

# OBTENCIÓN DE BIODIESEL A PARTIR DE MEZCLAS DE ACEITE DE COCINA USADO Y ACEITE DE HIGUERILLA

Diego A. R. Rodríguez<sup>a</sup>, Riesco, José M. R. Ávila<sup>b</sup>; Dionisio M. Romero<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás

<sup>b</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato

<sup>c</sup>Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Santo Tomás

dionisiomalagon@usantotomas.edu.co

## RESUMEN

*En la actualidad la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera (Ricinus communis L) se ha visto restringida debido a los altos costos del aceite vegetal. Una alternativa para disminuir los costos de producción es la mezcla del aceite de higuera con aceite de cocina usado, el cual es más económico. En este trabajo se evaluó la producción de biodiesel a partir de mezclas de aceite de higuera con aceite de cocina usado, las cuales fueron sometidas posteriormente a transesterificación. Inicialmente se caracterizaron los dos aceites empleados. Posteriormente se realizó la mezcla entre el 0% y el 20% de aceite de cocina usado con aceite de higuera. Se realizó la transesterificación en las condiciones establecidas previamente: temperatura 60°C, relación molar de 6 mol de metanol/ 1 mol de aceite, empleando hidróxido de potasio (KOH) como catalizador al 1% p/p con respecto al aceite. El mayor rendimiento de la reacción fue del 99% para la mezcla 85% de aceite de higuera y 15% de aceite usado de cocina. Los resultados obtenidos en la cromatografía de gases muestran una composición promedio de 97.6 % de ésteres metílicos, cumpliendo la norma NTC 5444. Por otro lado, el poder calorífico fue de 36645 J/g para la mezcla 85% de aceite de higuera y 15% de aceite usado de cocina, se encontró que la mezcla anterior fue la mejor de todas las mezclas realizadas. Mediante este trabajo se concluye que es posible, desde el punto de vista técnico, emplear la mezcla de aceite de higuera y usado de cocina para la producción de biodiesel, con lo cual se pueden reducir costos en la producción de biodiesel a partir de aceite de higuera.*

**Palabras claves:** Biodiesel, Aceite de Higuera, Aceite usado de cocina, Transesterificación

## 1. Introducción

El biodiesel es un combustible diesel alternativo que consiste en monoésteres de alquilo de los ácidos grasos derivados de los aceites vegetales y las grasas animales [1], [2], [3]. Algunos aceites usados para la producción de biodiesel son: el aceite de palma [4], [5], aceite de higuera [6], [7], [8] y aceite de cocina usado [9], [10]. El más empleado en el mundo es el aceite de palma debido a su alta productividad y bajo costo [11], [12]. Sin embargo, es deseable emplear otros aceites con un alto poder calorífico similar al biodiesel producido a partir de aceite de higuera, pero el costo es mayor que el del biodiesel de palma [13], [14], [15].

El aceite de higuera, extraído de las semillas de la planta de higuera (*Ricinus communis L*) que se cultiva en todo el mundo debido a la importancia comercial de su aceite por su utilización en la fabricación de una serie de productos químicos industriales como surfactantes, grasas y lubricantes [15]. Algunos informes presentados en la literatura [6], [7], [16], [17], [18] muestran las condiciones para la producción de biodiesel por transesterificación de aceite de higuera con metanol. Las ventajas del biodiesel de higuera son las propiedades de flujo en frío debido a su nube muy baja y puntos de vertido [8]. Sin embargo, el alto costo de este aceite, junto con la alta viscosidad, ha llevado a su aplicación industrial limitada en gran medida [13], [19]. El aceite de higuera pertenece al grupo considerado como materia prima estratégica para la producción de biodiesel [10], [11], sobre todo porque tiene un bajo índice de acidez, yodo e índice de saponificación [19]. El rendimiento de la reacción reportado es cercano al 90% [16], [18], por lo que el proceso productivo es atractivo.

