



PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES EN MÉXICO. PARTE 1. MATERIAS PRIMAS.

PRODUCTION OF BIOFUELS IN MEXICO. PART 1. RAW MATERIALS.

Fernando Israel Gómez-Castro^{1*}, Claudia Gutiérrez-Antonio², Salvador Hernández¹, Carolina Conde-Mejía³, Antioco López-Molina³, Ricardo Morales-Rodríguez¹

¹ Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Col. Noria Alta, Guanajuato, Guanajuato, 36050, México.

² Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/n, Col. Las Campanas, Querétaro, Querétaro, 76010, México.

³ Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, División Académica Multidisciplinaria de Jalpa de Méndez, Carretera Villahermosa-Comalcalco km. 27, Jalpa de Méndez, Tabasco, 86200, México.

*Autor de correspondencia. Correo electrónico: fgomez@ugto.mx

Resumen

Los combustibles renovables, o biocombustibles, son obtenidos a partir de materia prima renovable, y representan una alternativa sustentable a los combustibles fósiles. Entre las materias primas que pueden procesarse para obtener combustibles renovables se encuentran los aceites vegetales, las grasas animales, los residuos agroindustriales, entre otros. En los primeros años de desarrollo de los biocombustibles se emplearon aceites comestibles para su producción, así como maíz y caña de azúcar, lo cual generó incertidumbre respecto a una posible competencia entre los sectores de alimentación y energía. A pesar de que en los últimos años se han propuesto materiales alternativos para evitar dicha competencia, el temor prevalece en la opinión pública. Debido a esto, en este trabajo se expone la evolución en las materias primas propuestas y estudiadas para la producción de biocombustibles, así como su potencial de producción en México.

Palabras clave: biocombustibles, materia prima, potencial productivo.

Abstract

Renewable fuels or biofuels are obtained from renewable raw materials, and they represent a sustainable alternative to the fossil fuels. Among the materials that can be processed to obtain biofuels, vegetable oils, animal fats, agroindustry residues, among others, can be mentioned. On their first years of the development of biofuels production processes edible oils were used along with corn and sugarcane. This activity caused uncertainty in terms of potential competition between the food and energy sectors. Even though alternative raw materials have been proposed in the last years to avoid such competition, the fear prevails in the public opinion. With this in mind, in this work the evolution of the proposed and studied raw materials for the production of biofuels is presented. Moreover, the production potential of such materials in Mexico is discussed.

Keywords: biofuels, productive potential, raw material.

Introducción

El ser humano necesita energía para realizar sus actividades. Desde la época del hombre primitivo, al descubrir la forma de producir fuego, se comenzó a emplear energía térmica para cocinar los alimentos, obteniendo dicha energía a partir de un material combustible. A partir de la revolución industrial, el uso de combustibles ha crecido de manera importante; por ejemplo, en la generación de vapor para impulsar a los trenes se usaba originalmente carbón, uno de los combustibles sólidos de origen fósil más empleados. Hoy día, la energía eléctrica se produce, en gran parte, a través de la quema de combustibles fósiles. Las necesidades de calentamiento en la industria suelen satisfacerse a través de energía eléctrica o de vapor, para lo cual se requiere energía térmica, obtenida por medio de la quema de combustibles fósiles, tales como el gasóleo o el gas natural. El transporte de pasajeros y materiales implica también el uso de combustibles fósiles. Esto plantea dos problemáticas principales. La primera se refiere a la disponibilidad de esta fuente de energía. Hasta finales del 2017, las reservas mundiales eran de 1,696.6 billones de barriles, con lo cual se puede satisfacer la demanda actual por 50.2 años (BP, 2018). Sin embargo, la disponibilidad del petróleo varía con el tiempo, ya que esta industria continúa explorando nuevos campos; además, algunas reservas se encuentran en zonas de aguas profundas, dificultando su extracción y elevando los costos asociados, debido a la necesidad de tecnologías más sofisticadas. Así pues, las reservas de esta materia prima son muy variables. La predicción del pico máximo de producción siempre ha sido un tema controvertido; algunos autores indican que el máximo de producción ya se alcanzó (Hubbert, 1969), mientras que otros indican que se alcanzará muy pronto, en el año 2021 (Yang, 2015). Lo cierto es que el petróleo se agotará, tarde o temprano. Adicionalmente, muchas de las grandes reservas a nivel mundial se encuentran en zonas políticamente inestables. La segunda problemática se refiere a los diversos efectos negativos al ambiente que el uso desmedido de combustibles fósiles ha ocasionado. Algunos de estos efectos incluyen el agujero en la capa de ozono y la acidificación de los océanos, así como la aceleración en las variaciones climáticas del planeta (Lenton y col., 2009); lo anterior también ha originado incrementos importantes en la

