



Balances de masa en la producción de bioetanol de segunda generación a partir de residuos agroindustriales

Mass Balances in the Production of Second-Generation Bioethanol from Agroindustrial Waste

Gustavo Adolfo Espinoza Calderón¹ , Gloria Olivia Bustamante Cárdenas¹ ,
Milthon Morales Miranda¹ , Mauricio Taipe Quispe¹ 

¹Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, Perú

Autor de correspondencia:

Gustavo Adolfo Espinoza Calderón 

Historial del artículo:

Recibido el 2 de abril de 2025 | Aceptado el 30 de mayo de 2025 | Publicado el 20 de junio de 2025

RESUMEN

La producción de bioetanol de segunda generación (2G), a partir de residuos agroindustriales, se presenta como una estrategia biotecnológica sostenible para la valorización de biomasa lignocelulósica. Este trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar exhaustivamente los balances de masa en las etapas clave del proceso de obtención de bioetanol 2G, utilizando como materias primas la cascarrilla de arroz, rastrojo de maíz (chala) y rastrojo de caña de azúcar, abundantes en la agroindustria. El proceso estudiado comprendió las etapas de recepción y molienda, la hidrólisis enzimática, la fermentación alcohólica, la destilación para la concentración del etanol, la deshidratación para alcanzar la pureza requerida y la desnaturalización para su uso como biocombustible. Se realizaron mediciones precisas de masa para analizar y cuantificar los rendimientos y las pérdidas en cada etapa del proceso de bioetanol. Los resultados indicaron un rendimiento global de conversión de biomasa a bioetanol del 5.35 %, identificando la etapa de destilación como un punto crítico con el mayor impacto en la eficiencia general del proceso. La molienda mostró una pérdida de masa del 1 %, mientras que la fermentación alcanzó una eficiencia de conversión de azúcares a bioetanol del 5 %. El análisis de los balances de masa demostró ser una herramienta fundamental para la evaluación detallada y la identificación de oportunidades de optimización del proceso, sugiriendo que la mejora de la eficiencia en la etapa de fermentación y pretratamiento podría tener un impacto significativo en el rendimiento global y la viabilidad económica del proceso.

Palabras clave: bioetanol de segunda generación; residuos agroindustriales; balances de masa; fermentación

ABSTRACT

The production of second-generation (2G), bioethanol from agroindustrial waste, is presented as a sustainable biotechnological strategy for the valorization of lignocellulosic biomass. This research comprehensively evaluated the mass balances at key stages of the 2G bioethanol production process,

using rice husks, corn stover (chala), and sugarcane stover, abundant in the agroindustry, as raw materials. The studied process included reception and grinding, enzymatic hydrolysis to release fermentable sugars, alcoholic fermentation, distillation to concentrate ethanol, dehydration to achieve the required purity, and denaturation for use as a biofuel. Precise mass and volume measurements were made at strategic points throughout the process to quantify flows and determine mass balances at each stage. The results indicated an overall biomass-to-bioethanol conversion efficiency of 5.35 %, identifying the distillation stage as a critical point with the greatest impact on overall process efficiency. Milling showed a 1 % mass loss, while fermentation achieved a sugars-to-bioethanol conversion efficiency of 5 %. Mass balance analysis proved to be a fundamental tool for the detailed evaluation and identification of process optimization opportunities, suggesting that improving efficiency at the fermentation stage and pre-treatment could have a significant impact on the overall yield and economic viability of the process.

Keywords: second generation bioethanol; agroindustrial waste, mass balance, fermentation

INTRODUCCIÓN

El Perú alberga una extraordinaria riqueza de productos agrícolas y agropecuarios, sustentando una agroindustria en notable expansión durante los últimos años. Este crecimiento, sin embargo, conlleva la generación de volúmenes significativos de residuos (Mercado & Collazos, 2022).

En Perú, la producción de bioetanol cuenta con un respaldo legal que fomenta su crecimiento. Una normativa específica para la promoción del mercado de biocombustibles establece las bases para esta actividad, promoviendo la libre competencia y el acceso al mercado con la finalidad de diversificar las fuentes de energía del país, impulsar el desarrollo agropecuario y mitigar la contaminación ambiental. Este contexto legal favorable subraya la relevancia de optimizar los procesos de producción de bioetanol, donde el análisis detallado de los balances de masa, enfoque central de esta investigación, desempeña un rol crucial para alcanzar los objetivos de eficiencia y sostenibilidad definidos en la legislación (Cabezas-Oruna, 2017).