Por otra parte, el aceite de cocina usado es un residuo líquido procedente del uso de aceites

domésticos e industriales. El aceite de cocina se compone esencialmente de 45% de compuestos monoinsaturados, 12% de compuestos poliinsaturados y 43% de compuestos saturados; Sin embargo, Chhetri et al [20] reportaron que alrededor del 60% de los ácidos que constituyen el aceite de cocina usado son ácidos insaturados. Este aceite puede ser recogido y reutilizado principalmente para producir biodiesel [10], [9]. El aceite de cocina usado se produce principalmente en los hogares, hoteles y restaurantes [21]. En general, el aceite está normalmente expuesto a altas temperaturas, humedad y oxígeno durante largos períodos de tiempo [22], en el rango de 150 ° C a 180 ° C [20]. Cuando el aceite se utiliza para freír, normalmente se producen reacciones tales como la oxidación, polimerización, hidrólisis, ciclación e isomerización [22]. La hidrólisis da lugar a la liberación de ácidos grasos libres, que limitan el uso potencial en la producción de biodiesel cuando se utilizan catalizadores alcalinos [10, 23]. El perfil de los ácidos grasos cambia durante la fritura. Los niveles de ácido palmítico aumentan mientras que los del ácido linoleico disminuyen, y se encontraron altas correlaciones entre el ácido palmítico, oleico y linoleico en todos los aceites.

El uso de aceite de cocina usado como materia prima de biodiesel reduce el costo de la producción. Los costos de la materia prima constituyen aproximadamente el 70-95% del costo global de la producción de biodiesel [7]. Por lo tanto, el uso de aceites de cocina usado y aceites no comestibles debe darse con mayor prioridad sobre los aceites comestibles como materia prima de biodiesel. Meng et al [24] ha reportado una conversión de 89,8% y Phan y Phan [25] han reportado una conversión del 88-90% para la producción de biodiesel a partir de aceite de cocina usado. Anteriormente en nuestro grupo de investigación [10], estábamos obteniendo biodiesel a partir de aceite de cocina usado con un 98% de rendimiento y el porcentaje de metil-ésteres del 99,1%. Así que el aceite de cocina es una buena alternativa para la producción de biodiesel [26], [27], [28].

El objetivo de este trabajo es demostrar el uso de mezclas de aceite de cocina usado y aceite de higuerilla para la producción de biodiesel, que se espera reduzca los costos de producción de biodiesel y tiene la ventaja de reducir el ácido graso libre de la mezcla en comparación con el aceite de cocina. Dado que el precio del aceite de cocina es aproximadamente 2-3 veces más barato que los aceites virginales, es una opción atractiva para la producción de biodiesel cuando se mezcla con aceite de higuerilla.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Materiales**

Aceite de higuerilla fue adquirido a Incorp S.A.S. (INCORP S.A.S, Medellin, Colombia) y el aceite usado de cocina se recolectó en restaurantes de Bogotá. Por otro lado, metanol de 98% de pureza fue comprado a Panreac (Barcelona, España); hidróxido de potasio de 85% de pureza e hidróxido de sodio de 98% de pureza, etanol de 95% de pureza fueron adquiridos a Merck (Darmstadt, Alemania). Solución de fenolftaleína en etanol al 95%, yoduro potásico, cloroformo, reactivo de Wijs, tiosulfato sódico, almidón soluble y ácido clorhídrico fueron adquiridos a J.T. Baker (Center Valley, Estados Unidos).

### **2.2 Metodología**

#### **2.2.1 Filtración del aceite usado de cocina**

Para eliminar las impurezas presentes en el aceite usado de cocina, las cuales se presentan durante la reacción y se convertirían en material particulado del biodiesel obtenido se filtró empleando papel filtro (Whatman 1). Se calentó el aceite a una temperatura de 40°C y se filtró en un embudo. Una vez filtrado el aceite se guardó en recipientes plásticos, a temperatura ambiente, hasta su uso acorde al diseño experimental.

## 2.2.2 Caracterización de la materia prima (aceite usado de cocina e higuerilla)

**Densidad:** Se determinó mediante la norma ASTM D-5, empleando un picnómetro de 10 ml, a temperatura ambiente.

**Viscosidad:** Se utilizó un viscosímetro Cannon LV Modelo 2020 a una temperatura de 40°C, de acuerdo con la norma ASTM D-445.

**Índice de acidez:** La determinación del índice de acidez se realizó acorde a la ASTM D-1980. La prueba se desarrolló tomando una muestra del aceite la cual se disuelve en una solución de eter dietílico y etanol al 95%, los ácidos libres presentes en la muestra se titularon con una solución metanólica de hidróxido de potasio al 0.1M.

