

Noemí Hernández Neri, Claudia Gutiérrez Antonio y Fernando Israel Gómez Castro

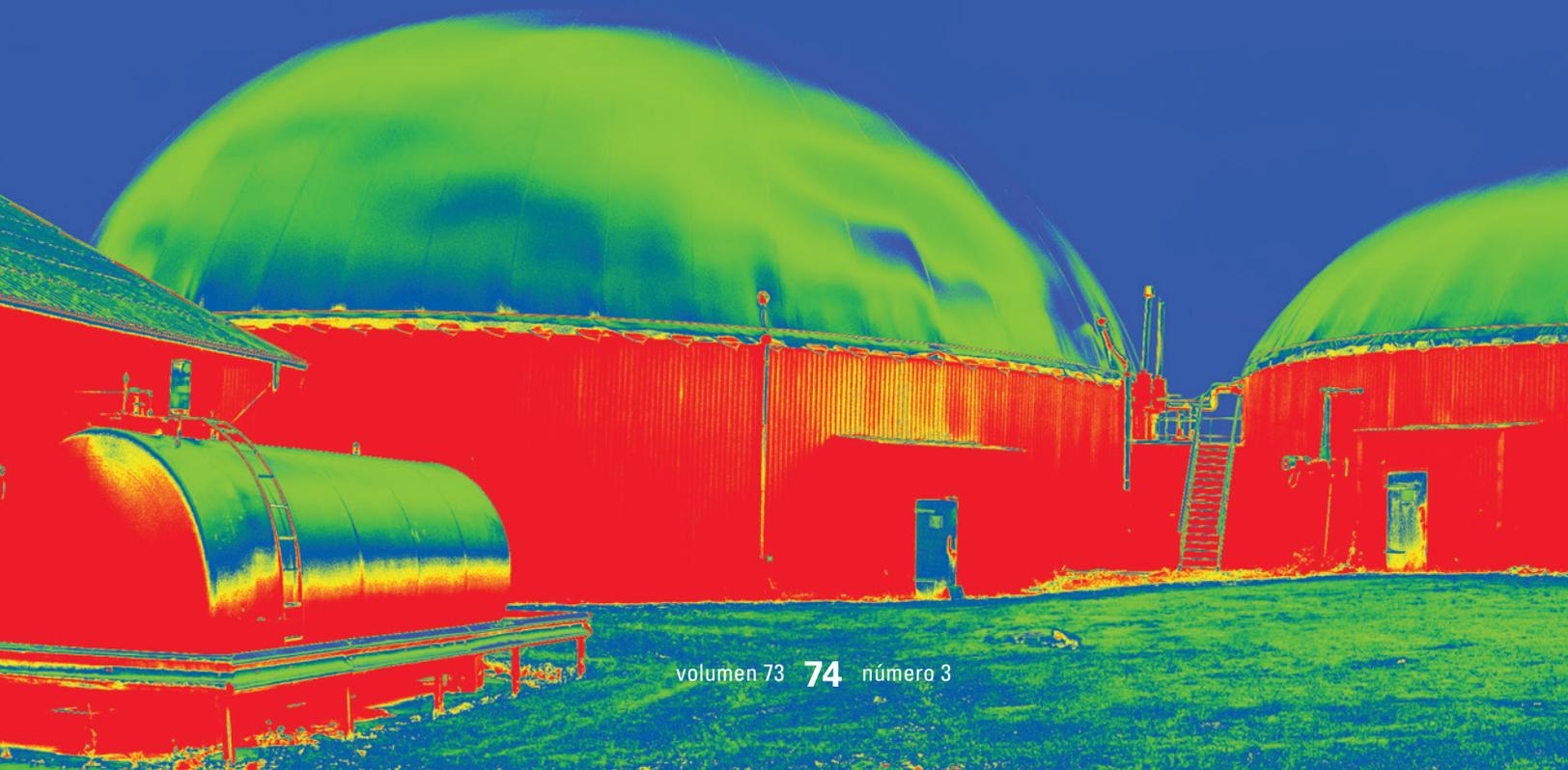
# ¿Todos los biocombustibles son sostenibles?

## Analicemos su ciclo de vida

Los biocombustibles son una alternativa energética renovable; sin embargo, su producción genera preocupación respecto a la seguridad alimentaria, deforestación, pérdida de biodiversidad y emisiones contaminantes. Para evaluar si los biocombustibles son sostenibles se debe analizar su ciclo de vida, con lo cual se cuantifican los impactos económicos, ambientales y sociales asociados a su producción.