El bioetanol es un tipo de Etanol producido a partir de biomasa o la fracción biodegradable de residuos agroindustriales (Gracida & Pérez, 2014), cuyo uso principal es en motores de gasolina convencionales, mezclando hasta el 15 % con gasolina y los

motores Flex-fuel como E85 E-Diesel mezclado máximo al 10 % (Castillo, 2012). El bioetanol de segunda generación, obtenido de materiales lignocelulósicos, emerge como una opción prometedora y más sostenible que los biocombustibles de primera generación. Al no utilizar recursos que compiten con la producción de alimentos y debido a la abundancia de biomasa lignocelulósica, su menor costo potencial podría reducir el precio del biocombustible final (Faba et al., 2014).

La producción de bioetanol, a partir de residuos agroindustriales, implica una serie de etapas secuenciales que incluyen la reducción de tamaño mediante molienda, un pretratamiento con explosión de vapor, la descomposición enzimática (hidrólisis), la fermentación alcohólica y la eliminación de agua (deshidratación). El proceso fundamental consiste en la obtención de glucosa a partir del almidón o la celulosa presentes en los residuos, la cual, posteriormente, se transforma en etanol mediante fermentación.

Si bien la producción de bioetanol 2G a partir de residuos agroindustriales presenta un potencial significativo en el Perú, existe una brecha importante en la aplicación sistemática y detallada de los principios de balance de masa para la comprensión, así como optimización de los procesos.

Por lo tanto, esta investigación propone utilizar los fundamentos del balance de masa

para examinar y cuantificar el movimiento de materiales en las diversas fases del proceso de obtención de bioetanol de segunda generación a partir de rastrojos de caña de azúcar (42.91 % de celulosa) (Resano et al., 2022), cascarilla de arroz (39.05 % de celulosa) y chala de maíz (43.14 % de celulosa) (Prado et al. (2012), con el fin de identificar áreas de mejora, evaluar la eficiencia de conversión y contribuir a la optimización, así como a la sostenibilidad de esta prometedora vía de valorización.

MATERIALES Y MÉTODOS

La producción de bioetanol de segunda generación se realizó en el laboratorio de procesos y operaciones unitarias del departamento de química ubicado en el Centro Modelo de Tratamiento de Residuos (Cemtrar) perteneciente a la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

Materia prima

Los materiales que se usaron fueron cascarilla de arroz, rastrojo de maíz (chala) y rastrojo de caña de azúcar, los cuales se obtuvieron de los fundos ubicados en la ciudad de Piura. Previo al proceso de obtención de bioetanol, a la materia prima se realiza el análisis de humedad, ceniza, proteína y porcentaje de lignina de acuerdo a los protocolos estandarizados por la AOAC International (Association of Official Analytical Chemists).

Insumos

Para el proceso de la hidrólisis enzimática, se utilizó los siguientes insumos:

Tabla 1. Reactivos para la obtención de bioetanol

Reactivos	Marca	País
Endoglucanasas	Genencor	EE. UU.
Exoglucanasas	Dyadic	EE. UU.
β-Glucosidasas	Novozymes	Dinamarca

Equipos y materiales de laboratorio

Para llevar a cabo las etapas del proceso de producción de bioetanol de segunda generación, se consideran los siguientes equipos. La reducción de tamaño de los residuos agroindustriales se realizará mediante un molino de martillo Bliss Industries, modelo 4860 HD, con una potencia típica de 200 kW y procedente de Estados Unidos. La hidrólisis de la biomasa pretratada se llevará a cabo en un reactor encapsulado de Pfaudler Werke GmbH, con una capacidad de 50 m³ y origen alemán. La fermentación de los azúcares liberados se realizará en un reactor Bioengineering AG, modelo BSF-5000, con una capacidad de 5000 litros y fabricado en Suiza. Para el pretratamiento mediante explosión de vapor, se utilizará un equipo ACE Pilot de Sunds Defibrator AB, con una capacidad de procesamiento de 50 kg/h de biomasa seca y proveniente de Suecia. Finalmente, la separación y purificación del bioetanol se llevará a cabo en un destilador de platos BX Column de Sulzer Chemtech, diseñado específicamente para las necesidades del proceso y con origen suizo.

