

# Hidrólisis enzimática de la cascarilla de café para su uso como sustrato en la producción de bioetanol

Elizabeth Varela Cano, Fabiola Sandoval Salas \*, Francisco Hernández Quinto y Carlos Méndez Carreto

Tecnológico Nacional de México/ITS Perote, Laboratorio de Investigación, Maestría en Planificación de Empresas y Desarrollo Regional, Veracruz, México.

\* Autor de correspondencia: [investiga.itspe@gmail.com](mailto:investiga.itspe@gmail.com)

## Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 19 de noviembre de 2024

Publicado: 26 de diciembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.221>

**Resumen:** En la búsqueda de alternativas que permitan reducir el uso de combustibles fósiles para satisfacer las necesidades del transporte y energía, se han realizado investigaciones sobre el uso de biocombustibles. Los materiales lignocelulósicos son una alternativa sustentable para la producción de bioetanol. La principal limitación del uso de estas materias primas es su dificultad para realizar la hidrólisis, por lo que es importante la evaluación de métodos. En este estudio se evalúa el uso de cascarilla de café como materia prima para la producción de bioetanol, así como el proceso de pretratamiento para la obtención de azúcares reductores que puedan ser empleados como sustrato. Para el desarrollo de esta investigación se aplicó la técnica de extracción de solubles, posteriormente un pretratamiento alcalino con NaOH y finalmente la hidrólisis enzimática con celulasas donde se emplearon valores de pH de 4, 5, 6 y 7, donde las concentraciones más altas de azúcares reductores se encontraron en las muestras con pH ácidos.

**Palabras clave:** Biocombustibles; Biomasa lignocelulósica; Residuos agroindustriales

## Introducción

En las últimas décadas, los residuos agroindustriales han sido objeto de numerosos estudios debido a que muchos de sus componentes pueden ser aprovechados como materia prima para la elaboración de productos de valor agregado (Mejías-Brizuela *et al.*, 2016) siguiendo los lineamientos de la economía circular al ser introducidos nuevamente al proceso productivo (Aguirre-Forero *et al.*, 2022).

Esta tendencia sigue siendo relevante hoy en día y se espera que continúe en el futuro, especialmente en el contexto de la producción de bioenergéticos y la prioridad de minimizar el impacto ambiental de estos residuos agroindustriales (Mejías-Brizuela *et al.*, 2016) pues es uno de los recursos orgánicos más abundantes a nivel mundial y constituye una fuente prometedora para la obtención de energía renovable (Espinosa-Negrín *et al.*, 2022) que al no ser aprovechada representa un grave problema de contaminación por los grandes volúmenes que se producen (Gutiérrez-Antonio *et al.*, 2020).

Esto es especialmente relevante en el sector agroalimentario, donde un manejo inadecuado de los residuos sólidos y subproductos pueden tener un impacto negativo en el equilibrio medioambiental (Aguar *et al.*, 2022). En este sentido, es fundamental implementar estrategias de gestión de residuos que promuevan la reducción, reutilización y reciclaje de los mismos, con el fin de minimizar su impacto ambiental y maximizar su valor económico. Una alternativa para otorgar valor agregado a los residuos orgánicos y fomentar la economía circular consiste en el aprovechamiento, en el cual, los residuos se convierten en materias primas, al eliminar el desperdicio de recursos y promoviendo el reciclaje y reutilización de los mismos (Matiacevich *et al.*, 2023).

Por otro lado, la dependencia de la civilización moderna hacia los combustibles derivados del petróleo para la movilidad global y el sostenimiento de muchas actividades económicas esenciales ha sido un problema durante varios años debido a la generación de gases de efecto invernadero que perjudican el medio ambiente y contribuyen al calentamiento global. Estos efectos ambientales negativos resaltan la necesidad urgente de encontrar alternativas sostenibles a los combustibles fósiles para el sector del transporte. Actualmente, en varios países se han aprobado normativas para el uso de biocombustibles para satisfacer las necesidades de transporte. En 2025, se espera que los biocombustibles proporcionen aproximadamente el 5.4% de los requerimientos energéticos para el transporte por carretera (Khan *et al.*, 2021).

