

## El Potencial de las Plantas para Suministrar Materia Prima para la Producción de Biocombustibles

Víctor M. Loyola-Vargas, Jorge Luis García-Almada, María Teresa Cadenas-González y Rosa M. Galáz-Ávalos

*Unidad de Bioquímica y Biología Molecular de Plantas, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43 No. 130, Col. Chuburná de Hidalgo, CP 97200, Mérida, Yucatán, México* \*Correo electrónico [vmloyola@cicy.mx](mailto:vmloyola@cicy.mx)

### RESUMEN

Los biocombustibles surgen como opción para mitigar los efectos antropocéntricos sobre el cambio climático, afectado principalmente por gases de efecto invernadero. En la última década se ha visto un marcado incremento en la utilización de biocombustibles como bioetanol y biodiesel, siendo la Unión Europea el principal productor y consumidor de biodiesel, mientras que EUA y Brasil lo son para el caso del bioetanol. Sin embargo, para que estas tecnologías contribuyan significativamente al desarrollo sustentable, es necesario implementarlas a una escala mayor. En este sentido, toma importancia el aprovechamiento de materias primas lignocelulósicas para obtener bioetanol y especies como *Jatropha curcas* para aprovechar tierras marginales y generar biodiesel a partir de los aceites contenidos en sus semillas, así como el uso de microorganismos modificados. Para el caso de *J. curcas*, si bien es cierto que puede sobrevivir en condiciones poco favorables para la agricultura, los rendimientos de producción de aceites son muy bajos. Para que *J. curcas* tenga éxito como cultivo energético será necesario generar variedades con mayor resistencia a condiciones de poca humedad, bajas temperaturas y plagas, también es muy importante optimizar las vías de biosíntesis de ácidos grasos en las semillas de *J. curcas* para que produzcan aceites que permitan obtener biodiesel de mejor calidad.

**Palabras clave:** biocombustibles, bioetanol, biodiesel, *Jatropha curcas*.

### ABSTRACT

Biofuels arise as an option to mitigate anthropocentric effects on climate change, mainly affected by greenhouse gases. The use of biofuels has been increasing in the last decade, with the EU as the largest producer and consumer of biodiesel, while United States and Brazil for bioethanol. Nevertheless, a larger scale implementation of these technologies is needed to contribute significantly to sustainable development. In this sense, becomes important the use of lignocellulosic feedstocks for bioethanol production and species as *Jatropha curcas* to use

marginal land to generate biodiesel, as well as modified microorganisms. The development of varieties with increased resistance to drought, low temperatures and pests is needed for the success of *J. curcas* as an energy crop, also is very important optimize the fatty acids biosynthesis pathway in *J. curcas* seeds to obtain better biodiesel quality.

**Keywords:** biofuels, bioethanol, biodiesel, *Jatropha curcas*.

## INTRODUCCIÓN

Nuestro clima está cambiando y ahora hay un reconocimiento científico, social y político de que es consecuencia del aumento antropocéntrico de los gases de invernadero. Los biocombustibles, combustibles derivados de materiales vegetales, tienen el potencial de aportar parte de la solución para la disminución de dichas emisiones. Los biocombustibles provienen de fuentes renovables que pueden ser cultivadas en muy diferentes ambientes (Pickett, 2008). La importancia de las fuentes de energía renovable está aumentando a medida que las presiones medio-ambientales y geopolíticas incentivan a los gobiernos a buscar alternativas a los combustibles fósiles. Sin embargo, las fuentes de energía renovables, son más caras que las fuentes fósiles, y sólo han sido desarrolladas exitosamente en mercados que brindan suficientes incentivos para éstas, como es el caso de Alemania y España, en donde existen estímulos asociados a la tarifa que admiten el desarrollo de proyectos rentables (Edgard, 2011).

En la última década se ha presentado un crecimiento exponencial en la producción mundial de biodiesel y bioetanol, que ha pasado de 30 PJ en el año 2000, a 572 PJ en el año 2009 para el

caso del biodiesel, siendo la Unión Europea (UE) el principal productor y consumidor de este bioenergético. Por otro lado, la producción global de bioetanol ha pasado de 340 PJ en el año 2000 a 1540 PJ en el año 2009, con Estados Unidos de América (EUA) como el principal productor de dicho biocombustible, seguido por Brasil (Lamers *et al.*, 2011).

Hasta el día de hoy el etanol ha sido el biocombustible más utilizado, en parte debido a un amplio conocimiento de sus características y de metodologías bien establecidas para su producción industrial, principalmente para la industria de alimentos y bebidas. Sin embargo, es posible que el etanol no sea la mejor opción como biocombustible, sobre todo debido a ciertos problemas técnicos relacionados con los motores de combustión interna, un ejemplo de esto puede ser su alta solubilidad en agua, lo cual dificulta su purificación y puede generar problemas en los sistemas de combustión, así como su bajo contenido energético —comparado con los combustibles normales— (Elshahed, 2010). En el año 2008 se produjeron alrededor de 87 ggalitros de combustibles líquidos mundialmente, lo cual es casi el volumen de combustible líquido consumido por Alemania el mismo año (Somerville *et al.*,

# Artículos

2010). Esencialmente, todo este combustible fue producido a partir de cultivos desarrollados inicialmente para la producción de alimentos. Es claro que el etanol proveniente de materiales lignocelulósicos es mucho mejor que el etanol que proviene de maíz en términos de los costos ambientales involucrados (Hill *et al.*, 2009) y de la ganancia energética obtenida.

