



AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.



CALIDAD AGROINDUSTRIAL DE INSUMOS BIOENERGÉTICOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN MÉXICO

Martínez-Valencia B.B.¹
Solís-Bonilla J.L.¹
Zamarripa-Colmenero A.¹

¹Campo Agrícola Experimental Rosario Izapa; Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias; Av. Progreso No. 5. Santa Catarina, Coyoacán, D.F. CP. 04010 México. Autor responsable e-mail: martinez.biaani@inifap.gob.mx

RESUMEN

E

El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad en el presente siglo, por lo que es necesario buscar nuevas alternativas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero provocados por los combustibles fósiles. La calidad del biodiesel debe garantizar el buen funcionamiento y la vida útil de los motores diesel, así como la satisfacción del consumidor. Diversos insumos bioenergéticos son potenciales como materia prima para la producción de biodiesel; sin embargo, la calidad del combustible puede ser afectada por las características fisicoquímicas que se encuentran en el aceite. El presente trabajo resalta la importancia de la calidad de diferentes insumos con potencial bioenergético que cumplan con los estándares internacionales y puedan ser alternativos para la producción de biodiesel.

Palabras clave: Aceite, biocombustible, higuera, piñoncillo.

INTRODUCCIÓN

El calentamiento del planeta se deriva en parte del modelo energético como sistema abierto, donde la humanidad, a través de sus actividades, emite a la atmósfera elevadas cantidades de dióxido de carbono (CO₂) a un ritmo tal que la naturaleza es incapaz de reciclar dicho compuesto. Este CO₂ se incrementa por el cambio en el uso del suelo (deforestación) y emisiones por el uso de los combustibles fósiles, lo cual trae como consecuencia que la radiación térmica atraviese la atmósfera y alcance la superficie de la tierra con más facilidad que la radiación térmica transmitida de la tierra hacia el espacio, produciéndose así un calentamiento en el planeta conocido como “efecto

invernadero” (Avellaneda, 2010). En la actualidad diversos países han apoyado la utilización de biocombustibles con el fin de reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y diversificar las fuentes de su abastecimiento y el desarrollo de alternativas al uso del petróleo a largo plazo sin desplazamiento de tierras aptas al cultivo de alimentos. En este contexto los biocombustibles, entendidos éstos como los obtenidos a partir de la biomasa con capacidad para utilizarse en el sector transporte, así como las especies anuales y perennes que son cultivadas específicamente para la producción de materiales energéticos en forma sólida, líquida o gaseosa, son una valiosa alternativa de diversificación.

El protocolo de Kyoto, que aborda el acuerdo internacional para reducir las emisiones de GEI, conocido oficialmente como la Convención Marco de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) sobre Cambio Climático, cuya iniciativa surgida en 1997 entró en vigor el 16 de febrero de 2005, menciona que los países pertenecientes a la Unión Europea, Canadá, Japón, Nueva Zelanda y Rusia tienen el compromiso de reducir en 5.2% las emisiones de gases tóxicos entre 2008 y 2012, respecto de lo que generaban en 1990. De igual forma 106 naciones en vías de desarrollo, como México, están comprometidas a informar sobre las acciones para disminuir las emisiones de carbono y sus niveles de polución ante la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (Díaz, 2008).

En cumplimiento de estos compromisos, México aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en febrero de 2008, la cual promueve la producción de insumos para bioenergéticos a partir de actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano sin poner en riesgo la seguridad

y soberanía alimentaria del país, además de procurar la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y de GEI, utilizando para ello los instrumentos internacionales. Con base en lo anterior, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en México estableció un Programa Nacional de Innovación e Investigación en Bioenergéticos para generar conocimientos y desarrollar tecnologías en cultivos agrícolas con potencial para la producción de biocombustibles con énfasis en cultivos ricos en aceites, tales como el piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) (Figura 1) y la higuera (*Ricinus communis* L.) (Figura 2) para elaborar biodiesel, además de cultivos ricos en azúcares como el sorgo dulce (*Sorghum bicolor*) y la remolacha (*Beta vulgaris*) para la elaboración de etanol (Zamarripa *et al.*, 2009).



Figura 1. Arbustos y frutos de piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) en proceso de evaluación agronómica.

