

Characterization of biodiesel produced from castor oil (*Ricinus communis*), and determination of primary factors that interfere in its quality

Caracterización del biodiesel producido a partir del aceite de higuera (*Ricinus communis*), y determinación de los factores primarios que intervienen en su calidad.

Dally Esperanza Gáfaró-Álvarez¹, Andrés Gilberto Rueda Jaimes², Luisa Fernanda Medina-Caballero³, Ana Milena Salazar-Beleño⁴, Sandra Milena Montesino-Rincón⁵, Leidy Andrea Carreño-Castaño^{6*}

¹MSc. Gestión Ambiental y Energética, dally.gafaro@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-0251-2491>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

²MSc. Química, andresg.rueda@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-5968-4556>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

³Esp. En TIC's aplicadas a la Enseñanza, luisa.medina@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0003-0804-9450>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

⁴Esp. Aseguramiento de la Calidad e Inocuidad Agroalimentaria, ana.salazar@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0001-7592-2550>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

⁵MSc. Agronegocios, sandra.montesino@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-3437-6976>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

⁶Esp. Gerencia de la Salud Ocupacional, leidy.carreno@unipaz.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-4374-5235>, Instituto Universitario de la Paz, Barrancabermeja, Colombia.

Cómo citar: D. E. Gáfaró-Álvarez, A. G. Rueda-Jaimes, L. F. Medina-Caballero, A. M. Salazar-Beleño, S. M. Montesino-Rincón, y L. A. Carreño-Castaño, "Caracterización del biodiesel producido a partir del aceite de higuera (*Ricinus communis*), y determinación de los factores primarios que intervienen en su calidad", *Respuestas*, vol. 29, n.º 2, pp. 38-45, May. 2024. <https://doi.org/10.22463/0122820X.4057>

Received on August 30, 2023 - Approved on February 05, 2024

ABSTRACT

Keywords:

Biodiesel, *Ricinus communis*, Castor oil, esterification.

Biodiesel has become one of the main options when it comes to satisfying the demand for energy resources and replacing or complementing the use of fossil fuels, thanks to its compatibility with fossil fuels, its renewable nature and its reduced environmental impact. Currently, to a large extent, biodiesel is produced from oils of vegetable origin, among which is castor seed oil. In the present investigation, regionally grown seed was used, in the municipality of Girón (Santander), to then carry out the complete process of extracting the oil and transforming it into fuel, seeking to determine their viability on a large scale through the characterization of the product obtained.

RESUMEN

Palabras clave:

Biodiesel, *Ricinus communis*, aceite de higuera, esterificación.

El biodiesel se ha convertido en una de las principales opciones a la hora de satisfacer la demanda de recursos energéticos y reemplazar o complementar la utilización de combustibles fósiles, gracias a su compatibilidad con los mismos, su carácter renovable y su impacto ambiental reducido. En la actualidad, y en gran medida, el biodiesel es producido a partir de aceites de origen vegetal, entre los que se encuentra el aceite de semilla de higuera. En la presente investigación se hizo uso de semilla cultivada de forma regional, en el municipio de Girón (Santander), para luego realizar el proceso completo de extracción del aceite y transformación del mismo en combustible, buscando determinar la viabilidad de los mismos a gran escala mediante la caracterización del producto obtenido.

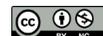
Introducción

La creciente demanda de recursos energéticos, aunada a la disminución continuada de las fuentes tradicionales de los mismos, ha llevado a la necesidad inmediata de buscar fuentes alternativas de energía que tengan un carácter renovable y accesible. En dicha búsqueda influyen, además, otros factores de relevancia entre los que resalta la necesidad de fuentes energéticas con un impacto ambiental reducido en comparación con las tradicionales, como forma de preservar la naturaleza y los recursos ambientales [1][2], frente a la amenaza representada por el cambio climático.

*Corresponding author.

E-mail Address: leidy.carreno@unipaz.edu.co

(Leidy Andrea Carreño-Castaño)



Peer review is the responsibility of the Universidad Francisco de Paula Santander.
This is an article under the license CC BY-NC 4.0

En este escenario, el biodiesel, combustible producido a partir de fuentes aceitosas, usualmente vegetales, se convierte en una opción de amplio interés, toda vez que se obtiene a partir de fuentes renovables; este resulta compatible con los combustibles fósiles tradicionales, por lo que puede ser mezclado con los mismos, tiene un mayor carácter biodegradable y genera menores emisiones contaminantes en comparación con el combustible tradicional [3]. Elementos que, en conjunto, le convierten una fuente energética de amplio potencial [4][5].

