

## Evaluación de impacto ambiental del bioetanol producido por biomasa agroindustrial en México

Luz Mariana Pérez-Montoya<sup>1</sup>, Perla Xochitl Sotelo-Navarro<sup>1</sup>, Pablo Antonio López-Pérez<sup>2</sup> y Cecilia Bañuelos-Barrón<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Programa Transdisciplinario en Desarrollo Científico y Tecnológico para la Sociedad. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional. Ciudad de México, México.

<sup>2</sup> Escuela Superior de Apan. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Apan, Hidalgo, México.

\* [cebanuelos@cinvestav.mx](mailto:cebanuelos@cinvestav.mx)

**Energías Renovables** (Biocombustibles).

**Resumen:** En México, es inherente el uso de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades energéticas. No obstante, a medida que este recurso se agota, resulta necesario hacer una transición hacia las energías renovables, entre las que se encuentra el bioetanol de segunda generación. Aunado a esto, México es un país que destaca por llevar a cabo actividades agrícolas y agropecuarias, en las que se generan una gran cantidad de residuos, que poseen características químicas que permiten su transformación a bioetanol. Por ello, los objetivos de este trabajo fueron, en primer lugar, evaluar teóricamente la producción de bioetanol a partir de seis residuos agroindustriales a través del metabolismo fermentativo de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Esta determinación fue posible con el uso de herramientas de simulación y modelado matemático, en donde se obtuvo que la paja de caña es el residuo agroindustrial que promete mayores productividades de bioetanol. Como segundo objetivo se planteó evaluar el impacto ambiental de la producción de bioetanol a partir de paja de caña. Esta evaluación fue desarrollada a través de un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), en el cual fue posible identificar que el mayor impacto ambiental recae en la categoría de ecotoxicidad marina y que las etapas del proceso que promueven mayor impacto ambiental son las etapas de hidrólisis enzimática y fermentación. Con estos resultados se abre una ventana de oportunidad para buscar estrategias que promuevan procesos con menores impactos ambientales y que trasciendan a procesos sostenibles en el contexto nacional.

**Palabras clave:** bioetanol; residuo agroindustrial; Análisis de Ciclo de Vida; México

## Environmental impact assessment of the bioethanol produced by agroindustrial biomass in Mexico

**Abstract:** In Mexico, the use of fossil fuels to satisfy energy needs is inherent. However, as this resource is depleted, it is necessary to make a transition towards renewable energies, among which is second generation bioethanol. In addition to this, Mexico is a country that stands out for carrying out agricultural and livestock activities, in which a large amount of waste is generated, which has chemical characteristics that allow its transformation to bioethanol. Therefore, the objectives of this work were, in the first place, to theoretically evaluate the production of bioethanol from six agroindustrial residues through the fermentative metabolism of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. This determination was possible with the use of simulation tools and mathematical modeling, where it was obtained that cane straw is the agroindustrial waste that promises higher bioethanol productivity. The second objective was to evaluate the environmental impact of the production of bioethanol from cane straw. This evaluation was developed through a Life Cycle Analysis (LCA), in which it was possible to identify that the greatest environmental impact falls on the category of marine ecotoxicity and that the stages of the process that promote the greatest environmental impact are the stages of enzymatic hydrolysis and fermentation. With these results, a window of opportunity opens to seek strategies that promote processes with lower environmental impacts and that transcend sustainable processes in the national context.

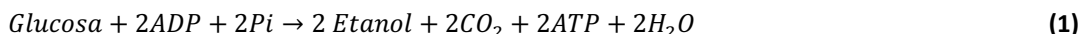
**Keywords:** bioethanol; agroindustrial waste; Life Cycle Analysis; Mexico

### Introducción

En el último año, la demanda mundial de energía ha aumentado rápidamente con más del 84% del total proveniente de recursos fósiles no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural (Sujata *et al.*, 2021). La Revisión Estadística de Energía Mundial 2021 (BP, 2021) revela que la pandemia de COVID-19 tuvo un impacto dramático en los mercados de energía porque tanto la energía primaria, así como las emisiones de carbono, cayeron a su ritmo más rápido desde la Segunda Guerra Mundial. Sin embargo, la energía renovable siguió creciendo. Los biocombustibles y la biomasa son las únicas fuentes renovables que pueden reemplazar el combustible fósil directamente por la restricción energética presente y futura, porque es una energía renovable y ecológica (Priya *et al.*, 2021).

