

Plantas silvestres del centro-norte de México con potencial para la producción de aceite

Miguel Ángel Flores-Villamil¹
Santiago de Jesús Méndez-Gallegos^{1§}
Eduwiges Javier García-Herrera¹
Alejandro Amante-Orozco¹
Adrián Gómez-González¹
Francisco Javier Cabral-Arellano²
José Fernando Vasco-Leal³

¹Colegio de Postgraduados-Campus San Luis Potosí. Iturbide núm. 73, Col. Centro, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. CP. 78600. (flores.miguel@colpos.mx; garciae@colpos.mx; aamante@colpos.mx; agomez@colpos.mx). ²Universidad Autónoma de Zacatecas-Unidad Académica de Ciencias Biológicas. Av. Preparatoria s/n, Col. Agronómica, Zacatecas, México. CP. 98060. (fjcabral@cantera.reduaz.com). ³Universidad Autónoma de Querétaro-División de Investigación y Posgrado-Posgrado de Gestión Tecnológica e Innovación-CU. Cerro de las Campanas s/n. Querétaro, México. CP. 76010. (cimer@uaq.mx).

[§]Autor para correspondencia: jmendez@colpos.mx.

Resumen

Ante la fluctuación de precios y el agotamiento de los combustibles fósiles, así como de sus efectos negativos en el ambiente, el desarrollo y aprovechamiento de biocombustibles representan una alternativa potencialmente viable. No obstante, los insumos empleados en la producción de bioenergéticos, son altamente cuestionados por su sostenibilidad energética. Debido a ello, es prioritaria la búsqueda de fuentes alternativas a partir de plantas resistentes a factores climáticos adversos, alta capacidad de adaptación, bajo requerimiento de insumos y que no compitan con los alimentos. Considerando lo anterior, se realizaron muestreos en el centro-norte de México para colectar especies silvestres, a fin de determinar su potencial productivo, el contenido de aceite de las semillas, y analizar las características físico químicas del aceite. Se colectaron semillas de 19 especies de plantas. *Agave* sp., registró el potencial productivo de semilla más alto con 24 305 kg ha⁻¹; sin embargo, presenta la limitante de tener un largo periodo de fructificación y su contenido de aceite es bajo. Cinco de las especies de semillas colectadas (*Cucurbita ficifolia*, *Cucurbita foetidissima*, *Proboscidea louisianica*, *Jatropha dioica* y *Apodanthera undulata*) alcanzaron contenidos de aceite superiores a 30%. *A. undulata* podría producir potencialmente hasta 1 315 kg ha⁻¹ de aceite, lo que la hace tan competitiva como los insumos disponibles comercialmente. La caracterización físico química de los aceites mostró una amplia variación, que permitió identificar aceites con cualidades alimenticias, bioenergéticas y otros usos potenciales.

Palabras clave: aceite vegetal, bioenergéticos, energías alternas, especies silvestres.

Recibido: agosto de 2018

Aceptado: octubre de 2018

Introducción

Actualmente, la crisis energética mundial y la oscilación del precio de los combustibles fósiles ha motivado la búsqueda de nuevas formas de energía menos contaminantes, que suplan paulatinamente al petróleo como recurso no renovable (Estrada e Islas, 2010; Romero *et al.*, 2015). Al respecto, Wilches (2011) señala que una alternativa más factible que el petróleo, el carbón o los reactores nucleares en los países en desarrollo, es la utilización directa e indirecta de la energía a partir de la biomasa o residuos vegetales. La producción de biocombustibles surgió a finales del siglo pasado, como una estrategia para promocionar el desarrollo de energías renovables, limpias y sustentables (Agüero-Rodríguez *et al.*, 2015).

A pesar de que la bioenergía podría mejorar la rentabilidad de la agricultura, promover el desarrollo económico local y diversificar el portafolio de opciones productivas (Montiel-Montoya, 2010) de las energías renovables, es la más cuestionada y la que más controversias ha creado. Se ha evidenciado que en torno a su producción se genera un impacto con implicaciones económicas, sociales, políticas y ambientales, por lo que a pesar de ser una energía renovable no es considerada, por muchos expertos, como una energía no contaminante y en consecuencia tampoco una energía verde, por ello, la producción de biocombustibles podría implicar situaciones más graves que el problema para el cual fueron vistos como solución (Wilches, 2011). Montiel-Montoya (2010) afirma que los biocombustibles pueden emitir más gases efecto invernadero que los combustibles fósiles, sobre todo si se emplean cultivos con bajos rendimientos, altos requerimientos de energía fósil o bien se cultivan en áreas anteriormente consideradas como forestales.

Reyes-Reyes *et al.* (2015) señalan que, en México, actualmente la extracción de aceites se realiza a partir de diferentes cultivos, principalmente *Ricinus communis* y *Jatropha curcas*. Esta última se promueve como un árbol milagroso, pero aún se desconocen aspectos esenciales de su comportamiento genético, aspectos agronómicos, calidad de semilla y rendimiento de aceite cuando se cultivan en diferentes condiciones (Montiel-Montoya, 2010). Asimismo, *R. communis* bajo las actuales condiciones de producción es medianamente competitiva y rentable en relación a otros cultivos, por lo que se requieren mejoras tecnológicas al sistema de producción que permitan elevar su productividad, así como incrementar el precio de venta de la materia prima a un precio superior a los \$500.00, para que pueda ser atractivo para los productores (Rodríguez y Zamarripa, 2013).

México es considerado un país mega diverso, donde es posible encontrar especies vegetales endémicas e introducidas que pueden emplearse en la producción de biocombustibles; no obstante, muchas especies ruderales, arvenses, ornamentales y cultivadas son subutilizadas, debido al desconocimiento de sus componentes químicos; por lo que el uso integral y sustentable de dichas plantas podría incrementar los ingresos de los agricultores en áreas marginales del Altiplano Semiárido de México (Reveles *et al.*, 2010). Tomando en cuenta que tanto especies nativas como introducidas ya adaptadas a cada región, podrían ser aprovechadas con fines energéticos en aquellos suelos no aptos para la agricultura, sin desplazar la producción de alimentos y además requerir pocos insumos, esta investigación pretende colectar especies silvestres del centro-norte de México, determinar su potencial productivo, analizar su contenido de aceite y sus características físicas y químicas, para identificar especies vegetales de interés oleaginoso.

