

# Yields and chemical composition of biomass, seed and oil of ecotypes of *Moringa oleifera* Lamarck introduced in Sinaloa, Mexico

## Rendimientos y composición química de biomasa, semilla y aceite de ecotipos de *Moringa oleifera* Lamarck introducidos en Sinaloa, México

Pérez-Ángel, Raymundo<sup>1</sup>; Pérez-Tamayo, Nancy M.<sup>2</sup>; Castro-Martínez, Claudia<sup>3</sup>; Contreras-Andrade, Ignacio<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Sinaloa. Programa Regional de Posgrado en Biotecnología/Facultad de Ciencias Químico Biológicas. <sup>2</sup>Extractos Herbolarios Sinaloenses, S. C. de R. L. de C. V. <sup>3</sup>Instituto Politécnico Nacional. Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional. Unidad Sinaloa.

\*Autor para correspondencia: ica@uas.edu.mx

### ABSTRACT

**Objectives:** To select, among the ecotypes of *Moringa oleifera* introduced to Sinaloa, the most suitable for biomass, seed and oil production, and chemically characterize them.

**Design/methodology/approach:** An orchard was established with 48 trees of 6 ecotypes of *M. oleifera* distributed randomly. At 16 months of age, the agronomic yields of stems, leaves, and seeds, the proximal composition of each fraction, the lignocellulosic profile of stems and the fatty acid content of the seed oil were determined.

**Results:** Significant differences were found between ecotypes for all parameters, highlighting "Sinaloa" who produced the highest amount of seed, and "Mojolo" the highest yields of stems and leaves. The proximal analysis showed the highest lipid content in seed (48.2%) and oleic acid in the oil of the "Elota" ecotype. The profile of the lignocellulose components of stems indicated that "Sonora", "Elota" and "Sinaloa" have the highest proportion of holocellulose. "Sinaloa" obtained the highest yields per hectare of seed and oil, while, from the leaf, the "Mojolo" ecotype achieved the highest productivity per hectare of proteins, lipids, and carbohydrates.

**Limitations /implications:** This study is only comparative and includes 16 months in non-intensive cultivation.

**Findings/conclusions:** "Mojolo" ecotype was the best for biomass production, and "Sinaloa" for seed and oil. The "Elota" ecotype presented the highest percentages of oil in the seed. Cross-experimentation between them is suggested to look for genetic improvements.

**Key words:** *Moringa oleifera*, varieties, agronomic yields, chemical composition, fatty acids.

### RESUMEN

**Objetivos:** Seleccionar entre ecotipos de *Moringa oleifera* introducidos al estado de Sinaloa, a los más aptos para la producción de biomasa, semilla y aceite, y caracterizarlos químicamente.

**Diseño/metodología/aproximación:** Se estableció un huerto con 48 árboles de 6 ecotipos de *M. oleifera* distribuidos al azar. A los 16 meses de edad se determinaron los rendimientos agronómicos de tallos, hojas y semillas, la composición proximal de cada fracción, el perfil lignocelulósico de tallos y el contenido de ácidos grasos del aceite de la semilla.

**Agroproductividad:** Vol. 13, Núm. 7, julio. 2020. pp: 21-28.

**Recibido:** enero, 2020. **Aceptado:** junio, 2020.

**Resultados:** Se observaron diferencias significativas entre ecotipos para todos los parámetros, encontrándose que "Sinaloa" produjo la mayor cantidad de semilla y "Mojolo" los mayores rendimientos de tallos y hojas. El análisis proximal mostró la mayor concentración de lípidos en semilla (48.2%) y de ácido oleico en el aceite del ecotipo "Elota". El perfil de los componentes de la lignocelulosa de tallos indicó que "Sonora", "Elota" y "Sinaloa" tienen la mayor proporción de holocelulosa. "Sinaloa" obtuvo los más altos rendimientos por hectárea de semilla y aceite, mientras que, de la hoja, el ecotipo "Mojolo" logró la más alta productividad por hectárea de proteínas, lípidos y carbohidratos.

**Limitaciones/implicaciones:** Este estudio sólo es comparativo y comprende 16 meses en cultivo no intensivo.

**Hallazgos/conclusiones:** El ecotipo "Mojolo" fue el mejor para la producción de biomasa y "Sinaloa" para semilla y aceite. El ecotipo "Elota" presentó los mayores porcentajes de aceite en la semilla. Se sugiere la experimentación con cruces entre ellos para buscar mejoras genéticas.

**Palabras clave:** *Moringa oleifera*, variedades, rendimientos agronómicos, composición química, ácidos grasos.

## INTRODUCCIÓN

*Moringa oleifera* es un árbol originario del sur del Himalaya que se encuentra actualmente distribuido en la mayoría de los países tropicales y subtropicales del mundo, siendo la especie más ampliamente cultivada de la familia Moringaceae. Es una planta que durante siglos ha sido aprovechada por sus usos alimenticios y medicinales, especialmente en la India, Pakistán, Filipinas y algunos países de África. Tiene la ventaja de crecer aceleradamente produciendo altos rendimientos de biomasa, tolera factores de estrés como la sequía, altas temperaturas, suelos pobres y salobres (Nouman *et al.*, 2012). Durante siglos el aceite de moringa o "Ben" fue utilizado como combustible y lubricante, hasta que fue prácticamente olvidado a raíz del uso generalizado de los combustibles fósiles. En las últimas décadas, debido al creciente interés en los bioenergéticos, se han intensificado los estudios sobre el cultivo de plantas pro-

ductoras de aceite para su transformación en biodiesel y la conversión de residuos lignocelulósicos de cultivos agrícolas y forestales en bioetanol, mediante el proceso conocido como de "segunda generación" (Chen, 2014).

