

## Tema A4 Termofluidos: Biocombustibles

### “Evaluación del proceso de obtención de biodiesel a partir de aceites vegetales usados”

\*Riesco-Ávila J.M.<sup>a</sup>, Flores-Patiño, E.E.<sup>a</sup>, Elizalde-Blancas, F.<sup>a</sup>, Martínez-Martínez, S.<sup>b</sup>, Malagón-Romero, D.H.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Division de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Salamanca, Gto. CP 36885, Mexico

<sup>b</sup>FIME, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, N.L. CP 66450, México

<sup>c</sup>Univesidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.

\*riesco@ugto.mx

#### RESUMEN

*En este trabajo se evalúa la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, mediante el método de transesterificación, variando el tipo de catalizador (hidróxido de sodio y de potasio), la relación molar entre el alcohol y el aceite (9:1 y 6:1), y el porcentaje de catalizador (1,0% y 1,5% respecto al aceite). El mejor rendimiento en la conversión de aceite en biodiesel se obtuvo con el uso de KOH al 1,0% como catalizador, con una relación molar metanol:aceite de 6:1. Con estas condiciones, se obtuvo un rendimiento del 99%. Sin embargo, la mayor cantidad de ésteres metílicos de ácidos grasos se obtiene con una relación molar metanol:aceite de 9:1, con un porcentaje de KOH como catalizador de 1,5%.*

*Palabras Clave: Biodiesel, Transesterificación, Aceite vegetal usado.*

#### ABSTRACT

*In this work the production of biodiesel from waste vegetable oil is evaluated by means of the transesterification method varying the catalyst type (sodium and potassium hydroxide), the molar rate between alcohol and oil (9:1 and 6:1) and the catalyst percentage (1,0% and 1,5% with respect to oil). The best performance of the oil to biodiesel conversion was obtained with the use of KOH as catalyst at 1,0% with a methanol:oil molar rate of 6:1. Under these conditions a performance of 99% was obtained. However, the largest amount of fatty acid methyl ester are obtained with a methanol:oil molar rate of 9:1, with 1,5% of KOH catalyst.*

*Keywords: Biodiesel, Transesterification, Waste vegetable oil.*

#### 1. Introducción

La mayoría de los motores de combustión interna alternativos (MCIA) obtienen su energía de la combustión de combustibles derivados del petróleo con aire, lo cual convierte la energía química del combustible en energía mecánica. El consumo de estos combustibles presenta dos problemas graves. El primero de ellos es su limitada disponibilidad en un futuro más o menos próximo. Estos combustibles se formaron a base de restos de plantas y organismos que habitaron la Tierra en épocas remotas y que posteriormente sufrieron una serie de transformaciones biológicas y geológicas. Los mismos han permanecido atrapados por la corteza terrestre durante miles de años, pero como actualmente se extraen en grandes cantidades, su agotamiento será inevitable, al no poder regenerarse con rapidez. El segundo gran problema asociado al consumo masivo actual de combustibles fósiles es el impacto gravemente negativo que han causado y causarán a la

biósfera terrestre, la delgada capa de la Tierra en la que se desarrolla la vida.

En las últimas décadas, la investigación y el desarrollo de actividades relacionadas con el transporte han hecho hincapié en el desarrollo de un transporte eficiente, limpio y seguro. Vehículos eléctricos, híbridos y de pilas de combustible han sido propuestos para sustituir los vehículos convencionales en un futuro próximo. Por otro lado, el uso de combustibles alternos, llamados biocombustibles, en los motores actuales es también una alternativa para reducir el uso de combustibles fósiles.

Los biocombustibles son combustibles de origen biológico obtenidos de manera renovable a partir de restos orgánicos. Entre las fuentes de los biocombustibles, están la biomasa proveniente de cultivos como caña de azúcar, maíz, sorgo, yuca y otros, usada para producir etanol; los aceites provenientes de palma africana, soya, higuera, Jatropha curcas, colza y otras plantas, utilizados para producir biodiesel; y residuos de origen animal, vegetal, humano, agroindustriales, forestales y cultivos acuáticos, para producir biogás.

