis se realizó por triplicado con cada concentración y catalizador.

2.3.1.2. Poder calorífico

Para la determinación del poder calorífico se usó la bomba calorimétrica del laboratorio de termodinámica y físico química de la Universidad de Cuenca. El quipo usado fue de la marca IKA y modelo C200. Para su uso se siguió el siguiente procedimiento:

Se encendió el equipo y se colocó 2 L de agua destilada con 2 ml de sulfato de cobre en su reservorio. Por otra parte, se pesó la muestra a ser analizada en el crisol y se la colocó en contacto con la mecha de la cámara de combustión, dicha cámara se selló y se inyectó una determinada cantidad de O_2 .

Se procedió a colocar la muestra en el equipo, ingresar los datos solicitados y registrar la medida del poder calorífico de cada muestra. El análisis se realizó por triplicado con cada concentración y catalizador.



Figura 17. Medición del poder calorífico de las muestras.

Nota. Autoría Propia.

2.3.1.3. Viscosidad

El proceso de medición de la viscosidad del biodiesel se basó en la norma ASTM D445 (2021). En este caso la determinación se realizó a 40 °C como especifica la norma ecuatoriana NTE INEN 2482 (2009). Para garantizar que la muestra se encuentre a la temperatura requerida es necesario que el viscosímetro cargado permanezca dentro del

baño maría un mínimo de 30 min. Luego se realizó la medición como se describe en la sección 2.1.5. El análisis se realizó por triplicado con cada concentración y catalizador.

2.3.1.4. Índice de acidez

Para la terminación de esta propiedad se usó el método descrito por la norma NTE INEN 0038 descrito en la sección 2.1.3. Para realizar el cálculo del índice de acidez se aplicó la ecuación 6

$$i = \frac{56,1 \times V \times N}{m}$$

Ecuación 6

Siendo:

i= índice de acidez del producto, en mg/g

V=volumen de la solución de hidróxido de sodio o potasio empleado en la titulación en mL

N= normalidad de la solución de hidróxido de sodio o potasio.

m=masa de la muestra analizada, en g.

Número de ensayos: 3 con cada concentración y catalizador.



Figura 18. *Determinación Índice de acidez.*

Nota. Autoría Propia.

2.3.1.5. Corrosión al cobre

Se aplicó el método descrito en la norma ASTM D130 (2019).

El proceso consistió en sumergir una lámina pulida de cobre en 30 ml de muestra de biodiesel en un tubo de ensayo. A su vez este tubo se sometió a una temperatura constante de 50 °C por un periodo de 3 horas. Al terminar el ensayo se procedió a secar las láminas de cobre y comparar con la escala de la norma ASTM D130 (2019). En la figura 19 se indica la escala de colores de 1A a 4C.



Figura 19. Escala de colores de corrosión al cobre.

Nota. Fuente: ASTM D130 (2019)

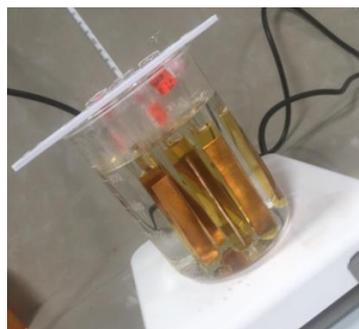


Figura 20. Determinación a la corrosión del cobre.

Nota. Autoría Propia.

El análisis se realizó por triplicado con cada concentración y catalizador.

2.3.2. Análisis cromatográfico del biodiesel

La determinación de FAMES en las muestras de biodiesel se realizó mediante cromatografía de gases. El proceso de manejo de las muestras y condiciones del equipo se describe en la sección 2.1.6. y no se realizan diluciones antes de inyectar las muestras derivatizadas.



Figura 21. *Muestras derivatizadas.*

Nota. Autoría Propia.

2.4. Análisis Estadístico

En base a los resultados obtenidos se determinó que biodiesel presentó las mejores características. Para esto se realizó un análisis ANOVA usando R y R-Studio y en caso de ser necesario un análisis post hoc para determinar donde se encuentran las diferencias estadísticamente significativas.

2.5. Determinación del porcentaje de rendimiento del biodiesel

El porcentaje de rendimiento de la ecuación se determinó registrando los valores de del peso del aceite vegetal usado y el peso del biodiesel (González Durán, 2012).

$$\% \text{ Rendimiento}_{\text{biodiesel}} = \frac{\text{peso en gramos}_{\text{biodiesel}}}{\text{peso en gramos}_{\text{aceite}}} \times 100$$

Ecuación 7

Número de ensayos: 3 de cada catalizador y concentración

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados y discusión: Características del Aceite Vegetal Reciclado

Las características organolépticas del aceite se describen en la tabla 7.

Tabla 7. Características organolépticas del aceite vegetal reciclado.

Características organolépticas	Estado Inicial	Estado Final
Color	Marrón oscuro	Marrón claro
Olor	Mariscos	Mariscos

Nota. Autoría Propia.

La tabla 8, registra las características físicas del aceite vegetal reciclado

Tabla 8. Resultados de la caracterización del aceite vegetal reciclado.

Parámetro	Valor
Densidad (g/mL)	0.9422 ± 0.018
% de Ácidos Grasos Libres	0.3114 ± 0.003
Acidez Libre (mg KOH/g)	0.3102 ± 0.003
Humedad	0.02422 ± 0.021
Viscosidad Cinemática (mm ² /s)	39.8700 ± 0.010

Nota. Autoría Propia.

La densidad obtenida de 0.9422 ± 0.018 g/mL se calculó con la ecuación 1. Este resultado es superior a lo descrito por Zarate Gamarra et al. (2022) que fue de 0.916 g/mL y a lo expuesto por Alvarado Pacheco et al. (2021) de 0.9181 g/mL, quienes analizaron aceite residual doméstico.

En cuanto al porcentaje de ácidos grasos libres, en la muestra se obtuvo 0.3114 ± 0.003 %. Este valor que se encuentra por debajo de 4 % que según Díaz y Guerrero (2018) es el valor máximo que puede tener un aceite que va a ser empleado en un proceso de transesterificación, en caso de que sea mayor se daría una saponificación (Díaz Alvarez & Guerrero Arrelucea, 2018). Por otra parte, la acidez libre fue superior a lo indicado en la NTE INEN 34 (1985) para mezclas de aceites vegetales comestibles, siendo un indicativo de que este aceite ha pasado por varios procesos de fritura.

Según Barbosa Reina et al. (2014) el porcentaje de humedad debe ser inferior a 0.5 %, porcentajes superiores causan problemas en la transesterificación y en la catálisis de la reacción.

El porcentaje de humedad para el aceite reciclado fue igual a $0.02422 \pm 0.021\%$, menor al 1.017 % reportado por Díaz Alvarez & Guerrero Arrelucea (2018) para aceite reciclado de cocina.

Para viscosidad cinemática se reportó $39.8700 \pm 0.010 \text{ mm}^2\text{s}$, menor a los valores reportados en otros estudios (Gaspar & Zorrilla, 2019; Quispe Puma, 2021). En el estudio de Gaspar y Zorrilla (2019) se analizó aceite usado de pollerías y se obtuvo una viscosidad de $106.7393 \text{ mm}^2\text{s}$. Un valor similar presenta Quispe Puma (2021) al trabajar con aceite doméstico residual, siendo su viscosidad de $106.6 \text{ mm}^2\text{s}$.

Los resultados del análisis por cromatografía se presentan a continuación en la tabla 9:

Tabla 9. Resultados del cromatógrafo: aceite vegetal reciclado.

# Pico	Tiempo de Retención	Área	%	Componente
1	10.1333	4.2381	0.6653	C14:0
2	12.1097	122.0016	19.1520	C16:0
3	12.9025	5.2262	0.8204	C16:1
4	14.6565	22.7828	3.5765	C18:0
5	15.6732	192.5921	30.2334	C18:1
6	15.7976	10.3618		X
7	17.0062	2.0806		X
8	17.4381	167.4447	26.2857	C18:2
9	19.9220	14.7821	2.3205	C18:3
10	28.9539	18.0674	2.8362	C24:0
11	34.9716	5.9895	0.9402	C22:6
12	36.9057	30.0891		X
13	40.0494	41.3628		X
Total			86.8302	

Nota. Autoría Propia.

Los componentes que se encontraron en mayor porcentaje fueron el ácido oleico (C18:1), el ácido linoleico (C18:2) y ácido palmítico con 30.2334 %, 26.2857 % y 19.1520 % respectivamente. Los resultados registrados se deben a que estos ácidos grasos se encuentran en mayor cantidad en el aceite vegetal comestible como en el: aceite de palma, maíz, girasol, soya, manteca de cerdo siendo los de mayor consumo (Alarcón Tarira & Romero Mosquera, 2021). Además, estos valores se usaron para determinar la

cantidad de alcohol y aceite que se empleó en la reacción de transesterificación, estos cálculos son descritos en el anexo 2.

3.2. Resultados y discusión: Características del Biodiesel Obtenido

Una vez caracterizado el aceite vegetal residual se procedió a la obtención del biodiesel con los diferentes catalizadores y sus respectivas concentraciones. En el caso del blanco cabe mencionar que no se obtuvo biodiesel. Debido a que, al aplicar el mismo tratamiento que a las muestras con catalizador, en la etapa de lavado se evidenció la formación de una mezcla homogénea. La cual no permitió la posterior separación de las fases. Esto se muestra en el anexo 4.

En cuanto al biodiesel obtenido empleando KOH y NaOH como catalizadores, se analizaron las siguientes propiedades: densidad, poder calorífico, viscosidad cinemática, índice de acidez, corrosión al cobre y composición de FAMES. Los cálculos realizados para cada uno de estos parámetros se encuentran en el anexo 5.

El análisis estadístico se realizó en el programa R y R-Studio y se aplicó a cada uno de los parámetros, con el objetivo de conocer la variabilidad al usar diferentes catalizadores y sus concentraciones. En todos los casos primero se determinó las condiciones de normalidad (prueba de Shapiro Wilk) y homocedasticidad (prueba de Levene) para proceder a la aplicación de un análisis de varianza (ANOVA).

El detalle de los cálculos estadísticos se presenta en el anexo 7 y el análisis de los resultados se indican a continuación:

a) Densidad

La densidad se determinó con la ecuación 1, y el procedimiento indicado en la sección 2.2.1. Los resultados de este parámetro se registran en la tabla 10.

Tabla 10. Densidades del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.

Catalizador y Concentración	E	Densidad (g/mL)	Promedio (g/mL)	Desviación estándar
NaOH 0.5 %	E1	0.88007	0.8792	± 0.0008
	E2	0.87839		
	E3	0.87920		
NaOH 1 %	E1	0.88010	0.8802	± 0.0003
	E2	0.88051		

	E3	0.88005		
KOH 0.5 %	E1	0.88032		
	E2	0.88195	0.8807	± 0.0011
	E3	0.87981		
KOH 1 %	E1	0.87934		
	E2	0.87771	0.8789	± 0.0010
	E3	0.87965		

Nota. Autoría Propia. *E=experimento.

La densidad del biodiesel presentó normalidad y homocedasticidad, los resultados del ANOVA se registran en la tabla 11.

Tabla 11. Resultados del ANOVA de la densidad del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.

Parámetro	Valor	Df	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	Pr(>F)	
Densidad	Min.	0.8777	P. 3	6.342e-06	2.114e06	2.723	0.114
	Max.	0.8820					
	Media	0.8798	R. 8	6.210e-06	87.763e07		
	DS.	± 0.0011					

Nota. Autoría Propia. *Df= grados de libertad, *P.=prueba, *R.=residuos, *DS.= Desviación estándar.

Según el resultado obtenido Pr(>F) 0.114 es mayor que 0.05.

La densidad media del biodiesel fue 0.8798 ± 0.0011 g/mL y se encuentra alrededor del resultado obtenido en el estudio de Zarate Gamarra et al. (2022) que fue de 0.876 g/mL y por Alvarado Pacheco et al. (2021) siendo el valor de 0.875 g/mL. Además de que las densidades determinadas se encuentran en los rangos establecidos por la norma NTE INEN 2482 (2009), ASTM D6751 (2020) y EN 14214 (2003) son 0.860 y 0.9 g/mL, cumpliéndose este parámetro indiferentemente de su concentración y catalizador. La importancia de cumplir con lo recomendado en la norma radica en que un valor inferior al mínimo provoca un aumento en el consumo del carburante (Zarate Gamarra et al., 2022).

b) Poder Calorífico

El poder calorífico fue determinado en el laboratorio de físico química de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Cuenca, estos resultados fueron calculados por la bomba calorimétrica que se indica en la sección 2.3.1.2 y se registran en la tabla 12.

Tabla 12. Resultados del poder calorífico del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.

Concentración	E	Poder Calorífico (J/g)	Promedio (J/g)	Desviación estándar
NaOH 0.5 %	E1	39758	39696.33	± 92.48
	E2	39741		
	E3	39590		
NaOH 1 %	E1	39714	39764.00	± 62.45
	E2	39834		
	E3	39744		
KOH 0.5 %	E1	40142	39726.00	± 364.91
	E2	39460		
	E3	39576		
KOH 1 %	E1	39744	39727.33	± 15.63
	E2	39725		
	E3	39713		

Nota. Autoría Propia. *E=experimento.

El poder calorífico del biodiesel presentó normalidad y homocedasticidad, los resultados del ANOVA se registran en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados del ANOVA del poder calorífico del biodiesel.

Parámetro	Valor	Df	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Poder calorífico	Min.	39460	P. 3	6908	2303	0.063
	Max.	40142				
	Media	39748	R. 8	291705	36463	
	DS.	±172.72				

Nota. Autoría Propia. *Df= grados de libertad, *P.=prueba, *R.=residuos, *DS.= Desviación estándar.