temperatura media en distintas zonas, así como un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos naturales tales como huracanes, tormentas tropicales, crecimiento desmedidos de especies marinas invasivas, entre otras consecuencias negativas. Estas situaciones, tanto económicas como ambientales, han motivado el desarrollo de fuentes alternativas de energía que sean renovables y de menor impacto ambiental que las tradicionales. Para sectores como el de transporte, el industrial y el de generación de energía, los biocombustibles representan una alternativa renovable a los combustibles fósiles. Los biocombustibles se obtienen a partir de fuentes renovables, entre las que se incluyen cultivos y desechos de diferente índole. Lo anterior implica que estos combustibles pueden producirse empleando materia prima local, promoviendo la independencia energética para cada nación. México es un país con un alto potencial productivo de distintos cultivos, así como una gran producción de residuos, lo cual lo hace un candidato idóneo para el desarrollo de una industria de biocombustibles. En las primeras etapas del desarrollo de los procesos de producción de los biocombustibles se empleaban materiales como maíz y caña de azúcar, así como aceites comestibles, lo cual ocasionó incertidumbre sobre una posible competencia entre el sector energético y el de alimentos. Aunque en los últimos años se han desarrollado procesos para obtener biocombustibles a partir de materia prima no comestible, la desconfianza prevalece en un sector de la población. Así pues, en este trabajo se presentarán algunas de las materias primas que se han propuesto para la obtención de biocombustibles, tanto comestibles como no comestibles, y se discutirá su potencial como materia prima en la producción de biocombustibles. En una segunda parte de este trabajo, se describirán a fondo los principales biocombustibles con potencial de desarrollo en el corto plazo, así como los retos para la implementación de una industria de energía renovable en el país.

2. Aceites vegetales

El uso de aceites vegetales como materia prima para producir combustibles, o inclusive como combustibles por sí mismos, no es algo novedoso; el mismo Rudolph Diesel probó originalmente su motor empleando aceite de cacahuate en 1900. Sin embargo, los aceites vegetales son muy

viscosos, y a largo plazo pueden ocasionar problemas en el sistema de inyección del motor. Debido a lo anterior, para ser empleados como combustibles los aceites vegetales deben ser modificados, con el fin de obtener un líquido

con características físicas apropiadas para la operación del motor. La Tabla 1 presenta un resumen de los tipos de aceites empleados para la producción de biocombustibles que se describirán en esta sección.

Tabla 1. Resumen de tipos de aceites para la producción de biocombustibles.

Generación	Ejemplos de aceites	Ventajas	Desventajas
Primera	Aceite de colza, aceite de palma, aceite de girasol	Alta disponibilidad Fácil transformación	Son aceites comestibles, o provienen de fuentes comestibles. Alto costo
Segunda	Aceite de higuera, aceite de <i>Jatropha curcas</i>	No son comestibles Arbustos resistentes	Baja productividad de aceite Alto requerimiento de agua para riego
	Aceite de re-uso	Bajo costo. Se evita su disposición a drenaje	Se requiere un sistema de recolección Requieren tratamientos adicionales
Tercera	Aceite de micro-algas	Alta productividad de aceite No requieren uso de tierras de cultivo	Alto requerimiento de agua Procesos complejos de cosecha y extracción de aceite

Inicialmente, se propusieron como materias primas para la producción de combustibles renovables aceites como el de canola, coco, girasol, ajonjolí, entre otros, los cuales se denominan de primera generación. Sin embargo, estos aceites se emplean en la alimentación humana, por lo que su uso en la producción de combustibles podía poner en riesgo la seguridad alimentaria. Debido a esto surge la segunda generación de materias primas, que incluye aceites obtenidos de semillas que no son comestibles, tales como la higuera o las variedades de *Jatropha*, particularmente *Jatropha curcas* L. o piñón mexicano. Ambas especies tienen la ventaja de crecer en terrenos considerados inapropiados para los cultivos alimenticios. Estas semillas han generado particular interés como materia prima de biocombustibles en México, debido a su potencial productivo; de acuerdo con el INIFAP (Díaz Padilla y col., 2012) en México se cuenta con 3,138,302 hectáreas con potencial productivo alto para el cultivo de *Jatropha*, así como 7,779,867 hectáreas con potencial productivo medio; para higuera son 8,001,417 hectáreas con potencial alto y 9,912,719 hectáreas con potencial medio. Los estados con mayor potencial productivo alto de *Jatropha* son Veracruz (24.47%), Chiapas (13.11%) y Guerrero (12.15%); en cuanto al potencial medio, se tiene mayor aportación de los estados de Sinaloa (20.64%), Tamaulipas (20.31%) y

Sonora (9.06%). Para el cultivo de *Jatropha*, Veracruz, Guerrero y Chiapas contribuyen con aproximadamente 50% del total de superficie con alto potencial. Respecto al cultivo de higuera, la mayor proporción de potencial alto se encuentra en Tamaulipas (20.85%), Sinaloa (17.83%) y Jalisco (11.31%); para potencial medio, los estados con mayor contribución son Zacatecas (11.15%), Guanajuato (10.07%) y Jalisco (8.52%). Para higuera, Tamaulipas, Sinaloa y Jalisco aportan el 50% de superficie con alto potencial. La Figura 1 muestra una el potencial para cultivo de *Jatropha* e higuera en el país.

