

Producción de biodiesel de aceite de palmiste – posible sustituto parcial del jet fuel A1

Palmiste oil biodiesel production - possible partial substitute for fuel jet A1

Recibido: 4 de noviembre de 2019 - Aceptado: 20 de Noviembre de 2019



Javier Alejandro Bonilla Páez*,
Manuel Alejandro Mayorga Betancourt**,
José Miguel Galindo Castillo***,
Camilo Andrés López Santamaría****,
Luz Adriana Suárez*****,
Mauricio López Gomez*****

..*.*.*Grupo de Investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME.

*****Grupo de Investigación en Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible, GADES.

Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, Universidad ECCI.

*****Grupo de Investigación en Electrónica y Tecnologías para la Defensa, TESDA

Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aérea Colombiana, ESUFA

Fuerza Aérea Colombiana, FAC.

*jbonillap@eccci.edu.co

* Ingeniero Electromecánico de la UTPC, Seccional Duitama. Magister en Ingeniería Mecánica de la Universidad de los Andes. Investigador de la Universidad ECCI. Investigador Junior de Colciencias. Experto en transformación termoquímica de la biomasa. Segundo líder del grupo del Grupo de investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME. e-mail: jbonillap@eccci.edu.co.

** Ingeniero Químico, M.Sc. y Ph.D (c) en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Investigador de la Universidad ECCI. Investigador Asociado de Colciencias. Experto en el área térmica, energía sostenible, biocombustibles, procesos químicos, materiales y tratamiento de residuos. Director del Grupo de investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME. e-mail: mmayorgab@eccci.edu.co.

*** Ingeniero Mecánico y Tecnólogo en Mecánica Automotriz de la Universidad ECCI. Joven Investigador de la Universidad ECCI y del Grupo de investigación en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía, GIATME. e-mail: josem.galindoc@eccci.edu.co.

**** Ingeniero Químico MSc PhD, director del programa de Ingeniería Química y Plásticos de la Universidad ECCI (Bogotá). Su experiencia en investigación se relaciona al análisis de sistemas de generación de energías y simulación de procesos. Específicamente, se encuentra trabajando en el diseño de equipos para la generación de bioqueroseno por hidrotratamiento de aceites y gasificación de material lignocelulósico. Investigador Junio de Colciencias. e-mail: clopezs@eccci.edu.co.

***** Ingeniera Ambiental y Técnica en Desarrollo Ambiental de la Universidad ECCI, candidata a Magister en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. Investigadora de la Universidad ECCI. e-mail: suarez.luz@eccci.edu.co.

***** Ingeniero Químico de la Universidad Nacional de Colombia, MBA en Administración del Instituto Europeo De Postgrados Escuela de Negocios San Pablo. Especialista de Certificación y jefe Fomento Aeronáutico de la Fuerza Aérea Colombiana. Mayor de la Fuerza Aérea Colombiana. e-mail: mauricio.lopezg@fac.mil.co.

Resumen

El biodiésel FAME es uno de los biocombustibles más ampliamente empleados en la actualidad para contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero, sin embargo su principal aplicación es en el transporte terrestre. Producir biodiésel por transesterificación a partir de aceites, como el de palmiste, permite no sólo obtener un biocarburante con propiedades más atractivas para los automotores ciclo diésel por sus insaturaciones, sino que en potencia podría tener un campo de acción más amplio, hasta el punto de emplearse en el transporte aéreo, debido a que los metil ésteres de ácidos grasos de cadenas más cortas pueden tener mayor similitud química y por ende física que a las moléculas del Jet Fuel. Así que en el presente estudio se evalúa la viabilidad técnica de la producción, a nivel de laboratorio, de biodiésel FAME a partir de aceite de palmiste vía transesterificación empleando metanol e hidróxido de potasio. En el diseño de experimentos, Box-Behnken, se definieron como factores: la temperatura, la relación molar metanol-aceite y la concentración de KOH, mientras que la variable de respuesta fue el rendimiento de biodiésel purificado. Se encontró un rendimiento óptimo del 99.9% a 47°C, 6 mol etanol/mol aceite y 0.5-1% de KOH. El aceite producido fue caracterizado determinando propiedades físico-químicas y funcionales que cumplen con las especificaciones establecidas para un biodiésel convencional. La composición del biodiésel obtenido encontrado con GC y FTIR tiene concordancia con el perfil de ácidos grasos del aceite de palmiste. Es necesario revisar las propiedades de flujo en frío de este aceite en mezclas con Jet Fuel A1 para realizar posibles pruebas en banco de motores de propulsión o hélice.

Palabras claves

Transesterificación, FAME, Queroseno, Ácidos grasos, Catalizador.

Abstract

FAME biodiesel is one of the most widely used biofuels currently used to contribute to the reduction of greenhouse gases, however its main application is in land transport. Producing biodiesel by transesterification from oils, such as palm kernel, allows not only to obtain a biofuel with more attractive properties for diesel-cycle cars because of their unsaturations, but potentially could have a broader field of action, to the point of used in air transport, because the fatty acid methyl esters of shorter chains may have greater chemical and therefore physical similarity to the Jet Fuel molecules. So in this study the technical feasibility of the production, at the laboratory level, of FAME biodiesel from palm kernel oil via transesterification using methanol and potassium hydroxide is evaluated. In the design of experiments, Box-Behnken, the following factors were defined: temperature, methanol-oil molar ratio and KOH concentration, while the response variable was the performance of purified biodiesel. An optimum yield of 99.9% at 47 °C, 6 mol ethanol/mol oil and 0.5-1% KOH was found. The oil produced was characterized by determining physical-chemical and functional properties that meet the specifications established for a conventional biodiesel. The biodiesel composition obtained with GC and FTIR is consistent with the fatty acid profile of palm kernel oil. It is necessary to check the cold flow

properties of this oil in mixtures with Jet Fuel A1 to perform possible tests on a propulsion or propeller engine bench.

Keywords

Transesterification, FAME, Kerosene, Fatty acids, Catalyst.