Según el resultado obtenido $Pr(>F)$ 0.978 es mayor que 0.05.

El biodiesel generalmente presenta un poder calorífico inferior al diésel convencional; esto lo demostraron Gorky et al. (2018) al analizar biodiesel producido a partir de diferentes tipos de aceite, obteniendo poderes caloríficos que varían entre 39.6-39.9 MJ/kg. Estos valores se encontraron por debajo de 43 MJ/kg que corresponde al poder calorífico del diésel convencional. El poder calorífico de 39.748 ± 0.1727 MJ/kg que se ha obtenido en este estudio, comparándolo con los valores expuestos por Gorky et al. (2018) fueron similares. En otro estudio (Rodríguez et al., 2017) emplearon una mezcla de aceites usados, el poder calorífico registrado fue de 37.250 MJ/kg, encontrándose por debajo de los resultados obtenidos en este trabajo. La causa por la que presentan un menor poder calorífico se debe a que el biodiesel producido tiene un menor número de insaturaciones y menor número de carbonos que el diésel (Sánchez Domínguez et al., 2016).

c) Viscosidad Cinemática

La viscosidad cinemática se calculó con la ecuación 5 y el proceso indicado en la sección 2.1.5. y los resultados se indican en la tabla 14.

Tabla 14. Viscosidad cinemática del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.

Concentración	E	Viscosidad Cinemática (mm ² /s)	Promedio (mm ² /s)	Desviación estándar
NaOH 0.5%	E1	4.7594	4.6957	± 0.05903
	E2	4.6428		
	E3	4.6849		
NaOH 1 %	E1	4.7283	4.6648	± 0.07532
	E2	4.6844		
	E3	4.5816		
KOH 0.5 %	E1	4.6204	4.6936	± 0.07680
	E2	4.7736		
	E3	4.6867		
KOH 1 %	E1	4.7018	4.6748	± 0.04911
	E2	4.7045		
	E3	4.6181		

Nota. Autoría Propia. *E=experimento.

La viscosidad cinemática del biodiesel presentó normalidad y homocedasticidad, los resultados del ANOVA se registran en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados del ANOVA de la viscosidad cinemática del biodiesel.

Parámetro	Valor		Df	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Viscosidad cinemática	Min.	4.582	P.	3	0.00201	0.000670	0.925
	Max.	4.774					
	Media	4.682	R.	8	0.03494	0.004368	
	DS.	± 0.0580					

Nota. Autoría Propia. *Df= grados de libertad, *P.=prueba, *R.=residuos, *DS.= Desviación estándar.

La viscosidad es la razón principal por la cual las grasas o aceites son sometidos a un proceso de transesterificación. Por lo que, la disminución de este valor luego de la reacción permite confirmar la conversión de aceite vegetal a ésteres (Zamora Burbano, 2015). En este caso se observó dicha disminución ya que la viscosidad de la materia prima fue de 39.8700 mm²/s. Mientras que, el valor obtenido de biodiesel fue de 4.682 ± 0.0580 mm²/s.

El biodiesel puede llegar a tener altas viscosidades que representan una desventaja para su uso ya que puede causar una mala atomización. Sin embargo, también se debe considerar una viscosidad mínima que permita evitar las pérdidas de potencia en el motor (Gaspar & Zorrilla, 2019). Debido a esto, los límites tanto máximo y mínimo están estipuladas en distintas normas. En el caso de la norma ecuatoriana NTE INEN 2482 (2009) establece que la viscosidad debe encontrarse entre 3 a 5 mm²/s. Mientras que, la norma EN 14214 (2003) permite valores entre 3.5-5 mm²/s. Por su parte, la norma ASTM D6751 (2020) establece los límites entre 1.9-6.0 mm²/s.

Tomando en cuenta los límites establecidos por las diferentes normas y la viscosidad obtenida del biodiesel de 4.682 mm²/s. Se afirma que la viscosidad del producto cumple y está dentro los rangos establecidos por las normativas mencionadas.

d) Índice de Acidez

El índice de acidez se calculó con la ecuación 6 aplicando lo indicado en la sección 2.1.3. los resultados obtenidos se registran en la tabla 16.

Tabla 16. Índice de acidez del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.

Catalizador y Concentración	E	Índice de acidez (mg KOH/g)	Promedio (mg KOH/g)	Desviación estándar
NaOH 0.5 %	E1	0.2242	0.2989	± 0.0647
	E2	0.3363		
	E3	0.3362		
NaOH 1 %	E1	0.2240	0.3736	± 0.1295
	E2	0.4485		
	E3	0.4483		
KOH 0.5 %	E1	0.2802	0.3550	± 0.0856
	E2	0.4483		
	E3	0.3364		
KOH 1 %	E1	0.3365	0.4107	± 0.0647
	E2	0.3355		
	E3	0.5601		

Nota. Autoría Propia. *E=experimento.

El índice de acidez del biodiesel presentó normalidad y homocedasticidad, los resultados del ANOVA se registran en la tabla 17.

Tabla 17. Resultados del ANOVA del índice de acidez del biodiesel.

Parámetro	Valor	Df	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	Pr(>F)	
Índice de Acidez	Min.	0.2240	P. 3	0.01121	0.003737	0.46	0.718
	Max.	0.4485					
	Media	0.3502	R. 8	0.06495	0.008119		
	DS.	± 0.1198					

Nota. Autoría Propia. *Df= grados de libertad, *P.=prueba, *R.=residuos, *DS.= Desviación estándar.

El índice de acidez en el biodiesel mide los ácidos grasos libres y su degradación. A su vez el valor promedio de esta propiedad en el biodiesel obtenido a partir de aceite reciclado de cocina es 0.345 mg KOH/g (Díaz y Guerrero 2018). En este caso se obtuvo

un valor muy cercano al reportado ya que el índice de acidez fue de 0.3502 ± 0.1198 mg KOH/g.

Un bajo índice de acidez en el biodiesel es un indicador de la eficacia de la reacción de transesterificación. En el caso de que este valor fuera elevado podría ocasionar daños en las partes metálicas del motor (García-Muentes et al. 2018). Por otra parte, las normas establecen el valor máximo de acidez que puede tener el biodiesel. Según la norma ecuatoriana NTE INEN 2482 (2009) y la norma europea EN 14214 (2003) el valor máximo del índice de acidez es de 0.5 mg KOH/g. Mientras que, la norma ASTM D6751 (2020) permite el valor máximo de 0.8 mg KOH/g. Tomando en cuenta estos límites, el índice de acidez obtenido se encuentra por debajo del valor establecidos por las diferentes normas.

e) Corrosión

El método usado para la determinación de la corrosión al cobre se basó en la norma ASTM D130 (2019). El resultado se obtuvo comparando el color de cada una de las tiras de cobre con la escala de colores dada por la misma norma. En este caso todas las muestras presentaron el mismo valor en la escala. Por lo cual, no se analizó de manera estadística. De manera visual se muestra los resultados en las figuras 22-25.



Figura 22. Corrosión al cobre causada por biodiesel obtenido con NaOH 0.5 %.

Nota. Autoría Propia.



Figura 23. Corrosión al cobre causada por biodiesel obtenido con NaOH 1 %.

Nota. Autoría Propia.



Figura 24. Corrosión al cobre causado por biodiesel obtenido con KOH 0.5 %.
Nota. Autoría Propia.



Figura 25. Corrosión al cobre causado por biodiesel obtenido con KOH 1 %.
Nota. Autoría Propia.

En todos los casos de estudio las láminas de cobre presentaron un leve deslustre. Esto permitió determinar la escala en la cual se encontraban, siendo esta en "1a". Para esta propiedad la norma NTE INEN 2482 (2009) y ASTM D6751 (2020), establece que el grado de corrosión máxima es de 3. Mientras que, la norma EN 14214 (2003) establece el máximo de 1. En el primer caso, el biodiesel obtenido se encuentra por debajo del límite. Sin embargo, en el caso de la norma EN 14214 (2003) se encuentra sobre el límite. Por lo que el biodiesel obtenido no es corrosivo para los motores.

f) Porcentaje de FAMES

El contenido de FAMES en el biodiesel obtenido con diferentes catalizadores y concentraciones se determinó con lo indicado en la sección 2.3.2. y los resultados obtenidos se registran en la tabla 18.

Tabla 18. Porcentaje de FAMES y contenido de ácido linolénico del biodiesel: NaOH y KOH con diferentes concentraciones.

Catalizador y Concentración	E	%FAMES	Promedio %FAMES	Desviación estándar % FAMES	% Ácido Linolénico (C18:3)	Promedio C18:3	Desviación estándar C18:3
NaOH 0.5 %	E1	93.2771			2.5604		
	E2	93.7549	93.2993	± 0.4450	2.5474	2,5373	± 0.0294
	E3	92.8658			2.5042		
	E1	90.7550			2.4497		

NaOH 1 %	E2	93.0674	88.5573	± 5.9231	2.5632	2,4465	± 0.1183
	E3	81.8495			2.3266		
KOH 0.5 %	E1	92.1160			2.5419		
	E2	94.0299	93.0840	± 0.9571	2.5974	2,5383	± 0.0609
	E3	93.1060			2.4757		
KOH 1 %	E1	94.5221			2.5375		
	E2	96.0229	94.7735	± 0.7639	2.6392	2,6185	± 0.0729
	E3	95.0250			2.6789		

Nota. Autoría Propia. *E=experimento.

El porcentaje de metil ésteres del biodiesel presentó normalidad y homocedasticidad, los resultados del ANOVA se registran en la tabla 19.

Tabla 19. Resultados del ANOVA de la composición química de FAMES del biodiesel.

Parámetro	Valor	Df	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	Pr(>F)
% FAMES	Min.	81.85	P. 3	71.27	23.757	2.584
	Max.	96.02				
	Media	92.53	R. 8	73.56	9.195	
	DS.	± 3.6286				0.126

Nota. Autoría Propia. *Df= grados de libertad, *P.=prueba, *R.=residuos, *DS.= Desviación estándar.

El resultado obtenido Pr(>F) 0.126 es mayor que 0.05, esto denota que no existen diferencias estadísticamente. Para el análisis el porcentaje de ácido linolénico es un parámetro que se debe tener en cuenta se procede a determinar lo indicado en la tabla 20.

Tabla 20. Estadísticos descriptivos del porcentaje de C18:3 presentes en el biodiesel.

Componente	Media	Desviación estándar	Varianza de la muestra
C18:3	2.5352	± 0.0916	0.0084

Nota. Autoría Propia.

Según lo indicado por la norma EN 14214 (2003) y la NTE INEN 2482 (2009) el contenido de ésteres totales mínimo es de 96.5 % y el contenido de éster metílico de ácido linolénico máximo es del 12 %. Al analizar la media de 92.53 ± 3.6286 % del

contenido de FAMEs presentes en las muestras se registró un valor inferior a lo solicitado. Mientras que, el contenido éster metílico de ácido linolénico con una media de 2.5352 ± 0.0916 % cumplió con lo establecido. En el estudio de la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado, se obtuvo un contenido de ésteres del 94.21 % y 96.15 % (Acevedo Páez et al., 2019) estos valores son superiores a la media obtenida en este estudio. Estas diferencias se deben a las condiciones de operación que se aplicó en cada investigación.

g) Porcentaje de rendimiento

El porcentaje de rendimiento de la reacción se determinó con la ecuación 7 indicada en la sección 2.3., los cálculos se encuentran en el anexo 6 y los resultados se registran en la tabla 21.

Tabla 21. Valor promedio del rendimiento de cada catalizador y concentración.

Catalizador y concentración	E	% Rendimiento	Promedio	Desviación estándar
NaOH 0.5 %	E1	88.0317	85.96	± 2.1153
	E2	83.8040		
	E3	86.0534		
NaOH 1 %	E1	78.1405	78.18	± 0.9336
	E2	79.1296		
	E3	77.2635		
KOH 0.5 %	E1	94.9555	93.19	± 1.6689
	E2	92.9773		
	E3	91.6381		
KOH 1 %	E1	95.9446	93.31	± 3.0218
	E2	93.9664		
	E3	90.0099		

Nota. Autoría Propia. *E=experimento.

El rendimiento del biodiesel presentó normalidad y homocedasticidad, los resultados del ANOVA se registran en la tabla 22.

Tabla 22. Resultados del ANOVA de la caracterización del biodiesel.

Parámetro	Valor	Df	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Rendimiento	Min. 77.26	P. 3	465.8	155.26		5.42e-5
	Max. 95.94					
	Media 87.66	R. 8	34.5	4.32	35.98	
	DS. ± 6.7441					

Nota. Autoría Propia. *Df= grados de libertad, *P.=prueba, *R.=residuos, *DS.= Desviación estándar.

Según el resultado de la columna Pr(>F), el valor P ($5.42e-5$) < 0.05. Por lo tanto, si existe diferencias estadísticamente significativas entre el tipo y concentración de catalizador usado. Para conocer la diferencia entre las medias de los grupos se realizó un análisis Post Hoc o prueba de comparación múltiple.

Análisis Post Hoc

El análisis Post Hoc se realizó mediante la técnica Pairwise, donde el método de ajuste del valor P es Holm, los resultados se indican en la tabla 23.

Tabla 23. Análisis Post Hoc del porcentaje de rendimiento.

	R.KOH.05	R.KOH.1	R. NaOH.05
R.KOH.1	0.94685	-	-
R. NaOH.05	0.00754	0.00754	-
R. NaOH.1	0.00012	0.00012	0.00712

Nota. Autoría Propia.

Según los resultados de la tabla 23, existen diferencias significativas entre los siguientes rendimientos: KOH y NaOH al 0.5 % (0.00754); KOH al 0.5 % y NaOH 1 % (0.00012); KOH al 1 % y NaOH 0.5 % (0.00754); KOH y NaOH al 1 % (0.00012); NaOH 0.5 % y NaOH 1 % (0.00712).

