

## HUELLA AMBIENTAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL UTILIZANDO *Jatropha curcas* MEXICANA CULTIVADA EN SUELOS MARGINALES

Environmental footprint of biodiesel production from mexican *Jatropha curcas* cultivated on marginal soils

Guadalupe PÉREZ<sup>1</sup>, Jorge M. ISLAS-SAMPERIO<sup>1\*</sup>, Fabio MANZINI<sup>1</sup>, Raúl SUÁREZ<sup>1</sup>,  
Luis F. BARAHONA-PÉREZ<sup>2</sup> y Javier E. AGUILLÓN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México, Privada Xochicalco S/N, 62580, Temixco, Morelos, México.

<sup>2</sup> Departamento de Energía Renovable, Centro de Investigación Científica de Yucatán, Calle 43, N°130 97295, Mérida, Yucatán, México.

<sup>3</sup> Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Escolar S/N, 04510, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, Ciudad de México, México.

\*Autor para correspondencia: [jis@ier.unam.mx](mailto:jis@ier.unam.mx)

(Recibido: enero 2021; aceptado: junio 2021)

Palabras clave: análisis de ciclo de vida, biocombustibles líquidos, bioenergía, ecotipo mexicano, sostenibilidad ambiental

### RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la huella ambiental que genera el proceso de producción de biodiésel utilizando un ecotipo mexicano de *Jatropha curcas* como materia prima. Este ecotipo tiene un potencial de producción de semillas de hasta 1021 kg/ha en suelos con baja humedad y bajo nivel nutricional. La evaluación de la huella ambiental se determinó a través de un análisis de ciclo de vida de 18 categorías de impacto de punto intermedio con el método ReCiPe Jerárquico 2016. El sistema de producción analizado está constituido por las etapas: (i) obtención de materia prima, (ii) extracción de aceite y (iii) producción de biodiésel. Entre los resultados más relevantes, este sistema presentó emisiones potenciales en calentamiento global de 27.56 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ de biodiésel y un consumo de energía de 0.527 GJ de energía fósil/GJ de biodiésel. Debido a que en la etapa de cultivo de *Jatropha curcas* se invierten recursos mínimos, la etapa de extracción de aceite fue la que presentó los mayores impactos potenciales en 14 de 18 categorías evaluadas, principalmente debido al consumo de electricidad utilizado en el proceso de la separación de las cáscaras de frutos y semillas de *Jatropha curcas*; dicho proceso tuvo una participación de 80 % de las contribuciones. El ecotipo mexicano de *Jatropha curcas* cultivado en suelos marginales es prometedor como materia prima para la producción de biodiésel. El sistema de producción presentó reducciones en los impactos ambientales potenciales comparado con un sistema que utiliza un cultivo de *Jatropha curcas* con riego y fertilizantes.

Key words: bioenergy, biofuel, environmental sustainability, life cycle assessment, Mexican ecotype

## ABSTRACT

The objective of this study was to assess environmental footprint associated with biodiesel production using a Mexican ecotype of *Jatropha curcas* as raw material, which has a seed production potential of 1021 kg/ha even when being cultivated in marginal land with minimal water resources and biofertilization. Life-cycle assessment methodology was used to assess the environmental footprint through 18 midpoint impact categories through Hierarchical ReCiPe method 2016. The production system is comprised of the following stage: (i) obtaining raw material, (ii) oil extraction, and (iii) biodiesel production. Among the most relevant results, this system showed 27.56 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ biodiesel of potential emissions in global warming and 0.527 GJ fossil energy/GJ biodiesel in energy consumption. Due to fact that minimal resources were invested in *Jatropha curcas* cultivation stage, the oil extraction stage showed the greatest impacts in 14 of 18 impact categories evaluated, mainly due to the electricity consumption used in the fruit skin and seed shells separation process, which had 80 % of contribution. The Mexican ecotype of *Jatropha curcas* is promising as a raw material for biodiesel production because the production system evaluated in this study showed reductions in the environmental impacts compared to a system that uses *Jatropha curcas* under irrigation and fertilization cultivation.

## INTRODUCCIÓN

*Jatropha curcas* es una planta oleaginosa con capacidad para crecer en suelos marginales con mínimos recursos y representa una opción atractiva para la producción de biodiésel (Francis et al. 2005, Achten et al. 2007, Kumar y Sharma 2008).

El análisis del impacto ambiental de la producción de biodiésel utilizando *Jatropha curcas* como materia prima se ha realizado en varios países de África (Hagman et al. 2013, Baumert et al. 2018, Ishimoto et al. 2018), Asia (Prueksakorn y Gheewala 2008, Achten et al. 2010, Jain y Sharma 2010, Kumar et al. 2012, Baral et al. 2020) y Latinoamérica (Gonzales 2016, Fuentes et al. 2018). Sin embargo, estos análisis no han reportado suficientes categorías de impacto de la huella ambiental, definiendo a la huella ambiental de acuerdo con la norma NMX-SAA-14044-IMNC-2008 (IMNC 2008) como el conjunto de impactos ambientales potenciales que pueden ocurrir en el ciclo de vida de una actividad humana. Los impactos ambientales que generalmente son reportadas por los autores arriba mencionados son (1) el potencial de calentamiento global expresada mediante las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un intervalo de 39.6 a 123 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ y (2) el consumo de energía fósil para la producción de una unidad de energía de biodiésel en un intervalo de 0.4 a 0.9 GJ de energía fósil/GJ de energía de biodiésel, dependiendo de los alcances y límites de los sistemas analizados. Otros pocos estudios han reportado, además de las categorías de impacto arriba mencionadas, las categorías de impacto de acidificación y eutrofización

(Achten et al. 2010), agotamiento abiótico, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana, ecotoxicidad de agua fresca y marina, ecotoxicidad terrestre y creación de ozono fotoquímico (Rivero et al. 2016), agotamiento de agua, de minerales y combustibles fósiles (Giraldi-Díaz et al. 2018). En estos estudios resultó que entre el 40 al 90 % de las emisiones estaban asociadas al cultivo de *Jatropha curcas*.

La mayoría de los estudios que han analizado los impactos ambientales del sistema de producción de biodiésel utilizando *Jatropha curcas* como materia prima han utilizado el enfoque de ciclo de vida considerando los límites del sistema de la cuna a la puerta con consideraciones de insumos-productos y flujos de energía específicos para cada caso de estudio. El sistema y las etapas de ciclo de vida que los estudios han abarcado son: (i) cultivo de *Jatropha curcas*, (ii) extracción del aceite y (iii) producción de biodiésel, aunque algunos estudios han considerado el transporte de materia prima al sitio de transformación como una etapa adicional, al igual que las etapas de distribución y consumo del biodiésel (Ndong et al. 2009, Wang et al. 2011, Eshton et al. 2013).