Asimismo, para la obtención de bioetanol, se siguió el procedimiento de la Figura 1, el cual se detalla:

1. Recepción de la materia prima: la cascarilla de arroz, el rastrojo de maíz (chala) y el rastrojo de caña de azúcar son almacenados en el área de recepción de la planta.
2. Molienda: consiste en una combinación de desfibrado y molienda que permite reducir el tamaño de las partículas de 1 a 3 milímetros y aumentando la superficie específica y la densidad aparente. Este procedimiento se realiza utilizando un molino de martillos. Operará a una velocidad de rotación del rotor de 3000 revoluciones por minuto (RPM) y a una velocidad de carga del material de 2 a 5 toneladas por hora (t/h).

3. Explosión de vapor: en esta etapa del proceso la materia prima previamente molida, es sometida a calor para solubilizar la hemicelulosa y hacerla accesible a la hidrólisis enzimática, evitando la formación de inhibidores. Se realiza en un reactor hidrotérmico de acero inoxidable de alta aleación a una temperatura y presión máxima de 170 °C y 1 MPa respectivamente.
4. Hidrolisis enzimática: la reacción se llevó a cabo bajo condiciones controladas de pH 4.8 y una temperatura entre 45 y 50°C. Para facilitar la descomposición del material celulósico y hemicelulósico pretratado, se utiliza una mezcla de diversas enzimas, incluyendo endoglucanasas, exogluconasas y beta-glucosidasas, las cuales se dispersan en una solución acuosa donde se suspende la biomasa. La operación se realiza en un reactor con agitación constante a 500 RPM para asegurar una mezcla homogénea.
5. Fermentación: durante esta fase del proceso, se lleva a cabo la fermentación alcohólica, una reacción de óxido-reducción que ocurre en ausencia de oxígeno y con la participación de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. Esta operación se desarrolla en un reactor con agitación a una velocidad de 30 revoluciones por minuto.
6. Destilación: esta operación se lleva a cabo en un equipo destilador de 31 platos, donde la mezcla fermentada, rica en etanol y otros compuestos volátiles. Se introduce continuamente por la parte media o inferior de la columna (flujo de alimentación).
7. Deshidratación: en esta fase del proceso, se logró una concentración de alcohol cercana al 99 %. Para alcanzar este nivel de pureza, se empleó un sistema de deshidratación que incluye una columna de destilación extractiva, una torre para recuperar el solvente utilizado, así como condensadores y decantadores
8. Desnaturalización: una vez obtenido el alcohol se sometió a una desnaturalización para ser considerado alcohol carburante y posteriormente poder ser mezclado con la gasolina o diesel.

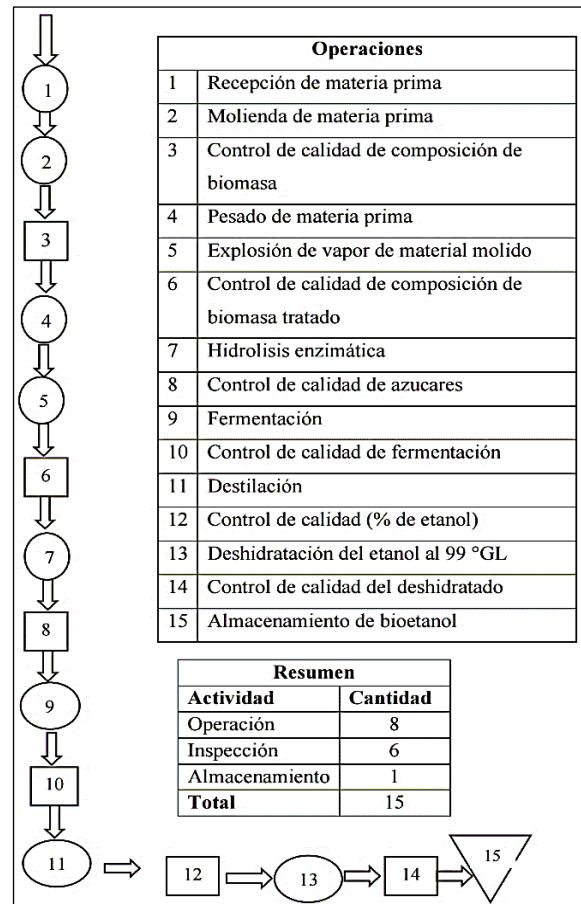


Figura 1. Diagrama de proceso para la obtención de bioetanol

El análisis de las corrientes que entran y salen de procesos de transferencia de masa, tales como la destilación, la extracción líquido-líquido, la absorción, la lixiviación y el secado, constituye la base del balance de materia en estas operaciones. Asimismo, la máxima concentración que cada componente puede alcanzar en cada una de las fases que interactúan está determinada por el equilibrio físico entre ellas (Álvarez, 2011).