La calidad y la eficiencia del biodiesel dependen del proceso de transformación y sobre todo de la calidad del aceite generado por las especies; es decir, deben ser aceites con baja concentración de ácidos grasos libres y altos en ácidos grasos monoinsaturados, libres de gomas e impurezas, lo cual garantizará el buen funcionamiento y la vida útil de los equipos de inyección de combustible en los motores diesel, además de la satisfacción o rechazo de sus consumidores a largo plazo. Estas razones son las consideraciones principales que sugieren la realización de análisis permanentes de calidad de insumos con potencial bioenergético, como los aceites de *R. communis* y *J. curcas*, buscando que cumplan con las especificaciones internacionales de calidad y puedan ser una alternativa para la producción de biodiesel. En este contexto el INIFAP estableció el primer laboratorio de bioenergía en el Campo Experimental Rosario Izapa, municipio de Tuxtla Chico, Chiapas, México, con el objeto de realizar análisis de calidad de aceite y biodiesel para apoyar las actividades de investigación en este rubro, considerando la selección de variantes biológicas de estas dos especies, su introducción a condiciones de cultivo, y la evaluación de diez parámetros de calidad de aceite y 21 de calidad de biodiesel.

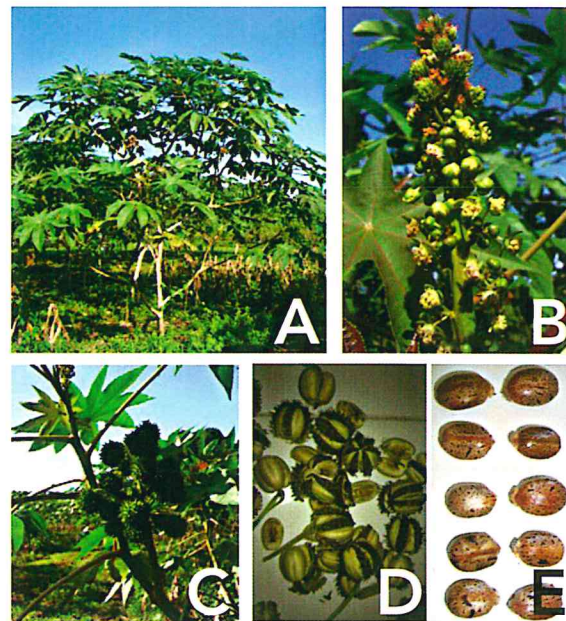


Figura 2. A: Hierba arbustiva de higuera (Ricinus communis L.); B-C: Inflorescencia y racimo ("panoja") de frutos inmaduro; D-E: Cápsula dehiscente y semillas maduras.

Biodiesel: una alternativa como fuente de energía renovable

El biodiesel se compone de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga, obtenidos mediante la transesterificación de aceites o grasas vegetales con un alcohol.

Los triglicéridos (principales componentes de los aceites vegetales o grasas animales) reaccionan con un alcohol de cadena corta en presencia de un catalizador usualmente ácido o básico para producir biodiesel y glicerina (Figura 3).



Figura 3. Formación de biodiesel y glicerina después de la transesterificación del aceite

El biodiesel, también llamado biocombustible, es una solución alternativa para el reemplazo parcial o total de aquellos combustibles derivados del petróleo; en forma líquida puede contribuir a la solución del problema energético. En la actualidad se definen como aquellos obtenidos a partir de biomasa que se encuentran en estado líquido en condiciones normales de presión y temperatura. Se emplean en calderas para la producción de calor, de electricidad, o en motores de combustión interna (Ballesteros, 2008). Además de provenir de una fuente renovable, el biodiesel puede ser almacenado en los mismos lugares donde se guarda el diesel de petróleo sin necesitar cambios de infraestructura; es un combustible más seguro y fácil de manipular debido a su alto punto de ignición (aproximadamente 150 °C) comparado con el diesel, que es de 60 °C aproximadamente (Van Gerpen, 2005).

Diversos factores influyen en la calidad del biodiesel, como son el tipo de aceite y la cantidad de alcohol utilizado, el tipo de catalizador usado, y las condiciones físicas del proceso como temperatura, agitación, presión y tiempo, así como la calidad del aceite empleado. En la actualidad se cuenta con normas estandarizadas que son documentos aprobados y reconocidos por un grupo de expertos de cada país para asegurar la alta calidad del biodiesel, tales como la Europea EN-14214 (European Committee for Standardization) y la estadounidense ASTM D6751 (American Standard Test Methods), basadas en una serie de parámetros físicos y químicos establecidos para medir sus propiedades y con ello permitir su comercialización.

