

Biodiesel obtenido a partir del aceite de *Moringa oleífera*

Biodiesel obtained from *Moringa oleifera* oil

Ofelia Alfonso Alemán^{1,*}

¹Facultad de Ingeniería Química. Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” (CUJAE). Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

*Correspondencia: renia@tesla.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

La *Moringa oleífera* es altamente valorada a nivel mundial por sus propiedades. Es una de las especies vegetales con mayor contenido de aceite en sus semillas, entre un 30 y 45%. En el presente trabajo mediante la reacción de transesterificación se obtuvo ésteres metílicos como alternativa al combustible diesel, que es no renovable y contamina al medio ambiente. El aceite presentó una densidad de 0,90 g/mL, una viscosidad cinemática de 42,19 mm²/s y un grado de acidez en porcentaje oleico de 2,3%. En el análisis de varianza del diseño experimental se observó que el factor temperatura influye significativamente en el rendimiento de la transesterificación. El mejor valor del mismo es de 91,5% y se alcanza a una temperatura de 60°C, 0,5% de NaOH, una velocidad de agitación de 500 rpm por espacio de una hora. También se realizó la caracterización de los ésteres metílicos, donde se obtuvo una densidad de 0,8650 g/mL, una viscosidad cinemática de 5,07 mm²/s y un grado de acidez referido al ácido oleico de 0,45%. El comportamiento reológico del biodiesel es el de un fluido no newtoniano y el número de cetano resultó ser de 58,63. El costo total de producir un litro de ésteres metílicos de *Moringa oleífera* fue de 52,66 CUP.

Palabras clave: biodiesel, aceite vegetal, *Moringa oleifera*

Abstract

Moringa oleifera is highly valued worldwide due to its properties. It is one of the vegetable species with the highest oil content in its seeds, between 30 and 45%. In the present work by the transesterification reaction methyl esters were obtained as an alternative to diesel fuel, which is non-renewable and contaminates the environment. The oil had a density of 0.90 g/mL, cinematic viscosity of 42.19 mm²/s and an acidity index in oleic percentage of 2.3%. In the analysis of variance of the experimental design it was observed that the temperature factor significantly influences in the transesterification yield. The best yield value was 91.5% and it is reached at a temperature of 60°C, 0.5% of NaOH, a stirring speed of 500 rpm during one hour. The characterization of the methyl esters was also made, obtaining a density of 0.8650 g/mL, a kinematic viscosity of 5.07 mm²/s and an acidity index relative to oleic acid of 0.45%. The rheological behavior of biodiesel corresponds to a non-newtonian fluid and the cetane number was 58.63. The total cost of producing one liter of methyl esters from *Moringa oleifera* oil was 52.66 CUP.

Keywords: biodiesel, vegetable oil, *Moringa oleifera*

1. Introducción

El uso de la energía se ha convertido en un requisito básico para la subsistencia humana, y los combustibles fósiles siguen siendo la fuente principal de energía empleada a nivel global, representando el 80% de la energía principal que se utiliza en el mundo, y de ella el 58% es consumida por el sector del transporte [1]. El combustible más utilizado es el petróleo y sus reservas se están agotando. A este problema se le suman aquellos relacionados con la emisión de gases del efecto invernadero, que contribuyen a la contaminación ambiental.

Con el fin de optimizar las capacidades industriales y sustituir las fuentes fósiles actualmente explotadas, debido a la actual crisis energética mundial, se analizan diferentes tecnologías donde se emplean fuentes alternativas y renovables, como los biocombustibles. Los combustibles alternativos son sustancias carburantes en estado líquido, sólido o gaseoso, que generan energía en forma de calor en presencia de oxígeno y una fuente de energía de activación [2]. Ejemplos de estos en estado líquido se encuentran el etanol, los aceites vegetales y el biodiesel. El biodiesel es una interesante alternativa para cubrir parte de la demanda energética de combustibles derivados de petróleo (diesel específicamente). Es un biocombustible que tiene ventajas respecto al diesel, pero la principal razón para su utilización es el hecho de que presenta un impacto ambiental positivo. Al ser producido a partir de aceites vegetales o grasas de cualquier origen, o sea recursos renovables, produce una ventaja neta en lo que se refiere al ciclo de carbono, no produciendo acumulación del mismo en el ambiente.