Materiales y métodos

Colecta en campo

La colecta de semillas se realizó mediante recorridos de campo entre los meses de junio de 2014 a mayo de 2015, considerando la disponibilidad anual de las plantas, en 17 municipios de los estados de Zacatecas, San Luis Potosí y Aguascalientes, México. Se utilizaron los siguientes criterios para la selección de las especies en campo: 1) abundancia; 2) disponibilidad de semilla; 3) accesibilidad a los sitios; y 4) antecedentes de uso.

Las especies y las características de su localización se muestran en el Cuadro 1. Las 19 especies colectadas en el área de estudio son: chicalote *Argemone mexicana*, calabacilla loca *Cucurbita foetidissima*, chilacayota *Cucurbita ficifolia*, melón hediondo *Apodanthera undulata*, aceitilla *Bidens odorata*, jara *Leonotis nepetifolia*, toloache *Datura inoxia*, cardo *Datura ferox*, cadillo *Xanthium strumarium*, toritos *Proboscidea louisianica*, mostacilla *Brassica* sp., saramago *Eruca sativa*, sangre de grado *Jatropha dioica*, huizache *Acacia farnesiana*, mezquite *Prosopis glandulosa*, gobernadora *Larrea tridentata*, maguey *Agave* sp., pirúl *Schinus molle* y lampote *Helianthus annuus*.

Cuadro 1. Características y ubicación de las especies colectadas en el estudio.

Estado	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Nombre común
AGS	Cosío	22°23'39.8"	102°18'23.4"	2 008	Toloache
AGS	San José de Gracia	22°08'36.9"	102°21'26.4"	1 980	Girasol, Melón Hediondo
AGS	Tepezalá	22°13'33.2"	102°14'14.2"	1 887	Cadillo, Cardo, Aceitilla
SLP	Ahuatalco	22°19'38.8"	101°12'15.3"	1 862	Toritos
SLP	Salinas	22°43'56"	101°42'40"	2 096	Aceitilla, Saramago
SLP	Mexquitic	22°19'38.8"	101°12'15"	1 870	Aceitilla, Mostacilla, Toritos
SLP	Mexquitic	22°16'23.4"	101°05'35"	1 980	Jara
SLP	Salinas	22°37'32.6"	101°41'15"	2 110	Toritos, Girasol, Saramago, Aceitilla, Cadillo
SLP	Venado	22°55'54.3"	101°04'25.6"	1 755	Aceitilla, Cadillo
SLP	Salinas	22°35'59.9"	101°42'07"	2 115	Gobernadora, Sangre de grado
SLP	Salinas	22°37'10.3"	101°43'58.9"	2 079	Huizache
ZAC	Pánfilo Natera	22°40'22.9"	102°06'28.4"	2 127	Toritos
ZAC	Zacatecas	22°45'26.9"	102°33'51.1"	2 418	Aceitilla, Girasol, Toloache
ZAC	Zacatecas	22°45'51.4"	102°38'21.2"	2 325	Sangre de grado
ZAC	Zacatecas	22°46'00.3"	102°35'03.8"	2 444	Chicalote
ZAC	Guadalupe	22°45'04.2"	102°27'10.4"	2 193	Calabacilla loca
ZAC	Loreto	22°16'19.3"	101°57'30.4"	2 047	Pirúl
ZAC	Guadalupe	22°40'53.5"	102°33'27.1"	2 376	Mezquite

Para estimar su produtividad en campo, una vez localizada la planta, se siguió la metodología propuesta por Mostacedo y Fredericksen (2000), que recomienda el método de muestreo por parcela cuadrada de 1 m x 1 m para plantas herbáceas, de 5 x 5 m para rastreras y de 10 x 10 m para arbustivas y arbóreas. En cada una de las parcelas se estimó la cobertura, densidad y frecuencia de plantas, así como el número de semillas por planta, de la totalidad de las plantas contenidas en la parcela respectiva. Se emplearon las variables densidad y número de semillas por planta para estimar el rendimiento potencial de semilla extrapolado a una hectárea en condiciones naturales. Para cada sitio de colecta se registraron las coordenadas de ubicación y altitud mediante un GPS y se realizó la georeferenciación utilizando el programa Google Maps.

Caracterización morfológica de semillas

Las semillas limpias se secaron a 60 °C por un periodo de 18 h. Posteriormente, se registró el peso (g) de 100 semillas tomadas al azar de cada una de las especies consideradas en el estudio, mediante una balanza analítica (Vlab V300®). A 10 semillas de cada una las especies se les midió largo, ancho y espesor (cm) utilizando un vernier y una cinta métrica, de acuerdo a la metodología propuesta por Pérez *et al.* (2006).

Extracción y caracterización de aceites

La extracción química de aceite se realizó utilizando un determinador de grasa y aceite (Soxtec System HT 1043), de acuerdo a la técnica aplicada por Loredo (2012). Todos los análisis se realizaron por triplicado.

Una vez extraídos los aceites se procedió a llevar a cabo la determinación de los siguientes parámetros, tomando en consideración las Normas Oficiales Mexicanas (NOM): índice de refracción (NMX-F-074-S 1981), índice de saponificación (NMX-F-174-S-1981), índice de acidez (NMX-F-101-1987), índice de yodo (NMX-F-408-S-1981) e índice de peróxidos (NMX-F-154-1987). En este estudio, considerando que cada especie produjo un contenido de aceite diferente, y que en su análisis se requieren diferentes cantidades de muestra, la caracterización realizada se hizo por duplicado, en función de la cantidad de aceite disponible de cada especie y estuvo concentrada en el aspecto químico.

También se realizaron espectros infrarrojos de las muestras extraídas en la región 600 a 4 000 cm⁻¹, en un espectrofotómetro modelo Nicolet is50® mediante la comparación de los picos de absorbancia de las señales obtenidas a través del análisis de los grupos funcionales presentes en cada una de las muestras de aceites. Para ello, se emplearon estándares de los ácidos grasos oléico, linoléico, linolénico y palmítico (Sigma-Aldrich®). Los gráficos se realizaron mediante el Programa Origin Pro 8.

Análisis estadístico

A las variables obtenidas se les calcularon parámetros de estadística descriptiva (medias y desviación estándar) y para rendimiento potencial de semilla y aceite, se realizaron análisis de varianza; la separación de medias se realizó mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$) utilizando el programa SAS (Statiscal Analysis Software, V9.1). Asimismo, se realizó un análisis de componentes principales (ACP) utilizando el programa InfoStat/L.