Los aceites de segunda generación tienen dos desventajas principales: primera, la cantidad de aceite que se obtiene por hectárea de semilla es relativamente baja. En el caso de la *Jatropha* se estima una producción de aceite de 1,892 litros por hectárea anuales, mientras que para la higuera se estiman 1,413 litros de aceite por hectárea anuales (Atabani y col., 2012). Asimismo, se ha estimado un potencial de producción de hasta 5 toneladas de semilla de *Jatropha curcas* a partir del quinto año de cultivo (Huerta Reza y col., 2010), así como 1.8 a 3 toneladas por hectárea de higuera sembrada, la cual puede cosecharse aproximadamente 150 días después de su siembra (SAGARPA, 2017).



Figura 1. Estados con potencial productivo para el cultivo de *Jatropha* e higuierilla

La segunda desventaja de dichos aceites es que, a pesar de que pueden crecer en terrenos inapropiados para los cultivos alimenticios, se requiere una gran cantidad de agua para mantener en buenas condiciones los arbustos. Por ello, el territorio reportado como de alto potencial para *Jatropha* [Veracruz, Chiapas, Guerrero y Nayarit] y para higuierilla [Tamaulipas, Sinaloa, y Jalisco] posee condiciones de lluvia capaces de satisfacer los requerimientos de agua de los arbustos [Díaz Padilla y col., 2012]. Sin embargo, existen otras regiones en las cuales es viable el cultivo de *Jatropha* e higuierilla, pero requieren riego artificial.

En años recientes se ha desarrollado una tercera generación de materias primas, la cual incluye algas y micro-algas. Las micro-algas permiten obtener una cantidad muy alta de aceite, entre 58,700 y 136,900 litros por hectárea anuales, dependiendo del tipo de micro-alga [Atabani y col., 2012], y no requieren de tierras de cultivo. El medio de crecimiento de estos microorganismos es agua, en grandes volúmenes, y se requieren nutrientes, así como una fuente de carbono. Para aminorar el consumo del recurso hídrico podrían implementarse estrategias de reciclaje; otra alternativa propone el cultivo y

crecimiento de micro-algas empleando aguas residuales. Esta segunda alternativa ha recibido mucha atención, ya que las micro-algas tienen la capacidad de remover bacterias, nitrógeno, fósforo y metales pesados de las aguas residuales, generándose una oportunidad de tratamiento de este tipo de aguas y el simultáneo crecimiento de las micro-algas para la producción de aceite [Rawat y col., 2011; Abdel-Raouf y col., 2012]. De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua en México, al año 2015 alrededor de 7,862,400 metros cúbicos por día de aguas residuales municipales no fueron tratadas, mientras que a nivel industrial el volumen fue de 12,450,240 metros cúbicos por día [CONAGUA, 2016]. Esto es un claro indicativo del potencial de cultivo de micro-algas con aguas residuales en México. No obstante, el mayor reto para la disposición de biomasa de micro-algas a gran escala se encuentra en el diseño eficiente de los métodos de cosecha de estos microorganismos. Igualmente, el diseño de la etapa de extracción de aceite a partir de la biomasa con bajo consumo de energía es una de las principales barreras técnicas en la ruta de producción de aceites de micro-algas. Una categoría especial de materia prima, que se clasifica como de segunda generación, incluye los aceites vege-

Fernando Israel Gómez-Castro, Claudia Gutiérrez-Antonio, Salvador Hernández, Carolina Conde-Mejía, Antioco López-Molina, Ricardo Morales-Rodríguez [pp. 41- 50]

tales de re-uso; es decir, aceite de cocina que ha terminado su ciclo en la preparación de alimentos, pero que puede tener un segundo uso como materia prima para obtener biocombustibles. Se ha reportado una disponibilidad de 10 millones de toneladas anuales de aceite de cocina de re-uso en los Estados Unidos (Gui y col., 2008). En México se han reportado estimados entre 0.21 y 0.473 millones de toneladas de aceite de cocina de re-uso disponibles para producción de biodiésel al año 2010 (Sheinbaum-Pardo y col., 2013). Por otra parte, se ha reportado al año 2016 la recolección de 8,300 L de aceite residual en empresas del Puerto Interior (Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato, 2016). Asimismo, en la Universidad Autónoma de Querétaro se recolectan mensualmente 600 L de aceite de re-uso en 10 sitios distintos, incluyendo cafeterías, hospitales, hoteles y restaurantes. En la región sureste, en un estudio realizado en el municipio de Emiliano Zapata, Tabasco, se reporta que se tiene un potencial de recolección de 5,000 litros por mes de aceite de re-uso (Gasca González, 2017). Este tipo de aceite es económico, pues se trata en principio de un desecho. Por otra parte, su uso como materia prima evita que se

deseche al drenaje, previniendo así un problema de contaminación ambiental. Sin embargo, se debe contar con un sistema apropiado de recolección. Asimismo, debido a la exposición al calor la composición química del aceite se modifica, por lo que se requieren métodos de acondicionamiento previos a su conversión en biocombustible.