El bioetanol (bio-EtOH) es un producto químico que se usa comúnmente como un aditivo de biocombustible renovable para gasolina. Se obtiene por la fermentación de los azúcares por medio de microorganismos como la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, que es la especie de levadura más utilizada para la obtención de etanol a nivel industrial debido a su fácil mantenimiento, manipulación y recuperación (Monir *et al.*, 2020).

En la fermentación alcohólica la producción de etanol por *S. cerevisiae*, se lleva a cabo por la ruta de la glucólisis, donde el etanol y CO<sub>2</sub> son productos finales de la fermentación alcohólica. Su ecuación general es la siguiente (Barnett *et al.*, 2005):



Dentro del metabolismo de *S. cerevisiae* se ha encontrado que en condiciones aerobias aumenta la biomasa y se produce poco alcohol, pero en anaerobiosis el crecimiento celular es lento y la producción de etanol es alta, a esta situación se le denomina “Efecto Pasteur”; pero cuando *S. cerevisiae* se encuentra en presencia de altas concentraciones de glucosa, el efecto Pasteur no tiene oportunidad de trabajar, por lo que el flujo metabólico se dirige hacia la producción de etanol. A este fenómeno se le conoce como “contra efecto Pasteur” o “Efecto Crabtree” (Barnett *et al.*, 2005). De manera experimental se ha comparado la producción de bioetanol bajo condiciones de estos dos efectos metabólicos utilizando como sustrato glucosa (Pérez, 2016).

El bioetanol puede producirse a partir de diferentes materias primas, que según el tipo de carbohidrato que contengan se dividen en sacaríferas (remolacha y caña de azúcar), amiláceas (maíz) y celulósicas (residuos lignocelulósicos o agroindustriales); los componentes principales de estos últimos son: 35 a 50% de celulosa, 20 a 35% de hemicelulosa y 12 a 20% de lignina (Visioli *et al.*, 2014). La Tabla 1 muestra la composición de algunos sustratos lignocelulósicos.

Tabla 1. Composición porcentual de algunos residuos agroindustriales

Sustrato	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Otros	Referencia
Paja de caña de azúcar (PCA)	66	8.3	25.2	0.5	Angarita <i>et al.</i> , 2015
Bagazo de caña (BC)	42	27.7	20	10.3	Brienzo, 2016
Paja de maíz (PM)	43.2	25.3	18.6	12.9	Zhang <i>et al.</i> , 2015
Paja de trigo (PT)	37	32.5	14.5	16	Liu <i>et al.</i> , 2009
Tronco de elote (TE)	38.8	44.4	11.9	4.9	Pointner <i>et al.</i> , 2014
Sorgo dulce (SD)	58.2	25.4	15	1.4	Thanapimmetha <i>et al.</i> , 2011

Se calcula que existen más de 21 millones de hectáreas destinadas a las actividades agrícolas a nivel nacional, en donde se generan agroplásticos y residuos orgánicos, que, por su alto contenido de humedad, duplican a los anteriores (640 mil toneladas). Tanto los agroplásticos como los residuos orgánicos agrícolas son considerados residuos de manejo especial (NOM-161-SEMARNAT-2011), por lo que son sujetos a planes de manejo estipulados por la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) (SAGARPA, 2015). Sin embargo, a la fecha no se ha logrado el aprovechamiento de estos para alargar su disposición final. En este contexto, los residuos generados por la agroindustria de México, en sus cadenas de producción y servicios, pueden ser aprovechados para la obtención de bioenergéticos (LPBD, 2018). Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar teóricamente la producción de bioetanol a través de los efectos metabólicos presentes en el metabolismo fermentativo de *Saccharomyces cerevisiae*, utilizando como sustrato residuos agroindustriales. Así mismo resulta interesante evaluar el impacto ambiental de la producción de este metabolito con la finalidad de conocer las etapas del proceso en donde es posible establecer estrategias de mejora a futuro.

## Materiales y Métodos

### Estimación teórica de la producción de bioetanol

Las simulaciones para la predicción de bioetanol se realizaron en una PC equipada con un procesador Intel® Core® i5-2410M y 4 GB de RAM en el software MATLAB® R2013b, utilizando el comando ode23s de la biblioteca ODE Solver para resolver el conjunto de ecuaciones diferenciales del sistema.

Se propone un modelo matemático basado en el modelo de hidrólisis enzimática (Kadam *et al.*, 2004) y en el modelo de fermentación alcohólica por *Saccharomyces cerevisiae* bajo los efectos metabólicos de Pasteur y Crabtree (Pérez,

2016). A continuación, se muestran las ecuaciones que conforman tales modelos, siendo las ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6 las correspondientes a la transformación de celulosa y hemicelulosa en celobiosa, glucosa y xilosa respectivamente. Y las ecuaciones 7, 8 y 9 lo correspondiente a la generación de biomasa, consumo de sustrato y producción de etanol respectivamente.