El aumento de la participación del bioetanol como combustible para el transporte surge como una solución a corto plazo porque su tecnología de producción está madura y se puede mezclar con gasolina. Considerando el período 2008-2018, el uso de etanol (principalmente de primera generación) contribuyó a la reducción de aproximadamente 500 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>-eq y contribuirá con otros 160 mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq hasta 2030 (99% de etanol de primera generación) (Sydney *et al.*, 2019). Sin embargo, los cultivos utilizados para la producción de bioetanol son principalmente cultivos alimentarios, como el maíz, la caña de azúcar y la remolacha, por lo tanto, su producción afecta la seguridad alimentaria debido al aumento de su demanda, lo que incrementa sus costos y afecta la economía de diversas regiones por lo que ya existen restricciones legales (Cantarella *et al.*, 2023). Los biocombustibles de segunda generación surgen como una mejor alternativa de producción pues estos no compiten con cultivos alimentarios, pueden reducir significativamente la producción de CO<sub>2</sub> y en algunos casos ofrecen un mejor rendimiento del motor (Alejandro y Camposano, 2021) además de que la materia prima se obtiene materiales lignocelulósicos que provienen de residuos agroindustriales. De esta manera, la gestión de estrategias para producir energía renovable mediante biorrefinerías, ayuda a preservar el medio ambiente, también mejora la salud humana (Peña y López, 2020), beneficia cadenas de suministros e impacta de manera positiva en la economía (Maffia *et al.*, 2024).

Dentro de los residuos agroindustriales que pueden ser empleados en la producción de biocombustibles se encuentra la cascarilla de café. El pergamino de café o cascarilla es la parte que envuelve el grano inmediatamente después de la capa mucilaginosa y representa alrededor de 12 % del grano de café en base seca. Esta cascarilla constituye una excelente fuente de celulosa, lignina, pentosanos, sílice y cenizas, así como otros compuestos en menor proporción (Manals *et al.*, 2018). Actualmente México participa en el mercado cafetalero con el 1.5 por ciento del volumen de las exportaciones mundiales (CEDRSSA, 2018), con una producción para el año 2021 de 947.0 mil toneladas según datos del SIAP, lo cual, representa una producción de 57.7 mil toneladas de cascarilla.

El uso de este residuo agroindustrial para la producción de bioetanol representa una alternativa de aprovechamiento rentable al ser un producto no alimentario, abundante y de bajo costo, además de que se ajusta a la estrategia de economía circular y planes de cero residuos (Broda *et al.*, 2022), pues la producción de bioetanol 2G a partir de desechos agrícolas, se caracteriza por la tendencia a maximizar el retorno de la inversión, ya que su enfoque permite satisfacer la demanda energética de manera sostenible, económicamente viable y ambientalmente segura. Sin embargo, uno de los mayores retos que presenta es la aplicación de pretratamientos que permitan el acceso a los azúcares fermentables que pueden ser transformados en bioetanol (Melendez, 2022) ya que la viabilidad de los proyectos de biocombustibles avanzados depende de tecnologías rentables y de la disponibilidad de grandes volúmenes de materia prima a precios bajos (Cantarella *et al.*, 2023).

## Desarrollo

### *Materiales y Métodos*

#### *Materia Prima*

Para los experimentos se empleó cascarilla de café proveniente del proceso de trillado de café pergamino proporcionada por una empresa de la región, la cual fue almacenada en recipientes de plástico a temperatura ambiente.

#### *Caracterización de la biomasa*

Para la caracterización de la biomasa (cascarilla de café) se empleó la metodología descrita por Álvarez *et al.* (2013) con algunas modificaciones para determinación de celulosa (TAPPTI212), holocelulosa (ASTM D-1104), lignina (NREL/TP- 510-42618) y extraíbles Soxhlet – Norma (NMX-F-615).

#### *Extracción de ceras*

Se realizó la extracción de ceras y material soluble utilizando modificaciones a la metodología descrita por Gavrilla *et al.* (2024). Las muestras de 100 g de cascarilla se mezclaron con 100 mL de agua destilada y 300 mL de etanol y se

extrajeron a reflujo durante 5 h a temperatura de ebullición, posteriormente se repitió la extracción usando solo agua durante 5 h más.