En los estudios mencionados, la etapa de cultivo de *Jatropha curcas* es la que presenta mayor variabilidad de datos reportados sobre los insumos utilizados y productividades obtenidas, los cuales reportan el uso de fertilizantes, irrigación y herbicidas para mejorar la productividad de semillas que se han reportado en el intervalo de 346 a 11 250 kg/ha (Beaver et al. 2016, Navarro-Pineda et al. 2016, Dawa et al. 2017, Somorin et al. 2017).

En México, son limitados los estudios que han reportado las emisiones ambientales potenciales de la producción de biodiésel de *Jatropha curcas* (Rivero et al. 2016, Giraldi-Díaz et al. 2018). Estos estudios no mencionan las variedades utilizadas por lo que se podría de tratar de variedades introducidas dado que Padilla et al. (2011) han señalado que los monocultivos de *Jatropha curcas* establecidos en México se han realizado con germoplasma de origen extranjero.

Por tal motivo es importante conocer la huella ambiental de la producción de biodiésel con *Jatropha curcas* de variedades mexicanas debido a que en México se han localizado variedades nativas en diferentes estados del país como Veracruz, Hidalgo, Puebla, Yucatán, Quintana Roo (Pecina-Quintero et al. 2014) y Morelos (Martínez-Herrera et al. 2006, 2010). Adicionalmente, estas variedades, que denominamos “no tóxicas”, han mostrado no contener ésteres de forbol, compuesto químico que puede provocar diferentes enfermedades en humanos y animales (He et al. 2011 y Martínez-Díaz et al. 2015). El uso de variedades de *Jatropha curcas* nativas en la producción de biodiésel podría proporcionar coproductos de valor sin tener que pasar por métodos de detoxificación (Nindita et al. 2015 y Mazumdar et al. 2018).

El objetivo de este estudio fue evaluar la huella ambiental que genera el sistema de producción de biodiésel que utiliza como materia prima un ecotipo de *Jatropha curcas* nativo de México cultivado en un terreno marginal bajo condiciones de mínimas de recursos de agua y biofertilización. El sistema de producción se analizó mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ILCD 2010) con la unidad funcional de producir 1 GJ de biodiésel. Finalmente, se obtuvieron los impactos ambientales potenciales de 18 categorías de impacto que conforman la huella ambiental del sistema de producción de biodiésel, y se realizó la comparación con otro sistema de producción similar al planteado en este estudio para conocer si la producción de biodiésel es ambientalmente viable.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio de estudio y características de cultivo de *Jatropha curcas*

La base de la información para el diseño del sistema de producción de biodiésel fue el estudio reportado por los autores Pérez et al. (2019) sobre las características de la producción de semillas y aceite del ecotipo de *Jatropha curcas* E2M. Este ecotipo se evaluó en una plantación experimental localizada en el municipio de Miacatlán perteneciente al estado

de Morelos la cual se estableció en el año 2009 y se evaluó por un periodo de nueve años finalizando en el año 2018.

La plantación se estableció en un terreno marginal abandonado en el que anteriormente se realizaban actividades agrícolas. El suelo presentaba niveles bajos de disponibilidad de nutrientes: materia orgánica (MO) 2.8 %, nitrógeno (N) 6.0 mg/kg, potasio (K) 216 mg/kg, conductividad eléctrica (CE) 0.5 ds/m y pH de 7.6, de acuerdo con el análisis de suelo realizado bajo las especificaciones de la norma mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (SEMARNAT 2000).

Las plantas del ecotipo E2M se obtuvieron por propagación generativa, el germoplasma se colectó de poblaciones naturales de *Jatropha curcas* localizadas en el estado de Morelos. La germinación de semillas se llevó a cabo bajo condiciones controladas de laboratorio y las plántulas obtenidas permanecieron en un invernadero hasta que fueron trasplantadas en la parcela experimental que quedó conformada por 64 plantas.

El sistema de cultivo de *Jatropha curcas* fue de mínimo uso de recursos y baja intensidad de manejo, que consistió en la aplicación de composta de residuos de jardinería en una proporción de 0.2 kg por planta, realizada únicamente durante el trasplante de plántulas, así como la aplicación de riegos de auxilio quincenales durante los tres primeros meses de la plantación. El riego fue del tipo rodado, es decir, no se utilizó bombas de agua, aspersores o equipo adicional. Posteriormente, el riego fue solamente el recibido por precipitación pluvial; el sitio tiene un promedio de precipitación anual de 1026 mm que fue registrada con una estación meteorológica instalada en la plantación experimental. No se utilizaron fertilizantes, insecticidas ni fungicidas.

La preparación del terreno para el trasplante de plántulas se realizó con un tractor marca Ford modelo 2007 que utiliza diésel, mientras que las actividades de plantación de plántulas, los riegos de auxilio y cosecha de semillas se realizaron de manera manual.

En las condiciones descritas, las plantas del ecotipo E2M con una edad de 8 años tuvieron una producción de frutos de  $0.81 \pm 0.39$  kg/planta y 1021 kg/ha a una densidad de cultivo de 1250 plantas por hectárea.

Los frutos están compuestos por cáscaras (pericarpio, es una cubierta lignocelulósica) y semillas (cada fruto contiene tres semillas) que representan 31.5 % y 68.5 %, respectivamente, con respecto al peso del fruto. A su vez, las semillas se conforman por el tegumento (cubierta lignocelulósica) y el endospermo (núcleo o pulpa) que es donde se almacena el

aceite que se utiliza para la producción de biodiésel. El rendimiento de aceite por extracción mecánica reportada por Pérez et al. (2019) fue 46.5 % con lo que se obtuvo un rendimiento de 191 kg de aceite por hectárea y presentó características físicas y químicas adecuadas para la producción de biodiesel.

### Análisis de ciclo de vida del sistema de producción de biodiésel

En este estudio se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) descritas en las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO 2006, 2018), esta metodología incluye las siguientes fases:

#### (i) Definición de objetivos y alcance

El objetivo del ACV fue evaluar la huella ambiental que genera el proceso de producción de biodiésel utilizando como materia prima el ecotipo mexicano de *Jatropha curcas* E2M, cultivado en terrenos marginales bajo condiciones mínimas de riego y fertilización. El sistema de estudio fue de *la cuna a la puerta*, cuyos límites abarcan tres etapas de producción presentadas en la **figura 1**: obtención de la materia prima, extracción de aceite y producción de biodiésel. La unidad funcional se definió como la producción de 1 GJ de biodiésel.

