

## **Caracterización mediante Cromatografía de Gases acoplada a un detector de masas (GC-MS) de biodiesel obtenido a partir de aceite reutilizado**

## **Characterization by Gas Chromatography coupled to a biodiesel mass detector (GC-MS) obtained from reused oil**

### **Lourdes Arjona**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.  
[lourdes.arjona@up.ac.pa](mailto:lourdes.arjona@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-0679-4337>

### **Felipe Barriá**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá  
[felipe.barria@up.ac.pa](mailto:felipe.barria@up.ac.pa) <https://orcid.org/0009-0007-2267-2739>

### **Xavier Ortega**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.  
[xavier.ortega@up.ac.pa](mailto:xavier.ortega@up.ac.pa) <https://orcid.org/0009-0009-6934-8279>

### **Gerardo Cáceres**

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Panamá.  
[gerardo.caceres@up.ac.pa](mailto:gerardo.caceres@up.ac.pa) <https://orcid.org/0000-0002-7029-6754>

**Fecha de recepción:** 24 de septiembre de 2024

**Fecha de aceptación:** 14 de abril de 2025

**DOI:** <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v27n2.a7658>

## **RESUMEN**

En este trabajo se obtuvo y caracterizó biodiésel a partir de aceite de cocina utilizado y metanol por medio de la reacción de transesterificación, con el objetivo de aprovechar el aceite de desecho (recurso de triglicéridos de bajo valor industrial) como materia prima y de esta manera contribuir a minimizar el impacto ambiental. Con la metodología empleada, el biodiesel producido a partir del aceite de desecho presenta características similares al biodiesel obtenido de aceite virgen, como se confirmó mediante la caracterización de la muestra por medio de diversas pruebas fisicoquímicas y por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS). La realización de este proyecto de investigación generó información y *know-how* relevante en lo referente a la metodología para la correcta caracterización mediante los espectros de masas de los principales

esteres metílicos de ácidos grasos (FAME) presentes en los biodiéselos producidos, entre los FAME que se lograron identificar se encuentran éster metílico octanoico, decanoico y octadecanoico. Estos resultados permiten confirmar que el biodiésel obtenido a partir de aceite de cocina es una alternativa viable y sostenible, además la caracterización analítica mediante GC-MS proporcionó información de los FAME, lo que facilita su comparación con estándares de calidad y su posible aplicación en motores diésel. De esta manera, el estudio contribuye a afirmar que el escalado de la metodología aquí propuesta es factible y podría contribuir al desarrollo de biocombustibles en Panamá promoviendo una gestión ambiental enmarcada dentro de la economía circular.

## **PALABRAS CLAVE**

Biodiésel, medio ambiente, combustible, cromatografía de gases acoplada a un detector de masas (GC-MS), transesterificación.

## **ABSTRACT**

In this work, biodiesel was obtained and characterized from used cooking oil and methanol by means of the transesterification reaction, with the aim of using waste oil (a low-value triglyceride resource) as a raw material and thus contributes to minimizing environmental impact. With the methodology used, biodiesel produced from waste oil shows characteristics like biodiesel obtained from virgin oil, as could be seen when characterizing each of the samples characterized by means of various physicochemical tests and by GC-MS chromatography. The realization of this research project generated relevant information and *know-how* regarding the methodology for the correct characterization by GC-MS of the main components (FAME) present in the biodiesels produced. Among the FAMEs that were characterized are the methyl octanoic, decanoic and octadecanoic esters. These results confirm that biodiesel obtained from cooking oil is a viable and sustainable alternative. In addition, the analytical characterization by GC-MS provided information on FAME, which facilitates its comparison with quality standards and its possible application in diesel engines. In this way, the study contributes to affirming that the scaling of the methodology proposed here is feasible and could contribute to the development of biofuels in Panama, promoting environmental management within the framework of the circular economy.

## **KEYWORDS**

Biodiesel, environment, fuel, gas chromatography mass spectrometry (GC-MS), Transesterification.

## **INTRODUCCIÓN**

La humanidad está enfrentando dos eventos de preocupación global, el deterioro ambiental (Verscheure *et al.*, 2023) y la crisis energética mundial (Simshauser, 2023). Ambos problemas emergen de la demanda de energías no renovables, principalmente los combustibles fósiles; los cuáles en 2023, representaron el 82 % del uso de energía primaria, indicativo mundial de la dependencia de esta. En las fuentes de energía evaluadas incluidas durante este período (petróleo, carbón, gas natural, energías renovables, nuclear e hidrógeno); destaca como la principal, el petróleo. Los valores de mayor interés en base al consumo anual para estas fuentes registrados en orden descendente fue para la gasolina (1.8 millones de b/d) y del

diésel/gasóleo (1.3 millones de b/d); y se reportan como los principales demandantes los EE.UU, China y la UE (BP, 2022). Como dato relevante, las energías primarias renovables (incluidos los biocombustibles) registraron un aumento anual de un 15 %.

Los aspectos negativos de la fuerte dependencia de los combustibles fósiles se reflejan en el aumento en los indicadores ambientales asociados a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) cuyas incidencias son evidenciadas en el cambio climático. El principal contribuyente en las emisiones de GEI es el combustible diésel utilizado principalmente en los sectores de la construcción, transporte, agricultura e industrias en general (Tan *et al.*, 2023).

El motor diésel se caracteriza por emitir importantes cantidades de contaminantes como hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbonos (CO) y materiales particulados (MP). EE.UU reportó que el 76 % de procesos equivalente a la producción de dióxido de carbono fue causado por la combustión de combustibles fósiles, y que de ellos, el 98 % del CO<sub>2</sub> proviene de motores diésel (Naciones Unidas, 2023).