3. Biomasa Sólida

Dentro de la biomasa sólida se encuentran materiales con alto contenido de azúcares, como maíz, caña de azúcar, sorgo; así como desechos agroindustriales, forestales y animales. Las primeras tres, conocidas como materias primas de primera generación, presentan el inconveniente de competir con el mercado alimenticio. La Tabla 2 resume las generaciones de biomasa sólida a analizarse a lo largo de esta sección. Refiriéndose a la competencia con el sector alimenticio de la biomasa de primera generación, este factor no ha tenido impacto importante en países con exceso de producción de caña de azúcar, como Brasil, o de maíz, como Estados Unidos. Sin embargo, otros países con déficit en la producción de estas materias primas no podían dedicar parte de su producción a la obtención de biocombustibles.

Tabla 2. Resumen de tipos de biomasa sólida para la producción de biocombustibles.

Generación	Ejemplos de biomasa	Ventajas	Desventajas
Primera	Maíz, caña de azúcar	Alto contenido de azúcares	Son materiales comestibles En el caso del maíz, sólo puede emplearse cuando haya excedentes de producción interna.
Segunda	Residuos agroindustriales Desechos animales	No son comestibles Alta disponibilidad	Se requiere un sistema de recolección Requieren tratamientos adicionales

En México, el artículo 11, fracción 8, de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, indica que la caña de azúcar y el maíz pueden emplearse para producir biocombustibles sólo en el caso de existir un superávit (Diario Oficial, 2008). Debido a esto se comenzó la búsqueda de nuevos materiales, los cuales no debían competir con la alimentación, encontrando una alternativa en los materiales lignocelulósicos. Este tipo de materia prima contiene componentes conocidos como lignina, celulosa y hemicelulosa, los cuales son polímeros complejos. Ejemplos de materiales lignocelulósicos son la madera y los residuos de la agroindustria. En el caso de la madera, su uso desmedido para la obtención de biocombustibles

podría ocasionar deforestación. Sin embargo, los residuos de la agroindustria usualmente se desechan o se queman sin ningún beneficio; por lo que su empleo como materia prima para biocombustibles aumentaría la cadena de valor de estos residuos y sus procesos de origen. Sin embargo, tienen la desventaja de requerir un número mayor de etapas de proceso para alcanzar el producto final, en comparación con los materiales de primera generación.

México es un país con una amplia producción de residuos agroindustriales. En el año 2006 se reportó la generación de 75.73 millones de toneladas (Saval, 2012). Además, se estima que se desechan 93 millones de metros cúbicos de efluentes líquidos, destacando las aguas

residuales de la industria de conservas, pescados y cerveza (Centro Mario Molina, 2016). El 79% de los residuos sólidos corresponde a residuos primarios (hojas y tallos de maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada y de frijol, entre otros), mientras que el 21% corresponde a residuos secundarios, tales como el bagazo de caña de azúcar, de maguey, de agave, entre otros (Saval, 2012). Por otra parte, en el estado de Guanajuato, se ha reportado una producción de alrededor de 4,100 toneladas por año de residuos de cultivos como agave, maíz, sorgo, trigo y cebada (Méndez-Vázquez y col., 2017). A nivel nacional, se ha reportado que los residuos de cultivos como maíz, sorgo, caña de azúcar y trigo representan alrededor del 80% de la generación de residuos agroindustriales de cultivos primarios, con 32.83, 8.28, 7.58 y 5.07 millones de toneladas de residuos, respectivamente, al año 2006 (Valdez-Vazquez y col., 2010). Por otra parte, Diaz Padilla y col. (2012) reportan 2,909,690 hectáreas y 11,157,752 hectáreas con potencial productivo alto y medio, respectivamente para el cultivo de maíz; 4,742,241 y 10,961,674 hectáreas con potencial productivo alto y medio, respectivamente, para sorgo; 1,146,792 y 5,130,996 hectáreas con potencial alto y medio, respectivamente, para el cultivo de caña de azúcar; así como 3,050,547 y 10,372,806 hectáreas con potencial alto y medio, respectivamente, para trigo. Entre los estados con mayor potencial productivo alto para

