



**Pretratamiento de Desechos Bananeros para Maximizar la Disponibilidad de Azúcares  
Fermentables en la producción de Bioetanol**

Avendaño, Tomas; Cuadrado, Nicolas; Pérez, Manuel; Vega, Valeria  
Ingeniería Biotecnológica, Universidad EIA

**Resumen:** Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un proceso de pretratamiento con microorganismos a los residuos de la industria bananera como materia prima de la producción de bioetanol para maximizar la disponibilidad de azúcares fermentables. Se implementó un enfoque experimental utilizando un biorreactor, evaluando variables como temperatura, pH y tiempo de reacción. Los resultados preliminares mostraron limitaciones en la cuantificación de azúcares debido a complicaciones en el diseño experimental y disponibilidad de microorganismos. A pesar de esto, se identificaron áreas clave para mejorar el proceso y se destacó la necesidad de estandarizar métodos para evaluar la eficacia de los consorcios microbianos. Las conclusiones sugieren que, aunque no se lograron resultados concluyentes, el proyecto abre caminos para futuras investigaciones en la optimización del uso de residuos bananeros en la producción de bioetanol.

## 1. Introducción

La industria bananera genera una cantidad significativa de residuos, como cáscaras, pseudotallos, hojas y frutos no comercializables, con altos contenidos lignocelulósicos, los cuales representan un desafío ambiental. En Colombia, esta problemática es muy relevante en regiones como Urabá y los Llanos Orientales, donde el banano es uno de los principales productos agrícolas, y sus desechos son subutilizados y mal gestionados, desperdiciando una materia prima con alto potencial económico y ambiental.

En este orden de ideas, la transformación de residuos bananeros en bioetanol es una alternativa para abordar tanto la gestión de desechos como la transición hacia fuentes de energía renovables. Este proyecto se centra en el diseño y evaluación de un proceso de pretratamiento biológico, basado en la acción combinada de microorganismos bacterianos y fúngicos, para maximizar la disponibilidad de azúcares fermentables. Con un enfoque experimental y el uso de un biorreactor, se busca optimizar parámetros operativos como temperatura, pH y tiempo de reacción.

## 2. Objetivos

Desarrollar un proceso innovador de pretratamiento de desechos orgánicos de la industria bananera para incrementar la

disponibilidad de azúcares fermentables en la producción de bioetanol, con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso y mejorar su viabilidad comercial.

### 2.1. Objetivos específicos:

- ✓ Evaluar con ayuda de la literatura científica la viabilidad técnica y potencial de optimización de los métodos de pretratamiento biológicos empleados en la producción de bioetanol.
- ✓ Detectar rango de operación en temperatura, pH, concentración enzimática y tiempo de reacción en la disponibilidad de azúcares fermentables después de la aplicación de los procesos de pretratamiento biológico basados en microorganismos bacterianos y fúngicos.
- ✓ Cuantificar la cantidad de azúcares fermentables obtenidos tras el pretratamiento biológico mediante la aplicación de métodos analíticos, como la cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) o el ensayo de DNS, para evaluar la eficiencia del proceso y optimizar la liberación de azúcares.

## 3. Planteamiento del problema.

La industria bananera genera 114 millones de toneladas métricas de residuos (Guerrero et al.). Entre los subproductos de desecho se encuentran cáscaras, hojas,

inflorescencia, vástago y banano de descarte, algunos de estos desechos se utilizan en abono o se queman (Shukla et al. 2023) y en su proceso de descomposición, producen altos niveles de CO<sub>2</sub> y de CH<sub>4</sub>; gases altamente contaminantes que contribuyen al calentamiento global y de los cuales el sector agrícola es responsable de su emisión en un 30% (International Atomic Energy Agency, 2023).