En años recientes los biocombustibles han tenido un gran desarrollo y se pronostica que constituirán un porcentaje importante de abastecimiento de la energía primaria que actualmente es útil para la humanidad. Existen varias características por las cuales los biocombustibles representan una alternativa amigable para obtener energía. Entre éstas están que: contaminan menos que la gasolina o el diesel; a diferencia de algunos aditivos oxigenantes que se emplean en la gasolina no son cancerígenos; si son producidos y utilizados con buenas prácticas, permiten reciclar de manera artificial el bióxido de carbono y por tanto no contribuyen a incrementar la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera. Una diferencia fundamental con los combustibles fósiles desde el punto de vista de materia prima renovable, es que representan una alternativa viable para obtener energía sustentable [1].

El biodiesel es un combustible que se obtiene por la reacción de transesterificación de un triglicérido, proveniente de aceite animal o vegetal, con un alcohol, típicamente metanol o etanol, para formar ésteres metílicos o etílicos [2,3]. Si se utiliza metanol, se obtendrán ésteres metílicos y si se usa etanol se obtendrán ésteres etílicos [4]. La transesterificación de los triglicéridos se puede realizar mediante diferentes procesos catalíticos. Los catalizadores utilizados pueden ser clasificados de la siguiente manera: *Catalizadores básicos o alcalinos* (hidróxido de sodio, hidróxido de potasio y metilato de sodio) [2,5,6]; *Catalizadores ácidos* (ácido sulfúrico, ácido fosfórico, ácido clorhídrico y ácido sulfónico) [7]; *Catalizadores enzimáticos* (lipasas) [8]; y *Catalizadores heterogéneos* (catalizadores en fase sólida) [9].

En este trabajo se evalúa la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, mediante el método de transesterificación, variando el tipo de catalizador (hidróxido de sodio y de potasio), la relación molar entre el alcohol y el aceite (9:1 y 6:1), y el porcentaje de catalizador (1,0% y 1,5% respecto al aceite).

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Materia prima

Para este proyecto se utilizó el aceite vegetal usado de canola, soya, girasol y cártamo, recolectado de la cafetería de una Universidad.

El aceite vegetal usado fue filtrado al vacío a través de un papel filtro cuantitativo N° 4, que permite retener sólidos suspendidos en el aceite de hasta 25 µm. Para facilitar la filtración, el aceite se calentó a 80 °C durante 10 min, con el fin de disminuir la viscosidad y eliminar el agua contenida en el aceite.

### 2.2. Caracterización del aceite

Para realizar la caracterización del aceite se siguieron las Normas Mexicanas (NMX) y/o las normas internacionales

ISO, ASTM y EN. Bajo estas normas se determinaron las siguientes propiedades:

- Densidad (NMX-F-075-SCFI-2012/ISO 6883-2017).
- Viscosidad (ASTM D445).
- Índice de acidez (NMX-F-101-SCFI-2012/ISO 660:2009/ASTM D664).
- Índice de saponificación (NMX-F-174-SCFI-2014/ISO 3657:2002/ASTM D5558).
- Índice de yodo (NMX-F-152-SCFI-2011/ISO 3961:2009/EN 14111).

### 2.3. Identificación de los parámetros del proceso

Para la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, se consideraron 8 parámetros, cinco de los cuales son constantes. En la Tabla 1 se presentan los 8 parámetros considerados y sus respectivos valores.

Tabla 1 – Parámetros para la obtención de biodiesel.

Parámetro	Valor
Aceite vegetal usado	185 ó 200 ml
Tipo de alcohol	Metanol
Temperatura	60 °C
Velocidad de agitación de la reacción	600 rpm
Tiempo de la reacción	2 horas
Relación molar alcohol:aceite	6:1 y 9:1
Catalizador	NaOH y KOH
Porcentaje de catalizador	1,0 y 1,5%

Los parámetros que no se modificaron en este estudio, se definieron con fundamento en la literatura. El alcohol seleccionado fue metanol, ya que dentro de sus propiedades se encuentra que es el alcohol de cadena más corta y es polar, además de ser económico [10]. La temperatura de reacción se fijó en 60 °C, ya que la temperatura de evaporación del metanol es de 65 °C [11]. La velocidad de agitación de la reacción se fijó en 600 rpm y el tiempo de reacción fue de 2 horas.