maíz se encuentran Jalisco [32.97%], Michoacán [12.26%] y Nuevo León [8.76%]. Respecto a potencial medio, se encuentran Tamaulipas [13.34%], Sinaloa [9.60%] y Guanajuato [9.51%]. En el caso del sorgo, los estados con mayor potencial alto son Sinaloa [23.77%], Tamaulipas [23.77%] y Michoacán [8.45%]. En cuanto a potencial medio, se tiene a Veracruz [14.77%], Jalisco [8.87%] y Tamaulipas [5.59%]. Para la caña de azúcar, los estados con mayor potencial alto son Veracruz [45.39%], Tabasco [14.57%] y Chiapas [9.15%]; respecto a potencial medio se tiene a Veracruz [22.74%], Chiapas [15.64%] y Guerrero [10.45%]. En el caso de trigo, los estados con mayor potencial productivo alto son Jalisco [34.75%], Michoacán [19.60%] y Nuevo León [7.85%]; respecto a potencial productivo medio, los estados con mayor contribución son Guanajuato [9.62%], Sinaloa [9.29%] y Tamaulipas [9.35%]. Se ha reportado que, por cada kilogramo cosechado, se producen 1.5 kilogramos de residuo de maíz, 1.5 kg de residuo de sorgo, 0.15 kg de residuo de caña de azúcar y 1.5 kg de residuo de trigo (Valdez-Vazquez y col., 2010). La Figura 2 presenta el potencial de los principales cultivos primarios en el país. Respecto a los principales cultivos primarios, se han reportado rendimientos de 3.32 toneladas por hectárea de maíz, 5.08 toneladas por hectárea de trigo, 2.51 toneladas por hectárea de cebada y 3.58 toneladas por hectárea de sorgo (Caballero Deloya, S.F.).

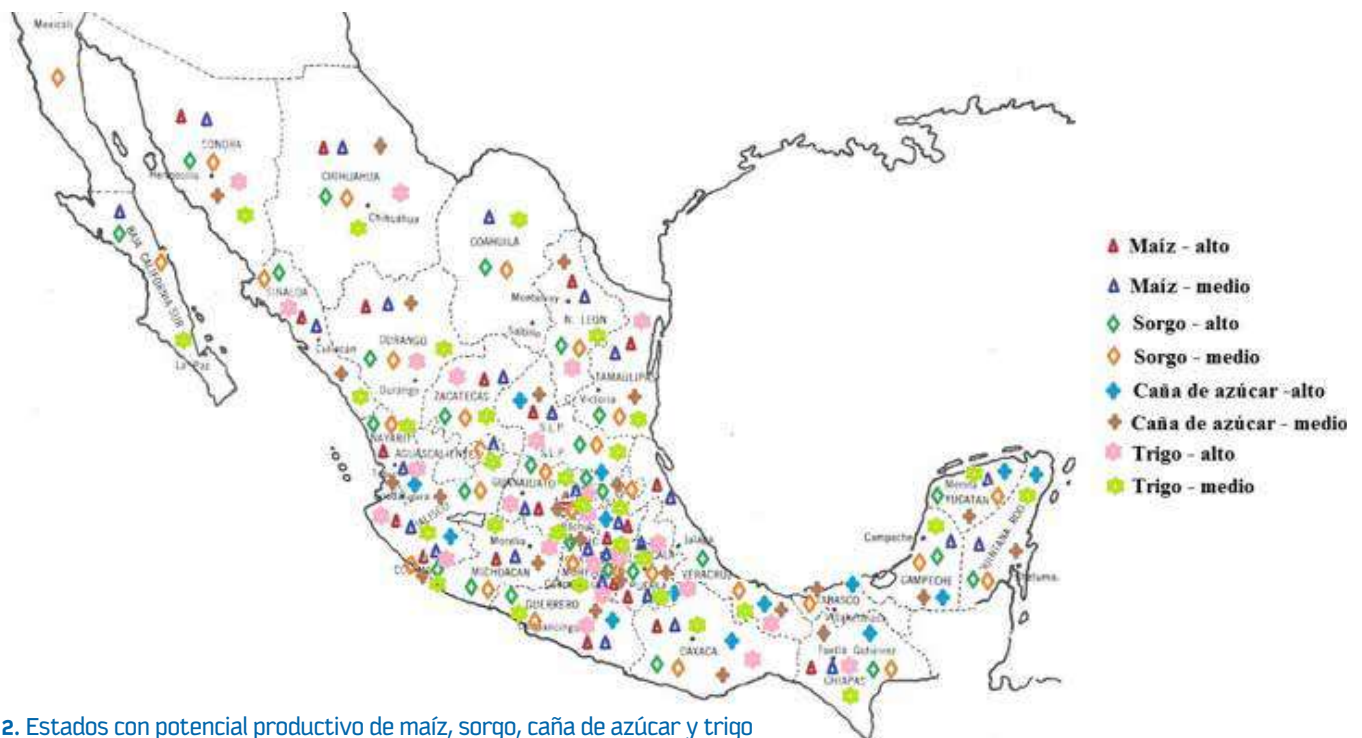


Figura 2. Estados con potencial productivo de maíz, sorgo, caña de azúcar y trigo

Adicionalmente, residuos orgánicos tales como las heces de ganado pueden emplearse para la generación de biocombustibles gaseosos, particularmente el biogás. México tiene un alto potencial para la producción de biogás, siendo los principales sectores para su implementación el ganadero (porcino y bovino), rellenos sanitarios y aguas residuales. Actualmente, se cuenta con una baja capacidad instalada para producir energía a partir de biogás, 5.7 MW. Sólo el 8% de las granjas porcinas tiene instalado un biodigestor, dejando claro que queda mucho por hacer para el aprovechamiento de estos residuos [Weber y col., 2012]. Por otra parte, estudios realizados en el norte del país indican que la producción de energía a partir de biogás tiene gran potencial en zonas de producción lechera y de establos, con un potencial de ahorro energético de más de 40 millones de pesos que no se ha aprovechado [Rivas Lucero y col., 2012].