A nivel internacional, se puede producir biodiesel a partir de aceites extraídos de plantas oleaginosas, entre las que se encuentran: soya, girasol, palma, coco, colza; también hay procesos de producción de biodiesel que utilizan aceites de fritura usados o grasas animales; sin embargo, cualquier materia que tenga triglicéridos puede utilizarse para la producción del portador energético. Su uso ofrece múltiples ventajas, tales como: disponibilidad, regeneración, bajo contenidos de sulfuros, alto contenido calórico y biodegradabilidad [3-5].

En Cuba se encuentran con cierta abundancia, varias especies de plantas que han sido introducidas por sus propiedades medicinales, alimenticias, así como por sus usos industriales y ornamentales. Tal es el caso de la especie *Moringa oleífera* [6]. Sus semillas poseen un gran potencial para la obtención de biodiesel, pues contienen entre 30 y 45% de aceite. El perfil de ácidos grasos del aceite es diferente al de otros aceites vegetales comúnmente empleados como materia prima en la producción del portador energético, destacando el ácido oleico con un 70% en peso [7-11]. El aceite derivado de las semillas de *Moringa oleífera* presenta alto número de cetano, cerca de 67. La inflamabilidad y la estabilidad oxidativa del combustible es alta comparado con otras materias primas para producir biodiesel.

En Cuba se desarrolla un programa nacional de la siembra del cultivo de la *Moringa oleífera*. El Ministerio de Agricultura ha tomado interés en diseminar y emplear esta especie, estableciéndola como recurso de primer orden para asegurar la alimentación humana y animal. Desde el año 2013 se viene trabajando en el proceso de extracción de aceite debido a la disponibilidad de semilla en el país y los beneficios que pueden obtenerse de estas.

Actualmente en la isla, la mayor parte de la energía es consumida por combustibles convencionales como la gasolina y el diesel. Con el objetivo de sustituir dichos combustibles se han empleado el gas natural comprimido y el alcohol. No obstante, no es suficiente y sigue siendo una necesidad imperante el estudio de nuevas fuentes de energía. El objetivo del presente trabajo es evaluar el proceso de producción de biodiesel a partir de aceite de semillas de *Moringa oleífera* cosechadas en Cuba.

2. Materiales y Métodos

El aceite de semillas de *Moringa oleifera* constituye la materia prima de la presente investigación. El mismo se obtiene a partir de la extracción mecánica y las semillas utilizadas son suministradas por un Banco de Germinación, donde se obtienen posturas del árbol con calidad. Las semillas se clasifican de acuerdo a propiedades organolépticas (color, olor y apariencia) para quedar agrupadas en aptas para el proceso de siembra o rechazadas. Las rechazadas se convierten en un producto de desecho pues no tienen otra utilidad. Las semillas de la variedad Criolla provienen del rechazo del proceso de germinación.

A partir de las semillas disponibles (10 kg) procedentes del rechazo del proceso de germinación, se realiza una extracción mecánica del aceite utilizando un molino. Las semillas se llevan al molino sin previo descascarado para evitar la adherencia de los cotiledones en el equipo. El aceite obtenido se filtra al observarse una coloración oscura y sólidos provenientes de la cáscara de las semillas. Para esta operación se utiliza la bomba de vacío. Propiedades como densidad, viscosidad, índice de acidez, grado de acidez y composición (perfil de ácidos grasos) se determinan para la muestra de aceite de *Moringa oleifera*.