El aceite de la semilla de moringa por sus características se considera una alternativa viable para la producción de biodiesel (Azad *et al.*, 2015). La productividad de semilla de *M. oleifera* es muy variable, dependiendo de las condiciones agroclimáticas (Leone *et al.*, 2016). En diferentes regiones en Nigeria, Ndubuaku *et al.* (2014) reportan rendimientos de semilla entre 6.7 y 24.0 t ha<sup>-1</sup>. Asimismo, en función de la variedad genética y condiciones agroclimáticas, el rendimiento y cualidades de la semilla y su aceite pueden también variar (Leone *et al.*, 2016). Del total de ácidos grasos presentes en el aceite de moringa, alrededor 65 al 75% es oleico, el 9% behénico, 9% palmítico y 7% esteárico. El alto contenido de ácido oleico y tocoferoles, le confieren al aceite de moringa una alta estabilidad a la oxidación por lo que es atractivo para la producción de biodiesel y refinados farmacéuticos (Raman *et al.*, 2017). Asimismo, las proteínas en la pasta desgrasada suman alrededor de un 60%, pudiéndose usar en alimentos para humanos y animales (Ogunsina *et al.*, 2010). Por otro lado, el residuo lignocelulósico del árbol de moringa comprende alrededor de un 70% de la biomasa. Ensayos en Nicaragua, con 1 millón de plantas ha<sup>-1</sup> produjeron más de 500 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de biomasa, la que mediante el uso de un proceso de segunda generación tiene el potencial para producir hasta 20,000 litros de bioetanol, además de proteínas y ligninas como coproductos (Foidl *et al.*, 2001). En Sinaloa, una región semiárida de México, se han introducido accesiones de distintos orígenes, sin embargo, a excepción del ecotipo "Culiacán", no se tiene información sobre su productividad (Pérez-Ángel, 2011). El objetivo del presente trabajo fue seleccionar ecotipos de *M. oleifera* de alta productividad de semilla y biomasa lignocelulósica y describir sus características químicas, para su posible beneficio agroindustrial.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Este experimento se realizó entre el 8 de marzo de 2015 y el 30 de junio de 2016. Se localizó en el Valle de Culiacán, en las coordenadas 24° 59' 06" y 107° 22' 44" y 97 m sobre el nivel del mar. La precipitación para el periodo fue de 408 mm, concentrada en los meses de julio a septiembre. La temperatura máxima del periodo fue 41 °C y la mínima de 7 °C. Se utilizaron semillas de seis lugares de origen, nombrados "Culiacán", "Elota",

“Guerrero”, “Mojolo”, “Sinaloa” y “Sonora”. Se plantaron distribuidos al azar en 12 hileras, 48 plántulas de seis semanas de edad de cada ecotipo. La separación de plantación fue de 3×2 m. Se aplicó un riego mensual en temporada seca.

### Cuantificación de la biomasa lignocelulósica y semilla

La cosecha de los frutos secos y del material lignocelulósico se realizó 480 días después de la siembra. Para ello se seleccionaron al azar 12 árboles de cada ecotipo. Los tallos y follaje se recogieron cortando el tronco a 30 cm del suelo. Todos los materiales, excepto frutos, se trituraron mecánicamente y se secaron a 60 °C por 48 h. Se determinó la biomasa fresca y seca obtenida de tallos, hojas, frutos y semillas para cada árbol y se guardaron muestras para los análisis químicos.

### Análisis proximales

Se emplearon los métodos de la AOAC (2005), el 930.04 para la determinación de humedad, el 930.05 para cenizas, 920.39 para lípidos, 962.09 para fibra cruda; y 960.52 (micro-Kjeldahl) para proteínas utilizando un factor de conversión de 6.25. Los carbohidratos se calcularon como extracto libre de nitrógeno (ELN) restando los valores de cenizas, proteínas, lípidos y fibra cruda de 100%.

### Análisis de lignocelulosa de tallos de *Moringa oleifera*

La holocelulosa se cuantificó siguiendo el método ASTM

D-1104 (ASTM, 2010). El contenido de celulosa se midió por el método de Kushner y Höffer, reportado por Crespo et al. (2013). La cuantificación de la lignina se realizó según el procedimiento NREL/TP-510-42618 (Sluiter et al., 2008).

### Perfil de ácidos grasos de aceite de semilla

La extracción del aceite y la cuantificación de ácidos grasos se llevó a cabo con asistencia de ultrasonido como lo señalan Soto-León et al. (2014), utilizando en el análisis un cromatógrafo de gases (Agilent 6890N equipado con columna Omega Wax 250, helio como acarreador e inyector automático serie 7683) acoplado a un espectrómetro de masas (Agilent 5973). Las condiciones de operación fueron: volumen de inyección, 1  $\mu$ L; flujo, 1 mL min<sup>-1</sup>, temperatura de columna 50 °C a 270 °C (10 min) rampa de calentamiento 5 °C min<sup>-1</sup>.

### Diseño experimental

El diseño experimental fue totalmente al azar, donde cada árbol representó una unidad experimental. Se analizaron los resultados utilizando el paquete estadístico Minitab 17. Se realizó una prueba comparativa de medias por el método de Tukey ( $\alpha=0.05$ ).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Componentes de la biomasa aérea a los 16 meses

El Cuadro 1 presenta los componentes del rendimiento de la biomasa y semilla de seis ecotipos de moringa

**Cuadro 1.** Componentes del rendimiento promedio por árbol de la biomasa para plantas de 16 meses de seis ecotipos de *Moringa oleifera*.