De manera general se observa variabilidad en los resultados del rendimiento al haber trabajado con diferentes catalizadores (NaOH y KOH) y concentraciones de estos (0.5 y 1 %). En el caso en el que se usó NaOH los rendimientos que se obtuvieron fueron de 85.96 ± 2.1153 % y 78.18 ± 0.9336 para la concentración de 0.5 % y 1 % de NaOH respectivamente.

Por otra parte, cuando se usó KOH, se evidenció un aumento del rendimiento con respecto al NaOH como catalizador. Esto se debe a que el KOH presentó una mayor solubilidad en el metanol que el NaOH. En este caso se obtuvo rendimientos de $93.19 \pm 1.6689 \%$ y $93.31 \pm 3.0218\%$ para las concentraciones de 0.5 y 1 % de KOH.

Esta variabilidad en los resultados se respalda con el análisis Post Hoc en la cual, mediante una comparación múltiple se muestra en que caso se obtuvo un mayor rendimiento. Al analizar entre las dos concentraciones de NaOH (0.5 y 1 %) como catalizador, se obtiene que la concentración de 0.5 % dio un mayor rendimiento. Mientras que, en el KOH en las dos concentraciones analizadas (0.5 y 1 %) no hubo una variación estadísticamente significativa.

En el caso de KOH al no existir una diferencia entre los dos rendimientos, se debería considerar otros factores como las características del biodiesel obtenido, el acceso o precio del catalizador. Debido a que en este estudio las características analizadas del biodiesel resultaron ser estadísticamente no significativas. Se toma en cuenta la accesibilidad al reactivo, el cual es controlado. Por otra parte, al emplearse el 1 % de concentración se duplica el costo del reactivo. Por lo tanto, la concentración de 0.5 % de KOH resulta ser la óptima.

Para comparar los dos catalizadores se toma en cuenta la mejor concentración de cada uno (0.5 % de NaOH y KOH) y se obtiene que existe una variación significativa siendo el KOH al 0.5 % el de mayor rendimiento.

Por otra parte, el rendimiento obtenido del $78.18 \pm 0.9336 \%$ al usar 1 % de NaOH como catalizador es menor al reportado por Flores Patiño (2017) quien alcanzó un rendimiento del 93.75 %. Por otra parte, Miranda Peña (2021) reporta un rendimiento del 91.789 % al usar 0.5 % de KOH como catalizador, valor que es ligeramente inferior al obtenido en este trabajo, el cual fue de $93.19 \pm 3.0218\%$.

El estudio de "Análisis de Parámetros para la Producción de Biodiesel a partir de Aceite de Cocina Usado" realizado por Tovar Torres (2019) trabajó en las mismas condiciones que este estudio en cuanto al tipo y concentración de catalizador (KOH al 1 %), relación alcohol/ aceite (6:1), tiempo de reacción (1.5) y agitación (350 rpm) obteniendo un 96 % de rendimiento.

En todos los casos se debe considerar que se está analizando con respecto al tipo y concentración de catalizador. Se debe recordar que variables como la temperatura,

tiempo de reacción, agitación, relación alcohol/aceite e incluso el tipo de materia prima pueden afectar el rendimiento de obtención de biodiesel.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Las propiedades fisicoquímicas del aceite vegetal reciclado, luego de un pretratamiento fueron: densidad de 0.9422 ± 0.018 g/mL, 0.3110 ± 0.003 % de ácidos grasos libres, índice de acidez de 0.3102 ± 0.003 mg KOH/g, humedad de 0.02422 ± 0.021 % y viscosidad de 39.8700 ± 0.010 mm²/s. Con la determinación de estas propiedades y basados en estudios similares que analizan las características del aceite vegetal reciclado, se verificó que la materia prima era apta para la obtención de biodiesel. Además, en el análisis cromatográfico se evidenció que el ácido oleico C18:1 fue el de mayor proporción con un 30.2334 %. Este valor obtenido y la relación molar 6:1 alcohol/aceite previamente establecida, permitió determinar que por cada 68.7122 g de metanol se usen 101.1 g de del aceite vegetal reciclado

En la reacción de transesterificación al trabajar con NaOH o KOH al 0.5 y 1 % como catalizadores, se obtuvo biodiesel. Las condiciones de operación que se mantuvieron constantes fueron: 55 °C, 1.5h, 350rpm y la relación molar 6:1 de alcohol/aceite. Mientras que, en el caso del blanco no se produjo la reacción.

El análisis ANOVA con un 0.05 de nivel de significancia, determinó que las propiedades de: densidad, poder calorífico, viscosidad, índice de acidez y composición de metil ésteres no tienen diferencias estadísticamente significativas. Mientras que, la corrosión al cobre no presentó variabilidad entre catalizadores o concentraciones. Caso contrario ocurrió con el porcentaje de rendimiento en el que se realizó un análisis post hoc, determinándose al KOH al 0.5 % como el catalizador y concentración óptima. Cabe recalcar que también se tomó en cuenta el costo y accesibilidad del reactivo.

Las propiedades del biodiesel obtenido con KOH al 0.5 % de concentración, seleccionado por su mayor rendimiento fueron: densidad de 0.8807 ± 0.0011 g/mL, viscosidad de 4.6936 ± 0.07680 mm²/s, índice de acidez 0.3550 ± 0.0856 mg KOH/g, corrosión 1a y 93.0840 ± 0.9571 % de FAMES y poder calorífico de 39726 ± 364.91 J/g. Al analizar estas propiedades, en el caso de la composición de FAMES no se cumplió con lo requerido en la norma EN 14214 y NTE INEN 2482. El poder calorífico por su parte no está establecido en las normas analizadas. Sin embargo, se llegó a valores expuestos por estudios similares. En cuanto a las demás propiedades, estas cumplen con lo establecido en las normativas ASTM D6751, NTE INEN 2482 y EN14214.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda estudiar la influencia de otras variables en la reacción de transesterificación y en la obtención del porcentaje de FAMEs en el biodiesel. Debido a que esta propiedad no llega a valor mínimo que exige la norma.

Determinar las impurezas que se encuentran durante la corrida de la muestra en el cromatógrafo.

Realizar estudio para la aplicación de biodiesel en un motor y compararlo con el diésel de origen petroquímico.

Incrementar el número de análisis a la calidad de biodiesel, enfocándose en los parámetros que dependen del clima. Ya que, Ecuador puede llegar a tener climas extremos en los que la calidad se vea afectada.

Estudiar el tiempo de estabilidad del biodiesel antes de sufrir algún tipo de degradación que afecte su calidad y uso.

Realizar un estudio económico del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceite reciclado, para poder establecer el costo de producto.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo Páez, J. C., Urbina Suárez, N. A., Acevedo Rodríguez, A. Z., & Becerra Orozco, L. C. (2019). Estudio de la producción de biodiesel por procesos químicos y enzimáticos a partir de aceite de cocina usado. *Aibi revista de investigación, administración e ingeniería*, 7(2), 20–26. <https://doi.org/10.15649/2346030X.566>
- Alarcón, R. (2014). *Obtención de biodiesel a partir de mezclas de aceite usado de cocina y aceite de palma*. Universidad Santo Tomás.
- Alarcón Tarira, M. M., & Romero Mosquera, R. L. (2021). *Estudio y diseño de un sistema de recolección de aceite vegetal usado para el sector comercial y residencial del norte de la ciudad de Guayaquil*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21048>
- Alvarado Pacheco, J. J., Canul Ku, J. A., Quijano Carreón, F. N., Gamboa Quijano, Y. J., & Herrera Chalé, F. G. (2021). Aprovechamiento de aceite residual doméstico de Puerto Progreso, Yucatán, como recurso para la producción de un biodiesel. *RINDERESU*, 5(1), Article 1. <http://rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/57>
- Alvarez, J. (2013). *Obtención de biodiesel a partir de aceites usados en casa habitación de la comunidad del Refugio*. Universidad Tecnológica de Tijuana.
- ARC. (2021). *Aceite reciclado de cocina*. <https://www.arc.ec/2186/0/sobre-nosotros>
- ASTM. (2019). *Standard test method for corrosiveness to copper from petroleum products by copper strip test*. <https://www.astm.org/d0130-19.html>
- ASTM. (2020). *Standard specification for biodiesel fuel blend stock (B100) for middle distillate fuel*. The American Society for Testing and Materials. <https://www.astm.org/d6751-20a.html>
- ASTM. (2021). *Standard test method for kinematic viscosity of transparent and opaque liquids (and calculation of dynamic viscosity)*. <https://www.astm.org/d0445-21.html>

- Avellaneda, F. (2010). *Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal*. Universitat Rovira I Virgili.
- Barbosa Reina, C., Jiménez Ramírez, L. N., & Pedraza Morales, N. (2014). Obtención de biodiesel (etil-éster) mediante catálisis básica a nivel planta piloto derivado de aceites usados de la industria alimenticia. *Publicaciones e Investigación*, 8, 99–116. <https://doi.org/10.22490/25394088.1293>
- Beltrán Velásquez, E., & Gaviria Navarro, J. (2020). *Evaluación de los parámetros cinéticos de la transesterificación de los aceites vegetales*. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8102>
- B.P. (2021, julio). Statistical review of world energy 2021 | 70th edition. *B.P. global*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
- Caro Becerra, J. L., Castellanos Rangel, L., Romero Gonzalez, F., & Ruiz Morales, M. del R. (2017). *Generación de biodiesel a partir de residuos de aceites, utilizando un reactor con PLC para la automatización del proceso*. No.4, 12.
- Carrión, J. (2019). *Industrialización del aceite vegetal de la especie Sacha Inchi (Plukenetia volubilis)*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Castellanos, I. C., González-Peralta, K., & Pinzón-Torres, S. J. (2018). Microalgas como alternativa sostenible para la producción de biodiesel. *Revista Ontare*, 6. <https://doi.org/10.21158/23823399.v6.n0.2018.2425>
- Castillo Fernández, K. (2018). *Caracterización teórica de parámetros del biodiésel y estudio de algunas de sus emisiones*. [Universidad Politécnica de Madrid]. https://oa.upm.es/53357/1/TFG_KEVIN_CASTILLO_FERNANDEZ.pdf
- Castillo, O. S., Torres Badajoz, S. G., Núñez Colín, C. A., Peña Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., & Rodríguez Núñez, J. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: Avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-88972017000300337&script=sci_arttext

- Chamorro Portilla, E. G., Lagos Riascos, J. S., López Toro, K. M., Meza Delgado, Y., Montezuma Villota, M. de los Á., & Bolaños, A. (2018). Obtención de biodiesel a partir de aceite usado. *Boletín Informativo CEI*, 5(2), 86–92. <http://editorial.umariana.edu.co/revistas/index.php/BoletinInformativoCEI/article/view/1661>
- Claramunt Vallespí, R. M., & Santos, S. E. (2017). *CATÁLISIS EN QUÍMICA ORGÁNICA*. Editorial UNED.
- Corach, J. (2018). *Propiedades eléctricas de biodiesel, aceites vegetales y sus mezclas con gasoil: Correlación con otras características fisicoquímicas y su aplicación a la tecnología de biocombustibles*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/130227>
- De La Cruz López, C. J., & Trujillo Luna, C. A. (2017). Obtención de biodiésel a partir de aceite comestible residual del comedor de la UNAC. *Repositorio institucional – UNAC*. <http://repositorio.unac.edu.pe/handle/20.500.12952/3595>
- Díaz Alvarez, M. C., & Guerrero Arrelucea, S. M. (2018). Influencia del índice de acidez en el poder calorífico del biodiesel, obtenido a partir de aceites reciclados de cocina. *Repositorio Institucional - UNS*. <http://repositorio.uns.edu.pe/handle/UNS/3046>
- Diniz Vicente Pardal, A. C. (2012). *Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: Nuevos métodos de síntesis*. <https://dehesa.unex.es:8443/handle/10662/326>
- Dorado, D. J., Hurtado, A. M., & Martínez-Correa, H. A. (2017). Extracción supercrítica de aceite de semillas de papaya (carica papaya): Composición y propiedades fisicoquímicas. *Vitae*, 24(2 (2)), 35–45. [https://doi.org/10.17533/10.17533/udea.vitae.v24n2\(2\)a05](https://doi.org/10.17533/10.17533/udea.vitae.v24n2(2)a05)
- Echeverría Echeverría, J. C. (2018). *Análisis de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel a base de aceite de higuera B10*. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8042>
- EN. (2003). *Automotive fuels. Fatty acid methyl esters (FAME) for diesel engines. Requirements and test methods*. European committee for standardization. <https://www.en-standard.eu/din-en-14214-liquid-petroleum-products-fatty-acid->

methyl-esters-fame-for-use-in-diesel-engines-and-heating-applications-requirements-and-test-methods-includes-amendment-2019/

- Ferrer Serrano, C., Zumalacárregui de Cárdenas, B., & Mazorra Mestre, M. (2020). Caracterización físico química del aceite de semillas de moringa olífera. *Centro Azúcar*, 47(4), 1–11. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2223-48612020000400001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Flores Patiño, E. E. (2017). *Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite vegetal usado y su efecto en las presentaciones de un MCI A*. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/3646>
- Franco-Pérez, J., Díaz-Velázquez, M., Lafargue-Pérez, F., & Santos-Mora, Y. (2018). Epoxidación del aceite vegetal de jatropha curcas I. Con ácido peracético. *Tecnología Química*, 38(2), 380–385. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-61852018000200015&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Fuentes Campos, M., Marleny, A., & Susana, G. (2016). Ondas ultrasónicas aplicadas en el biodiésel producido con diferentes tipos de aceites vegetales. *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, 19(38), 147–151. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v19i38.13581>
- García Muentes, S. A., Lafargue Pérez, F., Labrada Vázquez, B., Díaz Velázquez, M., & Sánchez del Campo Lafita, A. E. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la jatropha curcas I. En la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), 142–158. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2224-54212018000100012&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Gaspar, F., & Zorrilla, P. (2019). *Evaluación de la dosis de Na(OH) y metanol en la producción de biodiésel a partir de los aceites usados de las pollerías*. Universidad Nacional del Centro de Perú.
- González Durán, E. E. (2012). *Caracterización fisicoquímica de biodiésel producido a partir de tres variedades de piñón (jatropha curcas)*. 33.