A pesar de esto, existen varios factores que influyen de forma directa en la idoneidad del biocombustible y entre los que pueden resaltarse de forma primaria la disponibilidad y facilidad de acceso de la fuente grasa utilizada para su fabricación, y la eficiencia del proceso de producción, mediante el cual los ácidos grasos contenidos en dicha fuente son transformados en combustible.

Respecto del primer factor, al buscar una fuente vegetal renovable y de fácil acceso se ha recurrido de forma remarcada al aceite de higuera, obtenido de la planta *Ricinus communis*, toda vez que la misma se encuentra presente en la mayor parte del planeta, puede crecer en diferentes tipos de suelo y de piso climático, y sus semillas tienen una elevada proporción de grasa, que puede ser aprovechada para la elaboración de combustible [6].

En cuanto al segundo factor, la eficiencia, la semilla del *Ricinus communis* contiene entre un 40% y 55% de aceite, que supera de forma considerable a otras fuentes tradicionales, como la soya o la palma africana, al tiempo en que su cultivo suele requerir una menor cantidad de terreno, lo que impide a su vez que se afecte en demasía la disponibilidad de suelo fértil para la agricultura, y causa menos costos de sostenimiento. Igualmente, por no ser un fruto comestible, no se afecta tampoco de forma directa la producción alimentaria [3][7].

Sin embargo, el nivel de aceite extraído de la semilla se ve afectado, de forma ostensible, por el método empleado para dicha extracción, siendo la extracción por prensa en frío la de menor eficiencia, mientras que la extracción por mediante solventes parece evidenciar un mejor rendimiento [8][9].

Para el caso del presente trabajo, es importante resaltar que, aunque la especie *Ricinus communis* es nativa de África, en Colombia esta planta ha sido naturalizada y gracias a las condiciones climáticas y geográficas del departamento de Santander, se encuentra ampliamente distribuida en los ecosistemas de bosque seco tropical y bosque andino, teniendo presencia a diferentes altitudes, siendo así una ventaja para la región en la obtención de la semilla y su posterior extracción del aceite con fines medicinales, energéticos, entre otros [10].

Así, el presente trabajo pretende caracterizar el aceite de higuera extraído por método químico, teniendo como referente el aceite de palma, un aceite comúnmente comercializado, al igual que su transformación en biocombustible. En este proceso de transformación se tomará en cuenta la influencia de la concentración en el catalizador básico, y dependiendo de las propiedades del aceite extraído, llevar a cabo la esterificación del aceite como pretratamiento. De esta manera se logra estudiar las variables que pueden afectar la calidad de los productos obtenidos como el método de extracción para el caso del aceite y la concentración de los catalizadores en el caso de los metil ésteres producidos en la reacción de transesterificación y esterificación.

Materiales y Métodos

Materiales

El material básico, utilizado para la generalidad del proyecto, es aceite de higuera, extraído de forma local a partir de las semillas obtenidas en plantaciones de *Ricinus communis*, ubicadas en el área rural del municipio de San Juan de Girón, en el Departamento de Santander (Colombia).

De igual forma, y con el fin de comparar el método de extracción, se usó n-hexano como solvente para la extracción del aceite por método Soxhlet [11], e hidróxido de potasio (KOH) como catalizador de la reacción mediante la cual se transformó el aceite en combustible.

Instrumentación

Para la caracterización del aceite de higuera se usaron, además de equipo estándar de laboratorio, un extractor Soxhlet, un picnómetro de Gay-Lussac, un recipiente aislador de luz, un espectrofotómetro y un refractómetro. Equipamiento similar se utilizó para la segunda etapa de variación del catalizador, con la adición de un viscosímetro automático CAV 2000. No hubo adición de nuevos equipos a los ya mencionados en la tercera etapa de esterificación.