### Introducción

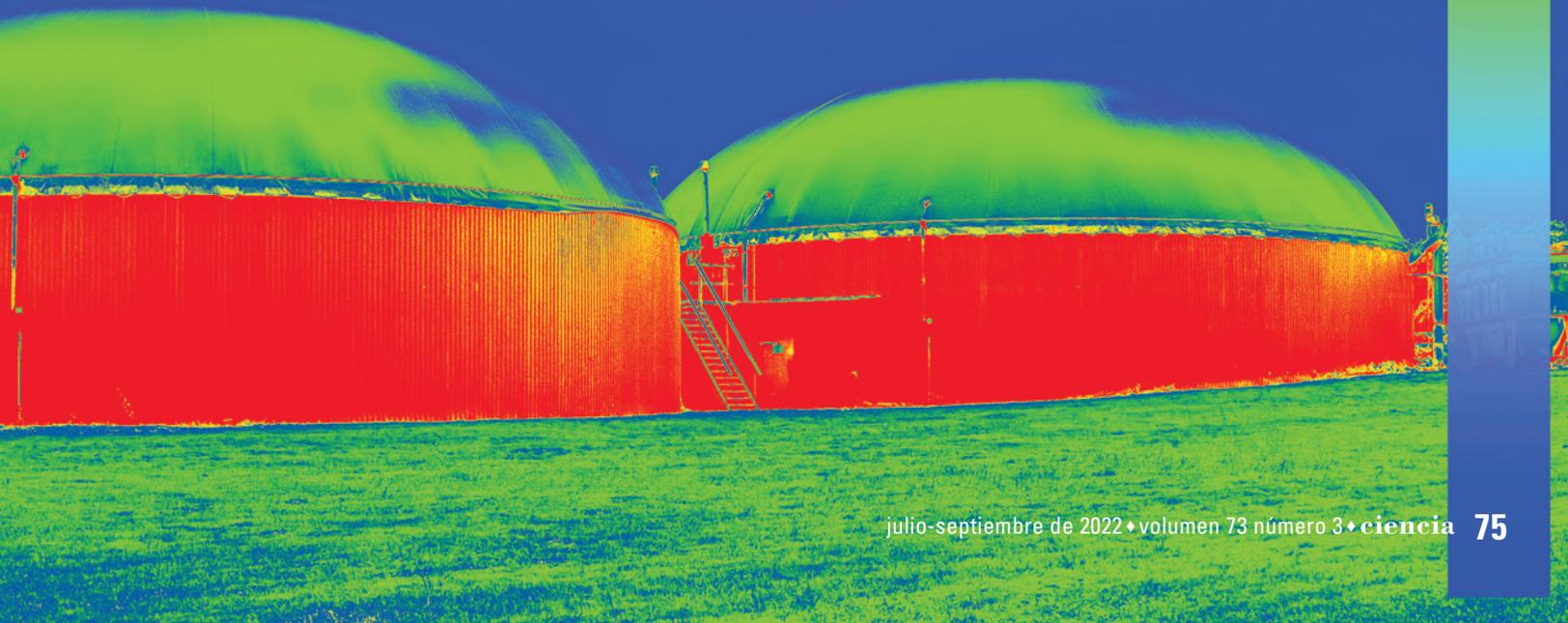
**E**n la actualidad, los combustibles derivados del petróleo son ampliamente utilizados para la generación de energía eléctrica, calorífica, así como la requerida para los medios de transporte; todos estos tipos de energía son



necesarios en los diferentes sectores: agrícola, industrial, comercial, doméstico y transporte. Por otra parte, las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas indican que la población mundial se incrementará de 7 700 millones en 2019 a 9 700 millones en 2050 (ONU, 2019); por ello, se prevé que la demanda de energía aumente de forma considerable. Además, la sociedad enfrenta el problema del cambio climático, causado por el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales se generan por el uso de los combustibles fósiles. Por lo anteriormente expuesto, la comunidad científica se ha enfocado en buscar fuentes de energía renovables que permitan mantener el estilo de vida actual con un menor daño ambiental.