1. Introducción

Los combustibles alternativos en todo el mundo cada día han tomado mayor relevancia debido a que se pueden generar de manera más sostenible, y aportan en la reducción de gases de efecto invernadero. Varios métodos para generar biocombustibles son usados en la literatura como los usados en procesos termoquímicos, hidrotreatmento, transesterificación, etc. [1][2][3], [4]–[7]. La producción de biodiesel a partir de aceites vegetales es una alternativa para la sustitución de combustibles fósiles. En ese sentido, se han explorado múltiples fuentes de producción con el fin de obtener las mejores condiciones y competir con el mercado actual del Diesel convencional. La obtención de biodiesel convencional o FAME (siglas en inglés de metil ésteres de ácidos grasos) se lleva a cabo por transesterificación de un aceite crudo realizada por un alcohol en presencia de un catalizador, como se observa en la Figura 1.

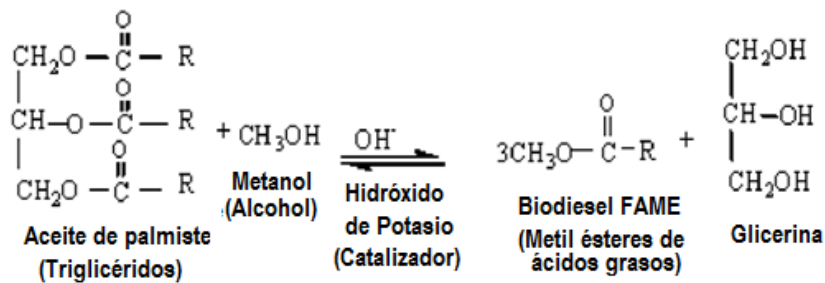


Figura 1. Obtención de biodiésel por transesterificación de aceite de palma. Adaptado de [3]

Actualmente, uno de los mayores usos de los aceites vegetales, además del comestible, es en el proceso de producción de biodiésel convencional por transesterificación, tecnología conocida, comercialmente disponible y de bajo costo, que ha crecido notoriamente en los últimos 10 años en el país. Sin embargo este biocombustible tiene aplicación para el sector de transporte terrestre que operan con ACPM (Aceite Combustible para Motores) como se conoce el Diésel en Colombia, para lo cual se emplea es el aceite de palma. Pero, este proceso a nivel industrial no es rentable, y se ha comercializado e industrializado es gracias a subsidios estatales de los países que vienen trabajando contra el cambio climático. El problema radica en el alto costo de las materias primas esenciales como los aceites, que compiten con el sector alimenticio. Alrededor del 20% de la producción de aceites se utiliza en aplicaciones no comestibles. El aceite de coco, el aceite de palma y el aceite de palmiste son las principales materias primas para la fabricación de oleoquímicos.

El aceite de palmiste, es extraído por prensado mecánico o con solventes como hexano de la almendra de palma. De los casi 230 millones de toneladas, Mt, de aceites crudos producidos mundialmente, alrededor del 3.5% corresponden al de palmiste (alrededor de 8 Mt), donde Colombia aporta el 1.4% (casi 0.1 Mt). Anualmente la tasa promedio de crecimiento es de 293 kt y 4.3 kt de aceite de palmiste crudo a nivel mundial y a nivel nacional respectivamente. El aceite de palmiste crudo corresponde aproximadamente al 2% del fruto y es la décima parte del aceite de palma crudo. Respecto al total de aceites, el aceite de palmiste es en promedio el 8% de la producción, el 3% del consumo, y el 16% de las exportaciones. Presenta un aumento anual del 36. % en la producción, del 20% en el consumo y del 59% en las exportaciones. Aunque el precio del aceite crudo de palmiste es mayor que el de palma, la diferencia que se ha venido reduciendo en los últimos años [1]. Debido a implementación de las políticas que incentivan el crecimiento de áreas cultivadas con palma, dentro del programa de biocombustibles (PROEXPORT, 2011), se está generando una sobreoferta de los productos derivados del beneficio de la palma, como lo es el aceite de palmiste.

Retomando el tema de los biocombustibles a partir de aceites, un biodiésel preparado a partir de aceite de palmiste o de coco puede tener un índice de cetano bastante alto respecto a los otros aceites, lo cual lo puede hacer atractivo para la producción de biodiesel, gracias a las insaturaciones presentes. Adicionalmente el aceite de palmiste contiene una importante mayor proporción de glicéridos (tri, mono y di) así como de ácidos grasos de cadenas de acilo cortas respecto al aceite de palma, por lo que en el país la demanda de ácido láurico es sustituida por aceite de palmiste (Cuellar Sánchez, 2000; CENIPALMA, 2008). Esto lo hace atractivo para otras aplicaciones diferentes a las de emplearlo en la industria de alimentos, como los productos farmacéuticos, cosméticos, de química fina, etc.

Por ello, una posibilidad de mercado es su potencial uso como materia prima para generar biocombustibles de aviación, debido a que las cadenas cortas pueden generar productos con una mayor similitud química al queroseno o turbosina, combustible fósil aéreo. Para generar estos sustitutos, se puede a través de rutas como el hidrogenación para obtener bioqueroseno [2], o por que no la misma transesterificación (más barata que la anterior, porque sucede a condiciones moderadas de temperatura y presión) para producir biodiésel convencional FAME de ácidos grasos de 12 y 14 carbonos, principalmente, respecto a los 16 y 18 carbonos del generado con aceite de palma [8]. Esto conlleva a que se pueden mejorar las propiedades en frío (punto de congelamiento y de nube) que son críticas a nivel de seguridad aérea. Así que este biodiésel puede ser en potencia un biojet que pueda sustituir parcialmente al Jet Fuel A1 en mezclas combustibles para aviación.