- Gorky, G., Rivera, A., & Morales, A. (2018). Efecto del poder calorífico en la relación de combustión del motor con distintos tipos de biodiesel. *NEXOS CIENTÍFICOS - ISSN 2773-7489*, 2(1), 20–24. <https://nexoscientificos.vidanueva.edu.ec/index.php/ojs/article/view/16>
- Guerrero De La A, B. N., & Kocher Solano, K. N. (2019). *Obtención de éster metílico (biodiesel), mediante reacción de transesterificación del aceite de moringa oleífera* [Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química.]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/45466>
- Hinojosa Campoverde, V. S. (2015). *Producción de biodiesel a partir de microalgas nativas cultivadas en un fotobiorreactor a escala laboratorio* [Universidad San Francisco de Quito]. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/4798>
- 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>
- Juárez, M. D., & Sammán, N. (2007). *El deterioro de los aceites durante la fritura*. 13.
- Laborde, M. F., Serna Gonzalez, M., Ponce Ortega, J. M., Pagano, A. M., & Gely, M. C. (2017). *Optimización del proceso de esterificación de aceites vegetales usados para la producción de biodiesel*. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/59115>
- Lamoureux, J. H. (2007). *Diseño conceptual de una planta de biodiesel*. Universidad de Chile.
- Lázaro Vela, M. (2018). *Alteraciones de los aceites vegetales durante la fritura*. Universidad de Sevilla.
- Llanes, E., Rocha, J., Salazar, P., & Medrano, J. (2017). Producción e impacto del biodiesel: Una revisión. *INNOVA Research Journal*, 2(7), 59–76. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n7.2017.229>
- López, L., Bocanegra, J., & Malagón Romero, D. (2015). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite de cocina usado. *Ingeniería y Universidad*, 19(1), 155–172. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-1.sprq>

- López Quiñones, D. A. (2017). *Obtención de biodiésel a partir de residuos de aguacate producido mediante el método de transesterificación en un reactor tipo batch* [Universidad Libre]. <http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10384>
- Martínez Ullate, P. (2016). *Biocombustibles y su mercado internacional*. Universidad Nacional de Rosario.
- Medina Pérez, E., Ruiz Domínguez, M. R., Morales Espinoza, J., & Cerezal Mezquita, P. (2019). Evaluación del perfil de ácidos grasos de *isochrysis galbana* mediante el uso de métodos ácidos y alcalinos de transesterificación. *Informador técnico*, 83(1), 66–75. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7030372>
- Miranda Peña, N. A. (2021). Obtención del biodiesel a partir del aceite vegetal residual mediante el proceso de transesterificación a nivel laboratorio, en Sullana, 2019-2020. *Universidad Nacional de Piura*. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/20.500.12676/3178>
- Mofijur, M., Rasul, M. G., Hyde, J., Azad, A. K., Mamat, R., & Bhuiya, M. M. K. (2016). Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. *Renewable and sustainable energy reviews*, 53, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.046>
- Morocho, E. (2019). *Diagnóstico de la generación y disposición final del aceite vegetal residual en restaurantes y locales de comida rápida en la ciudad de Azogues provincia del Cañar*. Universidad de Cuenca.
- NTE INEN. (1973a). *Grasas y aceites comestibles. Determinación de la acidez*. Instituto Ecuatoriano de normalización. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/38.pdf>
- NTE INEN. (1973b). *Grasas y aceites comestibles. Determinación de la pérdida por calentamiento*. Instituto Ecuatoriano de normalización. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/39.pdf>
- NTE INEN. (1985). *Mezclas de aceites vegetales comestibles. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de normalización. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/34.pdf>

- NTE INEN. (2009). *Biodiesel. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de normalización. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/2482.pdf>
- NTE INEN. (2012). *Grasas y aceites de origen animal y vegetal. Determinación de la densidad relativa*. Instituto Ecuatoriano de normalización. https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_35-1.pdf
- Pacheco Rojas, D. (2016). *Análisis exergo-económico en el sistema energético mexicano como una herramienta para el desarrollo sustentable*.
- Pantoja Cabrera, D. A. (2018). *Caracterización de las propiedades fisicoquímicas de biodiesel extraído de aceite reciclado de origen vegetal*. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/7140>
- Paredes, J., & Vidal, M. (2017). *Diseño y construcción de una planta de producción de biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado*. Universidad San Francisco de Quito.
- Piña Contreras, S. (2020). *Análisis de la esterificación por catálisis ácida homogénea como pretratamiento de aceite modelo acidificado*. http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4925
- Quispe Puma, K. Y. (2021). Obtención de biodiesel a partir de la mezcla de aceite doméstico residual y aceite de soya en la región del Cusco—2020. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/61327>
- Ramírez Nieves, T. (2018). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de aceites y grasas residuales potenciales para la producción de biocombustibles. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencia y Nanotecnología*, 9(16), 148. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2016.16.56909>
- Ramírez-Verduzco, L. F., Rodríguez-Rodríguez, J. E., & Jaramillo-Jacob, A. del R. (2012). Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel*, 91(1), 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.070>

- Reyes Vargas, H. D. (2018). Estudio de la generación de aceites usados en los diferentes establecimientos de comida y su reutilización industrial. *Universidad Nacional de Piura / UNP*. <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/1381>
- Rodríguez, D. A. R., Ávila, J. M. R., & Romero, D. M. (2017). *Obtención de biodiesel a partir de mezclas de aceite de cocina usado y aceite de higuera*. 9.
- Rodríguez Rodríguez, D. A., Riesco Avila, J. M., & Malagón Romero, D. H. M. (2016). Obtención de biodiésel a partir de mezclas de aceite de cocina usado y aceite de higuera por transesterificación. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 2(1), 1850–1854.
<https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/1296>
- Rojas Ramos, K. M. (2019). Obtención y extracción de aceites vegetales. *Repositorio Institucional - UNE*. <http://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/3861>
- Romanelli, G. P., Ruiz, D. M., & Pasquale, G. A. (2016). *Química de la biomasa y los biocombustibles*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
<https://doi.org/10.35537/10915/59392>
- Sánchez Domínguez, S. M., Torres Aldaco, A., Lugo Leyte, R., Cervantes Ruiz, J., & Torres González, E. V. (2016). *Caracterización de propiedades físicas del biodiesel a partir de aceite de coco y medición del poder calorífico*.
https://datospdf.com/download/memorias-del-xxxi-congreso-nacional-de-termodinamica-caracterizacion-de-propiedades-fisicas-del-biodiesel-a-partir-de-aceite-de-coco-y-medicion-del-poder-calorifico-_5ae5e242b7d7bcf338ec2cba_pdf
- Santana, V. (2019). *Obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado en frituras de alimentos utilizando diferentes concentraciones de lejía*. Universidad Técnica Estatal Quevedo.
- Tabio García, D., Díaz Domínguez, Y., Rondón Macías, M., Fernández Santana, E., & Piloto-Rodríguez, R. (2017). *Extracción de aceites de origen vegetal* [Universidad Tecnológica de La Habana].
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11047.55201>

- Tacias Pascacio, V. G., Rosales Quintero, A., & Torrestiana Sánchez, B. (2016). Evaluación y caracterización de grasas y aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel: Un caso de estudio. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(3), 303–313. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.03.05>
- Tejada Tovar, C., Tejada Benítez, L., Villabona Ortíz, Á., & Monroy Rodríguez, L. (2013). Obtención de biodiesel a partir de diferentes tipos de grasa residual de origen animal. *Luna Azul*, 36. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000100002
- Tordecilla, W. G. B. (2021). *Efecto de la fertilización orgánica de lombricompost en las propiedades fisicoquímicas del aceite crudo y torta de girasol helianthus annuus. L. Híbrido esbella en Montería Córdoba*. Universidad de Córdoba.
- Tovar Torres, M. L. T. (2019). Análisis de parámetros para la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado. *Revista EJE - Engineering Journal ECCI*, 1(1). <https://revistas.ecci.edu.co/index.php/eje/article/view/608>
- Villegas Córdoba, A. R., & Martínez Rojas, J. M. (2021). *Evaluación de la disposición final del aceite vegetal usado en el municipio de Yaguará Huila*. 74.
- Yépez, J., & Vidal, M. (2017). *Diseño y construcción de una planta de producción de Biodiesel a partir de aceite vegetal reciclado*. Universidad San Francisco de Quito.
- Zamora Burbano, Á. M. (2015). *Evaluación del aceite de lupino andino (lupinus mutabilis, L.) cómo alternativa energética para la producción del biodiesel* [Universidad de las Fuerzas Armadas]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/12630>
- Zannol, C. V. (2016). *Factibilidad económica de producción de biodiesel a partir de microalgas en Argentina*. <https://ri.itba.edu.ar/handle/123456789/563>
- Zarate Gamarra, J. A., Luján Rojas, J. M., & Llaque Fernández, G. I. (2022). Índice de aceites residuales de cocina para la producción de biodiésel en las provincias de Lima y Trujillo. 2020. *Universidad Privada del Norte*. <https://doi.org/10.18687/LEIRD2021.1.1.35>

Zavaleta Palomino, L. N., & Suavo Carrión, J. P. A. (2016). Obtención de biodiesel por transesterificación alcalina a partir de aceites vegetales residual en Lima. *TECNIA*, 26(1), 107–107.
<http://www.revistas.uni.pe/index.php/tecnia/article/view/116>

ANEXOS

ANEXO 1: Caracterización del aceite vegetal reciclado

Determinación de densidad

$$d_{25} = \frac{m_2 - m}{m_1 - m}$$

Ecuación 1

Siendo:

d_{25} = densidad relativa a 25 °C

m = masa del picnómetro vacío, g

m_1 = masa del picnómetro con agua destilada, g

m_2 =masa del picnómetro con la muestra, g.

$$d_{25} = \frac{40.5042 - 17.0049}{42.5109 - 17.0049} = 0.9213 \frac{g}{mL}$$

Determinación de % de ácidos grasos libres

$$\%AGL = \frac{N_{NaOH} \times fc \times V_{gastado(NaOH)} \times mg_{\text{Ácido Oleico}} \times 100}{m_{aceite}}$$

Ecuación 2

Siendo:

N_{NaOH} = Normalidad de NaOH, 0.1N

fc = factor de corrección

$V_{gastado(NaOH)}$ =volumen consumido de NaOH, mL

$mg_{\text{Ácido oleico}}$ =Peso molecular del Ácido oleico

m_{aceite} = muestra de aceite, en g.

$$\%AGL = \frac{0.1N \times 1.004 \times 1.1mL \times 282g \times 100}{10g} = 0.3110$$

Determinación de la Acidez Libre

$$A = \frac{M \times V \times N}{10 \times m}$$

Ecuación 3

Siendo:

A=acidez del producto, en porcentaje de masa

M=masa molecular del aceite usado para expresar el resultado

V=volumen de la solución de hidróxido de sodio o potasio empleado en la titulación en mL

N= normalidad de la solución de hidróxido de sodio o potasio

m=masa de la muestra analizada en g.

$$A = \frac{282 \text{ g} \times 1,1\text{mL} \times 0.1\text{N}}{10 * 10\text{mL}} = 31.0200 \frac{\text{mg KOH}}{\text{g}}$$

Determinación de la Humedad

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_1 - m} * 100$$

Ecuación 4

Siendo:

%H=contenido de humedad, en porcentaje de masa

m=masa del crisol vacío

m₁= masa del crisol con la muestra antes del calentamiento, en g

m₂= masa del crisol con la muestra después del calentamiento, en g.

$$\%H = \frac{70.9776 - 70.9504}{70.9776 - 15.0690} \times 100 = 0.0487$$

Determinación de la viscosidad cinemática

$$v_{40^{\circ}\text{C}} = k \times t$$

Ecuación 5

Siendo:

V_{40°C}=viscosidad cinemática a 40 °C, mm²/s

k=constante a 40 °C, 0.09143 mm²/s² ó (cSt/s)

t= tiempo en el que tardo en fluir la muestra el tramo AB, en s.

$$v_{40^{\circ}\text{C}} = 0.09143 * 436.10 = 39.8726 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$$

En la tabla A1 se indican los resultados generales registrados de la caracterización del aceite vegetal reciclado, pero debido a que existen parámetros en los que se realizaron más ensayos como es en el caso de la densidad, humedad y viscosidad cinemática se procede a calcular la media, desviación estándar y varianza siendo sus resultados descritos en la tabla A2

Tabla A1. Resultados registrados de la Caracterización del Aceite vegetal reciclado.

Parámetro	Ensayo		
	1	2	3
Densidad (g/mL)	0.9213	0.9526	0.9527
% de Ácidos grasos libres	0.3110	0.3143	0.309
Acidez Libre (mg KOH/g)	0.3102	0.3130	0.3102
Humedad	0.0487	0.0109	0.0131
Viscosidad	39.8726	39.8589	
Cinemática (mm ² /s)			
Composición de Ácidos grasos	86.8302		

Nota. Autoría Propia.

ANEXO 2: Composición del aceite vegetal reciclado.