En el 2015, las Naciones Unidas (ONU) hizo un llamado universal y se logra aprobar la agenda 2030 sobre el desarrollo sostenible, el objetivo de la agenda plantea los lineamientos mundiales para emprender un nuevo camino y mejorar las condiciones de vida de forma equitativa y global (ONU, 2023). Esta agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), incluido desde la eliminación de la pobreza (ODS 1), energías no contaminantes (ODS 7) y el combate del cambio climático (ODS 13) (*Organización Meteorológica Mundial*, 2020).

Al reducir las emisiones a producto de la combustión, propiciará un efecto reductor de los GEI. Se proponen utilizar métodos como es la recirculación de gases de escape (EGR) (Shi *et al.*, 2023) y los combustibles alternativos (Gebreslassie, Bahta & Mihrete, 2023). Estos combustibles deben poseer características puntuales y necesarias como su capacidad de renovación, fuentes de producción y posterior utilización de manera limpia y eficiente para lograr los propósitos de su uso, así aliviar la escasez de energía, además el disminuir la contaminación ambiental. La química, matemática, biología, ingeniería y la industria, han unido esfuerzos para lograr avances en la biología sintética (Liu, Wang and Nielsen, 2022) para la producción de biocombustibles de una manera más precisa y eficiente a partir de células microbianas. Dos tipos de biocombustibles líquidos que en los últimos veinte años han tenido un crecimiento destacado en cuanto a su producción y consumo son el bioetanol y el biodiésel.

En el año 1912, Rudolf Diesel señaló “Hoy en día el uso de aceites vegetales como combustible puede carecer de importancia, pero el tiempo mostrará como estos productos pueden ser tan importantes como el petróleo”. En sus inicios estos se usaban sin modificar, sin embargo, debido a las altas temperaturas que alcanzaba en la cámara de combustión, los aceites podían experimentar descomposición térmica, previa a la combustión, lo cual también contribuye a la formación de depósitos en inyectores, cámara, pistones y válvulas. Una adecuación efectiva fue modificar los aceites, generando un combustible similar al diésel convencional, siendo así como surge el biodiésel.

Un biodiésel es un combustible líquido fabricado a base de aceite vegetal y animal, el principal componente del biodiésel son ésteres alquílicos de cadena larga, por lo general ésteres metílicos, propílicos o etílicos. El estándar de la Sociedad Americana de pruebas y materiales (ASTM) describe al biodiesel como “ésteres mono alquílicos de ácidos grasos de cadena larga, derivado de lípidos tales como aceites vegetales o grasas (ASTM D6751, 2023).

El biocombustible está destinado a ser usado en motores diésel estándar, al utilizarse solo o como mezcla de biodiésel con petrodiesel (Kousoulidou *et al.*, 2012). Las propiedades son muy similares a las del gasoil de origen fósil. Esta similitud permite hacer mezcla de biodiésel y gasoil en proporciones que se desea B5, B10, B30, B50. En el año 2021 se produjeron 38.3 millones de toneladas de biodiésel en el mundo, siendo Indonesia el mayor productor de este biocombustible, con más de 8.2 millones de toneladas y en el continente americano, Brasil se posiciona en el primer lugar con 5.92 millones de toneladas (Progress, The and Annual, 2022). El biodiesel se considera una alternativa renovable por su menor huella de carbono en el aspecto del ciclo de vida, esto se debe a que la energía liberada y el CO<sub>2</sub> producto de la combustión del biodiesel, se compensa con la absorción durante el crecimiento de las materias primas como el girasol, la palma, soya y otras fuentes vegetales utilizadas para la producción de este combustible (Shirk *et al.*, 2017).

En los últimos años han surgido una gran variedad de técnicas para su producción, como la descomposición térmica del aceite por pirólisis (Yousef *et al.*, 2023), preparación de micro emulsiones (Leng *et al.*, 2018) y la conversión de triglicéridos en mezclas de ésteres simples, mediante la reacción química de transesterificación (Babadi *et al.*, 2022).

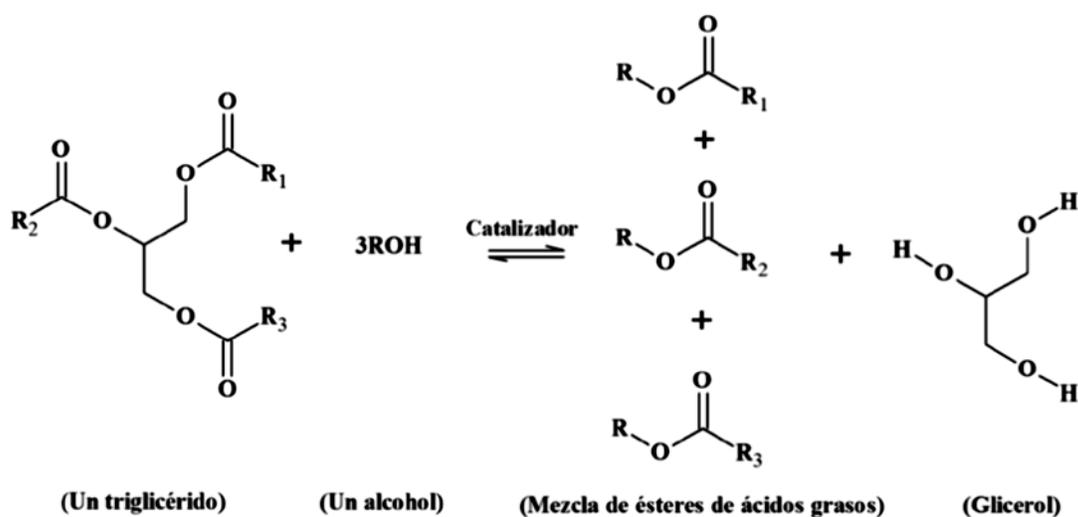
Para la producción de biodiésel, en sus inicios, solo se utilizaba aceites vegetales vírgenes comestibles como el aceite de soya, girasol o palma (Rupilius & Ahmad, 2007; Zahan & Kano, 2018), estos aceites son fácilmente disponible y proporcionan un rendimiento alto de biodiésel, sin embargo ha generado grandes preocupaciones debido a la competencia de alimentos, por ser producto con alto valor nutricional, es por eso que la producción de biodiésel ha emigrado a utilizar como materias primas aceites no comestibles, aceites

reutilizados ya sea de cocina u otras fuentes (Rodionova *et al.*, 2017) como es el caso de los utilizados en este estudio.

