

Deicy María Matos Ríos, José María Ponce Ortega y Claudia Gutiérrez Antonio

Cadena de suministro para la producción de biocombustibles

En el mundo, las necesidades energéticas actuales continúan incrementándose debido al crecimiento tanto económico como poblacional. En este contexto, los biocombustibles representan una alternativa energética promisoría; no obstante, es necesario garantizar su cobertura y suministro mediante la implementación de la cadena de suministro de una forma efectiva y sustentable.

Introducción

Hoy día, el tema energético es de gran interés tanto por el cambio climático como por el incremento y la variabilidad de los precios de los combustibles fósiles. Lo anterior ha impulsado la búsqueda de fuentes energéticas alternativas que sean viables técnica y económicamente. Así, se ha trabajado en el aprovechamiento de la energía de la radiación solar, del viento, de las corrientes de agua, de las olas y de la biomasa, entre las más importantes. A partir de estas fuentes energéticas se busca producir electricidad, calor y combustibles para satisfacer las necesidades de la población, así como las de los sectores productivos.

En particular, el desarrollo del sector del transporte requiere de combustibles que sean renovables, por ejemplo, obtenidos del procesamiento de la biomasa; a dichos combustibles se les conoce como biocombustibles. En México se ha dado un fuerte impulso al desarrollo de los biocombustibles, debido a la adherencia al Protocolo de Kioto, así como a la Ley de Promoción de los Bioenergéticos. Asimismo, se ha creado el Centro Mexicano de Innovación en Bioenergía (CEMIE-Bio), el cual tiene como objetivo desarrollar biocombustibles para coadyuvar a que, en 2027, 30% de la energía en México sea renovable. Dicho centro consta de clústeres, cada uno de los cuales realiza investigaciones en torno a los biocombustibles sólidos, bioalcoholes, biodiésel, biogás y bioturbosina.

De igual manera, se han implementado políticas para impulsar alternativas sustentables que permitan satisfacer la demanda energética y de combustibles. Por una parte, con ellas se debe regular el crecimiento de la producción de biocombustibles. Dado que éstos se producen a partir de biomasa, debe considerarse el cambio de uso del suelo agrícola o la incorporación de nuevas tierras para este fin, ya que



sin una regulación podrían ocasionarse problemas alimentarios, de destrucción del hábitat, así como de incremento de precios de los insumos utilizados.

Adicionalmente, la producción de biocombustibles a escala industrial requiere la implementación de la cadena de suministro. Esta última se define como el conjunto de eslabones que interactúan entre sí para entregar un bien o producto al mercado o a un cliente, desde su materia prima, transformación, transporte y hasta su consumo por el destinatario final (Tapia Becerra y cols., 2015). No obstante, resulta fundamental que la implementación de la cadena de suministro de biocombustibles (en adelante, CSB) sea sustentable, considerando los aspectos económicos, ambientales y sociales. Es decir, el establecimiento de la CSB debe minimizar y mitigar, en la medida de lo posible, los impactos al ambiente, dado que de esa manera se asegura la disponibilidad de recursos en el largo plazo. Asimismo, la implementación de la CSB debe maximizar el impacto social, mediante la generación de empleos bien remunerados que permitan mejorar la calidad de vida de las personas. De igual manera, se debe buscar que la CSB posibilite el crecimiento de los sectores económicos asociados. Por ello, esta cadena es fundamental para establecer de manera sustentable la producción y distribución de biocombustibles en el país.

En particular, los biocombustibles de mayor interés en México son biodiésel y bioturbosina para el reemplazo del diésel y la turbosina, respectivamente; además, el bioetanol se emplea como aditivo de la gasolina fósil, mientras que el biobutanol puede reemplazar a dicho combustible fósil. El establecimiento de la CSB permitirá contribuir con lo dispuesto en la política internacional para la disminución de gases de efecto invernadero, así como para prolongar las reservas petroleras de México; por otra parte, se logrará producirlos dentro del territorio cumpliendo estándares de índole nacional e internacional, pensando a mediano plazo en exportarlos a diferentes mercados en el mundo e introducirlos a la nueva industria de los biocombustibles (SENER, 2015).

