

MÁSTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Composición del aceite de las semillas de *Moringa oleifera*
y evaluación de sostenibilidad para su implementación
como cultivo agroforestal en Colombia



Universidad de Valladolid

Autor:
Luisa Fernanda Lozano
Castellanos

Tutor:
Adriana Correa
Guimarães



Composición del aceite de las semillas de *Moringa oleifera* y evaluación de sostenibilidad para su implementación como cultivo agroforestal en Colombia

Lozano-Castellanos, Luisa F ^a

^a Facultad de Ingeniería Forestal. Grupo de Investigación en Biodiversidad y Dinámica de Ecosistemas Tropicales. Universidad del Tolima, Ibagué - Colombia.

Resumen

Frente a la necesidad de desarrollar sistemas agroforestales más eficientes y sostenibles ambiental, económica y socialmente, se identifica la *Moringa oleifera* como especie prometedora para su implementación en Colombia y el aprovechamiento de su aceite debido a su versatilidad agronómica y propiedades químicas. Se comparó su aceite para producción de biodiesel con el fin de posicionarla frente a otras especies oleaginosas de importancia y reconocimiento, además se identificó las regiones potenciales para su establecimiento en Colombia a través del sistema de información geográfica QGIS, y se identificó los grupos funcionales del aceite procedente del Centro Universitario Regional del Norte (Tolima – Colombia) mediante la técnica de espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR). La moringa demostró ser una especie competitiva, con extensión considerable en el país para ser cultivada y con una alta calidad debido a su similitud con aceites vegetales provenientes de España y Portugal.

Palabras clave: *Moringa oleifera*, aceite de moringa, FTIR

Abstract

Facing the need to develop more efficient agroforestry systems as well as environmentally, economically and socially sustainable, *Moringa oleifera* is identified as a promising species for its implementation in Colombia and the use of its oil due to its agronomic versatility and chemical properties. Its oil was compared for the production of biodiesel in order to position it against other oil species of importance and recognition, also the regions for their establishment in Colombia were identified through the geographic information system QGIS, and the oil functional groups from the Regional University Center of the North (Tolima - Colombia) were identified using the Fourier Transformed Infrared Spectroscopy (FTIR) technique. The moringa proved to be a competitive species, with a considerable extension in the country to be cultivated and with a high quality due to its similarity with vegetable oils from Spain and Portugal.

Keywords: *Moringa oleifera*, moringa oil, FTIR

1. Introducción

La *Moringa oleifera*, perteneciente a la familia Moringaceae, es una especie de árbol nativa de la zona norte de India que posee raíces gruesas profundas, con tallos poco ramificados, hojas pinnadas donde cada una se encuentra dividida en muchos folíolos, fruto entre 20 – 50 x 1 – 3 cm,

atribuyéndole una forma alargada con semillas desarrollándose en su interior de forma globular café oscuro con 3 alas longitudinales entre 8 – 15 mm de diámetro, posee flores bisexuales blancas de 2.5 cm de diámetro y 2 cm de largo con estambres de color amarillo (Figura 1) (Olson & Fahey, 2011) (González, 2018), (Falasca & Bernabé, 2008).

Originaria del sur del Himalaya, se adapta a climas tropicales y subtropicales cuya temperatura media oscila entre los 12,6 y 40°C; para un óptimo crecimiento se debe encontrar entre los 25 a 35°C (Godino, et al., 2013). De igual forma, (Velázquez, et al., 2016) y (González, 2018) señalan su crecimiento en altitudes de hasta 2000 msnm, donde a mayor altitud su crecimiento y productividad es más lenta y baja, soportando precipitaciones entre los 250 a 2000 mm anuales y con adaptabilidad a suelos duros o pesados con poca capacidad de retención de humedad y pH entre 4,5 y 8,0.

Conocida comúnmente como moringa, ha sido aprovechada por diversas áreas del conocimiento atribuyéndole el apodo de ser una planta multipropósito. Debido a su alta rentabilidad, productividad y versatilidad frente a las condiciones ambientales para su plantación (Sanchez, et al., 2010), autores como (González, 2018), (Ramírez, 2017), (Castro, 2013), (García & Mora, 2018), entre otros, mencionan la siembra del cultivo principalmente en regiones tropicales con fines ornamentales, agroforestales y alimenticios para las personas y el ganado.

En particular, sus semillas poseen propiedades oleaginosas permitiendo la extracción de aceite para usos comestibles o industriales. Con un porcentaje en contenido de aceite en sus semillas entre el 30 - 45% (Gómez, et al., 2016), frente al 38 – 44% de colza (Cartea, et al., 2009), 20% de soya (Krimperfort, 2007), 21 – 23% de palma africana (Poku, 2002), 35 – 42% de girasol (Guo, et al., 2017), 25 - 30% de palma de macauba (Ciconini, et al., 2013) y 10 – 30% de oliva (Devarenne, 2006), ha sido estudiado para usarse en productos cosméticos, alimenticios y en la producción de biodiesel por su alto porcentaje en ácidos grasos como el oleico y behénico (González, 2016), (Karthickeyan, 2019), (Rashid, et al., 2008), (Godino, et al., 2013), (Castro, 2013).

Figura 1. Morfología de la *Moringa oleifera*.



Fuente: biotanical-online

Para mayores rendimientos de semilla y aceite de mejor calidad (González, 2018) sugiere la siembra del árbol por esquejes, mientras (Godino, 2016) recomienda densidades entre 300 a 1.200 plantas/ha, recomendándose realizar la cosecha después del primer año de comenzar su plantación, para obtener una producción media de 4.500 kg semilla/ha representados en 1.500 L de aceite.

El aprovechamiento de la moringa a mayor escala no ha sido posible debido a que “los forestales, probablemente la rechazan porque es básicamente un cultivo alimenticio, los agrónomos porque es



un árbol; los fruticultores porque es un vegetal” (National Research Council, 2006), impidiendo investigaciones más detalladas sobre sus características y manejo del cultivo con una finalidad específica.

2. Objetivos

La presente investigación describe la *Moringa oleifera*, y en especial su aceite, como un cultivo prometedor para su implementación y aprovechamiento en Colombia, permitiendo el inicio de la experimentación forestal como especie en programas de revegetación al tiempo que contribuye a la regulación hídrica, control de la erosión, mejora de la estructura, almacenamiento de nutrientes y productividad del suelo (Godino, et al., 2011), y como materia prima para la creación de empresas a través del aprovechamiento de su aceite.

Es así como se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Comparación del aceite de moringa para producción de biodiesel frente a seis especies oleaginosas con reconocimiento e importancia internacional.
- Identificación de zonas potenciales para el establecimiento del cultivo de moringa en Colombia de acuerdo a las características agronómicas y ambientales requeridas por la especie.
- Evaluación de impacto de la planta extractora de aceite de moringa ubicada en el Centro Regional Universitario del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, departamento del Tolima – Colombia.
- Caracterización del aceite de las semillas de moringa e identificación de sus grupos funcionales procedente del CRUDN, departamento del Tolima – Colombia.

3. Revisión bibliográfica

Especie agroforestal multipropósito

Sus hojas poseen un alto contenido de proteína (casi el 30% de su peso), representando una fuente de alimento con alto valor nutritivo llegando a sustituir otros alimentos como el maíz y el arroz; incluso se ha llegado a considerar como una solución para comunidades con vulnerabilidad alimenticia – nutricional (Alfaro, 2008) y como alimento esencial para el forrajeo (Sanchez, et al., 2010). También ayudan a elevar los niveles de biomarcadores, antioxidantes y enzimas de detoxificación (Olson & Fahey, 2011) (Figura 2, Godino, 2016).

Presenta propiedades depurativas para el tratamiento de aguas ya que posee características coagulantes y floculantes y es una especie apta para procesos de reforestación por su rápido crecimiento, (Sandoval, et al., 2013), (Hernández, et al., 2016), (Morales, et al., 2009). No obstante, casos desarrollados en países como Pakistán (Anwar & Rashid, 2007), Nicaragua (Aráuz & Romero,

2009), Ghana (Amaglo; et al, 2007) y Colombia (Castro, 2013), han determinado la fuerte incidencia de las densidades de siembra sobre el crecimiento y rendimiento de sus partes.

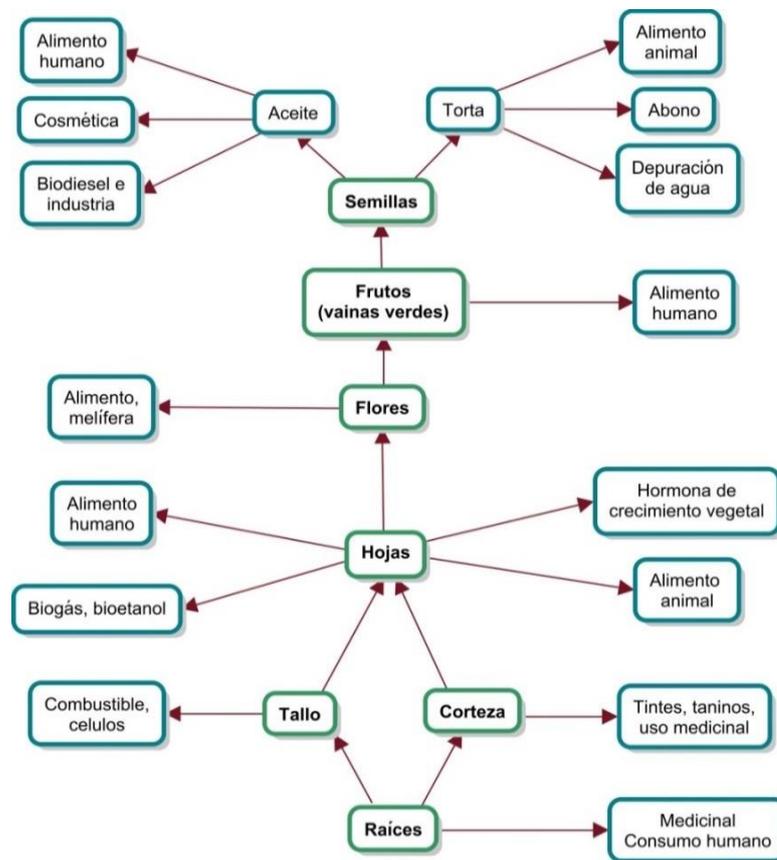


Figura 2. Productos derivados de la *Moringa oleifera*

Fuente: Elaboración propia

La moringa en Colombia y su importancia como cultivo agroforestal

Colombia posee 2.049.067 ha plantadas de cultivos como el café y palma africana; 497.867 ha de tubérculos y plátano; 1.034.065 ha de cereales; 254.925 ha de hortalizas, verduras y legumbres y 450.239 ha de frutales (DANE, 2017). Algunos han dejado de ser competitivos debido a circunstancias como los tratados de libre comercio donde los precios de los productos agrícolas básicos son bajos, dando lugar a acontecimientos como el paro agrario 2013 (Salcedo, et al., 2013). Además, las técnicas de manejo agropecuario no sostenibles en zonas como el Bosque Seco Tropical, considerado uno de los ecosistemas más amenazados, ha generado su degradación y fragmentación debido a la sobreexplotación por la fertilidad de sus suelos (IAVH, 1998).

La moringa ha sido una especie utilizada para ser implementada en sistemas agroforestales que permitan potenciar el desarrollo socioeconómico y ambiental de una zona determinada. En el Centro Universitario Regional del Norte de la Universidad del Tolima, se han desarrollado estudios para conocer la adaptabilidad, técnicas de cultivo y rendimientos de la especie para ser aprovechada; este es el caso de autores como (García & Mora, 2018) y (Godino, et al., 2011).

Planta extractora de aceite de moringa del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN), departamento del Tolima-Colombia.

El CURDN de la Universidad del Tolima en el municipio de Armero Guayabal – Tolima, se encuentra entre los 275 – 250 msnm con un área de 700 hectáreas, humedad relativa promedio anual de 71%, precipitación media anual de 1.738 mm y temperatura promedio anual de 27°C. El 60% de su área corresponde a colinas altas o francos de cordillera, mientras que el 40% son planos o ligeramente ondulados; los suelos presentan un pH ácido en los primeros 10 cm de la superficie, seguido de un pH neutro a básico de baja fertilidad y gran compactación, posee suelos con textura Arcilloso, Franco-Arcilloso, Franco-Arenoso y Limoso (Universidad del Tolima, 2017).