La composición de ácidos grasos se determina según [12]. Se utiliza un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 6890N (G1530N), Network GC System) con una columna cromatográfica SP de 100 m; sistema de inyección por enfriamiento en columna y 1 mL/min helio (He) como gas portador. El detector usado es el detector de ionización por llamas, operado a 250°C, 300 mL aire/min y 30mL H₂/min. Gas portador: He 20 mL/min. Programa de temperatura: 100°C (1 min), 4,8°C/min-150°C, 1°C/min, 170°C (48 min), 1°C/min, 174°C (30 min), 5°C/min, 240°C (10min). Los ácidos grasos fueron identificados por comparación del tiempo de retención y su espectro de masas con una base de datos de espectros de masas de compuestos conocidos.

En cuanto a la reacción de transesterificación, se utilizaron 30 g de aceite de *Moringa oleifera* de la variedad Criolla para realizar los experimentos. La reacción de transesterificación se lleva a cabo con un previo calentamiento del aceite hasta la temperatura de interés, empleando una relación molar alcohol-aceite de 6:1 (seis moles de metanol (CH₃OH) por mol de triglicérido presente). En el instante que se alcanza dicha temperatura se le adiciona el alcóxido (metóxido de sodio) preparado de manera independiente, añadiendo 19,4 mL de metanol al catalizador que posee una concentración de 0,5%. A partir de ese momento comienza a medirse una hora de reacción, durante la cual se garantiza una velocidad de agitación establecida. El producto obtenido se deja reposar en un embudo decantador por 24 horas. Pasado el tiempo de reposo se puede apreciar la separación de la fase glicerina de la fase de ésteres metílicos de ácidos grasos. El metanol que se utiliza tiene una pureza mayor que 99,5%. El catalizador utilizado fue el hidróxido de sodio (NaOH), el cual fue adquirido en forma de perlas con un 95% de pureza.

La fase de ésteres metílicos de ácidos grasos obtenidos se somete a un lavado con agua potable precalentada a 50°C. Cuando el agua de lavado tiene un pH aproximadamente de 7 y es incolora, se asume que las impurezas producto de la reacción de transesterificación, así como los restos de catalizador, se hayan eliminado. Posteriormente los ésteres metílicos lavados se colocan en "baño María" para eliminar el agua incorporada durante el lavado.

Para el estudio de la influencia de las condiciones de reacción en el rendimiento, se trabajó con el programa estadístico Statgraphics Centurión versión XV. Se estableció como variable respuesta el rendimiento de la reacción, para la cual se estudia la influencia de los factores velocidad de agitación y temperatura. Las dos variables de operación se estudian a dos niveles cada una, obteniéndose un diseño factorial 2^2 con una réplica, para un total de 8 experimentos.

3. Resultados y Discusión

El aceite de semilla de *Moringa oleífera* variedad Criolla se extrae de una masa de 10 kg mediante prensado mecánico. Las semillas se muelen con cáscaras y se obtiene un volumen de aceite de 1,2 L, indicando un porcentaje de extracción de aceite de 12% (porcentaje en peso). Es importante señalar que aunque no es objetivo incidir en la eficiencia de la extracción del método utilizado, se han reportado resultados similares (14%) en la literatura consultada, para extracción mecánica de aceite a partir de semillas de *Moringa oleífera* [13]. Debido a la coloración oscura, dicho aceite se somete a un proceso de filtrado al vacío.

El valor medio obtenido de la densidad en esta investigación es de 0,9029 g/mL, similar a valores reportados para aceite de *Moringa oleífera* de las variedades Supergenius (Cuba), Sindh y Wild (Pakistán), Mbololo (Kenya), Wild (Malawi) y Periyakulam (India) [14].

