



México y el futuro del bioetanol 2G: Conversión de residuos agrícolas en energía mediante enzimas celulasas

Mexico and the future of 2G bioethanol: Converting agricultural residues into energy through cellulase enzymes

María Guadalupe Aguilar-Uscanga^{ID}, Daniel Arturo Zavala-Ortiz^{ID}, Javier Gómez-Rodríguez^{ID}, María Inés Infanzón-Rodríguez*^{ID}

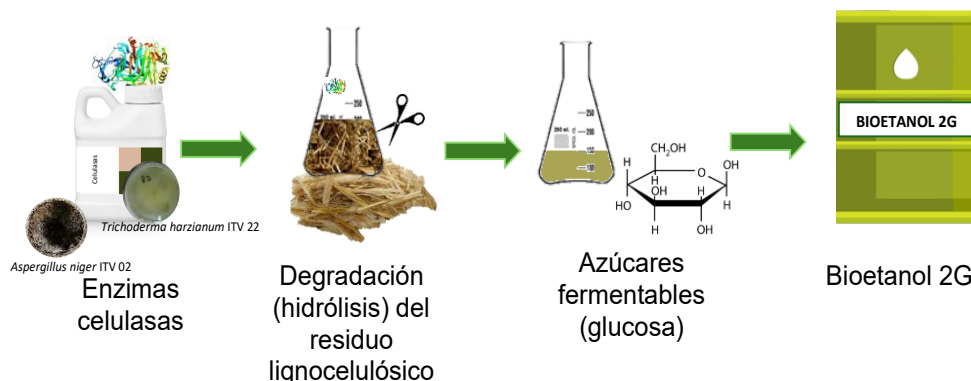
Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica-UNIDA, Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, México.

*Autor para correspondencia

Correo electrónico: maria.ir@veracruz.tecnm.mx (M.I. Infanzón-Rodríguez)

Historial del artículo:

Recibido: 14 Agosto 2025 / Recibido en forma revisada: 25 Septiembre 2025 / Aceptado: 29 Septiembre 2025 / Publicado online: 1 Octubre 2025.



“De residuos agrícolas a energía del futuro: El poder de las enzimas celulasas”

Resumen

El bioetanol de segunda generación (2G) se produce a partir de residuos lignocelulósicos no alimentarios, como bagazo, paja y cáscaras, a diferencia del bioetanol de primera generación (1G), que proviene de cultivos ricos en azúcar o almidón. México posee un gran potencial para la producción del 2G debido a la abundancia de residuos agrícolas de caña de azúcar, maíz y sorgo. La conversión de los residuos en azúcares fermentables mediante enzimas celulasas es la etapa limitante del proceso. Estas enzimas, producidas por hongos como *Trichoderma reesei* y *Aspergillus niger* permiten obtener glucosa, la cual es fermentada a bioetanol por *Saccharomyces cerevisiae*. Aunque los hongos autóctonos pueden producir celulasas, su eficiencia es menor que la de las enzimas comerciales, lo que representa un reto económico y tecnológico. Invertir en investigación, optimización de microorganismos y escalamiento de producción permitirá aprovechar los residuos lignocelulósicos, impulsar la producción de bioetanol 2G y fomentar una economía circular con beneficios ambientales y sociales.

Palabras claves: Bioetanol 2G, energía renovables, enzimas celulasas, residuos lignocelulósicos.

Abstract

Second-generation (2G) bioethanol is produced from non-food lignocellulosic residues, such as bagasse, straw, and peels, unlike first-generation (1G) bioethanol, which is derived from sugar- or starch-rich crops. Mexico has significant potential for 2G bioethanol production due to the large amounts of agricultural residues from sugarcane, maize, and sorghum. The key limiting step in the process is the conversion of the residues into fermentable sugars using cellulase enzymes. These enzymes, produced by fungi such as *Trichoderma reesei* and *Aspergillus niger*, release glucose, which is subsequently fermented to bioethanol by *Saccharomyces cerevisiae*. Although native fungi can produce cellulases, their efficiency is lower than that of commercial enzymes, representing both an economic and technological challenge. Investment in research, microorganism optimization, and scale-up of enzyme production can enhance the utilization of lignocellulosic residues, boost 2G bioethanol production, and promote a circular economy with positive environmental and social impacts.

Key words: Bioethanol 2G, cellulases enzymes, lignocellulosic residues, renewable energy.