Si las selvas tropicales, turberas, sabanas o pastizales se utilizan para producir biocombustibles se crea un déficit negativo de carbono al liberar entre 17 y 420 veces más bióxido de carbono que las reducciones que estos biocombustibles proporcionarían al desplazar a los combustibles fósiles (Fargione *et al.*, 2008; Scharlemann & Laurance, 2008). En tanto que los biocombustibles obtenidos a partir de desechos agrícolas o provenientes de cultivos sembrados en tierras abandonadas o degradadas prácticamente no tienen impacto en los gases invernadero (Fargione *et al.*, 2008), o incluso pueden disminuir la emisión de este tipo de gases (Sagar & Kartha, 2007). Otro costo ambiental que varía entre los biocombustibles son las emisiones de gases traza. Por ejemplo, los cultivares que requieren fertilizantes nitrogenados, tales como maíz o colza, pueden ser una importante fuente de óxido nítrico.

La expansión actual de los mercados energéticos y como resultado de las nuevas políticas energéticas y medio ambientales, el papel de la agricultura está cambiando. Entre los cambios más

significativos se encuentra la creciente función del sector agrícola como proveedor de materia prima para la producción de biocombustibles líquidos para el transporte -etanol y biodiesel-. El cultivo de plantas para producir bioenergía representa una nueva fuente de demanda para los productos agrícolas (Wiebe *et al.*, 2008). Si bien esta nueva actividad es una promesa para la creación de ingresos y empleo, al mismo tiempo genera una creciente competencia por los recursos naturales, en particular tierra y agua, especialmente en el corto plazo.

La producción actual de biocombustibles basada en azúcar y almidón de cultivos (etanol) y de semillas oleaginosas (biodiésel) se conoce generalmente como biocombustibles de primera generación. Una segunda generación de tecnologías, en desarrollo, también puede hacer posible el uso de materiales lignocelulósicos para la producción de bioetanol. También se encuentran en desarrollo la tercera y cuarta generaciones de biocombustibles, basadas principalmente en el uso de microorganismos modificados genéticamente. En este último caso ya se han modificado microorganismos, como *Escherichia coli*, para producir una mezcla de alcanos (los constituyentes de la gasolina, el biodiésel y el combustible para avión) (Schirmer *et al.*, 2010) o también para producir ésteres de los ácidos grasos (biodiésel) a partir de hemicelulosas como fuente de carbono (Steen *et al.*, 2010).

# Artículos

La celulosa es el material biológico más abundante en la tierra. El desarrollo de una segunda generación de biocombustibles basada en celulosa, podría ampliar significativamente el volumen y la variedad de las materias primas que pueden ser utilizadas para la producción de etanol. Los desechos celulósicos, incluidos los desechos procedentes de la agricultura (paja, tallos y hojas) y la silvicultura, desechos generados a partir de la transformación (cáscaras de nueces, bagazo de caña de azúcar y aserrín) y desechos orgánicos municipales, pueden ser fuentes potenciales de materia prima para la fabricación de biocombustibles. Sin embargo, también es importante considerar el papel crucial que la descomposición de la biomasa juega en mantener la fertilidad y textura del suelo; un retiro excesivo de desechos para la producción de bioenergía podría tener efectos negativos (Carroll & Somerville, 2009; Wiebe *et al.*, 2008).

La segunda generación de materias primas y biocarburantes podría también ofrecer ventajas en términos de reducción de emisiones de gases invernadero. La mayoría de los estudios proyectan que en el futuro, los combustibles provenientes de cultivos perennes, maderables y residuos agrícolas podrían reducir drásticamente el ciclo de vida de los gases invernadero en relación con los combustibles derivados del petróleo y a los biocombustibles de primera generación (Wiebe *et al.*, 2008).

## ¿PUEDEN LOS BIOCOMBUSTIBLES SER PRODUCIDOS EN TIERRAS MARGINALES?

Algunos de los cultivos utilizados para producir biocombustibles pueden tolerar condiciones medio ambientales que no pueden tolerar los cultivos para alimentos y por lo tanto ofrecen la oportunidad de volver productiva una tierra que presenta pocos beneficios económicos. Existen importantes cantidades de tierra marginal que podrían dedicarse a la producción de biocombustibles, reduciendo así el conflicto con los cultivos alimentarios y ofreciendo una nueva fuente de ingreso para los agricultores. El cálculo más reciente sobre el área agrícola global abandonada es de entre 385 y 472 millones de hectáreas (Campbell *et al.*, 2008). Si bien esas tierras podrían ser menos productivas y por lo tanto ser de alto riesgo, su uso para producir biocombustibles podrían producir beneficios secundarios, tales como la restauración de vegetación degradada, secuestro de carbono y servicios ambientales locales (Wiebe *et al.*, 2008).