Ecotipos	“Culiacán”	“Elota”	“Guerrero”	“Mojolo”	“Sinaloa”	“Sonora”
Ramas frescas (g)	8493 b	9103 b	8200 b	13857 a	7218 b	8198 b
Ramas secas (g)	2158 ab	1706 b	2110 ab	2571 a	1738 b	1391 b
Ramas secas (%)	66.9 bc	63.3 cd	74.7 a	68.8 b	62.6 d	65.1 cd
Hojas frescas (g)	953 b	918 b	1076 b	1741 a	789 b	629 b
Hojas secas (g)	261 b	248 b	330 b	502 a	209 b	223 b
Hojas secas (%)	9.0 b	9.2 b	11.4 ab	13.4 a	9.0 b	10.9 ab
Frutos secos (g)	831 ab	747 ab	400 b	664 ab	1117 a	501 ab
Frutos secos (%)	24.1 ab	27.5 a	13.9 d	17.8 c	28.4 a	24.0 b
Semillas (g)	266 ab	244 ab	154 b	262 ab	412 a	164 b
Semillas (%)	8.2 bc	9.0 b	5.4 d	7.9 bc	10.5 a	7.9 bc
Rendimiento fruto/semilla (%)	32.0	32.7	38.5	39.5	36.9	32.7
Semillas por fruto	17.6 ab	19.0 a	14.3 c	15.9 bc	19.9 a	19.9 a
Peso semillas/fruto (g)	3.3 c	4.8 b	3.6 c	3.7 bc	6.1 a	5.8 a
Semilla descascarillada (g)	175 ab	170 ab	96 b	196 ab	305 a	112 b
Semilla descascarillada (%)	5.7 bc	7.3 a	3.8 d	4.9 c	7.3 a	5.5 bc
Relación kernel/semilla (%)	65.8	69.7	62.3	74.8	74.0	68.3

Medias entre filas con letras distintas, son estadísticamente diferentes ( $p<0.05$ ).

al momento de la primera cosecha. El ecotipo "Mojolo" tuvo significativamente el mayor rendimiento en peso de tallos y hojas por árbol de todos los ecotipos; mientras que, "Sinaloa" y "Sonora" presentaron los menores. Los tallos aportaron entre 63 a 74% de la biomasa, siendo "Guerrero" el que mayor proporción obtuvo y "Sinaloa" la menor. El ecotipo que presentó el mayor rendimiento de frutos y semillas fue "Sinaloa". A pesar de que los ecotipos "Elota" y "Culiacán" obtuvieron buenos rendimientos de frutos secos, su baja relación semilla/fruto se reflejó en pesos bajos de semilla, debido a la alta proporción de cáscara del fruto. En cambio, el ecotipo "Sinaloa" produjo el mayor porcentaje de frutos y semillas.

Respecto al número de semillas por fruto, "Sinaloa", "Sonora" y "Elota" mostraron claramente los valores más altos. Estos resultados son superiores a los reportados por Ayerza (2012) en Argentina, los cuales tuvieron 16.25 semillas por fruto para PKM-1 y 16.12 para una variedad africana. En cuanto al peso de semillas por fruto, los ecotipos "Sinaloa" y "Sonora" mostraron los mayores rendimientos. Los valores fueron superiores a los reportados por el autor anterior, quien señala 4.03 g de semilla para la variedad PKM-1 y 3.07 para el ecotipo africano. Por su parte, Raja *et al.* (2013), compararon 14 variedades de *M. oleifera* en India, encontrando los mayores rendimientos en los híbridos PKM-1 y PKM-2.

### Análisis químico de tallos, hojas y semillas

La concentración de cenizas en tallos fue similar en todos los ecotipos, siendo solo diferente para "Culiacán" y "Guerrero". Estos resultados son similares a los encontrados por Abdulkadir *et al.* (2016) y más bajos a los publicados por Mahmoud (2013) y Pérez *et al.* (2010). Por el contrario, la concentración de lípidos de estos ecotipos fueron los más altos. Pérez *et al.* (2010) reportan porcentajes de grasas similares a los encontrados en este trabajo, mientras que Abdulkadir *et al.* (2016) citan valores mucho mayores (11.8%). La concentración de proteínas fue mayor para "Sonora" y "Sinaloa" y menor en "Guerrero". Los valores encontrados son muy inferiores a los de otros autores (Pérez *et al.*, 2010; Mahmoud, 2013; Abdulkadir *et al.*, 2016), quienes utilizaron ramas de menor edad. Lo anterior concuerda con Shih *et al.* (2011), quienes observaron que el contenido de proteínas de ramas de *M. oleifera* decrece al aumentar la edad de las plantas. El ecotipo "Sonora" tuvo el mayor porcentaje de fibra cruda mientras que "Mojolo" y "Guerrero" el menor. Estos resultados fueron consistentes con lo reportado para variedades de Cuba, Malasia y Egipto (Pérez *et al.*,

2010; Mahmoud, 2013; Abdulkadir *et al.*, 2016). Para los carbohidratos totales, el porcentaje mayor fue obtenido en los ecotipos "Guerrero" (53.30%) y "Mojolo" (52.01%), mientras que el menor lo presentó "Sonora" (46.59%). Estos resultados son superiores a los reportados por otros autores, como se muestra en el Cuadro 2.