En el contexto del panorama energético mundial, la búsqueda de fuentes sostenibles y renovables se ha vuelto una prioridad para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y mitigar los efectos del cambio climático. En este escenario, México posee un enorme potencial para producir bioetanol 2G, gracias a la abundancia de residuos lignocelulósicos provenientes de su intensa actividad agrícola. No obstante, uno de los principales obstáculos para hacer viable esta alternativa es el alto costo de las enzimas

celulasas necesarias para convertir los residuos en azúcares fermentables. Por ello, se requiere impulsar la investigación y el desarrollo de tecnologías que mejoren la eficiencia del proceso, especialmente mediante el uso de hongos autóctonos capaces de producir enzimas más accesibles y adaptadas a las condiciones locales.

Panorama energético global y potencial de México en la producción de bioetanol 2G

A nivel mundial, aproximadamente el 90% de la energía consumida proviene de fuentes no renovables. Estos recursos fósiles se están agotando aceleradamente y su uso excesivo produce un impacto negativo en el medio ambiente. En primer lugar, la combustión de combustibles fósiles libera grandes cantidades de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, lo que acelera el cambio climático y provoca alteraciones en los ecosistemas. Además, la extracción y refinación de estos recursos ocasionan contaminación del suelo, del agua y del aire, afectando la biodiversidad y la salud humana.

En México, los combustibles fósiles proporcionan el 82.09% de la energía y sólo el 13.77% corresponde a las energías renovables; mientras que en Brasil el 38.7% de su energía es proveniente de fuentes renovables. Dentro de las energías renovables que se producen en México, se encuentran fundamentalmente la hidroenergía (2.59%), la energía solar (2.79%), la energía eólica (2.47%) y la geoenergía (1.27%); sin embargo, hasta el momento, no se ha implementado la producción de biocombustibles a partir de cultivos agrícolas o forestales. En consecuencia, resulta esencial promover fuentes de energía limpias y renovables, como los biocombustibles, para avanzar hacia un modelo energético sostenible y resiliente.

Uno de los biocombustibles prometedores para sustituir el uso de combustibles fósiles en el sector transporte es el bioetanol obtenido a partir de residuos lignocelulósicos, llamado bioetanol de segunda generación (2G). Se llama bioetanol de 2G debido a que se produce a partir de biomasa lignocelulósica no alimentaria, como bagazo, paja, cáscaras o residuos agrícolas, a diferencia del bioetanol de primera generación (1G) que se obtiene de cultivos alimentarios ricos en azúcar o almidón.

México cuenta con un amplio potencial para la producción de bioetanol 2G debido a la gran cantidad de residuos lignocelulósicos generados por su actividad agrícola (Cuevas-García & Nava-Bravo, 2021). Los tres principales cultivos que se producen en México son caña de azúcar, maíz y sorgo, con una producción de 45, 41 y 4.7 millones de toneladas métricas anuales, respectivamente. Se ha reportado que por cada tonelada de estos cultivos se generan de 0.30 a 0.40 toneladas de residuos lignocelulósicos.

Los residuos lignocelulósicos están compuestos principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 1). Esta composición permite su conversión en azúcares fermentables, lo que los hace adecuados para la producción de bioetanol 2G (Cuevas-García & Nava-Bravo, 2021). La composición química de los residuos lignocelulósicos difiere dependiendo el origen del cultivo. Además, la variación en la composición de la pared celular entre la biomasa de plantas de la misma especie depende de la edad de la

planta y condiciones de crecimiento, así como factores genéticos, climáticos y geográficos. Por ejemplo, el bagazo de caña contiene entre 40-50% celulosa, 25-35% hemicelulosa y 18-24% lignina; mientras que la composición del rastrojo de maíz varía entre 30-40% celulosa, 19-25% hemicelulosa y 18-22% lignina.

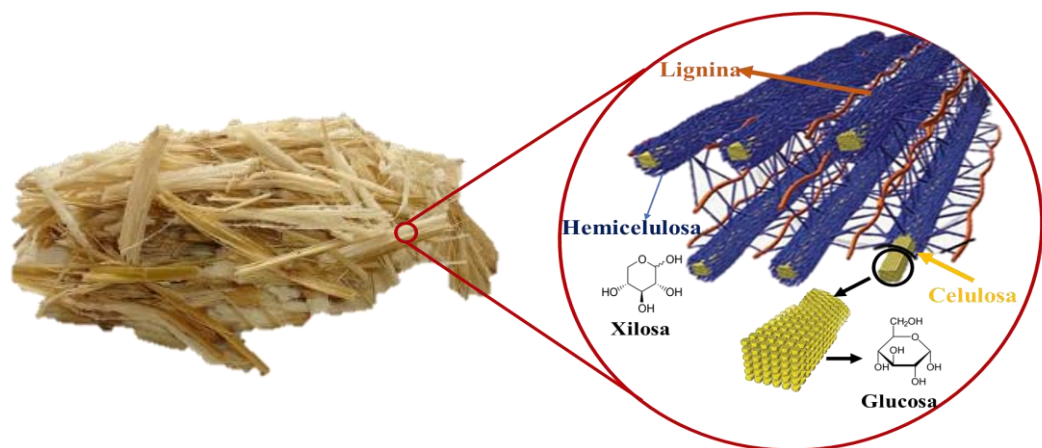


Figura 1. Estructura de la composición de los residuos lignocelulósicos.