En este contexto, los biocombustibles son reconocidos como una alternativa energética promisoría y sostenible para sustituir a los combustibles fósiles. Según Ayhan Demirbas (2009), el término *biocombustible* hace referencia a los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos derivados de fuentes renovables como la biomasa, que incluye especies cultivables comestibles (primera generación), residuos orgánicos y especies cultivables no comestibles (segunda generación), así como micro y macroalgas (tercera generación) (Gómez-Castro y cols., 2019). Los biocombustibles son considerados una opción para aumentar el uso y aprovechamiento de la biomasa, lo cual impulsará el desarrollo económico del sector rural, al mismo tiempo que contribuirá a resolver problemas relacionados con la seguridad energética y el calentamiento global.

A pesar de las ventajas de los biocombustibles, éstos también tienen efectos adversos. Por ejemplo, el cambio de uso de la tierra para el cultivo de la biomasa representa un problema, o bien las emisiones derivadas por el uso de energía convencional en la conversión de la biomasa. Por lo anterior, es importante evaluar los posibles efectos adversos sobre la salud humana o el ambiente como resultado de la producción de biocombustibles (Naik y cols., 2010). Los efectos ambientales y climáticos derivados de la producción de los biocombustibles pueden evaluarse mediante una herramienta llamada evaluación del ciclo de vida.



El objetivo del presente trabajo es describir la evaluación del ciclo de vida de los biocombustibles, identificar sus etapas de producción y analizar el impacto ambiental de dos procesos de producción de bioetanol. Al final se mencionan algunas perspectivas en torno a los factores que deben considerarse para que la producción de biocombustibles sea sostenible.

■ **Evaluación del ciclo de vida**

■ La evaluación del ciclo de vida es una herramienta útil para valorar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio desde el diseño hasta su disposición final, es decir, a lo largo de todo su ciclo de vida (Rathore y Singh, 2013). Por ello, la evaluación del ciclo de vida de los biocombustibles incluye todas las etapas de su cadena de producción: la generación de la biomasa, su transformación a biocombustible y la distribución a los puntos de venta y consumidores finales. No obstante, también pueden realizarse evaluaciones parciales; por ejemplo, considerando únicamente alguna de las etapas de producción o los procesos específicos de generación de la biomasa. Este último tipo de evaluaciones son valiosas cuando

se planea hacer cambios en un proceso y se desea evaluar los efectos económicos, sociales y ambientales de dichas modificaciones para determinar si generarán alguna mejora. Como parte del impacto ambiental se toma en cuenta la contribución de distintos factores de daño a la salud humana, a los ecosistemas, así como a los recursos minerales y fósiles.

La cadena de producción de los biocombustibles involucra diversas etapas, las cuales incluyen la cosecha (en caso de cultivos), recolección (cultivos y residuos), almacenamiento, transporte de biomasa, transformación de las materias primas, transporte de los biocombustibles y, por último, el uso del producto final. Todas las etapas de la cadena de producción se muestran en la Figura 1, donde también se observa que las emisiones de GEI derivadas de la quema del biocombustible son las mismas que absorben las plantas a medida que crecen; esto permite disminuir el impacto de las emisiones en el ciclo de vida completo. Asimismo, en la Figura 1 se observa que, en todas las etapas, ya sean de procesamiento o de transporte, se emplea energía convencional, lo cual implica de manera indirecta la emisión de dióxido de carbono y otros GEI.