Los balances de materia sencillos, que se aplican en procesos sin transformación química como la mezcla, la separación, el contacto a contracorriente, el contacto en paralelo, los sistemas con recirculación y los sistemas con derivación, se basan únicamente en la conservación de la masa (Basurco, 2019).

Metodología de balance de materia

En el presente trabajo de investigación, se desarrolló la metodología para los cálculos de balances de masa en el proceso de obtención de bioetanol como elementos fundamentales del estudio. Aplicando el balance de materia en estado estacionario, la fórmula se muestra a continuación:

$$\text{Entrada} + \text{Entrada de insumos} = \text{Salida} + \text{Consumo}$$

- Entrada: la cantidad de masa que ingresa al sistema dentro de un período específico
- Salida: la cantidad de masa que abandona el sistema dentro del mismo período.
- Consumo: la cantidad de masa que se consume dentro del sistema debido a reacciones químicas u otros procesos, similar a la generación, en balances de masa físicos, este término suele ser cero.

Rendimiento de la Operación (%) = Cantidad real del producto clave que sale de la operación/Cantidad de la materia prima clave que entra a la operación

RESULTADOS

Balance de materia

A través de la cuantificación de los flujos de materiales en cada etapa, desde la biomasa residual hasta el producto final, se pueden identificar puntos críticos, optimizar el rendimiento y determinar el impacto ambiental del proceso. En las Tablas 1 y 2, se presentan los resultados obtenidos del

balance de materia, donde se detallan las cantidades de materiales que ingresan y salen de cada etapa, así como los rendimientos y las pérdidas asociadas.

En las Figuras 2, 3, 4, 5 y 6, se detallan los balances de masa de cada operación unitaria en donde se aprecia a detalle el rendimiento en cada etapa de la extracción de bioetanol. Se opone un énfasis en la entrada y salida de material, así como al centro de la figura el porcentaje de material que se queda como residuo de cada operación.

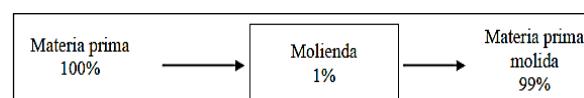


Figura 2. Rendimiento de la molienda

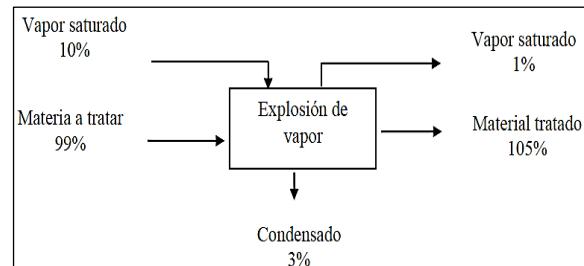


Figura 3. Balance de materia de la explosión de vapor

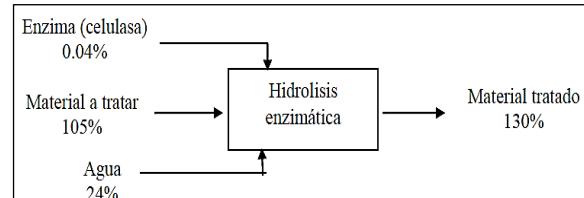


Figura 4. Balance de materia de hidrolisis enzimática

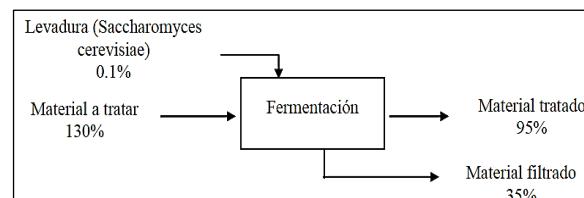


Figura 5. Balance de materia de la fermentación

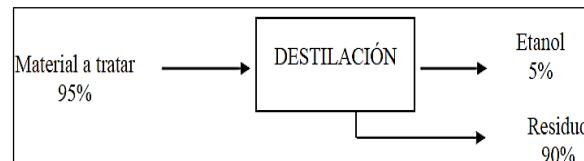


Figura 6. Balance de materia de hidrolisis destilación

Tabla 2. Balance de masa en porcentaje para el proceso de obtención de bioetanol

Operación	Insumos que ingresan %	Ingreso %	Residuo %	Salida %	Rendimiento de operación (%)	Rendimiento del proceso (%)
Molienda	0	100	1	99	99.00	99.00
Explosión de vapor	10	109	4	105	106.06	105.00
Hidrólisis enzimática	24	130	0	130	124.00	130.20
Fermentación	0.1	130	35	95	73.23	95.35
Destilación	0	18	90	5	5.61	5.35