Insumos para la producción de biodiesel

El biodiesel (Figura 3) es un biocombustible obtenido inicialmente a partir de plantas oleaginosas convencionales tales como palma africana (*Elaeis guineensis*) (Tapanes *et al.*, 2008), soya (*Glycine max*) y colza (*Brassica napus*), o a partir de oleaginosas alternativas como piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) higuera (*Ricinus communis* L.), coco (*Cocos nucifera* L.) (Kumar y Sharma, 2008), cacahuete (*Arachis hypogaea*), algodón (*Gossypium* spp.) (Georgogianni *et al.*, 2008), mostaza (*Sinapis* spp.) y olivo (*Olea europaea*), así como los derivados de aceites de fritura usados, o bien, de algas, como pueden ser especies del género *Chlorella* spp. (Liu *et al.*, 2008; Xiong *et al.*, 2008) y *Dunaliella* spp. (Takagi *et al.*, 2006).

El aceite de las semillas de piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) posee características agronómicas e industriales (Zamarripa *et al.*, 2009) y un alto contenido de lípidos y proteínas; la harina que se obtiene de la extracción del aceite puede usarse como alimento para animales una vez que se detoxifica (Kumar y Sharma, 2008; Martínez *et al.*, 2006). La higuera (*Ricinus communis* L.) es una planta oleaginosa que se encuentra ampliamente distribuida en México en condiciones rurales, adaptada a las condiciones climáticas de diferentes ambientes, y posee un potencial productivo para la producción de aceite. El aceite de higuera no es considerado como comestible debido a la ricinina, producto activo en la semilla, altamente tóxica para el hombre y los animales; sin embargo, posee múltiples usos en las industrias automotriz, farmacéutica, cosmetológica, química, aeronáutica, médica, de fertilizantes y pesticidas y, actualmente, en la industria de los biocombustibles.

Calidad de los aceites vegetales

La calidad del biodiesel depende de la pureza del aceite. Esta premisa obliga a realizar diferentes pruebas o controles de calidad en las etapas previas a la transesterificación, como es el análisis de las propiedades fisicoquímicas del aceite que influyen en la calidad del biodiesel, tales como:

Bajo contenido de ácidos grasos libres: simplifica el proceso de transesterificación, maximiza su eficiencia, rendimiento, y reduce pérdidas en forma de jabones. Para lograr lo anterior se considera dentro de los principales parámetros a modificar al contenido de ácidos grasos libres (% AG). Para poder realizar la transesterificación Van Gerpen (2005) recomienda que el porcentaje de AG debe ser inferior a 5%, mientras que Knothe *et al.* (2005) establecen que no debe superar el 2%. En ambos límites se depende del tipo de tecnología que se aplica en el proceso de producción del biodiesel. En fábricas continuas la acidez de la materia prima se especifica en menos de 0.1%, mientras que en las discontinuas se consideran como admisibles valores de 3 o 4% y puede producirse biodiesel cumpliendo los estándares de calidad.

Bajo contenido de insaponificables: referidos especialmente a gomas y fosfolípidos que pueden dar lugar a menores rendimientos en la producción de biodiesel y a la formación de impurezas y depósitos durante su combustión en el motor (Castro *et al.*, 2007).

Bajo contenido de agua: este problema puede existir cuando se trabaja con aceites usados, ya que el agua favorece la formación de ácidos grasos libres y de jabones (Castro *et al.*, 2007).

Bajo contenido de fósforo: es importante para evitar emulsiones durante el proceso de producción y purificación del biodiesel, así como de materiales insolubles que constituyen impurezas en el combustible (Castro *et al.*, 2007).

Bajo índice de yodo: siempre y cuando el clima del lugar donde será utilizado el biodiesel lo permita, ya que a menor índice de yodo mayor será la estabilidad del combustible y con estas características puede ser almacenado durante más tiempo, tanto antes de su uso como en el mismo motor, sin sufrir degradación. Sin embargo, si los valores de yodo son demasiado bajos, el combustible empezará a cristalizar (solidificar) a mayores temperaturas impidiendo su uso en climas fríos. Por esta razón se debe dar preferencia a los aceites con ácidos grasos monoinsaturados en lugar de utilizar los saturados.