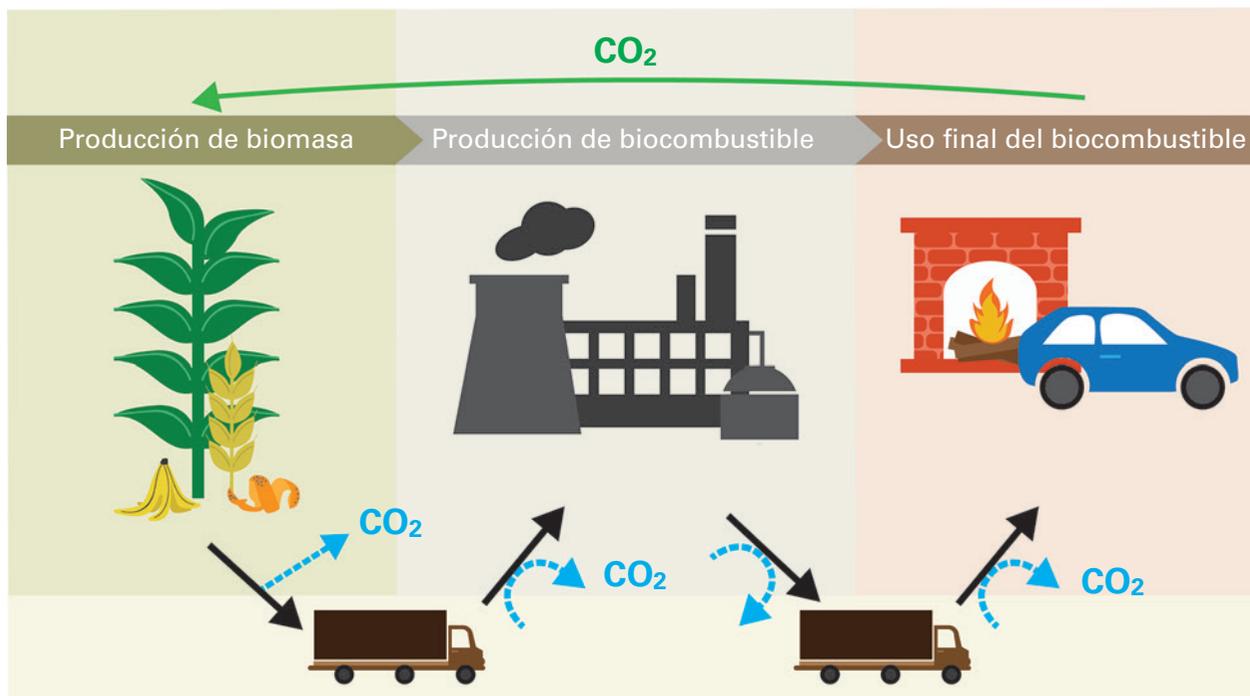


Figura 1. Etapas de la cadena de producción de los biocombustibles. Fuente: elaboración propia.

De esta forma, el impacto económico, social y ambiental depende de la materia prima, el proceso de producción y la localización tanto de los cultivos como de las plantas de procesamiento. La determinación de estos impactos permite analizar si los biocombustibles son sostenibles; es decir, se puede evaluar si estos productos pueden satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos y ecológicos (Larrouyet, 2015). Por ello, puede afirmarse que todos los biocombustibles son renovables, aunque no todos son sostenibles.

La evaluación del ciclo de vida considera impactos ambientales, económicos y sociales (véase la Figura 2), los cuales pueden ser benéficos o adversos, dependiendo de una variedad de factores. Todos estos aspectos deben considerarse para cada una de las etapas de la cadena de producción y suministro.

#### Producción de biomasa

La producción de biomasa tiene efectos ambientales, económicos y sociales. Con respecto a estos últimos, puede discutirse que, cuando se emplean como materias primas cultivos comestibles (por ejemplo, caña de azúcar y granos como el maíz), se genera un efecto de competencia entre la producción de biocombustibles y la de alimentos, lo que conlleva el incremento de precios de dichos cultivos. El aumento de precios tanto de manera directa (porque se limita la oferta de cereales para la alimentación) como de manera indirecta (si los alimentos son insumos de ganado, lo que influye en el precio de la carne y los lácteos) es inevitable. Por otro lado, si para la producción de biocombustibles se emplean cultivos no comestibles o residuos no hay una competencia directa con la alimentación humana; no obstante, hay efectos indirectos porque los residuos como la paja pueden ser parte de la mezcla de alimentos para el ganado y, por lo tanto, se encuentran vinculados a la cadena alimentaria. Por otra parte, algunos forrajes tienen poco valor nutricional, por lo que su uso para alimentos no es viable y en estos casos no se afecta la seguridad alimentaria.

En la evaluación de los efectos ambientales se considera el cambio o la recuperación del uso de sue-