La planta extractora de aceite de moringa instalada en el CURND, pretende ser usada para el cultivo con una extensión de 50 hectáreas. La planta está conformada por doce tipos de maquinaria, de los cuales tres no requieren energía eléctrica para su funcionamiento. Su funcionamiento (Figura 2) inicia en la cinta transportadora donde se deposita las vainas con las semillas para ser trasladados a la descascarilladora quien las separa; las semillas continúan a la criba quien separa la cáscara, alas y el polvo del grano de la semilla para almacenarse en un silo. Posteriormente es enviado al horno por unos instantes, es filtrado y transvasado hasta el depósito para finalmente ser embotellado.

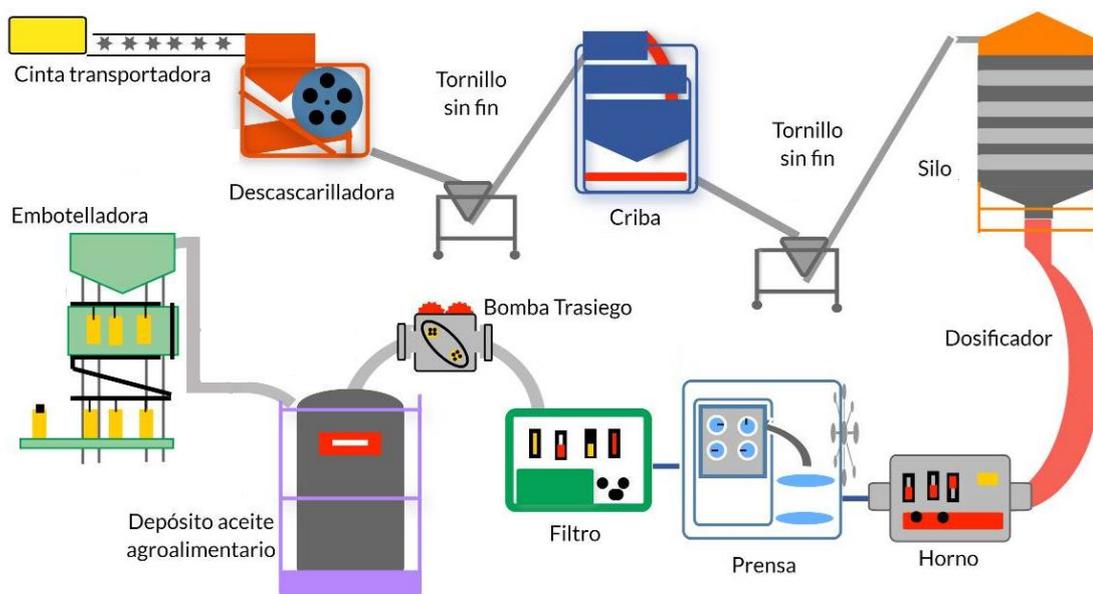


Figura 2. Planta extractora de aceite de moringa en el CURND

Fuente: Elaboración propia

Estudios relacionados con la composición del aceite de moringa y similares

Los metabolitos primarios y secundarios son compuestos químicos sintetizados por los seres vivos. Su diferencia radica en que el primero es esencial para el organismo, como los ácidos grasos, mientras que los secundarios no se encuentran involucrados en los procesos primarios de crecimiento y desarrollo, entre ellos se encuentran los alcaloides, terpenoides, flavonoides, glucosinolatos y taninos los cuales varían dependiendo de la especie (Kroymann, 2011).



El método de espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), consiste en visualizar e identificar compuestos de una muestra a través del espectro obtenido por radiación infrarroja. Al relacionarse con los metabolitos, permite interpretar con más detalle la composición de la muestra reflejada en el espectro resultante. A continuación se describen investigaciones que determinaron los contenidos de metabolitos en el aceite de moringa (Tabla 1), y los que utilizaron el método FTIR para la identificación de los grupos funcionales de aceites vegetales y minerales (Tabla 2).

Metabolitos primarios y secundarios

(Anwar & Rashid, 2007) han determinado la composición de ácidos grasos a través de cromatografía, mientras que (Fernández, et al., 2018) determinaron los polifenoles totales por el método colorimétrico a partir de disoluciones de ácido gálico, y para el contenido de tocoferoles se usó cromatografía líquida. Por su parte, (Ogbunugafo, et al., 2011) determinaron los flavonoides por método colorimétrico por tricloruro de aluminio, y la capacidad antioxidante fue por el método fosfomolibdeno, ensayo basado en la reducción de Mo (VI) a Mo (V) y su formación a pH ácido.

(Ruttarattanamongkol, et al., 2014) identificaron los esteroides con cromatografía de gases-espectrometría de masas donde el β -Sitosterol fue el más predominante en el aceite extraído. (Maldini, et al., 2014), confirman el contenido de glucosinolatos, donde la principal es el 4-(α -L-rhamnopyranosiloxy)benzyl glucosinolato, conocido como glucomoringin. Para su identificación se utilizó el método cromatografía líquida – espectrometría de masas acoplada a espectrómetros de masa en tándem, es decir, se realizó su purificación mediante dos etapas cromatográficas.

Tabla 1. Metabolitos secundarios presentes en el aceite de *Moringa oleifera*

Componentes	Cantidad	Referencia
Ácidos Grasos		
C16:0	6.45 \pm 0.20 %	a
C16:1	0.97 \pm 0.07 %	a
C18:0	5.50 \pm 0.25 %	a
C18:1	73.22 \pm 0.50 %	a
C18:2	1.27 \pm 0.12 %	a
C18:3	0.30 \pm 0.07 %	a
C20:0	4.08 \pm 0.10 %	a
C20:1	1.68 \pm 0.10 %	a
C22:0	6.16 \pm 0.15 %	a
C22:1	No detectado	a
Polifenoles totales	53,4 \pm 2,26 mg ácido gálico/kg	b
Flavonoides totales	18.24 \pm 0.01 mg rutina/g	c
Vitamina E (α -Tocoferol)	274,65 \pm 0,18 mg/kg	b
Capacidad antioxidante	37.94 \pm 0.02 mg ácido ascórbico/g	c



Componentes	Cantidad	Referencia
Esterol (β -Sitosterol)	1613.3 \pm 84.3 mg/kg	d
Glucomoringin	8619.44 \pm 573.20 mg/100 g	e

Fuentes: ^a(Anwar & Rashid, 2007), ^b(Fernández Sobrados, et al., 2018), ^c(Ogbunugafo, et al., 2011), ^d(Ruttarattanamongkol, et al., 2014), ^e(Maldini, et al., 2014).

Grupos funcionales de aceites vegetales y minerales estudiados

(Payal, et al., 2016) realizaron y analizaron los compuestos del aceite de moringa extraídos por un solvente y (Colombini, et al., 2009) por su parte caracterizaron un unguentarium de origen Egipcio, revelando la posible presencia de la moringa debido a que su aceite contiene entre el 8 – 12% de ácidos grasos saturados de cadena larga junto con una alta cantidad de ácido oleico.

(Abbas, et al., 2008) clasificaron aceites de combustible biodegradados por tratamientos quimiométricos. Conocidos como hidrocarburos saturados y aromáticos de aceite mineral, consisten en alcanos ramificados, cicloalcanos, y en alquilo sustituyentes (Li, et al., 2016) que tienden a contaminar los aceites comestibles debido a su uso como sustancias auxiliares para procesamiento, al uso de maquinaria durante la cosecha (sustancia volátil), entre otros (EFSA, 2013). (Mahboubifar, et al., 2017) y (Lu, et al., 2014) evaluaron el efecto en aceites vegetales durante tratamientos de calentamiento, mientras que (Yang & Irudayaraj, 2000) solo realizaron espectrometría.

Tabla 2. Principales bandas de absorción (expresados en cm^{-1}) en el espectro ATR-FTIR del aceite de moringa frente a aceites vegetales y minerales (aceites estándar)

Bandas de absorción		Grupo Funcional	Referencia
Aceite de moringa	Aceites estándar		
721,94	720 - 680	(CH ₂) <i>rocking</i> Aliphatic (CH ₂) _n	a
	724	Fingerprint region C-H	c
	720	str, bend, and rocking vib of aliphatic hydrocarbon	d
	721	–CH ₂ – Balanceo (<i>Rocking</i>)	e
	724	– (CH ₂) _n – –HC=CH –(cis-) <i>Bend (rocking)</i>	f
	1.096,35	1.094	Fingerprint region C-H
1.117,82	1.099	C–O <i>str</i>	d
	1.100	–C–O <i>str</i>	f
	1.114	Fingerprint region C-H	c
	1.114	C–O <i>str</i>	d
	1110	–C–O <i>str</i>	e
	1120	–C–O <i>str</i>	f



Bandas de absorción		Grupo Funcional	Referencia
Aceite de moringa	Aceites estándar		
1.160,51	~1160, ~1075	=C–H in-plane <i>def vib</i> Aromatic = C–H (substituted benzenes)	a
	1164	Fingerprint region C–H	c
	1162	C–O <i>str</i>	d
	1160	–C–O <i>str</i>	e
	1165	–C–O, –CH ₂ – <i>str, bend</i>	f
	1162	Enlace éter	b
1.377,28	1390–1370	C–H <i>def vib sym</i> (C–CH ₃)	a
	1.465 – 1.377	<i>str, bend, and rocking vib</i> of aliphatic hydrocarbon	d
	1375	–C–H (CH ₃) <i>Sym bend</i>	e
	1378	–C–H, –CH ₃ – <i>bend sym</i>	f
1.464,50	1465–1440	C–H <i>def vib asym</i> –CH ₃ (alcane)	a
	1500–1450	Presencia de Benceno C=C	b
	1459	δ(CH ₂), δ(CH ₃) CH ₂ <i>scissoring</i> CH ₃ <i>asym</i>	c
	1.465 – 1.377	<i>str, bend, and rocking vib</i> of aliphatic hydrocarbon	d
	1465	–C–H (CH ₂) <i>bend</i>	e
	1465	–C–H, (CH ₂ , CH ₃) <i>bend scissoring</i>	f
1.743,65	1760–1665	Grupo funcional éster (C=O) <i>str</i>	b
	1743	C=O (éster) Triacigliceroles	d
	1746	–C=O (éster) <i>str</i>	e
	1749	–C=O (éster) <i>str</i>	f
2.852,36	2870–2840	C–H <i>str vib sym</i> –CH ₂ –	a
	3000–2700	<i>sym y asym str</i> C–H del grupo CH ₂	b
	2858	γ (C–H) CH ₂ <i>sym</i>	c
	3.000 – 2.800	<i>str, bend, and rocking vib</i> of aliphatic hydrocarbon	d
	2856	–C–H (CH ₂) <i>Sym str</i>	e
	2856	–C–H (CH ₂) <i>str sym</i>	f
2.921,49	2940–2915	C–H <i>str vib asym</i> –CH ₂ –	a
	3000–2700	<i>sym y asym str</i> C–H del grupo CH ₂	b
	2931	γ (C–H) CH ₃ , CH ₂ <i>asym</i>	c
	3.000 – 2.800	<i>str, bend, and rocking vib</i> of aliphatic hydrocarbon	d
	2924	–C–H (CH ₂) <i>str</i>	e
	2929	–C–H (CH ₂) <i>str asym</i>	f

Fuentes: ^a(Abbas, et al., 2008), ^b(Payal, et al., 2016), ^c(Colombini, et al., 2009), ^d(Mahboubifar, Hemmateenejad, & Yousefinejad, 2017), ^e(Lu, et al., 2014), ^f(Yang & Irudayaraj, 2000)

**str* (stretching), *sym* (symmetric), *asym* (asymmetric), *def* (deformation), *vib* (vibration), *bend* (bending)



4. Materiales y métodos

4.1 Obtención muestra de aceite de moringa

RedMoringa es una red universitaria abierta para el desarrollo integral de la moringa conformado principalmente por la Universidad Politécnica de Madrid y la Universidad del Tolima. Gracias a dicha red, se logró obtener la muestra proveniente del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) a través de un sistema de extracción en frío mediante prensado de la semilla de la *Moringa oleifera*.