El manejo de cualquier cultivo en tierras marginales con bajos niveles de agua y nutrientes podría resultar en bajos rendimientos. *J. curcas* y sorgo dulce, que son tolerantes a la sequía, no son la excepción. Para producir niveles de rendimiento comerciales aceptables, las plantas no pueden ser estresadas más allá de ciertos límites: de hecho, estas plantas se beneficiarían de niveles modestos adicionales de agua y nutrientes.

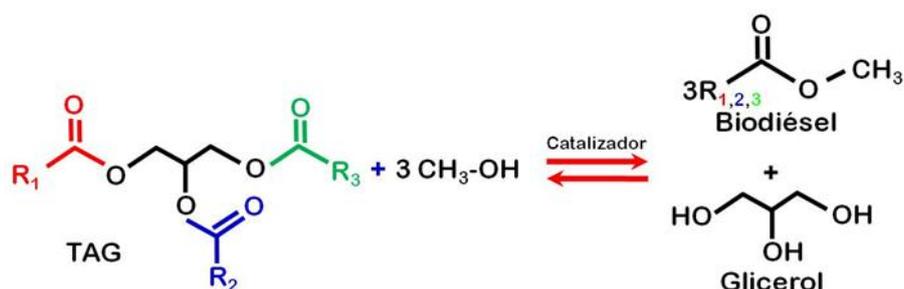
# Artículos

Se ha estimado que en una plantación de *J. curcas* se requieren aproximadamente 20,000 L de agua para producir 1 L de biodiesel, mientras que para obtener 1 L de biodiesel a partir de canola o soja, se requieren alrededor de 14,000 L. Por otra parte, para la obtención de 1 L de etanol, se requieren aproximadamente 1,300 L, 2,500 y 10,000 L cuando se usan remolacha azucarera, maíz y sorgo respectivamente (Gerbens-Leenes *et al.*, 2009). Así, mientras que el mejoramiento de los cultivos puede ofrecer potencial en el largo plazo, nutrimentos adecuados, agua y manejo adecuado son todavía necesarios para asegurar rendimientos económicamente aceptables –implicando que aun los cultivos que crecen en tierras marginales todavía competirán en alguna extensión con cultivos alimenticios por recursos tales como nutrimentos y agua (Wiebe *et al.*, 2008). Adicionalmente, algunos cultivares, como los agaves, producen buenos rendimientos de biomasa en tierras semiáridas (Davis *et al.*, 2011).

## BIODIÉSEL

Los aceites vegetales no pueden ser utilizados directamente en los motores de combustión interna, ya que debido a su elevada viscosidad forma fácilmente depósitos de carbono en los motores, lo que resulta en una combustión inadecuada y reduce el nivel de vida del motor. Por ello dichos aceites deben convertirse en biodiésel.

El biodiésel es un combustible limpio que se produce a partir de grasas animales o aceites vegetales, por lo que es renovable y biodegradable. El consumo de aceite por litro proveniente de plantas puede reducir 7.34 kg de CO<sub>2</sub> (Wang *et al.*, 2011). El biodiésel es producido a partir de los ácidos grasos presentes en los triacilglicéridos que se encuentran en las grasas animales o en los aceites vegetales. Los triacilglicéridos están formados de ácidos grasos de cadena larga unidos al glicerol. La reacción de transesterificación consiste en la transformación de los ácidos grasos presentes en los triglicéridos en los alquil ésteres de los ácidos grasos en presencia de monoalcoholes de cadena corta (normalmente los alcoholes metílico o etílico), un catalizador, ácido o alcalino, a temperatura elevada, y en glicerol como producto secundario (Fig. 1) (Hoydoncx *et al.*, 2004; Moser, 2009). La mezcla de alquil ésteres obtenida forma el biodiésel. La reacción química de esterificación permite que la mezcla de ácidos grasos adquieran las propiedades físico-químicas que se requieren para el funcionamiento de los motores sin que se presente ningún problema en ellos y cumpla con los estándares establecidos por la American Society for Testing and Materials (ASTM), en la norma ASTM D 6751 (ASTM, 2007), y su correspondiente en Europa, la norma EN 14214 (CEN, 2003). Con su relativamente bajo perfil de emisión, el biodiésel, es un combustible ideal para usar en ambientes sensibles, tales como las



**Fig. 1.** La transesterificación de los triacilglicérols (TAG) produce los alquil ésteres de los ácidos grasos (biodiésel).

ciudades altamente contaminadas (Vasudevan & Briggs, 2008).

Si bien existe una explosión de información relacionada con las publicaciones sobre biodiesel, aún existen varios problemas sin resolver; éstos van desde aspectos económicos, hasta aspectos sociales y técnicos. Por ello, la industria del biodiesel se encuentra bajo el ataque de algunas asociaciones ecologistas, y los subsidios para la producción de biocombustibles han sido condenados por algunos gobiernos. El biodiesel tiene que aumentar su popularidad entre los movimientos sociales y gobiernos para constituir una alternativa válida de fuente de energía (Pinzi *et al.*, 2009).