#### (ii) Inventario de ciclo de vida

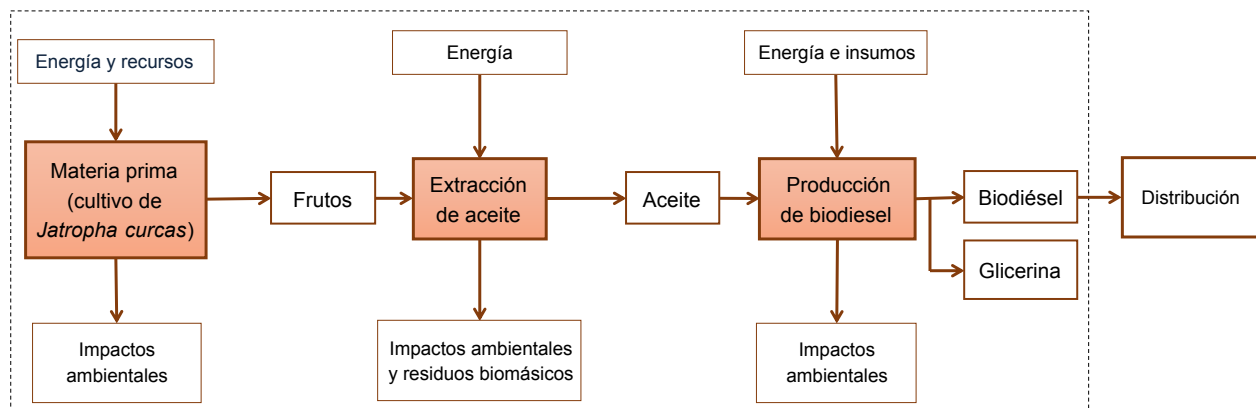
El inventario de ciclo de vida (ICV) del sistema de producción de biodiésel se muestra en el **cuadro I** en donde se presentan los insumos y productos dimensionados para satisfacer el flujo de referencia de 1 GJ de biodiésel.

Para las etapas de obtención de la materia prima y de extracción de aceite se consideraron

los insumos requeridos para obtener 1,021 kg/ha de frutos, 191 kg/ha de aceite y 832 kg/ha de residuos biomásicos derivados del ecotipo E2M, reportados por Pérez et al. (2019). En la etapa de obtención de materia prima no se toman en cuenta los flujos de energía y materiales utilizados para la obtención de las plántulas en el invernadero, ni los impactos por la aplicación de composta, tales como  $N_2O$ ,  $NH_3$  y  $NO_x$  que se consideran despreciables para los 20 años de vida útil de la plantación al utilizarse solo una aplicación de 0.2 kg/planta. Además, la cosecha de frutos se realiza de manera manual, los frutos de *Jatropha curcas* se transportan a una distancia de 40 km del sitio de la plantación al sitio de extracción de aceite en una camioneta de una tonelada marca Nissan modelo 2006 con motor de gasolina de cuatro cilindros y rendimiento promedio de 10 km/L.

En la etapa de extracción de aceite se realizó la separación de cáscaras de frutos y semillas previo al prensado del endospermo para obtener el aceite. Los equipos utilizados en este proceso fueron una máquina craqueadora marca Anyang Best modelo TXP100, prensa de extracción Anyang Best modelo YZS-80 y un filtro de aceite marca ABC mini, modelo YLB307 Niger en existencia en el mercado. Los residuos de las cáscaras de los frutos y semillas, y el endospermo extruido se consideraron como residuos del sistema y fueron dispuestos en un tiradero a cielo abierto.

En la etapa de la producción de biodiésel se consideró la transesterificación del aceite con metanol en una relación 1:9 vol/vol e hidróxido de sodio como catalizador (0.9 % del peso del aceite) y una eficiencia de transformación de 96 %, de acuerdo



**Fig. 1.** Etapas de ciclo de vida y límites del sistema de la producción de biodiésel con *Jatropha curcas* ecotipo E2M.

**CUADRO I.** RESUMEN DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA PARA SATISFACER LA UNIDAD FUNCIONAL DE LA PRODUCCIÓN DE 1 GJ DE ENERGÍA DE BIODIÉSEL DE *Jatropha curcas*.

Etapa	Recursos y materiales	Cantidad	Unidad	Salidas	Cantidad	Unidad
Obtención de la materia prima	Suelo	1351.9	m <sup>2</sup>			
	Agua de riego	506.9	L			
	Agua de lluvia	1380019	L	Frutos	139	kg
	Diésel para tractor	0.21	kg			
	Transporte de frutos	5.30	t km			
Extracción de aceite	Electricidad para craqueo <sup>a</sup>	16.9	kWh	Aceite	25.6	kg
	Electricidad para prensado <sup>b</sup>	3.8	kWh			
	Electricidad para filtrado <sup>c</sup>	0.2	kWh	Residuos de biomasa y pasta residual	111.5	kg
Producción de biodiésel	Electricidad para reactor <sup>d</sup>	4.6	kWh	Biodiésel	24.6	kg
	Metanol	5.64	kg			
	Hidróxido de sodio	0.23	kg	Glicerina	1.03	kg

Notas: <sup>a</sup>Máquina craqueadora con capacidad de 300 kg/h y potencia eléctrica de 22 kW (Anyang Best Complete Machinery Engineering Co. 2018), <sup>b</sup>Prensa de extracción de aceite con capacidad de 110 kg/h y potencia eléctrica de 7.5 kW (Anyang Best Complete Machinery Engineering Co. 2018), <sup>c</sup>Filtro para aceite con capacidad de 180 kg/h con potencia eléctrica de 1.5 kW (Alibaba 2018), <sup>d</sup>Reactor con capacidad de 175 l/h y potencia eléctrica de 5.4 kW (Solben 2019), <sup>e</sup>Se considera el poder calorífico del biodiésel de 40.64 MJ/kg reportado en Rivero et al. (2016).

con el estudio reportado por Ahmed et al. (2015). El equipo utilizado fue un reactor con capacidad de 175 l/h. En esta etapa se obtuvo como producto principal el biodiésel y la glicerina como un subproducto.

Se siguió la asignación por masa de 96 % para biodiésel y del 4 % para glicerina, tomando en cuenta la recomendación de los autores Kumar et al. (2012) que reportan que la asignación en masa o energía son las más apropiadas para sistemas en los que productos y coproductos son de naturaleza similar, así como por congruencia con la norma NMX-SAA-14044-IMNC-2008 (IMNC 2008). La norma establece que los procedimientos de asignación deben de aproximarse lo más posible a las relaciones y características fundamentales que existen entre entradas y salidas. Además, la asignación por masa es aplicada ya que la cantidad de frutos, semillas y aceite se reportan en términos masivos en el ICV. La asignación económica no se pudo realizar en este estudio a pesar de que se cuenta con datos de valor comercial de la glicerina cruda. Esto obedece a que la industria del uso de glicerina no se encuentra ampliamente desarrollada en el país y depende de fundamentaciones logísticas de la ubicación precisa de la planta para lograr una mejor asignación; tampoco se tiene información sobre los precios de

referencia del aceite y del biodiésel. Esto último impide hacer una comparación entre la asignación másica y la asignación económica.