**Índice de yodo:** Se determinó siguiendo la ASTM D-5554. La prueba consistió en la dilución de 0.2 gramos de ensayo en un solvente y adición de reactivo de Wijs; después se adicionó yoduro de potasio y agua y se tituló la liberación de yoduro con una solución de tiosulfato sódico.

**Índice de saponificación:** Se siguió la norma ASTM D-5558. La prueba consistió en saponificar completamente 2 gramos del aceite, mediante un exceso de solución alcohólica de hidróxido de potasio, valorando luego dicho exceso de solución alcalina con ácido clorhídrico 0.5N.

## 2.3 Reacción de trans-esterificación.

La obtención de biodiesel se realizó en condiciones establecidas previamente [18-19]: relación molar metanol-aceite 6:1, porcentaje de catalizador (hidróxido de potasio) 1%, tiempo de reacción 2 horas. La reacción se llevó a cabo en un reactor de vidrio de 100 ml de capacidad con un volumen útil de 60 ml, donde se mantuvo la temperatura en 60°C con un baño termostataado. Al finalizar el tiempo de reacción, se obtuvieron 2 fases: biodiesel y glicerol, por lo cual se colocó la mezcla de reacción en un embudo de decantación. Se permitió la separación de las 2 fases mediante decantación, se recogió la fase superior (rica en biodiesel). Se adicionó un volumen de agua correspondiente a 1/3 del volumen del biodiesel obtenido, se permitió la separación de fases y se descartó el agua. Se repitió el procedimiento hasta lograr que el pH del agua fuera neutro. Se calentó el biodiesel en una plancha de calentamiento hasta una temperatura de 110°C durante 30 minutos para secar y eliminar el agua que pudo haber quedado.

## 2.4 Diseño experimental.

Se propusieron mezclas que contienen 0%, 5%, 10%, 15%, 20% y 100% de aceite usado en aceite de higuerilla las cuales fueron trans-esterificadas para la obtención de biodiesel. Las reacciones se realizaron por duplicado.

## 2.5 Caracterización del biodiesel

### 2.5.1 Poder Calorífico

Para esta prueba se utilizó una bomba IKA C 2000 (IKA, Irlanda). Se pesaron muestras cercanas a 1 gramo y se introdujeron en el vaso de la bomba calorimétrica donde se realizó la combustión. El oxígeno empleado se utilizó a una presión máxima de 350 Pa.

### 2.5.2 Cromatografía de gases

Se determinó el contenido de triglicéridos mediante el empleo de un cromatógrafo de gases Varian 450 -GC (Agilent Technologies, China) y una columna BD-EN 1403 (Agilent Technologies, China) de 30 m x 0.320 µm x 0.25µm. La temperatura inicial en el inyector fue 60 °C por 3 segundos, la cual se incrementó con una rampa de 200 °C/min hasta 380 °C y se mantuvo por 22 min. En la columna la temperatura inicial fue de 50 °C durante 1 minuto y luego se incrementó con una rampa

de 15°C/min hasta 180°C, seguida de una segunda rampa de 7°C/min hasta 230 °C y finalmente se empleó una tercera rampa de 30°C/min hasta 380 °C donde se mantuvo por 10 min. El detector empleado fue el FID (*flame index detector*), el cual se mantuvo en 380 °C; el gas de arrastre empleado fue hidrogeno con un caudal de 3 ml/min.

Adicionalmente se determinó el contenido de metil-ésteres. Para ello se emplearon condiciones similares a las empleadas en la determinación de triglicéridos, excepto que no se utilizó la tercera rampa en la columna de cromatografía. El volumen de muestra inyectado para los dos métodos fue de 1 µL en forma manual.

## 2.6 Escalamiento en la planta de producción y Evaluación del motor

La producción fue escalada hasta 5 litros empleando un reactor de acero inoxidable equipado con una camisa para circulación de vapor y control de temperatura. Las condiciones de producción fueron las mismas que se utilizaron en la producción a nivel laboratorio con la mezcla de 85% y 15% (aceite de higuera y aceite de cocina). Una vez separado y purificado el biodiesel, se mezcló con diesel en distintas proporciones: B0, B10, B100 (0%, 10% y 100% de biodiesel respectivamente). La combustión se llevó a cabo en la planta eléctrica diesel (Kipor E6500). La potencia generada se midió determinando el voltaje y el amperaje de resistencias eléctricas y se midió el combustible gastado. Esta prueba se realizó por duplicado.

