

Daniel Trejo Zamudio, Juan Fernando García Trejo y Claudia Gutiérrez Antonio



Conversión de residuos a biocombustibles

En los últimos años la creciente demanda de energía ha originado la búsqueda de alternativas que permitan obtenerla con un menor impacto ambiental; la biomasa es una de estas fuentes potenciales. En el presente artículo se aborda el aprovechamiento de la biomasa –específicamente los residuos– para su conversión en biocombustibles sólidos, gaseosos y líquidos.

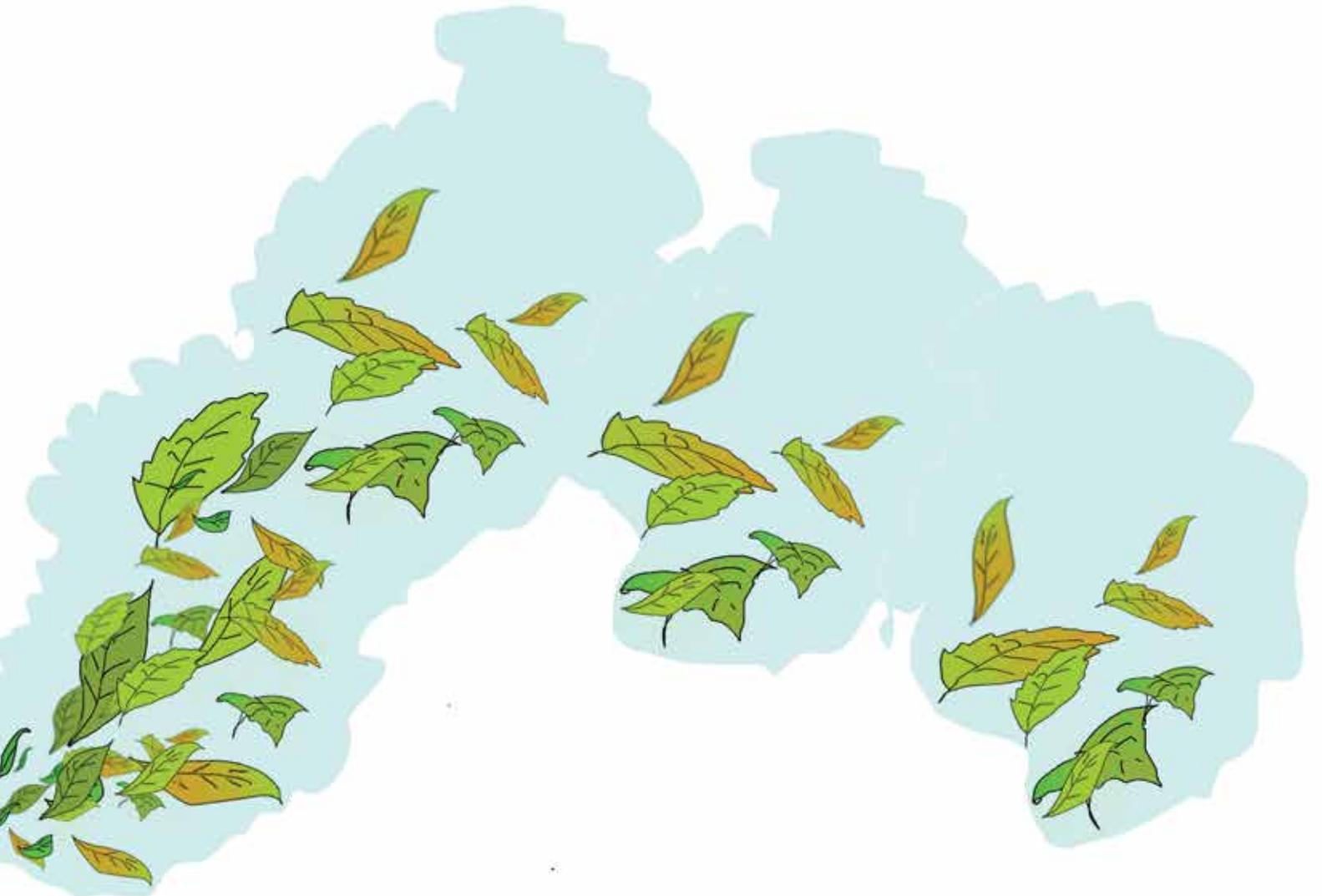


Introducción

En la actualidad, preparar un café por la mañana, utilizar un medio de transporte o el teléfono móvil son actividades cotidianas que tienen en común el uso de la energía. Estamos tan acostumbrados a contar con la energía que en ocasiones no imaginamos todo el trabajo que existe detrás para generarla. Hoy en día las principales fuentes energéticas son fósiles (carbón mineral, gas natural y petróleo), las cuales no son renovables, así que en algún momento se agotarán. Por ello se están buscando nuevas fuentes de energía, más limpias y renovables, como la solar, eólica, geotérmica y bioenergía.

En particular, la bioenergía proviene del aprovechamiento de la biomasa, que puede transformarse para obtener energía eléctrica, energía calorífica o biocombustibles. La biomasa se define como todo material orgánico formado por la vía biológica, y es de gran interés debido a que es muy abundante en el planeta.

Existen diferentes tipos de biomasa, por ejemplo, los residuos (como las cáscaras de naranja que sobran tras elaborar un jugo). El uso de los residuos para obtener





biocombustibles es una alternativa muy interesante, ya que permite tener una fuente energética renovable que remplace a los combustibles de origen fósil mientras contribuimos a mitigar el efecto invernadero. Los biocombustibles se pueden producir a partir de diferentes residuos de origen orgánico, derivados de procesos agrícolas (pajas), forestales (aserrín de madera), agroindustriales (bagazos), agropecuarios (excrementos, grasas animales) y de uso urbano (aceites de cocina usados).

