

## INFLUENCIA DE ANTIOXIDANTES SINTÉTICOS EN EL PROCESO DE DEGRADACIÓN DE BIODIÉSEL OBTENIDO A PARTIR DEL ACEITE DE PALMISTE

***Luisa Fernanda Medina Caballero***

Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ),  
Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Grupo  
de Investigación en Innovación, Desarrollo  
Tecnológico y Competitividad en Sistemas  
de Producción Agroindustrial (GIADAI).

Ingeniera Química

Barrancabermeja, Colombia

<https://orcid.org/0000-0003-0804-9450>

***Yuleisi Tatiana Caballero Hernández***

Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ),  
Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Grupo  
de Investigación en Innovación, Desarrollo  
Tecnológico y Competitividad en Sistemas de  
Producción Agroindustrial (GIADAI). MSc.

en Ingeniería química

Barrancabermeja, Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-0877-3142>

***Leidy Andrea Carreño Castaño***

Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ),  
Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Grupo  
de Investigación en Innovación, Desarrollo  
Tecnológico y Competitividad en Sistemas  
de Producción Agroindustrial (GIADAI).

Ingeniera agroindustrial

Barrancabermeja, Colombia

<https://orcid.org/0000-0002-4374-5235>

All content in this magazine is  
licensed under a Creative Com-  
mons Attribution License. Attri-  
bution-Non-Commercial-Non-  
Derivatives 4.0 International (CC  
BY-NC-ND 4.0).



***Eyvind Andres Rondón Rincón***  
Instituto Universitario de la Paz (UNIPAZ),  
Escuela de Ingeniería Ambiental. MSc. en  
Ingeniería de Materiales  
Barrancabermeja, Colombia  
<https://orcid.org/0000-0002-6278-8409>

**Resumen:** En la presente investigación se evalúan parámetros fisicoquímicos del biodiésel de palmiste producido por transesterificación básica con catalizadores de NaOH y KOH. Además, se analiza la influencia del uso de antioxidantes sintéticos en el proceso de degradación del biodiésel empleando ácido sulfónico y benzoato de sodio. El biodiésel se obtuvo mediante reacciones de transesterificación con aceite: metóxido en una relación 5:1 v/v, a  $55 \pm 1^\circ\text{C}$ , durante 2 horas en agitación (250 rpm). Por su parte, el metóxido se preparó en relación de 1,75% p/v con respecto al metanol. Seguidamente, se dispusieron 20 ml de muestra en tubos de ensayo dopadas con diferentes concentraciones del antioxidante (0, 250 ppm, 2500 ppm) en contacto con lámina de cobre, y se aislaron de la exposición a la luz y aire durante un periodo de 21 días. La caracterización del biodiésel se realizó cada 7 días, durante los 21 días, mediante pruebas químicas como índice de acidez, yodo y peróxidos. Por otro lado, se evaluó la degradación mediante absorbancia en la región visible y corrosión en la lámina de cobre. Los resultados de este trabajo permitieron observar índices de acidez constantes, así como una menor variación en el índice de peróxidos para las muestras con benzoato de sodio a 2500 ppm, en comparación con el blanco (muestra sin antioxidante). Por su parte, las muestras con ácido sulfónico presentaron una mayor acidez y oxidación en la superficie de las láminas de cobre como indicativo de la degradación de la muestra.

**Palabras Clave:** Aceite vegetal; Biocombustibles; Biodiésel; Palmiste; Degradación; Antioxidantes; Ácido sulfónico; Benzoato de sodio; Transesterificación; Estabilidad oxidativa.

## INTRODUCCIÓN

Ante el inevitable decrecimiento de las reservas de crudo a nivel mundial y la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el marco del protocolo de Kyoto establecido por el Consejo Nacional de Política Económica Social (CONPES, 2008) y con el fin de mitigar el impacto ambiental y el calentamiento global, en Colombia durante las últimas dos décadas ha crecido un particular interés por fuentes de energía alternativas (Olguin, 2017). El cual, se ha fomentado a través de normas que promueven el uso en mezcla con combustibles fósiles, las cuales, han cambiado en los últimos años con el propósito de reducir la huella de carbono y que el país cumpla con su compromiso de reducir sus emisiones de GEI en un 51% hacia el 2030, de acuerdo a los parámetros establecidos por el Ministerio de Minas y Energía, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y que actualmente se encuentra en mezcla B10 (Minambiente, 2021).