Hay varios retos técnicos que necesitan ser resueltos para hacer al biodiésel rentable. En primer lugar, el elevado costo de los aceites vegetales debe reducirse (Openshaw, 2000). Para ello deberán emplearse materias primas de bajo costo, tales como aceites no comestibles, aceites

residuales del procesamiento de los alimentos y grasas animales. Sin embargo, las relativamente grandes cantidades de ácidos grasos libres y el agua en estas materias primas redundan en la producción de jabón en presencia de un catalizador alcalino. Para ello se requieren pasos adicionales para eliminar el agua y los ácidos grasos libres de la mezcla de reacción (Vasudevan & Briggs, 2008).

El desarrollo de aceites vegetales como combustibles líquidos tiene varias ventajas sobre otras alternativas de producción de combustible, tales como: a) las tecnologías para la extracción y procesamiento son simples y fáciles, ya que sólo se requiere equipo convencional con poco consumo de energía; b) las propiedades del combustible son muy semejantes a las del diésel inorgánico; c) los aceites vegetales son renovables; d) puesto que son líquidos, estos aceites son fáciles de transportar y también son estables y no peligrosos; e) el subproducto de la extracción de los aceites es rico en proteínas y puede ser empleado como alimento para ganado o combustible

# Artículos

sólidos; f) el cultivo de las plantas que producen estos aceites se puede llevar a cabo en un amplio rango de localizaciones geográficas y condiciones climáticas; g) el biodiésel puede usarse directamente en motores de ignición por compresión sin necesidad de modificaciones sustanciales en el motor; y h) el biodiésel no contiene azufre, por lo que no se producen óxidos de azufre (Dorado, 2008).

Actualmente, para la producción de biodiésel se usa principalmente aceite de semillas de soya, girasol, colza y algodón (Chang *et al.*, 1996; Karmee *et al.*, 2004; Scott *et al.*, 2008), *Ricinus communis* y camelina. Sin embargo, *J. curcas* y *Pongamia pinnata* Pierre son las plantas preferidas sobre otras materias primas en los países tropicales.

La elaboración de biocombustibles de primera generación, cuya materia prima son los cultivos agrícolas, tienen un efecto negativo en la seguridad alimentaria si se produce en cantidades elevadas. No obstante, utilizar la biomasa obtenida de cultivos no agrícolas como materia prima para producir biocombustibles de segunda generación resulta más favorable para la protección del medio ambiente y la seguridad alimentaria, en contraste con los de primera generación. Actualmente se considera muy prometedor al cultivo de *J. curcas* como materia prima para biodiesel de segunda generación.

## JATROPHA

Entre todos los cultivos que producen aceite, *Jatropha curcas* L. (Euphorbiaceae) (Fig. 2), ha emergido como la principal

materia prima para la industria del biodiésel con grandes inversiones para su investigación y desarrollo, procesado y conversión en biodiésel (Rajagopal, 2008). *J. curcas* es una planta multipropósitos con diversos atributos y considerable potencial como fuente para la producción de biodiésel (Openshaw, 2000). Sin embargo, se conoce poco para hacerla una planta exitosa. Es un arbusto perenne leñoso que se encuentra ampliamente disperso a través de las regiones tropicales y subtropicales del mundo. La planta es medianamente tolerante a la sequía, crece bien en suelos marginales, necesita sólo una lluvia moderada, se establece fácilmente y puede ayudar a recuperar suelos erosionados y crece rápidamente (Wiebe *et al.*, 2008). La planta vive hasta 50 años y fructifica anualmente por más de 30 años (Francis *et al.*, 2005).

Se requieren alrededor de 300 a 350 frutos para obtener un kilo de semilla (Catzin & Loyola-Vargas, datos no publicados). Las semillas de *Jatropha* rinden aproximadamente de 6 a 8 TM ha<sup>-1</sup> y contienen entre 20 y 40% (p/p) de aceite (Aminul Islam *et al.*, 2012; Annarao *et al.*, 2008; Gübitz *et al.*, 1999). El grano contiene entre 20 y 50% de aceite. Si bien se ha dado un gran énfasis en la producción de biodiesel, no se ha dado la debida atención para el aprovechamiento de los otros componentes de la fruta con fines energéticos (Singh *et al.*, 2008).

Los muchos usos de *Jatropha* incluyen la recuperación de suelos marginales y la

# Artículos



**Fig. 2.** Diferentes vista de la planta *Jatropha curcas* L. Panel superior izquierdo, producción de plántulas para su uso en plantación. Panel central superior, una planta de *Jatropha*. Panel superior derecho, flores. Panel inferior izquierdo, frutos. Panel central inferior, un fruto abierto en el que se muestra la presencia de tres semillas. Panel inferior derecho, semillas secas de las cuales se extrae el aceite para la producción del biodiésel.

producción de forraje, jabón, cera, cosméticos, pesticidas y fármacos anticáncer (Mampane *et al.*, 1987; Openshaw, 2000; Staubmann *et al.*, 1999). También es útil para cocinar y para generar electricidad (Wiebe *et al.*, 2008); previene la deforestación y la desertificación y provee fertilidad al suelo (Rajagopal, 2008). Puede crecer en suelos pedregosos o arenosos con un contenido bajo de nutrimentos, casi sin suministros extras (Li *et al.*, 2008) y no requiere de un régimen nutricional especial. Los aspectos primarios que favorecen a *Jatropha* sobre otros cultivos incluyen el hecho de que existe por lo menos una variedad no comestible. La

planta y las semillas de *Jatropha* no son comestibles y son tóxicas para los animales. La toxicidad de la semilla se debe a la presencia de curcina y de ésteres de forbol (Aminul Islam *et al.*, 2012).