Por lo anteriormente expuesto, resulta de vital importancia estudiar de manera detallada cada uno

de los eslabones de la CSB, lo cual permitirá facilitar la intervención adecuada para su desarrollo y crecimiento, mediante el equilibrio de factores ambientales, económicos y sociales. Así, en el presente artículo se revisarán los elementos de la CSB, mediante una breve descripción de los procesos de producción de los biocombustibles de interés en México. También se presentarán algunos aspectos de sustentabilidad que deben considerarse en la CSB.

■ Biomasa y biocombustibles

■ La biomasa se define como todo el material biológico generado en el **ciclo corto de carbono**, tales como semillas, granos, cultivos alimenticios, residuos orgánicos, aceite residual, cultivos no comestibles y algas, entre otros. La biomasa puede clasificarse de acuerdo con su naturaleza química en materia lignocelulósica, triglicéridos, así como azúcares y almidones (véase el artículo “Revalorización de residuos” en este número); de esta manera, dependiendo de su naturaleza química, la biomasa es transformada mediante diferentes procesos de conversión para generar energía térmica, eléctrica o biocombustibles (García Bustamante y Masera Cerutti, 2016).

Por otra parte, un biocombustible se define como todo aquel combustible que puede producirse directa o indirectamente a partir de la biomasa; los biocombustibles pueden presentarse en estado sólido, líquido o gaseoso. Entre los biocombustibles líquidos destacan principalmente el bioetanol, el biodiésel y la bioturbosina, los cuales poseen propiedades similares a los de origen fósil. El bioetanol es un alcohol que se obtiene mediante la fermentación de carbohidratos de la biomasa compuesta de almidones, azúcares o celulosa; en este proceso, los azúcares de la biomasa se transforman en alcoholes mediante la acción de los microorganismos. El biodiésel se obtiene mediante la transesterificación de aceites de origen animal o vegetal, la cual es una reacción química en la que los aceites se convierten en ésteres metílicos, compuestos que conforman el biodiésel. Por otra parte, la bioturbosina se obtiene mediante el hidrogenación de aceites vegetales, de residuos o grasas animales; esta tecnología permite transformar

Ciclo corto de carbono

Aquel en el que se genera el material biológico, con excepción del fosilizado.

los aceites en hidrocarburos mediante una reacción química con hidrógeno.

Ahora bien, en los diferentes procesos de producción de biocombustibles un aspecto muy importante es la disponibilidad de la biomasa. México es un territorio atractivo para la producción de biocombustibles por diversas razones, entre las que destacan la extensión disponible, el clima, así como el impulso que se ha dado para el cultivo de biomasa energética. En la Tabla 1 se presentan algunos de los potenciales cultivos en México para producir biocombustibles, así como la superficie con potencial productivo alto. Es importante aclarar que los datos que se muestran en la Tabla 1 representan la superficie donde las condiciones de tipo de suelo, altitud, precipitación, entre otros factores, son las más apropiadas para el crecimiento de dichos cultivos; no obstante, no se espera que toda esa superficie sea empleada para el cultivo de la biomasa para la producción de biocombustibles, dado que se desplazarían los cultivos alimenticios, lo cual representa un riesgo para la seguridad alimentaria. Asimismo, también debe prohibirse el cambio de uso de suelo de ecosistemas naturales (forestales) a plantaciones, ya que las afectaciones derivadas incluyen el aumento

de las emisiones de CO₂, la erosión de los suelos, así como la pérdida de la biodiversidad. Por ello, el uso de residuos agroindustriales se considera como una materia prima de gran potencial para la producción de biocombustibles.

Cadena de suministro del proceso de producción de biocombustibles

En esta sección se revisará la cadena de suministro de los biocombustibles (CSB), para lo cual se describirá el proceso global tanto de producción como de distribución. Primero, la biomasa (materia prima) debe ser cultivada o recolectada, para posteriormente utilizarla en la producción de biocombustibles mediante diferentes procesos de transformación, los cuales pueden ser físicos y químicos. Una vez que los biocombustibles han sido producidos, éstos deben ser distribuidos a los diferentes puntos de venta para que puedan ser suministrados al cliente final. Por ello, la CSB contempla tres eslabones principales: obtención o recolección de biomasa (materias primas), proceso de transformación de las materias primas y, por último, distribución de los biocombustibles hacia los puntos de venta (véase la Figura 1).