No se requiere obligatoriamente utilizar un aceite totalmente refinado: Muchos de los pasos de la refinación del aceite para fines comestibles (como la desodorización o blanqueado) son innecesarios al momento de producir biodiesel y sólo añaden costo al combustible. Los procesos de refinamiento que sí son necesarios son los de refinación química, neutralización y desgomado del aceite (Matthys, 2003).

Avances de investigación del INIFAP

El estudio realizado sobre la calidad del aceite de piñón mexicano se enmarca en la estrategia de investigación y desarrollo de biocombustibles del INIFAP, que considera como un elemento la caracterización bioquímica de los aceites de especies promisorias para la producción de biodiesel. En este estudio se evaluó el contenido de aceite y proteínas en semillas de 138 genotipos de piñón mexicano establecidos en el Banco Nacional de Germoplasma del INIFAP, ubicado en el estado de Chiapas, México, así como la composición de ácidos grasos y propiedades fisicoquímicas. Los resultados del análisis bioquímico de las semillas de *Jatropha curcas* L. mostraron valores de entre 23.3 y 59.8% en el contenido de aceite (Figura 4) y de 21.5 a 67% en el contenido de proteínas (Figura 5).

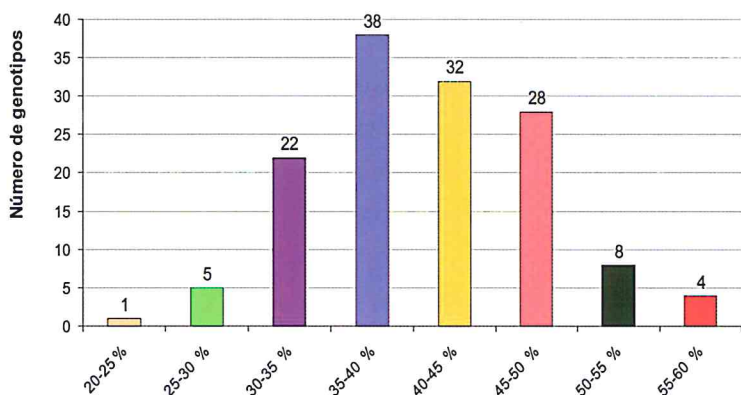


Figura 4. Contenido total de aceite en 138 genotipos de piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.).

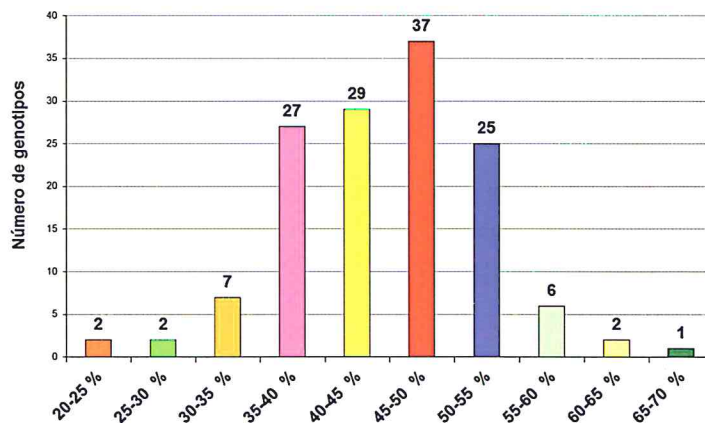


Figura 5. Frecuencia del contenido de proteínas en 138 genotipos de piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.).

Resaltan de lo anterior 12 de los 138 genotipos evaluados con contenidos de aceite superiores a 50%, y 40 genotipos con valores iguales o superiores a 45% que sugieren selecciones promisorias para la producción de biodiesel.

En el Cuadro 1 se resume las propiedades físicas y químicas del aceite de piñón mexicano evaluado en el Laboratorio de Bioenergía del INIFAP.

CUADRO 1. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL ACEITE DE PIÑÓN MEXICANO (*Jatropha curcas*)

Densidad (g. ml ⁻¹) a 40 °C	Viscosidad (mm ² .s ⁻¹) a 40 °C	Índice de acidez (%)	Índice de yodo (g I ₂ .100 g ⁻¹ aceite)	Índice de saponificación (mg KOH. g ⁻¹)	Estabilidad de oxidación (h) a 110 °C
0.89 ± 0.01 - 0.90 ± 0.02	27.22 ± 0.08 - 32.70 ± 0.16	2.90 ± 0.51 - 3.66 ± 0.16	96.85 ± 5.21 - 103.66 ± 1.58	248 ± 3.64 - 256 ± 1.98	9.94 ± 0.013

± Desviación estándar.