Se han realizado estudios de uso de FAME como combustible aeronáutico generando resultados satisfactorios hasta en un 20% de la mezcla [9], [10], [11], [12]. La Fuerza Aérea Colombiana ha sido pionera en realizar pruebas en tierras empleando mezclas de Jet Fuel A1 hasta con un 50% de FAME de aceite de palma en banco motores tubojet y tubohélice, sin embargo aún no se tiene certeza del comportamiento en frío de la mezcla para dar seguridad a una prueba en aire, debido a las propiedades de punto de congelamiento y de nube pueden no encontrarse dentro de las especificaciones de la norma [13]. De esta manera en la actual investigación, se pretende explorar como un primer paso la

producción de biodiésel convencional FAME a partir de la transesterificación de aceite de palmiste, buscando las condiciones óptimas que permitan el mayor rendimiento, variando la temperatura, la relación molar metanol-aceite y la concentración de catalizador. El biodiésel producido será caracterizado. En trabajos posteriores se evaluará el comportamiento en frío de este biodiésel generado mezclado en distintas proporciones con Jet Fuel A1, para posteriormente realizar producción del volumen necesario de biocombustible que se requiere las pruebas de banco, por lo que un futuro estudio de la cinética de la reacción también debe realizarse.

2. Materiales y Métodos

2.1 Caracterización de Materiales

En la elaboración de las pruebas hechas en laboratorio, se usaron los insumos nombrados a continuación. Aceite de palmiste Refinado con un índice de saponificación: 230-254 mg KOH / g de aceite, un índice de yodo: 17-19 y índice de acidez: 0.1% como ácido láurico. Además, Metanol para análisis marca MERCK con número CAS: 67-56-1 Grado: ACS. ISO.Reag. Ph Eur >99.9% de densidad a 20°C: 0.791-0.793 g/cm³, acidez: < 0.0002, alcalinidad: < 0.0002. También se usó hidróxido de potasio número CAS: 1310-58-3, grado: ACS. La composición del aceite de palmiste se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición como perfil de ácidos grasos del aceite de palmiste. *Tomado de [3]

Ácido Graso	Composición [%]	
	Integrasas S.A.S	Reportada*
Ácido Láurico	47,8	48,2
Ácido Mirístico	16,3	16,2
Ácido Palmítico	8,5	8,4
Ácido Esteárico	2	2,5
Ácido Cáprico	-	3,4
Ácido Caprílico	-	3,3
Ácido Oléico	15,4	15,3
Ácido Linoléico	2,4	2,3
Otros	< 1	0,4

2.2 Diseño de Experimentos

Los experimentos obtenidos fueron realizados bajo el diseño Box-Behnken usando la herramienta MiniTab 16.

2.3 Procedimiento Experimental

Para llevar a cabo la reacción de transesterificación fue utilizado aceite de palmiste refinado de la empresa Intergrasas S.A.S, hidróxido de potasio y metanol para análisis de la empresa Merck, así como también se siguió la siguiente metodología experimental.

2.3.1. Producción de metóxido de potasio

Medir en un erlenmeyer de 100 ml, la cantidad en gramos de metanol correspondiente a la relación alcohol – aceite de palmiste planteada para cada experimento. Posteriormente, se adiciona cuidadosamente al recipiente con metanol, el porcentaje de hidróxido de potasio necesario según en el diseño de experimentos, y se agita hasta que el catalizador se solubilice totalmente.

2.3.2. Reacción de transesterificación

Se miden 100 g de aceite de palmiste en un erlenmeyer de 200 ml y es precalentado en una plancha con agitador magnético para garantizar la fase líquida en la reacción, ya que a temperatura ambiente el aceite se encuentra en estado sólido. Cuando se establece la homogeneidad de la fase, se debe agregar cuidadosamente la solución de metóxido de potasio preparada en el paso 1. Allí, la reacción toma lugar a temperatura establecida de reacción con una velocidad de agitación de 500 RPM durante 90 minutos.

2.3.3. Separación de fases

Una vez finaliza el paso 2, la muestra se debe enfriar hasta temperatura ambiente, registrar su peso y luego ser agregada a un decantador de 200 ml, donde por efecto de la fuerza de gravedad el glicerol por su mayor densidad cae al fondo del recipiente, facilitando la separación del Biodiesel por inmiscibilidad de los productos. El tiempo de sedimentación del glicerol fue de 12 horas para cada muestra.

2.3.4. Purificación del Biodiesel

El biodiesel crudo obtenido en la separación es lavado 4 veces con 50 ml de agua destilada para eliminar el metanol en exceso, trazas de jabones y algunos contaminantes inorgánicos que puedan estar presentes. El agua con las impurezas disueltas es separada por diferencia de densidad a través de un decantador y el biodiesel obtenido es pesado para determinar su rendimiento.

2.4 Caracterización del Producto

Varios ensayos se realizaron en el actual estudio en función de caracterizar el combustible a través de la determinación de las propiedades físico-químicas más relevantes y de la composición. Las propiedades físico-químicas evaluadas fueron: densidad (ASTM D7777-13), punto de inflamación y combustión copa abierta Cleveland («ASTM D92-12»), punto de combustión e inflamación copa cerrada Pensky-Martens («ASTM D93-15»), Viscosidad Cinemática («ASTM D445-15»), Cenizas («ASTM D482-13»), Cenizas sulfatadas («ASTM D482-13»), Agua y sedimentos por centrifuga («ASTM D1796-11e1»), Curva de destilación («ASTM D86-12»), Poder calorífico («ASTM D240-14»), Punto de nube («ASTM D-2500»), Índice de refracción («ASTM D1218-12»).

Para una estimación de la composición se realiza un análisis por cromatografía de gases y por espectroscopia infrarroja. Para llevar a cabo el análisis es necesario preparara las muestras bajo el método reportado por Narvaez [14] para la derivatización de las muestras, tal como se presenta a continuación. La muestra se prepara tomando un tubo

ependorf y adicionando 5 mg de Tricaprina, 20 mg del biodiésel a analizar al vial, luego se agregó 2 ml de hexano, 20 μl de agente silante (BSTFA), y finalmente 2 gotas de piridina como catalizador. Posteriormente se debe esperar mínimo 60 minutos para completar la derivatización.