#### *Pretratamiento alcalino asistido por ultrasonido*

Se sometieron 100 g de cascarilla a pretratamiento alcalino con ultrasonido en un equipo Coler Palmer con baño de ultrasonido con una potencia de 120 W y una frecuencia de 40 kHz a una proporción 1:10 de muestra y solución de NaOH 1 N a temperatura de 50 °C. El tiempo del pretratamiento fue de 6 h. La cascarilla pretratada se filtró y se lavó dos veces con agua destilada para eliminar residuos de la solución alcalina. Finalmente, se secó a 60 °C hasta llegar a peso constante y se almacenó para su posterior uso en la hidrólisis enzimática. Todas las pruebas se realizaron por duplicado.

#### *Hidrólisis enzimática*

La cascarilla de café pretratada se trituró en una licuadora para reducir el tamaño de la partícula. Para la hidrólisis enzimática se usó un reactor de vidrio enchaquetado de 500 mL con control de temperatura y agitación automática (Marca SEV AMD-02). Como catalizador se utilizó la enzima celulasa (Cellulase 10X, ENZQUIM). Para la hidrólisis muestras de 10 g se suspendieron en 100 mL de buffer de citratos y buffer de fosfato de potasio a tres diferentes pH (4, 5 y 6) y se incubaron a 45 °C durante 3 h con agitación de 150 rpm. Se tomaron muestras en intervalos de 10 minutos los primeros 40 minutos y en intervalos de 20 minutos hasta completar 3 h. La actividad enzimática se detuvo sometiendo las muestras a un baño de hielo.

#### *Cuantificación de glucosa*

La cuantificación de glucosa liberada al medio se determinó por lectura en un espectrofotómetro a 505 nm (JENWAY 6305) después de la reacción con glucosa oxidasa peroxidasa GOD-GOP (kit enzimático TrinderR). Previamente se construyó una curva de calibración para correlacionar la concentración usando un estándar de glucosa (SPINREACT 1002400).

#### *Resultados y Discusión*

##### *Caracterización de la biomasa*

En la Tabla 1 se presentan los resultados de la caracterización de la cascarilla de café, donde se evidencian porcentajes significativos de lignina (30%) y celulosa (39%). Estos valores son relevantes, ya que la celulosa en la cascarilla de café supera el contenido reportado por Palomar *et al.* (2019) en la paja de trigo con un porcentaje de 34.76%. Este hallazgo sugiere que la cascarilla de café podría ser una fuente prometedora para la producción de bioetanol, dado su mayor contenido de celulosa, que es fundamental para la producción de azúcares fermentables. Por otro lado, el contenido de lignina en la cascarilla de café es considerablemente más alto (30%) que el reportado en la paja de trigo (14.85%). Sin embargo, el equilibrio entre la lignina y la celulosa en la cascarilla de café indica que, a pesar de su alta lignificación, el material sigue siendo viable para procesos de conversión en bioetanol siempre y cuando se apliquen métodos de pretratamiento adecuados.

Tabla 1. Caracterización de la biomasa (cascarilla de café).

	%(p/p)
<b>Celulosa</b>	39%
<b>Hemicelulosa</b>	20%
<b>Holocelulosa</b>	59%
<b>Lignina</b>	30%
<b>Extraíbles</b>	13%

##### *Extracción de ceras*

De las muestras de cascarilla de café sometidas a extracción se obtuvo como resultado un  $13.5 \pm 0.707$  % de ceras y material extraíble, lo que indica la alta eficiencia del proceso pues este resultado coincide con el contenido de extraíbles

reportado en la primera etapa de caracterización de la cascarilla. Este resultado tiene relevancia pues evita reacciones químicas y productos indeseables en los procesos posteriores según lo reportado por Aguilar-Rivera (2004).

### Pretratamiento alcalino asistido por ultrasonido

El pretratamiento alcalino degradó el contenido de lignina en un porcentaje de  $21.27 \pm 2.42\%$ , considerando el contenido de lignina presente en la cascarilla descrito en la Tabla 1, representa más del 75%. Según Gavrilla *et al.* (2024), uno de los principales retos en la hidrólisis de materiales lignocelulósicos es la ruptura de la lignina para poder acceder a la celulosa, pues al ser la lignina un compuesto fenólico complejo dificulta la conversión de la biomasa y genera un rendimiento bajo de azúcar. De ahí la importancia de aplicar técnicas que permitan aumentar la disponibilidad de celulosa, pues se ha demostrado que una deslignificación de la biomasa reduce las barreras físicas y químicas, e incrementa la accesibilidad de la celulosa (Espinosa-Negrín *et al.*, 2022).