A modo de resumen, la Figura 3 presenta los distintos tipos de materias primas, así como los combustibles renovables que se obtienen a partir de ellas.

4. Recapitulación

Se ha presentado una diversidad de potenciales materias

primas para la producción de biocombustibles en México, que van desde derivados de cultivos, como aceites de higuera y *Jatropha*, residuos de cultivos como maíz, trigo, sorgo y caña de azúcar, hasta aceites de otras fuentes, como las micro-algas, y aceites de cocina usados, e incluso desechos de animales. El potencial de producción de estos materiales es alto, pues en general al menos uno de los cultivos mencionados puede desarrollarse en al menos uno de los estados del país. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el potencial económico de cada cultivo variará dependiendo de la región y la tecnología disponible. Algunos reportes en Veracruz mencionan que la relación beneficio/costo para la higuera cultivada en esa zona es de 0.47, mientras que dicha relación es de 13.04 para la caña de azúcar [Valdés Rodríguez y col., 2014]. Sin embargo, es necesario mencionar que el potencial de cultivo de higuera en Veracruz es medio, con 757,649 hectáreas, lo cual representa el 7.64% nacional. Por el contrario, Veracruz representa el 45.39% de superficie con potencial alto para el cultivo de caña de azúcar. Otros estudios en Latinoamérica señalan relaciones de beneficio/costo entre 1.59 y 2.14 para distintas especies de higuera [Hurtado-Salazar y col., 2013].

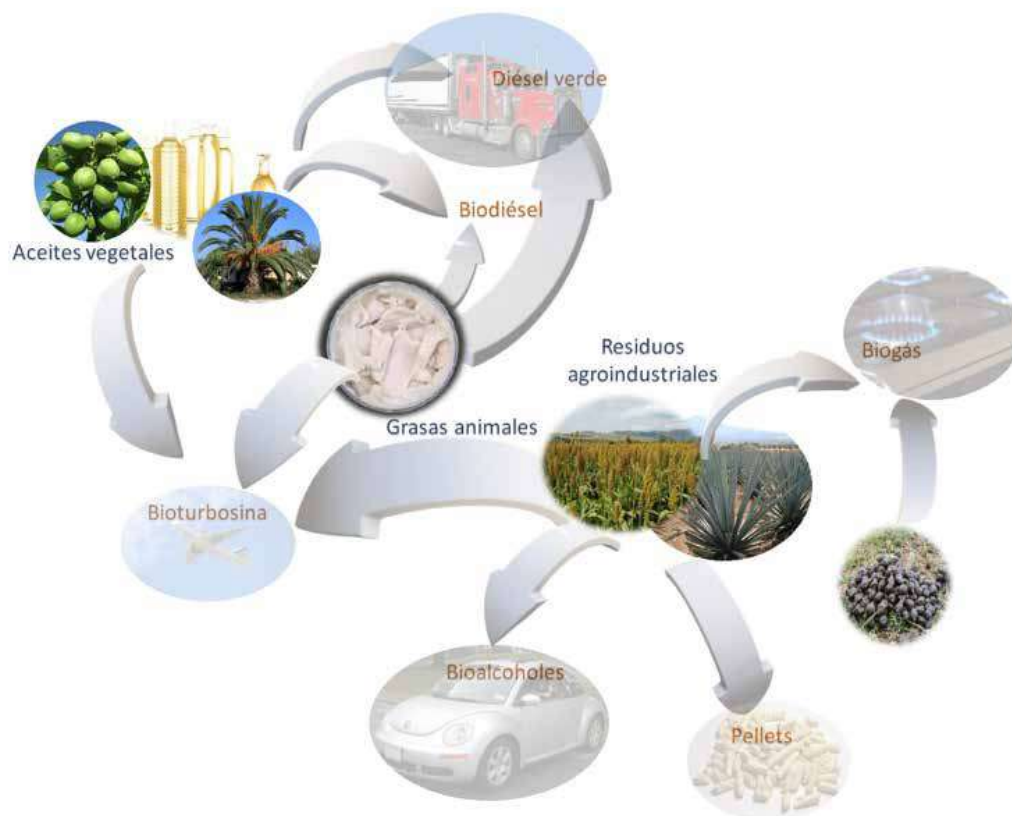


Figura 3. Materias primas y biocombustibles que se producen a partir de éstas [todas las imágenes bajo licencia Creative Commons CC BY-SA].