Al equipo Agilent 6820 GC (Agilent Technologies Co. Ltd., Shanghai, China) que cuenta con FID, se inyecta manualmente 1 μl de). El cromatógrafo consta una precolumna de sílice fundida (0.3 mx 0.53 mm) y un columna capilar de sílice fundida Supelco SGE HT-5 (12 mx 0.53 mm x 0.15 μm) (SGE International Pty. Ltd., Victoria, Australia). La temperatura del horno se estabiliza a 140 °C durante 1 min; luego, aumenta de 140 °C a 380 °C en 12 min. (rampa de 20 °C/min), y permanece finalmente durante 10 minutos. La temperatura del inyector es 350°C y la del detector es 390 °C. El flujo de carrier es de 6 ml/min de N₂, 40 ml/min de H₂ y 360 m/min de aire sec. Para la adquisición de datos y su procesamiento se emplea el software Cerity (Agilent Technologies Co. Ltd., Shanghai, China).

El equipo infrarrojo es un Bruker (Reino Unido) que analiza con Transformada de Fourier, FTIR con números de onda desde los 400 hasta los 4000 cm^{-1} .

3. Análisis de resultados

3.1 Diseño Box-Behnken

En primera instancia se establece plantear un diseño de experimentos donde las variables independientes contempladas son la relación de metanol-aceite, la concentración de catalizador y la temperatura de reacción. En función de estos factores, se establecen 3 niveles, como se presenta en la Tabla 2. El diseño de experimentos seleccionado es un Box-Behnken, donde se pretende determinar el mayor rendimiento de biodiesel respecto a los experimentos propuestos por el Box-Behnken.

Tabla 2. Diseño de experimentos

Factores	Variables	Niveles		
		-1	0	1
Relación molar metanol/aceite	X1	3	4,5	6
Concentración de KOH [%]	X2	0,5	1	1,5
Temperatura [°C]	X3	47	51	55

Los experimentos obtenidos como resultado del diseño Box-Behnken usando la herramienta MiniTab 16, son reportados en la Tabla 3. Es importante mencionar que el orden estadístico se utiliza con el fin de reducir el error experimental, debido a factores externos al experimento (temperatura ambiente, humedad, etc.) que se puedan presentar en diferente tiempo de ejecución

Tabla 3: Experimentos propuestos basado en el Box-Behnken

Orden estadístico	Orden de aplicación	Relación molar	%[KOH]*	T (°C)
3	1	3	1,5	51
4	2	6	1,5	51
12	3	4,5	1,5	55
1	4	3	0,5	51
8	5	6	1,0	55
9	6	4,5	0,5	47
2	7	6	0,5	51
11	8	4,5	0,5	55
14	9	4,5	1,0	51
15	10	4,5	1,0	51
13	11	4,5	1,0	51
5	12	3	1,0	47
6	13	6	1,0	47
10	14	4,5	1,5	47
7	15	3	1,0	55

*% peso de 100 g de aceite de palmiste

La cantidad de aceite requerido para llevar a cabo la transesterificación, es determinada por medio de la masa molar, el cual se calcula por medio de la Ecuación 1[15]:

$$\bar{M} = 3 \sum x_i M_i + 38 \tag{1}$$

Donde x_i es la fracción molar y M_i es el masa molar en g/mol de cada ácido graso presente en la composición del aceite de palmiste de acuerdo al perfil de ácidos grasos de la Tabla 1. Entonces los valores de las masas molares de los reactantes entonces don de 708,129 g/mol para el aceite de palmiste y de 32,042 para el metanol.

Para la producción de biodiesel a escala laboratorio se utilizó 100 gramos de aceite de palmiste refinado, donde las cantidades correspondientes de metanol y catalizador se reportan a continuación:

Las masas de metanol se calcularon de la siguiente manera:

$$100 \text{ g aceite} \cdot \frac{1 \text{ mol aceite}}{708,129 \text{ g aceite}} \cdot \left(\frac{4,5 \text{ mol metanol}}{1 \text{ mol aceite}} \right) \cdot \frac{32,042 \text{ g metanol}}{\text{mol metanol}} = 20,36 \text{ g metanol}$$

Mientras que la masa de hidróxido de potasio:

$$100 \text{ g aceite} \cdot \frac{0,5 \text{ g KOH}}{100 \text{ g aceite}} = 0.5 \text{ g KOH}$$

Determinadas las cantidades utilizadas en la reacción de transesterificación, los resultados obtenidos en la producción de Biodiesel de palmiste a escala laboratorio son reportados en la Tabla 4.

3.2 Rendimiento del Biodiesel

Los resultados obtenidos de cada experimento son presentados en la Tabla 4, allí es reportado la cantidad de biodiesel crudo y su rendimiento una vez sea purificado. El rendimiento del biodiesel purificado, y , fue calculado con la siguiente expresión (Ecuación 2):

$$y = \frac{m_p}{m_s} \cdot 100\% \quad (2)$$

Donde, m_p es la masa de biodiesel producido ya purificado y m_s es la masa de la muestra de aceite de palmiste utilizado en el experimento. Los resultados obtenidos con base en la aplicación del diseño Box-Behnken mostraron rendimientos de producción de biodiesel en el intervalo del 85% y 99.9%.

Tabla 4. Resultados de los 15 experimentos propuestos con variación de la relación molar, concentración de catalizador y temperatura.