Resultados y discusión

Rendimiento potencial de semilla y de aceite

El análisis estadístico realizado muestra que existe diferencia estadística para el rendimiento potencial de semilla y rendimiento de aceite, en función de las especies vegetales en estudio ($p \leq 0.05$). *Agave* sp., resultó superior y estadísticamente diferente (DSH= 2457) al resto de las especies, al registrar un rendimiento potencial de semilla de $24\ 305\ kg\ ha^{-1}$. No obstante, ésta representa un caso especial dado que en las especies grandes de este tipo de plantas la maduración puede ocurrir entre los 10 y 25 años, mientras que en las plantas pequeñas de esta especie se puede presentar entre los cuatro y cinco años (García-Mendoza, 2002).

En la Figura 1 se destaca que cuatro especies registraron rendimientos potenciales de semilla superiores a $1\ 000\ kg\ ha^{-1}$, pero sobresalen, además de *Agave* sp., *A. mexicana*, *P. louisianica* y *D. inoxia*. Por el contrario, siete especies presentaron valores de rendimiento de semilla menores a $100\ kg\ ha^{-1}$, destacando entre ellas *L. tridentata* con sólo $0.8\ kg\ ha^{-1}$ a pesar de haber registrado densidades altas. Un grupo de especies se ubicaron con rendimientos potenciales de semilla intermedios, con excepción de *P. glandulosa*, todas ellas son de porte medio-bajo, herbáceas y rastreras. Respecto a *B. odorata*, resalta que a pesar de registrar una densidad alta por unidad de superficie y de contar con un alto número de semillas, no se reflejó en su rendimiento potencial debido al bajo peso de éstas. Similar comportamiento se observó con *L. tridentata* dado que sus semillas son muy livianas.

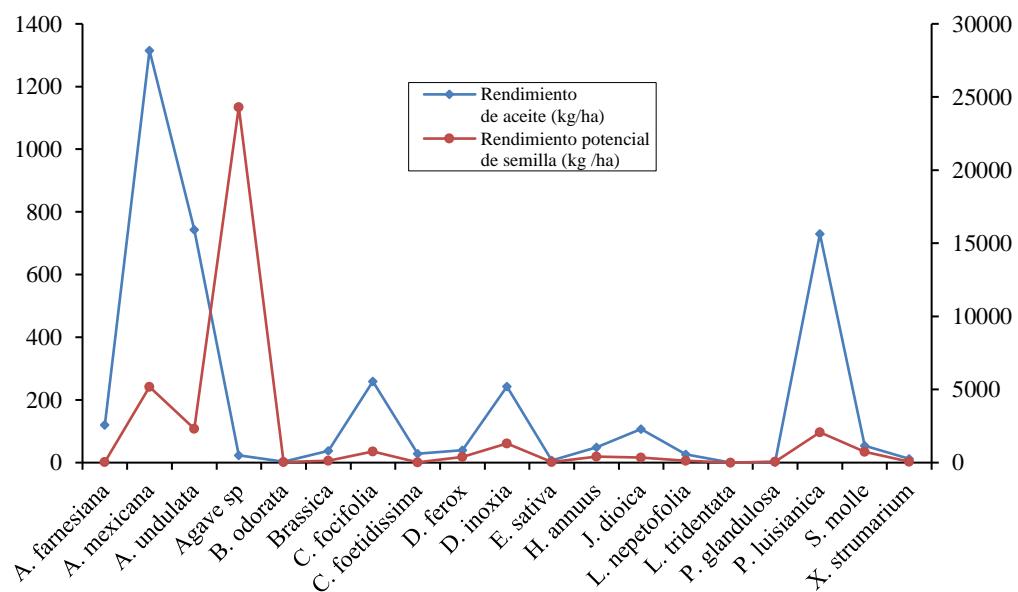


Figura 1. Relación entre rendimiento potencial de semilla y contenido de aceite.

En *X. strumarium* su reducido rendimiento pudo estar asociado a la presencia de un bajo número de semillas (dos semillas por fruto); sin embargo, es una especie a considerar ya que su semilla contiene 20.4% de aceite. En el caso particular de *Brassica* sp., su bajo rendimiento pudo ser resultado de su baja densidad y tamaño pequeño de semillas; no obstante, posee un alto porcentaje de aceite (30.3%) lo cual resulta interesante sobre todo si se considera pueda cultivarse de manera intensiva a fin de aumentar su rendimiento en semilla.

En otras oleaginosas cultivadas se han observado resultados muy contrastantes en el rendimiento, sobre todo si consideramos que muchos son en condiciones experimentales. Mazzani (2007) señala que *R. communis* puede llegar a producir entre 350 y 700 kg ha⁻¹ cuando se le proporcionan cuidados mínimos y hasta 1 250 kg ha⁻¹ en siembras ya tecnificadas. En Cuba, al evaluar diferentes accesiones de la misma especie se obtuvieron rendimientos de hasta 4 398 kg ha⁻¹ (Machado *et al.*, 2012).

Los resultados obtenidos para rendimiento de aceite de las especies estudiadas se muestran en la Figura 1. *A. mexicana* resultó la especie con el rendimiento más alto de aceite con 1315 kg ha⁻¹, estadísticamente diferente al resto de las especies (DSH= 773.2). *A. mexicana* resultó tan competitiva o mejor que algunos cultivos comerciales empleados actualmente en la producción de biodiesel, tales como soya *Glycine max* (335 kg ha⁻¹), girasol *Helianthus annuus* (568 kg ha⁻¹), cacahuate *Arachis hypogaea* (712 kg ha⁻¹), colza *Brassica napus* (832 kg ha⁻¹), piñón *Jatropha curcas* (950 kg ha⁻¹), higuerilla *Ricinus communis* (1 133 kg ha⁻¹), tung *Aleurites fordii* (1 204 kg ha⁻¹), según los reportan Martínez-Valencia *et al.* (2011). *A. undulata* y *P. lousianica* mostraron rendimientos interesantes de aceite de 743 y 730 kg ha⁻¹.

Estos son derivados de su gran número de frutos, tamaño y cantidad semillas y sobre todo de sus contenidos de aceite superiores a 30%. Sin embargo, sus valores son más bajos a los 5 772 L ha⁻¹ obtenidos en girasol por el INTA (1997), pero cercanos a los consignados por Rebora y Gómez (2007) para colza, donde en variedades con manejo se obtuvieron 1 466 L ha⁻¹. Por su parte, *A. mexicana* registró un rendimiento potencial de aceite de 1 315.9 kg ha⁻¹, valor superior al encontrado por Singh (2010) de 190 L ha⁻¹, por lo que se puede considerar que, con un manejo adecuado y altas densidades de plantas, los rendimientos podrían incrementarse. Se destaca que este rendimiento de aceite es superior al obtenido en *R. communis* en Cuba (1 130.2 kg ha⁻¹) (Machado *et al.*, 2012).