En Colombia, la industria bananera tiene un impacto significativo, especialmente en la región de Urabá, donde se cultivan grandes cantidades de banano y plátano, en el Informe de Gestión 2023 Augura (Asociación de Bananeros de Colombia) se menciona que los desechos se disponen adecuadamente de forma sostenible, pero la información disponible sobre los procesos reales implementados es escasa. Esta falta de transparencia sugiere que dichas prácticas podrían no ser tan efectivas como se presenta públicamente, lo que plantea la posibilidad de que parte de los residuos esté siendo gestionada de manera inadecuada, sin embargo, estos residuos tienen usos en la industria textil, o uno aún más prometedor: la producción de bioetanol a partir de estos desechos.

La mayoría de las plantas de producción bioetanol en Colombia, como INCAUCA, utilizan la caña de azúcar como materia prima. En este contexto los desechos del banano son un producto potencial ya que esta biomasa lignocelulósica que se genera en esta industria es muy abundante y económica (Gupta et al., 2024). De hecho, paradójicamente aunque en Colombia se produzca anualmente casi la misma cantidad de banano que de caña de azúcar (2,07M de toneladas y 2,09M de toneladas) (Asocaña, 2022; Dirección de cadenas agrícolas y forestales, 2020), la caña de azúcar que hasta 2015 cubría un 75% de la demanda nacional de etanol (Delgado et al., 2015), sigue siendo

la materia prima predilecta. Sin embargo esta presenta un problema muy importante, y es que las plantas productoras de etanol destinan miles de hectáreas (40.742) aproximadamente que se pueden aprovechar de otras maneras, mientras tanto la industria bananera produce 250 mil toneladas por año de fruta no exportada y unos 75 millones de vástagos apilados en los campos sin ningún tipo de tratamiento (Ibarra & Márquez, 2022), que puede ser aprovechado para la producción el biocombustible, y el pretratamiento biológico adecuado puede mejorar su accesibilidad enzimática y optimizar el proceso de sacarificación, incrementando la disponibilidad de azúcares fermentables.

#### 4. Justificación.

En la industria bananera de Colombia, se generan aproximadamente dos toneladas de residuos por cada tonelada de banano producida (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2021). Estos residuos, que incluyen cáscaras, hojas, pseudotallos y frutos no comercializables, representan una fuente abundante y subutilizada de materia orgánica, lo que constituye un desafío ambiental y una oportunidad comercial. Para aprovechar los residuos agroindustriales, se han establecido algunas plantas de bioetanol que utilizan principalmente caña de azúcar, pero pueden beneficiarse de los desechos bananeros.

Desde el punto de vista técnico, este proyecto se enfoca en el desarrollo de un proceso innovador de pretratamiento biológico de los residuos bananeros para maximizar la disponibilidad de azúcares fermentables. Entre los microorganismos bacterianos que se pueden utilizar en el pretratamiento se encuentran *Bacillus subtilis* y *Clostridium thermocellum*, conocidos por su capacidad de degradar celulosa y hemicelulosa. Estos microorganismos pueden combinarse con

hongos ligninolíticos como *Trametes versicolor* y *Phanerochaete chrysosporium*, que ayudan en la descomposición de la lignina, facilitando el acceso a los azúcares presentes en la biomasa. La mezcla estratégica de bacterias y hongos permitirá mejorar la eficiencia en la liberación de azúcares fermentables, optimizando así el rendimiento del bioetanol.

El proyecto está alineado con seis Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS); los objetivos ( 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13) Energía asequible y no contaminante; Trabajo decente y crecimiento económico; Industria, Innovación en infraestructura; Reducción de las desigualdades; Ciudades y comunidades sostenibles; producción y consumo responsable & acción por el clima, que están incluidos en la agenda para 2050 donde se plantean algunos objetivos a los que este proyecto puede contribuir (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022) contribuyendo no solo al desarrollo ambiental sino también social, reduciendo la brecha entre regiones como el Urabá donde el 48 % de la población en condiciones de pobreza (*Línea de Pobreza Por Ingresos - LPVF*, n.d.) y el 12,8% de la población está desempleada (*Tasa de Desempleo VF*, n.d.). Con la creación de nuevas plantas

incentivada por la optimización, rentabilidad y sostenibilidad de estos procesos, habrá un desarrollo en la infraestructura del sector ya que se convertirá en un sitio de interés ambiental, político y económico y se generará mayor inversión de presupuesto.