Experimento	Aceite [g]	Relación molar	KOH [g]	Temperatura de reacción [°C]	Biodiesel crudo [g]	Rendimiento biodiesel purificado [%]
1	100	3	0,5	51	101,9	85,8
2	100	6	0,5	51	106,3	98,7
3	100	3	1,5	51	93,6	90,5
4	100	6	1,5	51	101,8	94,4
5	100	3	1	47	98,3	87,1
6	100	6	1	47	105,2	99,9
7	100	3	1	55	95,1	86,9
8	100	6	1	51	104,7	99,4
9	100	4,5	0,5	47	104,1	99,6
10	100	4,5	1,5	47	100,9	97,5
11	100	4,5	0,5	55	105,1	94,9
12	100	4,5	1,5	55	98,6	95,1
13	100	4,5	1	51	102,1	95,2
14	100	4,5	1	51	102,3	97,2
15	100	4,5	1	51	102,1	97,4

El análisis de varianza (ANOVA) aplicado a los resultados, indicó que los factores no tienen un efecto significativo ($p < 0,01$) sobre el rendimiento. La representación de la relación matemática entre las variables del experimento, de acuerdo al ajuste polinomial del rendimiento obtenido está representado por la Ecuación (3):

$$Y = 212,776 + 21,079X_1 - 1,271X_2 - 6,478X_3 - 1,548X_1^2 - 0,133X_2^2 + 0,059X_3^2 - 3X_1X_2 - 0,013X_1X_3 + 0,287X_2X_3 \quad (3)$$

siendo X_1 , es la relación metanol-aceite X_2 , es la concentración de KOH y X_3 es la temperatura de reacción. El modelo mostró una variabilidad de la respuesta (R^2) del 94,26% con un coeficiente de determinación ajustado (R^2_{adj}) de 83,92%.

Para visualizar las condiciones más adecuadas para alcanzar los mayores rendimientos, se realizaron gráficamente algunas comparaciones binarias entre los factores (relación molar, temperatura y %KOH), tal como se observa más adelante (ver Figuras 2-5). En la Figura 2, se graficó la interacción entre la temperatura y la relación molar, donde se evidencio un comportamiento tipo silla sobre la superficie de respuesta, es decir, múltiples condiciones óptimas sobre el rendimiento del producto. En este caso, ambas zonas óptimas indican que las relaciones molares altas proporcionan un mejor rendimiento, debido a que el metanol en exceso desplaza el equilibrio de la reacción hacia la producción de biodiesel, tal como lo establece el principio de Le Chatelier.

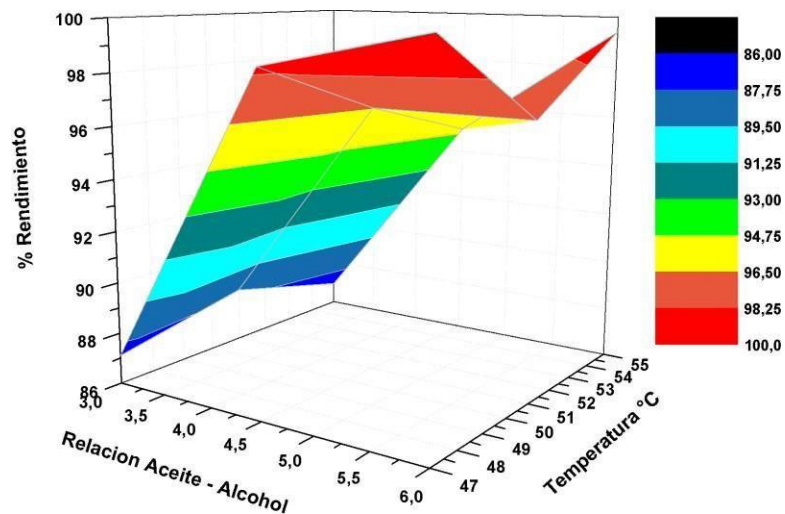


Figura 2. Efecto de la temperatura y la relación molar sobre el porcentaje de rendimiento de biodiesel en 3D.

Para ver el efecto de la temperatura, se graficó el contorno sobre perspectiva del eje de la superficie de respuesta, tal como se observa en la Figura 3. En esta grafica se observa que las bajas temperaturas dentro del rango evaluado presentan mayor rendimiento en la producción de biodiesel, sin embargo, en el límite superior de la temperatura se presenta una condición favorable respecto a la producción del biocombustible.

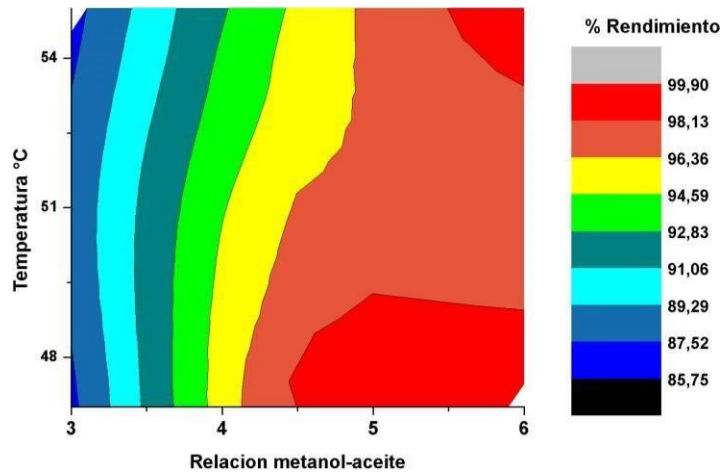


Figura 3. Contorno del efecto de la temperatura y la relación molar sobre el porcentaje de rendimiento de biodiesel.

Por otro lado, el efecto de la concentración de catalizador (KOH) y la temperatura fueron evaluados respecto al porcentaje de rendimiento de producción, como se puede ver en la Figura 4. El mejor rendimiento se presenta cuando se emplean bajas concentraciones de catalizador y bajas temperaturas, garantizando un rendimiento superior al 98%, como se indica en la Figura 4.

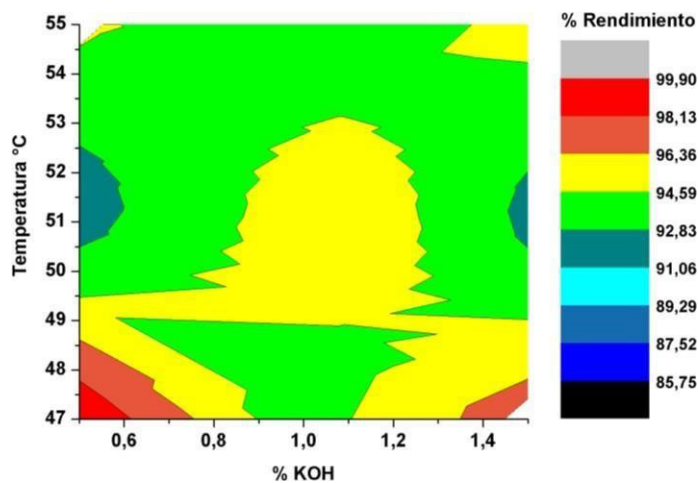


Figura 4. Contorno del efecto de la temperatura y la concentración de KOH sobre el rendimiento de biodiesel.