Por otra parte, el uso de materias primas renovables para la producción de biocombustibles tiene implicaciones que deben ser tomadas en cuenta. La primera es referente a lo ambiental. Si bien el origen renovable de la materia prima sugiere un menor impacto ambiental en comparación con los combustibles fósiles, es necesario cuidar el ciclo de vida completo en la obtención de combustibles renovables, siendo uno de los aspectos a cuidar el impacto debido a cambio de uso de suelo. Por otra parte, gran parte de las fuentes de materia prima requieren el uso de agua, por lo que resulta imperativo tener una planeación apropiada de la distribución de cultivos y granjas de micro-alga, de manera que se evite el desabasto en regiones con escasez de agua. La segunda implicación se refiere al aspecto social. El uso de desechos agrícolas, así como el cultivo de especies como higuera y *Jatropha*, implica un posible crecimiento en el sector agrícola; sin embargo, esto debe ir acompañado de condiciones laborales e ingresos apropiados para los campesinos. Por otra parte, es necesario contar con personal para la recolección y manejo de los desechos agrícolas, así como de los aceites usados, lo cual tiene como consecuencia la generación de empleos. Finalmente, el desarrollo de tecnología para la conversión de desechos animales en biogás, así como para su almacenamiento, se muestra como una potencial contribución a la producción de energía en zonas rurales. La Tabla 3 presenta un resumen del potencial productivo de las distintas materias primas que se han descrito en este trabajo. En el caso de aceites de *Jatropha curcas* e higuera, se ha supuesto que toda la superficie con po-

tencial alto y medio es empleada para el cultivo de estas especies. No se incluye el aceite de micro-algas, pues no se tienen datos de las hectáreas disponibles para su producción. Con base en la química de la transesterificación, se puede establecer que 1 kg de aceite vegetal dará aproximadamente 1 kg de biodiésel. Por tanto, con aceite de *Jatropha curcas* e higuera, se tendría un potencial de producción de biodiésel de 43 millones de toneladas por año, lo cual representa más del doble de la demanda de diésel esperada para 2018 (Forbes Staff, 2018). Por supuesto, es necesario remarcar que esta estimación asume el uso del 100% de superficie con potencial productivo, lo cual no es factible de llevar a cabo en la realidad. Por otra parte, empleando el factor de 240 litros de bioetanol por cada tonelada de biomasa lignocelulósica reportado por Valdez-Vazquez y col. (2010), es posible estimar un potencial productivo de dicho bio-alcohol de 12,900 millones de litros por año, lo cual representa cerca de un 30% de la demanda de gasolina en el país (Forbes Staff, 2018). Sin embargo, es necesario recordar que no se utiliza alcohol 100% puro en los motores. El análisis anterior permite visualizar el amplio potencial de materia prima para la producción de biocombustibles a partir de aceites, como biodiésel, bioturbosina o diésel verde, teniendo aún como respaldo la obtención de aceite de micro-algas. En el caso de la biomasa lignocelulósica, se observa que es suficiente para cubrir la demanda actual de gasolina, recordando que no se han tomado en cuenta los residuos de cultivos secundarios, así como residuos forestales y de poda, para la producción de bio-alcoholes o pellets de biomasa, entre otros productos.

Tabla 3. Resumen de potencial productivo de materia prima para biocombustibles en México.

Materia prima	Disponibilidad (millones de toneladas por año)	Fuente
Aceite de <i>Jatropha curcas</i>	19	Atabani y col. (2012)
Aceite de higuera	24	Atabani y col. (2012)
Aceite de cocina de re-uso	0.21-0.473	Sheinbaum-Pardo y col. (2013)
Residuos de maíz	32.82	Valdez-Vazquez y col. (2010)
Residuos de sorgo	8.28	Valdez-Vazquez y col. (2010)
Caña de azúcar	7.58	Valdez-Vazquez y col. (2010)
Trigo	5.07	Valdez-Vazquez y col. (2010)

5. Conclusiones

Los biocombustibles son una alternativa promisoriosa para sustituir parcialmente los combustibles derivados del petróleo, tanto en el sector transporte como en la industria. La producción de este tipo de combustibles renovables inició desde hace varias décadas en el mundo, con una aceptación parcial por parte de la población. A pesar de esto, existen sectores que aún no aprueban el uso de los biocombustibles, debido a que se piensa que su producción puede poner en juego la seguridad alimentaria. Sin embargo, en la actualidad la tendencia en la producción de combustibles renovables apunta al uso de materias primas no comestibles, o aquellas que se consideran desechos. Esta tendencia permite asegurar la disponibilidad de alimentos en regiones con baja producción, así como dar un segundo uso a materiales que, de otra forma, serían vertidos al drenaje o quemados directamente, contaminando el agua y la atmósfera.