A continuación presentamos los tipos de residuos que se pueden aprovechar y los procesos de producción de los biocombustibles sólidos, gaseosos y líquidos. Después revisamos la situación actual a nivel nacional e internacional, y finalmente discutimos las perspectivas para la producción de los bioenergéticos.

Carburante ▶
Compuesto que libera energía al ser quemado; es sinónimo de combustible.

■ **Los residuos como materia prima para la producción de biocombustibles**

■ En México, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos define a estos últimos como el material o producto cuyo propietario o poseedor desecha (DOF, 2003). A su vez, clasifica los residuos en función de sus características y origen (véase la Tabla 1).

Muchos de los residuos sólidos urbanos y los de manejo especial son orgánicos, por lo que pueden emplearse para producir los biocombustibles. De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2017), en México durante el año 2012 se desecharon 42 102.75 toneladas de residuos sólidos urbanos; de las cuales 22 070.27

ton eran de origen orgánico (basura de comida, jardines y otros materiales orgánicos) y 5 822.82 ton eran residuos procedentes de papel y cartón. Adicionalmente, se generan residuos agrícolas derivados de los cultivos de maíz, trigo, algodón, sorgo, caña de azúcar, frijol, cebada y maguey. México es el tercer país en Latinoamérica con la mayor cantidad de tierras cultivadas, por lo que tiene un gran potencial para la conversión de los residuos en biocombustibles.

■ **Qué son los biocombustibles y cómo se clasifican**

■ Un biocombustible es un **carburante** obtenido mediante el tratamiento físico o químico de la materia vegetal o de residuos orgánicos. Los biocombustibles pueden obtenerse en estado sólido, gaseoso y líquido; asimismo, se clasifican en tres generaciones, de acuerdo con el tipo de materia prima empleada para producirlos.

Los de primera generación se derivan de materias primas que también son utilizadas como alimentos, entre las que se incluyen plantas ricas en azúcares, almidones y aceites. Por ejemplo, de la caña de azúcar se puede obtener alcohol, mientras que del aceite de girasol se puede obtener biodiésel. Sin embargo, el uso de estas materias primas no es recomendable, dado que esto podría poner en riesgo la seguridad alimentaria.