"Mojolo" presentó el porcentaje de cenizas más alto en hojas, lo que concuerda con lo reportado por Castillo *et al.* (2018) para Moringa de Sinaloa. Por lo contrario, Olugbemi *et al.* (2010) en Tanzania así como Pérez *et al.* (2010) en Cuba, señalan valores ligeramente superiores. En cuanto a las grasas en hojas, destaca "Mojolo" que promedió 9.17%, "Culiacán" y "Sinaloa" (8.74%). Estos valores son superiores a los de Pérez *et al.* (2010) y de Olugbemi *et al.* (2010), e inferiores a los publicados por Castillo *et al.* (2018). Para la proteína en hojas, no se observaron diferencias entre ecotipos, excepto para "Sonora" que presentó un valor bajo, similar al encontrado por Pérez *et al.* (2010). El resto de las variedades presentaron promedios cercanos a los de Castillo *et al.* (2018) y Olugbemi *et al.* (2010), siendo el ecotipo "Culiacán" el de mayor porcentaje, pero no significativamente diferente de "Elota", "Mojolo" y "Sinaloa". Los valores de fibra cruda están dentro de los rangos reportados por otros autores (Olugbemi *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2010; Castillo *et al.*, 2018). Por otro lado, el ecotipo "Sonora" presentó el más alto porcentaje de carbohidratos (47.99%) y el menor de proteínas en la hoja. Las variedades con menor porcentaje de carbohidratos fueron "Mojolo" (39.07%) y "Sinaloa" (39.77%), similares a los reportados por otros autores (Olugbemi *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2010; Castillo *et al.*, 2018). No se encontraron diferencias en la concentración de cenizas para las semillas descascarilladas. Los promedios fueron similares a los reportados por Nzikou *et al.* (2009) para semilla del Congo (Liang *et al.*, 2019), y ligeramente inferiores lo reportado por Anwar y Rashid (2007) y Barakat y Ghazal (2016). Se observaron los más altos porcentajes de lípidos en "Elota" y "Sinaloa" y los más bajos en "Guerrero" y "Sonora", siendo en promedio más altos a los reportados por otros autores. Destaca en el presente trabajo el porcentaje de lípidos de los ecotipos "Elota" y "Sinaloa" (48.23 y 45.22%, respectivamente), que sobrepasan lo reportado por Makkar *et al.* (1997), Ayerza (2012) y Al Juhaimi *et al.* (2017). Por su alto porcentaje de lípidos, los ecotipos "Elota" y "Sinaloa" son interesantes para la producción de biodiesel a partir del aceite. En cuanto a la concentración de proteínas los ecotipos "Culiacán", "Sonora" y "Mojolo" mostraron los valores más altos, semejantes a los reportados por

**Cuadro 2.** Composición proximal de tallo, hoja, semillas de seis ecotipos de Moringa oleifera.

Componente	"Culiacán"	"Eloia"	"Guerrero"	"Mojojo"	"Sinaloa"	"Sonora"	Referencias
Tallo							
Humedad %	6.13±0.63 ab	6.63±0.67 a	6.00±0.21 bc	5.82±0.21 bc	5.59±0.45 cd	5.16±0.31 d	Pérez et al. (2010) 11.13
Cenizas <sup>1</sup> %	4.54±0.53 b	5.90±0.63 ab	4.68±0.99 b	6.44 ±3.28 a	5.71±0.54 ab	5.08±0.75 ab	Abdulkadir et al. (2016) 5.10
Lípidos <sup>1</sup> %	3.90±0.28 a	3.49±0.91 b	3.95±0.11 a	2.57±0.17 d	3.06±0.05 c	3.01±0.10 c	Mahmoud (2013) 5.77
Proteínas <sup>1</sup> %	5.25±1.10 ab	5.46±0.63 ab	4.59±0.51 b	5.65±0.86 ab	5.79±1.10 a	6.13±1.45 a	5.50
Fibra cruda <sup>1</sup> %	35.43±0.08 ab	37.32±1.58 a	33.48±1.84 b	33.34±0.30 b	35.33±1.16 ab	39.20±2.18 a	11.80
Carbohidratos (ELN) <sup>1</sup> %	50.89±1.01 ab	47.84±1.37 bc	53.30±2.02 a	52.01±3.42 a	50.11±1.30 ab	46.59±1.22 c	12.00
Hojas							
Humedad %	8.67±0.43 a	6.94±1.08 b	7.41±0.37 ab	8.22±0.98 ab	7.23±0.52 ab	8.14±1.23 ab	Pérez et al. (2010) 10.40
Cenizas <sup>1</sup> %	8.60±0.17 bc	9.08±0.40 ab	9.17±0.70 ab	9.62±0.60 a	8.97±0.68 ab	7.98±0.59 c	6.27
Lípidos <sup>1</sup> %	8.74±0.30 ab	6.09±0.75 d	8.28±0.20 bc	9.17±1.07 a	8.74±1.07 ab	7.62±0.58 c	9.54
Proteínas <sup>1</sup> %	29.24±0.50 a	30.36±0.44 a	28.93±0.78 a	29.54±0.76 a	29.87±0.95 a	24.90±0.91 b	12.63
Fibra cruda <sup>1</sup> %	13.18±0.42 a	12.44±0.58 ab	9.46±0.34 c	12.60±0.71 ab	12.65±0.44 ab	11.52±0.43 b	28.90
Carbohidratos (ELN) <sup>1</sup> %	40.24±0.85 ab	42.02±2.27 ab	44.16±0.59 bc	39.07±2.66 c	39.77±1.61 c	47.99±1.25 a	8.49
Semillas descascarilladas (kernel)							
Humedad %	4.51±0.05 a	3.85±0.04 c	3.88±0.09 bc	4.20±0.09 ab	3.99±0.21 bc	4.44±0.19 a	Liang et al. (2019) 6.78
Cenizas <sup>1</sup> %	3.78±0.11 ab	3.32±0.07 c	3.34±0.08 c	3.94±0.08 a	3.53±0.20 bc	3.69±0.03 ab	Anwar et al. (2005) 5.70
Lípidos <sup>1</sup> %	42.63±1.17 c	48.23±0.07 a	40.62±0.52 d	41.73±0.80 cd	45.22±0.31 b	40.75±0.50 d	6.60
Proteínas <sup>1</sup> %	36.95±0.03 a	31.51±0.36 d	32.77±0.08 c	35.18±0.31 b	33.61±0.22 c	36.91±0.75 a	40.39
Fibra cruda <sup>1</sup> %	14.81±0.16 b	13.63±0.11 c	21.93±0.01 a	6.89±0.29 e	12.26±0.22 d	14.41±0.07 b	29.36
Carbohidratos (ELN) <sup>1</sup> %	1.83±1.25 c	3.32±0.37 bc	1.35±0.36 c	10.14±0.82 a	5.38±0.20 b	4.23±1.17 b	7.20
Lignocelulosa (libre de extraíbles) <sup>2</sup>							
Celulosa	55.87±1.75 a	55.46±0.72 ab	52.12±0.31 c	56.19±0.39 a	54.48±0.82 ab	53.18±0.73 bc	Benitez et al. (2014) <sup>4</sup> 53.85
Hemicelulosa	13.88±0.96 c	22.97±1.56 ab	21.71±2.97 ab	17.88±1.97 bc	21.77±0.14 ab	26.30±1.83 a	Khider (2012) <sup>4</sup> 52.01
Lignina	30.25±1.38 a	21.56±1.16 bc	26.17±2.76 ab	25.92±2.34 ab	23.75±0.95 bc	20.52±1.77 c	18.65
Holocelulosa <sup>3</sup>	69.75±1.38 b	78.43±1.16 a	73.83±2.76 bc	74.08±2.34 bc	76.24±0.95 ab	79.48±1.77 a	27.48
Referencias							
							Barakat y Ghazal (2016) 7.50
							40.44 <sup>5</sup>
							7.50
							4.73
							29.61
							35.54
							10.92
							20.03
							Mahmoud (2013) <sup>4,5</sup>
							65.09
							15.04
							19.86 <sup>6</sup>
							80.13

