Evaluación del Bioetanol como Alternativa a los Combustibles Fósiles Mediante el Aprovechamiento de Desechos Orgánicos

Heniel J. Hernández Meléndez[1], Mali J. Boria Antonsanti[1], Ariangelis Negrón Ortiz,PhD[1]
Universidad Politécnica de Puerto Rico, [1]Departamento de Ingeniería Química
Programa de Investigación Subgraduada para Estudiantes de Honor y Destacados (URP-HOS) 2025–2026

Resumen

La creciente dependencia de combustibles fósiles ha impulsado la búsqueda de alternativas renovables que permitan reducir residuos y recuperar el valor energético de la biomasa. En este estudio se evaluó la producción de bioetanol a partir de cáscara de piña y residuos del procesamiento del café mediante hidrólisis ácida, fermentación y destilación sencilla. Las materias primas fueron lavadas, secadas y trituradas, seguidas de hidrólisis con H_2SO_4 al 0.5%, neutralización con NaOH 2 M y ajuste de pH a 4.5–5.5. Posteriormente, las muestras fueron fermentadas con Saccharomyces cerevisiae durante 48–72 h y destiladas a un máximo de 80 ˚C. La conversión del almidón se evaluó mediante prueba de yodo, mientras que la concentración de alcohol se determinó con un densímetro Anton Paar DMA 35. Los productos destilados fueron caracterizados mediante FTIR y comparados con un estándar comercial de etanol. La piña alcanzó 3.8 % w/w de alcohol, mientras que el café obtuvo 2.4 % w/w. El análisis FTIR mostró grupos funcionales característicos de alcoholes y una mayor similitud de la muestra de piña con el estándar. Estos resultados respaldan el potencial de estos residuos como materias primas renovables para la producción de bioetanol y su valorización dentro de un modelo de economía circular.

Introducción

La dependencia de los combustibles fósiles ha incrementado significativamente las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), contribuyendo al cambio climático y otros desafíos ambientales. En respuesta, el bioetanol ha surgido como una alternativa renovable y sostenible que puede producirse a partir de residuos agrícolas lignocelulósicos mediante procesos bioquímicos. Entre las materias primas comunes se incluyen el bagazo de caña de azúcar, el rastrojo de maíz, las cáscaras de cacahuete, la pulpa de café y la cáscara de piña, que a menudo se desechan a pesar de su alto contenido en celulosa y hemicelulosa (Naik et al., 2010; Melendez, 2022). La conversión de estos residuos en bioetanol reduce los desechos y proporciona un combustible renovable con menores emisiones netas de gases de efecto invernadero (Bhatia et al., 2012; Sarkar et al., 2012) Además de su alto índice de octano, el bioetanol representa una opción viable para reducir la dependencia de los combustibles fósiles (Panahi et al.,2022).

Objetivo

El objetivo de este estudio fue producir bioetanol a partir de materias primas lignocelulósicas y residuos agroindustriales como estrategia para reducir las emisiones de dióxido de carbono y la contaminación ambiental. El estudio se centra en la caracterización y utilización de estos materiales, incluyendo los procesos de pretratamiento, hidrólisis y fermentación. Se evaluó el rendimiento de bioetanol para determinar la viabilidad técnica y ambiental del proceso de producción propuesto.

Metodología



Fig 1. Lavado de materia prima con agua destilada.



Fig 2. Secado de materia prima en horno de laboratorio a aproximadamente 140 °F.



Fig 3. Triturado de materia prima.

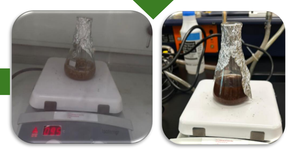


Fig 4. Hidrólisis ácida con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.5 M durante 1 h a 40 °C.



Fig 5. Neutralización de las muestras hidrolizadas hasta pH 5.0..



Fig 6. Centrifugación a 10,000 rpm durante 12 min.



Fig 7. Fermentación con levadura de pan (Saccharomyces cerevisiae).

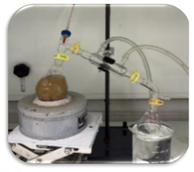


Fig 8. Destilación del líquido fermentado a 80 °C.



Fig 9. Obtención de etanol a partir de 200 mL de líquido fermentado.

Data



Fig. 10. Prueba de yodo para evaluar la presencia de almidón.



Fig. 11. Concentración de etanol en la muestra de café (2.4 % w/w).

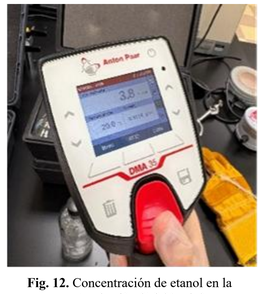


Fig. 12. Concentración de etanol en la muestra de piña (3.8 % w/w).

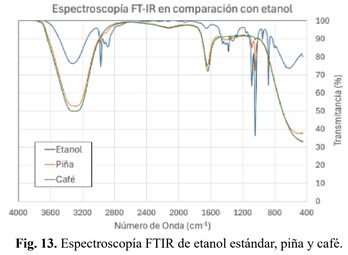


Fig. 13. Espectroscopía FTIR de etanol estándar, piña y café.