Extracción y caracterización del aceite

La extracción del aceite se realizó haciendo uso del método de sólido a líquido (Soxhlet), con n-hexano como solvente. Al aceite obtenido se le realizaron diversas pruebas fisicoquímicas, incluyendo la determinación de su densidad, índice de yodo, índice de acidez, índice de refracción, determinación del FT-IR mediante infrarrojos, determinación de humedad y punto de fusión, finalmente se determinó el nivel de impurezas. Esto se hizo siguiendo de forma estricta las pautas establecidas en la NTC 336 [12], NTC 283 [13], NTC 218 [14], NTC 289 [15], NTC 335 [16], NTC 287 [17], NTC 213 [18] y NTC 240 [19], de forma respectiva.

Obtención del biodiesel

Para la transesterificación, proceso por el cual se obtiene el biodiesel a partir del aceite de higuera, se hizo elección de un catalizador básico homogéneo, el método más usual a nivel industrial para dicho proceso, utilizando de forma particular el Hidróxido de Potasio (KOH). Las concentraciones del catalizador y las condiciones de temperatura de la reacción de transesterificación se basaron en la metodología realizada por Rueda et al. [20], comparando concentraciones de 3,5 y 4 gr KOH/100 mL de etanol y una temperatura de 60°C durante 2 horas.

Esterificación.

El proceso de esterificación del aceite, que se realiza de forma previa al proceso de transesterificación, tiene un carácter puramente optativo, que busca facilitar la transformación del aceite en combustible, aumentando el rendimiento [20]. Para determinar su utilidad, se hicieron tres procesos paralelos, dos con esterificación previa, y otro sin ella, para luego comparar los resultados. El aditivo empleado para la esterificación fue ácido sulfúrico, en proporciones de 20:1 y de 30:1, respectivamente.

Resultados y Discusión

El proceso inicial de extracción del aceite de higuierilla a partir de la semilla cultivada en el municipio de Girón tuvo una eficiencia con relación al peso de las semillas empleadas con una eficiencia promedio de 42%, que se considera competitiva para el estándar general de la industria, toda vez que valores constantes superiores al 30% ya superan al de otras fuentes tradicionales, como el aceite de palma [3] [7].

La caracterización del aceite, además, permitió determinar por el índice de acidez que este tiene un nivel bajo ácidos grasos libres, al igual que un bajo índice de saponificación. Dichos factores influyen de forma positiva en el proceso de fabricación del biodiesel al contribuir a la eficiencia de este [22][23], debido a que evita la formación de productos indeseables como jabones. La comparación de los parámetros obtenidos con relación a los parámetros aceptados para el aceite de palma comercialmente distribuido está registrada en la Tabla I:

Tabla I. Comparación de los parámetros de calidad del aceite de higuierilla.

Parámetro	Aceite analizado	Aceite de palma (Referencia)	Aceite de <i>Jatropha curcas</i> [26]
Densidad (g/mL)	0,768	0,896 - 0,910 [24]	0,91
Índice de Yodo (g I ₂ /100 g aceite)	44,09	58-75 [24]	90,8
Índice de acidez (mg KOH/g aceite)	0,51	<2 [25]	0,21
Índice de refracción	1,475	1,459 - 1,462 [24]	1,47
Índice de saponificación (mg KOH/g aceite)	33,4	189-199 [24]	180-200
Porcentaje de humedad (%)	0,05	Máximo 0,5 [24]	2,5
Punto de fusión (°C)	30	Máximo 30 [24]	-10°C
Porcentaje de impurezas (%)	5,7	0,10 [24]	---

Como puede verse, si bien la mayoría de los parámetros son acordes con el estándar comercial, hay algunos que se alejan de forma considerable. De estos, el que causa mayor preocupación es la densidad, que se encuentra bastante por debajo del parámetro comercial, y que puede afectar el rendimiento de la transformación del aceite en combustible [27] además, una baja densidad en el aceite promueve la acumulación de impurezas; este valor también pudo deberse a la presencia de trazas de n-hexano en el aceite extraído, el cual reduce su densidad. En contraste, el bajo índice de saponificación, inferior al nivel comercial, se convierte en un factor positivo, ya que previene la formación de jabones que afectan la apariencia y la calidad del aceite para su transformación en biodiesel [28]. Finalmente, es de señalar el elevado nivel de impurezas obtenido, que se convierte igualmente en un factor negativo de rendimiento, por lo que es recomendable realizar un pretratamiento al aceite.