Figure 1. Structural composition of lignocellulosic residues.

A pesar de que el país dispone de una gran cantidad de residuos lignocelulósicos provenientes de la agricultura, estos recursos no se aprovechan de manera eficiente para la producción de bioetanol 2G. A diferencia de naciones como Estados Unidos, Brasil y países de la Unión Europea, donde este biocombustible forma parte de la estrategia energética nacional, en México su desarrollo se encuentra limitado. Esta situación se debe principalmente al alto costo de las enzimas necesarias para la conversión de celulosa en glucosa, así como a la falta de infraestructura tecnológica y de inversión en investigación aplicada.

Enzimas celulasas: Etapa clave en el proceso de producción de bioetanol 2G

Las enzimas son catalizadores biológicos que aceleran las reacciones, bajo condiciones controladas para la obtención de un producto biotecnológico de interés. Una de las enzimas que ha cobrado importancia en la industria de los biocombustibles 2G, es la enzima celulasa, cuya función es convertir los residuos lignocelulósicos en azúcares (glucosa). La glucosa obtenida de estos residuos es convertida a bioetanol 2G por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.

La producción de bioetanol de segunda generación enfrenta uno de sus mayores desafíos en la etapa en la que los residuos agrícolas se convierten en azúcares que luego pueden fermentar para producir energía. Este paso, realizado por enzimas llamadas celulasas, es especialmente difícil porque la biomasa vegetal es muy resistente y compleja. La eficiencia de estas enzimas determina cuánto bioetanol se puede obtener de los residuos, por lo que

mejorar esta etapa es clave para aprovechar al máximo estos materiales que normalmente se desechan.

Sin embargo, el principal obstáculo para que este proceso sea económicamente viable es el alto costo de las enzimas celulasas (Infanzón-Rodríguez *et al.*, 2022). Producirlas y aplicarlas en cantidades suficientes representa gran parte del gasto total en la producción de bioetanol 2G, lo que limita su uso a gran escala. Por ello, investigadores y empresas buscan constantemente formas de hacer estas enzimas más eficientes y baratas, con el objetivo de transformar de manera más rentable los residuos en combustible sostenible.

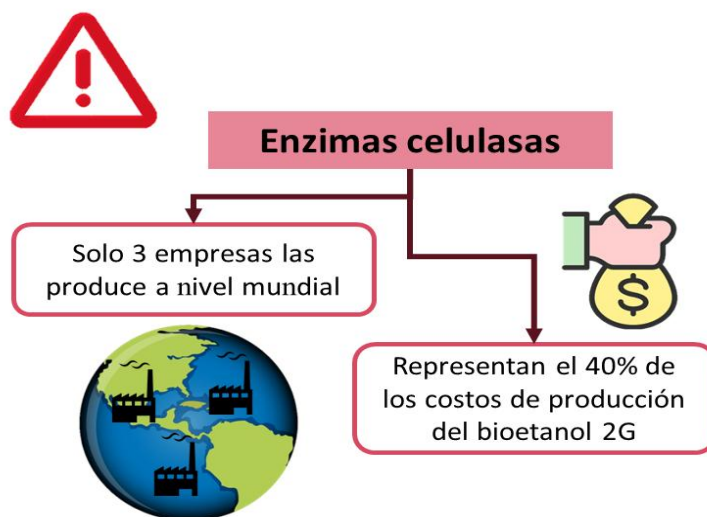


Figura 2. Limitaciones de la industria del bioetanol 2G.

Figure 2. Limitations of the 2G bioethanol industry.

Situación actual en la producción de enzimas celulasas, retos y oportunidades para México

Como se ha mencionado, las celulasas son enzimas esenciales en la producción de bioetanol de segunda generación, ya que permiten transformar la celulosa de los residuos vegetales en azúcares simples que posteriormente se fermentan para obtener etanol. Actualmente, los principales microorganismos utilizados para producir estas enzimas son los hongos *Trichoderma reesei*, *Humicola insolens* y *Aspergillus niger*, reconocidos por su alta capacidad enzimática.

