



Las Biorrefinerías: Fuente de Energía y Materiales Sostenibles

Biorefineries: Source of Sustainable Energy and Materials

*Julio César Sacramento-Rivero^{20, 21}
Freddy Segundo Navarro-Pineda*

Resumen

Una biorrefinería es una instalación que usa biomasa —material de origen biológico, como plantas o residuos— para producir biocombustibles, materiales biodegradables y otros productos, buscando ser una alternativa sostenible frente a las refinerías de petróleo. Existen diferentes tipos, clasificadas según la biomasa que emplean: de primera generación (cultivos alimentarios), segunda generación (residuos agrícolas y forestales), y tercera generación (algas y microorganismos). Tienen un papel crucial en la transición energética, reduciendo emisiones y promoviendo la economía circular al reciclar desechos. En el mundo, Estados Unidos y Noruega lideran su implementación, mientras que en México hay gran potencial gracias a sus recursos naturales y residuos agrícolas. Sin embargo, el desarrollo en México enfrenta fuertes desafíos ante la falta de posturas y estímulos claros a nivel de política pública, a pesar de su viabilidad técnico-económica. Así, las biorrefinerías

20 Cuerpo Académico de Ingeniería en Sistemas de Proceso. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Yucatán.

21 Autor para correspondencia: julio.sacramento@correo.uady.mx

representan una vía hacia un modelo energético más limpio y sostenible en el futuro.

Palabras clave: Desarrollo sustentable, Biocombustibles, Transición energética

Abstract

A biorefinery is a facility that uses biomass—biological materials like plants or waste—to produce biofuels, biodegradable materials, and other products, aiming to serve as a sustainable alternative to petroleum refineries. There are various types, classified by the type of biomass they use: first-generation (food crops), second-generation (agricultural and forestry waste), and third-generation (algae and microorganisms). Biorefineries play a crucial role in the energy transition, reducing emissions and promoting a circular economy by recycling waste. Globally, countries like the United States and Norway lead in their implementation, while Mexico shows significant potential due to its natural resources and agricultural waste. However, the development of biorefineries in Mexico faces considerable challenges due to a lack of clear policy support and incentives, despite their technical and economic feasibility. Thus, biorefineries represent a path toward a cleaner and more sustainable energy model for the future.

Keywords: Sustainable development, Bioenergy, Energy transition

Introducción

Una biorrefinería es una instalación industrial donde se transforma biomasa (es decir, cualquier material de origen biológico como plantas o residuos) en una amplia variedad de productos de valor agregado, incluyendo biocombustibles, alimentos, biomateriales, químicos, y fármacos, entre muchos otros. Este concepto es una analogía con las refinerías tradicionales, que procesan petróleo para obtener hasta 500 productos diferentes. Sin embargo, a diferencia del petróleo, la biomasa es renovable y se puede regenerar continuamente, lo que hace a las biorrefinerías mucho más sostenibles a largo plazo. La Figura 1 es un ejemplo de cómo las diferentes fracciones de la biomasa de un arbusto, como *Jatropha curcas*, pueden convertirse en una diversidad de productos (1).



Figura 1. Al aprovechar toda la biomasa de los frutos y tallos de la *Jatropha curcas*, es posible producir biodiesel, calor, electricidad, biofertilizantes, biocarbón, entre otros productos químicos.

Las biorrefinerías son clave en la transición hacia fuentes de energía más limpia, ya que, además de producir combustibles renovables como bioetanol o biogás, generan materiales que pueden reemplazar a los derivados del petróleo. Esto es fundamental para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y sus impactos ambientales.

Tipos de biorrefinerías y sus aplicaciones

Existen varios tipos de biorrefinerías y tradicionalmente se clasifican según el tipo de biomasa que procesan y los productos que generan. Encontramos así:

Biorrefinerías de primera generación: utilizan cultivos alimentarios como el maíz y la caña de azúcar para producir biocombustibles. Su principal inconveniente es que compiten directamente con la producción de alimentos, lo cual plantea preocupaciones sobre su sostenibilidad. Tanto es así, que las certificaciones internacionales de sostenibilidad de biocombustibles ya no promueven este tipo de biorrefinerías.