Esto se ha evidenciado en el reporte presentado por la Federación Nacional de Biocombustibles en Colombia (FEDEBIOCOMBUSTIBLES, 2021) donde las ventas nacionales de biodiésel en el 2020 fueron de 512 mil toneladas, una reducción del 3,8% si se compara con el 2019 o del 8% comparadas con el 2018. Estas contracciones en la demanda se debieron principalmente a la reducción del consumo de combustibles líquidos debido a las medidas de cuarentena adoptadas para enfrentar la pandemia COVID-19. Sin embargo, el 2021 prometía un crecimiento en la demanda de biocombustibles, particularmente por el incremento en el mandato de mezcla de biodiésel del 10% al 12% en la Resolución 40111, el cual posteriormente fue modificado por la parada de tres plantas productoras de

biodiésel poniendo en riesgo el suministro de B12 debido a la capacidad instalada, en este contexto se espera para el 2022 aumente este porcentaje de mezcla en miras de cumplir con el acuerdo de París 2015, que generó a los gobiernos el compromiso de llevar a cero el nivel de emisiones antes del 2050 (FEDEBIOCOMBUSTIBLES, 2022).

Debido a esto, en los últimos años se han venido desarrollando investigaciones en busca de ampliar la oferta de este biocombustible a partir del uso de nuevas materias primas, implementación de nuevas tecnologías y otros aspectos que permitan alcanzar el objetivo de la demanda nacional. Este trabajo de investigación busca evaluar el uso de antioxidantes sintéticos en el proceso de degradación durante el almacenamiento de biodiésel, el cual, es un combustible de origen biológico que se puede producir a partir de grasas animales o aceites vegetales por reacciones de transesterificación, en presencia de un alcohol y catalizador; y que tiene la ventaja de ser renovable, no tóxico y biodegradable. Sin embargo, al estar elaborado a partir de aceites vegetales o grasa animal, tiende a degradarse con el paso del tiempo, autooxidándose y formando ácidos grasos libres (AGL), cambios de color y descomposición térmica. Es por esto que se presenta la necesidad de evaluar cambios en los parámetros fisicoquímicos del combustible durante el tiempo de almacenamiento, a fin de determinar su vida útil. además, de analizar alternativas como los antioxidantes sintéticos y su influencia en el proceso de degradación del mismo sin alterar sus propiedades.

## MÉTODO

Se utilizó como materia prima el aceite de palmiste, el cual fue traído desde las instalaciones de UNIPALMA, ubicado en el km 25 vía Cumaral - Veracruz en el departamento del Meta - Colombia. Entre

las características del cultivo, se tiene que: el tiempo de cosecha es de 6 meses a una altura entre los 0 a 1000 m, y requiere un terreno franco arenoso para su cultivo.

Una vez se obtuvo la materia prima, se llevó a cabo la producción de biodiésel por transesterificación básica empleando hidróxido de potasio e hidróxido de sodio en relación volumétrica de aceite:metóxido 5:1 durante 180 minutos a 55°C, en agitación constante (250 rpm); por su parte, para la preparación del metóxido de potasio se emplearon 3.5 g de KOH por cada 200 mL de metanol (Sanchez, 2014).

A continuación, el biodiésel obtenido se dejó en reposo por un periodo de 7 días, pasado este tiempo se procedió a realizar la separación de la glicerina (fondos) y el sobrenadante (biodiésel) a temperatura ambiente. El biodiésel obtenido fue sometido al proceso de lavado para eliminar gomas e impurezas utilizando agua destilada a una temperatura de 50 – 60 °C, luego fue separado por decantación y posterior centrifugación. El biodiésel fue caracterizado mediante pruebas fisicoquímicas.

Por otro lado, y atendiendo a la problemática de autooxidación que presenta el biodiésel como consecuencia de su matriz base, se evaluó la estabilidad oxidativa del biodiésel; para ello, se empleó como base la norma ASTM D-130 (ASTM, 2019), empleando una lámina de cobre con dimensiones aproximadas de 5 cm largo, 1 cm de ancho y 1 mm de espesor, adecuadas previamente. Muestras de biodiésel fueron puestas en contacto con las láminas y aisladas de luz y aire, seguidamente se evaluó el comportamiento de las muestras y la solución en periodos de tiempo de 0, 7, 14, 21 y 28 días, por medio de pruebas fisicoquímicas como índice de peróxidos y acidez. De igual manera, se evaluó el índice de yodo al inicio y final del tiempo de estudio.

## PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

La calidad y propiedades del biodiésel producido a partir del aceite de palmiste se evaluaron mediante pruebas fisicoquímicas basadas en normas AOAC, ASTM y normas técnicas colombianas señaladas a continuación:

La evaluación de la viscosidad se realizó mediante el método de prueba estándar para la viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (ASTM 445, 2019). La gravedad API se determinó empleando un densímetro automático DMA 4500 M (ASTM D 4052, 2018). El índice de cetano se evaluó según la norma ASTM D4737-10 (ASTM D 4737, 2016), el índice se calculó por medio de una ecuación de 4 variables proporcionando un medio para estimar el número de cetano.

El contenido de agua se basó en la norma ASTM D 4377 (ASTM 4377, 2011) y ASTM D 1533 (ASTM 1533, 2012). se midió en un equipo 870 KF Titrino plus y 899 Coulometer respectivamente para estas normas. La temperatura del punto de inflamación es una medida de la tendencia de un producto para formar una mezcla inflamable con aire bajo las condiciones controladas, para este análisis se empleó el equipo Pensky-Martens copa cerrada basado en la norma internacional ASTM D93 método A (ASTM D93, 2019). La oxidación se evaluó con base a la norma ASTM D130 (ASTM D130, 2019).

El índice de yodo se determinó de acuerdo con la metodología establecida por la norma A.O.A.C.920.159 (AOAC, 1920), empleando el reactivo de Wijs. El índice de peróxidos se estudió de acuerdo con la metodología de la AOAC 965.33 (AOAC, 1969), valorando la solución de tiosulfato de sodio 0,01N.

Para la espectroscopia UV-VIS se empleó el espectrofotómetro UV-VIS Genesys 10S con celdas de cuarzo, como muestra madre se empleó biodiésel sin dopaje, para determinar la longitud de onda de mayor absorbancia.

Por su parte, el índice de acidez se evaluó siguiendo el procedimiento establecido en la NTC 218 (NTC, 1999), con etanol en caliente. Finalmente, la densidad fue evaluada empleando un picnómetro de Gay Lussac según la norma NTC 336 (NTC, 2016).

## RESULTADOS

De acuerdo con los resultados obtenidos en el cuadro 1 se observa que según la gravedad API (28° API) el biodiésel obtenido se clasifica como crudo medio o intermedio, proporcionando una indicación del valor calórico del combustible que para su clasificación representa menor unidad de calor por galón que los combustibles pesados (menos de 10° API). Este resultado puede influir en la regulación de operaciones de destilación fraccionada y en la conversión de viscosidad cinemática a viscosidad absoluta (Heras, 2020). La densidad obtenida para ambos combustibles se encuentra dentro del rango de especificación entre 0,87 a 0,92 g/cm<sup>3</sup>, concordando con el resultado para gravedad API.

El punto de inflamación de los dos combustibles reporta por debajo del límite establecido para biodiésel (120°C), esta medida de temperatura a la cual el combustible se inflama cuando entra en contacto con una fuente de calor, es un parámetro importante para la seguridad, transporte y almacenamiento, y se encuentra en 95,7°C y 103,7°C para las dos muestras analizadas, superior al diésel fósil (52 °C). Por su parte, de acuerdo con las especificaciones de combustible diésel el número de cetano es 43, y para el biodiésel según reporta la Resolución 40103 superior a 51. No obstante, las muestras de biodiésel evaluado presentan un número de cetano de 44, lo cual, podría ocasionar una ignición más lenta del combustible, esto puede deberse a una baja conversión en la reacción y mayor presencia de metilésteres

polinsaturados.

El color se encuentra en el rango establecido para biodiésel (L 0.5 a 8), y es un indicativo del grado de refinación. Además, un color claro en el biodiésel puede relacionarse con menor posibilidad de oxidación con respecto a colores oscuros.