Finalmente, se correlaciono el porcentaje de concentración de catalizador frente a la relación molar de metanol-aceite (ver Figura 5), donde la baja concentración de KOH y la alta relación molar brindan un óptimo rendimiento en la producción de biodiesel a partir de aceite de palmiste.

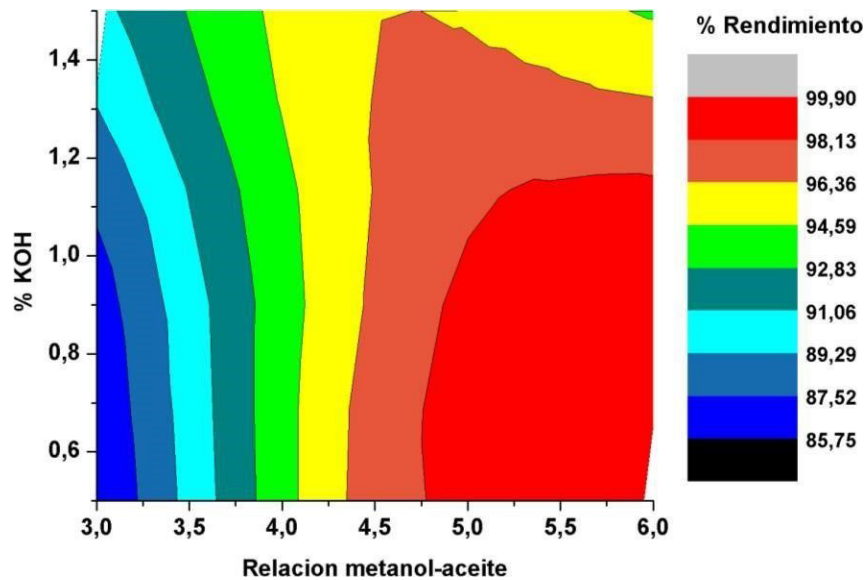


Figura 5. Contorno del efecto de la concentración de KOH y la relación molar sobre el porcentaje de rendimiento de biodiesel.

Basado en los anteriores resultados se determinó que las condiciones que favorecen la mayor producción de metil-ésteres se logra empleando una relación molar de metanol/aceite de 6 y una concentración de KOH de 0,5% en relación a la ma a 1a del aceite, a una temperatura de reacción de 47°C. Se establecieron las condiciones de operación para llegar a cabo la producción de biodiesel a escala laboratorio, las cuales se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de reacción.

Materia prima: Aceite de palmiste	100 g
Metanol	27,15 g
Catalizador: Hidróxido de potasio	0,5 – 1 g
Temperatura	47 °C
Velocidad de agitación	500 – 750 RPM
Tiempo	90 minutos

Con las condiciones establecidas en la Tabla 5, la cantidad obtenida de los productos de reacción es presentada en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la reacción de transesterificación.

Producto	Cantidad
Biodiesel	99,9 g
Glicerina	21,2 g

3.3 Caracterización del Biodiesel

La muestra No. 6 del diseño de experimentos que tuvo el mayor rendimiento de biodiesel fue caracterizada, determinando sus propiedades físico-químicas más relevantes de acuerdo

a los estándares ASTM y una aproximación a su composición por cromatografía GC e infrarrojo FTIR.

3.3.1 Propiedades físico-químicas

Al biodiesel producido se le determinó la gravedad específica y se comparó con otros resultados reportados en la literatura, como preliminar a la caracterización del biocombustible (ver Tabla 7).

Tabla 7. Gravedad específica del Biodiesel de palmiste

	Biodiesel FAC	Biodiesel Bong*	Biodiesel Alamu**	Diesel**
Gravedad Específica	0,887	0,874	0,883	0,853

* Tomado de Bong et. al. [16]

** Tomado de Alamu et. al. [17]

Las pruebas de caracterización fueron realizadas con base en los estándares internacionales ASTM como se presenta a continuación en la Tabla 8. Se puede observar que el biodiésel obtenido cumple prácticamente con todas las especificaciones exigidas por la norma. Para el análisis de la viabilidad de un posible uso del biodiesel de palmiste como sustituto parcial del Jet Fuel A1, es necesario revisar las propiedades en frío como el punto de congelamiento para dar cumplimiento a las normas ASTM D1655-19, IATA, Def Stan 91-91 y ASTM D7566 relacionadas con combustibles de aviación.

Tabla 8. Grupos funcionales presentes a cada frecuencia de adsorción

Propiedad	Unidad	Norma ASTM	Valor Medido	Valor ASTM D6751
Densidad (15°C)	g/cm ³	D7777-13	0,888	0,860 – 0,900
Viscosidad cinemática (40°C)	cSt	D445	4,22	1,9 – 6,0
Punto de inflamación (Copa Abierta-Cleveland)	°C	D92-12	119	Mínimo 93
Punto de inflamación (Copa Cerrada Pensky Martens)	°C	D93-15	107	Mínimo 100
Agua y sedimentos	% volumen	D1796-11e1	0,00	Máximo 0,05
Cenizas	% masa	D482-13	0,07	Máximo 0,18
Cenizas sulfatadas	% masa	D874-13a	0,01	Máximo 0,02
Temperatura media de ebullición	°C	D86-12	140	Máximo 360
Punto de nube	°C	D-2500	7	Reportar
Índice de refracción	-	D1218-12	1,4340	No contiene
Poder calorífico	MJ/kg	D240-14	37,4	No contiene

3.3.2 Composición

Para el análisis de la composición se realizó un análisis cromatográfico y espectroscópico. En la Figura 6 se presenta un cromatograma el cual arroja la siguiente composición de metil ester de ácidos grasos: 2,7% de caproato de metilo, 42,6% de laurato de metilo, 15,0% de

miristato de metilo, 9,3% de palmitato de metilo, 0,3% de linoleato de metilo, 18,8% de oleato de metilo, 2,7% de estearato de metilo y 8,6% de otros. Los anteriores resultados presentan convergencia con la composición inicial del aceite de palmiste, que según la Tabla 1 contaba con un perfil de ácidos grasos similar: 3,4% de ácido cáprico (C10:0), 47,8% de ácido láurico (C12:0), 16,3% de ácido mirístico (C14:0), 8,5% de ácido palmítico (C16:0), 2,0% de ácido esteárico (C18:0), 15,4 % de ácido oleico (C18:1) y 2,4% de ácido linoleico (C18:2).