4.2 La moringa a nivel mundial como productora de biodiesel

Los aceites vegetales más abundantes en una región se convierten en una fuente de materia prima importante para su aprovechamiento; en Europa por ejemplo, predominan los aceites de colza y girasol, mientras que en países tropicales predomina el de palma y soja (Rashid, et al., 2008). Una medida de sostenibilidad es evitar su utilización en la producción de biocombustibles para prevenir presiones sobre el uso de la tierra, precio y disponibilidad de alimentos, de ahí la importancia del desarrollo de estudios para la producción de biodiesel a partir de aceites menos comunes o no convencionales como el caso del aceite de la *Moringa oleifera* quien ha tomado mayor relevancia en los últimos años (Mofijur, et al., 2014).

Para ofrecer un enfoque global de la especie, se pretende describir el aceite como fuente productora de biodiesel, uno de sus posibles usos, para identificar su posición como especie oleaginosa comparándola con las especies mencionadas anteriormente a partir de revisión de literatura.

Otras especies a considerar

Colombia es el cuarto productor mundial de aceite de palma y el primero de América, siendo el segundo cultivo permanente con mayor extensión en área sembrada después del café (Fedepalma, 2018). Su aceite al provenir del fruto y no de la semilla como las demás especies a evaluar, se consideró incluir otra especie de palma para obtener una mejor relación en cuanto a sus propiedades. La palma de macaúba, quien se extiende desde México hasta Argentina, con excepción de Ecuador, es la segunda palma dedicada a la producción de aceite (Hernández, 2016).

En Colombia el cultivo de macaúba no ha sido desarrollado fuertemente como en Brasil (Colombo, et al., 2017), sin embargo diversos autores comparan su aceite con el de palma por sus propiedades agronómicas y variedad de subproductos (Ramírez et al., 2018), (Hernández, 2016), (CIRAD, et al., 2008), (Fernández, et al., 2018), (Barbosa, et al., 2018). Por otra parte, la moringa es altamente comparada con el aceite de oliva por su similitud en porcentaje de aceite y contenido de ácidos grasos (Godino, et al, 2013), por lo que igualmente fue incluido en dicha comparación.

4.3 Zonificación de áreas con potencial de producción de *Moringa oleifera* en Colombia

A través del sistema de información geográfica QGIS versión 3.4.7, con sistema de referencia proyectada 3116 - MAGNA SIRGAS/Colombia Bogotá Zone, se realizó la zonificación de áreas



potenciales para la producción de moringa en Colombia de acuerdo con la temperatura, altitud, precipitación y coberturas óptimas para su establecimiento. Para esto se tuvo en cuenta bases de datos del Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC).

Se utilizó la capa “Precipitación total anual. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) 2012”, del tema “Cambio Climático”; en él se seleccionó entre los 0 – 2.000 mm. La capa “Temperatura media anual y pisos térmicos” fue descargada, del tema “Cambio Climático”, realizada igualmente por el IDEAM; se seleccionó el piso térmico cálido y templado, los cuales incluyen temperaturas entre los 18°C a mayores de 24 °C, y entre los 0 – 2.000 msnm.

Además se tuvo en cuenta los drenajes dobles y el “Mapa de ecosistemas” del IDEAM para identificar las coberturas que permitan el establecimiento de la especie en Colombia. Se seleccionaron las siguientes subcategorías: arroz, bosque de galería y ripario, bosque fragmentado con pastos y cultivos, bosque fragmentado con vegetación secundaria, café, cultivos permanentes, cultivos transitorios, mosaico de cultivos, mosaico de cultivos y pastos, pastos, plantación forestal y vegetación secundaria.

Por otra parte se realizó la exclusión de centros poblados y de los Parques Nacionales Naturales a través de la capa “Parques Nacionales Naturales”, del tema “Biodiversidad” y subtema “Sistema Nacional de Áreas Protegidas”, realizado por el Sistema de Parques Nacionales Naturales.

4.4 Análisis de ciclo de vida (LCA – ACV) de la planta extractora de aceite

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo. Su importancia radica en la obtención de diversas categorías de impacto que permite tener una visión global sobre el proceso/producto a evaluar, a diferencia de la de huella de carbono o hídrica quienes consideran una única categoría.

En el análisis se tienen en cuenta las etapas de extracción y procesado de las materias primas, producción, transporte, distribución, uso, reutilización, mantenimiento, reciclado y disposición final, las cuales se conocen como inputs y outputs. Existen diversos software para el desarrollo del ACV con diversos y amplios contenidos de bases de datos o inventarios cuantitativos incluidos en su procesamiento sobre inputs y outputs, que permiten ser aplicados en proyectos similares partiendo de estudios realizados anteriormente; SimaPro es uno de ellos.

SimaPro es una herramienta de ACV que siguiendo las recomendaciones de la serie ISO 14040, permite el modelamiento y análisis de cualquier proceso/producto. Para el presente estudio se seleccionó dicho software debido a su reconocimiento a nivel mundial, a su inventario incluido y por su capacidad de trabajar con mayor detalle en los procesos.

Objetivo, alcance y unidad funcional.

El objetivo fue evaluar los impactos ambientales de la obtención de aceite de moringa a través de su planta extractora de aceite, ubicada en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) Armero Guayabal – Departamento del Tolima (Colombia). En dicho proceso, se estima la obtención de 60000

Litros de aceite a partir de 50 hectáreas de cultivo. La evaluación no tuvo en cuenta los procesos relacionados con el valor económico, la instalación del cultivo, otros productos diferentes a la obtención de aceite, y distribución y comercialización del producto final debido a que el estudio se enfocó solo a la producción de aceite a partir de la planta extractora (unidad funcional).

Límite del sistema

El límite del sistema del ACV, representado en la Figura 3 por la línea discontinua roja, es “Gate to gate” o “puerta a puerta”, enfocándose en un proceso específico de la producción total. La planta durante su funcionamiento, genera residuos o elementos innecesarios para la producción específica de aceite. Para el presente estudio no se tuvo en cuenta dichos subproductos, obtenidos de la descascarilladora (aproximadamente 117 toneladas de vainas), la separación de la cáscara, las alas y el polvo del grano de la semilla por la criba (aproximadamente 20 toneladas), y la torta obtenida por la prensa (aproximadamente 140 toneladas), debido a que los tres se traducen como otros sistemas para la producción de abono y pellets, los cuales no son el objetivo de este ACV.

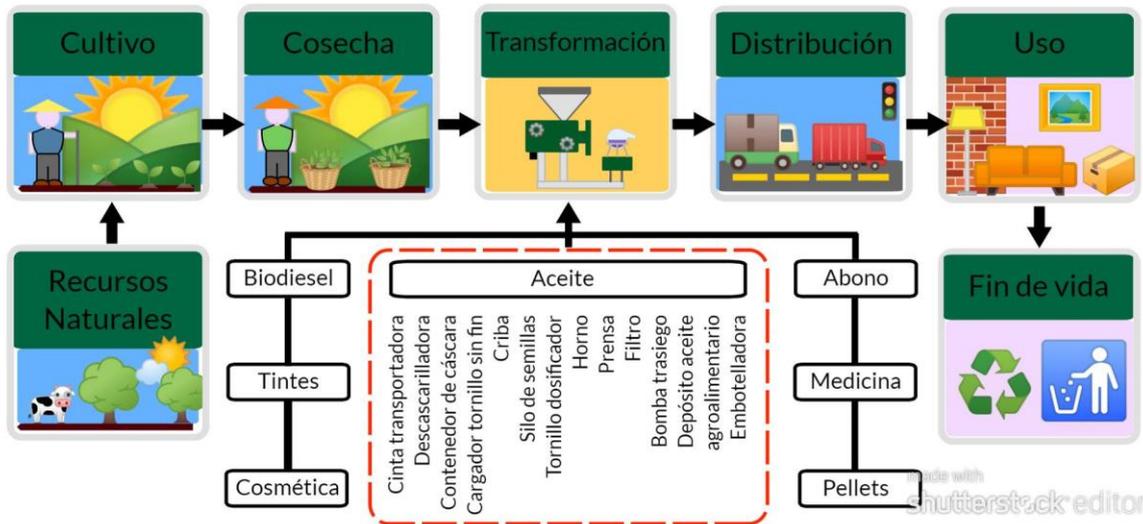


Figura 3. Límite del sistema de la unidad funcional bajo estudio

Fuente: Elaboración propia

Asignaciones

La mayoría de la maquinaria no se encontraba dentro del inventario SimaPro; por lo tanto, se realizó la asignación de las entradas y salidas a través de la creación de nuevos parámetros con datos sobre la energía, capacidad y distribución horaria requerida para el funcionamiento de cada uno utilizado durante el proceso. Aquellos equipos que no dependen de la electricidad fueron incluidos señalando el material del que están fabricados. Los datos de funcionamiento se encontraban determinados por investigaciones realizadas en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN).

Se asumió las características físicas de las vainas y semillas para realizar el cálculo de las toneladas totales de materia prima entrante y las toneladas de residuos generados en el proceso. Se evaluó el



tiempo de cosecha que debe realizarse principalmente en los meses de marzo y abril, considerando solo los días y horas laborales en Colombia del año 2019. Una vez añadido el proceso de producción de aceite, se prosiguió a ser determinada como producto final en el software

4.5 Metodología ATR – FTIR aplicada al aceite de moringa

La espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR) es una técnica utilizada para la identificación de los grupos funcionales de materias orgánicas e inorgánicas en forma sólida y líquida. Para el presente estudio, se realizó el análisis del aceite en estado líquido utilizando el espectrómetro FTIR Nicolet iS50 ATR, es decir en modo reflectancia total atenuada, con resolución $0,482\text{ cm}^{-1}$ en el intervalo espectral de $400 - 4000\text{ cm}^{-1}$ (IR infrarrojo medio) y con 64 número de escáneres para obtener el resultado en formato de absorbancia.

El software OMNIC Spectra genera los datos espectrales más no los grupos funcionales de las muestras, por lo tanto, se utilizó datos disponibles en la literatura que tuvieran determinados los rangos de absorción de espectroscopia infrarroja (Tabla 2) para compararlos con los del espectro de la moringa y así identificar sus grupos funcionales. Además, se tuvo en cuenta la composición de metabolitos primarios y secundarios (Tabla 1) del aceite de moringa, registrado igualmente en la literatura. Se realizó la comparación de grupos funcionales con aceites de Portugal y España.

5. Resultados y Discusión

5.1 Aceite de moringa frente a otras especies oleaginosas para la producción de biodiesel

Los aceites seleccionados fueron comparados con el aceite de moringa a partir del porcentaje en contenido de aceite, cantidad de semillas o frutos producidos por hectárea y potencial de producción de biodiesel expresados en litros por hectárea (Figura 4).

En primer lugar se observa el alto contenido de aceite que posee la moringa junto con la colza y girasol quienes oscilan entre el 40%, sin embargo las cantidades pueden variar dependiendo del método de extracción e incluso la zona geográfica hasta en un 19% para la moringa (Payal, et al., 2016), (Gómez, et al., 2016), (Tabio, et al., 2017).

La soya por su parte tiene el menor porcentaje de aceite en sus semillas y aunque por hectárea obtiene tantas semillas como la colza (e incluso mayor que el girasol), su potencial como fuente productora de biodiesel no es lo suficientemente significativa comparado con las demás. Además, el área requerida para la producción de 1 Mt de aceite por hectárea es de 1,4, mientras que para el girasol se requiere 0,7 (Bajaj, 1996).

En este orden de ideas, el cultivo de girasol aunque tampoco lo consideramos como un cultivo ideal, debido a que su obtención de aceite para biodiesel también es bajo, cabe señalar que su extracción es más aprovechable con respecto a la producción media de semillas por hectárea, ya que las especies con excepción de la palma africana, del 100% de sus semillas, por lo general se obtiene menos del 50% representados en litros.