Medias entre filas con letras distintas, son estadísticamente diferentes ( $p < 0.05$ ). <sup>1</sup>Los resultados se expresan en base seca. <sup>2</sup>Obtenidas de la fracción libre de extraíbles (cenizas, carbohidratos solubles, proteínas y lípidos). <sup>3</sup>Suma de celulosa y hemicelulosa. <sup>4</sup>Valores calculados en base a los datos proporcionados por el autor. <sup>5</sup>Ramas jóvenes de moringa. <sup>6</sup>Determinada como lignina detergente ácida (ADL).

Barakat y Ghazal (2016). El ecotipo con el más alto porcentaje de fibra cruda fue "Guerrero" con 21.93%. Los valores de fibra cruda están dentro de los rangos reportados por otros autores (Olugbemi *et al.*, 2010; Pérez *et al.*, 2010; Castillo *et al.*, 2018).

### Perfil lignocelulósico de tallo de moringa

Como se muestra en el Cuadro 2, el tallo libre de extraíbles de los ecotipos estudiados contiene entre 52.12% a 55.87% de celulosa. Estos resultados son semejantes a los reportados por Khider (2012) y Benitez *et al.* (2014), e inferiores a los señalados por Mahmoud (2013). En cuanto a la concentración de hemicelulosa, se encontraron promedios entre 13.88% para el ecotipo "Culiacán" y 26.30% para "Sonora". Basado en estos resultados se puede estimar la parte fermentable (holocelulosa) oscila entre 69.75% ("Culiacán") y 79.48% ("Sonora") del total. Lo anterior concuerda con lo reportado por Benitez *et al.* (2014) para moringa de Argentina, con 73.31% de holocelulosa y es superior a lo indicado por Khider (2012) para moringa de Sudán con 68.5%. El ecotipo "Sonora" presentó la mayor proporción de holocelulosa y menor de lignina, sin embargo, las diferencias respecto a "Sinaloa" y "Elota" no son significativas.

### Ácidos grasos de aceite de semilla

En el Cuadro 3 se observan los principales ácidos grasos encontrados en el aceite de semilla de moringa de cuatro de los seis ecotipos. Los principales ácidos grasos saturados fueron el palmítico, behénico, esteárico, araquídico y lignocérico. El oleico fue el ácido graso más abundante (74.44%) y, además, el único que presentó

diferencias significativas entre ecotipos ya que "Elota" y "Culiacán" presentaron mayor concentración que el resto de los ecotipos. Los valores anteriores son similares a los reportados en Kenia para la variedad Mbololo (Tsaknis *et al.*, 1999), el híbrido PKM-1 (Lalas *et al.*, 2002), y variedades de Pakistán (Anwar *et al.*, 2005; Anwar y Rashid, 2007). El siguiente en importancia fue el ácido behénico, el cual presentó valores ligeramente por encima a los señalados por los autores mencionados. Este ácido graso es característico del aceite de moringa, también conocido como de "Ben". Los promedios encontrados de ácido palmítico fueron ligeramente inferiores a los de variedades de África, India y Pakistán señaladas anteriormente.