Finalmente, la viscosidad es de gran interés para los motores que emplean mezcla con biodiésel, ya que suele ser elevado respecto al diésel comercial (2,36 mm<sup>2</sup>/s), por su parte, las muestras analizadas de biodiésel de palmiste reportan valores de viscosidad que se encuentran dentro de las especificaciones (3,5 – 5 mm<sup>2</sup>/s).

**Influencia de los antioxidantes.** Para realizar el análisis de degradación del combustible se utilizó la muestra obtenida utilizando KOH como catalizador, ya que esta presenta parámetros fisicoquímicos dentro de las especificaciones de la norma. Para el análisis se sometió el biodiésel a concentraciones de 0,250 y 2500 ppm de antioxidante sintético (benzoato de sodio y ácido sulfónico)

En la figura 1 se observa un aumento en el índice de acidez a partir del día 14 de almacenamiento, consecuencia de las reacciones de propagación en cadena de radicales libres y los ácidos grasos oxidables en el biodiésel, que promueven la formación de hidroperóxidos, que pueden dar lugar a aldehídos, que a su vez se oxidan en ácidos orgánicos (Rios, 2016) (Knothe, 2007).

Además, las trazas de agua relacionadas con el posible contenido de humedad de la muestra favorecen la hidrólisis de los ésteres, así como la formación de ácidos grasos libres (Bouaid *et al*, 2007) generando mayor velocidad de degradación del combustible por autooxidación en el almacenamiento, esto puede observarse con el comportamiento del índice de peróxidos (figura 2), en donde la tendencia parabólica que aumenta con la formación de peróxidos y disminuye al

formarse compuesto más estables como ácidos orgánicos se relaciona directamente con la degradación del biodiésel.

Lo anterior, puede generar en la combustión la producción partículas tóxicas que se liberan a la atmósfera mediante el sistema de escape de los automotores y un aumento en óxidos de nitrógeno. De igual manera, y según lo reportado por Dunn (2005b) el comportamiento del índice de peróxido es proporcional al índice de cetano, lo que conlleva con el aumento del mismo, a la reducción del tiempo de ignición debido a que los hidroperóxidos son más reactivos y aceleran la combustión de la mezcla (Dunn,2005)

En el cuadro 2, se presentan las láminas de cobre posterior al tiempo de almacenamiento, en contacto con biodiésel dopado con ácido sulfónico en diferentes proporciones, en donde se evidencia el cambio en la coloración de las mismas de acuerdo a la norma ASTM D130.

Se observa un cambio en la coloración de las láminas, correspondientes al proceso de oxidación, siendo más evidente luego de 14 días de almacenamiento. Para concentraciones de aditivo de 0 y 250 ppm, según la escala de la ASTM D130, la coloración se encuentra en 2c a diferencia de la concentración de 2500 ppm, que se encuentra en clasificación 3a. Lo anterior, se debe al mecanismo de deterioro del metal, que consiste en la formación de una capa no metálica (óxidos) sobre la superficie del mismo. De igual manera, se evidencia que el cambio para la muestra con concentración de 2500 ppm aumenta el proceso de corrosión para clase 1.

La degradación del biocombustible se da por la formación de hidroperóxidos, que son inestables y se descomponen en productos secundarios como aldehídos, cetonas, alcoholes, ácidos carboxílicos, epóxidos y oligómeros (Knothe *et al*, 2003). Durante el proceso, los dobles enlaces en los esteres metílicos de ácidos grasos insaturados podrían isomerizarse y absorber energía ultravioleta y visible en regiones de bajos coeficientes de absorción.

La evaluación de la degradación del biodiesel de palmiste se realizó mediante mediciones de absorbancia a una longitud de onda de 455 nm (figura 3) donde se aprecia el color visible de la solución, las muestras analizadas se encontraron expuestas al cobre y fueron medidas en periodos de 7 días, se pudo observar la disminución de la absorbancia en el tiempo para las tres concentraciones de antioxidante (0, 250 y 2500 ppm) producto de la notable degradación del material metálico

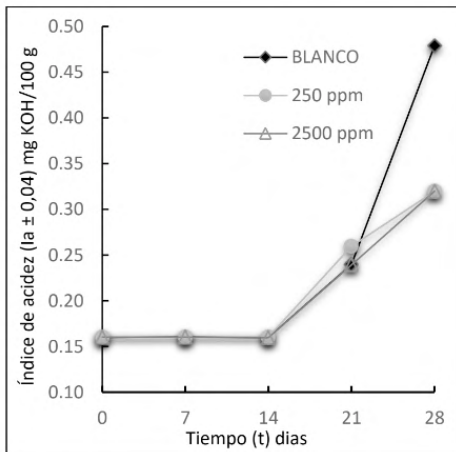


Figura 1. Índice de acidez del biodiésel de palmiste.