Las pruebas de estabilidad de oxidación a 110 °C, como lo establece la Norma Europea EN14214, mostraron que el aceite de piñón mexicano puede estar almacenado hasta un máximo de siete meses a una temperatura de 30 °C. Después de ese tiempo se inicia su oxidación, lo que ocasiona que se torne rancio y despidan olor desagradable, disminuyendo así su calidad. Estudios realizados por diversos autores establecen que el porcentaje de ácidos grasos libres presentes en el aceite debe ser inferior a 5%; en la presente evaluación éstos fluctuaron entre 2.9 y 3.6%, lo que significa que están en el rango permisible (Cuadro 1) ya que ello puede simplificar el proceso de producción de biodiesel (transesterificación) y maximizar su eficiencia, rendimiento y reducción de pérdidas en forma de jabones.

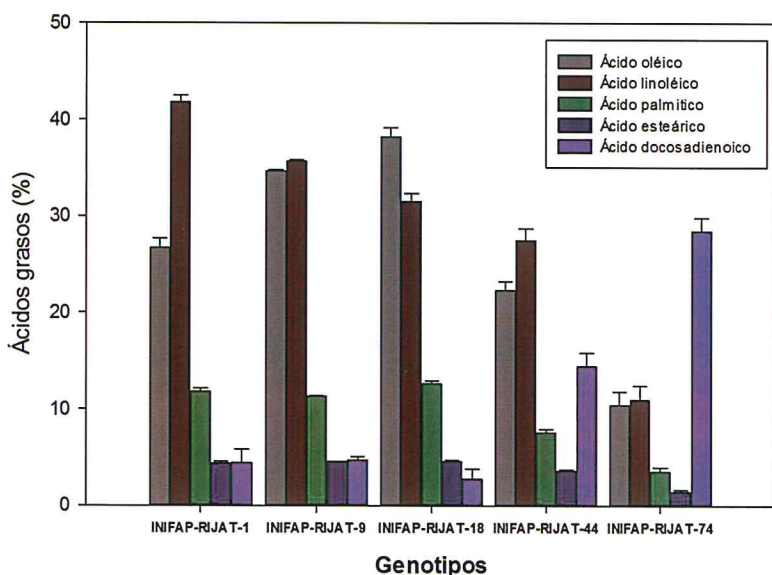
Las características fisicoquímicas de los aceites vegetales varían dependiendo de su origen, como se puede observar en el Cuadro 2.

CUADRO 2. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DE DIFERENTES ACEITES VEGETALES

Tipos de aceite	V (mm ² s ⁻¹ a 40° C)	D (gcm ⁻³)	ÍA (%)	IY (g I ₂ /100 g)	IS (mg KOH/g)	MI (%)	Referencia
Soya	33.1	0.914	1.5	121-143	190-194	1	Pinzi <i>et al.</i> , 2009; Canakci y Sanli, 2008
Colza	37.3	0.912	-	96-117	-	-	Pinzi <i>et al.</i> , 2009; Canakci <i>et al.</i> , 2008
Girasol	34.4	0.916	-	127-142	-	-	Pinzi <i>et al.</i> , 2009; Canakci <i>et al.</i> , 2008
Palma	39.6	0.918	4.95	53-57	196-206	0.3	Agarwal, 2007; Mittelbach y Remschmidt, 2004
Piñón mexicano	30.92	0.898	3.19	96-101	250	0.4	*Martínez <i>et al.</i> , 2011
Higuerilla	297	0.945	1.77	85	117-187	0.5	*Martínez <i>et al.</i> , 2011

Viscosidad (V), Densidad (D), Índice de acidez (IA), Índice de Yodo (IY), Saponificación (S), Material Insaponificable (MI).
*Resultados obtenidos en el laboratorio de biodiesel del INIFAP.