## 3. Resultados y Análisis

### 3.1 Caracterización de los aceites.

La caracterización de los aceites se presenta en la Tabla 1. La densidad de aceite de higuera obtenida experimentalmente en este trabajo es de 0,9707 g / ml, que está dentro del rango reportado en la literatura (0,9625 g / ml y 0,9772 g / ml) [7]. El aceite de cocina usado reporta una densidad de 0.9115 g / ml y 0.9156 g / ml [10]; comparando estos valores con la densidad obtenida en este trabajo concluimos que no hay una diferencia considerable.

Con respecto a la viscosidad absoluta, se determinó a una temperatura de 40 ° C para los dos aceites. Sánchez [7] reporto un valor de 174,71 cP de viscosidad para el aceite de higuera, pero el autor establece que este valor puede variar dependiendo de la fuente de extracción de aceite. En cuanto al aceite de cocina usado, López [10] reporta un valor de 40 cP, valor cercano al obtenido en este trabajo.

**Tabla 1.** Resultados caracterización de los aceites.

Aceite	Densidad [g/ml]	Viscosidad [cP]	Índice de acidez	Índice de yodo [g/100 g de sustancia]	Saponificación [mg de KOH/g]
Higuera	0.9707±0.009	215±1.13	0.5601±0.020	92.01±0.01	181.678 ± 1.985
Usado de cocina	0.9119±0.013	42.2±1.01	1.0268±0.016	72.22±0.05	196.238 ± 0.845

El índice de acidez determina los ácidos grasos libres contenidos en cada aceite [29]. Estudios como Amin [19] reportan un índice de acidez para el aceite de higuera de 0,2399. El aceite de cocina usado tiene valores de índice de acidez en el intervalo de 0,2 a 0,824 [30]. Es posible concluir que el aceite empleado en este trabajo (1.0268 ± 0.016) presenta un nivel muy alto y se infiere que ha sido sobre-utilizado. Por esta razón proponemos la mezcla de dos aceites para obtener una mezcla con bajo contenido de ácidos grasos libres.

El índice de yodo indica la cantidad de este compuesto que puede absorber el aceite vegetal en los enlaces insaturados, es decir, que cuanto mayor es el valor del índice, mayor será la adsorción en los enlaces dobles presentes en el aceite [31]. La literatura tiene valores en el intervalo de 82 a 90 para el aceite de higuera [19] y para el aceite de cocina usado entre 60 - 70 [10], por lo que los valores

experimentales obtenidos en este trabajo están por encima del rango reportado indicando la presencia de un mayor número de dobles enlaces que los aceites reportados.

El índice de saponificación indica la cantidad de hidróxido de potasio (KOH) que se necesita para saponificar (convertido en jabón) un gramo de aceite. El rango reportado en la literatura para el aceite de higuera varía desde 176 a 187 mg KOH / g de aceite [10], donde es evidente que el valor obtenido en este trabajo se encuentra dentro de lo reportado. Por otro lado, el valor para el aceite de cocina usado fue de 196,98 mg KOH / g de aceite [7], comparando el valor experimental obtenido en este trabajo es similar al reportado en la literatura, que fue de 185,6 mg KOH / g de aceite.

### 3.2 Producción de biodiesel.

Los resultados obtenidos para la producción de biodiesel se presentan en la Tabla 2. De acuerdo con esta tabla, en todos los ensayos se obtuvieron rendimientos superiores al 85%. Lopez et al. [10] reporta un rendimiento del 80%; Chuah et al [32] reportan un rendimiento de 97% y Phan [25] reporta un rendimiento de 88-90% para el aceite de cocina usado. Para el aceite de higuera, Kilic et al [16] reportada un rendimiento superior al 90% y Dias [18] un rendimiento del 92%. Estos resultados muestran que la adición de aceite de cocina usado a la mezcla de aceites no ocasiona una disminución en el rendimiento, por lo cual podría ser reemplazado parcialmente el aceite de higuera por aceite de cocina usado hasta el 20%.