La Figura 1 resalta la tendencia de *C. ficifolia*, ya que presenta una combinación de alto rendimiento de semilla y contenido de aceites. Por el contrario, se observan los contrastes de las especies *A. undulata* de obtener un alto contenido de aceite con un rendimiento bajo de semillas y el caso particular de *S. molle* de generar gran número de semillas, pero con reducido porcentaje de aceite.

Porcentaje de aceite

En la Figura 2, se presentan los porcentajes de aceite obtenidos de las semillas de las especies utilizadas. Se destaca que seis especies presentaron porcentajes mayores a 30%, entre las que destacan: *C. ficifolia* (34.1), *C. foetidissima* (33.90), *P. lousianica* (33.6), *A. undulata* (31.40), *J. diodica* (32.86) y *Brassica* sp. (30.33). Estos valores son menores a los reportados por Martínez-Valencia *et al.* (2011) para oleaginosas cultivadas comercialmente como girasol *Helianthus annuus* (45-55%), canola *Brassica napa* (40-44%), palma *Elaeis guineensis* (44-57%), coco *Cocos nucifera* (65-75%), cacahuate *Arachis hypogaea* (48-50%) y cártamo *Carthamus tinctorius* (35-40%); o al reportado por Calderón *et al.* (2013) de 51% para palma. Los rendimientos más altos por su parte, se encuentran dentro de los valores observados por Cruz *et al.* (2015) para diversas accesiones de *Jatropha curcas*, que oscilaron entre 31 y 49%, así como dentro de aquellos mencionados por Martínez-Valencia *et al.* (2011) para esta misma planta que van de 20 a 60% y para *Ricinus communis* (26-66%). No obstante, resultan superiores a los rendimientos de soya *Glycine max* (18-20%) y algodón *Gossypium hirsutum* (18-25%), según los reportan Martínez-Valencia *et al.* (2011). En la Figura 2, también se aprecia que cinco de las especies utilizadas obtuvieron un porcentaje de aceite entre 10 y 30% y seis resultaron con un porcentaje de aceite menor al 10%.

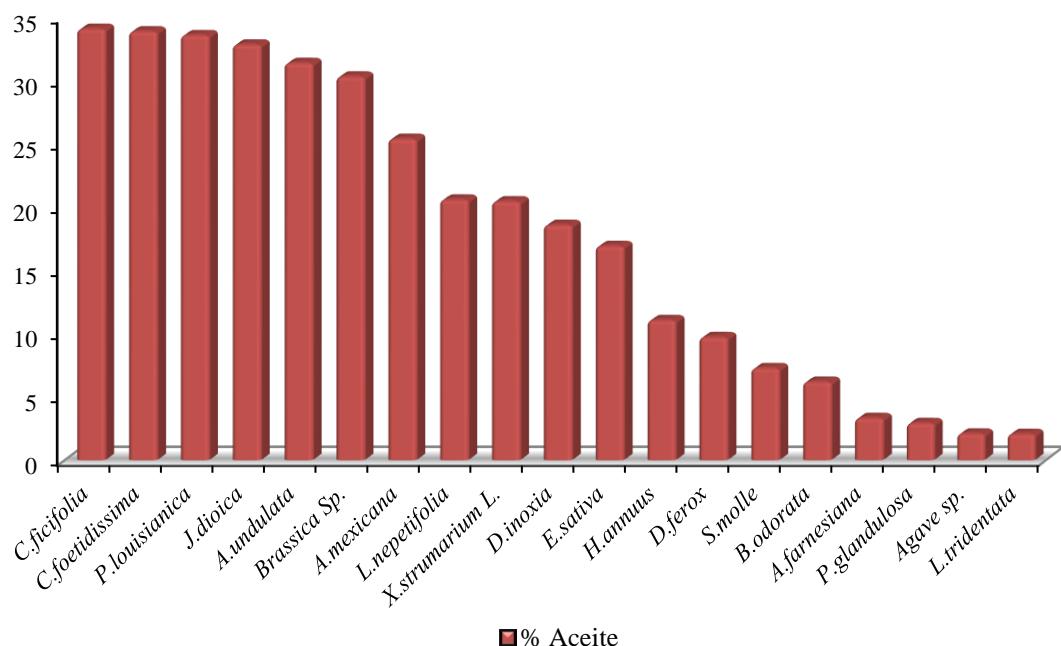


Figura 2. Porcentaje de aceite obtenido de las especies de plantas colectadas.

La Figura 3, elaborada con los dos primeros componentes principales, muestra que las variables de campo que influyen en el porcentaje y contenido de aceite son la densidad de plantas y el peso de 100 semillas (g), ya que especies como: *A. mexicana*, *D. inoxia*, *A. undulata*, *P. louisianica*, *C. ficiifolia* y *C. foetidissima*, se encuentran agrupadas, lo que indica un comportamiento similar de estas especies. En el caso de especies con mayor altura como *S. molle*, *A. farnesiana*, *L. tridentata* y *P. glandulosa* se asocian con una baja frecuencia y un bajo contenido de aceite. Asimismo, se observó la tendencia que la variable altura de planta se relaciona negativamente con el contenido de aceite, ya que ninguna de las especies arbóreas presentó porcentaje alto de aceite. Aunque también se observa que la variable de altura de planta muestra una tendencia a producir un rendimiento potencial de semillas más alto. En cuanto a los componentes, los dos primeros explican en conjunto un total de 49% de la variabilidad contenida en los datos.