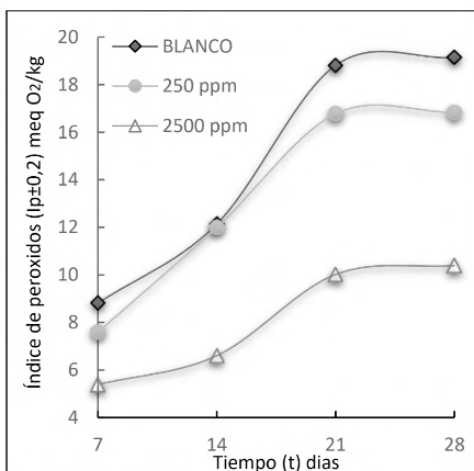
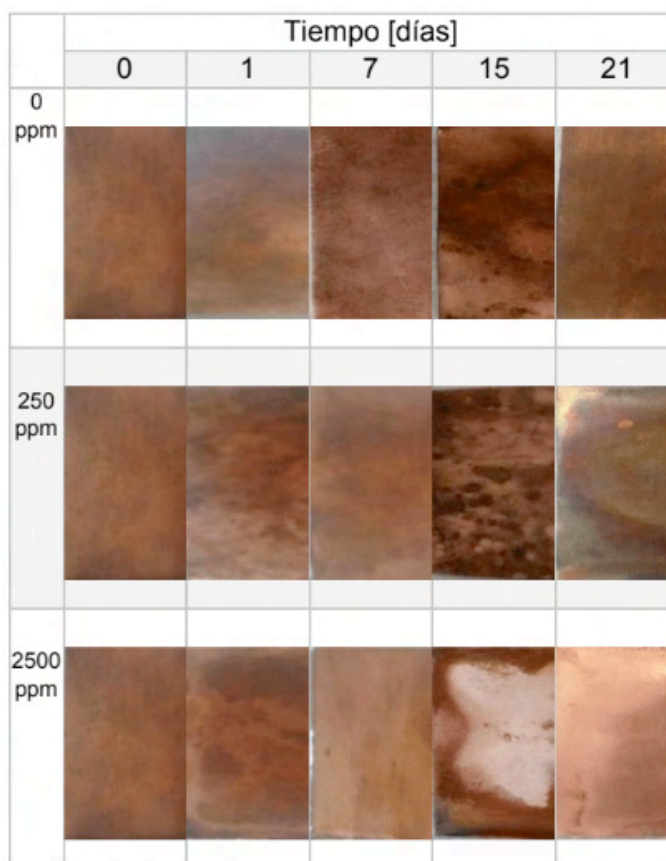


Figura 2. Índice de peróxidos.

Propiedad	Unidades	Biodiésel de palmiste KOH	Biodiésel de palmiste NaOH	Biodiésel de Sacha inchi (Basto, 2021)	Biodiésel de canola (Hariprasath, 2019)	Resolución 40103	Norma
Gravedad API	° API	28,6	28,0	23,0	-		ASTM D4737-10
10%	°C	248,8	256,2	253,7	-	360 máximo	
50%	°C	289,5	302,1	283,4	-		
90%	°C	396,1	409,5	336,6	-		
Índice de Cetano		44	44	33,0	53	51 mínimo	
Punto de Inflamación	°C	95,7	103,9	63,5	160	120 mínimo	ASTM D 93
Viscosidad	mm <sup>2</sup> /s	3,92	4,46	7,874	7,22	3,5 - 5	ASTM D 445 a 40°C
Color		2,5	2,5	1	-	<3	ASTM D 1500
Densidad a 20°C	g/cm <sup>3</sup>	0,887	0,882	0,910	0,9056	0,86 - 0,90	ASTM D 4052
	25°C			25°C			
Índice de yodo	gI <sub>2</sub> /100 g	51,69	32,39	54,22		120 mínimo	NTC 283
Índice de acidez	mg KOH/100g	0,11	0,33	0,08	0,71	0,5	ASTM D 664
Contenido de éster	% (m/m)	-	-	59,72	85	96,5%	EN 14103

Cuadro 1. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel producido a partir del aceite de palmiste.