**Tabla 2.** Resultados de rendimiento de la reacción y poder calorífico del Biodiesel obtenido

Porcentaje de aceite de cocina usado	Rendimiento [%]	Conversion [%]	Poder Calorífico [J/g]
0%	91.25 ± 0.010	90.07 ± 0.002	35672 ± 0.006
5%	92.66 ± 0.008	94.75 ± 0.001	36312 ± 0.002
10%	97.88 ± 0.002	91.25 ± 0.005	36198 ± 0.005
15%	99.89 ± 0.001	97.25 ± 0.002	36645 ± 0.001
20%	95.45 ± 0.007	94.22 ± 0.005	36150 ± 0.008
100%	85.43 ± 0.011	90.25 ± 0.004	37255 ± 0.005

### 3.3 Poder Calorífico.

El poder calorífico obtenido para todas las muestras de biodiésel se encuentra en el rango de 35.000 J / g a 38.000 J / g como se muestra en la Tabla 2. En dicha tabla se ve que la presencia del aceite de cocina usado en la mezcla de aceites hace que se incremente el poder calorífico. El biodiesel que tiene el mayor poder calorífico es el producido a partir de solo aceite de cocina usado, seguido por la mezcla de 85% de aceite de higuera y 15% de aceite de cocina usado. Tal como se presenta en la literatura, el poder calorífico del biodiesel a partir de aceite de higuera se encuentra en 36.947,4 J / g [13], [19] y el del aceite de cocina usado se encuentra en 37.520 J / g [33]. Lo anterior ratifica que el biodiesel obtenido cumple con lo reportado y que no hay un cambio considerable en el poder calorífico por la adición de aceite de cocina usado al aceite de higuera.

### 3.4 Análisis de cromatografía.

Lo presentado en la Tabla 3 evidencia que el contenido de ésteres metílicos está en un rango entre 97,4% y 98,2%. En la literatura se reportan valores superiores al 84,8% para el aceite de higuera [17] y al 99,1% para el aceite de cocina usado [10]. Por otro lado, según la norma ASTM D-1945 el

contenido de monoglicéridos y diglicéridos debe ser de 0,8 y 0,2 como máximo, respectivamente. El contenido de ésteres metílicos obtenidos en la cromatografía de gases para ambos aceites y sus mezclas está en los rangos establecidos en la bibliografía. Lo anterior ratifica que la adición de aceite de cocina usado al aceite de higuera no afecta a la producción de biodiesel, ya que es notable en la composición del biodiesel obtenido, el rendimiento de la reacción y en el poder calorífico.

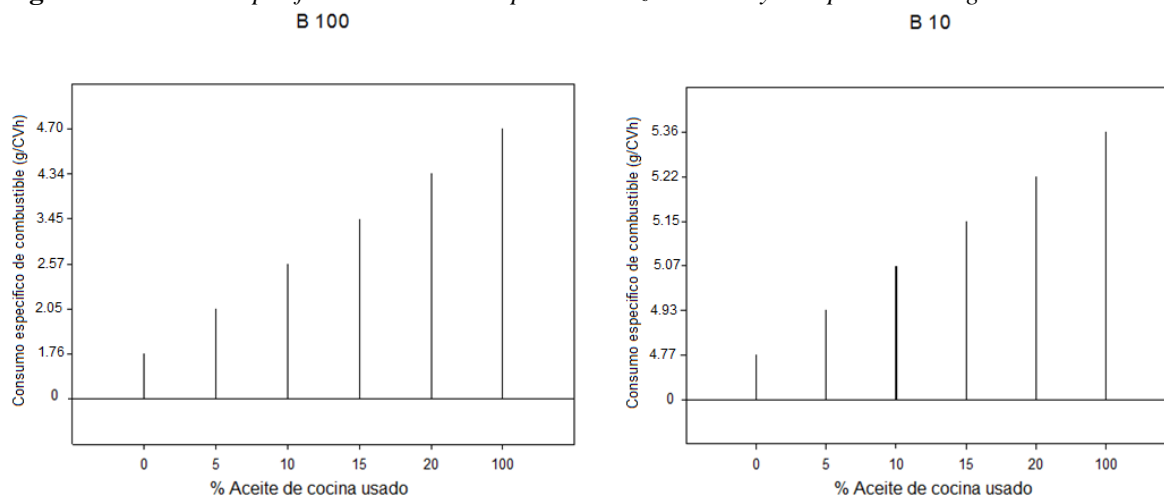
**Tabla 3.** Resultados cromatografía de gases del biodiesel.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Esteres metílicos [ME]	Monoglicéridos [MG]	diglicéridos [DG]	triglicéridos [TG]
0%	97.4	0.4	0	0
5%	97.6	0.59	0	0
10%	97.8	0.66	0	0
15%	97.8	0.70	0	0
20%	97.9	0.69	0	0
100%	98.2	0.8	0	0