Cualquiera que sea la materia, prima la reacción que se ha establecido para la producción de biodiésel es la transesterificación (Figura 1). Es una reacción estequiométrica donde el glicerol contenido en el aceite es remplazado por el alcohol en presencia del catalizador. Esta reacción se desarrolla en proporción estequiométrica (molar) de alcohol a triglicérido de 3 a 1, es decir a mol de triglicérido reacciona con 3 moles de alcohol, para producir 3 moles de éster y 1 mol de glicerol (Corral-Bobadilla *et al.*, 2024). El combustibles producto de esta materia prima y el proceso de transesterificación se caracteriza por su bajo contenido de azufre y compuestos aromáticos, alto índice de cetónico, lubricidad y regenerabilidad, lo que puede garantizar una reducción de aproximadamente 70–90 % en las emisiones de GEI (Azman *et al.*, 2021)

**Figura 1.**

*Reacción de transesterificación*



Las principales materias primas utilizadas para llevar a cabo esta reacción son: aceites vegetal o animal, alcohol de bajo peso molecular anhidro (metanol, etanol o isopropanol) y catalizadores ácidos o básicos, ya sean como catalizadores homogéneos o heterogéneos. Es importante que las materias primas estén libres de agua, para evitar la reacción de saponificación, reacción secundaria indeseable. Además, los triglicéridos deben tener una baja proporción de ácidos grasos libres para evitar que se neutralicen con el catalizador y se formen jabones.

El control de calidad del producto final es fundamental para garantizar al consumidor el desempeño eficiente del biodiesel y su compatibilidad con las normativas ambientales. La

literatura enfatiza que el enfoque principal en la producción de biodiesel se refiere al desempeño tanto en el diseño, la optimización y la caracterización (Corral-Bobadilla *et al.*, 2024). La ASTM sugiere realizar pruebas como humedad, viscosidad, índice de acidez, contenido de glicerina y composición de FAME permitiendo evaluar la calidad de biodiesel (ASTM D6751, 2023) y la norma europea 14214:2013 (Norma española UNE-EN 14214, 2013), para la identificación de los FAME esta norma hace referencia a la EN 14331 (Norma española UNE-EN 14331, 2004) y la UNE-EN ISO 5508 (Norma Española UNE-EN ISO 5508, 1996) proporciona directrices generales para determinar por cromatografía de gases y composición cualitativa de los FAME.

Mediante esta investigación se busca producir biodiesel a partir de aceite de cocina usado (procedentes de cocinas comerciales o industriales) utilizando metanol anhidro y un catalizador básico. La principal contribución de trabajo radica en la caracterización del producto final utilizando un cromatógrafo de gases (GC-MS) acoplado a un detector de masas y mediante los resultados obtenidos comparar la composición de los FAME en los productos formulados. El proceso se enmarcó en los principios de la economía circular, cuyo punto focal está minimizar el impacto ambiental y maximizar el aprovechamiento de los recursos de bajo valor industrial.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se utilizaron 3 formulaciones en la producción de biodiésel variando la materia prima. (1) 100% de aceite de cocina reutilizado (BD-100); (2) 50% de aceite de cocina reutilizado y 50% de aceite virgen (BD-50); (3) 100% aceite vegetal virgen (BD-0). Hidróxido de Sodio y Metanol Grado ACS, Marca: Sigma-Aldrich, mezcla estándar de 37 FAMEs (Restek Corporation).

### **Preparación de la materia prima**

El aceite reutilizado, por lo general en aplicaciones culinarias, contiene una considerable cantidad residuos sólidos y otras impurezas. Es por esto por lo que, antes de formular el producto, se debe acondicionar los aceites mediante una serie de operaciones unitarias. Para lograr la optimización de este proceso se revisaron estudios previos (Rupilius and Ahmad, 2007) y (Zahan and Kano, 2018).

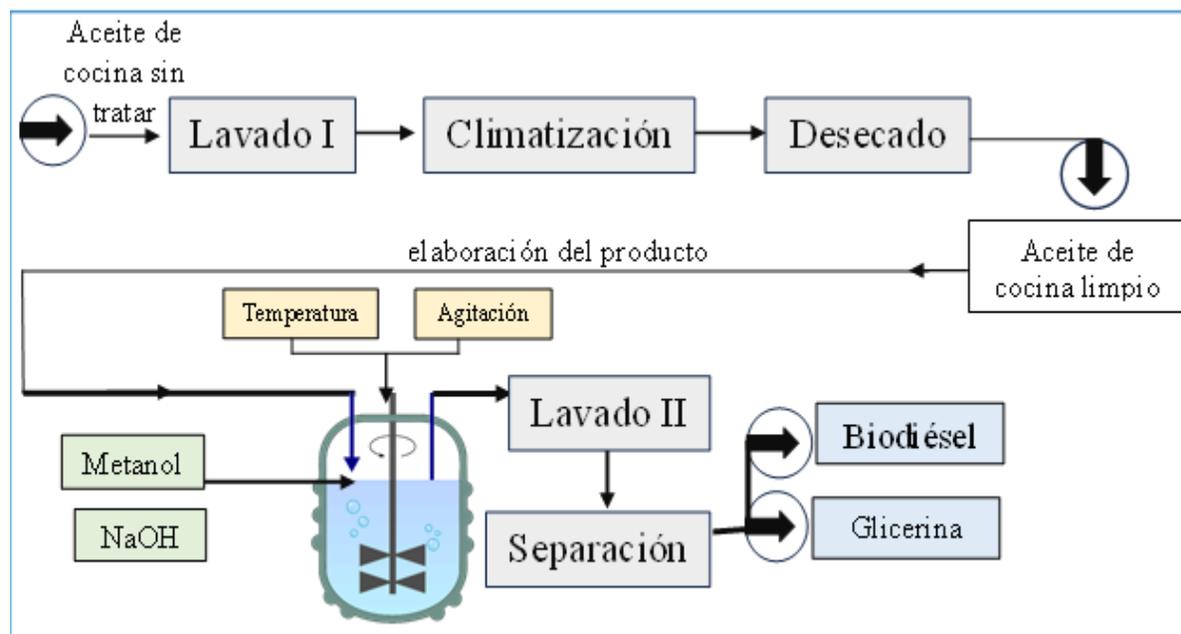
La materia prima se acondiciona al realizarle en tres operaciones unitarias básicas (Figura 2) que son: i) el lavado (eliminación de impurezas y ácidos grasos libres), ii) la climatización (para evitar cristales a bajas temperaturas) y iii) el desecado (para llevar al mínimo posible la presencia de humedad).