La viscosidad dinámica obtenida se convierte a viscosidad cinemática con el objetivo de realizar una comparación con la literatura, ya que en la mayoría de los artículos y normas del biodiesel se reportan los valores de viscosidad cinemática. Para estos cálculos se emplea la densidad del aceite obtenida con anterioridad. Se obtiene de esta manera que la viscosidad cinemática del aceite de la variedad Criolla es de 42,19 mm²/s. Este valor concuerda con los reportes realizados en la literatura consultada [14]. Esta propiedad es particularmente importante, pues una de las razones por las que no se utiliza el aceite directamente en un motor de combustión interna es su elevado valor, en comparación con la del combustible diesel. Altas viscosidades pueden traer consigo variaciones significativas en algunas características del funcionamiento del motor como son: la facilidad del encendido, el retardo de la ignición y aumento en la presencia de algunos compuestos en los gases de escape, además de dificultades con el bombeo y transporte del combustible [15]. Esto motiva a emplear el aceite en mezclas con el diesel o transesterificarlo para disminuir la viscosidad hasta valores similares al combustible diesel.

El valor medio del índice de acidez del aceite de *Moringa oleífera* variedad Criolla es bajo, lo cual indica escasa presencia de ácidos grasos libres en el mismo. El porcentaje de acidez se expresa en función del ácido oleico debido a que este es el ácido graso que predomina en el aceite de *Moringa oleífera*. El valor promedio que se obtiene para la variedad Criolla se encuentra por debajo del 3%. Este es un resultado importante que permite asegurar que el aceite puede ser transesterificado sin necesidad de un previo tratamiento. Cuando el porcentaje de acidez es superior al 3% se debe hacer un pretratamiento para eliminar los ácidos grasos libres, evitando así que el rendimiento de la reacción de transesterificación disminuya por la formación de jabón [15].

Los resultados de la cromatografía de gases para el aceite de *Moringa oleífera* variedad Criolla se muestran en la Figura 1.

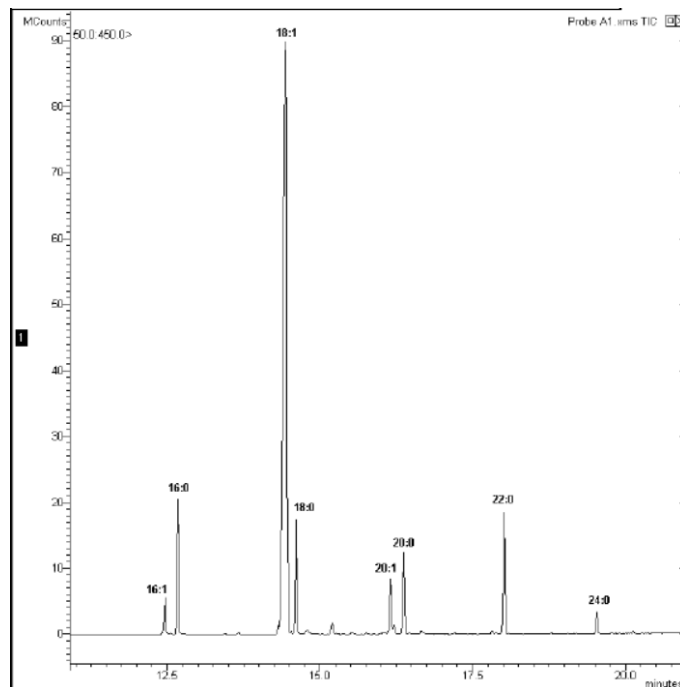


Fig.1 Cromatograma del aceite de *Moringa oleifera* variedad Criolla

Los ácidos grasos predominantes son los insaturados, con un porcentaje total de 76,4%, principalmente el ácido oleico con 71,7%. En el caso de los ácidos grasos saturados se observa que el ácido palmítico fue el de mayor porcentaje (7,0%), seguido del behénico (6,0%), esteárico (5,9%) y el araquídico (3,5%), además de otro en menor porcentaje como el lignocérico (1,1%). El porcentaje total de ácidos grasos saturados fue de 23,5%. De forma general el contenido de ácidos grasos saturados e insaturados obtenidos de la cromatografía a partir de las semillas de *Moringa oleifera* se corresponde con la información que se obtiene a partir del espectro de resonancia magnética nuclear protónica 1H-NMR. Se observa en la Figura 2 que los resultados obtenidos del aceite de *Moringa oleifera* de variedad Criolla resultan similares a los publicados [5, 11, 16]. Las pequeñas variaciones en los resultados pueden deberse a diferencias entre variedades, condiciones de cultivo y condiciones climáticas.