Cuadro 2. Corrosión en láminas de cobre.

(cuadro 2) y la formación de peróxidos y productos secundarios.

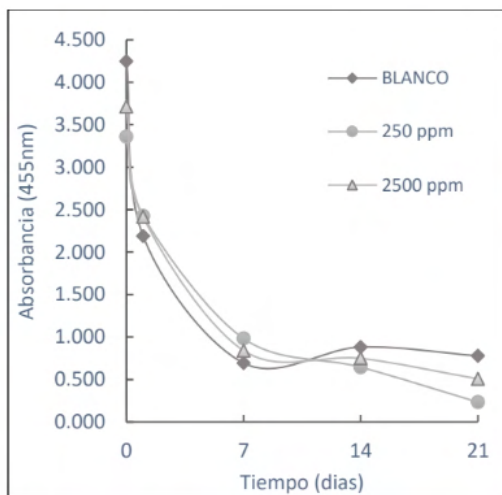


Figura 3. Absorbancia en función del tiempo del biodiésel de palmiste.

## CONCLUSIONES

EL biodiésel obtenido a partir del aceite de palmiste presenta parámetros fisicoquímicos como gravedad API, densidad, índice de acidez, color, viscosidad que se encuentran dentro de las especificaciones de la norma, en cuanto al punto de inflamación, número de cetano e índice de yodo, aunque se encuentran por debajo de la especificación puede considerarse el uso de aditivos para su mezcla con combustible fósil.

El benzoato de sodio como antioxidante, retarda el proceso de autooxidación del biodiésel de palmiste, evidenciándose en un menor aumento del índice de acidez y peróxidos en el tiempo para las muestras dopadas con concentraciones de 250 y 2500 ppm del aditivo, sin observarse una diferencia apreciable con el aumento de la concentración del antioxidante.

El ácido sulfónico acelera el proceso de degradación del combustible en estudio, por la formación de compuestos secundarios que oxidan el material metálico a partir de 14 días de almacenamiento.

## REFERENCIAS

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D130: Standard Test Method for Corrosiveness to Copper from Petroleum Products by Copper Strip Test. ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2019.

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D445: Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity). ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2019.

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D4052: Standard Test Method for Density, Relative Density, and API Gravity of Liquids by Digital Density Meter. ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2018.

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D4737: Standard Test Method for Calculated Cetane Index by Four Variable Equation. ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2016.

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D4377: Standard Test Method for Water in Crude Oils by Potentiometric Karl Fischer Titration. ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2011.



AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D1533: Standard Test Method for Water in Insulating Liquids by Coulometric Karl Fischer Titration, ASTM International, West Conshohocken, PA (USA):2012.

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D93: Standard Test Methods for Flash Point by Pensky- Martens Closed Cup Tester. ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2019.

AMERICAN SECTION OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR TESTING MATERIALS (ASTM). ASTM D 664: Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration, ASTM International ASTM International, West Conshohocken, PA (USA): 2018.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMIST (A.O.A.C.). AOAC 920.159: Iodine absorption number of oils and fats. Official methods on analysis of Association of Official Analytical Chemist. 14th ed. Virginia, (USA): 1920.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMIST (A.O.A.C.). AOAC 965.33: Peroxide Value of Oils and Fats Titration Method First Action 1965 Final Action 1969. Official methods on analysis of Association of Official Analytical Chemist. 14th ed. Virginia, (USA): 1969.

BASTO FLOREZ, LUIS EDUARDO; MILLÁN ALVARADO, SEBASTIAN AUGUSTO; MEDINA CABALLERO, LUISA FERNANDA; MORA VERGARA, LIA ZAMARA; CABALLERO HERNÁNDEZ, YULEISI TATIANA. Estudio del biodiesel obtenido a partir de aceite de Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* Linneo). Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial, v. 20, n. 1, 2021. p 41-53. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v19.n2.2021.1879>

BOUAID, A., MARTINEZ, M., & ARACIL, J. (2007). Long storage stability of biodiesel from vegetable and used frying oils. *Fuel*, v. 86, n. 16, 2007, p. 2596-2602. DOI: 10.1016/j.combustible.2007.02.014

COLOMBIA. CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL. CONPES 3510. Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia. Bogotá D.C.: DNP: DDRS-DIES-DDUPA, 2008. p. 7.