Modelo de hidrólisis enzimática:

$$\frac{dS}{dt} = D_H(Sa - S) - r_1 - r_2 \quad (2)$$

$$\frac{dg_2}{dt} = D_H(0 - g_2) + 1.056r_1 - r_3 \quad (3)$$

$$\frac{dg}{dt} = D_H(0 - g) + 1.111r_2 + 1.053r_3 \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt} = D_H(ha - h) - r_4 \quad (5)$$

$$\frac{dxi}{dt} = D_H(0 - xi) + 1.136r_4 \quad (6)$$

Donde  $S$  es celulosa ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $D_H$  es la tasa de dilución del reactor de hidrólisis ( $\text{h}^{-1}$ ),  $Sa$  es la celulosa alimentada al reactor ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $g_2$  es la celobiosa ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $g$  es la glucosa ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $h$  es la hemicelulosa ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $ha$  es la hemicelulosa alimentada ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $xi$  es la xilosa ( $\text{gL}^{-1}$ ) y la  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ , y  $r_4$  son las velocidades de reacción bajo el esquema de isoterma de Langmuir ( $\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ ).

Modelo de fermentación alcohólica:

$$\frac{dx}{dt} = D_F(0 - X) + \mu_x \quad (7)$$

$$\frac{dgl}{dt} = D_F(g - gl) - r_g \quad (8)$$

$$\frac{de}{dt} = D_F(0 - e) + r_e \quad (9)$$

Donde  $x$  es biomasa ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $D_F$  es la tasa de dilución del reactor de fermentación ( $\text{h}^{-1}$ ),  $\mu_x$  es la velocidad de reacción de biomasa ( $\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ ),  $g$  es glucosa que proveniente del reactor de hidrólisis ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $gl$  es la glucosa residual del reactor de fermentación ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $r_g$  es la velocidad de reacción de glucosa ( $\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ ),  $e$  es el etanol ( $\text{gL}^{-1}$ ),  $r_e$  es la velocidad de reacción de etanol ( $\text{gL}^{-1}\text{h}^{-1}$ ).

La identificación paramétrica de aquellos parámetros no disponibles en literatura se realizó mediante el algoritmo Marquardt en el software ModelMaker® 3.0.3. Los datos de alimentación de dicho modelo se tomaron de lo reportado en la Tabla 1. Posterior al desarrollo y programación del modelo, se estimaron valores de producción de etanol en 24 horas con los residuos agroindustriales de paja de caña de azúcar (PCA), bagazo de caña (BC), paja de maíz (PM), paja de trigo (PT), tronco de elote (TE) y sorgo dulce (SD) y bajo las dos condiciones metabólicas diferentes: Pasteur (anaerobio) y Crabtree. Para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en la producción de bioetanol con tales residuos agroindustriales, se desarrolló una prueba estadística de ANOVA en el software R Studio®.

#### *Análisis de Ciclo de Vida de la producción de bioetanol*

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) está establecida de acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044. Se estableció como unidad funcional evaluar la producción de un litro de bioetanol de segunda generación a nivel

industrial. El software para la evaluación del impacto ambiental corresponde a SimaPro® de la empresa Pré-Consultants. El método de evaluación aplicado es ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.03, el cual consta de 18 categorías de impacto ambiental. Los datos requeridos para el ACV se obtuvieron de la determinación teórica previamente desarrollada, así como de otras fuentes de información reportadas en literatura. El Inventario de Ciclo de Vida (ICV) del proceso de producción del flujo de referencia establecido se desarrolló en la paquetería Microsoft Excel®. Se toman como criterios de validación de datos de análisis: tiempo, geografía, tecnología, precisión, representatividad, integridad, coherencia, reproducibilidad, fuentes de la información e incertidumbre.