### (iii) Evaluación de los impactos

La evaluación de los impactos ambientales se realizó con el software SimaPRO 3.5 mediante la metodología de ReCiPe 2016 Midpoint y una perspectiva jerárquica (H). Se eligió la perspectiva (H) debido a que se sustentada en el consenso científico con respecto al marco de tiempo y a la plausibilidad del mecanismo de impacto a diferencia de la perspectiva individualista (I) o la perspectiva igualitaria (E). La perspectiva (I) se basa en un interés de corto plazo, en tipos de impactos que no están discutidos por la comunidad científica y en el optimismo tecnológico con respecto a la adaptación humana mientras que la perspectiva (E) considera una visión precautoria tomando un marco de tiempo más largo y sitúa en el mismo nivel los impactos presentes y futuros (Huijbregts et al. 2016).

### (iv) Interpretación

En la sección de resultados se presenta la evaluación de las 18 categorías de impacto siguientes:

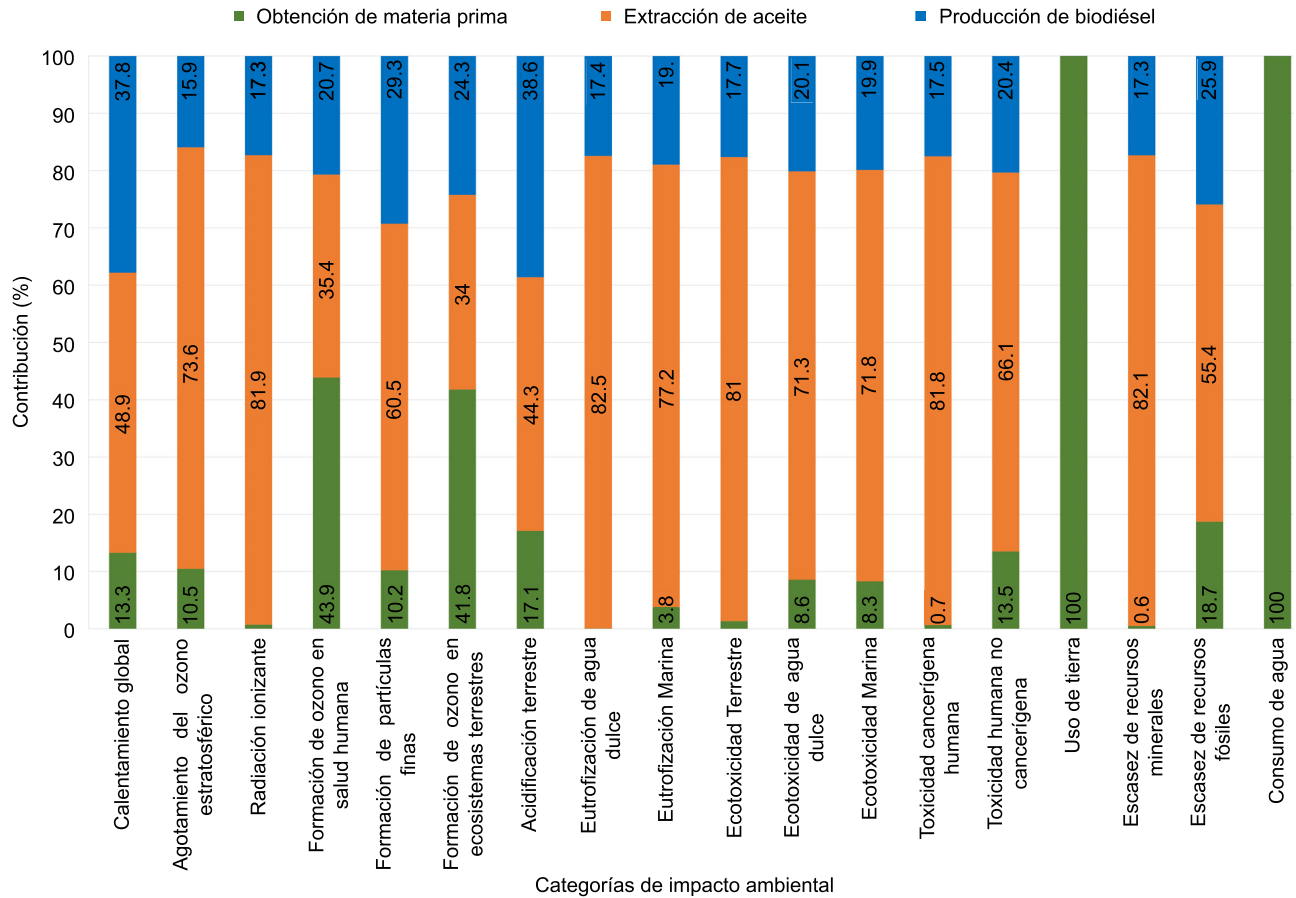
calentamiento global, agotamiento del ozono estratosférico, radiación ionizante, formación de ozono, salud humana, formación de partículas finas, formación de ozono, ecosistemas terrestres, acidificación terrestre, eutrofización de agua dulce, eutrofización marina, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, ecotoxicidad marina, toxicidad cancerígena humana, toxicidad humana no cancerígena, uso de tierra, escasez de recursos minerales, escasez de recursos fósiles y consumo de agua.

La modelación de las categorías de impacto, es decir, los modelos que reflejan el mecanismo ambiental que describen la relación entre los resultados del ICV y las categorías de impacto (IMNC 2008), se realizaron de acuerdo con Handbook on LCA reportado en Goedkoop et al. (2015) y Huijbregts et al. (2016).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La huella ambiental, definida como la estimación de los impactos ambientales potenciales analizados en el ciclo de vida del sistema estudiado se presentan en el **cuadro II** y las contribuciones de cada una de las categorías de impacto ambiental se presentan en la **figura 2**.

Las emisiones potenciales en calentamiento global fueron de 27.56 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ de biodiésel y un consumo de energía de 0.527 GJ de energía fósil/GJ de biodiésel en todo el sistema de producción de biodiésel. Las contribuciones de las emisiones de GEI y el consumo de energía fósil por unidad de energía renovable producida se presenta en la **figura 3** para cada una de las etapas que conforman el sistema de producción.



**Fig. 2.** Contribución de los impactos ambientales potenciales por las etapas del sistema de producción de biodiésel con *Jatropha curcas* ecotipo E2M

**CUADRO II.** IMPACTOS AMBIENTALES DEL SISTEMENA DE PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL UTILIZANDO LAS SEMILLAS DEL ECOTIPO E2M DE *Jatropha curcas*.