El lavado I, se realizó con sosa cáustica al 50 % en una proporción de 1:1 en volumen, a temperaturas superior a 30 °C y con agitación constante. El propósito de esta operación es eliminar impurezas y los ácidos grasos libres. Posteriormente se procede a la climatización, operación que comprende en calentar el aceite hasta 32 °C aproximadamente y luego disminuir la temperatura por debajo de 10 °C durante 24 horas (Figura 3), para separar las grasas saturadas. El resultado de la climatización son dos fases que se separan por decantación.

En la última operación, el desecado, se calentó el aceite entre 70 y 80 °C por alrededor de 12 horas, donde se eliminó la mayor cantidad de agua contenida en la materia prima, para esto.

**Figura 2.**

*Proceso general para la obtención de biodiésel*



### **Obtención del biodiésel**

Para la obtención de biodiésel, se utilizaron 200 mL de aceite reutilizado previamente acondicionado, soda cáustica (NaOH) aproximadamente 2.00 g y 160 mL de metanol anhidro. Se mezcló cuidadosamente en un recipiente y se calentó en un rango de 45-60 °C por 45 minutos con agitación constante, se dejó reposar el producto y se separaron las fases

utilizando un embudo de decantación donde se recolectó el biodiésel y como subproducto el glicerol (Figura 4A).

### Figura 3.

*Acondicionamiento de los aceites que se utilizó posteriormente como materia prima*



### Purificación del producto

La purificación del biodiésel tiene como objetivo remover los restos de reactivos en exceso y contaminantes presentes. Esta purificación se realizó con una solución de NaCl al 6.0 % m/m (Figura 4B), en una cantidad equivalente al 20% del volumen del biodiesel correspondiente. Se mezcló y decantó la solución.

### Figura 4.

*Separación del biodiésel y la glicerina (A), purificación de biodiésel (B)*



### Caracterización de la materia prima y del producto terminado

Se realizaron pruebas de caracterización fisicoquímicas siguiendo la norma ASTM (ASTM D6751, 2023). En esta norma se describen los valores mínimos requeridos que definan la calidad del biodiésel BD-100 (Tabla 1) y pruebas de identificación de los ésteres metílicos de ácidos grasos producto de la transesterificación mediante GCMS.

**Tabla 1.**

*Límites permitidos de las principales propiedades físicas y químicas para el biodiésel*

Propiedades	Normas ASTM D6751-02	Límites permitidos
Densidad 15.56 °C (g/mL)	D1298-99	0.860 – 0.900
Índice de acidez (mg KOH/g muestra)	D664	Máximo 0.5
Viscosidad a 40 °C (mm <sup>2</sup> /s)	D 6751-91	1.9 – 6.0
Contenido de azufre (mg/kg)	D 6751-9	15 - 500
Punto de inflamabilidad (°C)	D 93	120
Índice de cetanos (min)	D613	47
Humedad (mg/L)	D6751	0.05
FAME mediante GC-MS	D6585 ISO 14103	Contenido de ésteres metílicos variable

Siguiendo lo indicado por la norma se determinó el rendimiento volumétrico porcentual ( $RV$ ) del producto final por medio de la Ecuación 1, donde el  $V_{Biodiésel}$  es el volumen de biodiésel obtenido y  $V_{Aceite}$  es el volumen de aceite utilizado como materia prima.

$$RV = \frac{V_{Biodiésel}}{V_{Aceite}} \times 100 \quad (1)$$

La densidad del biodiésel se evaluó mediante un picnómetro, el índice de acidez mediante titulación (Ecuación 2), esta ecuación relaciona la cantidad de miligramos de hidróxido de potasio necesaria para neutralizar los ácidos grasos libres presentes por gramo de aceite o grasa (Harbers and Nielsen, 2003). Si la materia prima presenta un índice de acidez alto (> 12 mg KOH/g de aceite) indica que hay una elevada degradación del aceite a causa de la exposición al calor, al oxígeno o al uso repetido, provocando que la reacción de transesterificación sea casi imposible (Pérez-Bravo *et al.*, 2022). Con el valor de IA se determinó el porcentaje de conversión que es la relación entre los índices de acidez del aceite utilizado como materia prima y del biocombustible (Ecuación 3), es decir, la conversión dela

materia prima indica la eficiencia con la que el aceite se transformó en biodiésel. Por último se evaluó el porcentaje de humedad mediante volatilización (Ecuación 4).

$$IA = \frac{\text{vol.en mL de KOH} \times M \text{ de KOH} \times PM \text{ de KOH}}{\text{masa de muestra (g)}} \times 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Conversión} = \frac{IA \text{ aceite} - IA \text{ biodiesel}}{IA \text{ aceite}} \times 100 \quad (3)$$

$$\% H y V = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa final}}{\text{Masa inicial}} \times 100 \quad (4)$$

La correcta caracterización de los ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) como componentes del biodiésel han recibido una atención considerable en los últimos años debido a que representan un parámetro importante en la determinación de la calidad del producto. Esta caracterización se realizó mediante cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas (GC-MS), marca Shimadzu modelo QP2010 SE. Se utilizó una columna analítica capilar no polar SH-RXi-5HT (dimensiones: 30 m, DI: 0.25 mm, espesor de película: 0.25  $\mu\text{m}$ ). La energía de ionización fue de 70 eV y la rampa de temperatura que se utilizó inició a una 50 °C y terminó en 300 °C por un tiempo de 45 minutos. Además, se utilizaron: hexano grado HPLC como disolvente y como gas acarreador, helio.