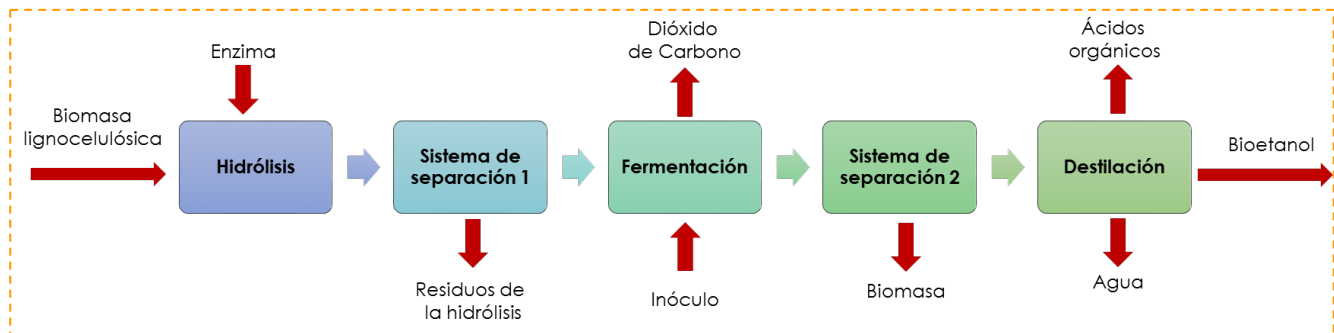


Figura 1. Operaciones Unitarias del proceso de producción de bioetanol

Para definir el sistema a evaluar, fue importante desarrollar un diagrama de bloques del proceso industrial, mismo que se muestra en la Figura 1. En dicho diagrama se pueden identificar las entradas y salidas del proceso global, así como las entradas y salidas de cada una de las operaciones unitarias que conforman el proceso. Las entradas contemplan la materia prima (biomasa lignocelulósica, enzima e inóculo o levadura), transporte y servicios auxiliares de energía eléctrica y agua; las salidas contemplan el producto principal (bioetanol), los subproductos (biomasa y ácidos orgánicos), así como el transporte, los residuos de la etapa de hidrólisis enzimática y las emisiones al aire (dióxido de carbono) y agua. Con base al diagrama de bloques establecido, se determinaron cuatro etapas importantes a evaluar (Figura 2):

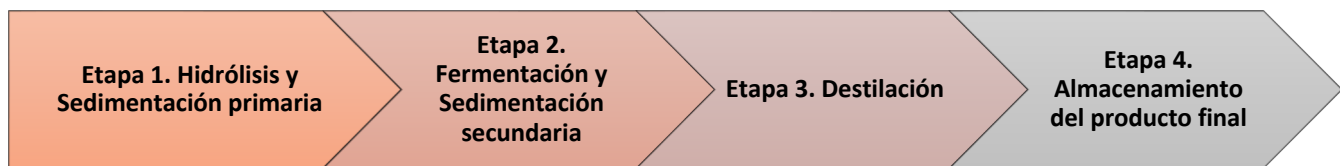


Figura 2. Diagrama de las etapas involucradas en la producción de bioetanol

## Resultados y Discusión

### Estimación teórica de la producción de bioetanol

Se preveía que la producción de bioetanol en México sería factible a través del aprovechamiento de residuos de bagazo de caña y del agave azul (Barrera *et al.*, 2016) o bien, a través del aprovechamiento de frutas como el coco, la piña y la tuna (Domínguez-Bocanegra *et al.*, 2015). Se estimaba, en estos estudios, que solo en condiciones anaerobias se obtenían las mayores producciones de este metabolito. Sin embargo, como se muestra en la figura 3, el residuo que promete mejores rendimientos de producción de etanol es la paja de caña, seguida por el sorgo dulce, paja de maíz, bagazo de caña, tronco de elote y paja de trigo. Además, la mayor producción de bioetanol se logra en condiciones aerobias extremas (efecto Crabtree).

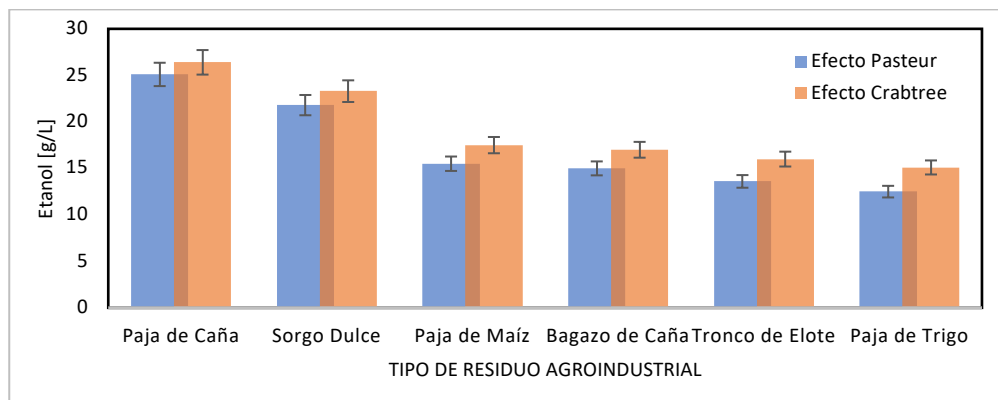


Figura 3. Gráfica de la producción de etanol con diferentes residuos agroindustriales por *S. cerevisiae* en condiciones del efecto Crabtree y del efecto Pasteur