Biorrefinerías de segunda generación: Estas instalaciones procesan residuos agrícolas (como el bagazo de caña o rastrojos), forestales (residuos de podas y aclareos) o industriales (aguas y lodos residuales), para generar biocombustibles y productos químicos. En

Brasil, por ejemplo, el bagazo de caña se utiliza para generar electricidad y bioetanol adicional, o biogás, mientras que, en Suecia y Noruega, los residuos forestales se transforman en biocombustibles avanzados.

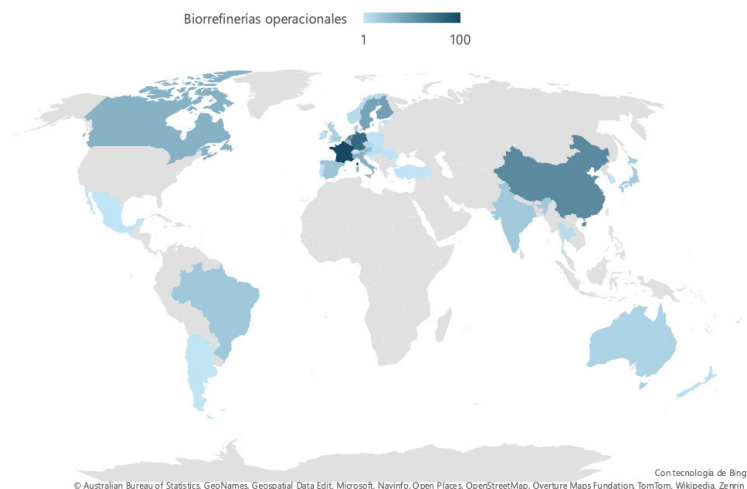
Biorrefinerías de tercera generación: Emplean herramientas avanzadas de biotecnología para convertir microorganismos o algas en energía y un amplio rango de productos de alta especialidad. Debido a su alta complejidad, son las menos comunes actualmente.

Metas de las biorrefinerías

Así como las refinerías de petróleo surgieron para cubrir la demanda de productos energéticos derivados del crudo, las biorrefinerías han emergido para aprovechar recursos renovables y generar productos más limpios. Organismos como la Agencia Internacional de Energía (IEA) y la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) consideran que las biorrefinerías son fundamentales para lograr una transición energética global hacia fuentes más sostenibles. Para lograr esto, se aspira que las biorrefinerías cumplan con el mayor número posible de los siguientes criterios (2):

Reducción de vertidos y emisiones: Los biocombustibles y productos generados en biorrefinerías deben tener un impacto ambiental menor que el de los combustibles fósiles, especialmente en términos de emisiones de gases de efecto invernadero.

Rentabilidad económica y energética: Los productos de la biorrefinería deben ser competitivos en el mercado y utilizar menos recursos energéticos de los que generan.



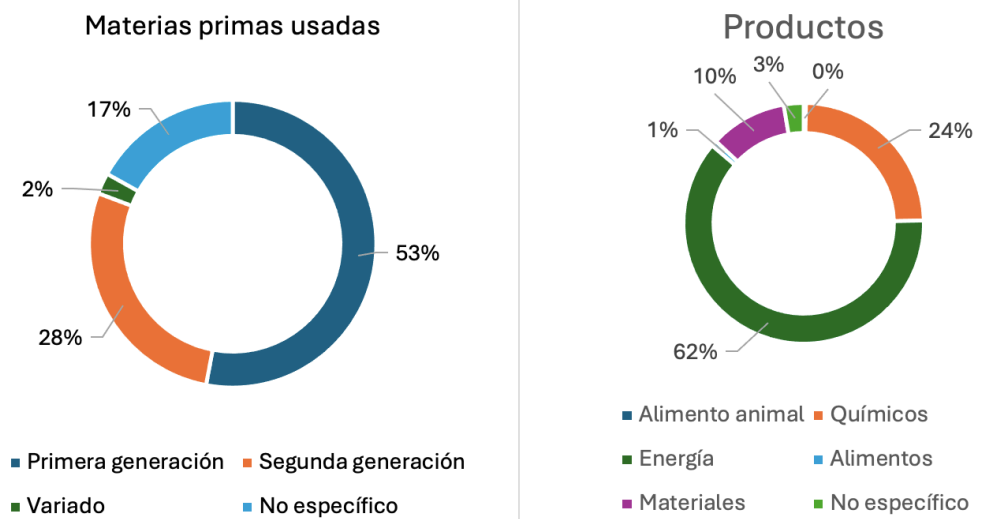
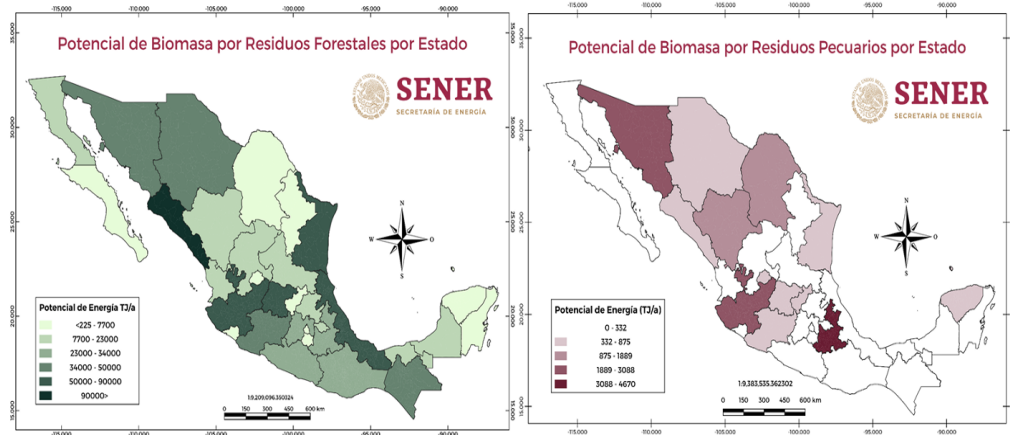