### 3.5 Prueba de consumo específico de combustible en un motor diesel y opacidad.

Se evaluó el comportamiento de la mezcla de biodiesel obtenido y petro-diesel en un motor. La mezcla B10 tenía un consumo de combustible específico de 5.35 g/CVh de mezcla de diesel-biodiesel en comparación con la mezcla B0 con 6.14 g/CVh de diesel-biodiesel y B100 con 4.69 g/CVh. No se puede comparar con otros reportes porque el consumo de combustible específico depende de la fuente de los aceites, poder calorífico, parámetros del motor [34]. Sin embargo, de acuerdo con la Figura 1, la adición de aceite de cocina usado al aceite de higuera aumenta el consumo específico de combustible debido al alto poder calorífico obtenido de acuerdo con la Tabla 2. La presencia de aceite de cocina usado produjo un aumento en el poder calorífico y disminuyó el consumo de combustible específico. Esta es una gran contribución al uso de aceite de higuera, ya que es posible agregar un bajo porcentaje de aceite de cocina usado obteniendo el aumento en el consumo de combustible específico.

**Figura 1.** Consumo específico de combustible para las mezclas B100 y B10 para una carga de 600 W.



La Tabla 4 muestra la prueba de la opacidad. En esta tabla, la mezcla B10 (10% de biodiesel) tiene

un rango de 86,1% a 91,8% para la opacidad; En contraste, para la mezcla B100 (100% biodiesel), la opacidad muestra valores entre 76,2% y 80,1%. Además se puede observar que todas las mezclas no tienen una diferencia significativa de opacidad debido a la adición de aceite de cocina usado, por lo que es posible adicionar este aceite y no afecta al comportamiento en el motor y la opacidad. Para todos los ensayos, la opacidad fue menor para B100 en comparación con B10, lo que indica que el aumento del biodiesel en la mezcla diesel / biodiesel descarta la emisión de partículas. Este comportamiento es similar al informe de Fang [35], porque la presencia de oxígeno en el biodiesel conduce a una combustión más completa. Estos resultados indican que es posible cambiar un porcentaje de aceite de higuera por aceite de cocina usado sin tener un cambio significativo de potencia y en los resultados de opacidad. Esto es importante para reducir el costo de las materias primas en la producción de biodiesel.

**Tabla 4.** Resultados de opacidad.

Porcentaje de aceite usado de cocina	Opacidad [%]	
	B10	B100
0%	87.2	76.2
5%	87.9	77.5
10%	86.1	78.1
15%	88.9	78.5
20%	91.8	80.1
100%	87.7	78.7

#### 4. Conclusiones.

El biodiesel se obtuvo a partir de mezclas de aceite de higuera y aceite de cocina usado por transesterificación. Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron que el rendimiento para las mezclas de aceite de higuera con aceite de cocina usado fueron superiores al 92,66%, siendo la mezcla de 85% de aceite de higuera y 15% de aceite de cocina usado la que obtuvo el mayor rendimiento (99,89%). Además, el poder calorífico obtenido para esta mezcla es de 36645 J / g siendo el más alto con respecto a las otras mezclas evaluadas y no hay mayor diferencia con respecto al biodiesel obtenido completamente a partir de aceite de cocina usado. Además, el biodiesel obtenido aumenta el consumo de combustible específico y reduce la opacidad. Con este trabajo se puede concluir que es posible integrar el aceite de cocina usado en procesos productivos para obtener biodiesel a partir de aceite de higuera y reducir los costos del biodiesel generado. Además, será posible integrar el aceite de cocina usado en un proceso de producción sin que siga generando impactos en el medio ambiente.