El aceite de *Jatropha*, contiene predominantemente ácidos oleico (C18:1) y linoleico (C18:2) los cuales constituyen del 72 al 80% de los ácidos grasos totales (Banerji *et al.*, 1985). El contenido de ácidos grasos libres puede variar entre 0.4% y 2.3% y el valor promedio de calentamiento está alrededor de 40 MJ kg<sup>-1</sup> (Aminul Islam *et al.*, 2012). Esta composición de ácidos grasos en los triacilglicéridos de *Jatropha* produce un

biodiésel con un índice de cetano con valores que van desde un promedio de 39.5 en cultivares del sureste asiático (Aminul Islam *et al.*, 2012) a un promedio de 52.9 para genotipos seleccionados (Aminul Islam *et al.*, 2012).

## GENOMA

El cariotipo de *J. curcas* se obtuvo del meristemo radical e indica la presencia de 22 cromosomas relativamente pequeños, tanto metacéntricos como submetacéntricos, en un rango de 1.71 a 1.24  $\mu\text{m}$ . Su genoma es del tamaño del de arroz, la citometría de flujo indica un valor 2C promedio de 0.85 pg y una composición GC de 38.7% (Carvalho *et al.*, 2008).

Además de los genes que codifican enzimas para la biosíntesis de los aminoácidos, se han empezado a estudiar otros genes que están involucrados en la respuesta al estrés de la planta. Entre éstos el primero fue uno que se denominó *JcERF*<sup>1</sup>. La secuencia de aminoácidos de la clona *JcERF* es similar al dominio de unión a ADN, AP2/EREBP. El gene se induce rápidamente bajo condiciones de salinidad, sequía, daño mecánico y tratamiento con etileno, mientras que no se observaron cambios significativos con el tratamiento de ABA. La proteína producto del gene *JcERF* se une específicamente a la caja GCC así como al motivo c/DRE. La sobre-expresión del gene *JcERF* en *A. thaliana* aumenta la tolerancia a la sal y a la

sequía. Mientras que la germinación de las semillas transgénicas no se ve afectada por varias concentraciones de ABA en medio MS. Estos datos sugieren que *JcERF* funciona como un factor de transcripción (Tang *et al.*, 2007).

Dado que *Jatropha* posee algunos caracteres indeseables que limitan su uso de una manera más amplia, es deseable tener herramientas a la mano que permitan solucionar este problema. El uso del vector Tobacco Rattle Virus (TRV) puede inducir el silenciamiento de genes en *Jatropha*. Esta técnica se ha empleado para investigar la posible función de 13 genes de *Jatropha* de varias categorías funcionales, incluyendo la biosíntesis de los ácidos grasos, la regulación del desarrollo y la biosíntesis de toxinas (Ye *et al.*, 2009). Otra estrategia ha sido la generación de <sup>2</sup>ESTs. Recientemente se han generado 13,249 ESTs de semillas en desarrollo y durante su germinación. Esta estrategia ha permitido la identificación de ESTs que codifican para proteínas que están involucradas en la toxicidad de las semillas de *Jatropha* (Costa *et al.*, 2010).

Otra alternativa ha sido la de construir una biblioteca de ADNc de semillas de *J. curcas*. Esta biblioteca contiene 106 clonas con un tamaño promedio del inserto de 2.1 kb. Se secuenciaron 12,084 ESTs con una longitud promedio de 576 pb. El

---

<sup>1</sup>ERF = Ethylene-responsive element binding-factors.

---

<sup>2</sup>ESTs = Expressed Sequence Tags.

# Artículos

análisis de los contigs<sup>3</sup> indica que hay 2,258 y 4,751 singletons<sup>4</sup>. El tamaño de los contigs se encuentra en el rango de 2-23 y se determinaron 7,333 ESTs en ellos. Esto resulta en 7,009 unigenes los cuales fueron anotados mediante BLASTX. Este análisis mostró la presencia de 3,982 unigenes con similaridad significativa a genes conocidos y 2,836 unigenes con similaridad a genes desconocidos. Los sobrantes 191 unigenes que no muestran similaridad con ningún gene puede ser que codifiquen para genes únicos. El análisis muestra que los unigenes están relacionados a un amplio rango de funciones celulares, moleculares y biológicas. Entre los 7,009 unigenes, 6,233 unigenes fueron identificados con potencial de ser genes completos (Natarajan *et al.*, 2010). Otro grupo creó una biblioteca BIBAC<sup>5</sup> del cultivar YN049-4 de *J. curcas*. Consiste de 30,720 clonas, 92.1% de las cuales contienen ADN de *Jatropha* con un tamaño promedio de 131.9 kb. Se estima que la biblioteca representa alrededor de 8.9 equivalentes del genoma haploide de la planta (Fu *et al.*, 2011).