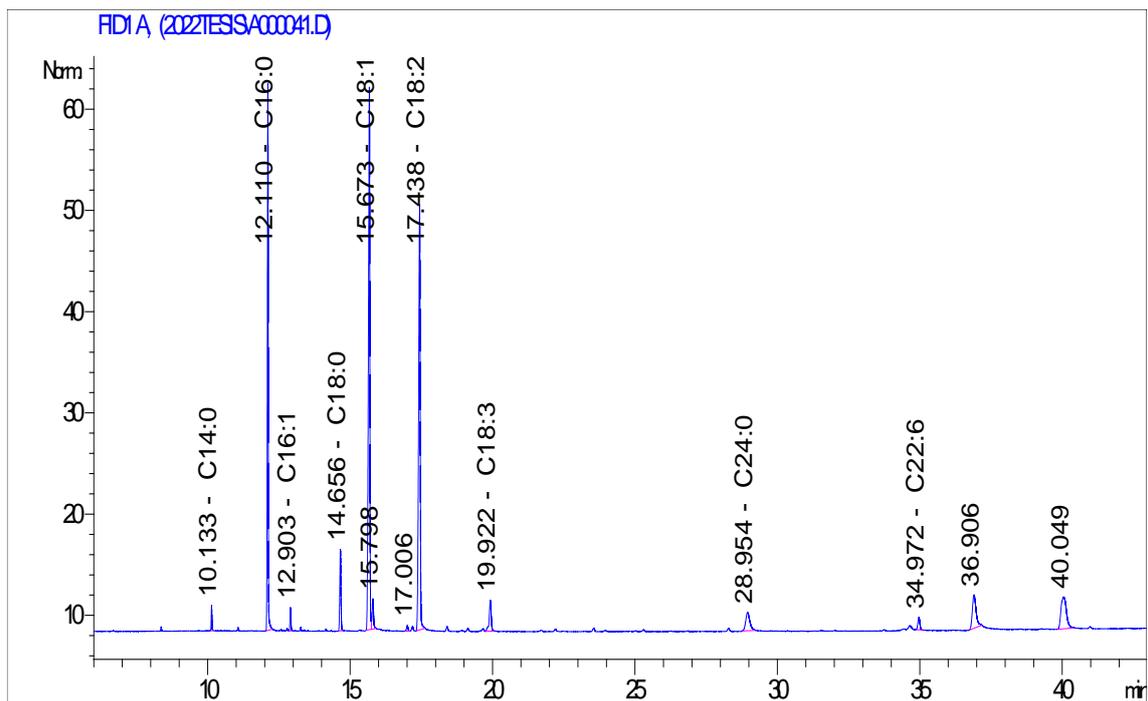


Figura A2. Cromatograma del aceite vegetal reciclado.

Nota. Autoría Propia.

ANEXO 2: Determinación del aceite y metanol a emplear

Tabla A3. Datos de los reactivos a emplearse en la reacción de transesterificación.

Moles	1	6
Sustancia	Aceite	Alcohol
Nombre	Ácido Oleico (C18:1)	Metanol
Peso Molecular (g/mol)	282.5000	192.0000
Densidad (g/mL)	0.9213	0.7920

Nota. Autoría Propia.

Se empleó 101.1000 g de aceite por lo cual se recalculó.

Aceite (g)	←	Metanol (g)
282.5000		192.0000
101.1000	→	X= 68.7122

ANEXO 3: Registro del blanco



Figura A4.1. Blanco antes del lavado.

Nota. Autoría Propia.



Figura A4.2. Blanco en el lavado.

Nota. Autoría Propia.

ANEXO 4: Caracterización del biodiesel obtenido

Determinación del poder calorífico



UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
LABORATORIO DE FÍSICO QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS DEL PODER CALORÍFICO

Ciente: Tesistas de la carrera de Ingeniería Química de la UC
Atención: Lourdes Buestán; Jennifer Ramírez.
Teléfono: 0'999962573
Fecha de recepción: 25 de mayo de 2022
Fecha de análisis: 25 de mayo de 2022
Tipo de Muestras: Biodiesel

RESULTADOS

Identificación Muestra 1: NaOH 1% E1

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico Superior	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4242 g	21.6652 °C	39,714	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos catorce Joules por gramo.

Identificación Muestra 2: KOH 0.5% E3

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.3987 g	22.6722	39,576	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil quinientos setenta y seis Joules por gramo

Identificación Muestra 3: NaOH 0.5% E1

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4839 g	20.9606 °C	39,758	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos cincuenta y ocho Joules por gramo

Identificación Muestra 4: KOH 1% E2

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4692 g	21.8152 °C	39,725	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos veinticinco Joules por gramo.

Identificación Muestra 5: KOH 0.5% E2

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4632 g	21.5829 °C	39,460	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil cuatrocientos sesenta Joules por gramo.



Firmado electrónicamente por:
DIANA ALEXANDRA
CRIOLLO AYALA

Ing. Alexandra Criollo Ayala.
Analista Laboratorio Físico Química

Cuenca, 07 de Junio del 2022



INFORME DE ANÁLISIS DEL PODER CALORÍFICO

Ciente: Tesistas de la carrera de Ingeniería Química de la UC
Atención: Lourdes Buestán; Jennifer Ramírez.
Teléfono: 0'999962573
Fecha de recepción: 25 de mayo de 2022
Fecha de análisis: 25 de mayo de 2022
Tipo de Muestras: Biodiesel

RESULTADOS

Identificación Muestra 1: NaOH 1% E1

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico Superior	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4242 g	21.6652 °C	39,714	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos catorce Joules por gramo.

Identificación Muestra 2: KOH 0.5% E3

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.3987 g	22.6722	39,576	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil quinientos setenta y seis Joules por gramo

Identificación Muestra 3: NaOH 0.5% E1

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4839 g	20.9606 °C	39,758	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos cincuenta y ocho Joules por gramo

Identificación Muestra 4: KOH 1% E2

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4692 g	21.8152 °C	39,725	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos veinticinco Joules por gramo.

Identificación Muestra 5: KOH 0.5% E2

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4632 g	21.5829 °C	39,460	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil cuatrocientos sesenta Joules por gramo.



Firmado electrónicamente por:
DIANA ALEXANDRA
CRIOLLO AYALA

Ing. Alexandra Criollo Ayala.
Analista Laboratorio Físico Química

Cuenca, 07 de Junio del 2022



INFORME DE ANÁLISIS DEL PODER CALORÍFICO

Cliente: Tesistas de la carrera de Ingeniería Química de la UC

Atención: Lourdes Buestán; Jennifer Ramírez.

Teléfono: 0'999962573

Fecha de recepción: 01 de junio de 2022

Fecha de análisis: 01 de junio de 2022

Tipo de Muestras: Biodiesel

RESULTADOS

Identificación Muestra 11: KOH 1% E1

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico Superior	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4228 g	22.3478 °C	39,744	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil setecientos cuarenta y cuatro Joules por gramo.

Identificación Muestra 12: NaOH 0,5% E2

Parámetro	Método	Equipo	Peso de la muestra	Temperatura inicial del sist.	Resultado	Unidades
Poder Calorífico	Directo	Bomba Calorimétrica IKA C 201	0.4399 g	20.0687°C	39,834	J/g

Resultado: Treinta y nueve mil ochocientos treinta y cuatro Joules por gramo



Firmado electrónicamente por:
DIANA ALEXANDRA
CRIOLLO AYALA

Ing. Alexandra Criollo Ayala.
Analista Laboratorio Físico Química

Cuenca, 07 de Junio del 2022

Determinación de la viscosidad cinemática

Este parámetro se lo determinó de la misma manera que el aceite vegetal reciclado.

Determinación del Índice de acidez

Para la terminación de esta propiedad se usa el método descrito en la sección 2.1.3.

Para realizar el cálculo del índice de acidez se aplica la ecuación 6

$$i = \frac{56,1 \times V \times N}{m}$$

Ecuación 6

I= índice de acidez del producto, en mg/g

M=masa molecular del aceite usado para expresar el resultado

V=volumen de la solución de hidróxido de sodio o potasio empleado en la titulación en mL

N= normalidad de la solución de hidróxido de sodio o potasio.

m=masa de la muestra analizada en g.

$$A = \frac{56,1 \times 0,2\text{mL} \times 0,1\text{N}}{5,0038} = 0,2242 \frac{\text{mg KOH}}{\text{g}}$$

Determinación del % de FAMES

Tabla A5.1. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de NaOH al 0.5% E1.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1569	10.0563	C14:0	0.7134
4	12.1607	290.0162	C16:0	20.5742
6	12.9376	12.7337	C16:1	0.9034
8	14.7204	56.6862	C18:0	4.0214
9	15.7637	465.7975	C18:1	33.0444
13	17.5341	397.6902	C18:2	28.2128
14	18.4650	4.6154	C20:0	0.3274
17	19.9848	36.0915	C18:3	2.5604
19	23.6070	3.7982	C22:0	0.2695
21	29.0481	18.1624	C24:0	1.2885
22	35.0218	19.1955	C22:6	1.3618
Total				93.2771

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.2. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de NaOH al 0.5% E2.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1542	9.4344	C14:0	0.7208
4	12.1550	275.0163	C16:0	21.0109
6	12.9320	11.8987	C16:1	0.9090
8	14.7126	53.7571	C18:0	4.1070
9	15.7528	438.8466	C18:1	33.5273
13	17.5204	371.0712	C18:2	28.3493
14	18.4552	4.3856	C20:0	0.3351
17	19.9750	33.3442	C18:3	2.5474
19	23.5983	3.5316	C22:0	0.2698
21	29.0063	12.6050	C24:0	0.9630
22	35.0087	13.2904	C22:6	1.0154
Total				93.7549

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.3. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de NaOH al 0.5% E3.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1544	8.5684	C14:0	0.6713
4	12.1523	259.1617	C16:0	20.3029
6	12.9312	11.1619	C16:1	0.8744
8	14.7090	50.5189	C18:0	3.9577
9	15.7475	425.1979	C18:1	33.3103
13	17.5161	364.9752	C18:2	28.5924
14	18.4504	4.1279	C20:0	0.3234
17	19.9720	31.9661	C18:3	2.5042
19	23.5945	3.2939	C22:0	0.2580
21	28.9735	13.3759	C24:0	1.0479
22	35.0059	13.0620	C22:6	1.0233
Total				92.8658

Nota. Autoría Propia.

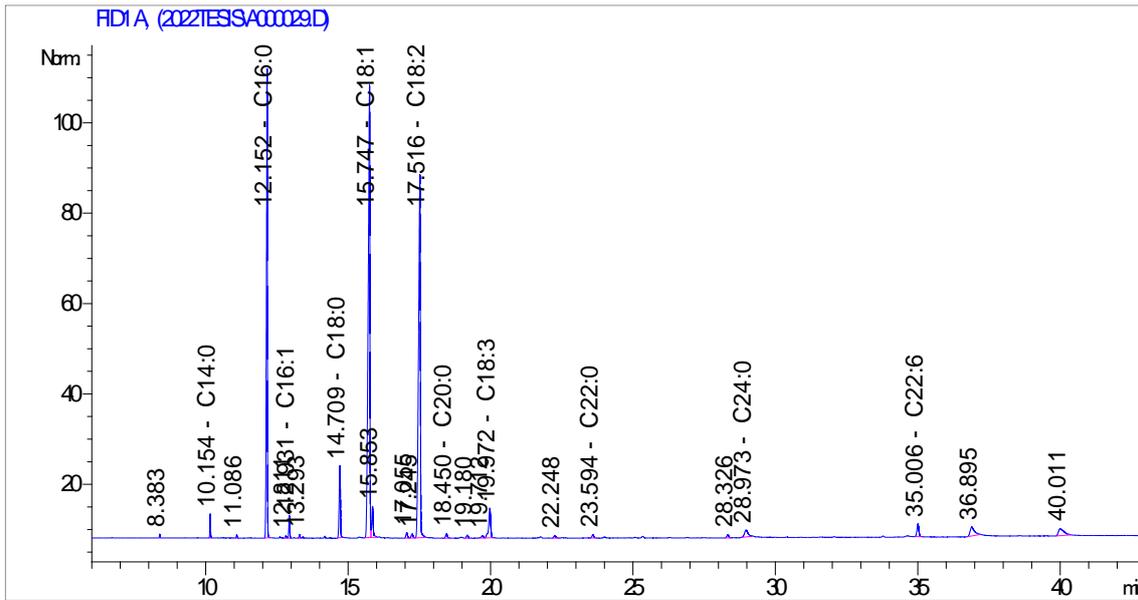


Figura A5.1. Cromatograma del biodiesel obtenido con el catalizador de NaOH 0.5% E3.

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.4. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de NaOH al 1% E1.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
1	10.1556	3.6760	C14:0	0.5708
2	12.1332	119.8461	C16:0	18.6092
3	12.9299	5.0056	C16:1	0.7773
4	14.6863	22.0062	C18:0	3.4170
5	15.7093	207.4490	C18:1	32.2119
8	17.4780	194.2161	C18:2	30.1571
9	19.9649	15.7764	C18:3	2.4497
10	28.9377	8.4093	C24:0	1.3058
11	35.0081	8.0903	C22:6	1.2562
Total				90.7550

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.5. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de NaOH al 1% E2.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1558	8.5675	C14:0	0.6199
4	12.1541	270.6252	C16:0	19.5797

6	12.9321	11.6156	C16:1	0.8404
8	14.7110	57.3323	C18:0	4.1480
9	15.7537	462.5120	C18:1	33.4627
11	16.3877	3.6034	C19:0	0.2607
14	17.5205	389.0080	C18:2	28.1447
15	18.4536	5.0096	C20:0	0.3624
18	19.9717	35.4277	C18:3	2.5632
20	23.5963	4.6919	C22:0	0.3395
22	28.8719	20.4944	C24:0	1.4828
23	35.0079	17.4629	C22:6	1.2634
Total				93.0674

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.6. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de NaOH al 1% E3.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
1	10.1553	2.9258	C14:0	0.4974
2	12.1292	95.6406	C16:0	16.2594
4	12.9307	3.9493	C16:1	0.6714
5	14.6839	17.1919	C18:0	2.9227
7	15.6950	154.7772	C18:1	26.3129
9	17.4669	177.9922	C18:2	30.2596
10	19.9633	13.6856	C18:3	2.3266
11	28.7935	7.2421	C24:0	1.2312
12	35.0179	8.0483	C22:6	1.3683
Total				81.8495

Nota. Autoría Propia.