Figura 1. Reactor de vidrio enchaquetado con control de temperatura y agitación.

### Hidrólisis enzimática

El uso del reactor enchaquetado, equipado con sistema de control de temperatura y agitación automática, ha demostrado eficiencia en el proceso de hidrólisis de cascarilla de café pretratada. Este tipo de reactor está diseñado para mantener condiciones controladas y estables durante la reacción química, lo que permite una mayor precisión y eficiencia en el proceso de hidrólisis, pues en esta etapa se logró hasta un 20% de materia hidrolizada.

### Cuantificación de glucosa

La curva de calibración GOD-GOP arrojó un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.9997$  cuya ecuación fue  $y = 0.1089x + 0.001$

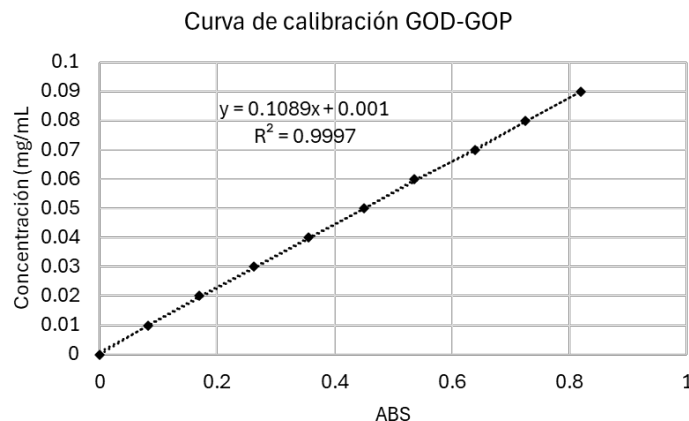


Figura 2. Curva de calibración obtenida mediante la técnica GOD-GOP.

En la Figura 3 se presentan los resultados del efecto del pH en la hidrólisis enzimática donde podemos observar las mayores concentraciones de glucosa en las muestras hidrolizadas en un rango de pH de 4-5, la mayor concentración obtenida fue de 504 mg/L a un pH 5, sin embargo, no representa una diferencia significativa en comparación con las concentraciones obtenidas a un pH 4. Las concentraciones de glucosa más bajas fueron obtenidas a un pH 7, las cuales no sobrepasaron valores mayores a 100 mg/L. En el caso del pH 6, aunque los valores superaron los 200 mg/L, los rendimientos son bajos en comparación con los obtenidos a un pH 4 y 5. Además, la tendencia ascendente en la gráfica para todas las muestras indica que un mayor tiempo de hidrólisis puede aumentar las concentraciones de glucosa lo que representa un parámetro para estudios posteriores. El comportamiento de la actividad enzimática descrita en la gráfica coincide con lo reportado por Ayala-Armijos *et al.* (2020) donde menciona que, al disminuir el valor del pH en el medio se obtienen mejores condiciones de hidrólisis. Estos resultados son importantes pues de esta manera se

definen las condiciones óptimas de pH necesarias para obtener un mayor rendimiento de glucosa durante la hidrólisis enzimática de la cascarilla de café.

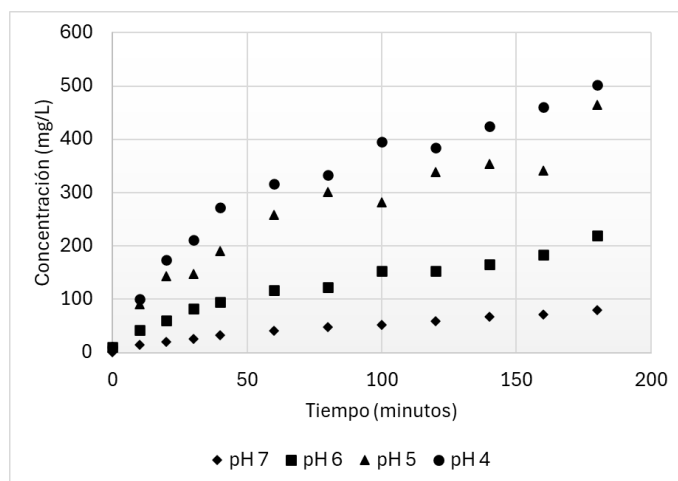


Figura 3. Efecto del pH en la hidrólisis enzimática de muestras de cascarilla de café pretratada.