Para el diseño factorial, se evalúa como variable respuesta el rendimiento del proceso de transesterificación del aceite de *Moringa oleifera*. Los rendimientos obtenidos de la reacción de transesterificación se encuentran entre 72 y 93%. Estos resultados se corresponden con los publicados por otros autores donde el rendimiento máximo de conversión de aceite a combustible es de 94,30% y se concluye que se puede obtener ésteres metílicos con calidad a partir del aceite de *Moringa oleifera*.

El diseño experimental que se analiza es factorial 2^2 con una réplica para un total de 8 experimentos, y su procesamiento permite conocer el comportamiento del rendimiento de la reacción de transesterificación del aceite de semillas de *Moringa oleifera* ante la variación de los factores seleccionados. El modelo real que se obtiene se muestra en la ecuación 1.

$$R = 84,82 + 5,68*A + 1,0225*B - 0,0225*A*B \quad (1)$$

Donde:

R: rendimiento de la reacción de transesterificación (%)

A: temperatura (°C)

B: velocidad de agitación (rpm)

AB: interacción entre la temperatura y la velocidad de agitación del aceite

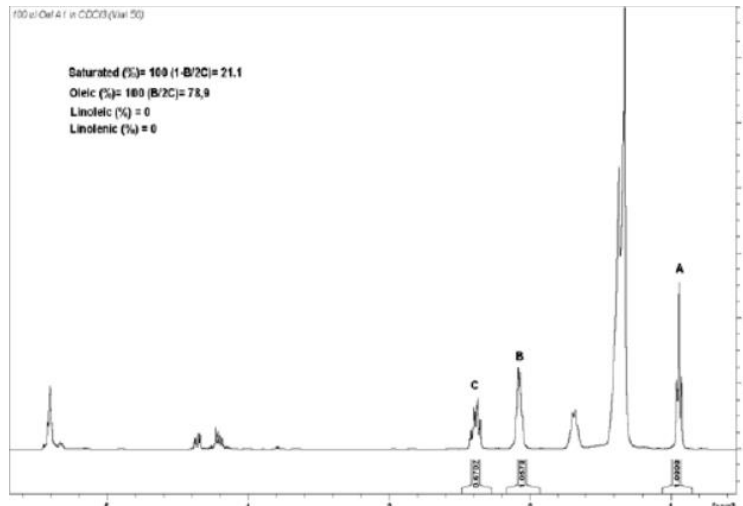


Fig.2 Composición de ácidos grasos de aceite de *Moringa oleifera* variedad Criolla calculado por el espectro 1H-NMR

En el análisis de varianza obtenido se observa que el factor temperatura influye significativamente de forma positiva en la variable respuesta, al tener un p-valor de 0,0395, menor que 0,05, indicando que es significativamente diferente de cero con un nivel de confianza del 95%. En el caso de la velocidad de agitación, y de la interacción entre la temperatura y la velocidad de agitación se observa que no influyen significativamente en la variable respuesta, debido a que presentan P-Valores de 0,5736 y 0,9898 respectivamente, siendo ambos valores superiores a 0,05. El diagrama de Pareto que se muestra en la Figura 3 concuerda y expone tal comportamiento.