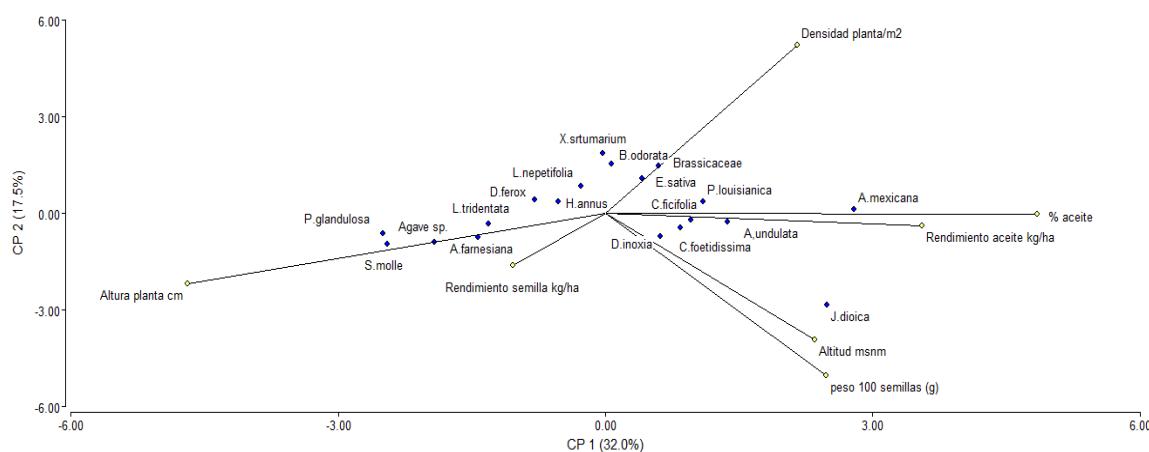


Figura 3. Comportamiento de 19 especies y las variables con los componentes principales 1 y 2.

Caracterización físico-química de aceites

La calidad y la eficiencia del biodiesel dependen del proceso y la calidad del aceite generado por el cultivo; es decir, aceites con baja concentración de ácidos grasos libres, altos en ácidos grasos monoinsaturados y sin gomas e impurezas, entre otras propiedades fisicoquímicas (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). Martínez-Sánchez *et al.* (2015) señalan que las características químicas más usadas para la clasificación y determinación de la calidad comercial de los aceites son: índice de yodo, saponificación, peróxidos y acidez, dentro de las características físicas destacan la gravedad específica, el índice de refracción, densidad y el punto de fusión. Los valores de los índices de refracción, saponificación, yodo, acidez y peróxidos, de los aceites contenidos en las especies estudiadas, se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Características físico-químicas de los aceites vegetales.

Especie	IR	IS (mg KOH g ⁻¹)	IY (g I ₂ 100 g ⁻¹)	IA (% ácido oleico)	IP (meq kg ⁻¹)
<i>A. farnesiana</i>	1.4768		60.68		
<i>A. mexicana</i>	1.473	119.31	117.94	11.71	0.39
<i>A. undulata</i>	1.487	141.48	123.8	11.25	0.75
<i>Agave</i> sp.	1.4762				0.68
<i>B. odorata</i>	1.4725	149.81	96.57		1.62
<i>Brassica</i> sp.	1.4715	174.17	29.45	3.13	0.79
<i>C. ficifolia</i>	1.4748		73.12	0.68	1.08
<i>C. foetidissima</i>	1.475	180.02	141.26	11.51	0.47
<i>D. ferox</i>	1.47	142.31		29.66	
<i>D. inoxia</i>	1.472	146.22	114.95	8.7	1.06
<i>E. sativa</i>	1.478	129.64	97.59	4.24	
<i>H. annuus</i>	1.4723	152.27	29.68	7.69	0.77
<i>J. dioica</i>	1.4725		113.49		
<i>L. nepetifolia</i>	1.4658	149.93	30.95	36.17	0.47
<i>P. glandulosa</i>	1.4757				
<i>P. louisianica</i>	1.4735	182.83	116.65	3.5	0.72
<i>S. molle</i>	1.485		99.4	26.8	0.79
<i>X. strumarium</i>	1.475		23.35	1.79	0.67

IR= índice de refracción; IS= índice de saponificación; IY= índice de yodo; IA= índice de acidez; IP= índice de peróxidos.

El índice de refracción (IR) de los aceites, registraron valores muy homogéneos, oscilando entre 1.473-1.487. El aceite de *R. communis*, uno de los aceites más utilizados en la producción de biodiesel presenta un valor de 1.47 o muy cercanos (ASTM, 2008). Algunas de las especies sobresalientes que mostraron esta característica fueron *Datura ferox* (1.47), *Datura inoxia* (1.472), *A. mexicana* (1.473) y *C. foetidissima* (1.475).

Los índices de saponificación (IS) registrados en los aceites de *C. foetidissima*, *P. louisianica* y *Brassica* sp., son muy semejantes a los valores obtenidos para *R. communis* (174.6, 176.3 y 173.8 mg KOH g⁻¹) señalados por Danlami *et al.* (2015), los aceites de estas especies podrían ser empleados en la producción de biodiesel. Vale la pena resaltar que algunos de los aceites obtenidos de las plantas estudiadas comparten características con los aceites de girasol, colza y ricino mencionados por CORPODIB (2003). Asimismo, en la industria de los cosméticos, Ruiz y Huesa (1991) observaron valores de IS para el aceite de Karité (*Butyrospermum parki*) de 180-190 mg KOH g⁻¹, dichos valores son similares con los aceites de *C. foetidissima* (180.02 mg KOH g⁻¹) y *P. louisianica* (182.83 mg KOH g⁻¹), lo que posibilita su potencial uso en la industria de los cosméticos.

Cruz *et al.* (2015) obtuvieron en *J. curcas*, uno de los insumos más empleados en la obtención de biodiesel, IS que oscilaron de 192 y 196 mg KOH g⁻¹, sólo *P. louisianica* se acercó a estos valores.

En relación al índice de acidez (IA), Martínez-Valencia *et al.* (2011) mencionan que valores mayores de 5% indican que el aceite contiene alta cantidad de ácidos grasos libres, generado por un alto grado de hidrólisis, lo cual afecta negativamente la eficiencia de la transesterificación en el proceso de producción de biodiesel. En el Cuadro 2, se aprecia que el aceite de las especies con IA menor de 5% son *Cucurbita ficifolia* (0.68%), *Brassica* sp. (3.13%), *Eruca sativa* (4.24%), *Proboscidea louisianica* (3.50%) y *Xanthium strumarium* (1.79%), lo que los hace aptos para la elaboración de biodiesel sin necesidad de llevar a cabo un pretratamiento del aceite para neutralizar los ácidos grasos libres. El aceite del resto de las especies presenta IA mayores de 5%, de las cuales *Datura ferox*, *Leonotis nepetifolia* y *Schinus molle* presentaron los valores mayores con 29.66, 36.17 y 26.8%, respectivamente.