En el Cuadro 2 se observa que el aceite de palma africana tiene el mayor índice de acidez con 4.95%, lo que afecta el rendimiento de la reacción y produce pérdidas por refinamiento (Mittelbach y Remschmidt, 2004). De acuerdo con la norma europea, la concentración de índice de yodo no debe exceder el límite de 120 I₂.100 g⁻¹. Con respecto a estos valores, en el Cuadro 2 se observa que el aceite de piñón mexicano contiene entre 96 y 101 I₂.100 g⁻¹ y el de higuerilla 85 I₂.100 g⁻¹, lo que significa que cumple con la norma internacional. Este parámetro indica que a menor índice de yodo, mayor estabilidad del combustible, y podrá ser almacenado durante más tiempo tanto antes de su uso como en el mismo motor sin sufrir degradación. Los principales ácidos grasos que se encontraron y cuantificaron en el aceite de piñón mexicano fueron ácido oléico (8.4 a 38.2%), ácido linoléico (10.2 a 42.3%), ácido palmítico (3.4 a 12.9%), ácido esteárico (1.2 a 4.8%), ácido linolénico (0 a 0.26%), ácido docosadienoico (2.8 a 29.4%) y ácido lignocérico (0.14 a 8.3%) (Figura 6).



Investigaciones del Programa Nacional de Bioenergía consideran que el aceite de semilla del piñón mexicano (*Jatropha curcas*) puede ser clasificado como aceite oléico-linoléico (Figuras 6 y 7), lo que lo ubica como un aceite vegetal ideal para biodiesel.

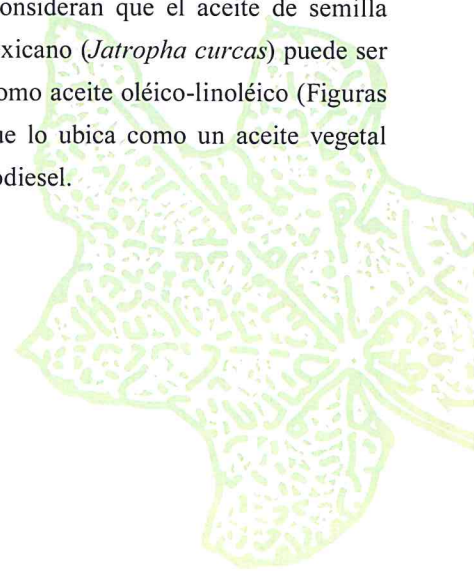


Figura 6. Principales ácidos grasos presentes en el aceite de cinco genotipos de piñón mexicano (*Jatropha curcas*).

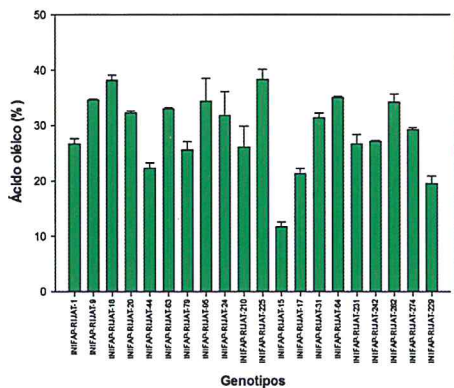


Figura 7. Ácido oléico presente en aceite de 20 genotipos de piñon mexicano (*Jatropha curcas*).

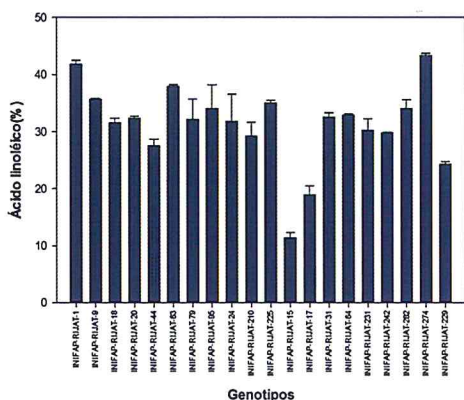


Figura 8. Ácido linoléico presente en el aceite de 20 genotipos de piñon mexicano (*Jatropha curcas*).

Comparado con otros aceites vegetales, el de piñon mexicano presenta un contenido más elevado en oléico, superando al de girasol y de soya en 81 y 63%, respectivamente, por lo que se considera un aceite de mayor calidad para la producción de biodiesel. Por estas características fisicoquímicas, así como por su contenido de ácido linoléico (0 a 0.26%), cumple con la norma europea que indica que el contenido máximo debe ser de 12%.

CONCLUSIONES

Los cultivos energéticos constituyen la base para la producción de biocombustibles, con la ventaja de poderse cultivar en cualquier parte del mundo. Representan parte de la solución en la búsqueda de la autosuficiencia energética de los países y la producción de biocombustibles a gran escala puede contribuir a minimizar la dependencia de los combustibles fósiles y los efectos del cambio climático.