Se debe tener en cuenta también el proceso de extracción a escala industrial como es el caso del aceite de referencia y el aceite estudiado en esta investigación, debido al uso de disolventes como el hexano y como fue realizado a pequeña escala es posible que haya diferencias en algunos parámetros, sin embargo, para el propósito de esta investigación se puede mencionar que el aceite de higuierilla es apto para su posterior transformación en biodiesel. Además de esto, se puede mencionar que al comparar con el aceite refinado de *Jatropha curcas* L. [27], se puede observar en la tabla I que parámetros como el índice de yodo, saponificación y humedad reportan menores valores, mostrando una mejor calidad al ser usados para la producción de biodiesel.

En cuanto a la transformación del aceite en biodiesel mediante el proceso de transesterificación, la utilización de un catalizador básico homogéneo como el hidróxido de potasio (KOH) cumplió con los estándares de eficiencia del mercado, siendo la relación de 3.5 gramos de KOH por cada 100 mL de etanol la que obtuvo mejores resultados, como puede observarse en la Tabla II.

Tabla II. Comparación en la concentración de KOH en la transesterificación

Parámetro	3.5 gr KOH/100 ml etanol	4 gr KOH/100 ml etanol	Parámetros biodiesel [29]
Índice de cetano.	34	28	Mínimo 50
Punto de inflamación	83,9 °C	86,7 °C	Mínimo 120°C
Densidad a 20° C	0,9319 g/cm ³	0,945 g/cm ³	0,86 – 0,90 g/cm ³
Viscosidad	22,75 mm ² /s ²	58,71 mm ² /s ²	3,5 – 5,0 mm ² /s ²

Aunque los valores obtenidos de la transesterificación no entran en el rango de los parámetros del biodiesel, se evidencia de este comparativo que el producto obtenido con 3.5 gramos de KOH por cada 100 ml de etanol tiene un índice de cetano considerablemente superior, lo que implica una combustión mucho más rápida y uniforme, y por consiguiente una mayor calidad como combustible [30]. De igual forma, el combustible obtenido con 4 gramos de KOH por cada 100 mililitros de etanol posee una viscosidad elevada, que afecta su manipulación. Es necesario señalar, sin embargo, que la viscosidad obtenida con la menor concentración, aunque es considerablemente más baja, sigue teniendo un valor elevado para su uso comercial.

A partir de los resultados de la transesterificación, se puede mencionar que, al aumentar el valor de la densidad favorece el uso de este biocombustible ya que tiende a acumular menor cantidad de impurezas. Por último, y en la evaluación de influencia de la etapa optativa de esterificación, los resultados obtenidos en la caracterización del aceite mostraron un índice de acidez bajo e ideal para la obtención de ésteres metílicos en la transesterificación, por lo tanto, se sugiere que dicho proceso no parece afectar de manera significativa la transformación del aceite de higuera en biodiesel, y por consiguiente no se justifica su implementación.

De igual forma, en todos los casos comparados, con o sin proceso de esterificación previa, se tuvieron niveles demasiado altos de impurezas en el combustible obtenido, lo que se convierte en un factor negativo de relevancia, al punto de hacerlo muy poco recomendable para su uso comercial, y obligando a buscar soluciones alternativas para la superación de dicho impase. Entre estas soluciones se encuentra el tratamiento de desgomado del aceite, el cual es el primer paso en la refinación del aceite, eliminando la concentración de fosfatos y metales en el aceite crudo, para este tratamiento se puede realizar el desgomado con agua, un desgomado ácido y enzimático [31], sin embargo, la efectividad del desgomado depende de factores como el tipo de semilla, la calidad del aceite crudo y las condiciones de la molienda de la semilla.

Conclusiones

De todo lo anterior se puede concluir, entonces, que tanto el proceso de extracción del aceite de la semilla de higuera obtenida en Girón, como la transformación de este en biodiesel tiene unos niveles de eficiencia idóneos y competitivos, que permiten proyectar de manera positiva la fabricación de biocombustibles en la región.

De igual forma, se descarta de momento la conveniencia de la etapa previa de esterificación del aceite, antes de su transformación en combustible, al no influenciar de forma significativa en los resultados del proceso.

Sin embargo, el exceso de residuos e impurezas contenidos en el biodiesel obtenido al final del proceso se convierte en un marcado factor de afectación negativa, por lo cual deben buscarse con inmediatez mecanismos para su reducción, como podrían ser la utilización de procesos previos para la limpieza y tratamiento de la semilla de higuerilla.