Otros aceites utilizados para elaborar biodiesel como el de soya muestran un IA de 1.5% (Pinzi *et al.*, 2009), en tanto que los de palma de aceite (*Elaeis guineensis*), piñón mexicano (*Jatropha curcas*) e higuerilla (*Ricinus communis*) presentan valores para este índice de 4.95, 3.19 y 1.77%, respectivamente (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). Por su parte, Lafargue-Pérez *et al.* (2012) reportan para *J. curcas* valores de 11.84%.

El índice de yodo (IY) del aceite en las especies estudiadas mostró una fuerte oscilación de entre 23.35 a 141.26 g I₂ 100 g⁻¹ (Cuadro 2). Valores altos de IY indican altos grados de insaturación en los ácidos grasos de los triglicéridos, que provoca el biodiesel elaborado a partir de ellos, una tendencia mayor a oxidarse y bajos números de cetano, lo que a su vez redundaría en un biodiesel poco estable y de baja calidad de combustión en los motores diesel (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). Por esa razón, la norma europea EN-14214 establece un límite superior para el IY de 120 g I₂ 100 g⁻¹. En ese sentido, los aceites de *A. undulata* y *C. foetidissima*, con 123.8 y 141.26 g I₂ 100 g⁻¹, respectivamente, podrían producir un biodiesel que no se ajusta a la norma. No obstante, aceites con IY alto pueden ser empleados en la fabricación de cosméticos por la facilidad de absorberse por la piel (Londoño *et al.*, 2011) o bien en la obtención de aceites alimenticios de alta calidad.

Por otro lado, bajos valores de IY indican una mayor presencia de ácidos grasos saturados y una menor presencia de poliinsaturados, lo que brinda mayor estabilidad al ser menos propensos a la oxidación y con mayores números de cetano; sin embargo, estos ácidos grasos saturados tienden a solidificarse a temperaturas más altas, por lo cual su uso para biodiesel se debe restringir a regiones

tropicales, ya que en regiones con climas fríos los motores diesel pueden presentar problemas de arranque (Martínez-Valencia *et al.*, 2011). Lo más deseable en los IY, es que presenten valores bajos, dado que esto permite una mayor estabilidad del aceite en almacenamiento (Martínez-Sánchez *et al.*, 2015).

Aceites con valores bajos se pueden también emplear en productos de higiene personal. El IY registrado para el aceite de la palma africana *Elaeis guineensis* es de 52.29 g I₂ 100 g⁻¹ (Calderón *et al.*, 2013) y de 53 a 57 g I₂ 100 g⁻¹ (Martínez-Valencia *et al.*, 2011).

No obstante, de acuerdo con Gunstone *et al.* (2004) alrededor de 82% del aceite *E. guineensis* son ácidos grasos saturados, por lo que tiende a solidificarse a bajas temperaturas, de ahí que se recomienda usar el biodiesel elaborado a partir de éste solo en climas cálidos. Se podría inferir que los aceites de *Brassica* sp., *H. annuus*, *L. nepetifolia* y *X. strumarium*, con IY de 29, 29, 31 y 23 g I₂ 100 g⁻¹, podrían producir un biodiesel con ese problema. Estos mismos autores señalan valores de 121-143, 96-117, 127-142, 96-101 y 85 g I₂ 100 g⁻¹, para los cultivos de soya, colza, girasol, piñón mexicano e higuerilla, respectivamente. Por su parte, Armendáriz *et al.* (2015) mencionan, para biodiesel producido a partir de *R. communis*, un IY de 85 g I₂ 100 g⁻¹, valores similares a los de *B. odorata*, *C. ficiifolia*, *E. sativa* y *S. molle*.

Los índices de yodo (IY) obtenidos en los aceites de las especies estudiadas, por su grado de insaturación, se pueden considerar secantes, semi secantes y no secantes. Los secantes, por lo regular, son los que presentan un IY alto (Bailey, 1984) y pueden ser empleados en la producción de pinturas y barnices. Para este fin se podrían utilizar los aceites de las especies *C. foetidissima*, *J. dioica*, *D. inoxia*, y *P. louisianica* ya que tienen IY de 141.26, 113.49, 114.95 y 116.65 g I₂ 100 g⁻¹, respectivamente. Dentro de los no secantes se encuentran los aceites de *A. farnesiana*, *B. odorata*, *Brassica* sp., *C. ficiifolia*, *E. sativa*, *H. annuus*, *L. nepetifolia*, *S. molle* y *X. strumarium*. Estos aceites por sus características en condiciones de clima normales no solidifican. Como semisecantes se pueden considerar a *A. undulata*, *A. mexicana*, *D. inoxia*, *J. dioica* y *P. louisianica*, con características semejantes a aceites comerciales como el de ajonjolí y el de maíz (Ortega y Vázquez, 1993).

Los peróxidos son conocidos como compuestos de la descomposición primaria de la oxidación de las grasas y aceites (Gómez, 2010), por lo que aquellos valores de índice de peróxido (IP) cercanos a 0 meq kg⁻¹, se relacionan con un nivel de rancidez bajo; es decir, se oxidan lentamente permitiendo que el aceite conserve por más tiempo su calidad, dándoles una ventaja para su posible utilización posterior. Un valor alto de IP indica la presencia de oxidación; en este estudio los aceites de la mayoría de las especies vegetales estudiadas presentaron un IP menor a 1. De acuerdo con Luna-Guevara y Guerrero-Beltrán (2012) el IP y el IA son considerados indicadores de calidad y frescura de los aceites. Para aceite de palma africana se obtuvieron valores muy altos de peróxidos de 31.3 meq kg⁻¹ (Calderón *et al.*, 2013).

Espectrometría FTIR

En la Figura 4 se observa el espectro de los estándares de los ácidos grasos palmítico, oleico, linoleico y linolénico, determinado. De esta manera se confirmó el patrón de pureza de los estándares y permitió compararlos con las muestras de aceites de las especies estudiadas. Se observa, que el palmítico expresa en la huella dactilar siete picos ubicados en la región 1 187-1 319 cm⁻¹ que diferencian de los otros ácidos grasos los cuales no presentaron esos picos característicos.