Tabla 1. Potencial productivo de cultivos aptos para la producción de biocombustibles en México.

Cultivos	Biocombustibles	Potencial productivo alto (Ha)	Localización de las tierras con potencial productivo alto
caña de azúcar	bioetanol, biobutanol	4 313	22 estados
higuerilla	biodiésel, bioturbosina	6 345	28 estados
jatropha curcas	biodiésel, bioturbosina	3 468	28 estados
palma de aceite	biodiésel, bioturbosina	293	8 estados
remolacha azucarera	bioetanol, biobutanol	2 008	32 estados
sorgo dulce	bioetanol, biobutanol	2 200	22 estados

Fuente: base de datos de la Red Mexicana de Bioenergía (2017).



Figura 1. Esquema de la cadena de suministro de biocombustibles (CSB).

El primer eslabón está relacionado con el cultivo o recolección de la biomasa, que representa la materia prima de los biocombustibles. En el caso del cultivo, debe tomarse en cuenta la disponibilidad de las tierras y el rendimiento, mientras que la disponibilidad debe considerarse para los residuos de todos los tipos. En ambos casos es necesario el transporte de las materias primas hacia los centros de procesamiento.

El segundo eslabón de la CSB es la transformación de la materia prima, lo cual incluye considerar las rutas de conversión, eficiencia energética de los procesos y rendimientos de los productos obtenidos. Cabe añadir que recientemente se ha propuesto el diseño de procesos que permitan el aprovechamiento completo de las materias primas; a dichos centros de procesamiento se les conoce como biorefinerías, con un enfoque similar al de las petrorefinerías, donde se procesa una sola materia prima y se obtiene una gran variedad de productos. Así, al disponer de va-



rios bioproductos, los precios son más competitivos, además de la gran ventaja de que dichos productos son de carácter renovable. El grupo de bioproductos incluye aquellos empleados en la industria farmacéutica (compuestos activos para medicamentos), alimenticia (nutrientes, aditivos) o química (bioplásticos). Sin embargo, esto implica un mayor reto para el transporte de los bioproductos, dado que incluyen diversos mercados y sitios de venta.

Por último, se tiene el eslabón de la logística para llevar los productos hasta el consumidor final, lo cual incluye una red de distribución, mezclas con los combustibles fósiles y almacenamiento (Barón y cols., 2013). Todos los eslabones de la CSB deben estar relacionados y comunicados hacia objetivos comunes que garanticen su continuidad y crecimiento en los aspectos económico, ambiental y social.

La CSB incluye decisiones relacionadas con el tipo de biomasa a seleccionar, cuánto y de qué lugar tomarla, qué tecnología de producción instalar, dónde establecer las plantas de procesamiento y con qué capacidad, qué tipo y cantidad de biocombustible entregar, y qué mercado satisfacer, con el fin de que la relación costo-beneficio de la producción de biocombustibles sea favorable (Fuentes Martínez, 2013). En el caso de las biorefinerías, el análisis también debe incluir los bioproductos derivados.

Ahora bien, la producción de biocombustibles depende principalmente del rendimiento de los procesos de transformación, así como de la disponibilidad de las materias primas. Por ello, se ha incentivado la inversión en estos aspectos, tanto para incrementar la producción de las materias primas como para desarrollar tecnologías eficientes de conversión; esto posibilitará que la oferta de biocombustibles pueda abastecer la demanda interna y, de ser factible, la externa. Con respecto a las materias primas se prefieren aquellas que sean residuos, o bien que sean cultivadas, pero que no compitan con la alimentación humana; esto permitirá generar los insumos necesarios sin poner en riesgo la seguridad alimentaria de los mexicanos. Asimismo, deben seleccionarse aquellas materias primas que tengan mayor potencial en una entidad en específico, en lugar de modificar los ecosistemas tratando de utilizar las materias primas



Figura 2. Cadena regional de suministro de biocombustibles.

novedosas. Así, los centros de procesamiento de la biomasa deben ser regionales, con el afán de disminuir tanto los costos de transporte como el impacto ambiental. Esto a su vez permitirá la activación de la economía regional, con un impacto positivo en la generación de empleos, con lo cual se beneficiará al sector social. La Figura 2 presenta la cadena regional de suministro de biocombustibles que incluye los flujos de materiales en cada uno de sus eslabones o actores.