Referencias

- [1] S. K. Hoekman, A. Broch, C. Robbins, E. Cenicerós and M. Natarajan, “Review of biodiesel composition, properties, and specifications”, *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 1, pp. 143–169, January 2012. DOI: 10.1016/j.rser.2011.07.143
- [2] G. Knothe and L. F. Razon, “Biodiesel fuels”, *Prog. Energy Combustion Sci.*, vol. 58, pp. 36–59, January 2017. DOI: 10.1016/j.peccs.2016.08.001
- [3] A.K. Yusuf, P.A.P. Mamza, A.S. Ahmed and U. Agunwa, “Extraction and characterization of castor seed oil from wild *Ricinus communis* Linn”, *Int. J. Sci. Environ. and Technol.* Vol. 4, No. 5, pp. 1392 – 1404, October 2015. ISSN: 2278-3687
- [4] S. T. Keera, S. M. El Sabagh and A. R. Taman, “Castor oil biodiesel production and optimization”, *Egyptian J. Petroleum*, vol. 27, No. 4, pp. 979–984, December 2018. DOI: 10.1016/j.ejpe.2018.02.007
- [5] A. Torroba, “Atlas de los biocombustibles líquidos 2019-2020”, *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)*. 2020. URI: <https://repositorio.iica.int/handle/11324/13974>
- [6] S. N. Gebremariam and J. M. Marchetti, “Economics of biodiesel production: Review”, *Energy Convers. Manage.*, vol. 168, pp. 74–84, July 2018. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.05.002
- [7] B. Karmakar, S. H. Dhawane and G. Halder, “Optimization of biodiesel production from castor oil by Taguchi design”, *J. Environmental Chem. Eng.*, vol. 6, No. 2, pp. 2684–2695, April 2018. DOI: 10.1016/j.jece.2018.04.019
- [8] K. J. Godri Pollitt, D. Chhan, K. Rais, K. Pan and J. S. Wallace, “Biodiesel fuels: A greener diesel? A review from a health perspective”, *Sci. Total Environ.*, vol. 688, pp. 1036–1055, October 2019. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.002
- [9] M. R. Monteiro, C. L. Kugelmeier, R. S. Pinheiro, M. O. Batalha and A. da Silva César, “Glycerol from biodiesel production: Technological paths for sustainability”, *Renewable Sustain. Energy Rev.*, vol. 88, pp. 109–122, May 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.02.019
- [10] Gómez, A., Murillo, J., & García, H. “Los géneros de *Euphorbiaceae*, *Peraceae*, *Phyllanthaceae* y *Picrodendraceae* del Departamento de Santander, Colombia” Universidad Nacional de Colombia, 2021. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/83558>
- [11] Mkhize, Z. I., Ngema, P. T., & Ramsuroop, S. “Effect of Temperature on Extraction of Castor Oil from Castor Seeds Using Potential Green Solvents”. *Adv. in Chem. Eng. and Science*, vol. 13(04), pp.

301–317. September 2023. DOI: 10.4236/aces.2023.134021

- [12] ICONTEC, “NTC 336: Grasas y aceites animales y vegetales. Método de la determinación de la densidad (Masa por volumen convencional)”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2016. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-animales-y-vegetales-metodo-de-la-determinacion-de-la-densidad-masa-por-volumen-convencional-ntc336-2016.html>
- [13] ICONTEC, “NTC 283: Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del índice de yodo”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2019. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-vegetales-y-animales-determinacion-del-indice-de-yodo-ntc283-2019.html>
- [14] ICONTEC, “NTC 218: Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de acidez y de la acidez”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2011. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-vegetales-y-animales-determinacion-del-indice-de-acidez-y-de-la-acidez-ntc218-2011.html>
- [15] ICONTEC, “NTC 289: Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de refracción”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2019. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-animales-y-vegetales-determinacion-del-indice-de-refraccion-ntc289-2019.html>
- [16] ICONTEC, “NTC 335: Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del índice de saponificación”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2019. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-animales-y-vegetales-determinacion-del-indice-de-saponificacion-ntc335-2019.html>
- [17] ICONTEC, “NTC 287: Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de humedad y materia volátil”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2018. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-animales-y-vegetales-determinacion-del-contenido-de-humedad-y-materia-volatil-ntc287-2018.html>
- [18] ICONTEC, “NTC 213: Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del punto de fusión (punto de deslizamiento)”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2013. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-animales-y-vegetales-determinacion-del-contenido-de-humedad-y-materia-volatil-ntc287-2018.html>
- [19] ICONTEC, “NTC 240: Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de impurezas insolubles.”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2011. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-grasas-y-aceites-animales-y-vegetales-determinacion-del-contenido-de-impurezas-insolubles-ntc240-2011.html>
- [20] B. Chidambaranathan, S. Gopinath, R. Aravindraj, A. Devaraj, S. Gokula Krishnan and J. K. S. Jeevaanathan, “The production of biodiesel from castor oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition Engine: A comprehensive review”, *Mater. Today: Proc.*, vol. 33, pp. 84–92, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.03.205
- [21] M. J. A. Ferreira, M. F. S. Mota, R. G. B. Mariano and S. P. Freitas, “Evaluation of liquid-liquid