Para analizar el efecto del tipo y porcentaje de catalizador usado, y la relación molar alcohol:aceite, se realizó un diseño factorial completo 2<sup>k</sup>. En la Tabla 2 se presentan los 3 factores analizados y el dominio factorial.

Tabla 2 – Factores y dominio experimental.

Factores	Dominio Experimental	
	Nivel (-)	Nivel (+)
Catalizador	KOH	NaOH
Porcentaje de catalizador	1,0	1,5
Relación molar metanol:aceite	6:1	9:1

En la Tabla 3 se presenta la matriz de experimentos realizados. Cada uno de estos ensayos se realizó por duplicado.

Tabla 3 – Matriz de experimentos para el diseño factorial 2<sup>3</sup>.

Ensayo	Catalizador	Porcentaje de catalizador	Relación molar metanol:aceite
1	KOH	1,0	6:1
2	KOH	1,5	6:1
3	KOH	1,0	9:1
4	KOH	1,5	9:1
5	NaOH	1,0	6:1
6	NaOH	1,5	6:1
7	NaOH	1,0	9:1
8	NaOH	1,5	9:1

#### 2.4. Transesterificación

Para llevar a cabo la reacción se utilizó un reactor de vidrio con capacidad de 250 ml, que tiene una chaqueta de calentamiento para controlar la temperatura de la reacción, mediante un baño con control de temperatura y equipado con dos boquillas en la tapa: una para permitir el ingreso de la solución de catalizador-alcohol y la otra para ubicar un condensador con el fin de evitar la pérdida de metanol. La agitación se garantizó usando una plancha de agitación magnética.

En la Figura 1 se muestra el montaje experimental para la obtención del biodiesel, mediante la reacción de transesterificación.

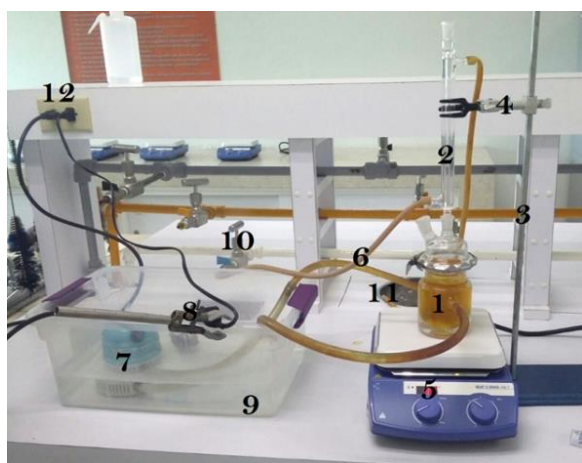


Figura 1 - Montaje para la producción de biodiesel.

Transcurridas las 2 horas de la reacción de transesterificación, se detiene la agitación para realizar la separación del biodiesel y glicerina. El biodiesel (fase liviana) y la glicerina (fase pesada), se separan colocando la mezcla en un embudo de decantación, como se muestra en la Figura 2.



Figura 2 – Separación del biodiesel y la glicerina.

#### 2.5. Separación y purificación del biodiesel

El proceso de separación de las dos fases duró 24 horas. Una vez separado el biodiesel, se realiza un proceso de purificación, para retirar los posibles residuos de metanol, glicerina y catalizador [12,13]. Se adicionó agua destilada en un volumen igual a un tercio del volumen de biodiesel, se agitó manualmente y se dejó de nuevo en el embudo de decantación hasta que las fases se separan, para posteriormente eliminar la fase acuosa. El proceso se repitió hasta alcanzar un valor de pH del agua de lavado cercano a la neutralidad. En la Figura 3 se muestran los tres lavados realizados.

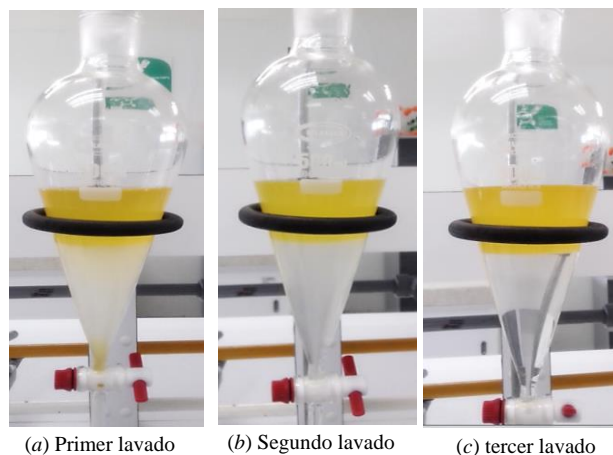


Figura 3 – Etapas de purificación del biodiesel.