Es importante destacar que de los cuatro ácidos grasos más abundantes, tres son saturados y solamente uno monoinsaturado. Los poliinsaturados representan menos del 0.8% del total. Esta característica da al aceite de moringa mayor resistencia a la oxidación, por lo cual representa una ventaja industrial (Anwar *et al.*, 2005).

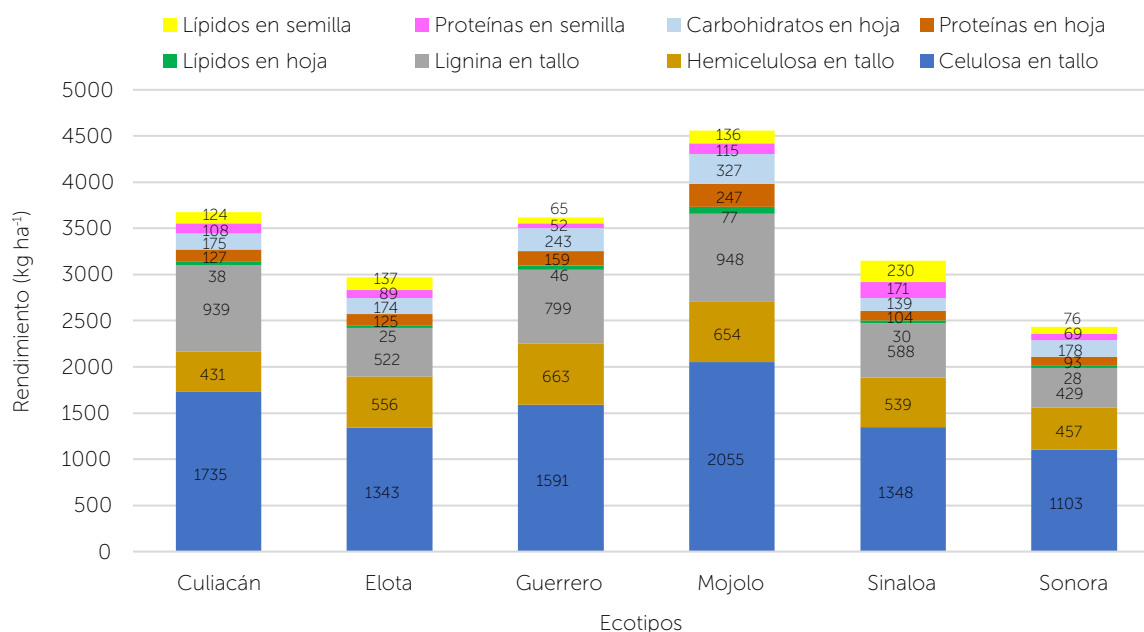
### Rendimiento por hectárea de componentes químicos de biomasa y semilla

En la Figura 1 se presentan los comparativos de las cantidades calculadas por hectárea (densidad de siembra de 1,667 plantas ha<sup>-1</sup>) de los componentes de interés de tallos, hojas y semillas de los seis ecotipos de *M. oleifera*, analizados al momento de la primera cosecha de semilla. Como se puede apreciar, el mayor rendimiento de biomasa lignocelulósica de tallo lo presentó el ecotipo "Mojolo", seguido por "Culiacán" y "Guerrero". Como también se deduce en la Figura 1, de la lignocelulosa de

**Cuadro 3.** Porcentajes de ácidos grasos en aceite de semilla de cuatro ecotipos de *Moringa oleifera*.

Ácido graso	Elota	Culiacán	Mojolo	Guerrero	Tsaknis <i>et al.</i> (1998)	Lalas y Tsaknis (2002)	Anwar <i>et al.</i> (2005)	Anwar y Rashid (2007)
Palmitico C16:0	4.82±0.66 a	5.11±0.43 a	5.37±0.32 a	4.56±0.05 a	6.04	6.46	5.98	6.45
Palmitoleico C16:1	1.18±0.23 a	1.11±0.07 a	1.29±0.07 a	1.28±0.02 a	1.46	1.36	1.10	0.97
Margárico C17:0	0.031±0.04 a	0.017±0.007 a	0.036±0.004 a	0.020±0.003 a	0.09	0.08	ND	ND
Esteárico C18:0	4.61±1.11 b	4.72±0.27 b	6.69±0.34 a	6.57±0.25 a	4.14	5.88	4.47	5.50
Oleico C18:1	75.91±0.70 a	75.18±0.06 ab	74.14±0.93 b	72.51±0.99 c	73.6	71.21	76.00	73.22
Linoleico C18:2	0.538±0.12 a	0.418±0.09 a	0.575±0.02 a	0.443±0.05 a	0.73	0.66	1.20	1.27
Linoléico C18:3	0.162±0.12 a	0.128±0.04 a	0.061±0.02 a	0.060±0.10 a	ND	0.22	ND	0.30
Araquídico C20:0	3.31±0.58 a	3.23±0.24 a	4.92±1.11 a	4.41±0.02 a	2.76	3.62	3.50	4.08
Gondoico C20:1	1.78±0.17 a	1.80±0.06 a	1.89±0.06 a	1.70±0.16 a	2.4	2.22	1.40	1.68
Behénico C22:0	7.04±0.71 a	7.17±0.42 a	7.54±0.07 a	7.36±0.52 a	6.73	6.41	5.65	6.16
Lignocérico C24:0	1.26±0.30 a	1.19±0.18 a	1.13±0.03 a	1.10±0.08 a	ND	ND	ND	ND

Medias entre filas con letras distintas, son estadísticamente diferentes (p<0.05). ND=No detectado.