Para el caso de México, la implementación de la CSB ha sido un proceso complejo. Lo anterior se debe a que el sector energético ha visto limitado el grado de inversión necesario para su desarrollo en todos los niveles; por ello, se llevó a cabo la reforma energética en aras de incrementar la inversión en este sector (Hernández Trejo, 2015).

Adicionalmente, se han realizado estudios interesantes mediante técnicas de programación matemática que analizan la CSB en el país con base en comportamientos lineales o no lineales que permiten obtener soluciones mediante estrategias de optimización determinísticas o disyuntivas (Ponce Ortega y Santibáñez Aguilar, 2019). Dichos estudios consideran la evaluación de riesgos financieros y la planificación óptima de la CSB bajo incertidumbre,

la cual está relacionada con la operación de la cadena y el riesgo asociado a su adecuada implementación, teniendo en cuenta la selección de materias primas, las rutas de procesamiento, los productos y subproductos a generarse, los sitios de recolección, procesamiento, almacenamiento y mercados, flujos de transportes, así como criterios de sustentabilidad. Este tipo de estudios se ha realizado en México bajo el liderazgo del investigador José María Ponce Ortega y su grupo de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; dichos estudios han abordado la planificación de la cadena óptima de suministros de bioenergía a partir de biomásas, incluidos bioproductos como bioetanol, biodiésel y bioturbosina a partir de biomásas alimenticias, no alimenticias, así como residuos agroindustriales (Ponce Ortega y Santibáñez Aguilar, 2019). En estos trabajos se determina la cadena óptima de suministros considerando objetivos económicos, ambientales y sociales.

Es de vital importancia que todos los actores involucrados en la CSB sepan en qué parte de la cadena intervienen; esto, para que la producción de los biocombustibles sea viable económica y ambientalmente (Lechuga Montenegro y García de la Cruz, 2010). De acuerdo con la Secretaría de Energía (SENER, 2015), el primer y segundo eslabón en la

cadena productiva deben estar respaldados por políticas públicas estables y deben incluir incentivos económicos, con los cuales resulte rentable la producción de biocombustibles a partir de la biomasa cultivada y transformada en México.

■ **Sustentabilidad de la cadena de suministros de biocombustibles**

■ Las preocupaciones en torno a la sustentabilidad ambiental relacionada con los biocombustibles incluyen los temas de emisiones de gases de efecto invernadero, uso y calidad de recursos hídricos, degradación del suelo y pérdida de la biodiversidad, principalmente en términos de sus impactos económicos, ambientales y sociales (Arteaga Espinoza, 2018). Por lo anterior, es importante que en el presente y en el futuro estas relaciones en la CSB sean indivisibles, pues el desequilibrio en una dimensión significa grandes impactos en las demás. En este sentido, las tecnologías de producción y logística de los sistemas agrícolas destinados a alimentos, productos no alimentarios y la energía deben ser abordadas desde la seguridad alimentaria, la producción de energía verde, el desarrollo de productos sustentables, la gestión de residuos y el reciclaje; de ahí que el enfoque de la CSB sea fundamental para integrar estos requerimientos en la producción agrícola, la transformación, la distribución y el consumo de los biocombustibles (Tapia Becerra y cols., 2015).

Si bien la sustentabilidad debe cuidarse en todos los eslabones de la CSB, resulta imprescindible en

el primer eslabón, relacionado con el cultivo o recolección de las biomásas. En este punto es importante señalar que, si bien las biomásas residuales no compiten por tierras, sí tienen emisiones de CO₂ asociadas con su transporte a los centros de procesamiento. Adicionalmente, las biomásas cultivadas requieren agua, nutrientes, fertilizantes y uso de maquinaria para su cosecha, lo cual incrementa su impacto ambiental. De ahí que sea relevante el establecimiento de las cadenas regionales de suministro, para así reducir al máximo los impactos ambientales y económicos asociados con el transporte de las materias primas.