Terminado el proceso de separación, el producto se calentó a 110 °C para evaporar el agua que podía estar presente. Una vez deshidratado, se almacenó el producto a 4 °C. En la Figura 4 se muestra el biodiesel obtenido después de la purificación.



Figura 4 - Biodiesel purificado.

## 2.6. Cromatografía de gases

Con el fin de determinar la calidad del biodiesel producido, se realizó una cromatografía de gases para determinar el contenido de glicerol, mono-, di- y tri-glicéridos, el porcentaje de ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés: *Fatty Acid Methyl Ester*), el ácido linolénico y la concentración de metanol en el biodiesel.

El cromatógrafo de gases usado fue un Varian modelo 450 GC, equipado con un detector de ionización de flama (FID). Para el análisis de glicerina y glicéridos, el cual se realiza bajo la norma ASTM D6584/EN14105 [14], se utiliza un inyector capilar SPI 1093 con temperatura programable y una columna capilar BPX-BIOD6584 de 30 m de longitud, 0,25 mm de diámetro y 0,25  $\mu\text{m}$  de espesor. El porcentaje de FAME y ácido linolénico se determina usando la norma EN14103 [15,16], y para la concentración de metanol se usa la norma EN14110 [17]. En estos casos, se usa un inyector capilar Split/Splitless y una columna capilar Omegawax<sup>TM</sup> 250 de 30 m de longitud, 0,25 mm de diámetro y 0,25  $\mu\text{m}$  de espesor.

Para el análisis de glicerina y glicéridos, se inyectaron manualmente muestras de 1  $\mu\text{L}$ . La temperatura inicial del inyector fue de 60 °C durante 0,05 min, incrementándose posteriormente hasta 380 °C a una velocidad de 14,5 °C/s. En el horno, la temperatura inicial fue de 50 °C durante 1 min, después de lo cual se realiza una primera rampa de calentamiento hasta 180 °C con una velocidad de 15 °C/min; posteriormente, una segunda rampa hasta 230 °C con una velocidad de 7 °C/min y, finalmente, una tercera rampa hasta 380 °C con una velocidad de 30 °C/min y un periodo de estabilización de 10 min.

Por otro lado, para el análisis del porcentaje de FAME y el ácido linolénico, se inyectaron manualmente muestras de 1  $\mu\text{L}$ . La temperatura del inyector fue de 260 °C. En el horno, la temperatura inicial fue de 150 °C durante 1 min, después de lo cual se realiza una rampa de calentamiento hasta 250 °C con una velocidad de 5 °C/min y un periodo de estabilización de 20 min.

Finalmente, para el análisis de la concentración de metanol, se inyectaron manualmente muestras de 0,3 mL. La temperatura del inyector fue de 140 °C. En el horno, la temperatura inicial fue de 50 °C durante 5 min, después de

lo cual se realiza una rampa de calentamiento hasta 180 °C con una velocidad de 10 °C/min y un periodo de estabilización de 12 min.

En todos los análisis el gas de arrastre fue nitrógeno con un flujo de 3,0 mL/min y la adquisición y procesamiento de los datos se realizó usando el programa Galaxie<sup>TM</sup>.

## 3. Resultados

### 3.1. Caracterización del aceite

En la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del aceite vegetal usado.

Tabla 4 – Propiedades del aceite vegetal usado.

Propiedad	Valor	Especificación	Fuente
Densidad a 20 °C [g/ml]	0,904	0,96	ASTM-D1298
Viscosidad cinemática a 40 °C [mm <sup>2</sup> /s]	22,42	50	ASTM-D445
Índice de acidez [mg KOH/g]	0,48	1,24	[18]
Porcentaje de acidez [%]	0,95	0,98	[19]
Índice de saponificación [mg KOH/g]	80,64	No reportado	ASTM-D5558
Índice de yodo [g I <sub>2</sub> /100 g]	121	118-141	[20]

Como se observa en la Tabla 4, todos los valores obtenidos de las propiedades del aceite vegetal utilizado en este trabajo para la obtención de biodiesel, se encuentran dentro, o muy cercano, a las especificaciones establecidas para aceite virgen.