En relación con la secuencia completa del genoma de *J. curcas*, se han secuenciado tanto el genoma nuclear como el genoma del cloroplasto. En el caso de la

secuencia del genoma del cloroplasto se utilizó la técnica de pirosecuenciación y los faltantes se llenaron utilizando la técnica de Sanger. La molécula circular del ADN cloroplástico contiene 163,856 pb y codifica para 110 genes (78 proteínas, 4 ARNr y 29 diferentes ARNt). La organización y arreglo de su genoma es similar a la reportada para el genoma del cloroplasto de otras angiospermas. Sin embargo, en *Jatropha*, el gene *infA* y los genes *rps16* no son funcionales. El límite de las repeticiones invertidas está dentro del gene *rpl2* y los 13 nucleótidos al final de los genes duplicados son diferentes (Asif *et al.*, 2010).

En mayo del año 2009 se hizo el anuncio de que se había llevado a cabo la primera secuenciación del genoma de *Jatropha* por el grupo de Craig Venter<sup>6</sup>; la secuencia no es pública. Una segunda secuenciación fue anunciada en agosto del año 2010 por Life Technologies Corporation<sup>7</sup>. En diciembre del mismo año, un grupo de investigadores japoneses hizo pública una tercera secuenciación de *Jatropha* (Sato *et al.*, 2011). La longitud de las secuencias no-redundantes fue de 285,858,490 pb y contiene 120,586 contigs y 29,831 singletons lo que abarca el 95% de las regiones del genoma que tienen genes que codifican. El contenido G/C fue de 34.3%. Se dedujeron un total de 40,929

---

<sup>3</sup>Contig = De "contiguous" es un conjunto de segmentos de ADN que se superponen provenientes de una sola fuente genética.

<sup>4</sup>Singleton = Un gene o marcador único que identifica una región en el genoma.

<sup>5</sup>BIBAC = Binary Bacterial Artificial Chromosome.

---

<sup>6</sup><http://www.genomeweb.com/sequencing/synthetic-genomics-acgt-use-sanger-454-sequence-jatropha-genome>.

<sup>7</sup><http://domesticfuel.com/2010/08/24/biofuel-biotech-companies-sequence-jatropha-genome/>.

# Artículos

genes completos o parciales. El 4% de los genes que codifican para proteínas (1,529) son específicos de la familia Euphorbiaceae<sup>8</sup>.

La presencia de ARNmi también está bajo escrutinio en *Jatropha*. Recientemente se ha reportado la caracterización de 48 ARNmi de plantas de *Ricinus communis*, *Manihot esculenta*, *Hevea brasiliensis* y *J. curcas* que han sido sometidas a extremos de sequía y frío y durante su recuperación (Zeng *et al.*, 2010).

## CONCLUSIONES

*Jatropha* y otros cultivares tiene un futuro prometedor como fuentes para la producción de biocombustibles. Sin embargo, antes de que se puedan convertir en plantas de uso rutinario para la obtención de biocombustibles deberán completarse una serie de estudios. En primer lugar se requerirán avances en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería así como el desarrollo sustentable de los cultivos. Entre los conocimientos más importantes que se requieren está el del proceso de biosíntesis de los ácidos grasos que dan origen a los triacilglicéridos presentes en el aceite que se almacena en sus semillas. El conocimiento de la ruta anabólica y de los genes que codifican para las enzimas que participan en dicho proceso, permitirá su modificación. En este sentido, recientemente se ha reportado la

modificación de la ruta de biosíntesis de ácidos grasos en semillas de *J. curcas*, logrando disminuir la producción de ácido linoleico y aumentar la síntesis de ácido oleico (Qu *et al.*, 2012).

También, deberá ponerse atención a la susceptibilidad de estas plantas a diversas enfermedades y condiciones climáticas extremas y darles resistencia a bajas temperaturas y otros extremos ambientales. Este hecho les permitiría crecer en tierras aún menos usadas por cultivos de uso agrícola convencional.

El tercer aspecto de importancia, es la creación de variedades con caracteres deseados fijos. Ello permitirá la producción de híbridos con aún mejores características, tanto agronómicas como de productividad y calidad.

En suma, los estudios actuales muestran que el cultivo de plantas para la producción de biocombustibles, en suelos no agrícolas y que no compitan con la producción de comestibles, es posible. Para ello se deberán promulgar leyes y decretos que faciliten su implementación por la sociedad. También deberán desarrollarse programas de investigación que abarquen aspectos de la investigación, desde el conocimiento biológico de las plantas, hasta su uso como fuente de aceite para biocombustibles, pasando por la generación de variedades e híbridos de importancia agronómica. Todo ello permitirá que las plantas contribuyan de manera significativa al desarrollo de energías sustentables y a la atenuación del cambio climático.

---

<sup>8</sup> La secuencia e información adicional se encuentra en: <http://www.kazusa.or.jp/jatropha/>.

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo del laboratorio de los autores ha tenido el financiamiento parcial de la BioRed (Conacyt).