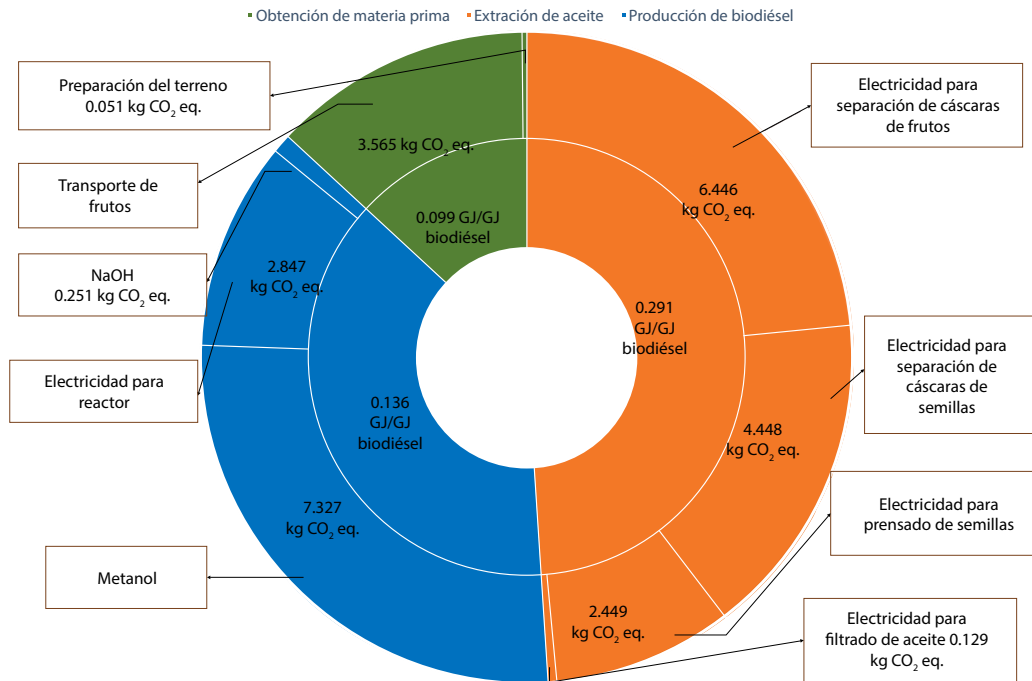
Categoría de impacto	Unidad	Total	Materia prima	Extracción de aceite	Producción de biodiésel
Calentamiento global	kg CO <sub>2</sub> eq	27.563	3.666	<b>13.471</b>	10.424
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC <sub>11</sub> eq	2.49E-05	2.62E-06	<b>1.83E-05</b>	3.97E-06
Radiación ionizante	kq Co-60 eq	0.923	0.0069	<b>0.756</b>	0.159
Formación de ozono, salud humana	kg NO <sub>x</sub> eq	0.062	<b>0.027</b>	0.022	0.013
Formación de partículas finas	kg PM <sub>2.5</sub> eq	0.052	0.0053	<b>0.031</b>	0.015
Formación de ozono, ecosistemas terrestres	kg NO <sub>x</sub> eq	0.066	<b>0.027</b>	0.022	0.0161
Acidificación terrestre	kg SO <sub>2</sub> eq	0.101	0.017	<b>0.045</b>	0.039
Eutrofización de agua dulce	kg P eq	0.0074	6.06E-06	<b>6.0E-03</b>	1.2E-03
Eutrofización marina	kg N eq	0.0005	1.95E-05	<b>4.0E-04</b>	9.66E-05
Ecotoxicidad terrestre	kg 1,4-DCB	13.285	0.1808	<b>10.758</b>	2.345
Ecotoxicidad de agua dulce	kg 1,4-DCB	0.227	0.019	<b>0.161</b>	0.046
Ecotoxicidad marina	kg 1,4-DCB	0.318	0.026	<b>0.228</b>	0.063
Toxicidad humana cancerígena	kg 1,4-DCB	0.391	0.0027	<b>0.320</b>	0.068
Toxicidad humana no cancerígena	kg 1,4-DCB	7.048	0.954	<b>4.659</b>	1.434
Uso de tierra	m <sup>2</sup> cultivo anual eq	946.342	<b>946.342</b>	0.0097	0.0021
Escasez de recursos minerales	kg Cu eq	0.0009	4.86E-06	<b>7.0E-04</b>	1.0E-04
Escasez de recursos fósiles	kg petróleo eq	7.586	1.419	<b>4.201</b>	1.965
Consumo de agua	m <sup>3</sup>	1380.562	<b>1380.527</b>	0.025	0.009

Notas: Los valores en negrita presentan la etapa con mayores impactos para cada una de las categorías evaluadas.

La etapa de obtención de materia prima contribuye con 3.67 kg CO<sub>2</sub> eq y 0.099 GJ de consumo de energía fósil, siendo el proceso con mayor aportación el transporte de frutos con 92 % de las aportaciones para calentamiento global y 85 % del consumo de energía fósil. La etapa de extracción de aceite contribuye con 13.47 kg CO<sub>2</sub> eq y 0.291 GJ de consumo de energía fósil, teniendo a la separación de frutos y semillas con el mayor aporte de 80.86 % para ambas categorías. La etapa de producción de biodiésel contribuye con 10.42 kg CO<sub>2</sub> eq y 0.136 GJ de consumo de energía fósil, en la que el consumo de

metanol tiene las mayores aportaciones en la categoría de calentamiento con el 70 %, mientras que el consumo de energía eléctrica para el reactor tiene la mayor aportación con 59.45 % del consumo de energía fósil.

La etapa de extracción de aceite es la que genera la mayor cantidad de impactos en 14 de las 18 categorías evaluadas (**Cuadro II**), seguido por la etapa de obtención de materia prima que presenta mayor impacto en las 4 categorías restantes: formación de ozono, uso de tierra y consumo de agua; mientras que la etapa de producción de biodiésel genera la menor cantidad de impactos en todas las categorías.



**Fig. 3.** Emisiones potenciales de calentamiento global y consumo de energía fósil por la producción de 1 GJ de biodiésel en las etapas y procesos del sistema de la producción.

La aportación de mayores impactos ambientales del proceso de extracción de aceite pudiera atribuirse a que el proceso de separación de las cáscaras de los frutos y las semillas es muy intensivo en consumo energía eléctrica obtenida de la red eléctrica nacional. De acuerdo con la base de datos Ecoinvent 3 del software SimaPRO 3.5, la mezcla o matriz representativa de electricidad mexicana se conformó principalmente por combustible fósiles: 52.3 % de gas natural, 12.7 % de combustóleo, 11.4 % de carbón mineral, 1.4 % coque de petróleo, 1.1 % de diésel, 13.3 % de hidroelectricidad, 4.3 % de eólica, geotérmica, solar y bioenergía y 3.2 % de nucleoelectrónica.