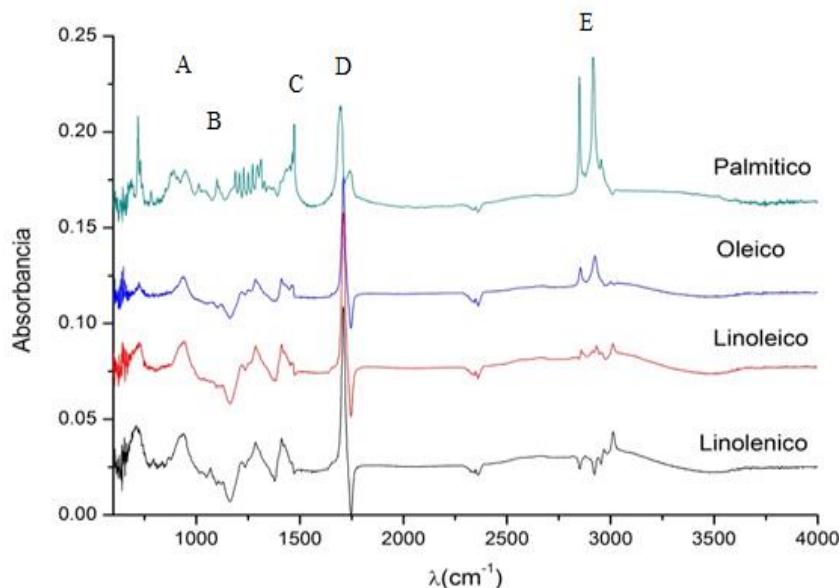


Figura 4. Espectro de infrarrojo de los ácidos grasos utilizados como patrón.

De acuerdo al espectro de los ácidos grasos y por comparación se detectaron los ácidos grasos presentes en cada una de las especies estudiadas. En el Cuadro 3 se aprecia una predominancia de los ácidos oleico y palmítico en la mayoría de las especies. En el caso de *C. foetidissima*, *A. undulata* y *J. dioica* se registraron los ácidos linoleico y linolénico, los cuales son importantes en la dieta ya que el cuerpo no los sintetiza, lo que les da un mayor valor agregado para su posible uso como aceites comestibles (Koolman and Röhm, 2004).

Cuadro 3. Principales ácidos grasos presentes en los aceites de las especies estudiadas.

Espece	Oleico	Linoleico	Linolénico	Palmítico
<i>Acacia farnesiana</i>			X	
<i>Argemone mexicana</i>	X			
<i>Apodanthera undulata</i>			X	
<i>Agave</i> sp.				X
<i>Bidens odorata</i>	X			
<i>Brassica</i> sp.				X
<i>Cucurbita ficifolia</i>	X			
<i>Cucurbita foetidissima</i>	X	X	X	
<i>Datura ferox</i>				X
<i>Datura inoxia</i>				
<i>Eruca sativa</i>	X			X
<i>Helianthus annuus</i>	X			X
<i>Jatropha dioica</i>		X		
<i>Leonotis nepetifolia</i>	X			
<i>Larrea tridentata</i>				X
<i>Prosopis glandulosa</i>	X			
<i>Proboscidea louisianica</i>				X
<i>Xanthium strumarium</i>				X

Vale la pena destacar que el ácido graso oleico (mono insaturado), además de ser de los componentes mayoritarios de los principales aceites comestibles, puede contribuir a reducir los niveles de glucosa y colesterol en la sangre, así como reducir el riesgo de enfermedades cardiovasculares y la obesidad (Luna-Guevara y Guerrero-Beltrán, 2012).

Conclusiones

Las especies silvestres estudiadas presentaron características agroproductivas distintivas interesantes en cuanto a productividad de semilla y contenido de aceite.

Seis especies (*C. ficifolia*, *C. foetidissima*, *A. undulata*, *J. dioica*, *P. louisianica* y *Brasica* sp.) obtuvieron porcentajes superiores a 30%, por lo que son de interés en la producción de aceite.

Considerando las características físicas y químicas de los aceites se sugiere su potencial utilización no solo en la industria de biocombustibles, sino su posible empleo en la industria alimenticia, farmacéutica y cosmética, así como en la obtención de productos de mayor valor agregado.

Los ácidos grasos oleico y palmítico son los que se encuentran presentes en la mayoría de los aceites de las especies estudiadas. *C. foetidissima*, *A. undulata* y *J. dioica* presentaron ácidos linoleico y linolénico comestibles de alto potencial antioxidante, funcional y nutracéutico.

Se recomienda realizar un análisis proximal a fin de considerar la pasta residual para la elaboración o complementación de algunos productos alimenticios o forrajeros, o bien en la obtención de productos bioactivos.

Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado técnica y financieramente por el Colegio de Postgrados, *Campus SLP*. Por su parte los autores M. A Flores-Villamil y J. F Vasco-Leal, agradecen al CONACYT por las becas de postgrado otorgadas. A la Universidad Autónoma de Zacatecas por facilitar sus laboratorios para realizar las pruebas de caracterización química de aceites.

Literatura citada

- Agüero-Rodríguez, J. C.; Tepetla-Montes, J. y Torres-Beristaín, B. 2015. Producción de biocombustibles a partir de la caña en Veracruz, México: perspectivas y riesgos socio-ambientales. *Ciencia UAT*. 9(2):74-84.
- American Society for Testing Materials. (ASTM). 2008. <http://www.astm.org/database.cart/historical/d6751-08.htm>.
- Armendáriz, J.; La Puerta, M.; Zavala, F.; García-Zambrano, E. and Del Carmen, M. 2015. Evaluation of eleven genotypes of castor oil plant (*Ricinus communis* L.). *Industrial Crops and Products*. 77(23):484-490.
- Bailey, E. 1984. Aceites y grasas industriales. Editorial Reverté, SA. España. 740 p.
- Calderón, A. A. I. A.; Monterrosas, S. M.; Arroyo, T. J. R.; Chávez, B. E.; Villegas, R. M. L. O. y Carranza, T. V. 2013. Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite crudo de la palma africana *Elaeis guineensis*. *Ing. Rev. Académica de la FI-UADY*. 17(2):103-109.