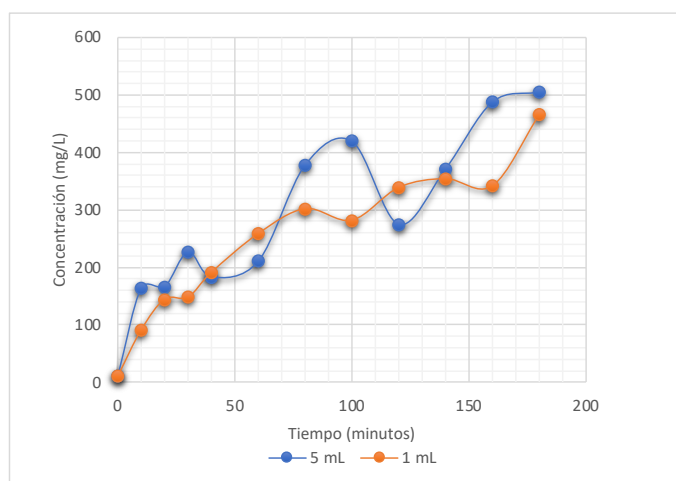


Figura 4. Efecto de la dosis de enzima en la producción de glucosa en muestras de cascarilla de café pretratada.

El impacto de la variación en la dosis de enzima sobre la hidrólisis enzimática de residuos lignocelulósicos fue evaluado y se observó que la modificación en las concentraciones enzimáticas produjo un incremento en las concentraciones de glucosa liberada de 40.29 mg/L. Este incremento no refleja una mejora sustancial en el rendimiento del proceso de hidrólisis enzimática, como se evidencia en la Figura 4, pues demuestra que las concentraciones de glucosa obtenidas bajo diferentes dosis de enzima siguen un patrón de comportamiento muy similar, indicando que la variación en la dosis no genera una diferencia significativa en la actividad enzimática. Según lo reportado por Rohrbach y Luterbacher (2021), menciona que el aumento en la carga enzimática no proporciona beneficios significativos en términos de eficiencia de hidrólisis. La optimización de la hidrólisis parece beneficiarse de una menor carga enzimática, lo cual facilita una mejor difusión de los reactivos y una mayor eficiencia en la conversión enzimática. Estos resultados sugieren que un enfoque más equilibrado en la dosificación de enzimas puede ser preferible para maximizar la eficiencia del proceso, pues el aumento en la dosis de enzima no aumenta las concentraciones de glucosa obtenida.

Tabla 2. Comportamiento de la velocidad enzimática inicial a diferentes valores de pH.

pH	Velocidad (mg/L•min)	Concentración máxima de glucosa (mg/L)	Tiempo para alcanzar la concentración máxima de glucosa (min)
4	6.345	502	180
5	3.818	504	180
6	2.113	230	180
7	0.645	80	180

En la Tabla 2, se muestran las concentraciones finales de las muestras de cascarilla de café hidrolizada con enzima celulasa donde los mejores rendimientos de glucosa se obtuvieron en los experimentos a pH 4 y 5 los cuales alcanzaron alrededor de 500 mg/L. Sin embargo, los resultados muestran una mejor velocidad inicial a pH 4 alcanzando hasta 6.345 mg/L•min, comparado con la velocidad inicial a pH 5 con una diferencia de aproximadamente 2.5 mg/L. Los valores no presentan diferencias significativas en comparación con lo reportado por Alejandro y Camposano (2021) en su trabajo enfocado a la evaluación del efecto del pH en residuos sólidos orgánicos de cocina, donde obtuvo concentraciones de azúcares reductores de 1.7 – 2.07 g/L.