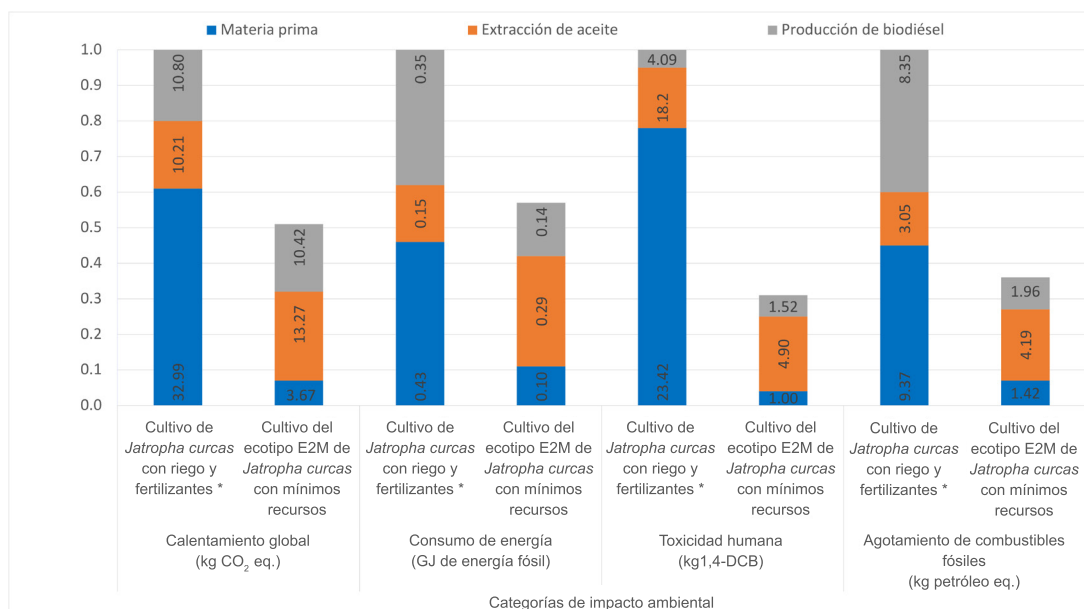
La contribución de cada uno de los procesos que conforman la etapa extracción de aceite fue la misma en todas las categorías evaluadas con respecto al total de emisiones ambientales de cada categorías de impacto. El proceso de separación de las cáscaras de los frutos contribuye con 47.8 %, la separación de las cáscaras de las semillas del endospermo contribuye con 33 %, el prensado del endospermo contribuye con 18.1 % y el filtrado de aceite contribuye con 0.96 %.

Los resultados obtenidos en este estudio únicamente se pueden comparar en cuatro categorías de impacto reportadas por Giral-di-Díaz et al. (2018), debido a que la huella ambiental del sistema de

producción de biodiésel con *Jatropha curcas* no ha sido reportado en otros estudios para todas las categorías analizadas en este trabajo. Tampoco se han reportado sistemas de producción en que la obtención de la materia prima se realice en un cultivo de mínimos recursos. Giral-di-Díaz et al. (2018) analizaron un sistema de producción de biodiésel que considera las tres etapas de ciclo de vida, aplicando datos para México. Los procesos que conforman las etapas de ciclo de vida de dicho sistema de producción tienen algunas diferencias con respecto al presente trabajo. Las más notables se encuentran en la etapa de materia prima. En efecto, Giral-di-Díaz et al. (2018) utilizaron riego, fertilizantes, herbicidas y plaguicidas reportando una producción de semillas de 6,000 kg/ha el cultivo de *Jatropha curcas*. En la etapa de extracción de aceite no consideraron el proceso de separación de cáscara mientras que en la etapa de producción de biodiésel el proceso utilizó H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> y gas LP, adicionalmente al NaOH, metanol y electricidad.

Para comparar los sistemas de producción se utilizó el mismo flujo de referencia de la producción de 1 GJ de biodiésel, así la comparación se realizó sobre las emisiones potenciales en calentamiento global, consumo de energía, toxicidad humana y agotamiento





**Fig. 4.** Comparación de cuatro categorías de impacto ambiental de la producción de 1 GJ de biodiésel de *Jatropha curcas* entre dos sistemas con diferente escenario de cultivo de la materia prima.

de combustibles fósiles. En la **figura 4**, se muestra la comparación de las 4 categorías de impacto entre los valores de Giraldi-Díaz et al. (2018) y los obtenidos en el presente trabajo. Los impactos ambientales potenciales se normalizaron de 0 a 1, en donde 1 representa el sistema de producción con mayor impacto ambiental en cada categoría comparada.

Los impactos ambientales totales reportadas por Giraldi-Díaz et al. (2018) dimensionadas a la producción de 1 GJ de biodiésel fueron, en calentamiento global 54.00 kg CO<sub>2</sub> eq, en consumo de energía 0.93 GJ de energía fósil, en toxicidad humana 23.42 kg 1,4-DCB y en agotamiento de combustibles fósiles 20.77 kg petróleo eq. En todas las categorías las emisiones ambientales son mayores comparadas en relación con las del sistema de producción de biodiésel que utiliza el ecotipo mexicano E2M cultivado en un escenario de mínimos recursos de agua y biofertilización. En calentamiento global presentó un valor de 27.56 kg CO<sub>2</sub> eq, en consumo de energía 0.53 GJ de energía fósil, en toxicidad humana 7.42 kg 1,4-DCB y en agotamiento de combustibles fósiles 7.57 kg petróleo eq. Las mayores contribuciones del estudio de Giraldi-Díaz et al. (2018) se presentaron en la etapa de materia prima por el uso de fertilizantes, herbicidas y plaguicidas para el cultivo de *Jatropha curcas*, mientras que en la etapa de extracción de aceite los impactos ambientales potenciales resultaron mayores para el sistema que utiliza el ecotipo E2M.

En la etapa de producción de biodiésel las emisiones potenciales de las categorías de calentamiento global, consumo de energía y agotamiento de combustibles fósiles son menores en el sistema de que utiliza el ecotipo E2M, pero en la categoría de toxicidad humana presenta un impacto ambiental mayor. En términos de emisiones potenciales totales, el sistema que utiliza el ecotipo E2M en un sistema de cultivo con mínimos recursos de agua y biofertilización presenta reducciones de 48 % en la categoría de calentamiento global, 43 % en consumo de energía, 68 % en toxicidad humana y 63 % en agotamiento de combustibles con respecto al sistema que utiliza un cultivo de *Jatropha curcas* con riego y fertilizantes.