Tabla 3. Balance de masa en kilogramos para la obtención de bioetanol

Operación	Insumos que ingresan (Kg)	Ingreso (Kg)	Residuo consumo (Kg)	Salida (Kg)	Rendimiento de operación (%)	Rendimiento del proceso (%)
Molienda	0	20	0.2	19.8	99.00	99.00
Explosión de vapor	2	19.8	0.8	21	106.06	105.00
Hidrólisis enzimática	5.04	21	0	26.04	124.00	130.20
Fermentación	0.03	26.04	7	19.07	73.23	95.35
Destilación	0	19.07	18	1.07	5.61	5.35

DISCUSIÓN

El análisis del balance de masa en la producción de bioetanol a partir de residuos de maíz, arroz y caña de azúcar reveló variaciones significativas en la eficiencia de conversión y los rendimientos obtenidos. En el caso del producto final obtenido, se observó un rendimiento promedio de bioetanol de 5.35 %. Sin embargo, a diferencia de Wang et al. (2024), quienes reportaron 12 % de rendimiento en la obtención de bioetanol de maíz, nuestros hallazgos revelan que el maíz, como materia prima única, produjo considerablemente más bioetanol que la combinación de arroz, maíz y azúcar que empleamos.

El análisis de balance de masa reveló pérdidas significativas de masa en etapas específicas del proceso. Por ejemplo, la pérdida del 1 % en la molienda, aunque aparentemente menor, subraya la importancia de considerar todas las corrientes, incluso las que podrían parecer insignificantes. En consonancia con los hallazgos de Bellido (2013), también, reportaron pérdidas de masa en la etapa de pretratamiento de bioetanol de maíz. Siguiendo las recomendaciones de Alonso et al. (2011), la identificación de las pérdidas en el balance es significativa, ya que señala oportunidades para la optimización de procesos y la reducción de la generación de residuos, tal como lo enfatizan.

Es importante destacar que el balance de masa también se vio influenciado por la cantidad de subproductos generados durante el proceso, como el bagazo. La gestión adecuada de estos subproductos ya sea para su aprovechamiento en otros procesos o para su tratamiento y disposición final, es crucial para mejorar la sostenibilidad y la viabilidad económica de la producción de bioetanol.

La metodología de balance de masa implementada en este trabajo permitió una cuantificación detallada de los flujos de materia a través de las distintas etapas del proceso de producción de bioetanol 2G a partir de cascarilla de arroz, rastrojo de maíz

y rastrojo de caña de azúcar. A diferencia de Faba et al. (2014), nuestro enfoque se centró en la medición precisa de la masa en cada corriente de entrada y salida, lo que posibilitó la identificación de pérdidas no evidentes en análisis basados únicamente en la medición de productos finales.

Casco et al. (2022), por su parte, mencionan que la combinación de métodos de pretratamientos maximiza el rendimiento de etanol a partir del bagazo de caña de azúcar.

CONCLUSIONES

El análisis exhaustivo de los balances de masa aplicado al proceso de producción de bioetanol de segunda generación a partir de residuos agroindustriales peruanos ha proporcionado información valiosa para la comprensión y optimización de esta vía de valorización. Se ha demostrado la viabilidad técnica de convertir estos subproductos en un biocombustible de alto valor añadido, aunque la eficiencia global del proceso está intrínsecamente ligada al rendimiento de cada etapa individual.

Los rendimientos obtenidos en cada proceso fueron altos como es el caso en la molienda de los residuos agroindustriales (caña de azúcar, cascarilla de arroz y chala de maíz) obtuvo un 99 % (de un peso de 20 kg de materia prima total), en la explosión de vapor un 105 % (esto debido a la adición de insumos adicionales para su operación correcta), en la hidrolisis enzimática un 130 % (del mismo modo con un adicional de insumos de 5.04 kg), la fermentación obtuvo un 95.35 % (adicionalmente se agregó 0.03 kg de insumos) y, finalmente, un 5.35 % en la destilación. En trabajos futuros, se podrían utilizar residuos agroindustriales producidos en la cierra específicamente en la región Huancavelica.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declararon que no existe conflicto de intereses con respecto al trabajo

realizado, autoría y/o publicación de este artículo científico.