Entre las celulasas comerciales más utilizadas se encuentran Celluclast 1.5L, Cellic CTec2 y Cellic CTec3, desarrolladas a partir de *T. reesei*, con actividades enzimáticas aproximadas de 75, 148 y 191.6 unidades por mililitro, respectivamente. La empresa danesa Novozymes es líder mundial en su producción y comercialización. En 2014, esta compañía lanzó las llamadas enzimas de tercera generación (Cellic CTec3 y HTec3), las cuales son más eficientes que las versiones anteriores ya que no se inhiben por la presencia de glucosa. Sin embargo, estas formulaciones avanzadas aún no están

disponibles comercialmente. Versiones más básicas, como Celluclast 1.5L, pueden adquirirse a precios cercanos a los ¡3,000 pesos mexicanos por 50 mL!

En México, Enzimas Mexicanas (Enmex- kerry) es una de las principales compañías productoras de enzimas celulasas a nivel mundial, teniendo como productos principales: complejo enzimático de bromelina, cóctel de enzimas exo y endopeptidasa, lactasa, proteasa amilasa y xilanasas. Sin embargo, no está enfocada a la producción de celulasas aplicadas en la hidrólisis de residuos lignocelulósicos. La producción de celulasas con aplicación en la hidrólisis de residuos lignocelulósicos merece especial atención en nuestro país.

Diversas investigaciones se han realizado con la finalidad de incrementar y obtener enzimas eficientes en la conversión de los residuos a azúcares fermentables, desde el aislamiento de microorganismos, optimización de los medios de cultivos y modificación genética de los microorganismos. Se ha reportado el porcentaje de conversión de celulosa a glucosa empleando hongos autóctonos que, si bien este valor es inferior al reportado para enzimas comerciales, resulta relevante al considerar que se trata de un hongo autóctono y que el proceso no requiere la adquisición de preparados comerciales de alto costo (Infanzón-Rodríguez *et al.*, 2022). Sin embargo, se requiere realizar más investigación y desarrollar tecnologías para incrementar la eficiencia de estos extractos enzimáticos para alcanzar valores cercanos al 90% correspondientes a las enzimas comerciales (Cellic CTec3), que se venden a altos precios y son de difícil adquisición (Figura 3).

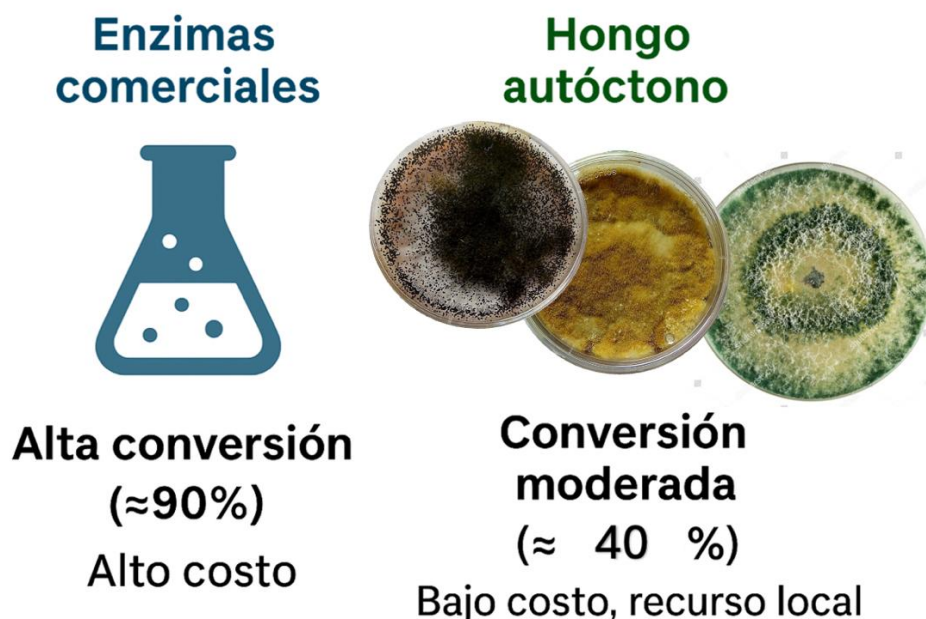


Figura 3. Diferencias entre el uso de enzimas comerciales y hongos autóctonos para la conversión de celulosa a glucosa.

Figure 3. Differences between the use of commercial enzymes and native fungi for cellulose-to-glucose conversion.