Otros sistemas de producción de biodiésel que utilizan diferentes materias primas, generalmente en sistemas de cultivo intensivos de riego y fertilización, han reportado para la categoría de impacto de calentamiento global las siguientes emisiones potenciales: 30.50 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ con el cultivo de semillas de girasol, 36.28 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ con el cultivo de semillas algodón, 105.58 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ con el cultivo de colza, 164.08 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ con el cultivo de semillas de tabaco (Carvalho et al. 2019) y 40.81 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ con de cultivo de palma aceitera (Siregar et al. 2015). Comparado con el sistema de producción de biodiésel de mínimos recursos utilizando semillas de *Jatropha curcas* del ecotipo E2M, respecto a la categoría de calentamiento global, el sistema producción de biodiésel analizado en este

trabajo es una opción prometedora para mitigar el cambio climático.

## CONCLUSIÓN

Se determinó la huella ambiental de un sistema de producción de biodiésel utilizando un ecotipo mexicano de *Jatropha curcas* cultivado en suelo marginales con mínimos recursos de riego y biofertilización, medida a través de 18 categorías de impacto ambiental en un análisis de ciclo de vida. Esto permitió identificar principalmente que las emisiones potenciales en todo el sistema de producción para la categoría de calentamiento global fueron 27.56 kg CO<sub>2</sub> eq/GJ de biodiésel con un consumo de energía de 0.527 GJ de energía fósil/GJ de biodiésel.

En las categorías de impacto que fueron comparadas con respecto a un sistema que utiliza un cultivo de *Jatropha curcas* con riego y fertilizantes se presentó una reducción de 48 % en la categoría de calentamiento global, 43 % en consumo de energía, 68 % en toxicidad humana y 63 % en agotamiento de combustibles. El sistema de producción de biodiésel que utiliza el ecotipo E2M de *Jatropha curcas* también mostró menores emisiones en la categoría de calentamiento global con respecto a sistemas de producción que utilizan otras materias primas como semillas de girasol, algodón, colza, tabaco o palma aceitera para la producción de biodiesel, por lo que el ecotipo E2M de *Jatropha curcas* es prometedor para la producción de biodiésel ya que logra reducir el impacto ambiental y la mitigación del cambio climático. Sin embargo, es necesario desarrollar programas de mejoramiento de este ecotipo para aumentar la productividad de su semilla.

En el futuro se requiere el análisis de mejoras tanto al sistema de producción, que incluyan el aprovechamiento de los residuos biomásicos y el endospermo extruido, así como, de los aspectos económicos y sociales que son críticos para la sustentabilidad de la producción de biodiésel utilizando *Jatropha curcas* mexicana como materia prima.

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al CVU No. 490087 del primer autor y al proyecto L4 Sustentabilidad y Políticas Públicas de Biocombustibles Sólidos del Clúster de Innovación en Biocombustibles

Sólidos del Fondo de Sustentabilidad Energética CONACYT-SENER-FSE 246911, por el apoyo para concluir este trabajo.

También a la beca PSPA de la DGAPA UNAM 2021 otorgada a Jorge M. Islas S. para una estancia sabática en CIEMAT-España.

## REFERENCIAS

- Achten W. M. J., Almeida, J., Fobelets, V., Bolle, E., Mathijs, E., Singh, V. P., Tewari, D. N., Verchot, L. V. y Muys, B. (2010). Life cycle assessment of *Jatropha biodiesel* as transportation fuel in rural India. *Appl. Energy*, 87(12), 3652-3660. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.003>
- Achten W. M. J., Mathijs, E., Verchot, L., Singh, V. P., Aerts, R. y Muys, B. (2007). *Jatropha* biodiesel fueling sustainability? *Biofuels, Bioprod. Biorefining*, 1(4), 283-291. <https://doi.org/10.1002/bbb.39>
- Ahmed W., Nazar, M. F., Ali, S. D., Rana, U. A. y Khan, S. U. D. (2015). Detailed investigation of optimized alkali catalyzed transesterification of *Jatropha* oil for biodiesel production. *J. Energy Chem.* 24(3), 331-336. [https://doi.org/10.1016/S2095-4956\(15\)60319-9](https://doi.org/10.1016/S2095-4956(15)60319-9)
- Alibaba. Precios filtro de aceite <https://spanish.alibaba.com/product-detail/low-price-multi-functional-jatropha-niger-seed-oil-filter-machine-60726518648.html> 18/06/2018
- Anyang Best Complete Machinery Engineering Co. Precios de equipos de extracción de aceite [www.oilmill-plant.com](http://www.oilmill-plant.com) 13/06/2018
- Baral N. R., Neupane, P., Ale, B. B., Quiroz-Arita, C., Manandhar, S. y Bradley, T. H. (2020). Stochastic economic and environmental footprints of biodiesel production from *Jatropha curcas* Linnaeus in the different federal states of Nepal. *Renew. Sust. Energy Rev.* 120, 109619. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109619>
- Baumert, S., Khamzina, A. y Vlek, P. L. G. (2018). Greenhouse gas and energy balance of *Jatropha* biofuel production systems of Burkina Faso. *Energy Sustain. Dev.* 42, 14-23. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.09.007>
- Beaver A., Castaño, A. G. y Díaz, M. S. (2016). Life cycle analysis of *Jatropha curcas* as a sustainable biodiesel feedstock in Argentina. *Chem. Eng. Trans.* 50(2008), 433-438. <https://doi.org/10.3303/CET1650073>
- Carvalho F. S., Fornasier, F., Leitão, J. O. M., Moraes, J. A. R. y Schneider, R. C. S. (2019). Life cycle assessment of biodiesel production from solaris seed tobacco. *J. Clean. Prod.* 230, 1085-1095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.177>