## Montaje del Prototipo

Se formularon una matriz morfológica (Detallada en la Figura 1) y una matriz de selección, las cuales se presentan en la Tabla 1, respectivamente. A partir de la información analizada con estos métodos, se definieron las condiciones óptimas para el consorcio microbiano, que también fue escogido con ayuda de las matrices, La selección de las matrices fue: *Bacillus Subtilis* + *Orpinomyces sp*, 45 °C, Condiciones Anaerobias pH de 5.8 y para evaluar la eficiencia de estas condiciones seleccionadas, se diseñó un biorreactor en continuo que pretendía controlar dichas variables claves elegidas. A continuación en la Tabla 2, se describe el diseño conceptual inicial (Figura 2) y las alternativas implementadas, las cuales se eligieron principalmente debido a las restricciones de tiempo.

Tabla 1: Matriz morfológica y de selección

Microorganismo	Achlya Bisexualis	Bacillus macerans	Rizhopus chinensis	Bacillus subtilis	Orpinomyces sp.
pH	6	6	5.5	5 to 7	5.8
Temperatura	45	45	45	45	45
Acción enzimática	7840	5030	4800	514	3659
Aireación	Aerobio	Facultativo	Aerobio	Facultativo	Anaerobio
Patogenicidad	Produce Saprolegnia en peces y especies acuáticas	No patogenica	Mucormicosis en personas inmunosuprimidas	No patogenica	No patogenico (simbiotico en rumiantes)
Ambiente	Acuatico	Terrestre	Terrestre	Terrestre	Indiferente
Tiempo	Lento	Rápido	Lento	Rápido	Lento

Consorcio	Bacillus macerans → Orpinomyces sp.	Bacillus macerans → Achlya bisexualis	Bacillus subtilis → Achlya bisexualis	Bacillus subtilis → Orpinomyces sp.	Bacillus subtilis → Rhizopus chinensis
Afinidad organismos					
A.E. del consorcio					
Patogenica	No patogenica	Saprolegnia	Saprolegnia	No patogénica	Murcomicosis
Conversión					
Selectividad					
Rendimiento					
Tiempo de Proceso					
Costos de Implementación					
Sostenibilidad Ambiental					
Facilidad de Escalabilidad					

Compatibilidad	Consorcios
No Compatibles	Bacillus macerans → Rhizopus chinensis
Compatibilidad Reducida	Bacillus macerans → Orpinomyces sp.
	Bacillus macerans → Achlya bisexualis
	Bacillus subtilis → Achlya bisexualis
Compatibilidad Alta	Bacillus subtilis → Orpinomyces sp.
	Bacillus subtilis → Rhizopus chinensis