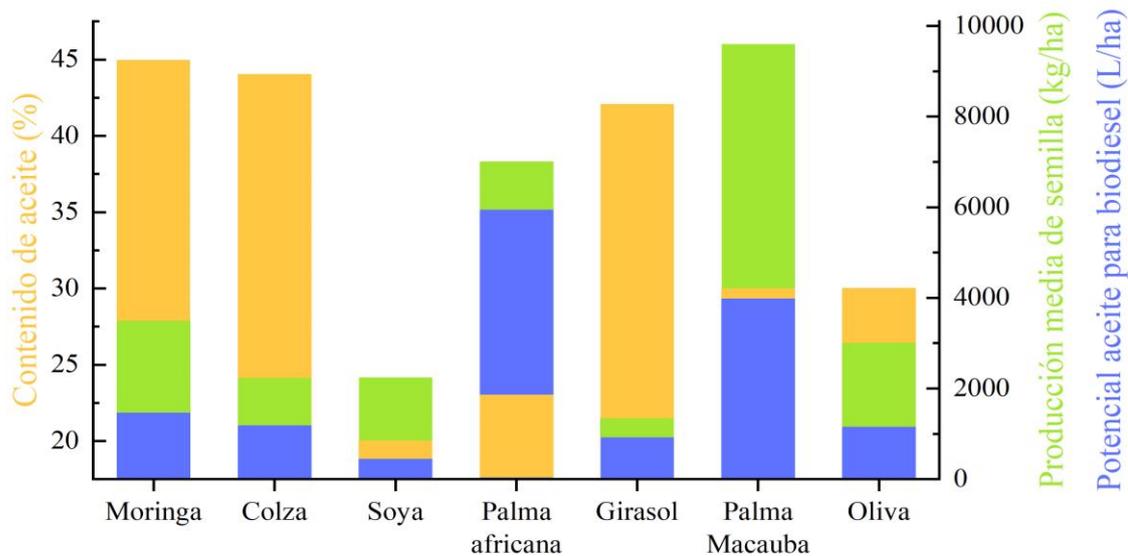


Figura 4. Características productivas de siete especies oleaginosas y su potencial para la obtención de biodiesel.

Fuentes: (Capareda, 2014); (Godino, 2016); (Gómez, et al., 2016); (Cartea, et al., 2009); (Krimperfort, 2007); (Poku, 2002); (Guo, Ge & Na Jom, 2017); (Ciconini, et al., 2013); (Devarenne, 2006); (Tickell, 2000); (Hernández, 2016); (Asociación Española de Municipios del Olivo, 2012).

**Los datos proporcionados son una aproximación a la realidad. Las densidades de siembra, condiciones ambientales, tipo de producción, e incluso la toma de datos indican en las cantidades.*

La palma africana y palma de macaúba poseen un potencial de producción elevado para biodiesel, representando más del doble de la moringa quien ocupa el tercer lugar con un potencial de producción de 1.440 Litros de biodiesel/ha (Godino, 2016). Sin embargo, en el caso particular de Colombia y las plantaciones de palma africana, algunos autores la consideran como un problema socio-ambiental (Arboleda, 2008), (García, 2014), (Asociación Campesina de Cacaoteros de Buenos Aires, 2009), debido a que se ha convertido en un cultivo perteneciente a la agroindustria y no a sistemas agroforestales.

Aunque la macaúba ocupa el segundo lugar en cuanto al potencial de biodiesel y el primero en producción de frutos, sus requerimientos para la obtención de 1 Mt de aceite por hectárea es similar a la africana, 0,1 y 0,14 respectivamente (Bajaj, 1996). Además, es de resaltar que ambas especies tienden a ser atractivas para ser sembradas por sus altos rendimientos por área cultivada, y bajos requerimientos de manejo y mantenimiento comparados con otros cultivos aceiteros (Bajaj, 1996).

No obstante, en términos de germinación y producción de plantas es más fácil en la moringa que en la macaúba debido a que su producción tiende a decrecer cada tres años (CIRAD, et al., 2008), mientras que la moringa aumenta anualmente hasta estabilizarse en el cuarto, manteniéndose constante durante 15 a 20 años (Godino, 2016). Igualmente se encuentra en tercer lugar frente al rendimiento de semilla por hectárea con 3500, 500 más que el oliva siendo un cultivo competitivo no solo por rendimientos, sino también por las propiedades químicas; la moringa suele ser comparada con el aceite de oliva principalmente por su similar contenido en ácido oleico (Gómez, et al., 2016).



5.2 Potencial de producción de la *Moringa oleifera* en Colombia

La Figura 5 presenta una serie de mapas con la zonificación de áreas potenciales para la producción de *Moringa oleifera* en Colombia de acuerdo a las condiciones agronómicas requeridas por la especie y a las áreas con vocación del suelo para el establecimiento del cultivo; dichas condiciones fueron seleccionadas a través de información geográfica suministrada por el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC).

Las características hidrológicas, geomorfológicas y climatológicas del país permiten la predominancia de temperaturas cálidas en la mayor parte del territorio colombiano al igual que cuerpos de agua extensos, favoreciendo la presencia de diferentes ecosistemas acuáticos y terrestres. Si bien la moringa podría extenderse en todo el país si se llegase a considerar solo las temperaturas, aspectos como la pluviosidad y zonas altitudinales limitan su área principalmente en las regiones del Caribe y Andina de Colombia como zonas con características adecuadas para plantaciones agroforestales de moringa, similar a lo identificado por (Castro, 2013).

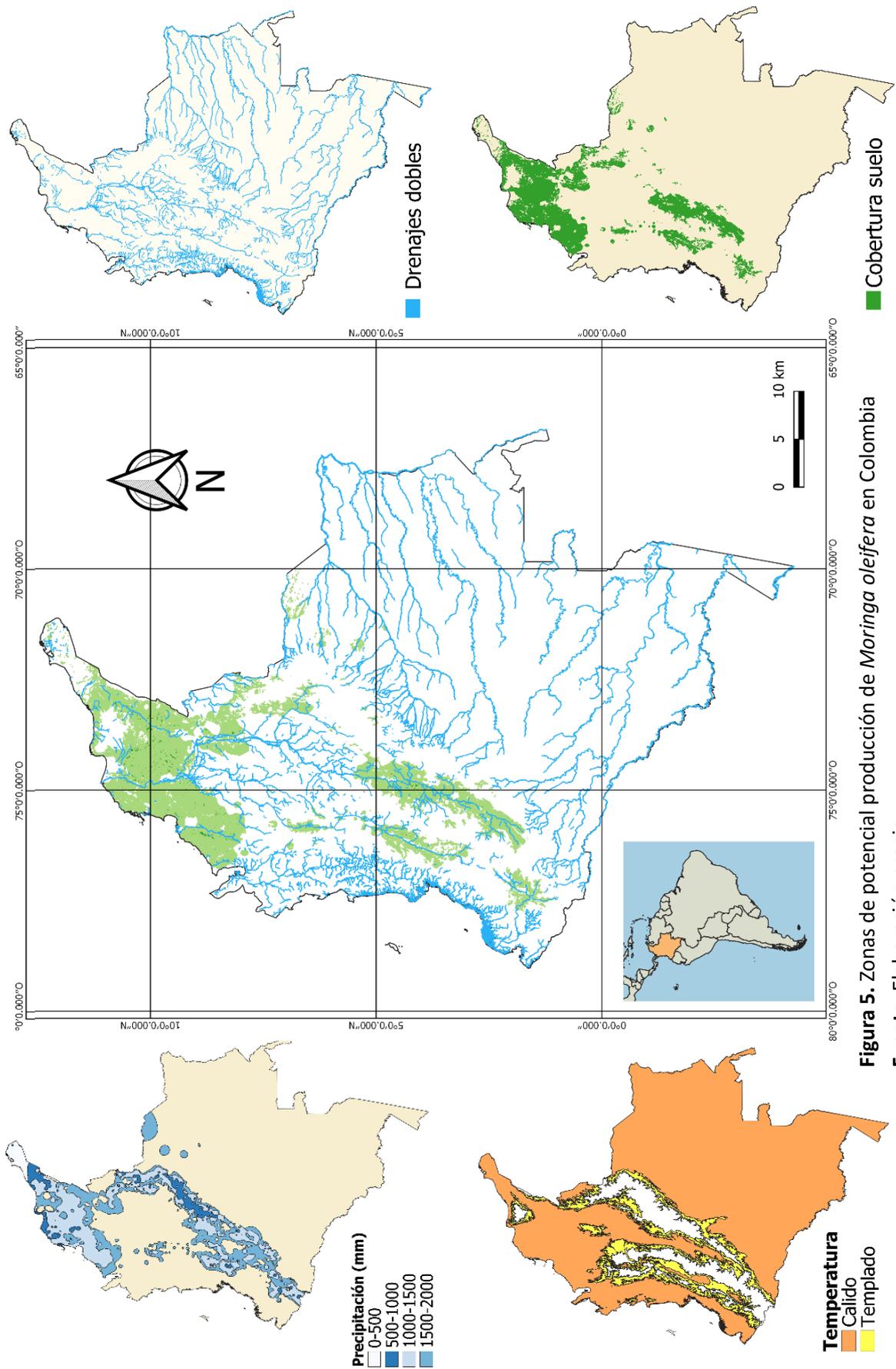
Además de considerar las condiciones ambientales, se tuvo en cuenta su correlación con coberturas del suelo o actividades que permitieran la integración o sustitución de cultivos y la mejora de áreas naturales debido a los servicios ecosistémicos que ofrece el árbol, obteniendo una delimitación más detallada y específica del área potencial. En total se identificó un área de 85.102,23 km², aproximadamente un 8% del territorio colombiano.

Coberturas por departamentos

A continuación se realizará un análisis más detallado frente a las coberturas para identificar los departamentos que poseen mayor área y las zonas o actividades que podrían ser intervenidas para su establecimiento. Se dividió el país en tres zonas (norte, central y sur) para una mejor visualización.

La zona norte conformada por la Guajira, Atlántico, Magdalena, Cesar, Sucre, Bolívar, Córdoba, Norte de Santander, San Andrés y Providencia (Figura 6) presenta mayor extensión con potencial para la moringa, donde predominan los pastos, vegetación secundaria, mosaico de cultivos y pastos, bosque fragmentado con pastos y cultivos, y bosque de galería y ripario, demostrando extensiones considerables de sistemas agropecuarios. En este caso, la moringa como especie agroforestal podría ser un complemento dentro de estos sistemas como cerca viva o barrera natural, como insumo adicional económico si se llegase a aprovechar sus partes como las hojas para el forraje, y como medio para el aporte de servicios como la sombra y nutrientes al suelo (Godino, et al., 2011).

Además, por el rápido crecimiento que posee, su uso en vegetación secundaria y bosques fragmentados con pastos y cultivos, representa una oportunidad de realizar procesos de reforestación y creación de corredores biológicos para mantener la biodiversidad y unir relictos de bosque reducidos por las actividades humanas. Por otra parte, su establecimiento en bosques de galería y ripario permitiría la regulación hídrica debido a sus propiedades depurativas (Sandoval, et al., 2013), (Hernández, et al., 2016), (Morales, et al., 2009).



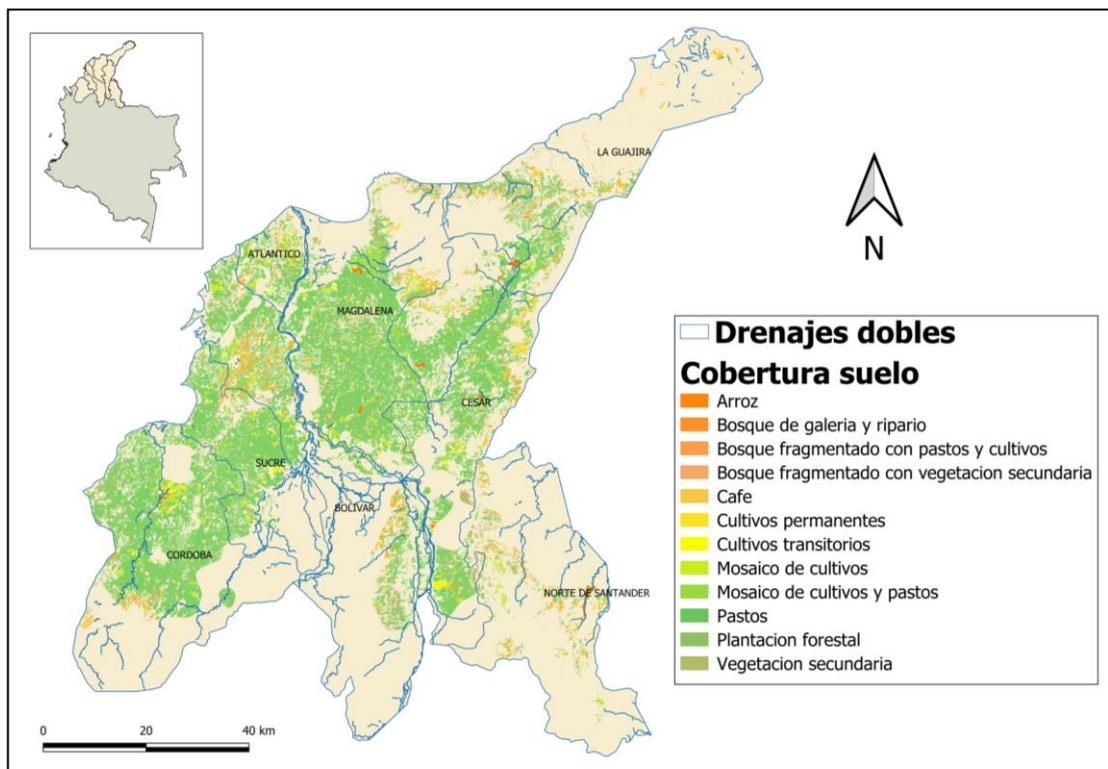


Figura 6. Zonas de potencial producción de *Moringa oleifera* en la zona norte de Colombia de acuerdo a las condiciones ambientales, coberturas del suelo y actividades agropecuarias óptimas para su establecimiento.