## REFERENCIAS

- Aminul Islam A, Yaakob Z, Anuar N, Primandari S & Osman M (2012) Physiochemical properties of *Jatropha curcas* seed oil from different origins and candidate plus plants (CPPs). *J. Am. Oil Chem. Soc.* 89: 293-300.
- Annarao S, Sidhu OP, Roy R, Tuli R & Khetrapal CL (2008) Lipid profiling of developing *Jatropha curcas* L. seeds using <sup>1</sup>H NMR spectroscopy. *Biores. Technol.* 99: 9032-9035.
- Asif M, Mantri S, Sharma A, Srivastava A, Trivedi I, Gupta P, Mohanty C, Sawant S & Tuli R (2010) Complete sequence and organisation of the *Jatropha curcas* (Euphorbiaceae) chloroplast genome. *Tree Gen. Genom.* 6: 941-952.
- ASTM (2007) American Society for Testing and Materials. D 6751 - Standard Specification for Biodiesel Fuel (B100) Blend Stock for Distillate Fuels. In: Annual Book of ASTM Standards, V. 05.04, Anonymous. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Banerji R, Chowdhury AR, Misra G, Sudarsanan G, Verma SC & Srivastava GS (1985) *Jatropha* seed oils for energy. *Biomass.* 8: 277-282.
- Campbell JE, Lobell DB, Genova RC & Field CB (2008) The global potential of bioenergy on abandoned agriculture lands. *Environ. Sci. Technol.* 42: 5791-5794.
- Carroll A & Somerville C (2009) Cellulosic biofuels. *Annu. Rev. Plant Biol.* 60: 165-182.
- Carvalho CC, Clarindo WR, Prac MM, Santos Araújo FS & Carels N (2008) Genome size, base composition and karyotype of *Jatropha curcas* L., an important biofuel plant. *Plant Sci.* 174: 613-617.
- CEN (2003) EN 14214 Automotive Fuels: FAME for Diesel Engines; Requirements and Test Methods. In: European Committee for Standardization (CEN), Anonymous. Brussels, Belgium.
- Chang DYZ, Van Gerpen JH, Lee I, Jonson IA, Hammond EG & Marley SJ (1996) Fuel properties and emissions of soybean oil esters as diesel fuel. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 73: 1549-1555.
- Costa G, Cardoso K, Del Bem L, Lima A, Cunha M, de Campos-Leite L, Vicentini R, Papes F, Moreira R, Yunes J, Campos F & Da Silva M (2010) Transcriptome analysis of the oil-rich seed of the bioenergy crop *Jatropha curcas* L. *BMC Genomics.* 11: 462.
- Davis SC, Dohleman FG & Long SP (2011) The global potential for Agave as a biofuel feedstock. *GCB Bioenergy.* 3: 68-78.
- Dorado MP (2008) Raw materials to produce low-cost biodiesel. In: Biofuels refining and performance, Nag A (ed). McGraw Hill, United States of America. pp. 107-147.

# Artículos

- Edgard G (2011) Assessing the sustainability of biofuels: A logic-based model. *Energy*. 36: 2089-2096.
- Elshahed MS (2010) Microbiological aspects of biofuel production: Current status and future directions. *J. Adv. Res.* 1: 103-111.
- Fargione J, Hill J, Tilman D, Polasky S & Hawthorne P (2008) Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science*. 319: 1235-1238.
- Francis G, Edinger R & Becker K (2005) A concept for simultaneous wasteland reclamation, fuel production, and socio-economic development in degraded areas in India: Need, potential and perspectives of *Jatropha* plantations. *Nat. Res. Forum*. 29: 12-24.
- Fu Y, Scheuring C, Wang H, Zhang Hb & Wang W (2011) Construction and characterization of a BIBAC library of *Jatropha curcas* L. and identification of BIBAC clones containing genes associated with fatty acid metabolism. *Mol. Breed*. 28: 559-567.
- Gerbens-Leenes W, Hoekstra AY & van der Meer TH (2009) The water footprint of bioenergy. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*. 106: 10219-10223.
- Gübitz GM, Mittelbach M & Trabi M (1999) Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. *Biores. Technol.* 67: 73-82.
- Hill J, Polasky S, Nelson E, Tilman D, Huo H, Ludwig L, Neumann J, Zheng H & Bonta D (2009) Climate change and health costs of air emissions from biofuels and gasoline. *Proc. Natl. Acad. Sci. (USA)*. 106: 2077-2082.
- Hoydoncx HE, De Vos DE, Chavan SA & Jacobs PA (2004) Esterification and transesterification of renewable chemicals. *Top. Catal.* 27: 83-96.
- Karmee SK, Mahesh P, Ravi P & Chadha A (2004) Kinetics study of the base catalyzed transesterification of monoglycerides from *pongamia* oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 81: 425-430.
- Lamers P, Hamelinckb C, Junginger M & Faaij A (2011) International bioenergy trade-A review of past developments in the liquid biofuel market. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 15: 2655-2676.
- Li M, Li H, Jiang H, Pan X & Wu G (2008) Establishment of an *Agrobacterium*-mediated cotyledon disc transformation method for *Jatropha curcas*. *Plant Cell Tiss. Org. Cult.* 92: 173-181.
- Mampane KJ, Joubert PH & Hay IT (1987) *Jatropha curcas*: use as a traditional Tswana medicine and its role as a cause of acute poisoning. *Phytoth. Res.* 1: 50-51.
- Moser B (2009) Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cell. Dev. Biol. -Plant.* 45: 229-266.
- Natarajan P, Kanagasabapathy D, Gunadayalan G, Panchalingam J, Shree N, Sugantham P, Singh K & Madasamy P (2010) Gene discovery from *Jatropha curcas* by sequencing of ESTs from normalized and full-length enriched cDNA library from developing seeds. *BMC Genomics*. 11: 606.