COLOMBIA. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL Y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 40261. (12, ago, 2021). Por la cual se modifica el contenido máximo de alcohol carburante-etanol en la mezcla con gasolina motor corriente y extra a nivel nacional, el contenido de biocombustible máximo en la mezcla con combustible diésel fósil a nivel nacional, y se adoptan otras disposiciones. Bogotá D. C.: Los Ministerios, 2021. p. 7.

COLOMBIA. FEDERACIÓN NACIONAL DE BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA. [sitio web]., Lo que nos dejó el 2020 y lo que promete el 2021. Bogotá (Colombia): 2021. <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3300.htm> [Consulta: 12 marzo de 2021].

COLOMBIA. FEDERACIÓN NACIONAL DE BIOCOMBUSTIBLES EN COLOMBIA. [sitio web]. Menosprecio por los biocombustibles. Bogotá (Colombia): 2022 <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-3300.htm> [Consulta: 29 marzo de 2022].

Díaz, Nieves Abril; Bárcena Ruiz, J. Antonio; Reyes, Emilio Fernández; Galván Cejudo, Aurora; Jorrín Novo, Jesús; Peinado Peinado, José; Toribio Meléndez-Valdés, Fermín; Túnez Fiñana, Isaac. Espectrofometría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. [https://www.uco.es/dptos/pdfs/08\\_ESPECTROFOTOMETRIA](https://www.uco.es/dptos/pdfs/08_ESPECTROFOTOMETRIA). [Consulta: 29 marzo de 2022].

DUNN, ROBERT O. Effect of antioxidants on the oxidative stability of methyl soyate (biodiesel). *Fuel Processing Technology*, v. 86, n. 6, 2005. p 1071-1085. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2004.11.003>

HARIPRASATH, P., *et al.* Comparative analysis of cashew and canola oil biodiesel with homogeneous catalyst by transesterification method. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 16, p.p. 1357-1362

HERAS NARANJO, CATHERINNE YASMIN; LOJANO CRIOLLO, DIANA JUDITH. Estudio de la factibilidad de los aceites usados de palma y lubricantes para la elaboración de combustibles. [Tesis de ingeniería ambiental]. Cuenca (Ecuador). Universidad Politécnica Salesiana. 2020. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/18776/1/UPS-CT008776.pdf> [Consulta: 12 marzo de 2022].

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana NTC 218 “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de acidez y de la acidez, Segunda actualización. Bogotá, D.C (Colombia):1999.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana NTC 336 “Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (Masa por volumen convencional), Tercera actualización. Bogotá, D.C (Colombia): 2016.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). Norma Técnica Colombiana NTC 283 “Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de yodo” Tercera actualización. Bogotá, D.C (Colombia): 2019.

KNOTHE, GERHARD; DUNN, ROBERT O. Dependence of oil stability index of fatty compounds on their structure and concentration and presence of metals. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, v. 80, n. 10, 2003. DOI: 10.1007/s11746-003-0814-x

KNOTHE, GERHARD. Some aspects of biodiesel oxidative stability. *Fuel Processing Technology*, v. 88, n. 7, 2007. p 669-677. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.01.005

OLGUÍN MACIEL, EDGAR, *et al.* *Brosimum alicastrum* as a Novel Starch Source for Bioethanol Production. *Energies*. vol. 10, nro. 10,2017, pp. 1-100. doi:10.3390/en10101574.

RIOS LINARES, RICARDO AUGUSTO. Evaluación de un catalizador heterogéneo basado en dióxido de titanio y potasio para la producción de biodiesel de palma. [Tesis de maestría en ingeniería con énfasis en energías alternativas]. Bogotá (Colombia). Universidad Libre, Facultad de ingeniería. 2016.

SÁNCHEZ TORRES, JOSÉ ALCIDES. Determinación de la relación entre parámetros de proceso y rendimiento de obtención de biodiesel a partir de aceites de cocina usados, con base en meta-análisis. [tesis de maestría en diseño y gestión de procesos]. Bogotá, D.C (Colombia). Universidad de la Sabana, Facultad de ingeniería. 2014, P 50-51.