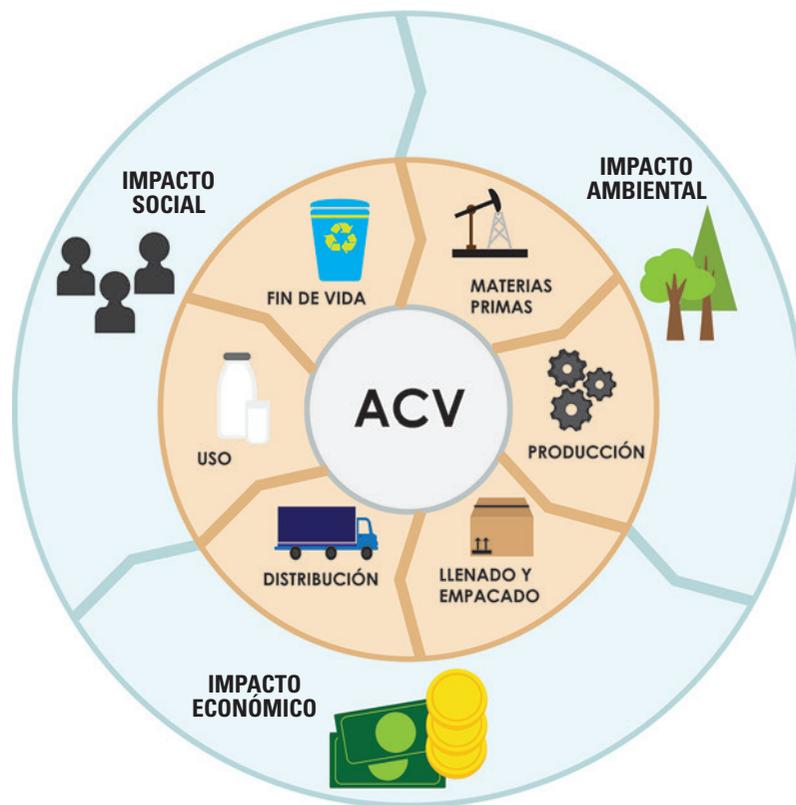


Figura 2. Tipos de impactos para evaluar la sostenibilidad. Fuente: elaboración propia.

lo, así como el empleo de agroquímicos y recursos hídricos. Para la evaluación del primer aspecto se debe considerar su aplicación actual, si la tierra es utilizada para el pastoreo o para la producción de granos destinados a la alimentación. De forma general, se considera que los biocombustibles de segunda generación tienen efectos menores por el cambio de uso del suelo, puesto que no es necesario aumentar los espacios para la producción. El aprovechamiento de residuos generados por cultivos ya existentes aumenta la eficiencia del uso de la tierra, en comparación con los biocombustibles de primera generación; por lo tanto, su impacto ambiental es mínimo en términos de obtención de la materia prima.

Por otra parte, la recuperación de terrenos abandonados o que no están siendo aprovechados es una oportunidad valiosa para la reactivación económica de las zonas rurales. Se calcula que hay alrededor de 450 millones de hectáreas de tierras de cultivo abandonadas en el mundo (Anderson y cols., 2008), por lo que una parte importante de éstas se podría

aprovechar con cultivos energéticos. Sin embargo, la producción de biocombustibles puede afectar también a la biodiversidad, debido a que se pierden hábitats naturales como resultado de la conversión de las tierras para la expansión de los cultivos. Además, la biodiversidad agrícola se ve afectada por los monocultivos a gran escala, lo cual también aumenta la vulnerabilidad ante nuevas plagas y enfermedades, al no haber rotación de cultivos.

Por otra parte, hay dos tipos de agroquímicos empleados en el suelo agrícola: fertilizantes que mejoran el crecimiento de las plantas y pesticidas que sirven para minimizar el ataque de las plagas. Estos productos agroquímicos pueden filtrarse al subsuelo y afectar de manera negativa la calidad del agua. Es importante mencionar que cada cultivo difiere en gran medida de otros en cuanto a sus necesidades de fertilizantes y plaguicidas. En el caso del aprovechamiento de los residuos este rubro no se considera.

Ahora bien, la producción de biocombustibles de primera generación incrementa de forma significativa la demanda de agua; se estima que la **huella hídrica** de los cultivos de primera generación puede incrementarse hasta diez veces en el periodo 2012-2030 (de 90 km<sup>3</sup>/año a 970 km<sup>3</sup>/año). Se espera además que la huella hídrica azul, la cual se refiere al agua dulce extraída, aumente de 0.5% a 5.5% en el periodo 2005-2030 (Gerbens-Leenes y cols., 2012). La variación de la huella hídrica de los cultivos es considerable dependiendo de las características de las especies, las condiciones de producción agrícola, el clima de la zona, así como la eficiencia del riego, ya sea por lluvia o extraído de ríos, acuíferos, etc. Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación tienen menor impacto en el uso de agua, pues se aprovecha la conversión de todo el material **lignocelulósico**. Los biocombustibles elaborados con residuos agrícolas pueden tener un menor impacto en cuanto al uso del agua; sin embargo, su procesamiento requiere mayor cantidad de agua que los cultivos de primera generación, debido a que se lleva a cabo un mayor número de operaciones de conversión y separación.