#### Referencias

- [1] A. Talebian-Kiakalaieh, N. A. S. Amin, and H. Mazaheri, "A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil," *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 683–710, 2013.
- [2] M. Balat and H. Balat, "Progress in biodiesel processing," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 6, pp. 1815–1835, Jun. 2010.
- [3] A. Beatriz, Y. Araújo, and D. de Lima, "Glicerol: um breve histórico e aplicação em sínteses estereosseletivas," *Quim. Nova*, vol. 34, no. 2, pp. 1–15, 2011.
- [4] S. S. Wirawan, A. H. Tambunan, M. Djamin, and H. Nabetani, "The Effect of Palm Biodiesel Fuel on the Performance and Emission of the Automotive Diesel Engine," *Agric.*

- Eng. Int.*, vol. X, pp. 1–13, 2008.
- [5] J. C. Acevedo, J. A. Hernández, C. F. Valdés, and S. K. Khanal, “Analysis of operating costs for producing biodiesel from palm oil at pilot-scale in Colombia,” *Bioresour. Technol.*, vol. 188, pp. 117–123, 2015.
- [6] C. L. Barajas Forero, “Biodiesel from castor oil: a promising fuel for cold weather,” *RE&PQJ*, vol. 1, no. 3, pp. 59–62, 2005.
- [7] N. Sánchez, J. M. Encinar, G. Martínez, and J. F. González, “Biodiesel Production from Castor Oil under Subcritical Methanol Conditions,” *Int. J. Environ. Sci. Dev.*, vol. 6, no. 1, pp. 61–66, 2015.
- [8] D. P. Deshpande, Y. D. Urunkar, and P. D. Thakare, “Production of Biodiesel From Castor Oil using acid and Base catalysts,” *Res. J. Chem. Sci.*, vol. 2, no. 8, pp. 51–56, 2012.
- [9] A. Talebian-kiakalaieh, N. A. S. Amin, and H. Mazaheri, “A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil,” *Appl. Energy*, vol. 104, pp. 683–710, Apr. 2013.
- [10] L. López, J. Bocanegra, and D. Malagón-romero, “Obtención de biodiesel por transesterificación de aceite,” *Ing. y Univ.*, vol. 19, no. 1, pp. 155–172, 2015.
- [11] P. Verma, M. P. Sharma, and G. Dwivedi, “Evaluation and enhancement of cold flow properties of palm oil and its biodiesel,” *Energy Reports*, vol. 2, pp. 8–13, 2016.
- [12] Y. L. Cheryl-Low, K. L. Theam, and H. V. Lee, “Alginate-derived solid acid catalyst for esterification of low-cost palm fatty acid distillate,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 106, pp. 932–940, 2015.
- [13] S. Nurdin, N. A. Rosnan, N. S. Ghazali, J. Gimbut, A. H. Nour, and S. F. Haron, “Economical Biodiesel Fuel Synthesis from Castor Oil Using Mussel Shell-Base Catalyst (MS-BC),” *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 576–583, 2015.
- [14] O. S. Valente, V. M. D. Pasa, C. R. P. Belchior, and J. R. Sodr e, “Physical-chemical properties of waste cooking oil biodiesel and castor oil biodiesel blends,” *Fuel*, vol. 90, no. 4, pp. 1700–1702, 2011.
- [15] S. M. Hailegiorgis, M. A. Hasraff, S. N. Khan, and M. Ayoub, “Methanolysis of Castor Oil and Parametric Optimization,” *Procedia Eng.*, vol. 148, pp. 546–552, 2016.
- [16] M. Kilic, B. Burcu, E. Pütün, and A. E. Putun, “Optimization of biodiesel production from castor oil using factorial design,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 111, pp. 105–110, 2013.
- [17] N. Sánchez, R. Sánchez, J. M. Encinar, J. F. González, and G. Martínez, “Complete analysis of castor oil methanolysis to obtain biodiesel,” *Fuel*, vol. 147, pp. 95–99, 2015.
- [18] J. M. Dias, J. M. Araújo, J. F. Costa, M. C. M. Alvim-Ferraz, and M. F. Almeida, “Biodiesel production from raw castor oil,” *Energy*, vol. 53, pp. 58–66, 2013.
- [19] A. Amin, A. Gadallah, A. K. El Morsi, N. N. El-Ibiari, and G. I. El-Diwani, “Experimental and empirical study of diesel and castor biodiesel blending effect, on kinematic viscosity, density and calorific value,” *Egypt. J. Pet.*, pp. 2–7, 2016.
- [20] A. B. Chhetri, K. C. Watts, and M. R. Islam, “Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production,” *Energies*, vol. 1, no. 1, pp. 3–18, 2008.
- [21] J. Echavarría, “El desarrollo sostenible y el reciclaje del aceite usado de cocina a la luz de la jurisprudencia y el ordenamiento jurídico colombiano,” *Prod. + Limpia*, vol. 7, no. 1, pp. 109–122, 2012.
- [22] M. Martínez-Pineda, a. Ferrer-Mairal, a. Vercet, and C. Yagüe, “Physicochemical characterization of changes in different vegetable oils (olive and sunflower) under several frying conditions Caracterización fisicoquímica de los cambios en diferentes aceites vegetales (oliva y girasol) bajo varias condiciones de fritura,” *CyTA - J. Food*, vol. 9, no. 4, pp. 301–306, 2011.
- [23] B. M. Ordoñez, L. C. Chaves, and W. Rodríguez-pérez, “Caracterización de biodiesel obtenido de aceite residual de cocina,” *Rev. Colomb. Biotecnol.*, vol. 15, no. 1, pp. 61–70, 2013.