La identificación de los compuestos se basó en la biblioteca de espectros de masas del Instituto Nacional de Normalización y Tecnología (National Institute of Standards and Technology) utilizando el software NIST MS Search 2.0. También, para corroborar la identidad de los diferentes FAME presentes, se utilizaron un set de estándares de biodiesel al 99.9 % de pureza, 17360 G.R. de Spectrum Quality Standards, Ltd.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan los resultados de los tres productos formulados. Los rendimientos volumétricos obtenidos son superiores al 70.0 %. El mayor rendimiento (94.0 %) se logró utilizando como materia prima 100 % de aceite virgen (BD-0) y el menor rendimiento corresponde al biodiesel producido con aceite reutilizado (BD-100), resultado esperado debido al contenido de impurezas de los aceites, afirmación realizada en el estudio: evaluación de la purificación de biodiésel (Mary Flor Césare, 2010).

El índice de acidez es un valor indicador que nos muestra el riesgo que la reacción de transesterificación no ocurra. Los resultados del índice de acidez confirman que la reacción se llevó a cabo de manera adecuada, ya que los valores obtenidos se encuentran por debajo del límite de 0.5 KOH/g aceite, indicado en la ASTM (ASTM D6751, 2023). Este valor está estrechamente relacionado con el porcentaje de conversión del biocombustible formulado.

El mayor porcentaje de conversión se obtuvo en el biodiésel producido a partir de aceite usado y el menor porcentaje de conversión se obtuvo en el biodiésel de aceite virgen. Este porcentaje mayor se debe a la presencia de ácidos grasos libres, generados durante el uso del aceite en la cocción de los alimentos. La presencia de una gran cantidad de ácidos grasos libres facilitan el proceso de transesterificación (Encinar, 2010). Cuando los aceites alcanzan altas temperaturas se generan reacciones de oxidación y polimerización térmica que altera la composición química. Este desdoblamiento de la cadena favorece la reacción de transesterificación (Pérez-Bravo *c.*, 2022). y por tanto se da una mayor conversión a diferencia del aceite virgen donde las estructuras de los ácidos grasos libres están más estables, lo que dificulta la conversión (Lafont, Páez & Torres, 2011).

Otro parámetro importante determinado fue la humedad como factor determinante en la calidad y rendimiento del biodiesel producido. El valor máximo permitido para este parámetro según la ASTM es de 0.05 %. Altas concentraciones de agua en el biodiésel pueden causar la corrosión del motor, e incluso la reproducción de microorganismos (Hoekman *et al.*, 2012). Los resultados de humedad obtenidos son mayores al máximo valor permitido, por lo cual en el futuro se debe optimizar este parámetro.

**Tabla 2.**

*Principales propiedades fisicoquímicas de los productos obtenidos*

<b>Producto</b>	<b>BD-100 (Producto 1)</b>	<b>BD-50 (Producto 2)</b>	<b>BD-0 (Producto 3)</b>
Rendimiento volumétrico (%)	74	86	94
Conversión (%)	96.47	93.89	85.54
Índice de acidez de la materia prima	8.78	2.95	1.73
Índice de acidez del biodiésel	0.31	0.18	0.20
Densidad	0.84	0.83	0.87
Humedad (%)	0.07	0.12	0.98

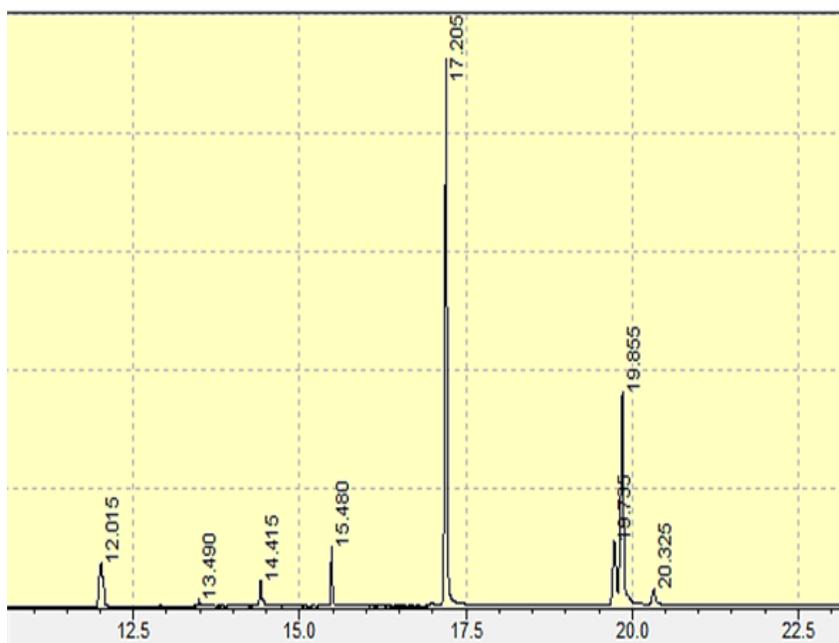
Los resultados obtenidos por GC-MS se relacionan directamente con la conversión de los triglicéridos a FAME, los tipos y proporciones de estos. La caracterización por GC-MS se realizaron a los productos BD-100 y BD-0, además del estándar utilizado como control.