En complemento de lo anterior, se realizaron pruebas estadísticas de ANOVA en R Studio® para la producción de etanol de los diferentes residuos agroindustriales. Se obtiene que, a condiciones del efecto Pasteur, se alcanza un valor de  $p$  de  $2.2 \times 10^{-16} < F(435.4)$  y a condiciones del efecto Crabtree, se logra un valor de  $p$  de  $2.2 \times 10^{-16} < F(196.4)$ . Por lo tanto, en ambos casos, existe una diferencia estadísticamente significativa de la producción de bioetanol según el tipo de residuo agroindustrial empleado (Figura 4).

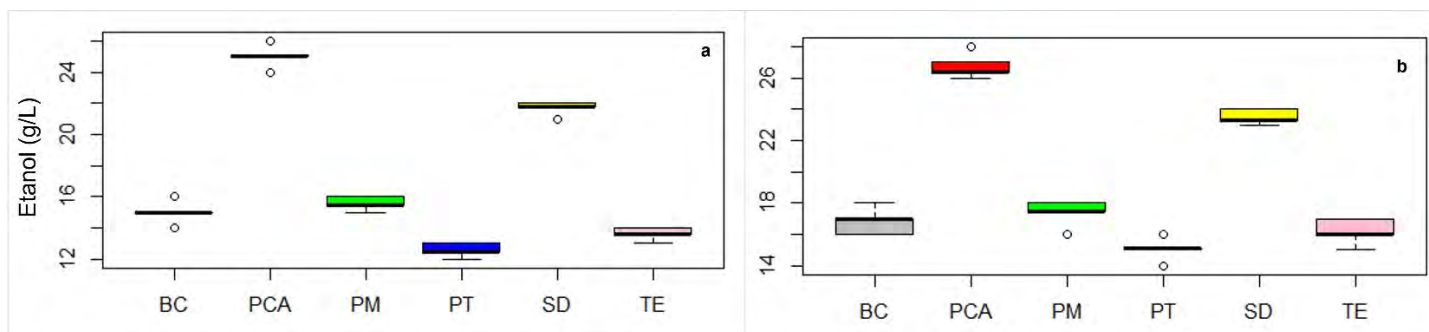


Figura 4. Boxplot de la producción de etanol con diferentes residuos agroindustriales (BC: bagazo de caña, PCA: paja de caña de azúcar, PM: paja de maíz, PT: paja de trigo, SD: sorgo dulce y TE: tronco de elote) por *S. cerevisiae* en condiciones del efecto Pasteur (a) y del efecto Crabtree (b).

#### Análisis de Ciclo de Vida de la producción de bioetanol

En los últimos años ha sido importante incluir análisis ambientales a la producción de bioetanol para lograr un escalamiento efectivo y sostenible. Sharma y col. (2020) desarrollaron un análisis para mostrar los impactos ambientales del bioetanol de 2G, concluyendo que, el bioetanol producido a partir de biomasa lignocelulósica por vía bioquímica debe superar varias dificultades en la etapa de fermentación y de hidrólisis, promoviendo la eliminación de los inhibidores y el reciclaje de subproductos, así como el tratamiento de los desechos. En lo que respecta a este trabajo, la figura 5, muestra el comportamiento gráfico del porcentaje de contribución en cada una de las 18 categorías de impacto ambiental por las cuatro etapas involucradas en la producción de bioetanol a partir de biomasa lignocelulósica. Se observa que, efectivamente, los mayores impactos están asociados a las etapas de fermentación e hidrólisis siguiendo como orden de impacto la etapa de destilación y finalmente la etapa de empaquetado. De igual forma, se puede observar que para el caso de la etapa de hidrólisis enzimática existe un impacto positivo en la categoría de escasez de recursos minerales. En complemento, la figura 6 muestra que las categorías de mayor impacto ambiental son ecotoxicidad marina, ecotoxicidad terrestre, ecotoxicidad de agua dulce, toxicidad humana no carcinogénica, toxicidad humana carcinogénica y escases de recursos fósiles. Esto significa entonces que el proceso para la producción de bioetanol a partir de paja de caña impacta negativamente en un 30% al ambiente.