Figura 2. Número estimado de biorrefinerías en varios países del mundo excluyendo a los Estados Unidos, materias primas empleadas y productos derivados de biorrefinerías. Datos de Ref. (4).

Biorrefinerías en el contexto mexicano

México es un país muy propicio para el desarrollo de biorrefinerías, debido a su riqueza de recursos naturales y la gran cantidad de residuos agrícolas (Figura 3). En estados como Sinaloa, Tamaulipas, Guanajuato y Veracruz hay un alto potencial de residuos forestales; en Puebla, Jalisco y Sonora existen grandes cantidades de residuos pecuarios e industriales, mientras que en el Estado de México, Veracruz, Jalisco, Durango y Nuevo León se encuentra el mayor potencial de residuos urbanos (6).



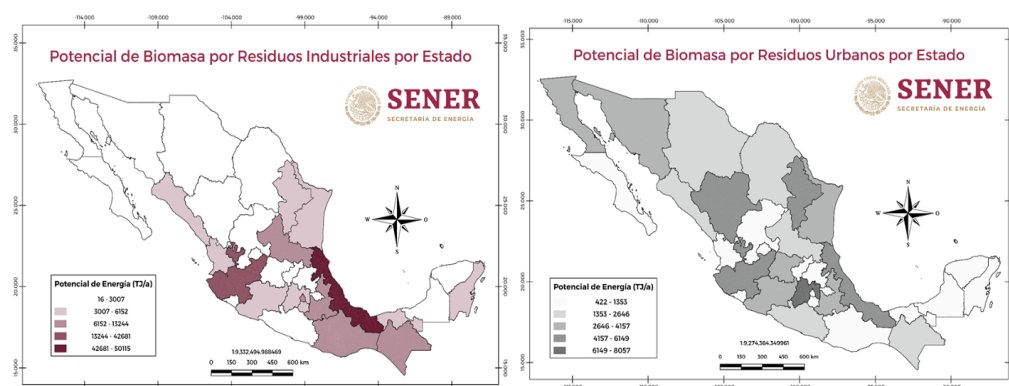


Figura 3. Potencial de energía de la biomasa en México (6).

A pesar de este gran potencial, en México aún no hay biorrefinerías multi-producto, debido a los altos costos de inversión y a un contexto político-económico y legislativo que no promueve las energías alternas ni la producción sostenible de químicos renovables. Aun así, existen muchos estudios que afirman la factibilidad económica y ambiental de la implementación de biorrefinerías en México. En Yucatán, se estableció la factibilidad económica de biorrefinerías de *Jatropha curcas* que, pese a bajas productividades, la diversificación de productos lograría hacer un exitoso caso económico y de reducción de emisiones. También se han analizado la producción de energéticos y alimento para animales a partir de algas como sargazo, o microalgas, aunque se reconoce que la incertidumbre en la productividad superficial de biomasa incrementa el riesgo de la inversión (7–9). En Veracruz, la industria citrícola ha estado buscando utilizar las cáscaras de naranja para la generación de calor, con el fin de reducir su dependencia en combustibles fósiles. Un estudio indica que el proyecto puede reducir tanto los costos como las emisiones del sistema de producción (10).