La determinación del porcentaje de ácidos grasos libres resulta ser un parámetro importante a la hora de definir si es necesario realizar el proceso de obtención de biodiesel en dos etapas: esterificación (conversión de ácidos grasos en metilésteres) y transesterificación (conversión de triacilglicéridos en metilésteres). Por lo general, la esterificación se realiza en condiciones ácidas, mientras que la transesterificación, en condiciones alcalinas. El criterio para realizar la reacción en dos etapas es el porcentaje de ácidos grasos libres, que debe ser superior al 1,0% [21]. Como se puede ver en la Tabla 4, al tener un porcentaje de ácidos grasos menor de 0,98% no se requiere la esterificación en condiciones ácidas.

### 3.2. Rendimiento para la transesterificación

El rendimiento del proceso se definió como la relación entre el volumen de biodiesel obtenido y el volumen de aceite utilizado.

En la Tabla 5 se muestran los resultados del rendimiento obtenido para cada uno de los ensayos. En esta tabla se observa que el mejor rendimiento se obtuvo para el ensayo 1, el cual corresponde al uso de KOH al 1,0% como catalizador, con una relación molar metanol:aceite de 6:1.

**Tabla 5 – Rendimiento.**

Ensayo	Cat. [% m/m]	Rel. molar	Aceite [ml]	Vol. final Biodiesel [ml]	Rendimiento [%]
1	1,0	6:1	200	198	99
2	1,5	6:1	200	185	93
3	1,0	9:1	185	175	95
4	1,5	9:1	185	175	95
5	1,0	6:1	200	187	94
6	1,5	6:1	200	175	88
7	1,0	9:1	185	170	92
8	1,5	9:1	185	163	88

Los resultados presentados en la Tabla 5 muestran que el rendimiento se ve afectado por el porcentaje de catalizador y la interacción entre el tipo-cantidad de catalizador y el porcentaje de catalizador-relación molar. El uso de NaOH favorece la formación de jabones (reacción de saponificación) y, por ello, se presenta un menor rendimiento al compararlo con el hidróxido de potasio.

Como se observa en la Tabla 5, para los dos catalizadores evaluados (NaOH y KOH), el mayor rendimiento se obtiene para una baja concentración de catalizador (1,0%) y una baja relación molar de metanol:aceite, 6:1.

Por otro lado, el incremento en el porcentaje de catalizador disminuye el rendimiento de la reacción, debido a la saponificación que se presenta. Esto puede deberse a que el sodio tiene mayor electronegatividad, lo cual lo hace más reactivo; además, el hidróxido de sodio tiene menor peso molecular que el hidróxido de potasio, por lo cual hay más moles de hidróxido de sodio para un mismo porcentaje en peso evaluado [22]. Adicionalmente, alcanzar la neutralidad en la etapa de lavado del biodiesel implica el uso de una mayor cantidad de agua.

En la Tabla 6 se muestran las propiedades del biodiesel obtenido. En el caso de la densidad y la viscosidad, estas propiedades se encuentran dentro de los valores especificados en la Norma EN 14214:2008, la cual establece los requerimientos y métodos de prueba para combustibles automotrices.

**Tabla 6 – Propiedades del biodiesel obtenido.**

Ensayo	Densidad [g/ml]	Viscosidad [mm <sup>2</sup> /s]	Poder Calorífico [kJ/kg]
1	0,866	4,55	40 305
2	0,861	4,44	40 385
3	0,862	4,44	40 214
4	0,863	4,53	40 050
5	0,863	4,59	40 260
6	0,864	4,35	40 305
7	0,862	4,54	40 192
8	0,864	4,46	40 250

### 3.3. Cromatografía de gases

En la Tabla 7 se presentan los resultados de la cromatografía de gases para cada uno de los ensayos. Para ambos catalizadores, la mayor cantidad de FAME se obtiene con una relación molar metanol:aceite de 9:1. Sin embargo, con KOH, la mayor cantidad de FAME se obtiene con un porcentaje de catalizador de 1,5% (ensayo 4), mientras que para el NaOH con un porcentaje de catalizador de 1,0% (ensayo 7). Estos resultados concuerdan con los presentados por Atadashi et al. [23], quienes estudiaron el efecto de los catalizadores alcalinos y la concentración de éstos en la obtención de metilésteres y concluyeron que cada catalizador tiene propiedades químicas que lo hacen más o menos reactivo, y en el caso del NaOH, es el que menor porcentaje necesita para lograr la mayor conversión de triglicéridos.