En los cultivos agrícolas con potencial bioenergético es importante determinar la calidad de los aceites y del biodiesel con los estándares internacionales, con el fin de garantizar su eficiencia en los motores.

En virtud de la gran diversidad genética y bioquímica en cultivos bioenergéticos, como el piñon mexicano (*Jatropha curcas* L.) y la higuera (*Ricinus communis* L.), expresada tanto en contenido de aceites como en composición de ácidos grasos, es factible seleccionar materiales genéticos que cumplan con los estándares internacionales de calidad que se requieren.

LITERATURA CITADA

- Agarwal A.K. 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science* 33(3): 233-271.
- Avellaneda V.F.A. 2010. Producción y caracterización de biodiesel de palma y de aceite reciclado mediante un proceso batch y un proceso continuo con un reactor helicoidal. Tesis. Universitat Rovira i Virgili, Medallin Colombia 244 p.
- Ballasteros, M. 2008. Los Biocarburantes: http://imagenes.racc.es/pub/ficheros/adjuntos/adjuntos_mercedes_ballasteros_jzq_ed94ed27.pdf. (25 de noviembre de 2010).
- Canakci M., Sanli H. 2008. Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 35 (5): 431-441.
- Castro P., Coello J., Castillo-Lima L. 2007. Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. 1ª Edición. 93 p.
- Díaz B.A. 2008. Un análisis económico político para México del Protocolo de Kyoto. DELOS: Desarrollo local sostenible. <http://eumed.net/rev/delos/01/>. (14 junio 2011).
- Georgogianni K.G., Kontominas A.G., Pomonis P.J., Avlonitis D., Gergis V. 2008. Alkaline conventional and in situ transesterification of cottonseed oil for the production of biodiesel. *Energy & Fuels*. 22 (3):2110-2115.
- Knothe G., Krahl J., Van Gerpen J. 2005. The biodiesel handbook. USA: AOCs Press. 98-157 pp
- Kumar A., Sharma S. 2008. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Industrial Crops and Products*. 2: 1-10.
- Liu Z.Y., Wang G.C., Zhou B.C. 2008. Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*. 99(11):4717-4722.
- Matthys D. 2003. Producing Biodiesel A Simple Affair. A Practical Guide To Read Before Building Your Plant. Ghent, Bélgica: American Soybean Association. 23 p.
- Martínez H.J., Siddhuraju P., Francis G., Dávila O., Becker K. 2006. Chemical composition, toxic/antimetabolic constituents and effects of different treatments on their levels, in four provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Food Chemistry*. 96: 80-89.
- Martínez-Valencia B.B., Zamarripa-Colmenero A., Goytia-Jiménez M.A., Solís-Bonilla J.L., López-Ángel L.J. 2011. Innovación tecnológica ante el cambio climático: desafío para la seguridad alimentaria. Memoria PCCMCA, El Salvador.
- Mittelbach M., Remschmidt C. 2004. Biodiesel-The comprehensive handbook. 1st ed. Graz: Mittelbach M.
- Pinzi S., García L.L., López-Jiménez J.L., De Castro M.D., Dorado G., Dorado P.M. 2009. The Ideal Vegetable Oil-based Biodiesel Composition: A Review of Social, Economical and Technical Implications. *Energy & Fuels*. 23: 2325-2341.
- Takagi M., Karseno S., Yoshida T. 2008. Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae *Dunaliella* cells. *J Biosci Bioeng*. 101(3):223-226.
- Tapanes N.C.O., Aranda D.A.G., Mesquita J.W., Antunes O.A.C. 2008. Transesterification of *Jatropha curcas* oil glycerides: Theoretical and experimental studies of biodiesel reaction. *Fuel*. 87. 2286-2295.
- Van-Gerpen J. 2005. Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology* 86 (10):1097-1107.
- Xiong W., Li X., Xiang J., Wu Q. 2008. High-density fermentation of microalga *Chlorella* protothecoides in bioreactor for microbio-diesel production. *Appl Microbiol Biotechnol*. 78(1):29-36.
- Zamarripa-Colmenero A., Ruiz-Cruz P., Solís-Bonilla J.L., Martínez-Herrera J., Olivera-De los Santos A., Martínez-Valencia B. 2009. Biocombustibles: Perspectivas de producción de biodiesel a partir de *Jatropha curcas* L. en el Tópico de México. Folleto Técnico núm. 12. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Rosario Izapa, Tuxtla Chico, Chiapas, México.46 p.