**Figura 1.** Rendimientos de los principales componentes químicos de tallo, hoja y semilla de ecotipos de *Moringa oleifera* a los 16 meses.

los tallos del ecotipo “Mojolo” se obtendrían 2,708.8 kg de holocelulosa, la cual, mediante un proceso de segunda generación, podría rendir 1,384.2 kg de etanol, considerando una conversión de 51.1%.

La lignina, segundo componente en importancia de la lignocelulosa, es una materia prima infravalorada, ya que prácticamente sólo se ha usado como combustible en la industria papelera. Sin embargo, se han venido desarrollando recientemente aplicaciones de alto valor agregado, tales como termoplásticos (Sadeghifar et al., 2012) y ácidos húmicos (Jeong et al., 2018). Para el caso de la hoja, el ecotipo más productivo fue “Mojolo”, de donde se obtendrían los mayores rendimientos por hectárea de carbohidratos, proteínas y lípidos. Los carbohidratos son los componentes más abundantes de la hoja, destacando nuevamente el ecotipo “Mojolo” con los mayores rendimientos por hectárea. El resto de los ecotipos presentaron valores muy por debajo de los encontrados para este ecotipo. De los macro componentes presentes en las hojas de moringa, las proteínas y lípidos representan los de mayor interés comercial ya que se pueden utilizar para la obtención de alimentos, productos nutracéuticos y medicinales (Raman et al., 2017). Como se puede observar en la Figura 1, el ecotipo “Sinaloa” produjo los mayores rendimientos de lípidos y proteínas de la semilla. De los primeros se pueden obtener, aparte de biodiesel, compuestos de alto valor agregado como tocoferoles y carotenoides (Raman et al., 2017). La pasta de

la semilla desgrasada se aprovecharía como fuente de proteínas en alimentos para animales y humanos (Ogun-sina et al., 2010).

## CONCLUSIONES

**El ecotipo** “Mojolo” presentó la mayor productividad de tallos y hojas y el más alto porcentaje de lípidos, proteínas de hoja y carbohidratos fermentables por hectárea. El ecotipo “Sinaloa” produjo los mayores rendimientos de semillas, aceite y proteínas de semilla. El ecotipo “Elota” sobresalió por su alto porcentaje de aceite y ácido oleico. Se recomienda la experimentación con los ecotipos “Sinaloa”, “Mojolo” y “Elota” con fines de mejoramiento genético y cultivos intensivos para producción de biomasa y aceite.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento otorgado por el Fondo Sectorial SAGARPA-CONACYT al proyecto 175519, del cual fue parte el presente trabajo de investigación.

## LITERATURA CITADA

- Abdulkadir, A. R., Zawawi, D. D., & Jahan, M. S. (2016). Proximate and phytochemical screening of different parts of *Moringa oleifera*. *Russian Agricultural Sciences*, 42(1), 34-36.
- Al Juhaimi, F., Ghafoor, K., Babiker, E. E., Matthäus, B., & Özkan, M. M. (2017). The biochemical composition of the leaves and seeds meals of moringa species as non-conventional sources of nutrients. *Journal of Food Biochemistry*, 41(1), e12322.