Referencias bibliográficas

- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A. y Ibraheem, I.B.M. (2012). Microalgae and wastewater treatment. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(3), 257-275.
- Atabani, A.E., Silitonga, A.S., Badruddin, I.A., Mahlia, T.M.I., Masjuki, H.H. y Mekhilef, S. (2012). A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4), 2070-2093.
- British Petroleum (2018). BP Statistical Review of World Energy. Extraído el 06 de noviembre de 2018 desde: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.
- Centro Mario Molina (2016). Bioenergía: Análisis regional del aprovechamiento integral de los residuos de la industria agropecuaria. Extraído el 21 de febrero de 2019 desde: http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2017/10/5.-Bioenerg%C3%A1-Da_2016.pdf.
- Comisión Nacional del Agua - CONAGUA (2016). *NUM3RAGUA MÉXICO*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Díaz Padilla, G., y cols. (2012). *Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.
- Forbes Staff. (2018, junio 25). Consumo diario de gasolina es de 124 millones de litros en promedio. Forbes. Extraído el 15 de abril de 2019 desde: <https://www.forbes.com.mx/consumo-diario-de-gasolina-es-de-124-millones-de-litros-en-promedio/>.
- Gasca González, R. (2017). *Diseño de un proceso de bajo costo para la producción de biodiésel a partir de aceites de re-uso*. Guanajuato: Universidad de Guanajuato.
- Gui, M.M., Lee, K.T., Bhatia, S. (2008). Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*, 33(11), 1646-1653.
- Hubbert, M.K. (1969). Energy resources. En National Research Council - Committee on Resources and Man (Ed.), *Resources and man* (pp. 157-242). San Francisco, California: W.H. Freeman and Company.
- Huerta Reza, D., Garza Bueno, L.E., Vega Valdivia, D.D. y Omaña Silvestre, J.M. (2010). La producción de biodiesel en el estado de Chiapas. *Revista Mexicana de Economía Agrícola y de los Recursos Naturales*, 3(2), 77-96.
- Hurtado-Salazar, A., Gutiérrez, G., Restrepo, J.F., Costa Nobre, D.A. (2013). Evaluación de cuatro variedades de higuero (Ricinus communis L.) para la producción y rendimiento de aceite en Colombia. *Agrociencia Uruguay*, 17(2), 25-32.
- Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (2016). Padrón de Prestadores de Servicios de RME. Extraído el 21 de mayo de 2018 desde: <https://smaot.guanajuato.gob.mx/sitio/papsrme>.
- Lenton, A., Codron, F., Bopp, L., Metzl, N., Cadule, P., Tagliabue, A., Le Sommer, J. (2009). Stratospheric ozone depletion reduces ocean carbon uptake and enhances ocean acidification. *Geophysical Research Letters*, 36(12), 1-5.
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (2008, febrero 1). Diario Oficial.
- Méndez-Vázquez, M.A., Gómez-Castro, F.I., Ponce-Ortega, J.M., Serafín-Muñoz, A.H., Santibañez-Aguilar, J.E., El-Halwagi, M.M. (2017). Mathematical optimization of a supply chain for the production of fuel pellets from residual biomass. *Clean Technology*

Fernando Israel Gómez-Castro, Claudia Gutiérrez-Antonio, Salvador Hernández, Carolina Conde-Mejía, Antioco López-Molina, Ricardo Morales-Rodríguez (pp. 41- 50)

- and Environmental Policy*, 19(3), 721-734.
- Rawat, I., Kumar, R.R., Mutanda, T. y Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411-3424.
- Rivas Lucero, B.A., Zúñiga Avila, G., Saenz Solis, J. I., Guerrero-Morales S., Segovia-Lerma A., Morales Morales H.A. (2012). Perspectivas de obtención de energía renovable de la biomasa del estiércol del ganado lechero en la región centro-sur de Chihuahua, *Revista Mexicana de Agronegocios*, 30, 872-885.
- Saval, S., (2012). Aprovechamiento de residuos agroindustriales: pasado, presente y futuro, *BioTecnología*, 16(2), 14-46.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - SAGARPA (S.F.). Estudios de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional. Extraído el 15 de abril de 2019 desde: http://www.sagarpa.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/GRANOS.pdf
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación - SAGARPA (2017). Planeación Agrícola Nacional 2017-2030: Bioenergéticos Higuera, Jatropha Curcas, Sorgo Dulce Mexicanos. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
- Sheinbaum-Pardo, C., Calderón-Iraoque, A., Ramírez-Suárez, M. (2013). Potential of biodiesel from waste cooking oil in Mexico. *Biomass and Bioenergy*, 56(Septiembre), 230-238.
- Valdés Rodríguez, O.A., Palacio Wassenaar, O.M., Ruíz Hernández, R., Pérez Vásquez, A. (2014). Potencial de la asociación Moringa y Ricinus en el subtrópico veracruzano, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9, 1673-1686.
- Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J.A., Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147-2153.
- Weber, B., Rojas Oropeza, M., Torres Bernal, M., Pampillón González, L. (2012). Producción de biogás en México: estado actual y perspectivas. Ciudad de México: Red Mexicana de Bioenergía A.C.
- Yang, G., Li, X., Wang, J., Lian, L. y Ma, T. (2015). Modeling oil production based on symbolic regression. *Energy Policy*, 82(Julio), 48-61.