Por otro lado, se observa que el desarrollo de biocombustibles de segunda generación en México, específicamente la producción de bioetanol a partir de paja de caña y a través del metabolismo de *Saccharomyces cerevisiae*, minimizan los impactos negativos asociados al Calentamiento Global.

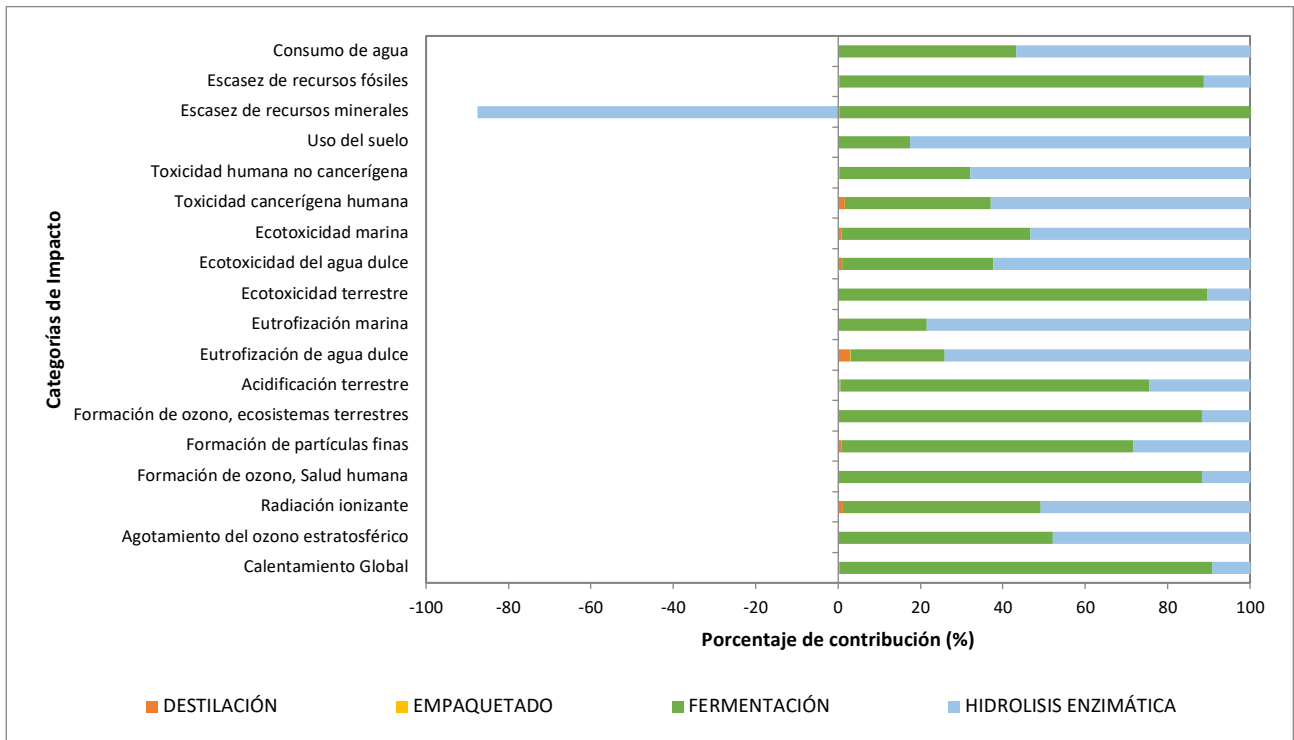


Figura 5. Porcentaje de contribución en cada categoría de impacto

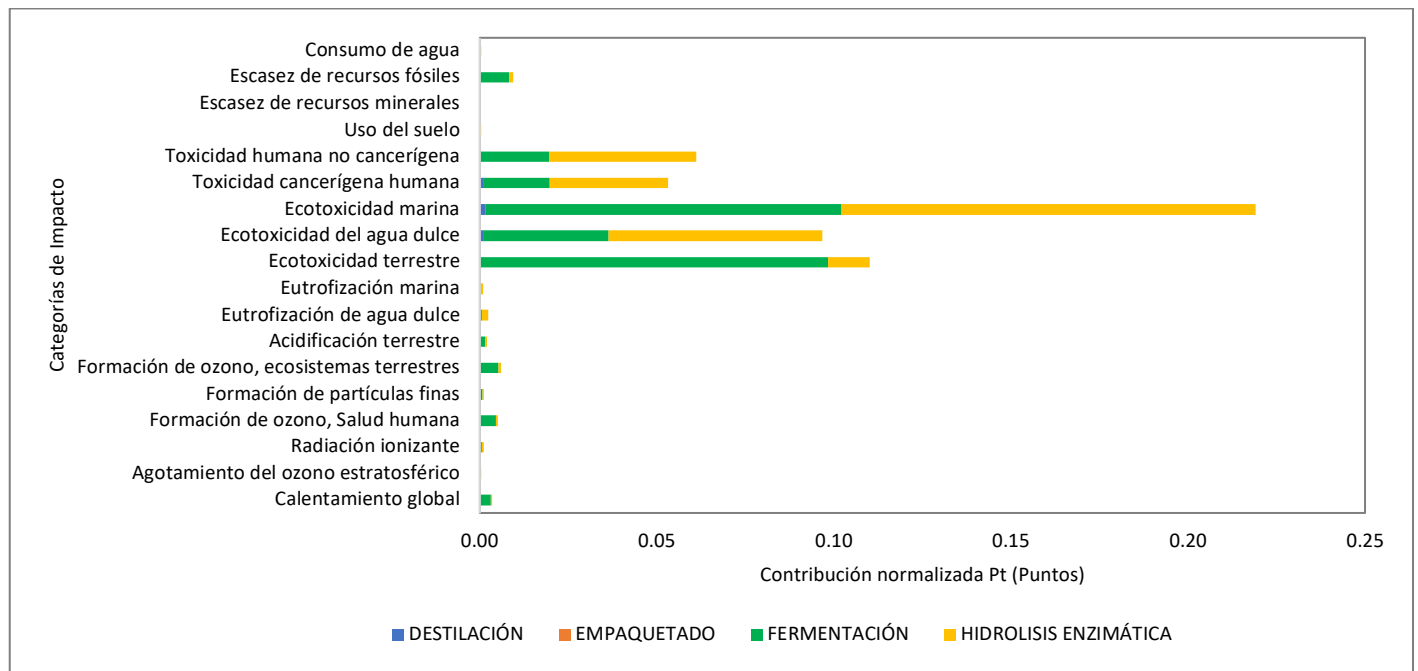


Figura 6. Contribución por datos normalizados en cada categoría de impacto

## Conclusiones

Debido a que materiales como el maíz o la caña de azúcar son parte de la canasta básica alimenticia de los mexicanos, resulta difícil promover el desarrollo de bioetanol de primera generación. Sin embargo, la producción de bioetanol de segunda generación es una alternativa viable, principalmente porque en México una de las actividades primarias es la agricultura, sector que mayor número de residuos agroindustriales genera, y cuya composición química le atribuyen una posición a la lista de materiales con potencial de aprovechamiento en la generación de bioetanol. Además, con soporte en herramientas matemáticas y computacionales ha sido posible poseer un panorama predictivo y alentador porque se han incluido seis residuos agroindustriales en el portafolio de materiales capaces de ser utilizados para la generación de bioetanol de segunda generación.

Los resultados del Análisis de Ciclo de Vida han permitido establecer que el proceso propuesto solo impacta al ambiente en un 30% aproximadamente. Esto significa que el proceso promete ser ambientalmente sostenible. Sin embargo, dado que el mayor impacto ambiental proviene de las etapas de hidrólisis enzimática y fermentación se recomienda fortalecer la etapa de fermentación con la captura de CO<sub>2</sub> atmosférico y recuperación de productos de desecho (biomasa y agua residual) para su reincorporación en el proceso. El impacto ambiental que se obtiene en la etapa de destilación es mínimo. Sin embargo, esta etapa se puede fortalecer con la incorporación de fuentes de energía alternas que minimicen el impacto generado en la categoría de calentamiento global.

Finalmente, resulta interesante ampliar este análisis hacia cuestiones económicas y sociales, de modo que se logre establecer un proceso sostenible de generación de bioetanol de 2G en México.