Con relación al contenido de glicerol, mono-, di- y triglicéridos, el ácido linolénico y la concentración de metanol en el biodiesel, los resultados muestran que todos estos parámetros se encuentran entre los límites establecidos por la Norma EN 14214:2008, como se muestra en la Tabla 7.

**Tabla 7 – Resultados de la cromatografía de gases.**

Ensayo	Glicerol	Monoglicéridos	Diglicéridos	Triglicéridos [% m/m]	FAME	C18:3	Metanol
1	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	78,50	0,33	0,13
2	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	89,90	8,97	0,20
3	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	78,50	0,32	0,18
4	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	97,70	8,98	0,19
5	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	78,70	0,28	0,07
6	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	91,40	8,92	0,08
7	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	97,50	8,95	0,03
8	ND	< 0,80	< 0,20	< 0,20	91,50	8,92	0,14

ND: No se detectó el pico de señal para este analito.

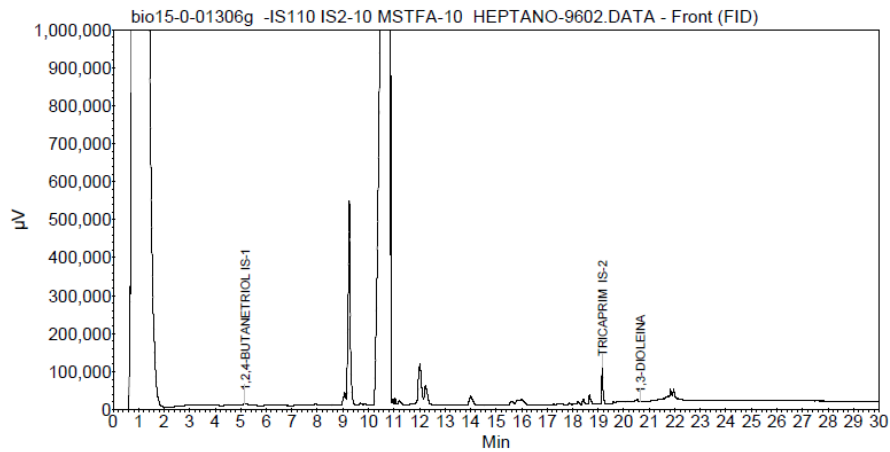


Figura 5 – Cromatograma del contenido de glicéridos en la muestra.

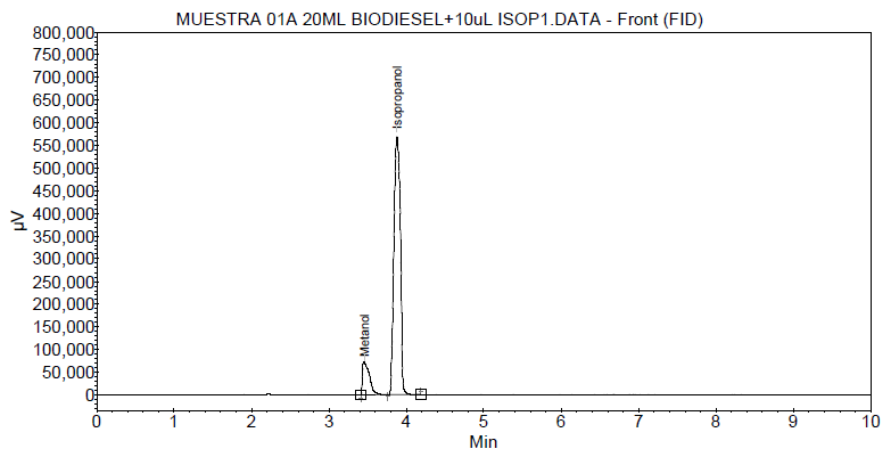


Figura 6 – Cromatograma del contenido de metanol en la muestra.