Para el análisis de los biodiésels obtenidos, se utilizaron las mismas condiciones instrumentales (temperatura de inyección, rampa de temperatura y tiempo de análisis) aplicadas tanto para los analitos y el estándar de referencia.

En la Figura 5 se muestra el cromatograma del estándar certificado de biodiésel al 99 %. Los compuestos mayoritarios coinciden con los descritos en el certificado de análisis del estándar y con la base de datos de la biblioteca de espectros del NIST. Los picos con mayor área y representativos (ocho en total) son de los ésteres obtenidos del ácido palmítico (éster con C17) y de los oleicos (ésteres con C19) como se muestra en la Tabla 3.

**Figura 5.**

*Cromatograma del estándar de biodiésel*

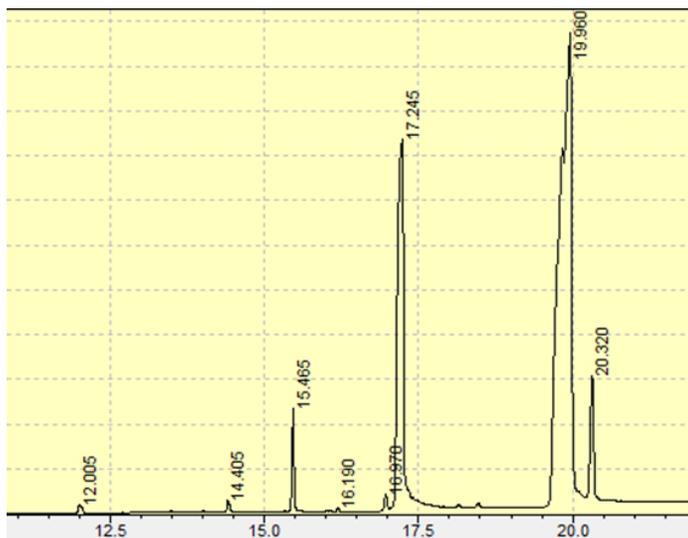


**Tabla 3.**  
*FAME identificados del estándar certificado de biodiésel*

Tiempos de retención (min)	Ester metílicos de sus correspondientes ácidos grasos	Fórmula Molecular	Porcentaje en masa (%)
12.015	Éster metílico del ácido octanoico	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	7.60
13.490	Éster metílico del ácido decanoico	C <sub>11</sub> H <sub>20</sub> O <sub>2</sub>	0.46
14.415	Éster metílico del ácido dodecanoico	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	2.45
15.480	Éster metílico del ácido tetradecanoico	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	4.39
17.205	Éster metílico del ácido hexadecanoico	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	54.01
19.735	Éster metílico del ácido (Z, Z) -9,12-octadecadienoico	C <sub>19</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	3.98
19.855	Éster metílico del ácido 9-octadecenoico	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	25.04
20.325	Éster metílico del ácido octadecanoico	C <sub>19</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	2.07

En la figura 6 y la tabla 4 se muestran los resultados de la caracterización del biodiésel BD-100 (proveniente de aceite 100 % reciclado). Se observa que los compuestos mayoritarios son los ésteres derivados del ácido 14-metil-pentadecanoico (éster con C17) y del ácido oleico (éster con C19), este último es muy común su presencia ya que la mayor cantidad de aceite comercial disponible en Panamá es el llamado “aceite vegetal mezcla” el cual está compuesto principalmente por aceite de soya.

**Figura 6.**  
*Cromatograma BD-100*

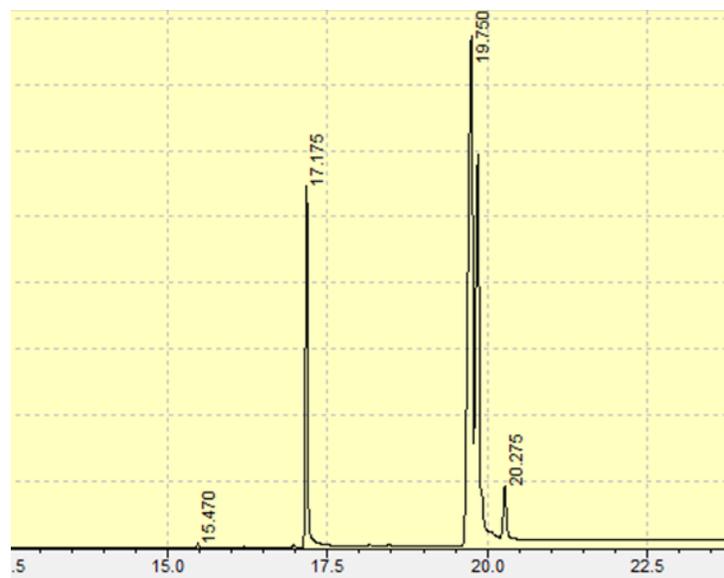


**Tabla 4.**  
Principales FAME identificados del BD-100

Tiempos de retención (min)	Ester metílicos de sus correspondientes ácidos grasos	Fórmula Molecular	Porcentaje en masa (%)
12.010	Éster metílico del ácido octanoico	C <sub>9</sub> H <sub>18</sub> O <sub>2</sub>	0.37
14.405	Éster metílico del ácido dodecanoico	C <sub>13</sub> H <sub>26</sub> O <sub>2</sub>	0.89
15.465	Éster metílico del ácido tetradecanoico	C <sub>15</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	2.74
16.190	Éster metílico del ácido pentadecanoico	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0.37
16.970	Éster metílico del ácido 9-hexadecanoico	C <sub>17</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	0.91
17.245	Éster metílico del ácido 14-metil-pentadecanoico	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	26.51
19.960	Éster metílico del ácido 9-octadecenoico	C <sub>19</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	62.25
20.320	Éster metílico del ácido 17-metil-octadecanoico	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	5.96