extraction to reducing the acidity index of the tucuma (*Astrocaryum vulgare* Mart.) pulp oil”, *Separation Purification Technol.*, vol. 257, p.p. 1-24, February 2021. DOI: 10.1016/j.seppur.2020.117894

- [22] H. Hadiyanto, A. P. Aini, W. Widayat, K. Kusmiyati, A. Budiman and A. Roesyadi, “Multi-Feedstocks Biodiesel Production from Esterification of Calophyllum inophyllum Oil, Castor Oil, Palm Oil and Waste Cooking Oil”, *Int. J. Renewable Energy Develop.*, vol. 9, No. 1, pp. 119–123, January 2020. DOI: 10.14710/ijred.9.1.119-123
- [23] ICONTEC, “NTC 5895:2021: Aceite crudo de palma con mayor contenido de ácido oleico. Requisitos.”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2021. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-aceite-crudo-de-palma-con-mayor-contenido-de-acido-oleico-requisitos-ntc5895-2021.html>
- [24] C. Camargo. “Obtención de una base biolubricante a partir de aceites transesterificados de las grasas animales (sebos) provenientes de la industria bovina” Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. 2022
- [25] A. T. Hoang and V. V. Pham, “Impact of Jatropha Oil on Engine Performance, Emission Characteristics, Deposit Formation, and Lubricating Oil Degradation”, *Combustion Sci. Technol.*, vol. 191, No 3, pp. 504–519, August 2018. DOI: 10.1080/00102202.2018.1504292
- [26] E. González-Acosta, M. Martínez-Alonso, Y. Hernández-Díaz, Y. García-Díaz, y L. González-Rodríguez. “Propiedades fisicoquímicas y tribológicas del aceite de Jatropha curcas L. epoxidado”. *Revista Cubana de Ciencias Químicas*, vol. 30(1), p.p. 204-212. 2023. ISSN: 2224-6185
- [27] C. Muhammad, M. Mukhtar, M. Sabiu-Jibrin, M. Usman-Dabai, A. Sarkin-Baki, “Assessment of Low Temperature Refining Process of Castor Seed Oil for Biodiesel Production”, *American Journal of Chemical and Biochemical Engineering*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-6. 2019.
- [28] ICONTEC, “NTC 5444:2020: Biodiesel para uso en motores diésel. Especificaciones.”, *Normas Técnicas Colombianas*, 2020. Disponible en: <https://tienda.icontec.org/gp-biodiesel-para-uso-en-motores-diesel-especificaciones-ntc5444-2020.html>
- [29] P. Montcho, L. Tchiakpe, G. Nonviho, D. Bothon, A. Sidohoude, C. Agbangnan-Dossa, D. Bessieres, A. Chrostowska and K. Sohounhloue, “Fatty acid profile and quality parameters of Ceiba pentandra (L.) seed oil: A potential source of biodiesel”, *J. Pet. Technol. Altern. Fuels*, Vol. 9, No. 3, pp. 14-19, 2018. DOI: 10.5897/JPTAF2018.0141
- [30] N. Kanthavelkumaran, S. Samuel, M. Daniel, S. Sanjeev, and S. Sujith. “Estimation of Performance and Emission of Castor Oil Biodiesel Blended With Sole Fuel in Diesel Engine”. *International Journal of Precious Engineering Research and Applications (IJPERA)*, vol 7(1), p.p. 8–12. ISSN: 2456-2734