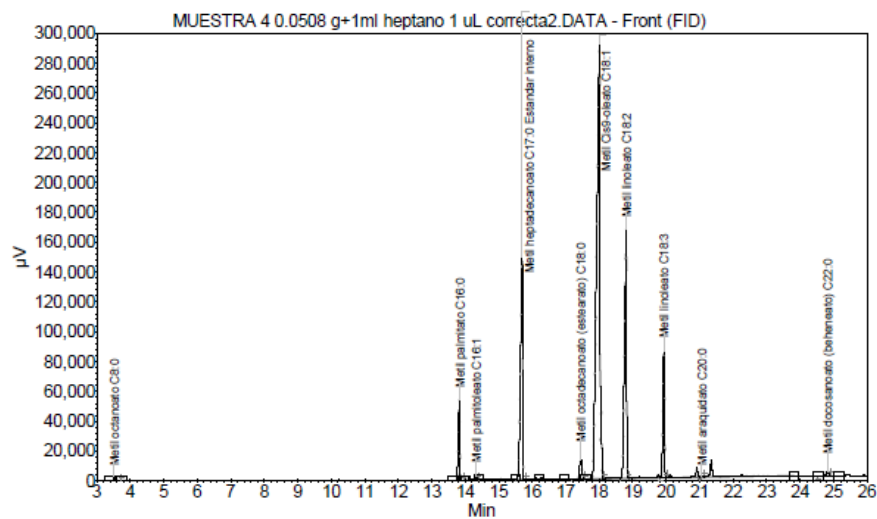


Figura 7 – Cromatograma del contenido de FAME y ácido linoléico (C18:3) en la muestra.

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran un Cromatograma del contenido de glicéridos, metanol y FAME, respectivamente, para una muestra del biodiesel obtenido en este trabajo.

#### 4. Conclusiones

En este trabajo se evalúa la obtención de biodiesel a partir de aceite vegetal usado, mediante el método de transesterificación, variando el tipo de catalizador (hidróxido de sodio y de potasio), la relación molar entre el alcohol y el aceite (9:1 y 6:1), y el porcentaje de catalizador (1,0% y 1,5% respecto al aceite).

Para los dos catalizadores evaluados (NaOH y KOH), el mayor rendimiento se obtiene para una baja concentración de catalizador (1,0%) y una baja relación molar de metanol:aceite, 6:1. Sin embargo, la mayor cantidad de FAME se obtiene con una relación molar metanol:aceite de 9:1, para ambos catalizadores, con un porcentaje de 1,5% para el KOH y del 1,0% para el NaOH.

Los resultados anteriores concuerdan con algunos reportados en la literatura, donde se concluye que industrialmente se prefiere el KOH por generar una mayor cantidad de metilésteres cuando se produce biodiesel a partir de aceites vegetales usados [23,24].

Otro elemento importante a la hora de seleccionar el KOH como catalizador tiene que ver con la separación de fases entre el glicerol y el biodiesel, debido a que los jabones obtenidos con potasio son más suaves que los formados con sodio; por lo tanto, los jabones de potasio se disuelven con mayor facilidad en la capa de glicerol y de esta forma el biodiesel se separa sin mayores gastos de agua. Sin embargo, el factor económico lleva a que generalmente se escoja el NaOH por su menor costo [23].

#### Agradecimientos

Los autores agradecen al PRODEP por el apoyo económico otorgado a la Red Temática: "Investigación e Innovación en Tecnología Energética", para la realización del proyecto: "Uso y Aprovechamiento Energético de Biocombustibles en Motores de Combustión Interna".