En la Figura 7 se muestra los picos obtenidos por la caracterización del BD-0 obtenidos a partir de aceite vegetal virgen comercial. Es interesante observar (Tabla 5) que el biodiesel obtenido de este aceite presenta una menor variedad de FAME (cuatro) con respecto al BD-100 (ocho). Este resultado se debe principalmente a que para obtener el BD-0 solo se utilizó un tipo y marca de aceite vegetal virgen, en cambio el aceite utilizado para obtener el BD-100 procede de la mezcla de varias marcas y fuentes diferente, y que también ha sido sometido a altas temperaturas durante su uso lo cual pudo alterar en alguna medida la estructura química de los ésteres de glicerol originales. Los FAME más abundante en el BD-0 son los correspondientes a C17 y C19, de manera similar que el BD-100. Los ácidos grasos aquí identificados son similares a los identificados por Tefera en su estudio, optimización, caracterización y análisis GC de biodiésel a partir de semillas de algodón (Tesfaye Tefera *et al.*, 2024).

**Figura 7.**  
Cromatograma BD-0



**Tabla 5.**  
Principales FAME identificados en el BD-0

Tiempos de retención (min)	Ester metílicos de sus correspondientes ácidos grasos	Fórmula Molecular	Porcentaje en masa (%)
15.480	Éster metílico del ácido tetradecanoico	$C_{15}H_{30}O_2$	0.17
17.175	Éster metílico del ácido 14-metil-pentadecanoico	$C_{17}H_{34}O_2$	18.40
19.750	Éster metílico del ácido 8,11-octadecadienoico	$C_{19}H_{34}O_2$	78.99
20.275	Éster metílico del ácido nonadecanoico	$C_{20}H_{40}O_2$	2.44

## CONCLUSIONES

Gran parte del trabajo en la producción y caracterización de biocombustibles comienza con el uso de materias primas "puras", en este estudio, intentamos maximizar los principios de sostenibilidad local sintetizando biocombustible a partir de aceite de cocina usado y grasa proveniente de nuestras cafeterías en el campus universitario; de este modo, sintetizamos con éxito biodiésel útil con una visión a futuro de crear la capacidad de eliminar el costo que implica para el campus el envío y procesamiento de estos residuos fuera de sus instalaciones.

El evaluar diferentes procesos para la obtención de biodiésel a partir de fuentes de energías renovables, relacionadas a la economía circular; sitúan este trabajo de investigación en una condición con elevado potencial para el desarrollo de esta práctica comercial en Panamá, dando así nuevas oportunidades de negocios a nivel industrial, aumentando la demanda de profesionales y técnicos nacionales idóneos en este rubro y propone una nueva alternativa para una mejor gestión de los procesos de manejo de residuos y desechos, cumpliendo así con varias de las ODS.

La realización de este proyecto generó información y *know-how* relevante en lo referente a la metodología para la correcta caracterización por GC-MS de los principales componentes (FAME) presentes en los biodiéselos producidos.

El biodiésel obtenido en este proyecto a partir de aceite reutilizado cumple con los principales parámetros establecidos por las normas ASTM correspondientes, exceptuando los vinculados a niveles de humedad, la cual resultó ser un poco elevada. Se plantea en futuros trabajos mejorar este parámetro y realizar ensayos de rendimiento y eficiencia. Además, del potencial uso de la glicerina obtenida (principal producto secundario) como comonomero para su polimerización para así general biopolímeros con potenciales utilidades.

Finalmente, los datos y metodologías generadas y utilizadas prometen ser importantes al momento que se plantee realizar un escalado a nivel de planta piloto; Los resultados abren nuevas vías de investigación para la producción y caracterización, de modo que el biodiésel obtenido a partir del aceite de cocina usado en el campus pueda utilizarse de manera más económica para abastecer los vehículos diésel operados en el campus por el personal de operaciones, mantenimiento y seguridad, así como su potencial ahorro de costos para la universidad.

El estudio también evidencia la sencillez, rapidez y bajo costo al emplear la GC-MS al compararlos con otras metodologías comúnmente utilizadas para identificar ácidos grasos o sus derivados (FAME); siendo una de sus limitaciones los espectros no siempre contienen iones indicativos característicos estructurales (no siempre es posible determinar la forma definitiva en la posición de los dobles enlaces en la cadena alifática). Este estudio se centró en los iones más intensos para cada espectro de masa de los componentes de ácidos grasos obtenidos.

El análisis por GC-MS logró identificar componentes individuales en ambas muestras de biodiésel como los FAME, mostrando en la composición química en cada una de las muestras ensayadas la presencia de 8 tipos de FAME; siendo identificados mediante sus tiempos de retención y la comparación de sus espectros de masas con los estándares de la biblioteca del instrumental GC-MS.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D6751 (2023) ‘Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels’. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://doi.org/10.1520/D6751-20A>.
- Azman, N.S. *et al.* (2021) ‘Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil via Deoxygenation Using Ni-Mo/Ac Catalyst’, *Processes* 2021, Vol. 9, Page 750, 9(5), p. 750. Available at: <https://doi.org/10.3390/PR9050750>.
- Babadi, A.A. *et al.* (2022) ‘Emerging technologies for biodiesel production: Processes, challenges, and opportunities’, *Biomass and Bioenergy*, 163, p. 106521. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2022.106521>.
- BP (2022) ‘BP Statistical Review of World Energy 2022,( 71st edition)’, <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>, pp. 1–60. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-full-report.pdf>.
- Corral-Bobadilla, M. *et al.* (2024) ‘An artificial intelligence approach to model and optimize biodiesel production from waste cooking oil using life cycle assessment and market dynamics analysis’, *Energy*, 307, p. 132712. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2024.132712>.
- Encinar, J.M, et al (2010) *Transesterification of rapeseed oil with methanol in the presence of various co solvents pdf free ebook download*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/277149728\\_Transesterification\\_of\\_rapeseed\\_oil\\_with\\_methanol\\_in\\_the\\_presence\\_of\\_various\\_co-solvents](https://www.researchgate.net/publication/277149728_Transesterification_of_rapeseed_oil_with_methanol_in_the_presence_of_various_co-solvents) (Accessed: 2 February 2025).
- Gebreslassie, M.G., Bahta, S.T. & Mihrete, A.S. (2023) ‘Development of alternative fuel for cement industries: The case of Messebo cement factory in Ethiopia’, *Waste Management Bulletin*, 1(3), pp. 58–70. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.WMB.2023.07.003>.
- Harbers, L. & Nielsen, S. (2003) ‘El análisis de las cenizas’, *Análisis de los Alimentos*, pp. 121–132. Available at: [https://www.editorialacribia.com/libro/analisis-de-los-alimentos\\_54086/](https://www.editorialacribia.com/libro/analisis-de-los-alimentos_54086/) (Accessed: 17 September 2023).