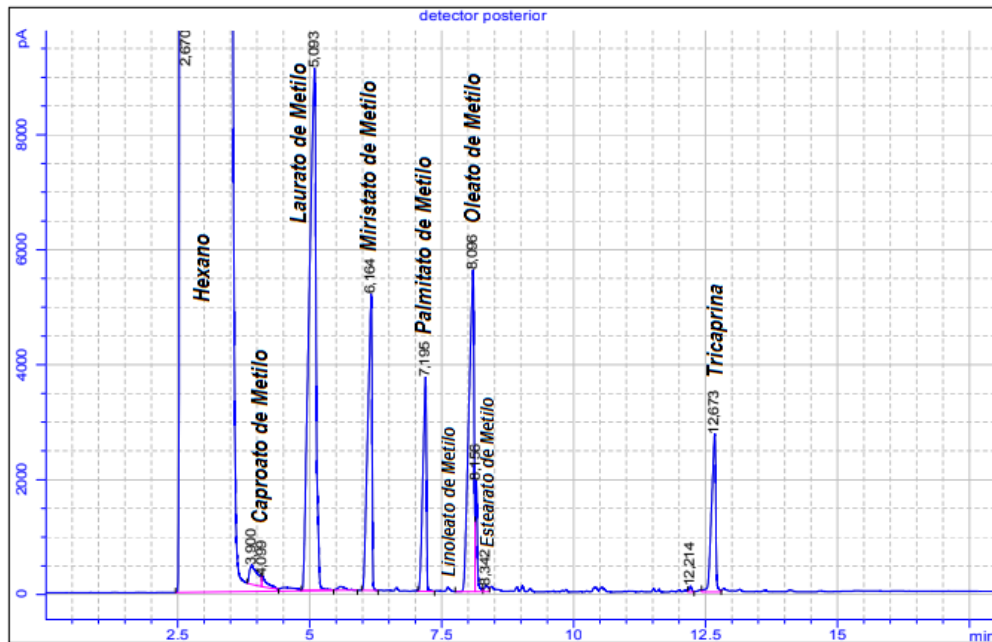


Figura 6. Cromatograma GC para Biodiesel de Palmiste

En la Figura 7, se presenta el espectro IR del Biodiesel de Palmiste, donde los picos indican la presencia de grupos funcionales presentes en este tipo de biocombustibles.

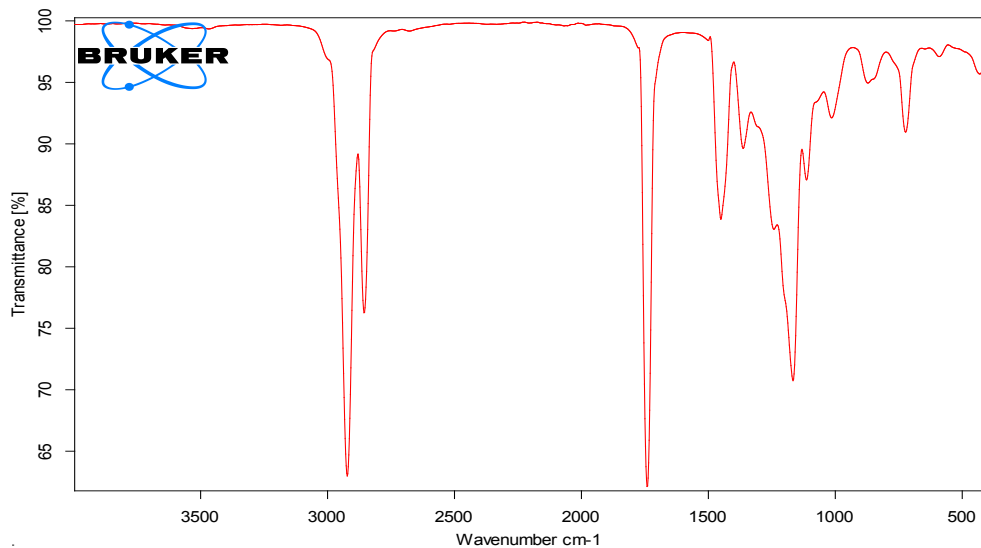


Figura 7. Espectro IR para Biodiesel de Palmiste

Los grupos más representativos son ésteres y componentes de hidrocarburos, los cuales están asociados a las diferentes formas de enlace presentes en el espectro y son identificados por sus frecuencias de absorción, como se presenta en la Tabla 14.

Tabla 14. Grupos funcionales presentes a cada frecuencia de adsorción

Pico	Frecuencia de absorción [cm ⁻¹]	Área bajo la curva [cm ²]	Posibles grupos funcionales presentes
1	720	91.0	C-O elongado, C-C flexión
2	890	97.8	C=C doble enlace en Hidrocarburos
3	1020	92.0	C-O enlaces en ésteres, C-H en hidrocarburos
4	1125	85.1	C-O, C-C y C-H grupos en componentes carbonilos
5	1200	70.5	C-H en hidrocarburos y éteres
6	1400	88.0	C-O enlaces simples en ésteres
7	1480	83.5	C-H y O-H flexión
8	1740	62.0	C=O en ésteres
9	2830	71.2	C-H estiramiento en alcanos
10	2925	63.2	C-H flexión en alcanos

Con base en el anterior reporte, se evidencia la relación de la conversión de triglicéridos a metilésteres de ácidos grasos. Los cual permite detectar según el espectro que posibles componentes se encuentran presentes en la muestra, como octadecanoato de metilo (C₁₉H₃₈O₂), 3-nonenoato de metilo (C₁₀H₁₈O₂), nonanoato de metilo (C₁₀H₂₀O₂) y hexanoato (C₇H₁₄O₂). Además de otros posibles componentes pueden estar presentes como ácidos carboxílicos (butanoico, hexanoico, decanoico y undecanoico) y otros ésteres saturados y no saturados.