- Dawa A., Klemola, T., Saloniemi, I., Niemelä, P. y Vuorisalo, T. (2017). Factors affecting genetic and seed yield variability of *Jatropha curcas* (L.) across the globe: A review. *Energy Sustain. Dev.* 42, 170-182. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.09.002>
- Eshon B., Katima, J. H. Y. y Kituyi, E. (2013). Greenhouse gas emissions and energy balances of *Jatropha* biodiesel as an alternative fuel in Tanzania. *Biomass Bioenergy.* 58, 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.08.020>
- Francis G., Edinger, R. y 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. Resour. Forum.* 29, 12–24. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2005.00109.x>
- Fuentes A., García, C., Hennecke, A. y Maserá, O. (2018). Life cycle assessment of *Jatropha curcas* biodiesel production: a case study in Mexico. *Clean Technol. Envir.* 20(7), 1721–1733. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1558-7>
- Giraldo-Díaz M. R., De Medina-Salas, L., Castillo-González, E. y De la Cruz-Benavides, M. (2018). Environmental impact associated with the supply chain and production of biodiesel from *Jatropha curcas* L. through life cycle analysis. *Sustainability.* 10(5), 1451. <https://doi.org/10.3390/su10051451>
- Goedkoop M., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Struijs, J. y van Zelm, R. (2015). ReCiPe 2008 Characterisation Data. Online: PRé Consultants. Retrieved from <http://www.lcia-recipe.net/file-cabinet/ReCiPe111.xlsx?attredirects=0>
- Gonzales N. F. C. (2016). International experiences with the cultivation of *Jatropha curcas* for biodiesel production. *Energy,* 112(2016), 1245–1258. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.073>
- Hagman J., Nerentorp, M., Arvidsson, R. y Molander, S. (2013). Do biofuels require more water than do fossil fuels? Life cycle-based assessment of *Jatropha* oil production in rural Mozambique. *J. Clean. Prod.* 53, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.039>
- He W., King, A. J., Khan, M. A., Cuevas, J. A., Ramiaramananana, D. y Graham, I. A. (2011). Analysis of seed phorbol-ester and curcumin content together with genetic diversity in multiple provenances of *Jatropha curcas* L. from Madagascar and Mexico. *Plant Physiol. Biochem.* 49(10), 1183–1190. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2011.07.006>
- Huijbregts M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M. D. M. y van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. National Institute for Public Health and Environment, 201 pp.
- IMNC (2009). Norma Mexicana IMNC NMX-SAA-14014-IMNC-2008. Gestión ambiental-Análisis de Ciclo de Vida-Requisitos y directrices. Febrero 2009.
- ILCD (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook – General guide for Life Cycle Assessment – Detailed guidance. European Commission – Joint Research Centre – Institute for Environment and Sustainability.
- Ishimoto Y., Yabuta, S., Kogong, S., Motsepe, M., Tomimaga, J., Teramoto, S., Konaka, T., Mmopelwa, G., Kawamitsu, Y., Akashi, K. y Ueno, M. (2018). Environmental evaluation with greenhouse gas emissions and absorption based on life cycle assessment for a *Jatropha* cultivation system in frost- and drought-prone regions of Botswana. *Biomass Bioenergy.* 110, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.12.026>
- ISO (2006). 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. ISO:Geneva, Switzerland, 2006.
- ISO (2018). 14044:2006 + A1:2018 Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. ISO:Geneva, Switzerland, 2018.
- Jain S. y Sharma, M. P. (2010). Kinetics of acid base catalyzed transesterification of *Jatropha curcas* oil. *Bioresour. Technol.* 101(20), 7701–7706. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.034>
- Kumar A. y Sharma S. (2008). An evaluation of multi-purpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. *Ind. Crops Prod.* 28 (1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.01.001>
- Kumar S., Singh, J., Nanoti, S. M. y Garg, M. O. (2012). A comprehensive life cycle assessment (LCA) of *Jatropha* biodiesel production in India. *Bioresour. Technol.* 110, 723–729. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.142>
- Martínez-Díaz Y., González-Rodríguez, A., Delgado-Lamas, G. y Espinosa-García, F. J. (2015). Geographic structure of chemical variation in wild populations of the fuel crop *Jatropha curcas* L. in Mexico. *Ind. Crops Prod.* 74, 63–68. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.049>
- Martínez-Herrera J., Martínez Ayala, A., Makkar, H., Francis, G. y Becker, K. (2010). Agroclimatic conditions, chemical and nutritional characterization of different provenances of *Jatropha curcas* L. from Mexico. *Eur. J. Sci. Res.* 39(3), 396–407. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm%5Cnhttp://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-79957536650&partnerID=40&md5=e9b8f6a9a6ea2c8dfcb6662ea28af0ce>
- Martínez-Herrera J., Siddhuraju, P., Francis, G., Dávila-Ortiz, G. y 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 Chem.* 96(1), 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2005.01.059>
- Mazumdar P., Singh, P., Babu, S., Siva, R. y Harikrishna, J. A. (2018). An update on biological advancement of *Jatropha curcas* L.: New insight and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 91, 903–917. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.082>
- Navarro-Pineda, F. S., Baz-Rodríguez, S. A., Handler, R. y Sacramento-Rivero, J. C. (2016). Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 54, 247–269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.009>
- Ndong R., Montrejeud-Vignoles, M., Saint Girons, O., Gabrielle, B., Pirot, R., Domergue, M. y Sablayrolles, C. (2009). Life cycle assessment of biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: a field study. *Glob Change Biol Bioenergy.* 1(3), 197–210. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2009.01014.x>
- Nindita A., Dewi, I. S., Purwoko, B. S. y Setyobudi, R. H. (2015). Genetic Improvement and Biotechnology Research of *Jatropha curcas* Linn. Review: Future Research Opportunity and Sustainability Challenges in Indonesia. *Energy Procedia.* 65, 3–7. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.021>
- Padilla V., Villar, C., Sergio, H., Coiffier, V. y Patricia, M. (2011). The project of biofuels in Chiapas: Experiences of physic nut (*Jatropha curcas*) farmers within the rural crisis framework. *Estud. Soc.* 19(38), 120–144. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41719205005>
- Pecina-Quintero V., Anaya-López, J. L., Zamarripa-Colmenero, A., Núñez-Colín, C. A., Montes-García, N., Solís-Bonilla, J. L. y Jiménez-Becerril, M. F. (2014). Genetic structure of *Jatropha curcas* L. in Mexico and probable centre of origin. *Biomass Bioenergy*, 60, 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.11.005>
- Pérez G., Islas, J., Guevara, M. y Suárez, R. (2019). The sustainable cultivation of Mexican nontoxic *Jatropha curcas* to produce biodiesel and food in marginal rural lands. *Sustainability.* 11(20),5823. <https://doi.org/10.3390/su11205823>
- Prueksakorn K. y Gheewala, S. H. (2008). Full chain energy analysis of biodiesel from *Jatropha curcas* L. in Thailand. *Environ. Sci. Technol.* 42(9), 3388–3393. <https://doi.org/10.1021/es7022237>
- Rivero J. C. S., Eastmond-Spencer, A., García, J. B. y Navarro-Pineda, F. S. (2016). A three-dimensional sustainability evaluation of *Jatropha* plantations in Yucatan, Mexico. *Sustainability.* 8(12), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su8121316>
- SEMARNAT (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 31 de Diciembre de 2002
- Siregar K., Tambunan, A. H., Irwanto, A. K., Wirawan, S. S. y Araki, T. (2015). A comparison of life cycle assessment on oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) and physic nut (*Jatropha curcas* Linn.) as feedstock for biodiesel production in Indonesia. *Energy Procedia.* 65, 170–179. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.01.054>
- Solben. Precios de planta de biodiesel <http://www.solben.org.mx/27/06/2019>
- Somorin T. O., Di Lorenzo, G. y Kolios, A. J. (2017). Life-cycle assessment of self-generated electricity in Nigeria and *Jatropha* biodiesel as an alternative power fuel. *Renew. Energy.* 113, 966–979. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.073>
- Wang Z., Calderon, M. M. y Lu, Y. (2011). Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China. *Biomass Bioenergy.* 35(7), 2893–2902. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.03.031>