- Hoekman, S.K. *et al.* (2012) ‘Review of biodiesel composition, properties, and specifications’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), pp. 143–169. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.07.143>.
- Kousoulidou, M. *et al.* (2012) ‘Impact of biodiesel application at various blending ratios on passenger cars of different fueling technologies’, *Fuel*, 98, pp. 88–94. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2012.03.038>.
- Lafont, J.J., Páez, M.S. and Torres, Y.C. (2011) ‘Análisis Químico de Mezclas Biodiesel de Aceite de Cocina Usado y Diesel por Espectroscopia Infrarroja’, *Información tecnológica*, 22(4), pp. 35–42. Available at: <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400005>.
- Leng, L. *et al.* (2018) ‘Biodiesel microemulsion upgrading and thermogravimetric study of bio-oil produced by liquefaction of different sludges’, *Energy*, 153, pp. 1061–1072. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.04.087>.
- Liu, Z., Wang, J. and Nielsen, J. (2022) ‘Yeast synthetic biology advances biofuel production’, *Current Opinion in Microbiology*, 65, pp. 33–39. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2021.10.010>.
- Mary Flor Césare, L.C. (2010) ‘Redalyc. Evaluación de la purificación de biodiésel en la etapa final de producción’.
- Norma española UNE-EN 14214, 2013 (2013) ‘UNE-EN 14214:2013 A2+V2 Productos petrolíferos líquidos Ésteres metílicos de ácidos grasos ( FAME ) para motores diésel y equipos de calefacción Requisitos y métodos de ensayo’, p. 6.
- Norma española UNE-EN 14331 (2004) ‘UNE-EN 14331’.
- Norma Española UNE-EN ISO 5508 (1996) ‘Noma española’.
- ONU (2023) *Objetivos de Desarrollo Sostenible | Naciones Unidas en México, Onu*. United Nations. Available at: <https://www.un.org/es/common-agenda/sustainable-development-goals> (Accessed: 12 September 2023).
- Organización Meteorológica Mundial* | (2020). Available at: <https://public.wmo.int/en> (Accessed: 12 September 2023).

- Pérez-Bravo, S.G. *et al.* (2022) ‘Condiciones del proceso de transesterificación en la producción de biodiésel y sus distintos mecanismos de reacción’, *TIP. Revista especializada en ciencias químico-biológicas*, 25. Available at: <https://doi.org/10.22201/FESZ.23958723E.2022.481>.
- Progress, R.O.N., The, F. and Annual, U. (2022) ‘BIODIESEL & CO. 2021/2022’, pp. 1–60.
- Rodionova, M. V. *et al.* (2017) ‘Biofuel production: Challenges and opportunities’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(12), pp. 8450–8461. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2016.11.125>.
- Rupilius, W. and Ahmad, S. (2007) ‘Palm oil and palm kernel oil as raw materials for basic oleochemicals and biodiesel’, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 109(4), pp. 433–439. Available at: <https://doi.org/10.1002/EJLT.200600291>.
- Shi, Z. *et al.* (2023) ‘Mechanism, performance and modification methods for NH<sub>3</sub>-SCR catalysts: A review’, *Fuel*, 331, p. 125885. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2022.125885>.
- Shirk, M. *et al.* (2017) ‘History of Significant Vehicle and Fuel Introductions in the United States’. Available at: <https://doi.org/10.2172/1408646>.
- Simshauser, P. (2023) ‘The 2022 energy crisis: Fuel poverty and the impact of policy interventions in Australia’s National Electricity Market’, *Energy Economics*, 121(March), p. 106660. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106660>.
- Tan, D. *et al.* (2023) ‘Utilization of renewable and sustainable diesel/methanol/n-butanol (DMB) blends for reducing the engine emissions in a diesel engine with different pre-injection strategies’, *Energy*, 269, p. 126785. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2023.126785>.
- Tesfaye Tefera, N. *et al.* (2024) ‘Optimization, characterization, and GC-MS analysis of CSOME produced using alkali catalyzed transesterification’, *Energy Conversion and Management: X*, 22, p. 100549. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.ECMX.2024.100549>.
- Unidas, O. de las naciones (2022) *Las emisiones históricas del sector de la construcción, lo alejan de los objetivos de descarbonización*. Available at: <https://news.un.org/es/story/2022/11/1516722>.

- Verscheure, P. *et al.* (2023) 'Impact of environmental nitrogen pollution on pollen allergy: A scoping review', *Science of The Total Environment*, 893(June), p. 164801. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164801>.
- Yousef, S. *et al.* (2023) 'Pyrolysis of cigarette butts as a sustainable strategy to recover triacetin for low-cost and efficient biodiesel production', *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 175, p. 106167. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.106167>.
- Zahan, K.A. and Kano, M. (2018) 'Biodiesel production from palm oil, its by-products, and mill effluent: A review', *Energies*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2132. Available at: <https://doi.org/10.3390/en11082132>.