- [24] X. Meng, G. Chen, and Y. Wang, "Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test," *Fuel Process. Technol.*, vol. 89, no. 9, pp. 851–857, 2008.
- [25] A. N. Phan and T. M. Phan, "Biodiesel production from waste cooking oils," *Fuel*, vol. 87, pp. 3490–3496, 2008.
- [26] A. A. Apostolakou, I. K. Kookos, C. Marazioti, and K. C. Angelopoulos, "Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils," *Fuel Process. Technol.*, vol. 90, no. 7–8, pp. 1023–1031, 2009.
- [27] V. K. W. S. Araujo, S. Hamacher, and L. F. Scavarda, "Economic assessment of biodiesel production from waste frying oils," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 12, pp. 4415–4422, 2010.
- [28] A. Mohammadshirazi, A. Akram, S. Rafiee, and E. Bagheri Kalhor, "Energy and cost analyses of biodiesel production from waste cooking oil," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 44–49, 2014.
- [29] N. Kapilan, T. P. Ashok Babu, and R. P. Reddy, "Technical aspects of biodiesel and its oxidation stability," *Int. J. ChemTech Res.*, vol. 1, no. 2, pp. 278–282, 2009.
- [30] L. C. Meher, D. Vidya Sagar, and S. N. Naik, "Technical aspects of biodiesel production by transesterification — a review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 248–268, 2006.
- [31] M. Alam, D. Akram, E. Sharmin, F. Zafar, and S. Ahmad, "Vegetable oil based eco-friendly coating materials: A review article," *Arab. J. Chem.*, vol. 7, no. 4, pp. 469–479, 2014.
- [32] L. F. Chuah, S. Yusup, A. R. Abd Aziz, A. Bokhari, and M. Z. Abdullah, "Cleaner production of methyl ester using waste cooking oil derived from palm olein using a hydrodynamic cavitation reactor," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4505–4514, 2016.
- [33] S. Kathirvel, A. Layek, and S. Muthuraman, "Exploration of waste cooking oil methyl esters (WCOME) as fuel in compression ignition engines: A critical review," *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 19, no. 2, pp. 1–9, 2016.
- [34] B. H. Diya'Uddeen, A. R. Abdul Aziz, W. M. A. W. Daud, and M. H. Chakrabarti, "Performance evaluation of biodiesel from used domestic waste oils: A review," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, no. 3, pp. 164–179, 2012.
- [35] Q. Fang, J. Fang, J. Zhuang, and Z. Huang, "Effects of ethanol- diesel-biodiesel blends on combustion and emissions in premixed low temperature combustion," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 54, no. 2, pp. 541–548, 2013.