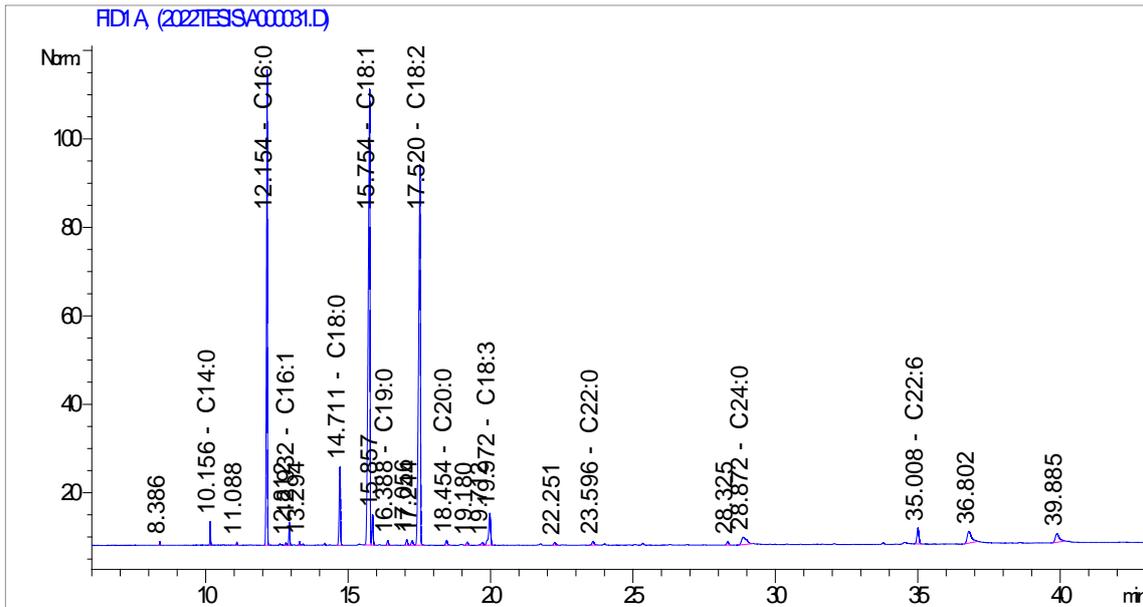


Figura A5.2. Cromatograma de biodiesel obtenido con el catalizador de NaOH 1% E2.

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.7. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de KOH al 0.5% E1.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1509	7.9757	C14:0	0.6923
4	12.1453	235.2970	C16:0	20.4246
6	12.9261	10.1587	C16:1	0.8818
8	14.6997	47.1812	C18:0	4.0955
9	15.7339	383.7068	C18:1	33.3071
13	17.5015	324.4373	C18:2	28.1623
14	18.4379	3.9520	C20:0	0.3430
17	19.9566	29.2831	C18:3	2.5419
19	23.5806	3.4409	C22:0	0.2987
22	28.9596	3.2836	C24:0	0.2850
23	34.9922	12.4868	C22:6	1.0839
Total				92.1160

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.8. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de KOH al 0.5% E2.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1522	7.0383	C14:0	0.6547
4	12.1437	216.1290	C16:0	20.1048
5	12.9264	9.2809	C16:1	0.8633
7	14.6980	44.9878	C18:0	4.1849
8	15.7311	365.1146	C18:1	33.9637
12	17.4970	308.6194	C18:2	28.7084
13	18.4369	3.8373	C20:0	0.3570
15	19.9561	27.9223	C18:3	2.5974
17	23.5796	3.2941	C22:0	0.3064
19	28.7027	12.1491	C24:0	1.1301
20	34.9917	12.4608	C22:6	1.1591
Total				94.0299

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.9. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de KOH al 0.5% E3.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
1	10.1522	4.8191	C14:0	0.6404
2	12.1341	148.1004	C16:0	19.6818
3	12.9257	6.3777	C16:1	0.8476
4	14.6858	27.3887	C18:0	3.6398
5	15.7102	250.6757	C18:1	33.3135
9	17.4781	227.7390	C18:2	30.2653
10	19.9568	18.6290	C18:3	2.4757
11	28.7637	8.0351	C24:0	1.0678
12	34.9969	8.8344	C22:6	1.1740
Total				93.1060

Nota. Autoría Propia.

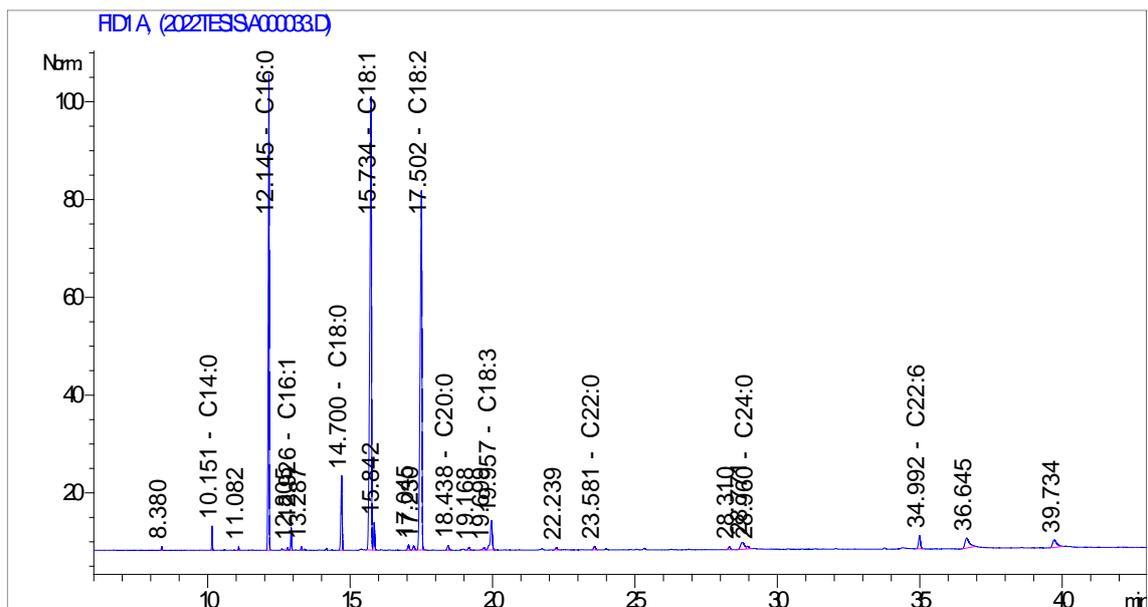


Figura A5.3. Cromatograma de biodiesel obtenido con el catalizador de KOH 0.5% E1.

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.10. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de KOH al 1% E1.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1492	12.8115	C14:0	0.7492
4	12.1572	370.4485	C16:0	21.6623
6	12.9267	16.1189	C16:1	0.9426
9	14.7132	69.7246	C18:0	4.0772
10	15.7591	574.1290	C18:1	33.5727
14	17.5232	487.4597	C18:2	28.5046
15	18.4439	5.2932	C20:00	0.3095
18	19.9630	43.3944	C18:3	2.5375
20	23.5827	4.1796	C22:0	0.2444
21	25.3304	2.3521	C20:4	0.1375
23	28.8230	14.5656	C24:0	0.8517
24	34.9933	15.9528	C22:6	0.9329
Total				94.5221

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.11. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de KOH al 1% E2.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
1	10.1520	5.3808	C14:0	0.6848
2	12.1392	161.0992	C16:0	20.5033
3	12.9313	6.9358	C16:1	0.8827
4	14.6940	33.7326	C18:0	4.2932
5	15.7254	272.8959	C18:1	34.7318
9	17.4927	229.5559	C18:2	29.2159
10	18.4562	2.7786	C20:00	0.3536
11	19.9697	20.7366	C18:3	2.6392
12	29.0313	7.9125	C24:0	1.0070
13	35.0044	9.4135	C22:6	1.1981
Total				95.5097

Nota. Autoría Propia.

Tabla A5.12. Resultados del cromatógrafo: biodiesel concentración de KOH al 1% E3.

# Pico	Tiempo de retención	Área	Compuesto	% FAMES
2	10.1489	27.6255	C14:0	0.6243
4	12.1917	897.3904	C16:0	20.2792
7	12.9322	38.4473	C16:1	0.8688
11	14.7746	190.8589	C18:0	4.3130
13	15.8442	1539.3013	C18:1	34.7851
18	17.6121	1295.4171	C18:2	29.2738
19	18.4676	16.9023	C20:00	0.3820
23	19.9841	118.5458	C18:3	2.6789
26	23.5998	13.8210	C22:0	0.3123
29	25.3322	6.8838	C20:4	0.1556
32	28.9808	9.2128	C24:0	0.2082
35	34.9990	50.6144	C22:6	1.1438
Total				95.0250

Nota. Autoría Propia.

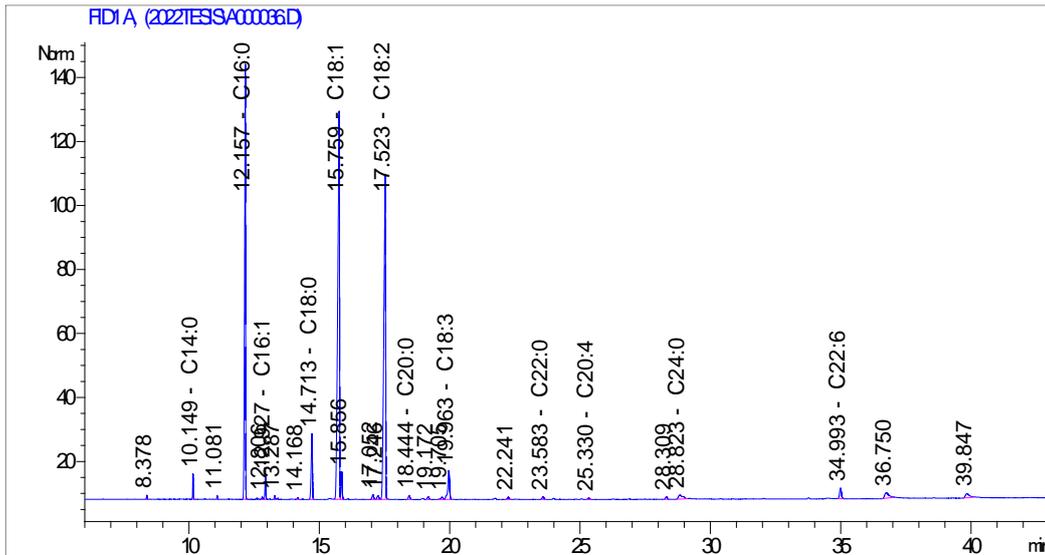


Figura A5.4. Cromatograma de biodiesel obtenido con el catalizador de KOH 1% E3

Nota. Autoría Propia.

ANEXO 5: Determinación del rendimiento

$$\% \text{Rendimiento}_{biodiesel} = \frac{\text{peso en gramos}_{biodiesel}}{\text{peso en gramos}_{aceite}} * 100$$

Ecuación 7

$$\% \text{Rendimiento}_{biodiesel} = \frac{89.0000}{101.1000} * 100 = 88.0317$$

Tabla A6.1.

Registros de pesos del aceite- biodiesel y % de rendimiento.

Peso aceite (g)	Peso biodiesel (g)	% Rendimiento
101.1000	89.0000	88.0317
63.2428	53.0000	83.8040
101.1000	87.0000	86.0534
101.1000	79.0000	78.1405
101.1000	80.0000	79.1296
111.3074	86.0000	77.2635
101.1000	96.0000	94.9555
101.1000	94.0000	92.9773
111.3074	102.0000	91.6381
101.1000	97.0000	95.9446
101.1000	95.0000	93.9664

101.1000

91.0000

90.0099

Nota. Autoría Propia.

ANEXO 6: Informes de los estadísticos realizados en R y R-Studio

7.1. Informe de los estadísticos realizados en R y R-Studio de la densidad

Tabla A7.1.1. Resultados estadísticos de la densidad.

Densidad	
Mínimo	0.8777
Primer cuartil	0.8793
Mediana	0.8799
Media	0.8798
Tercer cuartil	0.8702
Máximo	0.8820

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.1.2. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene) y normalidad (Test de Shapiro-Wilk) de densidad.

Test Shapiro- Wilk		Test de Levene	
W	0.97539	Valor F	0.4379
Valor P	0.9583	Pr(>F)	0.7321

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.1.3. Resultados de ANOVA de densidad.

	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Prueba	3	6.342e.06	2.114e-06	2.723	0.114
Residuos	8	6.210e-06	7.763e-07		
Error estándar residual			0.0008810694		

Nota. Autoría Propia.