Considerando que cada litro de sustrato contiene 100 g de cascarilla de café en base seca, obtenemos un rendimiento de glucosa 0.5 g/100 g de cascarilla, valor estimado de glucosa disponible para la etapa de fermentación. Por lo tanto, en la etapa de fermentación suponiendo una eficiencia del 100% donde por cada molécula de glucosa se obtiene 2

moléculas de etanol, el rendimiento teórico del etanol es de 0.511 g de etanol por cada gramo de glucosa (valor derivado de sus masas molares), lo que significa que, a partir de la cascarilla de café podemos obtener un rendimiento de bioetanol de aproximadamente 0.25 g/ 100 g de cascarilla, lo que sugiere que, por cada tonelada de cascarilla se estima una producción de 2500 g de bioetanol. Aunque estos valores estimados están basados en una eficiencia del 100 %, es importante destacar que los valores pueden estar sujetos a variaciones debido a factores como la eficiencia en la hidrólisis de la biomasa y otras condiciones operativas del proceso, sin embargo, estos datos nos proporcionan una aproximación del potencial de la cascarilla de café como sustrato para la producción de bioetanol.

## Conclusiones

Se demostró que el contenido de celulosa presente en la cascarilla de café favorece la conversión de este polímero en azúcares fermentables para la producción de bioetanol.

La reducción de lignina por el método alcalino asistido con ultrasonido facilitó la degradación de la celulosa, incrementando la disponibilidad de celulosa y mejorando la eficiencia de la hidrólisis enzimática.

Las concentraciones óptimas de glucosa se lograron en un rango de pH entre 4 y 5, con la mayor concentración alcanzada a pH 5 (504 mg/L) aunque se obtuvo una mayor velocidad inicial a un pH 4. De esta manera se comprobó que valores de pH ácidos favorecen la actividad enzimática, permitiendo una mayor liberación de glucosa durante la hidrólisis.

El aumento en la proporción de la dosis de enzima y sustrato no produjo un aumento significativo en la concentración de glucosa, lo que sugiere que la carga enzimática adicional no mejora sustancialmente la eficiencia del proceso de hidrólisis, lo que indican que un equilibrio adecuado en la dosis de enzima puede ser más beneficioso, ya que una carga enzimática excesiva no necesariamente incrementa la eficiencia.

Se espera que la continuidad de esta investigación contribuya al aumento de producción estimada de glucosa y en la conversión de biomasa en biocombustible.

## Bibliografía

- Aguiar S., Enríquez Estrella M., & Uvidia Cabadiana H. (2022). Residuos agroindustriales: su impacto, manejo y aprovechamiento. *AXIOMA*, 1(27), 5-11. <https://doi.org/10.26621/ra.v1i27.803>.
- Aguiar-Rivera, N. (2004). Importancia, manejo y control de extraíbles e incrustaciones (pitch) en la fabricación de papel. *Madera y Bosques*, 10(1), 89-99.
- Aguirre-Forero, S. E., Piraneque-Gambasica, N. V., & Cabarcas-Saumeth, D. E. (2022). Compost de cáscara de naranja: una alternativa de aprovechamiento y ciclaje de materia orgánica en la Región Caribe de Colombia. *Entramado*, 18(1), e8063. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/entramado.1.8063>.
- Alejandro S. J. L. Y Camposano R. Y. (2021). Efecto del pH, temperatura y celulosa en la obtención de glucosa por hidrólisis enzimática de residuos sólidos orgánicos pre tratados. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Nacional del Centro Del Perú.
- Álvarez, R. A., Pizarro, G. C. y Folgueras, D. M. B. (2013). Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico. Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.
- Ayala-Armijos, J., Machuca-Loja, G., Benítez-Castrillón, P., & Alvarado-Cáceres, J. (2020). Hidrólisis enzimática de polvillo de arroz para la producción de etanol de segunda generación. *Revista Ciencia Unemi*, 13(32), 41-50.
- Broda, M., Yelle, D. J., Serwańska, K. 2022. Bioethanol Production from Lignocellulosic Biomass-Challenges and Solutions. *Molecules*, 27(24):8717. <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>.
- Cantarella, H., Leal Silva, J. F., Nogueira, L. A. H., Maciel Filho, R., Rossetto, R., Ekbo, T., ... & Mueller-Langer, F. (2023). Biofuel technologies: Lessons learned and pathways to decarbonization. *GCB Bioenergy*, 15(10), 1190-1203. <https://doi.org/10.1111/gcbb.13091>.
- CEDRSSA. Centro de estudios para el desarrollo rural sustentable y la soberanía alimentaria. 2018. *El café en México Diagnóstico y Perspectiva*. Palacio Legislativo de San Lázaro.
- Espinosa-Negrín, Ana María, López-González, Lisbet Mailin & Casdelo-Gutiérrez, Neybis Lourdes. (2022). Pretratamientos aplicados a biomasa lignocelulósicas: una revisión de los principales métodos analíticos utilizados para su evaluación. *Revista Cubana de Química*, 34(1), 87-110.
- Gavrila, A. I., Vartolomei, A., Calinescu, I., Vinatoru, M., Parvulescu, O. C., Psenovschi, G., Chipurici, P., Trifan, A. (2024). Pretratamiento alcalino de biomasa asistido por ultrasonido para mejorar el rendimiento de extracción de sustancias químicas valiosas. 14, 903. <https://doi.org/10.3390/agronomía14050903>.
- González, D. E., Ortiz, J. E., Mejía, Y., García-Alzate, L. S., & Cifuentes-Wchima, X. (2020). Evaluación de la biomasa residual (cereza) de café como sustrato para el cultivo del hongo comestible *Pleurotus ostreatus*. *Revista ION*, 33(1), 93-102. <https://doi.org/10.18273/revion.v33n1-2020009>.