4. Conclusiones

El aumento de la cantidad de metanol favorece el rendimiento cuando la cantidad de catalizador no supera el 1% en peso de aceite, sin embargo, es necesario garantizar un efectivo proceso de separación de metóxido de sodio del biodiesel para su refinación. De acuerdo al diseño de experimentos, se encontró que para la transesterificación del aceite de palmiste a 500 rpm durante 1.5, el mayor rendimiento del 99.9% se dió a 47°C, 6 mol metanol/mol de aceite y 0.5-1% de concentración de hidróxido de potasio respecto al aceite. De acuerdo con los ensayos de análisis hechos en el laboratorio, el biodiesel cumple con las características y estándares exigidos de acuerdo a las distintas normas ASTM nombradas en el actual documento. La composición aproximada de metil ésteres de ácidos grasos del biodiésel de aceite de palmiste generado tiene principalmente un 43% de laurato de metilo (C12:0), un 15% de miristato de metilo (C14:0), un 9% de palmitato de metilo (C16:0) y 19% de oleato de metilo (C18:1), en concordancia con el perfil de ácidos grasos del aceite de palmiste. Es necesario evaluar las propiedades de flujo de frío de la mezclas en diferentes proporciones del biodiesel obtenido con Jet Fuel A1 para poder planificar futuras pruebas en banco de motores.

Agradecimientos

La presente investigación fue financiada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación COLCIENCIA, la Fuerza Aérea Colombiana y la Universidad ECCI a través del proyecto “*Uso de Bioqueroseno como Combustible en Aeronaves de la FAC*”.

5. REFERENCIAS

- [1] J. Bonilla and G. Gordillo, “Adiabatic Fixed-Bed Gasification of Colombian Coffee Husk Using Air-Steam Blends for Partial Oxidation .,” *J. Combust.*, vol. 2017, pp. 1–26, 2017.
- [2] M. A. Mayorga et al., “Evaluation of Zeolite-Based Catalyst Supports for the Production of Biokerosene by Hydrotreating of Oils,” vol. 74, no. February, pp. 13–18, 2019.
- [3] M. Ahmad, S. Rashid, M. A. Khan, M. Zafar, S. Sultana, and S. Gulzar, “Optimization of base catalyzed transesterification of peanut oil biodiesel,” *African J. Biotechnol.*, vol. 8, no. 3, pp. 441–446, 2009.
- [4] A. Arumugam and V. Ponnusami, “Production of biodiesel by enzymatic transesterification of waste sardine oil and evaluation of its engine performance,” *Heliyon*, vol. 3, no. 12, p. e00486, 2017.
- [5] T. F. Adepoju, B. Rasheed, O. M. Olatunji, M. A. Ibeh, F. T. Ademiluyi, and B. E. Olatunbosun, “Modeling and optimization of lucky nut biodiesel production from lucky nut seed by pearl spar catalysed transesterification,” *Heliyon*, vol. 4, no. 9, p. e00798, 2018.
- [6] M. A. Kadi, N. Akkouche, S. Awad, K. Loubar, and M. Tazerout, “Kinetic study of transesterification using particle swarm optimization method,” *Heliyon*, vol. 5, no. 8, p. e02146, 2019.
- [7] Y. Rathore, D. Ramchandani, and R. K. Pandey, “Experimental investigation of performance characteristics of compression-ignition engine with biodiesel blends of Jatropha oil & coconut oil at fixed compression ratio,” *Heliyon*, vol. 5, no. 11, p. e02717, 2019.
- [8] M. Alejandro et al., “Use of Biofuels in the Aeronautical Industry: Colombian Air Force Case,” vol. 14, no. 26, pp. 53–63, 2019.
- [9] M. Lapuerta and L. Canoira, *Chapter 4 – The Suitability of Fatty Acid Methyl Esters (FAME) as Blending Agents in Jet A-1*. Elsevier Inc., 2016.
- [10] A. Llamas, M. Lapuerta, A. M. Al-Lal, and L. Canoira, “Oxygen extended sooting index of FAME blends with aviation kerosene,” *Energy and Fuels*, vol. 27, no. 11, pp. 6815–6822, 2013.
- [11] C. J. Chuck and J. Donnelly, “The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene,” *Appl. Energy*, vol. 118, pp. 83–91, 2014.
- [12] P. A. Cremones et al., “Biofuels in Brazilian aviation: Current scenario and prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1063–1072, 2015.
- [13] G. Talero et al., “Experimental Methodology and Facility for the J69-Engine Performance and Emissions Evaluation Using Jet A1 and Biodiesel Blends,” pp. 1–10, 2019.
- [14] P. C. Narváez, M. A. Noriega, and J. G. Cadavid, “Kinetics of palm oil ethanolysis,” *Energy*, 2015.
- [15] N. A. Morad, A. A. Mustafa Kamal, F. Panau, and T. W. Yew, “Liquid specific heat capacity estimation for fatty acids, triacylglycerols, and vegetable oils based on their fatty acid composition,” *JAOCS, J. Am. Oil Chem. Soc.*, 2000.
- [16] A. Bong, N. Kor, P. Ndifon, and Y. Sani, “Synthesis and Characterisation of Biodiesel from Cameroon Palm Kernel Seed Oil,” *Asian J. Biotechnol. Bioresour. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–17, 2018.
- [17] O. J. Alamu, M. A. Waheed, and S. O. Jekayinfa, “Effect of ethanol-palm kernel oil ratio on alkali-catalyzed biodiesel yield,” *Fuel*, vol. 87, no. 8–9, pp. 1529–1533, 2008.