La segunda generación abarca cultivos no comestibles (higuerilla, pastos, jatrofa) y los residuos de las actividades agrícolas, forestales, ganaderas, agroindustriales y urbanas. Por ejemplo, la Figura 1 muestra

Tabla 1. Clasificación de los residuos en México.

Clasificación	Definición	Ejemplos
Residuos Sólidos Urbanos (RSU)	Generados en casas habitación.	Inorgánicos: envases, empaques; orgánicos: bolsas de té, desechos de comida.
Residuos de Manejo Especial (RME)	Generados en procesos productivos.	Residuos de rocas; de la agricultura (pajas); de la ganadería (estiércol); lodos de tratamiento de aguas, así como residuos tecnológicos.
Residuos Peligrosos (RP)	Poseen características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o bien contienen agentes infecciosos.	Pilas, así como residuos biológico-infecciosos de los servicios de salud.

Fuente: Elaborada con información del DOF (2003).



Figura 1. Planta de higuierilla, materia prima de segunda generación.

la planta de higuierilla, de cuyas semillas se obtiene aceite para producir biodiésel o bioturbosina. Este tipo de materias primas no provoca un riesgo para la seguridad alimentaria, pero sí se pueden generar problemas de cambio de suelo o de competencia por tierras con cultivos alimenticios; no obstante, algunas especies pueden cultivarse en tierras marginadas

con reducidos requerimientos de agua y fertilizantes. Por otra parte, los residuos representan un problema mayor de contaminación por sus altos volúmenes de generación y su poco o nulo uso para obtener productos de mayor valor agregado.

Por último, la tercera generación abarca a los biocombustibles originados a partir de microalgas, macroalgas y algas verde-azules (Singh y cols., 2016) que crecen en cuerpos acuáticos o aguas marinas. Éstas consumen grandes cantidades de CO_2 (dióxido de carbono) durante su crecimiento y producen aceites, proteínas y carbohidratos, a partir de los cuales se puede obtener biodiésel, bioturbosina, bioetanol e hidrógeno renovable. Al ser utilizados los biocombustibles liberan CO_2 ; no obstante, la misma cantidad de CO_2 es captada por las plantas durante su crecimiento, y así se regula el ciclo natural del carbono sin aumentar su concentración en la atmósfera.

■ Procesos de conversión de residuos a biocombustibles

■ Los residuos pueden emplearse como materia prima para la producción de biocombustibles líquidos, sólidos o gaseosos. En la mayoría de los casos, los residuos deben ser recolectados y transportados a los centros de procesamiento; en otros casos, como en los rellenos sanitarios municipales, se puede llevar a cabo la separación y la obtención de la energía en el mismo sitio.

La Figura 2 muestra la ruta de procesamiento de la biomasa, que comienza con la recolección de los



Figura 2. Procesamiento de biomasa para la producción de bioenergía.



residuos generados por la agroindustria, agricultura, ganadería y los municipales (1); posteriormente se transportan los residuos a las plantas de producción (2) para su conversión a biocombustibles (3). Éstos son utilizados para obtener energía calorífica o eléctrica (4), y finalmente los residuos del proceso pueden ser empleados, en algunos casos, como fertilizantes.

Procesos de obtención de los biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos se obtienen a partir de materias primas de origen vegetal. Pueden producirse mediante procesos mecánicos o térmicos, o bien emplearse directamente, como en el caso de la madera. Las materias primas incluyen residuos de madera (astillas y aserrín), de cultivos (pajas, cascarrillas y hojas), del procesamiento de los alimentos, e inclusive residuos urbanos, de los cuales se obtienen combustibles como pellets, briquetas, astillas y carbón vegetal (Ríos Badrán y cols., 2017). La Figura 3 muestra pellets elaborados a partir de residuos de frijol.

Los procesos de conversión incluyen la trituración de la biomasa y su posterior densificación, un proceso que emplea presión y temperatura para compactar la biomasa. Como resultado se aumenta la cantidad de energía por unidad de volumen, lo cual facilita el transporte y el almacenamiento.