#### REFERENCIAS

- [1] Martínez Jiménez, A. Biocombustibles biotecnológicos. *Ide@s CONCYTEG*, Año 4, Núm.54, 1198-1215, 2009.
- [2] Dias, J.M., Alvim-Ferraz, M.C., Almeida, M.F. Comparison of the performance of different homogeneous alkali catalysts during transesterification of waste and virgin oils and evaluation of biodiesel quality. *Fuel*, vol. **87**, pp. 3572-3578, 2008.
- [3] Demirbas, A. Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats. *Energy Conversion and Management*, vol. **49**, pp. 125-130, 2008.
- [4] Leung, D.Y.C., Wu, X., Leung, M. K. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied Energy*, vol. **87**, pp. 1083-1095, 2010.
- [5] Encinar, J.M., González, J.F., Rodríguez-Reinares, A. Biodiesel from used frying oil. Variables affecting the yields and characteristics of the biodiesel. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. **44**, pp. 5491-5499, 2005.
- [6] Chen, K.S., Lin, Y.C., Hsu, K.H., Wang, H.K. Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system. *Energy*, vol. **38**, num. 1, pp. 151-156, 2012.
- [7] Soriano, N.U., Venditti, R., Argyropoulos, D.S. Biodiesel synthesis via homogeneous Lewis acid-catalyzed transesterification. *Fuel*, vol. **88**, pp. 560-565, 2009.
- [8] Lam, M.K., Lee, K.T., Mohamed, A.R. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: a review. *Biotechnology Advances*, vol. **28**, pp. 500-518, 2010.
- [9] Patil, P., Deng, S., Rhodes, J.I., Lammers, P.J. Conversion of waste cooking oil to biodiesel using ferric sulfate and supercritical methanol processes. *Fuel*, vol. **89**, num. 2, pp. 360-364, 2010.
- [10] Ma, F., Hanna, M. Biodiesel production: a review. *Bioresour. Technol.*, vol. 70, pp. 1-15, 1999.
- [11] Perry, R., Green, D. *Manual del Ingeniero Químico*. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2001.
- [12] Predojević, Z.J. The production of biodiesel from waste frying oils: A comparison of different purification steps. *Fuel*, vol. **87**, pp. 3522-3528, 2008.
- [13] Atadashi, I., Aroua, M., Aziz, A. Biodiesel separation and purification: A review. *Renewable Energy*, vol. **36**, pp. 437-443, 2011.
- [14] Narváez Rincón, P.C., Torres, J.A., Sánchez Castellanos, F., Ponce de León, L.F. Determinación por cromatografía de gases de alquil ésteres (metílico y etílico) de ácidos grasos, en presencia de mono-, di- y triglicéridos. *Ingeniería e Investigación*, n° 57, pp. 58-62, 2005.
- [15] Determination of Total FAME and Linolenic Acid Methyl Esters in Biodiesel According to EN14103. BRUKER, 2010.
- [16] Ruppel, T., Huybrighs, T. Fatty Acid Methyl Esters in B100 Biodiesel by Gas Chromatography (Modified EN 14103). Perkin Elmer For the Better, 2012.
- [17] Ruppel, T., Goodman, W., Huybrighs, T. Residual Methanol in B100 Biodiesel by Haspace Gas Chromatography According to EN14110. Perkin Elmer For the Better, 2012.
- [18] Holtmark, B., Mæstad, O. Emission trading under the Kyoto Protocol, effects on fossil fuel markets under alternative regimes. *Energy Policy*, vol. **30**, no. 1, pp. 207-218, 2002.
- [19] Anastasi, C., Hudson, R., Simpson, V.J. Effects of future fossil fuel use on CO<sub>2</sub> levels in the atmosphere. *Energy Policy*, vol. **18**, no. 10, pp. 936-944, 1990.
- [20] Hoekman, S. K., Robbins, C. Review of the effects of biodiesel on NO<sub>x</sub> emissions. *Fuel Processing Technology*, vol. **96**, pp. 237-249, 2012.
- [21] Helwani, Z., Othman, M., Aziz, N., Fernando, W., Kim, J. Technologies for production of biodiesel focusing on

- green catalytic techniques: A review". *Fuel Processing Technology*, vol. **90**, num. 12, pp. 1502-1514, 2009.
- [22] Leung, D., Guo, Y. Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, vol. **87**, pp. 883-890, 2006.
- [23] Atadashi, I., Aroua, M., Aziz, A., and Sulaiman, N. The effects of catalysts in biodiesel production: a review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. **19**, pp. 14-26, 2013.
- [24] Leung, D., and Guo, Y. Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel Processing Technology*, vol. **87**, pp. 883-890, 2006.