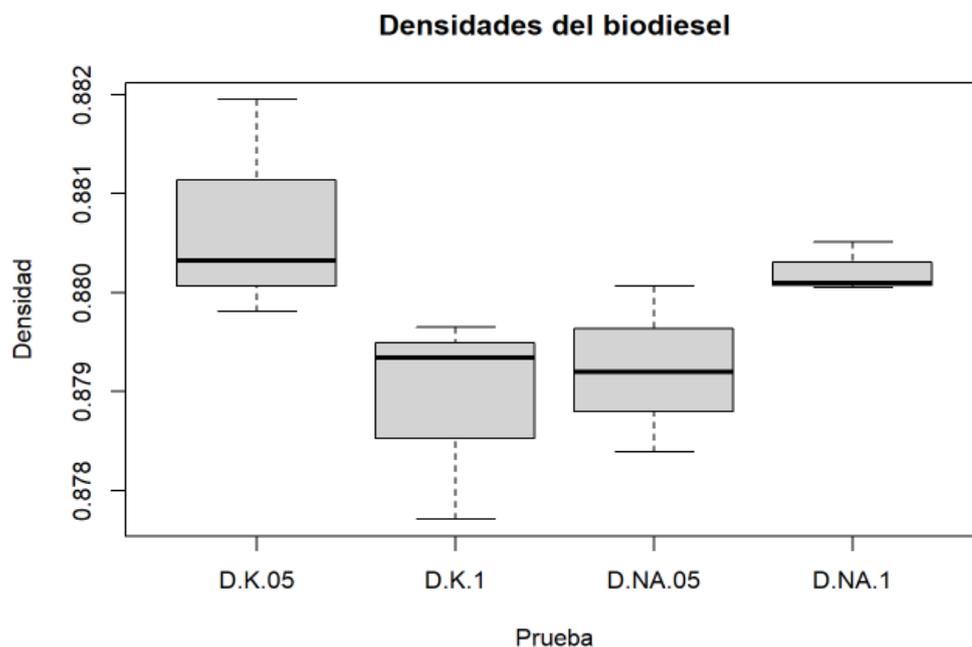


Figura A7.1.1 Diagrama de cajas de diferencias de medidas de la densidad.

Nota. Autoría Propia.

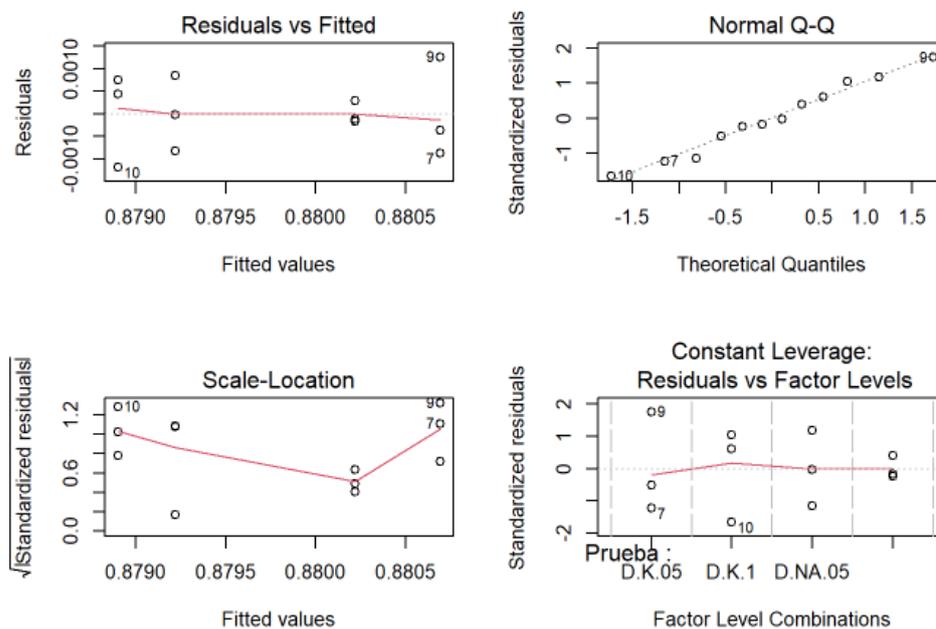


Figura A7.1.2. Gráfica de ANOVA de densidad.

Nota. Autoría Propia.

7.2. Informe de los estadísticos realizados en R y R-Studio del poder calorífico

Tabla A7.2.1. Resultados estadísticos del poder calorífico.

Poder calorífico	
Mínimo	39460
Primer cuartil	39682
Mediana	39733
Media	39728
Tercer cuartil	39748
Máximo	40142

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.2.2. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene) y normalidad (Test de Shapiro-Wilk) del poder calorífico.

Test Shapiro- Wilk		Test de Levene	
W	0.87316	Valor F	0.87316
Valor P	0.07188	Pr(>F)	0.3811

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.2.3. Resultados de ANOVA del poder calorífico.

	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Prueba	3	6908	2303	0.063	0.978
Residuos	8	291705	36463		
Error estándar residual			190.9533		

Nota. Autoría Propia.

Poder calorífico del biodiesel

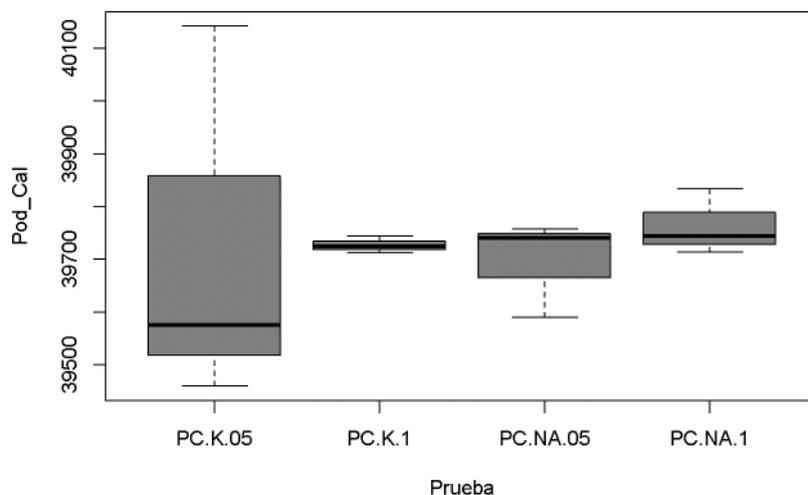


Figura A7.2.1. Diagrama de cajas de diferencia de medidas del poder calorífico.

Nota. Autoría Propia.

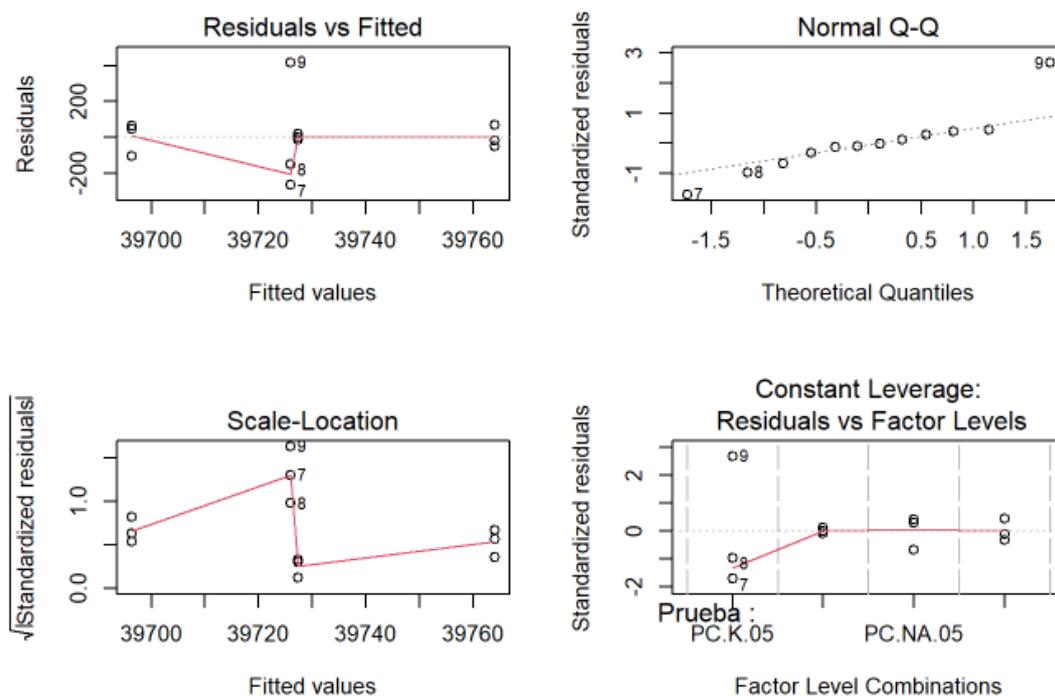


Figura A7.2.2. Gráfica de ANOVA de poder calorífico.

Nota. Autoría Propia.

7.3. Informe de los estadísticos realizados en R y R-Studio de la viscosidad cinemática

Tabla A7.3.1. Resultados estadísticos de la viscosidad cinemática.

Viscosidad cinemática	
Mínimo	4.582
Primer cuartil	4.637
Mediana	4.686
Media	4.682
Tercer cuartil	4.710
Máximo	4.774

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.3.2. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene) y normalidad (Test de Shapiro-Wilk) de la viscosidad cinemática.

Test Shapiro- Wilk		Test de Levene	
W	0.93216	Valor F	0.1498
Valor P	0.4036	Pr(>F)	0.9269

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.3.3. Resultados de ANOVA de la viscosidad cinemática.

	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Prueba	3	0.00201	0.000672	0.153	0.925
Residuos	8	0.03494	0.004368		
Error estándar residual			0.0660901		

Nota. Autoría Propia.

Viscosidades cinemáticas del biodiesel

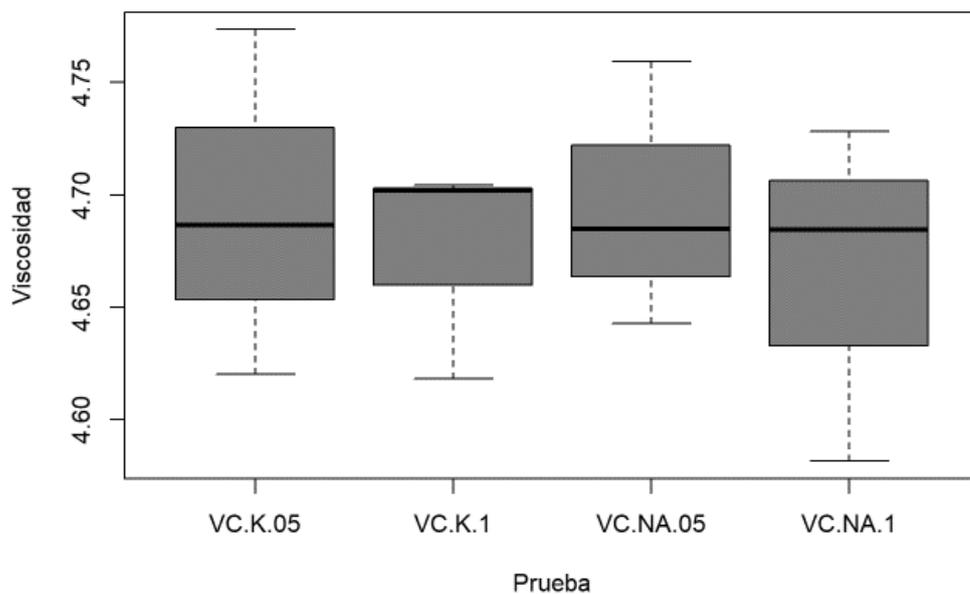


Figura A7.3.1. Diagrama de cajas de diferencia de medidas de viscosidad cinemática.

Nota. Autoría Propia.

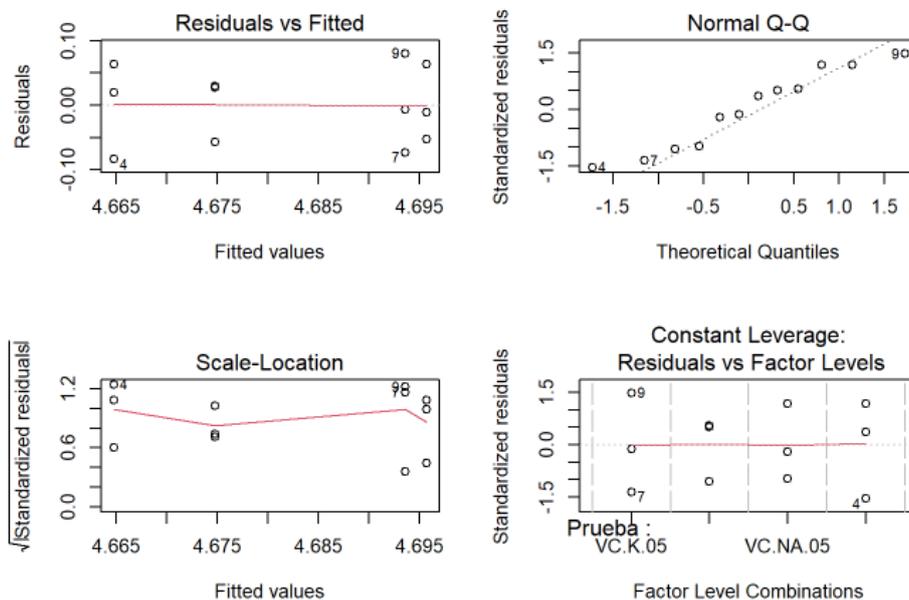


Figura A7.3.2. Gráfica de ANOVA de viscosidad cinemática.

Nota. Autoría Propia.

7.4. Informe de los estadísticos realizados en R y R-Studio del índice de acidez

Tabla A7.4.1. Resultados estadísticos del índice de acidez.

Índice de acidez	
Mínimo	0.2240
Primer cuartil	0.3217
Mediana	0.3363
Media	0.3502
Tercer cuartil	0.4481
Máximo	0.4485

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.4.2. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene) y normalidad (Test de Shapiro-Wilk) del índice de acidez.

Test Shapiro- Wilk		Test de Levene	
W	0.91841	Valor F	0.1364
Valor P	0.273	Pr(>F)	0.9355

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.4.3. Resultados de ANOVA del índice de acidez.

	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Prueba	3	0.01121	0.003737	0.46	0.718
Residuos	8	0.06495	0.008119		
Error estándar residual			0.090104		

Nota. Autoría Propia.