- Anwar, F., Ashraf, M., & Bhangar, M. (2005). Interprovenance variation in the composition of *Moringa oleifera* oilseeds from Pakistan. *Journal of Oil & Fat Industries*, 82, 45-51.
- Anwar, F., & Rashid, U. (2007). Physico-chemical characteristics of *Moringa oleifera* seeds and seed oil from a wild provenance of Pakistan. *Pakistan Journal of Botany*, 39(5), 1443-1453.
- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis* (18th ed.). Maryland, USA: Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- ASTM. (2010). *Annual Book of ASTM Standards* (Vol. 4.10). West Conshohocken, PA, USA: ASTM INTERNATIONAL.
- Ayerza, R. (2012). Seed and oil yields of *Moringa oleifera* variety Periyakulam-1 introduced for oil production in four ecosystems of South America. *Industrial Crops and Products*, 36, 70-73.
- Azad, A. K., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., Sharma, S. C., & Islam, R. (2015). Prospect of Moringa Seed Oil as a Sustainable Biodiesel Fuel in Australia: A Review. *Procedia Engineering*, 105, 601-606.
- Barakat, H., & Ghazal, G. A. (2016). Physicochemical Properties of *Moringa oleifera* Seeds and Their Edible Oil Cultivated at Different Regions in Egypt. *Food and Nutrition Sciences*, 07(06), 472-484.
- Benítez, J. B., Vallejos, M. E., Area, M. C., & Felissia, F. E. (2014, November, 26-28, 2014). Caracterización química y morfológica de *Moringa oleifera* para su aprovechamiento en biorrefinerías. 1. Aptitud Papelera. Paper presented at the Proceedings of the VIII CIADICYP, Medellín, Colombia.
- Castillo, L. R. I., Portillo, L. J. J., León, F. J., Gutiérrez, D. R., Angulo, E. M. A., Muy-Rangel, M. D., & Heredia, J. B. (2018). Inclusion of Moringa Leaf Powder (*Moringa oleifera*) in Fodder for Feeding Japanese Quail (*Coturnix coturnix japonica*). *Revista Brasileira de Ciência Avícola*, 20, 15-26.
- Crespo, G. R., Torres, U. M., Valenzuela, H. L., & Poblete, W. H. (2013). Propiedades químicas, color y humectabilidad de partículas de *Laureliopsis philippiana* (tepa) con y sin tratamiento térmico. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 15, 337-348.
- Chen, H. (2014). *Biotechnology of Lignocellulose*. Dordrecht: Springer.
- Foidl, N., Makkar, H., & Becker, K. (2001, 01/01). The potential of *Moringa oleifera* for agricultural and industrial uses. *The Miracle Tree: The Multiple Attributes of Moringa*.
- Jeong, H., Cha, J.-Y., Choi, J., Jang, K.-S., Lim, J., Kim, W. Y., Seo, D. C., & Jeon, J. R. (2018). One-Pot Transformation of Technical Lignins into Humic-Like Plant Stimulants through Fenton-Based Advanced Oxidation: Accelerating Natural Fungus-Driven Humification. *ACS-Omega*, 3, 7441-7453.
- Khider, T. (2012). Heat Value of Four Hardwood Species from Sudan. *Journal of Forest Products and Industries*, 1, 5-9.
- Lalas, S., & Tsaknis, J. O. I. (2002). Characterization of *Moringa oleifera* Seed Oil Variety "Periyakulam 1". *Journal of Food Composition and Analysis*, 15, 65-77. doi: 10.1006/jfca.2001.1042
- Leone, A., Spada, A., Battezzati, A., Schiraldi, A., Aristil, J., & Bertoli, S. (2016). *Moringa oleifera* Seeds and Oil: Characteristics and Uses for Human Health. *International Journal of Molecular Sciences*, 17(12).
- Liang, L., Wang, C., Li, S., Chu, X., & Sun, K. (2019). Nutritional compositions of Indian *Moringa oleifera* seed and antioxidant activity of its polypeptides. *Food Science & Nutrition*, 7(5), 1754-1760.
- Mahmoud, A. E. M. (2013). Effect of feeding on *Moringa oleifera* stems on productive performance of growing lambs. *Egyptian Journal of Nutrition and Feeds*, 16(2), 281-292.
- Makkar, H. P. S., & Becker, K. (1997). Nutrients and antiquality factors in different morphological parts of the *Moringa oleifera* tree. *The Journal of Agricultural Science*, 128(3), 311-322.
- Ndubuaku, M., N, N., & E, N. (2014). Yield Characteristics of *Moringa oleifera* Across Different Ecologies in Nigeria as an Index of Its Adaptation to Climate Change. *Sustainable Agriculture Research*, 3(1), 95-100.
- Nouman, W., Siddiqui, M. T., Barsa, S. M. A., Khan, R. A., Gull, T., Olson, M. E. & Munir, H. (2012). Response of *Moringa oleifera* to Saline Conditions. *International Journal of Agriculture and Biology*, 14, 557-562.
- Nzikou, J. M., Matos, L., Moussounga, J. E., Ndangui, C. B., et al. (2009). Characterization of *Moringa oleifera* seed oil variety Congo-Brazaville. *Journal of Food Technology*, 7, 59-65.
- Ogunsina, B. S., Radha, C., & Govardhan Singh, R. S. (2010). Physicochemical and functional properties of full-fat and defatted *Moringa oleifera* kernel flour. *International Journal of Food Science & Technology*, 45(11), 2433-2439.
- Olugbemi, T., Mutayoba, S., & Lekule, F. (2010). Evaluation of *Moringa oleifera* leaf meal inclusion in cassava chip based diets fed to laying birds. *Livestock Research for Rural Development*, 22(6), 1-6.
- Pérez-Ángel, R. (2011). *Moringa oleifera*: una alternativa forrajera para ovinos. Culiacán, México: Fundación Produce Sinaloa.
- Pérez, A., Tania, S., Armengol-López, N., & Reyes, F. (2010). Characteristics and potential of *Moringa oleifera*, Lamark. An alternative for animal feeding. *Pastos y Forrajes*, 33, 349-362.
- Raja, S., Bagle, B. G., & More, T. A. (2013). Drumstick (*Moringa oleifera* Lamk.) improvement for semiarid and arid ecosystem: Analysis of environmental stability for yield. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*, 5(8), 164-170. doi: 10.5897/JPBCS12.029
- Raman, K. J., Alves, C., & Gnansounou, E. (2017). A review on moringa tree and vetiver grass - Potential biorefinery feedstocks. *Bioresource Technology*, 249, 1044-1051.
- Sadeghifar, H., Cui, C., Sen, S., & Argyropoulos, D. (2012). Toward thermoplastic lignin polymers; thermal & polymer characteristics of kraft lignin & its derivatives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 16713-16720.
- Shih, M.-C., Chang, C.-M., Kang, S.-M., & Tsai, M.-L. (2011). Effect of Different Parts (Leaf, Stem and Stalk) and Seasons (Summer and Winter) on the Chemical Compositions and Antioxidant Activity of *Moringa oleifera*. *International Journal of Molecular Sciences*, 12, 6077-6088.
- Sluiter, A., Hames, B., Ruiz, R., Scarlata, C., Sluiter, J., Templeton, D., & Crocker, D. (2008). Determination of Structural Carbohydrates and Lignin in Biomass. *Laboratory Analytical Procedure (LAP)*. NREL Laboratory Analytical Procedures for Standard Biomass Analysis(NREL/TP-510-42618), 18.
- Soto-León, S., Zazueta-Patrón, I. E., Piña-Valdez, P., Nieves-Soto, M., Reyes-Moreno, C., & Contreras-Andrade, I. (2014). Extracción de lípidos de *Tetraselmis suecica*: proceso asistido por ultrasonido y solventes. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 13, 723-737.
- Tsaknis, J., Spiliotis, V., Lalas, S., Gergis, V. & Dourtoglou, V. (1999). Quality changes of *Moringa oleifera*, variety Mbololo of Kenya, seed oil during frying. *Grasas y Aceites*, 50, 37-48.