Fuente: Elaboración propia

La zona central conformada por los departamentos de Antioquia, Chocó, Caldas, Risaralda, Quindío, Valle del Cauca, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima, Arauca, Casanare, Meta y Vichada (Figura 7), es la segunda con mayor extensión para el establecimiento del cultivo de moringa. En él se encuentran pastos, mosaico de cultivos y pastos, vegetación secundaria, arroz y café.

A diferencia de la zona norte, algunos de los cultivos más representativos de esta zona del país son el arroz donde sus suelos tienden a variar entre arenosos y arcillosos, ideales también para la moringa (Velázquez, et al., 2016). La sustitución de un cultivo agrícola como el arroz por una especie como la moringa podría examinarse, considerando los sucesos ocurridos a nivel nacional como el paro agrario del 2013 y el arrocero del 2017 (Salcedo, et al., 2013), esta podría ser una alternativa para mejorar la economía y minimizar los impactos ambientales generados por la actividad.

De los departamentos con potencial para su implementación en Colombia se encuentra el Tolima, identificado con poseer características ambientales aptas para la plantación del árbol, y de donde el aceite de moringa utilizado para el presente estudio fue extraído; sin embargo, es importante señalar que las áreas presentadas en las figuras no implican un éxito de productividad del 100%. Un ejemplo es la identificada por (García & Mora, 2018), quienes desarrollaron la investigación “Manejo y desempeño de *Moringa oleifera* (Lam) en la etapa de vivero y trasplante”, concluyendo que a pesar de la resistencia del árbol, el establecimiento en campo no mostró los resultados que se esperaban

debido a la baja supervivencia, lento crecimiento y raíces afectadas por Hardpain, posiblemente, por condiciones geológicas y meteorológicas que pudieron incidir en los resultados.

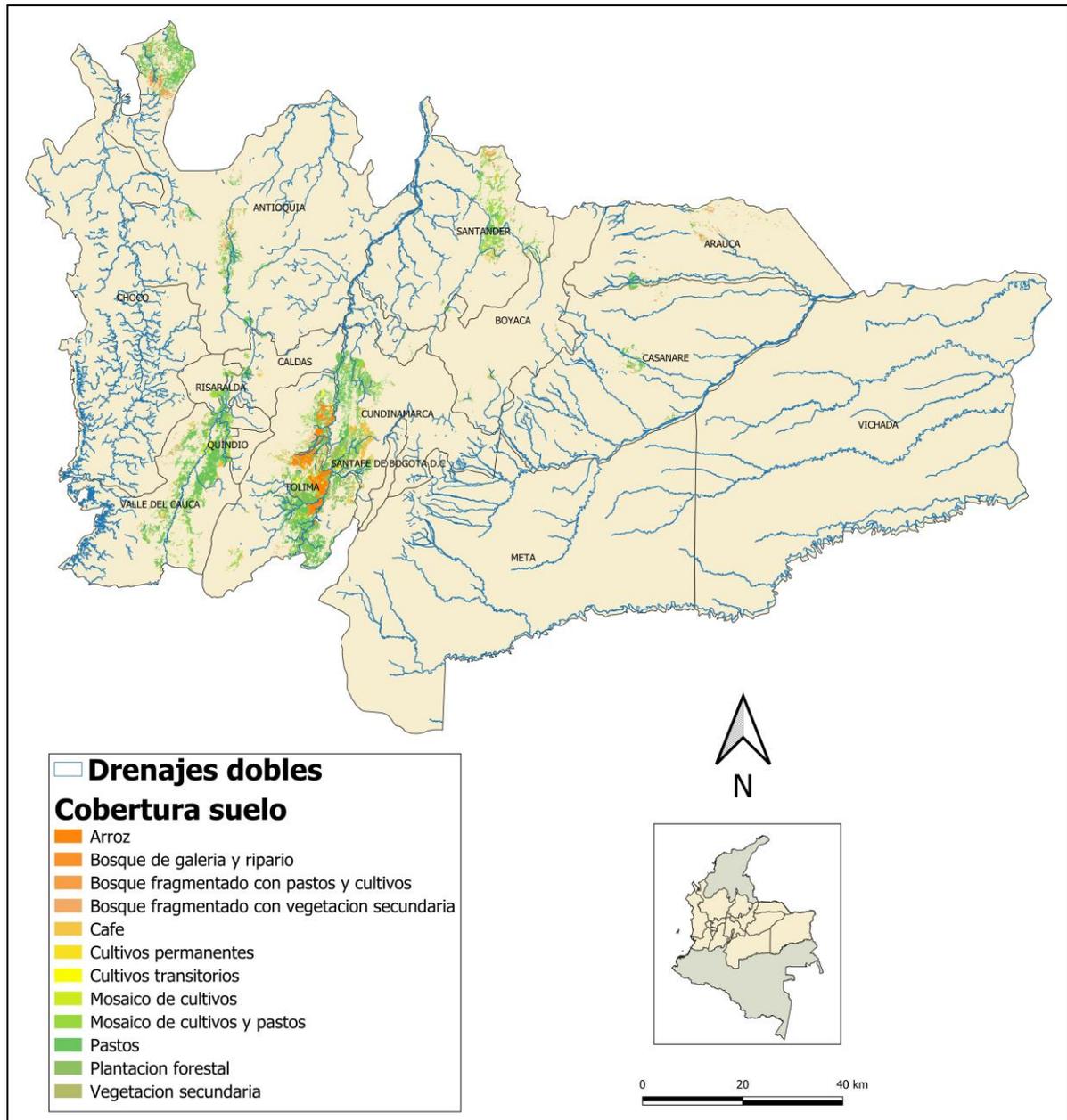


Figura 7. Zonas de potencial producción de *Moringa oleifera* en la zona central de Colombia de acuerdo a las condiciones ambientales, coberturas del suelo y actividades agropecuarias óptimas para su establecimiento.

Fuente: Elaboración propia

Finalmente en la zona sur, conformada por los departamentos del Cauca, Nariño, Huila, Putumayo, Caquetá, Guaviare, Guainía, Vaupés y Amazonas (Figura 8), predominan los pastos, café, mosaico de cultivos y pastos, vegetación secundaria y arroz. Las condiciones ambientales y las áreas protegidas presentes en el sur de Colombia, limitan aún más el área para el establecimiento de la moringa. El departamento del Huila es quien presenta mayor potencial de establecimiento del árbol y es

conocido como uno de los más cafeteros del país. En este caso, en cultivos como el café, se consideraría más provechoso usar la moringa en sistemas agroforestales que permitan proteger el cultivo, mejorar la calidad del suelo y aportar más productos a la producción, que realizar sustituciones como el arroz.

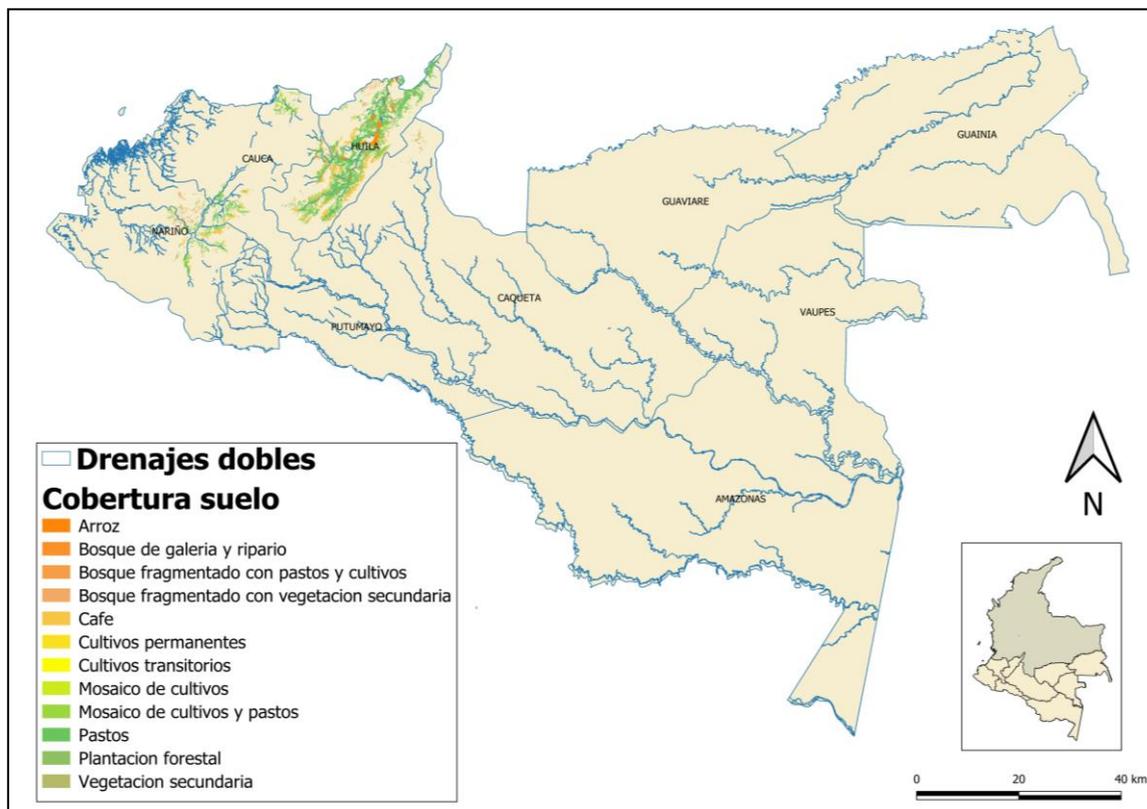


Figura 8. Zonas de potencial producción de *Moringa oleifera* en la zona sur de Colombia de acuerdo a las condiciones ambientales, coberturas del suelo y actividades agropecuarias óptimas para su establecimiento.

Fuente: Elaboración propia

Las coberturas menos frecuentes en las tres zonas fueron el bosque fragmentado con vegetación secundaria, cultivos permanentes, cultivos transitorios, mosaico de cultivos y plantación forestal. En el primer caso se consideran zonas en proceso de restauración activa o pasiva que pueden ser reforzadas con especies forestales como la moringa, además las plantaciones forestales permiten indagar sobre las condiciones y manejo del árbol desde diferentes ecosistemas (Godino, et al., 2011).

Si bien la moringa posee requerimientos hídricos donde las zonas con precipitaciones menores a los 300 mm, el riego es obligatorio para la obtención de semillas, hojas y vainas, entre los 800 y 1.500 mm no es necesario realizar riego, y para más de 1.500 mm, no es apto para la producción de semillas, y para las hojas y vainas no se realiza riego (Godino, 2016), sistemas por goteo es una alternativa que mantiene su crecimiento y productividad. Cultivos transitorios o permanentes como el arroz y el algodón podrían ser reemplazados por el árbol en cuestión realizando las adecuaciones necesarias para su establecimiento como el mencionado anteriormente, evitando las inundaciones y aprovechando la estructura del suelo igualmente apta para la moringa.

5.3 Análisis de ciclo de vida (LCA – ACV) de la planta extractora de aceite de moringa ubicada en el CURDN

En el municipio de Armero Guayabal del departamento del Tolima – Colombia, se encuentra instalada la planta extractora de aceite de moringa del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima (Figura 9), del cual se obtuvo la muestra de aceite utilizada en el presente estudio.