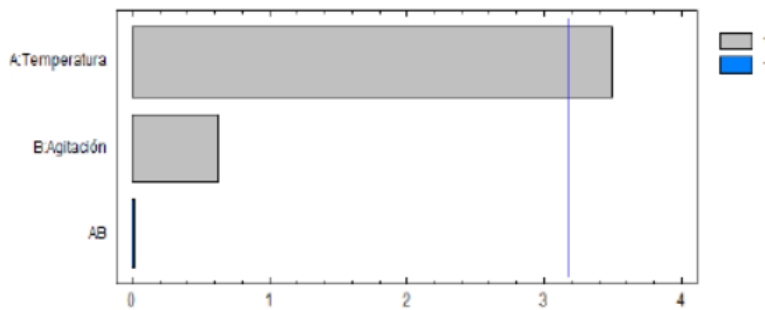


Fig.3 Diagrama de Pareto estandarizado

Las propiedades del biodiesel son parecidas o prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad. La densidad reportada en la norma EN-14214 está entre 860 y 900 kg/m³ (menor que la del agua), lo que permite demostrar que el biodiesel obtenido cumple con este indicador, al tener un valor de densidad de 0,865 g/mL equivalente a 865 kg/m³.

La viscosidad es una de las propiedades más importantes del combustible y altos valores de esta afecta la atomización del portador energético al inyectarse en la cámara de combustión, provocando problemas como la formación de depósitos en el motor, de aquí la importancia de prestarle especial atención. Los valores de viscosidad dinámica que se obtienen tienen una media de $4,38 \text{ mPa}\cdot\text{s} \pm 0,38$. Teniendo en cuenta que la densidad de los ésteres metílicos de *Moringa oleífera* variedad Criolla es de $0,8650 \text{ g/mL}$, se obtiene una viscosidad cinemática a 40°C promedio de $5,07 \text{ mm}^2/\text{s}$. Comparando el resultado obtenido de viscosidad cinemática a 40°C de $5,07 \text{ mm}^2/\text{s}$ con los valores que se observan en el Anexo V, se evidencia que cumple con los estándares internacionales de la norma ASTM D-6751 ($1,9\text{-}6,0 \text{ mm}^2/\text{s}$), aunque es ligeramente superior a la EN-14214 ($3,5\text{-}5,0 \text{ mm}^2/\text{s}$). El resultado de esta propiedad se corresponde con los resultados publicados por Mofijur donde la viscosidad cinemática a 40°C es de $5,05 \text{ mm}^2/\text{s}$ y con los de Umer Rashid con un valor de $4,83 \text{ mm}^2/\text{s}$ [5, 17].

Dado el limitado alcance del presente manuscrito, parte de los resultados expuestos pueden ser profundizados y comparados en más recientes publicaciones complementarias del presente trabajo o relativas al tema [18].

Conclusiones

Se obtiene biodiesel a partir de aceite de *Moringa oleífera*, lográndose rendimientos que varían entre 72 y 93%. El mejor valor obtenido es de 91,5% a una temperatura de 60°C y una velocidad de agitación de 500 rpm. El aceite tiene una densidad de $0,9029 \text{ g/mL}$, una viscosidad dinámica de $38,1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, un índice de acidez de $3,04 \text{ mg NaOH/g}$ de aceite y un grado de acidez de 2,3%. El biodiesel obtenido tiene una densidad de $0,8650 \text{ g/mL}$, una viscosidad dinámica de $4,39 \text{ mPa}\cdot\text{s}$, índice de acidez de $0,67 \text{ mg NaOH/g}$ de aceite, un grado de acidez de 0,45% y un número de cetano de 58,63. El mismo se comporta como un fluido no newtoniano (dilatante). Las propiedades del biodiesel de *Moringa oleífera* variedad Criolla se encuentran acorde a lo establecido en los estándares internacionales (normas ASTM D-6751 y EN-14214). El costo de producción de un litro de biodiesel de *Moringa oleífera* para las condiciones estudiadas en el laboratorio es de 50,35 CUP sin tener en cuenta la depreciación y de 52,66 CUP con depreciación.