Respecto a los biocombustibles de primera y segunda generación existen oportunidades para mejo-



rar los efectos económicos a lo largo de toda la cadena productiva; en otras palabras, se pueden generar empleos desde la etapa de producción o recolección de biomasa hasta la de distribución del producto. Lo anterior se debe a que la producción de biocombustibles permite crear asociaciones entre el sector agrícola-forestal con el sector industrial, lo que beneficia a los sectores productores del campo. Se estima que la biomasa puede implicar la generación de 135 puestos de trabajo directos por cada 10 000 usuarios, frente a los 9 empleos que se crean por la obtención de petróleo o gas natural (REMBIO, 2011); esto significa que la generación de empleo es 14 veces mayor con respecto al sector de los combustibles fósiles.

#### *Transporte de materias primas y productos*

El transporte de la biomasa desde el campo hasta la planta de producción de los biocombustibles, y posteriormente el transporte del biocombustible a los puntos de venta o a sus consumidores finales, también constituye un aspecto importante para analizar la sostenibilidad de los biocombustibles. Los impactos ambientales son los de mayor peso en este eslabón de la cadena de suministro. Las distancias de transportación están relacionadas con la cantidad

**Huella hídrica** ▶ Cantidad de agua dulce que se emplea en la fabricación de un producto.

**Lignocelulósico** ▶ Material de origen orgánico que debe su nombre a los componentes lignina, celulosa y hemicelulosa.



de combustible requerido para la distribución en los distintos puntos de la cadena de suministro; a mayor distancia mayor cantidad de combustible a usar, y por lo tanto se tienen más emisiones contaminantes. Otro aspecto importante es el tipo de transporte (terrestre, acuático o aéreo), el modelo del vehículo y el tipo de combustible que se usa en cada caso, así como sus rendimientos por kilómetro recorrido. Cabe añadir que el transporte es un factor clave en la determinación de costos para los biocombustibles; así, la rapidez y eficiencia de entrega de los biocombustibles influye de manera directa en la rentabilidad de la cadena de suministro.

#### *Producción de biocombustible*

Con respecto al impacto ambiental de la producción de biocombustibles es importante recordar que ésta incluye pretratamientos, procesos de conversión y separación. Cada una de estas etapas requiere energía, así como reactivos, y pudiera o no tener emisiones y **efluentes** asociados con su operación. Por lo general, en las biomásas lignocelulósicas el pretratamiento es la etapa que mayor energía demanda, mientras que en el caso de las biomásas de triglicéridos se requiere más energía en la conversión y separación. Por

otro lado, los sistemas de biocombustibles de segunda generación requieren equipos de procesamiento más sofisticados, una mayor inversión por unidad de producción e instalaciones de mayor escala que los biocombustibles de primera generación. Entre las ventajas que tiene el uso de biocombustibles de segunda generación está la revalorización de algunos residuos agroindustriales, lo cual contribuye a resolver el problema asociado a su inapropiada disposición. Los residuos agroindustriales tienen un alto potencial para convertirse en biocombustibles y permiten diversificar las materias primas empleadas para obtenerlos. Además, los biocombustibles pueden proporcionar beneficios socioeconómicos por la instalación de plantas de procesamiento en zonas rurales; esto posibilitará generar empleos y aumentar el ingreso familiar, lo que también tiene beneficios en el ámbito social.

#### *Uso final del biocombustible*

El impacto ambiental asociado al uso de los biocombustibles es reducido, en comparación con los combustibles fósiles; las emisiones que se liberan durante la combustión del biocombustible son las mismas que las plantas absorbieron durante su crecimiento (Gómez-Castro y cols., 2019). No obstante, es importante considerar que en la cadena completa de suministro no sólo se toma en cuenta el uso del biocombustible, sino también el proceso de producción, así como el transporte de materias primas y productos; de ahí la importancia de contar con procesos de mínimo consumo energético e implementar cadenas locales de suministro. Con respecto al impacto económico, en algunos países se otorgan incentivos monetarios a las empresas que contribuyan a mejorar la calidad ambiental y que consigan regular las emisiones generadas por sus procesos productivos. El uso de biocombustibles contribuye a lograr dichos objetivos y posibilita que las compañías sean ambiental y socialmente responsables.