Al igual que el desarrollo de una industria de producción de biocombustibles, el desarrollo de biorrefinerías en México tomará muchos años e incluso décadas ya que, suponiendo que las bases científicas actuales (que pueden tomar de entre 5 a 10 años en desarrollarse) se encuentren disponibles, la demostración de instalaciones funcionales a nivel piloto puede conllevar de entre 3 a 5 años para labores de evaluación y estudios de escalamiento. Además, la fase de comercialización puede llevar otros 5 a 15 años para la construcción de amplias infraestructuras



y el desarrollo de cadenas de suministro. Finalmente, la penetración de los biocombustibles en el mercado puede tomar otros 5 a 10 años.

Conclusión

Al igual que las refinerías de petróleo transformaron el panorama energético en el siglo XX, las biorrefinerías serán una pieza clave en la transición energética del siglo XXI. Representan una alternativa fundamental para enfrentar la crisis ambiental y lograr la independencia energética. A través de la transformación de biomasa renovable en energía y productos industriales sostenibles, fortalecen la economía circular y tienen el potencial de traer beneficios socioeconómicos significativos, especialmente en áreas rurales. Sin embargo, como todo nuevo paradigma, el avance de las biorrefinerías enfrenta desafíos de inversión, tecnológicos y de voluntad política. En el futuro, diversificar la producción y mejorar la eficiencia de los procesos serán claves para maximizar su impacto en la transición energética global, hacia un modelo más limpio y sostenible.

Referencias

1. Navarro-Pineda FS, Baz-Rodríguez SA, Handler R, Sacramento-Rivero JC. Advances on the processing of *Jatropha curcas* towards a whole-crop biorefinery. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [Internet]. febrero de 2016;54:247–69. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115010849>
2. Sacramento-Rivero JC. A methodology for evaluating the sustainability of biorefineries: framework and indicators. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2012;6(1):32–44.
3. IRENA. Bioenergy for the energy transition: Ensuring sustainability and overcoming barriers [Internet]. Bharadwaj Kummamuru (World Bioenergy Association. Jack Saddler; 2022. Disponible en: www.irena.org
4. Annevelink B, Garcia Chavez L, van Ree R, Vural Gursel I. Global biorefinery status report 2022. 2022.
5. Rødsrud G, Lersch M, Sjöde A. History and future of world's most advanced biorefinery in operation. *International Conference on Lignocellulosic ethanol* [Internet]. 2012;46(0):46–59. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096195341200164X>
6. SENER. Atlas nacional de zonas con alto potencial de energías limpias [Internet]. Atlas nacional de zonas con alto potencial de energías limpias. 2023. p. 1–36. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/903922/Atlas_Nacional_de_Zonas_con_Alto_Potencial_de_Energ_as_Limpas.pdf
7. Aguilar-Sánchez P, Navarro-Pineda FS, Sacramento-Rivero JC, Barahona-Pérez LF. Life-cycle assessment of bioethanol production from sweet sorghum stalks cultivated in the state of Yucatan, Mexico. *Clean Technol Environ Policy*. 2018;
8. Sacramento-Rivero JC, Navarro-Pineda F, Vilchiz-Bravo LE. Evaluating the sustainability of biorefineries at the conceptual design stage. *Chemical Engineering Research and Design*. 2016;107:167–80.
9. Navarro-Pineda FS, Handler R, Sacramento Rivero JC.



Conceptual design of a dedicated-crop biorefinery for *Jatropha curcas* using a systematic sustainability evaluation. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. el 9 de enero de 2019;13(1):86–106.

10. Navarro-Pineda FS, Equihua-Sánchez M, Grande-Acosta GK, Sacramento Rivero JC, Islas-Samperio JM, Bonales Revuelta J, et al. Assessment of the Environmental and Economic Performance of Heat Generation from Orange Peels and Sugarcane Straw. *Bioenergy Res* [Internet]. 2021; Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10326-9>