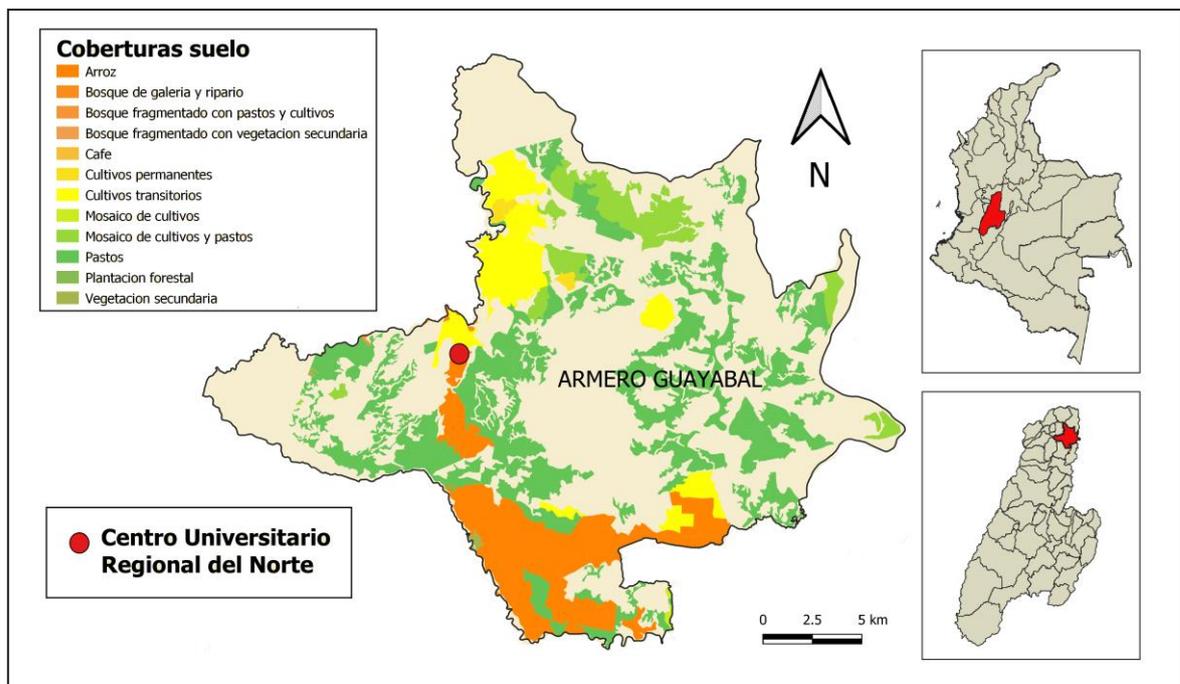


Figura 9. Ubicación geoespacial del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima en el municipio de Armero Guayabal, Departamento del Tolima – Colombia

Fuente: Elaboración propia

El presente inciso tenía el objetivo de evaluar la planta extractora de aceite a través del ACV para identificar los impactos ambientales originados por el proceso de extracción de aceite de moringa en un cultivo de 50 hectáreas utilizando el software SimaPro; sin embargo al asignar la maquinaria, que en su mayoría no se encontraba dentro del inventario de SimaPro, y al hacer el balance energético de la producción del aceite, los cálculos preliminares salieron negativos por falta de medios y tiempo. De esta forma, para poder determinar los insumos, residuos y el poder calorífico emitido por la planta, se opta por seguir el trabajo a futuro haciendo el ACV del cultivo de la moringa.

5.4 Análisis de espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR) aplicada en el aceite de moringa

Composición y grupos funcionales del aceite de moringa extraído del CURN

La muestra de aceite obtenida del Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) ubicado en el departamento del Tolima – Colombia, fue extraída en frío mediante prensado de la semilla de

Moringa oleifera. El aceite se analizó a través del método FTIR, obteniendo como resultado un espectro con los patrones del aceite (Figura 10). La identificación de su estructura se realiza por medio de las bandas de absorción, expresados en cm^{-1} , más representativos generados por la técnica, donde cada uno se encuentra dentro de una zona o grupo funcional específico.

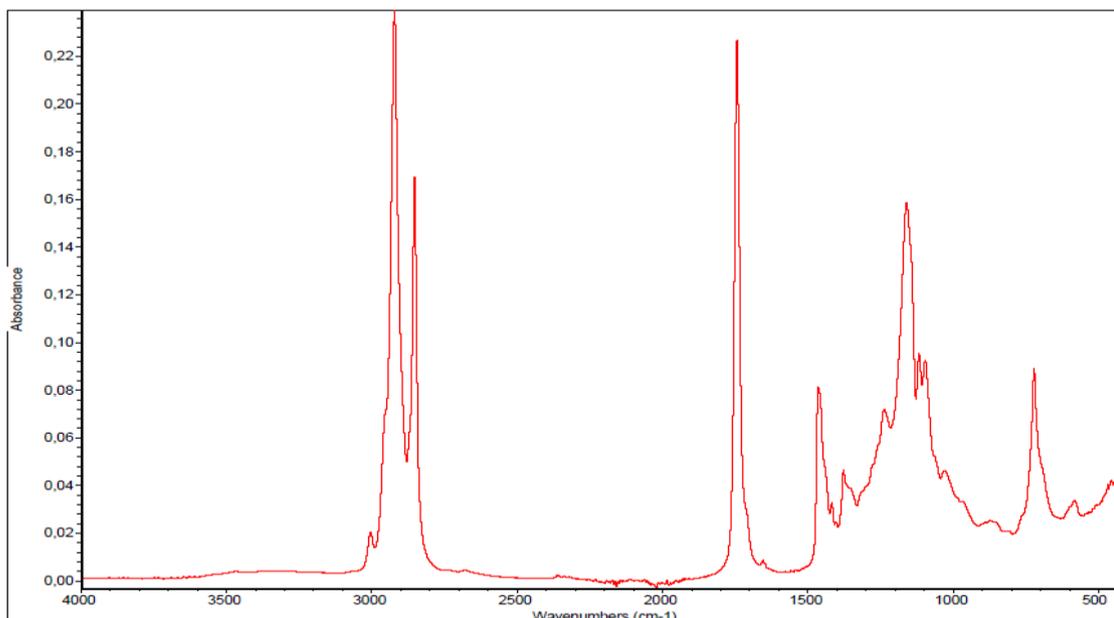


Figura 10. Espectro infrarrojo del aceite de la *Moringa oleifera*

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con los autores mencionados en la Tabla 1 y 2, en la Tabla 3 se resume los grupos funcionales designados al aceite de moringa a partir de la información suministrada anteriormente. Las bandas de absorción obtenidos por el análisis FTIR en el aceite, predominan en las zonas comprendidas entre las bandas $600 - 1400 \text{ cm}^{-1}$, conocida como Fingerprint region (C-C; C-O; C-N), entre $1600 - 1800 \text{ cm}^{-1}$ con predominancia de C=C; C=O y C=N, y entre $2700 \text{ a } 3500 \text{ cm}^{-1}$ con enlaces C-H, O-H y N-H.

Tabla 3. Bandas de absorción y grupos funcionales del aceite de moringa en el espectro ATR-FTIR

Banda de absorción cm^{-1}	Grupo Funcional	Intensidad
721,94	CH_2 rocking	w
1.096,35	C – O str	w
1.117,82	C – O str	w
1.160,51	C – O (éter) str	m
1.377,28	C-H (CH_3) sym bending	vw
1.464,50	C-H (CH_2) bending	w



Banda de absorción cm^{-1}	Grupo Funcional	Intensidad
1.743,65	C=O (éster) <i>str</i>	s
2.852,36	C – H (CH_2) <i>sym str</i>	m
2.921,49	C – H (CH_2) <i>asym str</i>	vs

Fuente: Elaboración propia

**str* (stretching), *sym* (symmetric), *asym* (asymmetric), *vs* (very strong), *s* (strong), *m* (medium), *w* (weak), *vw* (very weak)

A partir de los grupos funcionales y la composición del aceite de moringa, se interpreta el espectro infrarrojo de la siguiente manera:

1. No hay presencia de agua en el espectro debido a que suelen ubicarse entre las bandas 3700 – 3100 (O-H stretching vibration) y en 1640 cm^{-1} (O-H stretching vibration) (Yang & Irudayaraj, 2000).
2. La ausencia del grupo carbonilo entre las regiones 1665 – 1572 cm^{-1} (C=C str vib) indican que no se presenta envejecimiento del aceite (Colombini, et al., 2009).
3. Gracias al estudio de (Abbas, et al., 2008) se pueden diferenciar aceites vegetales de los aceites minerales, permitiendo incluso identificar la existencia de algún tipo de contaminación por la asignación en las bandas 2942 y 2863 (C–H stretching vibration asymmetric – symmetric), 1450 (C–H deformation vibration asymmetric), 1606 y 1051 (C=C stretching vibration), 1033 (S=O stretching vibration), 879 y 809 (Aromatic =C–H, deformation vibration) cm^{-1} . Dichas bandas no se presentan en el aceite de moringa, con excepción de 1377 (C–H deformation vibration symmetric) cm^{-1} .
4. Las bandas entre los 4000 – 3100 (O-H stretching), 1650 – 1550 (C=C- (cis-) stretching), 1050 (C-O bands) - 800 (C-H bands) y 690 (Aromatic= C-H deformation vibration) cm^{-1} , correspondientes a la presencia de cadenas, grados, o formas de insaturación de los grupos acilo asignados a hidroperóxidos, ácidos u otros productos de oxidación (Mahboubifar, et al., 2017), (Lu, et al., 2014) no son representativas en la moringa debido al bajo contenido de ácidos grasos poliinsaturados y el alto nivel de ácido oleico (Colombini, et al., 2009) (Payal, et al., 2016).

La presencia débil de la banda en 3010 (=C-H (cis-) stretching) cm^{-1} en el FTIR moringa, reafirma que no existe peroxidación lipídica (Lu, et al., 2014), por lo que no hay presencia de sulfóxidos, grupo carbonilo, alcoholes, fenoles o derivados de ácidos debido a la oxidación del aceite (Abbas, et al., 2008), (Payal, et al., 2016).

5. En la literatura publicada no se encuentran registros puntuales sobre los rangos del número de ondas en que se encuentran algunos metabolitos secundarios. No obstante, autores como (Colombini, et al., 2009) mencionan la posibilidad de distinguir algunos terpenos en las bandas 2931 (CH_3 , CH_2 asymmetric – symmetric) 1709 (C=O acid), 1248, 1114, 1011 y 984 (C-O bands),

838–826, 655, y 581 cm^{-1} (C-H bands), las cuales se registran cercanas a las bandas de los triacilglicérols.

6. La región comprendida entre los 2800 – 3000 (Methylene C-H asymmetric – symmetric stretching), 1743 (éster C=O stretching), 1465 (methylene C-H bending), 1375 (methyl C-H symmetric bending), 1240, 1160, 1120 y 1110 (éster C-O stretching) y 720 (C-H rocking) cm^{-1} corresponden a los triacilglicérols, componentes principales de los aceites derivado de glicerol y tres cadenas de ácidos grasos, y por tanto, dominantes en ese espectro (Payal, et al., 2016), (Mahboubifar, et al., 2017), (Lu, et al., 2014).
7. De las bandas mencionadas anteriormente, 2800 – 3000, 1743, 1160, y 722 concuerdan con la estructura de un triacilglicérol que tiene ácidos grasos insaturados en su estructura (Gómez, et al., 2011).

Comparación del FTIR aceite de moringa con otros aceites vegetales

De igual forma, se realizó el análisis FTIR del aceite de oliva extra virgen proveniente de España y aceites de macauba de Portugal, con el fin de ser comparados con el espectro obtenido en el FTIR del aceite de moringa extraído de Colombia. Debido a que los triacilglicérols son los componentes más importantes de los aceites vegetales, los espectros tienen grandes similitudes en los grupos funcionales (Figura 11 A – B), (Tabla 4).