#### **Evaluación del ciclo de vida del bioetanol**

■ El bioetanol es el aditivo y biocombustible de mayor producción a escala mundial. El bioetanol es un

#### **Efluentes**

Corrientes de líquido o gas que se generan en los procesos y que usualmente contienen materiales contaminantes.

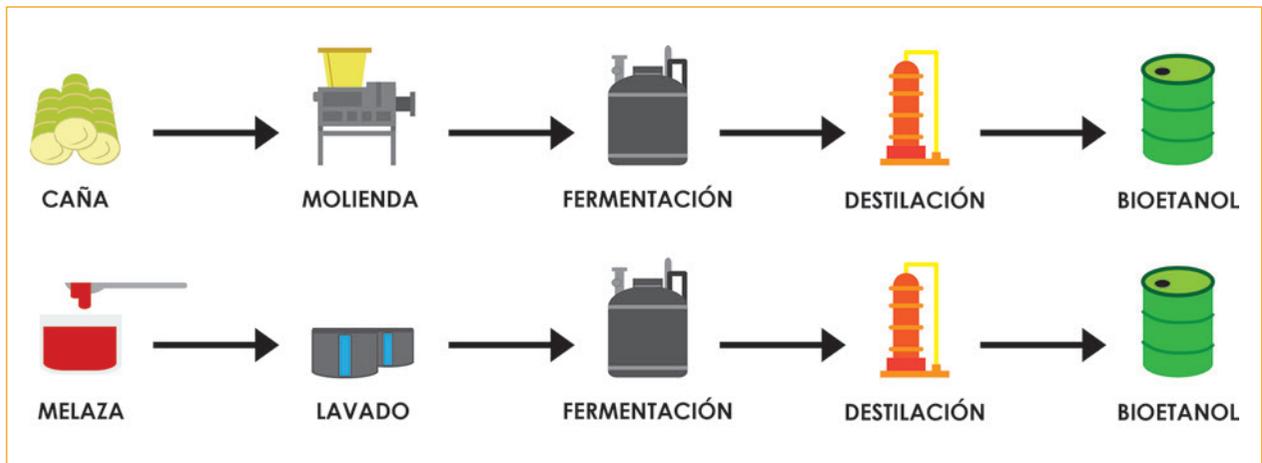


Figura 3. Proceso de producción de bioetanol a partir de: a) caña de azúcar; y b) melaza. Fuente: elaboración propia.

alcohol de origen orgánico obtenido del maíz, trigo, cebada, caña de azúcar, remolacha o alimentos ricos en almidón; en estos casos, los azúcares son convertidos en bioetanol por medio de la fermentación alcohólica. Sin embargo, el uso de estos cultivos comestibles para la producción de bioetanol implica un riesgo para la seguridad alimentaria, por lo que se ha explorado el uso de otras materias, como los residuos lignocelulósicos o las microalgas.

En 2014, Ioannis Tsiropoulos y cols. (2014) analizaron el ciclo de vida del bioetanol producido mediante fermentación a partir de caña de azúcar y melaza de caña de azúcar (véase la Figura 3). Sus resultados muestran que el etanol a partir de melaza tiene menores emisiones de GEI ( $0.09\text{-}0.64 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{etanol}}$ ) que el producido a partir de caña de azúcar ( $0.46\text{-}0.63 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{etanol}}$ ); estos resultados se explican en términos de que el bioetanol es producido a partir de la melaza, un coproducto de la producción de azúcar, lo que resulta en una menor asignación de la carga ambiental total. Por otra parte, el daño a la salud humana, cuantificado en años de vida adaptados por discapacidad (DALY, por sus siglas en inglés), para el bioetanol de melaza tiene valores menores ( $3.6 \times 10^{-6} \text{ DALY}/\text{kg}_{\text{etanol}}$ ) en comparación con el obtenido de caña ( $4 \times 10^{-6} \text{ DALY}/\text{kg}_{\text{etanol}}$ ). Lo anterior se debe al alto uso de pesticidas en el suelo; en este caso específico, daconate (herbicida que contiene arsénico) y atrazina (herbicida), aplicados en la producción de caña de azúcar. Por último, el daño al ecosistema,