REFERENCIAS

- Alonso, J., Domínguez, H., Garrote, G., González, M., Gullón, B., Moure, A., Santos, V., Vila, C., & Yáñez, R. (2011). Biorefinery processes for the integral valorization of agroindustrial and forestal wastes. *CyTA-Journal of Food*, 9(4):282-289.
- Alvarez, H. (2013). *Balances de materia y energía, formulación, solución y usos en Procesos Industriales*. Editorial ArtBox Medellín, Colombia.
- Basurto, R. (2019). *Balance de Materia y Energía*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.
- Bellido, C. (2013). *Obtención de Bioetanol 2G a partir de hidrolizados de paja de trigo. Fermentación conjunta de los penta y hexa carbohidratos con Pichia stipitis*. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid. Valladolid, España. Pp. 120.
- Casco-Méndez, Gladys María, Diéguez-Santana, Karel, Sarduy-Pereira, Liliana, Vinocunga-Pillajo, Reni Danilo, Pomavilla-Guaminga, Shirley Isamar, & Pérez-Martínez, Amaury. (2022). Diseño del proceso de obtención de bioetanol carburante mediante hidrólisis enzimática del bagazo de caña en pastaza. *Centro Azúcar*, 49(2), 35-46. Epub 01 de abril de 2022. <https://tinyurl.com/2pk47p9m>
- Castillo-Hernández, P., Mendoza-Domínguez, A., & Caballero-Mata, P. (2012). Análisis de las propiedades fisicoquímicas de gasolina y diesel mexicanos reformulados con Etanol. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 13(3), 293-306. <https://tinyurl.com/4feht7an>
- Díaz, C., & Herrera, F. (2016). *Producción de etanol combustible a partir de lignocelulosas*. Popayán, Colombia: Universidad del Cauca.
- Escalante, J., & Fuentes, H. (2013). *Estudio experimental de obtención de bioetanol a partir de residuos agrícolas de banano orgánico en Piura*. Piura: Universidad de Piura.
- Faba, L., Díaz, E., & Ordóñez, S. (2014). Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y bosques*, 20(3), 11-24. <https://tinyurl.com/4tsjwnx3>
- Gracida Rodríguez, J. N., & Pérez-Díaz, B. (2014). Factores previos involucrados en la producción de bioetanol, aspectos a considerar. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 30(2), 213-227. <https://tinyurl.com/3hed5d2a>
- Mercado-Mamani, S. L., & Collazos-Cabrera, J. A. (2022). Contexto del impacto ambiental generado por la agroindustria en el Perú. *Innova Biology Science: Revista Científica de Biología y Conservación*, 13-22(2). <https://tinyurl.com/2pyfd4n6>
- Cabezas-Oruna, J. (2017). Biocombustibles para el parque automotor de Lima Metropolitana y el Callao. *Paideia*, 4(5), 124-136. <https://doi.org/10.31381/paideia.v4i5.914>
- Prado-Martínez, M., Anzaldo-Hernández, J., Becerra-Aguilar, B., Palacios-Juárez, H., Vargas-Radillo, J. de J., & Rentería-Urquiza, M. (2012). Caracterización de hojas de mazorca de maíz y de bagazo de caña para la elaboración de una pulpa celulósica mixta. *Madera y bosques*, 18(3), 37-51. <https://tinyurl.com/mrykae2v>
- Resano, D., Guillen, O. W., Ubillús, F. D. R., & Barranzuela, J. L. (2022). Caracterización fisicoquímica del bagazo de caña de azúcar industrial y artesanal como material de construcción. *Información tecnológica*, 33(2), 247-258. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000200247>
- Wang, Y., Su, C., Mei, X., Jiang, Y., Wu, Y., Khalili, A., Amiri, H., Zhang, C., Cai, D., & Qin, P. (2024). Improved bioethanol production from corn stover using microwave-assisted protic ionic liquid pretreatment and an engineered S.

cerevisiae strain. *Biomass and Bioenergy*,
191, 107486.
<https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2024.107486>