## Bibliografía

- Angarita, J. D., Souza, R. B. A., Cruz, A. J. G., Biscaia, E. C., & Secchi, A. R. (2015). Kinetic modeling for enzymatic hydrolysis of pretreated sugarcane straw. *Biochemical Engineering Journal*, 104, 10-19. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.05.021>
- Barnett, J. A., & Entian, K.-D. (2005). A history of research on yeasts 9: regulation of sugar metabolism. *Yeast*, 22(11), 835-894. <https://doi.org/10.1002/yea.1249>
- Barrera, I., Amezcua-Allieri, M. A., Estupiñán, L., Martínez, T., & Aburto, J. (2016). Technical and economical evaluation of bioethanol production from lignocellulosic residues in Mexico: Case of sugarcane and blue agave bagasses. *Chemical Engineering Research and Design*, 107, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.015>
- Brienzo, M. (2016). Sugarcane bagasse hemicellulose properties, extraction technologies and xylooligosaccharides production. En *Food Waste: Vol. Chapter 8* (pp. 155-188). Macmillan Publishers. [https://www.researchgate.net/publication/309414077\\_SUGARCANE\\_BAGASSE\\_HEMICELLULOSE\\_PROPERTIES\\_EXTRACTION\\_TECHNOLOGIES\\_AND\\_XYLOOLIGOSACCHARIDES\\_PRODUCTION](https://www.researchgate.net/publication/309414077_SUGARCANE_BAGASSE_HEMICELLULOSE_PROPERTIES_EXTRACTION_TECHNOLOGIES_AND_XYLOOLIGOSACCHARIDES_PRODUCTION)
- BP Statistical Review of World Energy. (2021). Renewable energy. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
- Domínguez-Bocanegra, A. R., Torres-Muñoz, J. A., & López, R. A. (2015). Production of Bioethanol from agro-industrial wastes. *Fuel*, 149, 85-89. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.062>
- Kadam, K. L., Rydholm, E. C., & McMillan, J. D. (2004). Development and Validation of a Kinetic Model for Enzymatic Saccharification of Lignocellulosic Biomass. *Biotechnology Progress*, 20(3), 698-705. <https://doi.org/10.1021/bp034316x>
- Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos. (2018). <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LPDB.pdf>
- Liu, J., Wu, M., & Wang, M. (2009). Simulation of the Process for Producing Butanol from Corn Fermentation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(11), 5551-5557. <https://doi.org/10.1021/ie900274z>
- Monir, MU, Abd Aziz, A., Yousuf, A. y Alam, MZ (2019). Hydrogen-rich syngas fermentation for bioethanol production using *Sacharomyces cerevisiae*. *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.246>
- SAGARPA. (2015). Plan de manejo de residuos generados en actividades agrícolas primera etapa: Diagnóstico nacional. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346963/Manejo\\_de\\_Residuos\\_Reporte\\_Ejecutivo.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346963/Manejo_de_Residuos_Reporte_Ejecutivo.pdf)
- Sharma, B., Larroche, C., & Dussap, C. G. (2020). Comprehensive assessment of 2G bioethanol production. *Bioresource Technology*, 313, 123630. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123630>
- Pérez-Montoya, L. M. (2016). Análisis teórico-experimental de la ruta metabólica fermentativa de *Saccharomyces cerevisiae* en la obtención de bioetanol. Tesis de Maestría. CINVESTAV.
- Pointner M., Kuttner P., Obrlik T., Jäger A., Kahr H. (2014). Composition of corncobs as a substrate for fermentation of biofuels. *Agronomy Research* 12(2), 391-396. [https://www.researchgate.net/publication/284719513\\_Composition\\_of\\_corncobs\\_as\\_a\\_substrate\\_for\\_fermentation\\_of\\_biofuels](https://www.researchgate.net/publication/284719513_Composition_of_corncobs_as_a_substrate_for_fermentation_of_biofuels)
- Priya, Deora, P. S., Verma, Y., Muhal, R. A., Goswami, C., & Singh, T. (2021). Biofuels: An alternative to conventional fuel and energy source. *Materials Today: Proceedings*. Published. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.227>
- Sujata, Anand, A., & Kaushal, P. (2021). Life cycle assessment of strategic locations to establish molasses based bioethanol production facility in India. *Cleaner Environmental Systems*, 3, 100055. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100055>

- 
- Thanapimmetha, A., Vuttibunchon, K., Saisriyoot, M., & Srinophakun, P. (2011). Chemical and Microbial Hydrolysis of Sweet Sorghum Bagasse for Ethanol Production. Proceedings of the World Renewable Energy Congress – Sweden, 8–13 May, 2011, Linköping, Sweden, 389-396. <https://doi.org/10.3384/ecp11057389>
- Visioli, L. J., Stringhini, F. M., Salbego, P. R. S., Chielle, D. P., Ribeiro, G. V., Gasparotto, J. M., Mazutti, M. A. (2014). Use of Agroindustrial Residues for Bioethanol Production. Bioenergy Research: Advances and Applications, 49–56. <https://doi:10.1016/b978-0-444-59561-4.00003-6>
- Zhang, P., Dong, S.-J., Ma, H.-H., Zhang, B.-X., Wang, Y.-F., & Hu, X.-M. (2015). Fractionation of corn stover into cellulose, hemicellulose and lignin using a series of ionic liquids. Industrial Crops and Products, 76, 688-696. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.037>