Durante el densificado, el aumento de temperatura hace que la **lignina** contenida en la materia prima se funda y, con ayuda de la presión, aglomere a la biomasa. Posteriormente se enfría y la lignina se plastifica, lo que le da la forma y resistencia al

Lignina ▶ Componente de la biomasa que consta de compuestos que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno.



Figura 3. Pellets combustibles elaborados con residuos del cultivo de frijol.

densificado. Este proceso requiere un buen control de la humedad de la materia prima, el tamaño de partícula, la temperatura y presión. En algunos casos es necesario agregar un aglutinante para aumentar la resistencia o el contenido energético; puede usarse otro residuo sólido o incluso un agente químico como el glicerol, que a su vez es un residuo de la producción de biodiésel.

Las etapas del proceso de producción de los biocombustibles sólidos incluyen: reducción de tamaño (molienda), acondicionamiento de la humedad en la materia prima (secado o hidratación), densificado, enfriado, limpieza y empaquetado. Gracias a la densificación es posible aprovechar toda la materia para su combustión, con una eficiencia energética de entre 84% y 88% (Uslu y cols., 2008).

Por otra parte, la torrefacción es un proceso térmico en el que la biomasa se calienta en ausencia de aire a una temperatura de entre 200 °C y 300 °C (Uslu y cols., 2008); como resultado, la biomasa pierde humedad, pero mantiene gran parte de su contenido energético. El producto resultante –conocido como carbón vegetal– tiene baja densidad volumétrica y puede ser empleado en procesos de gasificación, o bien como sustituto del carbón en centrales termoeléctricas o de cementos.

Procesos de obtención de los biocombustibles gaseosos

Los biocombustibles gaseosos se obtienen mediante procesos térmicos (como la pirólisis), microbianos (descomposición de materia orgánica en ausencia de oxígeno), o de gasificación. El biohidrógeno y el metano son los biocombustibles gaseosos más conocidos.

La pirólisis es un proceso térmico realizado a altas temperaturas en condiciones anaeróbicas (en ausencia de aire), con atmósferas inertes, como helio o nitrógeno. En este proceso la biomasa se descompone en bioaceite, biocarbón y gases no condensables; la cantidad producida de cada uno depende principalmente de la temperatura (Singh y cols., 2016). El combustible líquido –bioaceite– puede aprovecharse para ser quemado y así obtener energía de manera directa, o bien puede ser tratado químicamente

para obtener otros productos químicos o combustibles, como biodiésel. Pueden emplearse como materias primas los residuos de madera, de podas de pastos, paja de cultivos, bagazo de caña de azúcar y cáscaras de nueces.

Por otra parte, la digestión anaeróbica consiste en la degradación biológica a temperaturas de 30 °C a 65 °C, sin la presencia de oxígeno (Singh y cols., 2016). De este proceso se obtiene principalmente biogás, que es una mezcla de metano y CO₂. El proceso se puede llevar a cabo en rellenos sanitarios, o bien en biodigestores en las comunidades, en un período de 30 a 60 días. Se pueden emplear residuos generados por animales en granjas, aguas residuales, desechos de la industria de alimentos y de las cocinas de los hogares. La Figura 4 presenta residuos generados en una granja animal, los cuales pueden usarse para obtener biogás. No obstante, no se pueden emplear desechos de cultivos o de madera, debido a que las bacterias no pueden degradar con facilidad a la lignina.

Finalmente, en la gasificación la biomasa se somete a un proceso de combustión con deficiencia de oxígeno para obtener gas de síntesis o syngas (Chen y cols., 2015). El proceso se lleva a cabo entre 900 °C y 1 000 °C, y se obtiene una mezcla de gases constituida por hidrógeno, CO₂, monóxido de carbono, vapor de agua y metano, conocida como syngas. Éste también puede emplearse para generar otros biocombustibles, como biodiésel, biogasolinas o bioturbosina, mediante **procesos de Fischer-Tropsch** (Izquierdo Romero y cols., 2016). En la gasificación pueden usarse residuos ricos en lignina, como la madera, y residuos sólidos urbanos.