Algunas de las propuestas para revalorizar los residuos lignocelulósicos y detonar la industria de los biocombustibles 2G, se encuentra realizar el escalamiento de producción de enzimas celulasas a nivel planta piloto y transferir la tecnología a la industria, tales como los ingenios azucareros, alcohólicas, la industria del tequila, entre otras.

Conclusiones

México posee un alto potencial para la producción de bioetanol de segunda generación (2G) debido a la abundante disponibilidad de residuos lignocelulósicos generados por sus principales cultivos agrícolas, como caña de azúcar, maíz y sorgo. La conversión de estos residuos en azúcares fermentables para la producción de bioetanol 2G depende críticamente de las enzimas celulasas, cuyo alto costo representa el principal cuello de botella para su aprovechamiento industrial. Los hongos autóctonos, como *Aspergillus niger*, muestran un desempeño prometedor en la producción de celulasas, alcanzando eficiencias de conversión relevantes que podrían optimizarse mediante investigación y desarrollo tecnológico. El escalamiento de la producción de enzimas celulasas y la transferencia de la tecnología a la industria son estrategias clave para revalorizar los residuos lignocelulósicos y detonar la industria de biocombustibles 2G en México. La implementación de estas estrategias contribuiría a diversificar la matriz energética del país, reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir el impacto ambiental asociado a su uso.

Referencias

- Cuevas-García, R., & Nava-Bravo, I. (2021). Producción de combustibles renovables. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, 16(30). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2023.30.69635>
- Guarneros-Flores, J., Aguilar-Uscanga, M. G., Morales-Martínez, J. L., & López-Zamora, L. (2019). Maximization of fermentable sugar production from sweet sorghum bagasse (dry and wet bases) using response surface methodology (RSM). *Biomass Conversion and Biorefinery*, 9(3), 633–639. <https://doi.org/10.1007/s13399-018-00366-1>
- Infanzón-Rodríguez, M. I., Ragazzo-Sánchez, J. A., Del Moral, S., Calderón-Santoyo, M., & Aguilar-Uscanga, M. G. (2022). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass using native cellulase produced by *Aspergillus niger* ITV02 under liquid state fermentation. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 69(1), 198–208. <https://doi.org/10.1002/bab.2097>
- Partida-Sedas, G., Montes-García, N., Carvajal-Zarrabal, O., López-Zamora, L., Gómez-Rodríguez, J., & Aguilar-Uscanga, M. G. (2017). Optimization of hydrolysis process to obtain fermentable sugars from sweet sorghum bagasse using a Box–Behnken design. *Sugar Tech*, 19(3), 317–325. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0461-y>
- Secretaría de Energía (SENER). (2023). *Balance nacional de energía 2023*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/sener/articulos/balance-nacional-de-energia-296106>

Información de los autores



María Guadalupe Aguilar Uscanga (Primer autor).

La Dra. María Guadalupe Aguilar Uscanga es Ingeniero Industrial en Química y Maestra en Ciencias en Bioingeniería de Fermentaciones por el Instituto Tecnológico de Veracruz (ITVer), y Doctora en Ciencias en Ingeniería Química por la ENSIGC del INPT de Toulouse, Francia. Profesora Investigadora del ITVer desde 1989, es creadora del Laboratorio de Bioingeniería y de la Planta Piloto de Bioetanol de 1ª y 2ª generación, únicas en su tipo en México. Su investigación se centra en el desarrollo de bioproductos como bioetanol, xilitol, enzimas, biofertilizantes y compuestos antitumorales a partir de células vegetales. La Dra. es miembro del SNII Nivel III.



María Inés Infanzón Rodríguez (Autor para correspondencia).

La Dra. María Inés Infanzón Rodríguez obtuvo su grado de doctorado en Ciencias en Alimentos por el Instituto Tecnológico de Tepic, su maestría en Ingeniería Bioquímica y licenciatura Ingeniera Bioquímica por el Instituto Tecnológico de Veracruz. Es profesora de medio tiempo y miembro SNII Nivel I. Ha participado como asesora de proyectos de diseños de bioprocesos a nivel licenciatura y posgrado en la maestría de energías renovables. Colaboradora de proyectos financiados por TecNM, SECIHTI y COVEICyDET: “Escalar a nivel planta piloto la producción de enzimas celulasas aplicadas a la generación de biocombustibles avanzados”, “Revalorización de los desechos de la producción de bioetanol 2G para la generación de biofertilizantes y enzimas” y “Producción de bioetanol bajo un concepto de biorrefinería”.