En este contexto, la Mesa Redonda sobre Biomateriales (RSB, 2017) ha desarrollado, con un grupo interdisciplinario de expertos, el estándar de certificación RSB, el cual incluye los criterios y principios con los que se evalúa este enfoque triple en el que los biocombustibles serán ambientalmente correctos, socialmente justos y económicamente viables. Estos criterios apuntan de forma directa a la realización de actividades que competen a cada uno de los actores de la CSB; es decir, considera a todos los agentes involucrados en la generación del producto, ya que la certificación se otorga al producto y no a un actor de la cadena como tal. Dichas acciones están enfocadas para minimizar y restaurar los impactos ambientales y sociales de la producción de biomateriales.

El cumplimiento del estándar de certificación RSB implica un reto muy fuerte, especialmente en México, dado que, si bien los biocombustibles son renovables, no necesariamente son sustentables. Es decir, si en la producción de un biocombustible se emplea una cantidad de energía mayor a la que puede proporcionar dicho combustible, sin lugar a duda, el proceso no es sustentable. O bien, si se realiza un cambio de uso de suelo o la destrucción de un hábitat para cultivar la biomasa necesaria para producir un biocombustible, entonces éste no es sustentable. Los principios que se integran en el estándar incluyen cuestiones legales, mitigación del impacto ambiental, derechos humanos, derechos laborales, así como de impacto social. Cabe mencionar que estos estándares se han armonizado con los reglamentos y las leyes aplicables en cada uno de los países.



Conclusiones

La cadena de suministro es una pieza clave para lograr la producción y distribución de los biocombustibles en México. Los principales eslabones de dicha cadena involucran la producción de las materias primas, su procesamiento y la distribución de los productos hacia el mercado. Por ello, muchas actividades deben llevarse a cabo de manera coordinada por los múltiples actores involucrados. Asimismo, debe buscarse garantizar la sustentabilidad, minimizar el impacto ambiental y maximizar los beneficios económicos y sociales. Cabe añadir que las políticas en materia de impulso al desarrollo y la promoción de los bioenergéticos resultan fundamentales para el exitoso establecimiento de la cadena.

Los autores agradecen el apoyo financiero brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), mediante el proyecto 279753. Asimismo, Deicy María Matos Ríos recibe una beca SENER-Conacyt para la realización de sus estudios de posgrado.

Deicy María Matos Ríos

Universidad Autónoma de Querétaro.

deymatt@hotmail.com

José María Ponce Ortega

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

jose_maria_ponce@yahoo.com

Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.

claudia.gutierrez@uaq.mx

Referencias específicas

- Arteaga Espinoza, L. (2018), *Desarrollo de una metodología para el diseño del proceso de producción sustentable de bioturbosina* (tesis de licenciatura), México, Instituto Politécnico Nacional.
- Barón M., I. Huertas y J. Orjuela (2013), “Gestión de la cadena de abastecimiento del biodiésel: una revisión de la literatura”, *Ingeniería*, 18(1):84-117.
- Fuentes Martínez, E. F. (2013), *Gestión de biocombustibles en México: caso del biodiésel* (tesis de maestría), México, Instituto Politécnico Nacional.
- García Bustamante, C. A. y O. Masera Cerutti (2016), *Estado del Arte de la Bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt*, Guadalajara: Imagia Comunicación.
- Hernández Trejo, L. D. (2015), *Estudio sobre la calidad y sustentabilidad de la bioturbosina en México* (tesis de licenciatura), México, Instituto Politécnico Nacional.
- Lechuga Montenegro, J. y F. García de la Cruz (2010), “Biocombustibles: el debate internacional y el caso de México”, *Ensayos de Economía*, 37:131-155.
- Ponce Ortega, J. M. y J. E. Santibáñez Aguilar (2019), *Strategic Planning for the Sustainable Production of Biofuels*, Países Bajos, Elsevier.
- Roundtable on Sustainable Biomaterials (2017), *A guide to the RSB standard*, Ginebra, Roundtable on Sustainable Biomaterials.
- SENER (2015), *Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables. Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018*, México, Secretaría de Energía. Disponible en: <<https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf>>, consultado el 1 de marzo de 2021.
- Tapia Becerra, L. M., J. Acevedo Chedid, H. Araméndiz Tatis y J. Ararat Herrera (2015), “La sostenibilidad en el diseño de cadenas de suministro de biocombustibles”, *Revista Ingenierías*, 14(26):57-72.