estimado en fracción de desaparición de especies (PDF, por sus siglas en inglés), es menor cuando se emplea la melaza ( $2.5 \text{ PDF} \times \text{m}^2 \times \text{año}/\text{kg}_{\text{etanol}}$ ) que cuando se emplea la caña de azúcar ( $3.3 \text{ PDF} \times \text{m}^2 \times \text{año}/\text{kg}_{\text{etanol}}$ ). En la producción de caña de azúcar, las categorías de impacto que contribuyen de forma significativa al daño del ecosistema son la ocupación de la tierra (debido al uso directo de jugo de caña de azúcar para la producción de etanol) y la toxicidad terrestre (asociada principalmente al deconato); a su vez, el mayor impacto en el caso del bagazo es debido a la acidificación y la nutrición terrestre por las prácticas de quema precosecha. Cabe resaltar que las mejoras en la eficiencia de la producción agrícola (riego, uso de fertilizantes, cambios de suelo, sistema de producción, entre otros) mostrarán nuevos panoramas con respecto a las emisiones generadas.

Para terminar, debemos añadir que el uso de materias primas comestibles para producir biocombustibles podría afectar la seguridad alimentaria. Adicionalmente, es importante considerar la legislación asociada al tema. En México, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos indica que la caña de azúcar y el maíz pueden usarse para producir biocombustibles, sólo en caso de existir un superávit (Gómez-Castro y cols., 2019). Sin embargo, en Estados Unidos de América y Brasil no hay una legislación similar, y estas biomásas han sido exitosamente empleadas para generar bioetanol sin afectar la seguridad alimentaria. Por ello, la selección de una bio-

masa para producir biocombustibles debe considerar tanto la legislación local como el riesgo potencial para la seguridad alimentaria global.

## ■ Conclusiones

■ El análisis del ciclo de vida de los biocombustibles incluye los impactos ambientales, económicos y sociales relacionados con su cadena de producción. Los resultados obtenidos de este análisis y la herramienta de evaluación del ciclo de vida son de vital importancia para el desarrollo tecnológico de los procesos de producción de biocombustibles sostenibles.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico al proyecto 279753, así como por la beca de Noemí Hernández Neri para sus estudios de posgrado.

### Noemí Hernández Neri

Universidad Autónoma de Querétaro.  
noemi\_hne@hotmail.com

### Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.  
claugtez@gmail.com

### Fernando Israel Gómez Castro

Universidad de Guanajuato.  
fgomez@ugto.mx

## Referencias específicas

- Anderson, T., H. Paul y G. Rodríguez (2008), “Los agrocombustibles y el mito de las tierras marginales”, *Polis*, 21:3-12.
- Demirbas, A., (2009), “Los biocombustibles satisfacen las necesidades futuras de energía del planeta”, *Energía, Conversión y Gestión*, 50:2239-2249.
- Gerbens-Leenes, P. W., A. Hoekstra y T. H. Van Der Meer (2012), “Biofuels scenarios in water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030”, *Global Environmental Change*, 22:764-755.
- Larrouyet, M. C. (2015), *Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta* (trabajo final integrador), Universidad Nacional de Quilmes, Argentina.
- Naik, S. N., V. V. Goud, P. K. Rout y A. K. Dalai (2010), “Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2):578-597.
- ONU (2020), *Perspectivas de la población mundial 2019: metodología de las Naciones Unidas para las estimaciones y proyecciones de población*, serie Población y Desarrollo 132 (LC/TS.2020/95), Santiago, CEPAL.
- Rathore, D., D. Pant y A. Singh (2013), “A comparison of life cycle assessment studies of different biofuels”, en A. Singh, D. Pant y S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*, Londres, Springer, pp. 269-289.
- REMBIO (2011), *La bioenergía en México, situación actual y perspectivas*, cuaderno temático núm. 4, México, Red Mexicana de Bioenergía. Disponible en: <<http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf>>, consultado el 3 de mayo de 2022.
- Tsiropoulos, I., A. P. Faaij, J. E. Seabra, L. Lundquist, U. Schenker, J. F. Briois y M. K. Patel (2014), “Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(5):1049-1067.
- Gómez-Castro, F. I., C. Gutiérrez-Antonio, S. Hernández, C. Conde-Mejía, A. López-Molina y R. Morales-Rodríguez (2019), “Producción de biocombustibles en México. Parte 2. Procesos de producción y áreas de oportunidad”, *CIENCIA@UAQro*, 12(2): 51-60.