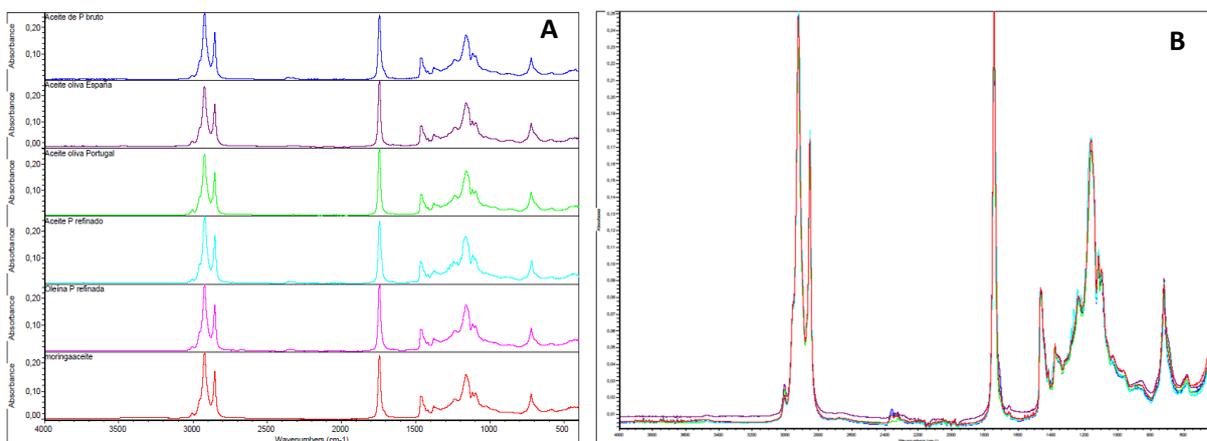


Figura 11. Espectro infrarrojo individual (A) del aceite de moringa (*espectro rojo*) proveniente de Colombia, aceite de oliva proveniente de España (*espectro morado*) y aceite de oliva (*espectro verde*), refinado (*espectro turquesa*), oleina refinada (*espectro violeta*) y aceite bruto (*espectro azul*) proveniente de Portugal. Espectro infrarrojo global (B).

Fuente: Elaboración propia

Quiénes muestran mayores diferencias son los aceites refinado de Portugal (*espectro turquesa*) y el aceite de oliva de España (*espectro morado*). En el primer caso, es el único que presenta más bandas de absorción en la región *Fingerprint*, específicamente entre las bandas 1200 – 1350 cm^{-1} , mientras que en el otro espectro su diferencia radica en presentar mayor intensidad en algunas bandas a comparación de los demás aceites evaluados; entre ellos es la presencia de agua en su composición debido a la presencia marcada en las bandas 3700 – 3100 (O-H stretching vibration) y en 1640 cm^{-1}



(O-H stretching vibration) (Yang & Irudayaraj, 2000); por otra parte es quien muestra tener mayor envejecimiento por la presencia de bandas $1665 - 1572 \text{ cm}^{-1}$ (C=C str vib) (Colombini, et al., 2009).

Los aceites evaluados muestran contenidos de ácido oleico altos y baja cantidad en aceites saturados debido a las bandas $3010 - 3000 \text{ cm}^{-1}$ (=C-H (cis-) stretching) y $1120 - 1095 \text{ cm}^{-1}$ de la región Fingerprint. Aquellos que presentan un alto contenido de ácido linoléico (ácido graso poliinsaturado) presentan mayor frecuencia en la primera banda que aquellos con grupos del ácido oleico (Jaswir, et al., 2003). El aceite de oliva España posee mayor intensidad, seguido del oliva Portugal, moringa Colombia y los demás aceites de Portugal.

El otro rango del espectro mencionado, en todos los casos muestra dos bandas (~ 1095 y $\sim 1115 \text{ cm}^{-1}$) que indican la proporción de grupos saturados y oleicos, siendo sus alturas inversamente relacionadas (Jaswir, et al., 2003). Dichas concentraciones son aproximadamente iguales en los aceites de oliva España y Portugal, y moringa; mientras que los demás aceites presentan mayores diferencias en estas bandas indicando mayor contenido de saturados.

Tabla 4. Principales bandas de absorción en el espectro ATR-FTIR de aceite de moringa, aceite de oliva, aceite refinado, oleína refinada y aceite bruto provenientes obtenidos de Colombia, España y Portugal (todos los número de onda están expresados en cm^{-1})

COLOMBIA	ESPAÑA	PORTUGAL			
Aceite de moringa	Aceite de oliva	Aceite de oliva	Aceite refinado	Oleína refinada	Aceite bruto
721,94	722	722,04	718,17	721,69	721,51
1096,35	1095,77	1096	1096	1096	1096
1117,82	1118,05	1117,83	1114,97	1116,38	1116
1160,51	1159,82	1159,74	1161,28	1159,99	1159,99
1377,28	1377,28	1377,31	1377,47	1377,29	1377,29
1464,5	1463,99	1464,03	1466,05	1464,62	1464,77
1743,65	1743,68	1743,65	1743,04	1743,43	1743,55
2852,36	2852,66	2852,64	2851,3	2852,43	2852,34
2921,49	2921,85	2921,82	2919,94	2921,55	2921,42

Fuente: Elaboración propia

6. Conclusiones

La finalidad de esta investigación no consiste en dirigir al lector para elegir una única especie; por el contrario, se pretende realizar comparaciones señalando pros y contras de los cultivos, en especial el de moringa. Ningún sistema es 100% rentable y efectivo, ya que las condiciones ambientales, sociales y económicas influyen en la productividad y capacidad del cultivo en un área determinada.

La moringa como especie productora de biodiesel se identificó como competitiva frente a otras especies con reconocimiento e importancia internacional, demostrando que sus rendimientos son similares principalmente al de oliva, seguido de la colza, girasol y la palma de macaúba al estar todas



dentro de porcentajes en contenido de aceite por encima del 30% y con aprovechamiento de sus semillas del 35% o más para producción de aceite.

Debido a las problemáticas ambientales y sociales presentes en Colombia por cultivos como el de palma y arroz, se propone la moringa como especie forestal para sustituir o complementar estos cultivos, ya que por su versatilidad y bajos requerimientos de manejo y mantenimiento, sería una opción ideal para su establecimiento. Esta oportunidad se refleja en 85.102,23 km², aproximadamente un 8% del territorio colombiano, principalmente en los departamentos de Córdoba, Sucre, Atlántico, Magdalena, Bolívar, Cesar, Tolima, Cundinamarca, Valle del Cauca y Huila.

La mayor parte de la delimitación de áreas potenciales para la moringa, de acuerdo a las condiciones ambientales, coberturas del suelo y actividades agropecuarias, se encuentra bajo coberturas de pasto y mosaico de cultivos y pastos, por lo que el desarrollo del árbol en sistemas agroforestales se consideraría como una estrategia de implementación debido a los servicios ecosistémicos que el árbol ofrece, incluyendo el mantenimiento de la biodiversidad, regulación hídrica, mejora de la calidad del suelo, desarrollo de la experimentación forestal y como especie beneficiosa para el sector agrícola y ganadero. Además la variedad de productos que pueden ser obtenidos, con un mínimo de desperdicio, crea mayores oportunidades para su aprovechamiento y por consiguiente, una posible mejora de la economía local por su germinación y producción constante a partir del cuarto año.

En el municipio de Armero Guayabal, departamento del Tolima – Colombia, se han implementado investigaciones y empresas enfocadas en la producción de moringa; específicamente en el centro universitario de la Universidad del Tolima, se ha puesto en marcha la extracción del aceite por prensado de sus semillas. Bajo el método FTIR se identificó que el aceite proveniente de dicho lugar es de calidad para su consumo por su alta cantidad en ácido oleico, bajos niveles de poliinsaturados y por sus contenidos en metabolitos primarios y secundarios antioxidantes. Además la moringa presentó características de ser un aceite sin rasgos de envejecimiento, presencia de contaminantes como aceites minerales y peroxidación lipídica de acuerdo a las bandas de absorción.

7. Recomendaciones

Durante el desarrollo de la investigación se identificaron aspectos que por límites en cuanto a tiempo y recursos no se estudiaron a profundidad. A continuación se mencionan algunas recomendaciones para futuras líneas de investigación con el objetivo de poner en marcha de este cultivo.

Estudios de impacto económico, social y ambiental

Para empezar, es importante desarrollar estudios costo-beneficio de la moringa como cultivo agroforestal en sistemas agropecuarios para identificar la rentabilidad de su establecimiento; además, las necesidades poblacionales y requerimientos ambientales se deben tener en cuenta como complemento de esta evaluación. Por esta razón se recomienda el uso de metodologías y técnicas de evaluación de impacto, donde desde una visión de desarrollo sostenible, estimen cualitativa y cuantitativamente las adecuaciones, mejoras, limitaciones y oportunidades del cultivo. Entre ellos se encuentra el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), una herramienta de gestión



medioambiental, donde por tiempo y recursos limitados no se logró desarrollar en el presente documento, pero se recomienda su desarrollo en el cultivo para obtener diversas categorías de impacto desde el establecimiento hasta su uso.

Enriquecimiento de las zonas potenciales para el establecimiento del cultivo en Colombia

Es importante realizar un estudio más detallado frente a los departamentos o municipios donde se pretende instalar el cultivo de moringa a partir de información más actualizada y verificada de las características de las zonas; entre ellos se encuentran cuerpos de agua, poblaciones asentadas, cambios de uso de la tierra, actividades o proyectos en desarrollo o próximos a ser desarrollados ajenos a la agricultura y ganadería, áreas de interés cultural, entre otros.

Experimentación forestal y creación de empresas

La moringa es una especie versátil que predomina en zonas tropicales, sin embargo, condiciones como componentes del suelo, disponibilidad de agua, altitud y latitud han incidido en su rendimiento y propagación en diferentes partes del mundo, por lo que posterior a su aprovechamiento se espera el desarrollo de experimentos forestales que permita conocer el comportamiento de la especie en determinadas zonas. Además, los estudios de calidad de la especie permiten ampliar el conocimiento frente a las propiedades de las diferentes partes de la planta que son base para la creación de empresas destinadas a cualquier sector.

Agradecimientos

Esta investigación fue desarrollada gracias al apoyo brindado por profesionales de España y Colombia a través de su asesoramiento técnico y acompañamiento continuo. Se agradece igualmente a la Universidad de Valladolid – España y a la Universidad del Tolima – Colombia, por los soportes técnicos y académicos brindados.

Referencias

- Abbas, O.; Rebufa, C.; Dupuy, N.; Permanyer, A.; Kister, J. (2008). Assessing petroleum oils biodegradation by chemometric analysis of spectroscopic data. *Talanta*, 75(4), pp. 857-871
- Asociación española de municipios del olivo (AEMO). (2012). Aproximación a los costes del cultivo del olivo. Cuaderno de conclusiones del seminario AEMO – Córdoba
- Alfaro, Norma C. (2008). Rendimiento y uso potencial de Paraíso Blanco, *Moringa oleifera* Lam, en la producción de alimentos de alto valor nutritivo para su utilización en comunidades de alta vulnerabilidad alimenticia-nutricional de Guatemala. Informe final, proyecto FODECYT, 26, 2006.
- Amaglo, N. K.; Timpo, G. M.; Ellis, W. O.; Bennett, R. N. (2007). Effect of spacing and harvest frequency on the growth and leaf yield of Moringa (*Moringa oleifera* Lam), a leafy vegetable crop. *Ghana Journal of Horticulture*, 6 pp. 33-40