Procesos de obtención de los biocombustibles líquidos

Los biocombustibles líquidos incluyen alcoholes (bioetanol y biobutanol), ésteres (biodiésel) e hidrocarburos (diésel verde, gasolina verde, bioturbosina). Los alcoholes se producen a partir de residuos de la industria azucarera, mientras que los ésteres y los hidrocarburos se generan a partir de aceites de plantas no comestibles, así como aceites usados. La principal aplicación de los biocombustibles líquidos



Figura 4. Residuos animales generados en una granja.

es en el sector del transporte: en motores que funcionan con gasolina, diésel y turbosina de origen fósil. La producción de biocombustibles líquidos se realiza mediante procesos de fermentación, transesterificación y pirólisis, así como de procesos combinados; por ejemplo, gasificación seguida de Fischer-Tropsch, para la obtención de bioturbosina y diésel verde.

La fermentación es un proceso en el que la materia prima rica en azúcares se convierte con la ayuda de las levaduras en alcohol, el cual puede ser usado puro o en mezclas con diésel o gasolina en motores de combustión interna. También puede emplearse materia lignocelulósica, como la poda de pastos, la cual debe ser sometida a procesos químicos, físicos, biológicos o fisicoquímicos para retirar la lignina y obtener azúcares fermentables. El proceso de fermentación permite obtener bioetanol o biobutanol, dependiendo del tipo de microorganismo empleado. La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es la más empleada en la producción de etanol, con rendimientos de 10% aproximadamente. Para la producción de butanol se suele emplear *Clostridium acetobutylicum*, el cual es un microorganismo que permite obtener acetona, butanol y etanol. Ambas fermentaciones afrontan el reto de la purificación: el caldo de fermentación y los subproductos deben ser retirados para obtener productos con purezas superiores a 99.5%, requeridas para su uso en motores de combustión interna. La destilación es el método más empleado para realizar la purificación, pero requiere de grandes cantidades de energía. En el caso del bioetanol, éste forma un **azeótropo** con el agua, por lo que se deben emplear mallas moleculares o solventes

Procesos de Fischer-Tropsch

Proceso químico que permite la obtención de hidrocarburos líquidos.

Azeótropo

Mezcla de dos o más componentes que se caracteriza porque durante la destilación posee la misma composición en la fase líquida como en la fase vapor.



para su purificación. En el caso del butanol no se forma un azeótropo, pero las cantidades del butanol son pequeñas en la mezcla resultante, que también incluye acetona y etanol.

Por otra parte, el biodiésel es un combustible líquido amarillento derivado de aceites vegetales, grasas animales, lípidos de algas o residuos de aceites obtenidos mediante la transesterificación en presencia de alcohol y un catalizador alcalino. La Figura 5 presenta el aceite residual de cocina, que es una materia prima para la producción de biodiésel. El proceso más común consiste en calentar el aceite a 50 °C o 60 °C y adicionar metanol e hidróxido de sodio como catalizador. Después de dos horas de agitación a la misma temperatura, la mezcla se enfría por unas horas hasta que se separan los compuestos formados; en el fondo se precipitará la glicerina, mientras que el biodiésel se encontrará en la parte superior. Éste se recolecta y lava para retirar residuos de jabón, metanol, catalizador y ácidos grasos sin reaccionar.

Finalmente, la bioturbosina, o combustible renovable de aviación, es un combustible sintético con propiedades similares a la turbosina. Se puede obtener a partir de residuos de aceite comestible y grasas animales no comestibles, los cuales deben someterse a un proceso de reacción con hidrógeno a elevadas temperaturas y presiones, para así generar el biocombustible de aviación. La bioturbosina se emplea en mezclas hasta 50% en volumen con la turbosina de origen fósil (Izquierdo Romero y cols., 2016).