- CORPODIB. 2003. Corporación para el Desarrollo Industrial de la Biotecnología y Producción Limpia-Programa estratégico para la producción de biodiesel, combustible vegetal a partir de aceites vegetales: evaluación de las variedades más promisorias para la producción de aceite vegetal y su potencial implementación en Colombia. <http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/biodiesel/capitulo%202.pdf>.
- Cruz, R. B. A.; Pérez-Vázquez, A.; García, P. E.; Gallardo, L. F. y Marcos, S. R. 2015. Análisis químico morfológico comparativo de accesiones de *Jatropha curcas* L. del estado de Veracruz. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 6(3):589-601.
- Danlami, J.; Arsal, A and Zaini, M. 2015. Characterization and process optimization of castor oil (*Ricinus communis* L.) extracted by the soxhlet method using polar and non-polar solvents. J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 47:99-104.
- Estrada, C. e Islas, J. 2010. Energías alternas: propuesta de investigación y desarrollo tecnológico para México. Academia Mexicana de Ciencias. 1^{ra}. Ed. México. 136 p.
- García-Mendoza, A. 2002. Distribution of the genus *Agave* (Agavaceae) and its endemic species in México. Cactus Succulent J. 74:177-187.
- Gómez, E. 2010. Índice de peróxido. Informe núm. 4. Universidad Agraria de la Selva, Perú. <http://documents.mx/documents/informe-n04-indice-de-peroxido.html>.
- Gunstone, F. D.; Harwood, J. L. and Padley, F. B. 2004. The lipid handbook. Second edition. London. Chapman & Hall. 286 p.
- INTA. 1997. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación-Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos. <http://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-uia-practica-para-el-cultivo-de-girasol.pdf>.
- Koolman, J and Röhm, K. H. 2004. Bioquímica, Texto y Atlas. 3^a Ed. Editorial Médica Panamericana. 488 p. ISBN 84-7903-724-5.
- Lafargue-Pérez, F.; Barrera-Vaillant, N.; Assuncao-Nascimento, J.; Diaz-Vazquez, M. y Rodríguez-Martínez, C. 2012. Caracterización fisicoquímica del aceite vegetal de *Jatropha curcas* L. Tecnología Química. 32(2):162-165.
- Londoño, P.; Mires-Pitre, A. y Hernández, E. C. 2011. Extracción y caracterización del aceite crudo de la almendra de durazno *Prunus persica*. Avances en Ciencia e Ingeniería. 3(4):37-46.
- Loredo, S. 2012. Perfil de ácidos grasos en *Lupines uncinatus* S. Tesis doctoral, especialista en edafología. Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 155 p.
- Luna-Guevara, J. J. y Guerrero-Beltrán, J. A. 2012. Evaluación de algunos índices físicos y químicos de aceites extraídos de nuez pecanera, nuez de castilla y macadamia. Ciencia y Tecnología de Alimentos. 22(2):33-39.
- Machado, R.; Suárez, J. y Alfonso, M. 2012. Caracterización morfológica y agroproductiva de procedencias de *Ricinus communis* L. para la producción de aceite. Pastos y Forrajes. 35(4):381-392.
- Martínez-Sánchez, J.; Espinosa-Paz, N.; Fernández-González, I.; Martínez-Valencia, B. B.; De la Cruz-Morales, F. R. y Cadena-Iñiguez, P. 2015. Evaluación fisicoquímica del aceite de variedades criollas de *Arachis hypogaea* L. Revista Agroproductividad. 8(8):12-18.
- Martínez-Valencia, B. B.; Zamarripa-Colmenero, A.; Solís-Bonilla, J. L. y López-Ángel, L. J. México 2011. Calidad fisicoquímica de insumos bioenergéticos para la producción de biodiesel en México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Chiapas. México. Folleto técnico núm. 24. 63 p.

- Mazzani, E. 2007. El tártago: la planta, su importancia y usos. CENIAP Hoy. núm. 14. <http://www.cadenahortofruticola.org/admin/bibli/576tartago-importancia-usos.pdf>.
- Montiel-Montoya, J. 2010. Potencial y riesgo ambiental de los bioenergéticos en México. Ra Ximhai, Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable. 6(1):57-62.
- Mostacedo, B. y Fredericksen, T. 2000 Manual de métodos básicos de muestreo en ecología aplicada, Santa Cruz, Bolivia. BolFor. 88 p.
- NMX-F-074-S-1981. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de refracción.
- NMX-F-101-1987. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de acidez.
- NMX-F-154-1987. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de peróxidos.
- NMX-F-174-S-1981. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de saponificación.
- NMX-F-408-S-1981. Norma Oficial Mexicana. Determinación del índice de yodo por el método de análisis de Hanus.
- Ortega, M. y Vázquez, L. 1993. Caracterización fisicoquímica del aceite crudo y refinado de la semilla de *Proboscidea parviflora* (uña de gato). Grasas y Aceites. 44(1):30-34.
- Pérez, C.; Hernández, L.; Valerio, F.; García, G.; Caraballo, A.; Vázquez, T. y Tovar, M. 2006. Tamaño de semilla y relación con su calidad fisiológica en variedades de maíz para forraje. Agric. Téc. Méx. 32(3):341-352.
- Pinzi, S.; García, L.; López, J. J.; de Castro, L. M. D.; Dorado, P. G. and Dorado, M. 2009. The ideal vegetable oil-based biodiesel composition: a review of social, economical and technical implications. Energy & Fuels. 23(5):2325-2341.
- Rebora, C. y Gómez, A. 2007. Rendimiento de aceite de colza cultivada bajo riego. FCA Uncayo. 39(2):101-108.
- Reveles, S. F. O.; Rosales, S. R.; Nava, B. C. A.; Delgado L., E.; Cuéllar R., E. I.; Carrete C., F. O. y Ríos, S. J. C. 2010. Identificación de especies vegetales con potencial para la producción de biocombustibles líquidos en Durango, México. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 1(1):45-54.
- Reyes-Reyes, A. L.; Zamarripa-Colmenero, A.; Iracheta-Donjuan, L.; Espinosa-Zaragoza, S. y Won-Villarreal, A. 2015. Perspectivas de la producción de biodiesel proveniente de materia prima renovable. Agroproductividad. 8(4):19-23.
- Rodríguez, H. R. y Zamarripa, C. A. 2013. Competitividad de la higuerilla (*Ricinus communis*) para biocombustible en relación a los cultivos actuales en el edo. de Oaxaca, México. Rev. Mex. Agron. 17(32):306-318.
- Romero, P. A.; Hernández, J. M.; León, M. A. y Sangermán-Jarquín, D. M. 2015. Impacto en el mercado mexicano de maíz en ausencia de políticas de producción de biocombustibles en Estados Unidos de América. Rev. Mex. Cienc. Agríc. 6(5):1023-1033.
- Ruiz, M. y Huesa, J. 1991 La manteca de Karité. Grasas y Aceites. 42(2):151-154.
- Singh, D. 2010. Low cost production of ester from non-edible oil of *Argemone Mexicana*. Bio. Bioenergy. 34(4):545-549.
- Statistical Analysis Software. (SAS). SAS Institute Inc. Cary, NC. 2011.
- Wilches, F. A. M. 2011. Biocombustibles: ¿son realmente amigables con el medio ambiente? Rev. Colomb. Bioética. 6(1):89-102.