# Artículos

- Openshaw K (2000) A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise. *Biomass Bioenerg.* 19: 1-15.
- Pickett J (2008) Sustainable biofuels: prospects and challenges. The Royal Society, London.
- Pinzi S, Garcia IL, Lopez-Gimenez FJ, Luque de Castro MD, Dorado G & Dorado MP (2009) The ideal vegetable oil-based biodiesel composition: A review of social, economical and technical implications. *Energ. Fuel.* 23: 2325-2341.
- Qu J, Hui-Zhu M, Wen C, Shi-Qiang G, Yan-Nan B, Yan-Wei S, Yun-Feng G & Ye J (2012) Development of marker-free transgenic *Jatropha* plants with increased levels of seed oleic acid. *Biotechnology for Biofuels.* 5: 10.
- Rajagopal R (2008) Best practices for long-term *Jatropha* development. KnowGenix, Mumbai, India.
- Sagar AD & Kartha S (2007) Bioenergy and sustainable development? *Annu. Rev. Env. Res.* 32: 131-167.
- Sato S, Hirakawa H, Isobe S, Fukai E, Watanabe A, Kato M, Kawashima K, Minami C, Muraki A, Nakazaki N, Takahashi C, Nakayama S, Kishida Y, Kohara M, Yamada M, Tsuruoka H, Sasamoto S, Tabata S, Aizu T, Toyoda A, Shin-i T, Minakuchi Y, Kohara Y, Fujiyama A, Tsuchimoto S, Kajiyama S, Makigano E, Ohmido N, Shibagaki N, Cartagena JA, Wada N, Kohinata T, Atefeh A, Yuasa S, Matsunaga S & Fukui K (2011) Sequence analysis of the genome of an oil-bearing tree. *Jatropha curcas* L., *DNA Res.* 18: 65-76.
- Scharlemann JPW & Laurance WF (2008) How green are biofuels? *Science.* 319: 43-44.
- Schirmer A, Rude MA, Li X, Popova E & del Cardayre SB (2010) Microbial biosynthesis of alkanes, *Science.* 329: 559-562.
- Scott P, Pregelj L, Chen N, Hadler J, Djordjevic M & Gresshoff P (2008) *Pongamia pinnata*: An untapped resource for the biofuels industry of the future. *Bioener. Res.* 1: 2-11.
- Singh RN, Vyas DK, Srivastava NSL & Narra M, (2008) SPRERI experience on holistic approach to utilize all parts of *Jatropha curcas* fruit for energy. *Renew. Ener.* 33: 1868-1873.
- Somerville C, Youngs H, Taylor C, Davis SC & Long SP (2010) Feedstocks for lignocellulosic biofuels. *Science.* 329: 790-792.
- Staubmann R, Ncube I, Gübitz GM, Steiner W & Read JS (1999) Esterase and lipase activity in *Jatropha curcas* L. seeds. *J. Biotechnol.* 75: 117-126.
- Steen EJ, Kang Y, Bokinsky G, Hu Z, Schirmer A, McClure A, del Cardayre SB & Keasling JD (2010) Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass, *Nature.* 463: 559-562.
- Tang M, Sun J, Liu Y, Chen F & Shen S (2007) Isolation and functional characterization of the *JcERF* gene, a putative AP2/EREBP domain-containing transcription factor, in the woody oil

# Artículos

- plant *Jatropha curcas*. *Plant Mol. Biol.* 63: 419-428.
- Vasudevan PT & Briggs M (2008) Biodiesel production: current state of the art and challenges. *J. Ind. Microbiol. Biot.* 35: 421-430.
- Wang Z, Calderon MM & Lu Y (2011) Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China. *Biomass Bioenerg.* 35: 2893-2902.
- Wiebe K, Croppenstedt A, Raney T, Skoet J, Zurek M, Tschirley J and Cluff M (2008) The state of food agriculture 2008. Biofuels: prospect, risks and opportunities. FAO, Rome.
- Ye J, Qu J, Bui HTN & Chua N-H (2009) Rapid analysis of *Jatropha curcas* gene functions by virus-induced gene silencing. *Plant Biotechnol. J.* 7: 964-976.
- Zeng C, Wang W, Zheng Y, Chen X, Bo W, Song S, Zhang W & Peng M, (2010) Conservation and divergence of microRNAs and their functions in Euphorbiaceous plants. *Nucleic Acids Res.* 38: 981-985.