■ Situación actual de los biocombustibles

■ Actualmente existen diversos proyectos para la producción de biocombustibles en el mundo. En Europa, Canadá y Estados Unidos funcionan plantas para la producción de pellets; mientras que en China, Japón, Alemania, Reino Unido y Países Bajos se emplean pellets de madera para producir energía eléctrica. En el año 2012 la producción mundial de pellets de madera fue de 19.1 millones de toneladas (Guo y cols., 2015). Por otra parte, Estados Unidos y Brasil son los mayores productores de bioetanol en el mundo, a partir de materias primas de primera



Figura 5. Aceite para cocinar usado, fuente para la producción de biodiésel.

generación. Algunas plantas productoras que emplean materia celulósica son Abengoa Bioenergy (Salamanca), Iogen Energy (Ottawa) y Poet, LLC (Sioux Falls) (Guo y cols., 2015); estas plantas podrían emplear residuos agrícolas y también podrían ser empleadas en la producción de butanol. Asimismo, existen plantas de pirólisis que convierten biomasa de madera en bioaceite, ubicadas en Canadá, Italia, Estados Unidos, Brasil, Países Bajos, Alemania, Bélgica y Australia. Los mayores productores de biodiésel se encuentran en Europa, Estados Unidos, Brasil, Argentina y China; mientras que la bioturbosina tiene grandes productores en la Unión Europea y Estados Unidos.

En el caso de México existen universidades y centros de investigación que trabajan en la conver-



sión de residuos en biocombustibles. En particular, en la Universidad Autónoma de Querétaro se emplea biodiésel en mezclas como combustible para los autobuses, así como bioetanol como aditivo en los vehículos a gasolina; también se ha desarrollado la producción de biocombustibles sólidos mediante el empleo de los residuos.

Perspectivas

En el futuro la demanda de energía, así como la generación de residuos, aumentará; no obstante, los residuos pueden utilizarse para producir biocombustibles, con lo cual se resuelve un problema de contaminación mientras se genera una alternativa energética renovable. Los biocombustibles poseen importantes ventajas, como su origen renovable y su reducido impacto ambiental. Sin embargo, resulta necesario desarrollar procesos eficientes y de bajo consumo energético que empleen materia lignocelulósica, la cual es de bajo costo y muy abundante.

El uso de residuos en México para la producción de biocombustibles tiene un gran potencial, por lo que las investigaciones deben enfocarse en su desarrollo. Así, los biocombustibles contribuirán a diversificar los recursos energéticos en el país para garantizar un desarrollo sustentable y respetuoso con el ambiente.

Daniel Trejo Zamudio

Universidad Autónoma de Querétaro.
dtreza15d.t@gmail.com

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.
juanfernando77@gmail.com

Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.
claudia.gutierrez@uaq.mx

Lecturas recomendadas

- Chen, W. H., J. Peng y X. T. Bi (2015), "A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44:847-866.
- Guo, M., W. Song y J. Buhain (2015), "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:712-725.
- Izquierdo Romero, A., A. Gómez de la Cruz y C. Gutiérrez-Antonio (2016), "Bioturbosina: retos y oportunidades", *Ciencia*. Disponible en: <<https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/Bioturbosina.pdf>>. Consultado el 1 de noviembre de 2018.
- Ríos Badrán, I. M., J. Santos Cruz y C. Gutiérrez Antonio (2017), "Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global", *Ciencia*. Disponible en: <<https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/online/BiocombustiblesSolidos.pdf>>. Consultado el 1 de noviembre de 2018.
- Semarnat (2017), *Residuos*. Disponible en: <<http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/residuos>>. Consultado el 21 de junio de 2017.
- Singh, R. *et al.* (2016), "Strategies for selection of thermo-chemical processes for the valorisation of biomass", *Renewable Energy*, 98:226-237.
- Uslu, A., A. P. C. Faaij y P. C. A. Bergman (2008), "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation", *Energy*, 33:1206-1223.
- Valdez-Vázquez, I., J. A. Acevedo-Benítez y C. Hernández-Santiago (2010), "Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14:2147-2153.