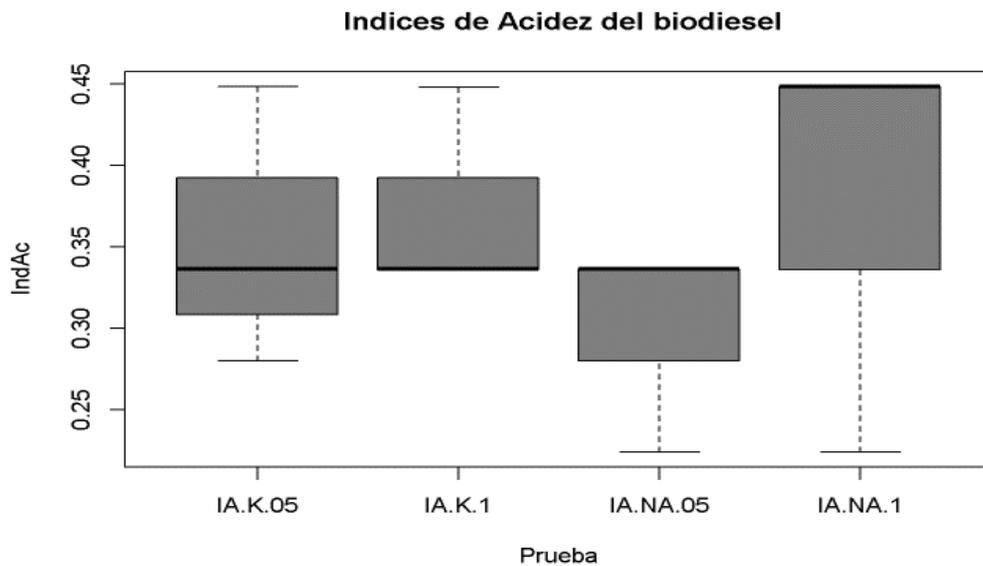


Figura A7.4.1. Diagrama de cajas de diferencia de medidas del índice de acidez.

Nota. Autoría Propia

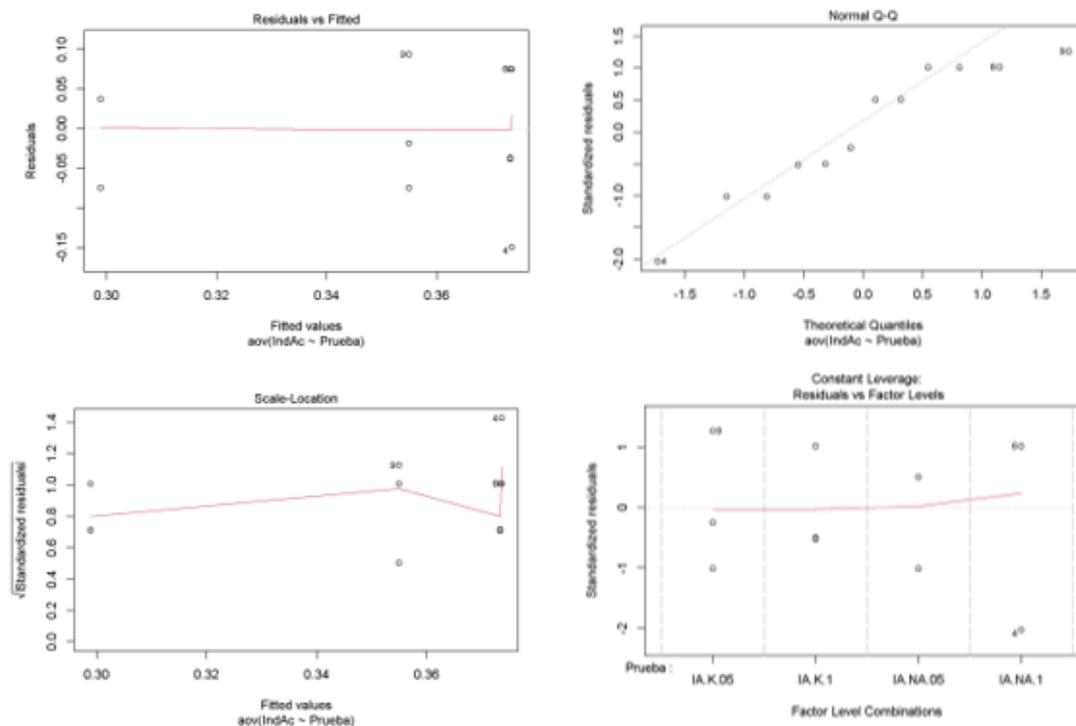


Figura A7.4.2. Gráfica de ANOVA del índice de acidez.

Nota. Autoría Propia.

7.5. Informe de los estadísticos realizados en R y R-Studio de la determinación de FAMEs

Tabla A7.5.1. Resultados estadísticos de la determinación de FAMEs.

FAMEs	
Mínimo	81.85
Primer cuartil	92.68
Mediana	93.19
Media	92.53
Tercer cuartil	94.15
Máximo	96.02

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.5.2. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene) y normalidad (Test de Shapiro-Wilk) de FAMEs.

Test Shapiro- Wilk		Test de Levene	
W	0.83393	Valor F	1.4625
Valor P	0.02338	Pr(>F)	0.296

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.5.3. Resultados de ANOVA de FAMEs.

	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Prueba	3	71.27	23.757	2.584	0.126
Residuos	8	73.56	9.195		
Error estándar residual			3.032341		

Nota. Autoría Propia.

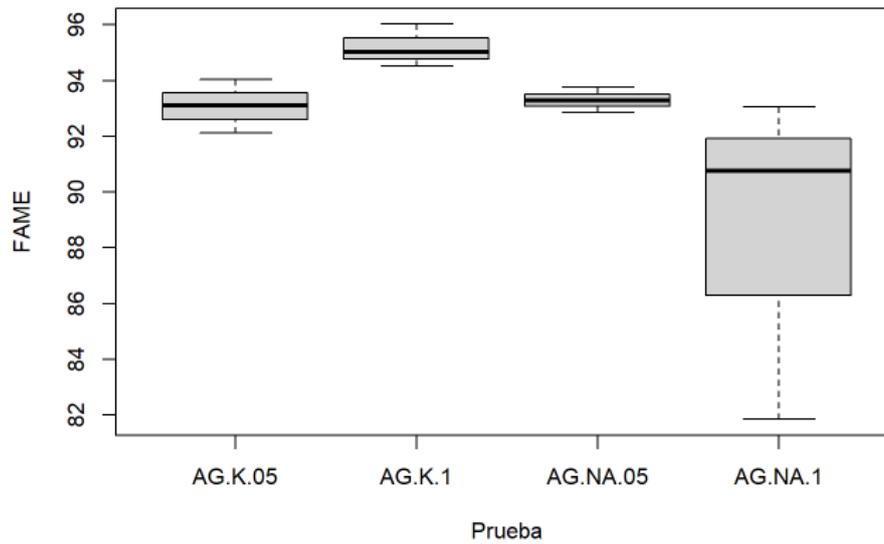


Figura A7.5.1. Diagrama de cajas de diferencia de medidas de FAMEs.

Nota. Autoría Propia.

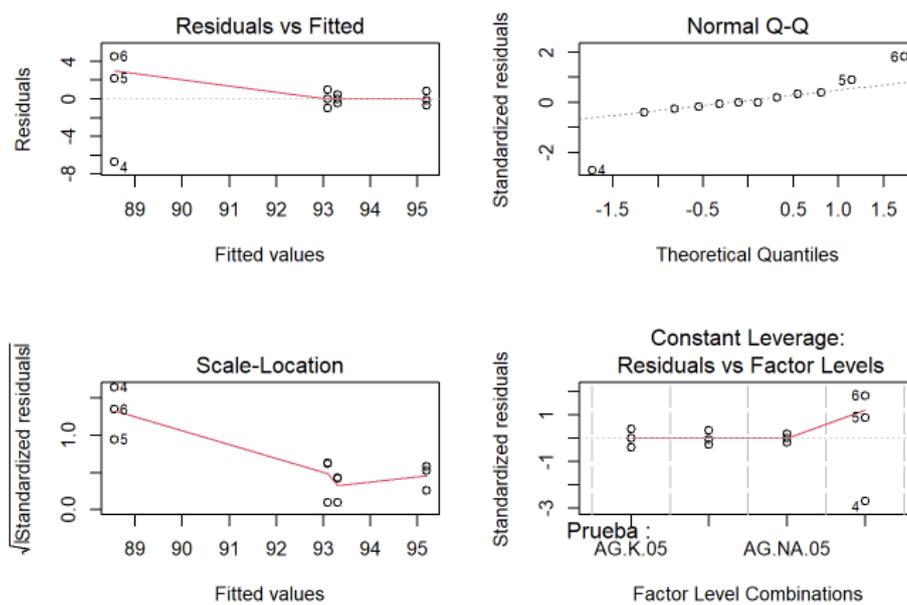


Figura A7.5.2. Gráfica de ANOVA de la determinación de FAMEs.

Nota. Autoría Propia.

7.6. Informe de los estadísticos realizados en R y R-Studio del rendimiento

Tabla A7.6.1. Resultados estadísticos del rendimiento.

Rendimiento	
Mínimo	77.26
Primer cuartil	82.64
Mediana	89.02
Media	87.66
Tercer cuartil	93.22
Máximo	95.45

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.6.2. Prueba de homocedasticidad (Test de Levene) y normalidad (Test de Shapiro-Wilk) del rendimiento.

Test Shapiro- Wilk		Test de Levene	
W	0.97903	Valor F	0.5747
Valor P	0.9785	Pr(>F)	0.6475

Nota. Autoría Propia.

Tabla A7.6.3. Resultados de ANOVA del rendimiento.

	Df	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	Valor F	Pr(>F)
Prueba	3	465.8	155.26	35.98	5.42e-05
Residuos	8	34.5	4.32		
Error estándar residual			2.077422		

Nota. Autoría Propia.

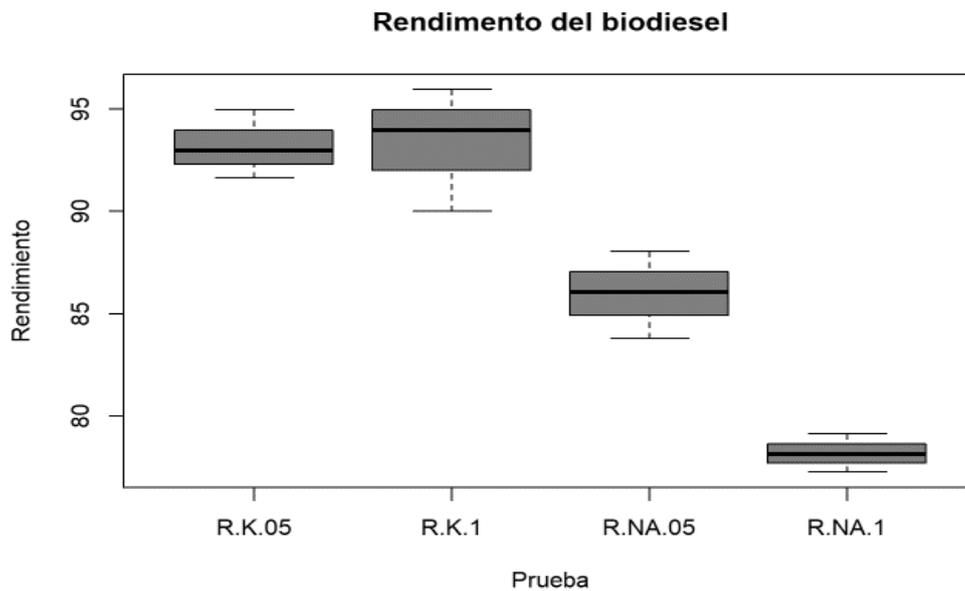


Figura A7.6.1. Diagrama de cajas de diferencia de medidas del rendimiento.

Nota. Autoría Propia.

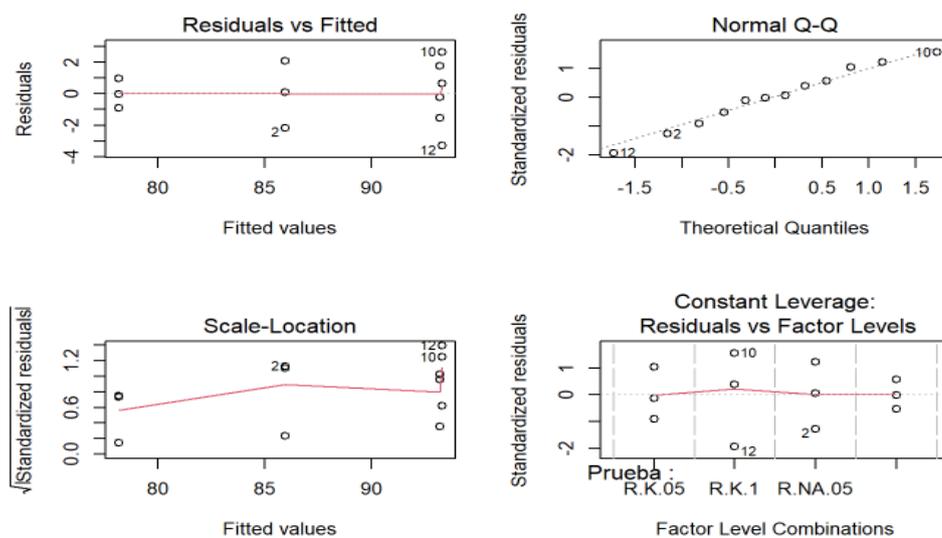


Figura A7.6.2. Gráfica de ANOVA de la determinación del rendimiento.

Nota. Autoría Propia.