- Anwar, Farooq; Rashid, Umer. (2007). Physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan. *Pak. J. Bot.*, 39(5), 1443-1453
- Aráuz C., David; Romero P., Zoila J. (2009). Efecto de diferentes densidades de siembra y niveles de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de *Moringa oleifera*, Managua, Nicaragua. *Universidad Nacional Agraria - Nicaragua*.
- Arboleda M., Nixon. (2008). La palma africana en el pacífico colombiano: su ilegalidad, consecuencias y violación de derechos territoriales. *Revista Luna Azul*, 25 pp. 113-126.
- Asociación Campesina de Cacaoteros de Buenos Aires (ASOCAB). (2009). Impactos ambientales de la expansión de Palma Aceitera en el Magdalena Medio, hablan los pobladores. Estudio de Caso Las Pavas, Municipio El Peñón, Departamento de Bolívar, Colombia
- Bajaj, Y. P. S. (Ed.). (1996). Trees IV. Biotechnology in Agriculture and Forestry.
- Barbosa E., A.; Fernández C., Ignacio A.; Corrêa G., Adriana; Martín G., Jesús; Leonardo Duarte-Pimentel, José A. Saraiva-Grossi, Luis M. Navas-Gracia & Pablo Martín-Ramos. (2018). Simulation of macauba palm cultivation: an energy-balance and greenhouse gas emissions analysis, *Carbon Management*, 9:3, 243-254
- Botanical-online (2019). *Moringa* planta (*Moringa oleifera* Lam). <https://www.botanical-online.com/moringa.htm>
- Castro, A. (2013). El árbol *Moringa* (*Moringa oleifera* Lam.): Una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicos y ambientales de Colombia. *Universidad Militar Nueva Granada - Colombia*
- Capareda, S. (2014). Introduction to Biomass Energy Conversions. Boca Raton: CRC Press
- Cartea, Aumaría E.; Vilar, Marta; Francisco, Marta; De Haro, Antonio. (2009). Calidad del aceite de las brásicas cultivadas en Galicia. *Horticultura internacional*
- Ciconini, Gabrielly; Favaro, S.P.; Roscoe, R.; Miranda, C.H.B.; Tapeti, C.F.; Miyahira, M.A.M.; Bearari, L.; Galvani, F.; Borsato, A.V.; Colnago, L.A.; Naka, M.H. (2013). Biometry and oil contents of *Acrocomia aculeata* fruits from the Cerrados and Pantanal biomes in Mato Grosso do Sul, Brazil. *Industrial Crops and Products*, 45, 208-21
- Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD); Centro Franco-Brasileiro de Documentação Técnica e Científica (Cendotec); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); Innov-energie; Serviço Florestal Brasileiro (SFB); Universidade Federal do Pará (UFPA). (2008). Guía técnica para el uso energético de los aceites vegetales. CDU (2.ed.) 662.756.3
- Colombini, M.P.; Giachi, G.; Iozzo, M.; Ribechini, E. (2009). An Etruscan ointment from Chiusi (Tuscany, Italy): its chemical characterization. *Journal of Archaeological Science*, 36(7), pp. 1488-1495
- Colombo, Carlos A.; Chorfi B., Luiz H.; Díaz, Brenda G.; Ferrari, Roseli A. (2017). Macauba: a promising tropical palm for the production of vegetable oil. *OCL* 25 (1) D108



- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2017). Encuesta Nacional Agropecuario (ENA) 2017. Boletín Técnico.
- Devarenne, Alexandra. (2006). Newsletter of olive oil production and evaluation. *University of California Cooperative Extension. First Press* 2(1)
- European Food Safety Authority (EFSA) (2013) Scientific opinion on mineral oil hydrocarbons in food. EFSA J 10(6) 2704, 1–185.
- Falasca, Silvia; Bernabé, María A. (2008). Potenciales usos y delimitación del área de cultivo de *Moringa oleifera* en Argentina. *Revista virtual REDESMA*
- Fedepalma. (2018). El pamicultor, Edición Febrero 2018, No. 552
- Fernández C., Ignacio A.; Barbosa E., Anderson; Corrêa G., Adriana; Martín G., Jesús; Navas G., Luis M.; Martín R., Pablo. (2018). Life cycle analysis of macauba palm cultivation: A promising crop for biofuel production. *Industrial Crops and Products*. 125. pp 556-566
- Fernández S., Jhoel; Pascual C., Gloria; Silva J., Marcial I.; Salvá R., Bettit; Guevara P., Américo; Encina Z., Christian. (2018). Efecto del tratamiento enzimático de la semilla de moringa (*Moringa oleifera*) sobre las características físico-químicas del aceite obtenido por extracción con prensa expeller. *Scientia Agropecuaria*, 9(3), 371 – 380
- García, Indira I.; Mora D., Jairo. (2018). Árboles y arbustos para silvopasturas. Uso calidad y alometría. Capítulo 4 Manejo y desempeño de *Moringa oleifera* (Lam) en la etapa de vivero y trasplante. *Universidad del Tolima – Colombia*, pp. 86 – 102
- García R., P. (2014). Tierra, palma africana y conflicto armado en el Bajo Atrato chochoano, Colombia. Una lectura desde el cambio en los órdenes de extracción. *Estudios Socio-Jurídicos*, 16(1), pp. 209-244
- Godino, Miguel. (2016). La moringa (*Moringa oleifera*) en la península Ibérica. *Jornada Técnica Agroalimentaria*.
- Godino, M.; Arias, C., & Izquierdo, M. (2013). Interés forestal de la *Moringa oleifera* y posibles zonas de implantación en España. *6 Congreso Forestal Español*.
- Godino, Miguel; Vargas, Rafael; Velásquez, Julián. (2011). La *Moringa oleifera* en la producción silvoagropecuaria. Conferencias Magistrales Internacionales. *Agroforestería Neotropical*, 1, 54-55
- Godino, M., Villegas, S., Izquierdo, M., Velasquez, J., & Vargas, R. (2013). Evaluación del uso energético de la *Moringa oleifera*. *6 Congreso Empresarial Español*.
- Gómez M., Diana; Pita B., Vicente; Zumalacárregui de Cárdenas, Beatriz. (2016). Caracterización de aceites de las semillas de *Moringa oleifera* a partir de la extracción por diferentes métodos. *Revista Colombiana Biotecnología*, 18(2), 106-111
- Gomez, Neffer A.; Abonia, Rodrigo; Cadavid, Hector; Vargas, Ines H. (2011). Chemical and spectroscopic characterization of a vegetable oil used as dielectric coolant in distribution transformers. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 22(12), 2292-2303



- González M., Francisco J. (2018). Un estudio transversal de *Moringa oleifera* Lam. (Moringaceae). *Revista Dominguezia*, 34(1), 5-25
- Guo, Shuangshuang; Ge, Yan; Na J., Kriskamol. (2017). A review of phytochemistry, metabolite changes, and medicinal uses of the common sunflower seed and sprouts (*Helianthus annuus* L.). *Chemistry Central journal*, 11(1), 95
- Hernández B., Santiago; Niguelie C., Zairie; Gómez L., Marisol; González M., Clara. (2016). Eficacia de la semilla de *Moringa oleifera* en el aclaramiento del agua. *Revista Universidad y Ciencia*, 9(14)
- Hernández Z., Alejandro F. (2016). La palma corajo, un recurso natural para la producción sostenible de aceite. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 13-33
- Instituto Alexander Von Humboldt (IAVH). (1998). El Bosque seco Tropical (Bs-T) en Colombia. Programa de Inventario de la Biodiversidad Grupo de Exploraciones y Monitoreo Ambiental GEMA
- Jaswir, I.; Mirghani, M. E. S.; Hassan, T. H.; Said, M. Z. M. (2003). Determination of Lard in Mixture of Body Fats of Mutton and Cow by Fourier Transform Infrared Spectroscopy. *Journal of Oleo Science*, 52(12), 633–638
- Karthickeyan, V. (2019). Effect of cetane enhancer on *Moringa oleifera* biodiesel in a thermal coated direct injection diesel engine. *Fuel*, 235, 538-550
- Kroymann, Juergen. (2001). Natural diversity and adaptation in plan secondary metabolism. *Current Opinion in Plan Biology*, 14(3), 246 - 251
- Krimperfort, Lucas. (2007). La soja, biología y agronomía. *La salud y la soja*, Cap. 2 pp. 17-30
- Li, Bingning; Wu, Yan W.; Liu, Lingling; Ouyang, Jie; Ren, Jiajia; Wang, Yu; Wang, Xinxin. (2016). Determination of Mineral Oil-Saturated Hydrocarbons (MOSH) in Vegetable Oils by Large Scale Off-Line SPE Combined with GC-FID. *Journal of the American Oil Chemists' Society*. 94, 1-9
- Lu, Yuzhen; Du, Changwen; Shao, Yanqiu; Zhou, Jianmin. (2014). Characterization of rapeseed oil using FTIR-ATR spectroscopy. *Journal of Food Science and Engineering*
- Mahboubifar, M.; Hemmateenejad, B.; Yousefinejad, S. (2017). Classification of Edible Oils Based on ATR-FTIR Spectral Information During a Long Heating Treatment. *Journal of AOAC International*, 100(2), 351–358
- Maldini, M.; Maksoud, S. A.; Natella, F.; Montoro, P.; Petretto, G. L.; Foddai, M.; Pintore, G. (2014). *Moringa oleifera*: study of phenolics and glucosinolates by mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*, 49(9), 900–910
- Morales A., F.; Méndez N., R.; Tamayo D., M. (2009). Tratamiento de aguas residuales de rastro mediante semillas de *Moringa oleifera* Lam como coagulante. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(3), 523-529
- Mofijur, M; Masjuki, H.H.; Kalam, M.A.; Atabani, A.E.M; Rizwanul Fattah, I.M.; Mobarak, H.M. (2014). Comparative evaluation of performance and emission characteristics of *Moringa oleifera* and Palm oil based biodiesel in a diesel engine. *Industrial Crops and Products*, 53 pp. 78-84



- Natural Research Council. (2006). Lost crops of Africa. *The National Academies Press*. Volume II: vegetables pp. 259
- Ogbunugafo, H. A., Eneh, F. U., Ozumba, A. N., Igwo-Ezikip, M. N., Okpuzor, J., Igwilo, I. O., Onyekwelu, O. A. (2011). Physico-chemical and Antioxidant Properties of Moringa oleifera Seed Oil. *Pakistan Journal of Nutrition*, 10(5), 409-414
- Olson, Mark E.; Fahey, Jed W. (2011). Moringa oleifera: un árbol multiusos para las zonas tropicales secas. *Revista mexicana de biodiversidad*, 82(4), 1071-1082
- Payal R., Bhutada; Ananda J. Jadhav; Dipak V., Pinjari; Parag R., Nemade; Ratnesh D., Jain. (2016). Solvent assisted extraction of oil from Moringa oleifera Lam. Sedes. *Industrial Crops and Products*, 82 pp.74-80
- Poku, Kwasi. (2002). Small-Scale Palm Oil Processing in Africa. Boletín de Servicios Agrícolas de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). 148
- Rashid, Umer; Anwar, Farooq; Moser, Bryan R.; Knothe, Gerhard. (2008). Moringa oleifera oil: A possible source of biodiesel. *Bioresource Technology*, 99(17), 8175-8179
- Ramírez, Jose E. (2017). Moringa oleífera (Lam.) en condiciones de bosque seco tropical: una revisión. *Agroforestería Neotropical*, 1(7)
- Ramirez N., M.; Jiménez F., J.; Bernal S., J.; Osorio D., M. (2018). Caracterización del aceite extraído del kernel del fruto de la palma de cumare (*Astrocaryum chambira* Barret). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 71(1), 8415-8422
- Ruttarattamongkol, K.; Siebenhandl E., S.; Schreiner, M.; Petrasch, A. M. (2014). Pilot-scale supercritical carbon dioxide extraction, physico-chemical properties and profile characterization of Moringa oleifera seed oil in comparison with conventional extraction methods. *Industrial Crops and Products*, 58, pp. 68–77
- Salcedo, L.; Pinzón, R.; Duarte, C. (2013). El paro nacional agrario: un análisis de los actores agrarios y los procesos organizativos del campesinado colombiano. Área de Investigación Aplicada, *Universidad Javeriana de Cali - Colombia*.
- Sanchez M., Dalia I.; Núñez G., Jose A., Reyes M., Cuauhtémoc; Ramirez W., Benjamin; Lopez C., Jaime. (2010). Nutritional quality of edible parts of Moringa oleifera. *Food Anal. Methods*, 3, 175-180
- Sandoval A., M.; Laines C., J. (2013). Moringa oleifera una alternativa para sustituir coagulantes metálicos en el tratamiento de aguas superficiales. *Ingeniería*, 17 (2), 93-101
- Tabio G., Danger; Díaz D., Yosvany; Rondón M., Maylin; Fernández S., Elina; Piloto R., Ramón. (2017). Extracción de aceites de origen vegetal
- Tickell, Joshua. (2000). From the Fryer to the Fuel Tank: The Complete Guide to Using Vegetable Oil as an Alternative Fuel. 3rd Edition. Tickell Energy Consulting, Tallahassee, FL. pp.162



Universidad del Tolima. (2017). Centro Universitario Regional del Norte (CURDN). Facultad de Ingeniería Forestal. <http://www.ut.edu.co/>

Velázquez Z., M.; Peón E., I. E.; Zepeda B., R.; Jiménez A., M. A. (2016). Moringa (*Moringa oleifera* Lam.): potential uses in agriculture, industry and medicine. *Revista Chapingo Serie Horticultura* , 22(2), 95-116

Yang, Hong; Irudayaraj, Joseph. (2000). Characterization of semisolid fats and edible oils by Fourier transform infrared photoacoustic spectroscopy. *JAOCs, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77, 291-295