Referencias

1. Nigman P, Singh A., *Production of liquid biofuels from renewable resources*. Progress in Energy and Combustion Science, 2011. **37**: p. 52-68.
2. Piloto-Rodríguez, R., Melo, E.A., Goyos, L., Verhelst, S., *Conversion of by-products from the vegetable oil industry into biodiesel and its use in internal combustion engines: a review*. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2014. **31**(2): p. 287-301.
3. Fernández L, Montiel, J., Millám, A., Badillo, J., *Producción de biocombustibles a partir de microalgas*, 2012. 8: p. 101-115.
4. Vera, A.C., *Actividad Catalítica de una arcilla pilareada para la síntesis de biodiesel*. Universidad Autónoma de Coahuila, 2012.
5. Mofijur, M, Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Atabani, A.E., Arbab, M.I., Cheng, S.F., Gouk, S.W., *Properties and use of Moringa oleífera biodiesel and diesel fuel blends in a multi-cylinder diesel engine*. Energy Conversion and Management, 2014: p. 169-76.
6. Marrero, D., González, V., *Composición de ácidos grasos del aceite de las semillas de Moringa oleífera que crece en La Habana, Cuba*. Revista Cubana Medicinales, 2014. **19**: p. 197-204.

7. Castro, A.M., *El árbol Moringa (Moringa oleífera Lam): una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicos y ambientales de Colombia*. Trabajo de Grado para optar título de especialista Planeación Ambiental y Manejo Integrado de los Recursos Naturales, 2013. Universidad Militar Nueva Granada.
8. Valencia, B.B., Colmenero, A., Bonilla, J.L., *Calidad agroindustrial del aceite de semillas de Moringa oleífera*. Desplegable Informativo, 2013. **16**.
9. Tabio, D., Díaz, Y., Rondón, M., Fernández, E., Piloto-Rodríguez, R., *Extracción de aceites de origen vegetal*. Universidad Tecnológica de La Habana, 2017.
10. Colectivo de Autores, *Biocombustibles para su uso en motores diesel*, 2014. IDICT. ISBN: 978-959-234-095-4.
11. Díaz-Domínguez, Y., Tabio, D., Rondón, M., Fernández, E., Muñoz, S., Ameneiros, J.M., Piloto-Rodríguez, R., *Extraction and characterization of Moringa oleífera Lam var. Supergenius seed oil from Cuba*. Revista CENIC Ciencias Químicas, 2017. **48**: p. 17-26.
12. Piloto-Rodríguez, R., Goyos, L., Alfonso, M., Duarte, M., Caro, R., Galle, J., Sierens, R., Verhelst, S., *Characterization of Jatropha curcas oils and their derived fatty acid ethyl esters obtained from two different plantations in Cuba*. Biomass & Bioenergy, 2011. **35**(9): p. 4092-4098.
13. Martín, C.M., Martín, G.J., Carrillo, E., Domínguez, H., Parajó, J.C., *La biomasa como fuente renovable de energía en el medio ambiente*, 2012.
14. Anwar F, Rashid, U., *Physico-chemical characteristics of Moringa oleífera seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan*, 2007. **39**: p. 1443-1453.
15. Reyes, L., *Biodiesel obtenido a partir de destilados de ácidos grasos procedentes de la industria aceitera cubana*, 2015. Tesis de Diploma, CUJAE.
16. Díaz, Y., Tabio, D., Goyos, L., Fernández, E., Piloto-Rodríguez, R., *Extraction and characterization of oil from Moringa oleífera for energy purposes*. Wulfenia Journal, 2017. **24**(5): p. 86-103.
17. Rashid, U., Anwar, F., Moser, B.R., Knothe, G., *Moringa oleífera oil: A possible source of biodiesel*, 2008. **99**: p. 8175-8179.
18. Colectivo de Autores, *Biodiesel. Producción y Uso*, Editorial Pastos y Forrajes, 2021. ISBN: 978-959-7138-48-8.