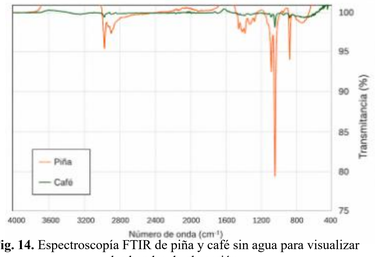


Fig. 14. Espectroscopía FTIR de piña y café sin agua para visualizar las bandas de absorción.

Análisis y Resultados

La producción de bioetanol se evaluó mediante pruebas de yodo, mediciones de alcohol y análisis FTIR. Tras la hidrólisis ácida, se realizó una prueba de yodo para verificar la conversión del almidón en azúcares fermentables; la ausencia de coloración azul-negra indicó una hidrólisis exitosa. Después de la fermentación, el densímetro Anton Paar DMA 35 registró un contenido de alcohol de 3.8 % p/p para la cáscara de piña y 2.4 % p/p para la muestra de café, evidenciando una mayor producción en la piña. En el análisis FTIR, los espectros presentaron una banda ancha de estiramiento O–H entre 3200–3400 cm^{-1}, asociada al agua y a los grupos hidroxilo. Tras reducir la contribución del agua, las bandas características del etanol se hicieron más distinguibles, especialmente en la región de huella dactilar.. La muestra de piña presentó mayor similitud espectral con el estándar de etanol que la muestra de café, respaldando los resultados obtenidos.

Conclusiones y Recomendaciones

Este estudio demostró la producción de bioetanol a partir de pulpa de café y cáscara de piña bajo condiciones de laboratorio. Los análisis FTIR y las mediciones con hidrómetro confirmaron la presencia de alcohol, siendo la cáscara de piña la materia prima con mayor producción de etanol. Se recomienda optimizar las condiciones de hidrólisis y fermentación, evaluando mayores concentraciones de ácido y diferentes tipos de levadura para aumentar el rendimiento. Además, se sugiere implementar procesos de destilación fraccionada para aumentar la cantidad de bioetanol obtenido, así como emplear métodos avanzados de evaluación para validar y mejorar los resultados.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Programa de Investigación para Estudiantes de Honor y Destacados (URPHOS) de la Universidad Politécnica de Puerto Rico por el apoyo brindado para la realización de esta investigación. Agradecemos a nuestra mentora de investigación, Prof. Ariangelís Ortíz Negrón, por su orientación y apoyo, y al Técnico de Laboratorio Ángel López Gutiérrez por su asistencia técnica durante los procedimientos experimentales.

Referencias

- Acevedo, M.-A., Peñaloza-Quintero, I., & Morales-Fonseca, D. (2021). Aprovechamiento de los polisacáridos de la pulpa de café residual para la obtención de bioetanol como estrategia hacia la bioeconomía. *Gestión y Ambiente, 24*(Supl. 3), 100–113. https://doi.org/10.15446/ga.v24nSupl3.99983
- Bušić, A., Mardetko, N., Kundas, S., Morzak, G., Belskaya, H., Ivančić Šantek, M., Komes, D., Novak, S., & Šantek, B. (2018). Bioethanol production from renewable raw materials and its separation and purification: A review. *Food Technology and Biotechnology, 56*(3), 289–311. https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5546
- Cavelius, P., Engelhart-Straub, S., Mehlmer, N., Lercher, J., Awad, D., & Brück, T. (2023). The potential of biofuels from first to fourth generation. *PLOS Biology, 21*(3), e3002063. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002063
- Nebo, U. C., Boboye, B. E., & Agbo, S. O. (2024). Molecular characterization and prospective economic value of yeasts isolated from different waste fruit peels. *Malaysian Journal of Microbiology, 20*(7), 657–668.
- Panahi, H. K. S., & colab. (2022). Bioethanol production from food wastes rich in carbohydrates. *Bioresource Technology Reports, 17*, Article 100960. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.100960
- Pérez, C., & Díaz, A. (2018). Obtención de bioetanol a partir de la cáscara de piña (*Ananas comosus*) usando *Saccharomyces cerevisiae*. *Revista de Investigación e Innovación en Ingeniería, 6*(1), 45–58. https://doi.org/10.29097/2011-639X.65
- Ramírez Quirós, Y., et al. (2020). Obtención de bioetanol a partir de residuos de fruta obtenidos de sitios urbanos. *Revista TEDIQ, 6*(6), 178–183.
- Shukla, A., Kumar, D., Girdhar, M., Kumar, A., Goyal, A., Malik, T., & Mohan, A. (2023). Strategies of pretreatment of feedstocks for optimized bioethanol production: Distinct and integrated approaches. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 16*(44), 1–33. https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2
- Naik, S., Goud, V. V., Rout, P. K., & Dalai, A. K. (2010). Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(2), 578–597. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.003.
- Melendez, J. R. (2022). Biotecnología y gerencia aplicada en la producción de bioetanol 1G y 2G. Revista de Ciencias Sociales (Ve), XXVIII(4), 415–429.
- Bhatia, L., Johri, S., & Ahmad, R. (2012). An economic and ecological perspective of ethanol production from renewable agro waste: A review. AMB Express, 2(1), 65. https://doi.org/10.1186/2191-0855-2-65
- Sarkar, N., Ghosh, S. K., Bannerjee, S., & Aikat, K. (2012). Bioethanol production from agricultural wastes: An overview. Renewable Energy, 37, 19–27