- Gutiérrez-Antonio, C., De Lira-Flores, J. A., Quiroz-Pérez, E., & Martínez-Guido, S. I. (2020). Conversión de residuos agroindustriales para la generación de biocombustibles, productos de valor agregado y bioenergía. *Digital Ciencia@ UAQRO*, 13(1), 27-35. <https://revistas.uaq.mx/index.php/ciencia/article/view/41>.
- Khan, N.; Sudhakar, K.; Mamat, R. (2021). Role of Biofuels in Energy Transition, Green Economy and Carbon Neutrality. *Sustainability*, 13, 12374. <https://doi.org/10.3390/su132212374>.
- Maffia, A.; Marra, F.; Celano, G.; Oliva, M.; Mallamaci, C.; Hussain, M.I.; Muscolo, A. (2024). Exploring the Potential and Obstacles of AgroIndustrial Waste-Based Fertilizers. *Land*, 13, 1166. <https://doi.org/10.3390/land13081166>.
- Manals-Cutiño, E. M., Salas-Tort, D., & Penedo-Medina, M. (2018). Caracterización de la biomasa vegetal cascarilla de café. *Tecnología química*, 38(1), 169-181. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852018000100013&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852018000100013&lng=es&nrm=iso).
- Matiacevich, S., Soto Madrid, D., & Gutiérrez Cutiño, M. (2023). Economía circular: obtención y encapsulación de compuestos polifenólicos provenientes de residuos agroindustriales. *RIVAR (Santiago)*, 10(28), 77-100. <https://doi.org/10.35588/rivar.v10i28.5343>.
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillén, E., & Galán-Hernández, N. (2016). Aprovechamiento de los residuos agroindustriales y su contribución al desarrollo sostenible de México. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27-41.
- Melendez, J. R. (2022). Biotecnología y gerencia aplicada en la producción de bioetanol 1G y 2G. *Revista de ciencias sociales*, 28(4), 415-429.
- Murillo, S. E. P., & Galán, J. E. L. (2020). Desarrollo sostenible y oportunidad de aprendizaje de las biorrefinerías: Una alternativa de la biomasa. *Revista de ciencias sociales*, 26(2), 401-413.
- Rohrbach, J. C., & Luterbacher, J. S. (2021). Investigating the effects of substrate morphology and experimental conditions on the enzymatic hydrolysis of lignocellulosic biomass through modeling. *Biotechnology for Biofuels*, 14(1), 103. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-01920-2>.
- Sydney, E., Letti, L., Karp, S., Sydney, A., Vandenberghe, L., De Carvalho, J., Woiciechowski, A., Medeiros, A., Thomaz-Soccol, V., Soccol, Carlos. (2019). Current analysis and future perspective of reduction in worldwide greenhouse gases emissions by using first and second-generation bioethanol in the transportation sector. *Bioresource Technology Reports*. 7. 100234. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100234>.