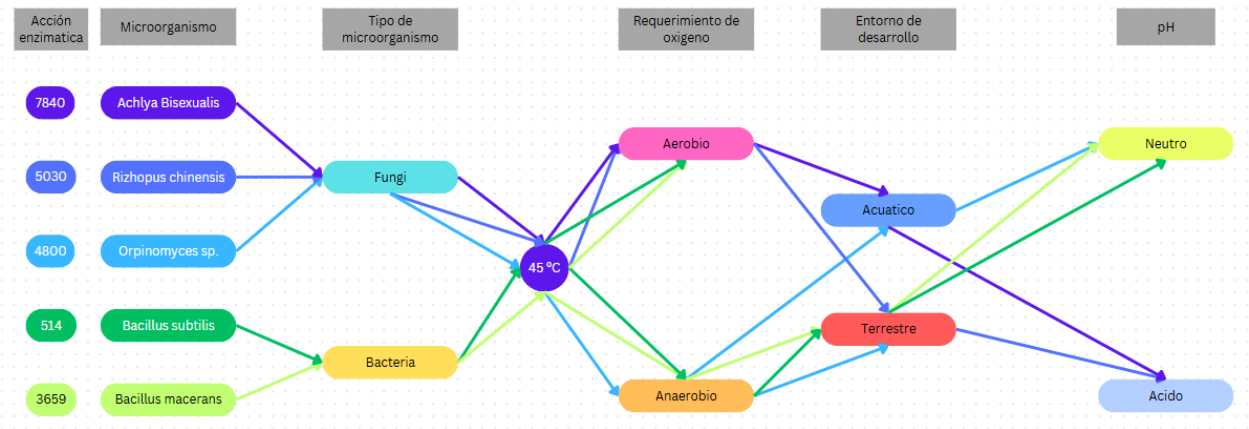


Figura 1: Matriz morfológica de correlación

Tabla 2: Diseño de Biorreactor y alternativas

Componente	Diseño principal	Alternativa
Recipiente	Tubo de PVC de 6 pulgadas (~15 cm) de diámetro y 9 pulgadas de alto (~22 cm), sellado en ambos extremos con tapas de PVC, diseñado para contener 3 L de mezcla y dejar un espacio de vacío adicional de 2 L para manejar la presión interna sin riesgo de escape de solución.	Recipiente de vidrio con capacidad de 10 L
Temperatura	Sistema Arduino con un termistor interno, que controlaría el paso de corriente a través de una resistencia, asegurando temperatura estable, sin fluctuaciones perjudiciales para el consorcio.	Plancha de calentamiento con agitador magnético
Agitación	Aspas giratorias impresas en 3D movidas por un motor de 12V	
Sistema de vacío	Tubo en forma de "S" ubicado en la parte superior del reactor. Este tubo estaría parcialmente relleno con agua para mantener el sistema aislado del exterior y, al mismo tiempo, permitir la liberación del exceso de presión.	No se aplicó sistema de vacío
Entradas y salidas	Dos conductos de PVC de ½ pulgada, uno ubicado en la parte superior para la entrada del sustrato, y otro en la parte media para la extracción de la mezcla. Esto evitaría la pérdida de material sedimentado en el fondo del reactor, facilitando al mismo tiempo la medición de parámetros clave, como pH y concentración de azúcares disponibles.	Única entrada y salida

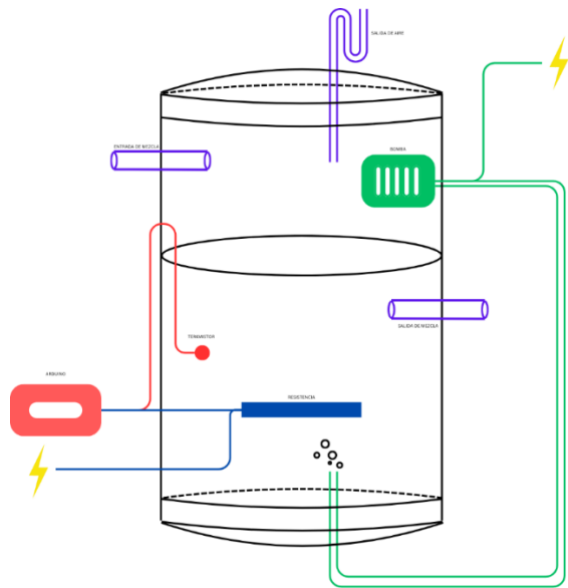


Figura 2: Biorreactor diseñado inicialmente, Elaboración propia. 2024

## 5. Materiales

### Reactivos:

- Residuos de banano de descarte (442 g).
- 2 L de solución buffer de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$
- 400 mL de KOH
- Agar Nutritivo 14 g
- Agua destilada

### Microorganismos:

- Cultivo de *Bacillus subtilis* obtenido de un semillero de investigación previo.

### Equipos:

- Reactor de vidrio de 10 L con tapa hermética.
- Plancha de calentamiento con agitador magnético.
- Autoclave horizontal
- Macerador.
- Incubadora

## 6. Metodología

**Para la preparación del Medio de cultivo** Se prepararon 700 mL de solución con 14 agar nutritivo (a una concentración de 20 g/L). Esta solución fue dividida en 100 mL por cada caja de Petri. Se colocó en una plancha de calentamiento y agitación hasta su completa disolución y se autoclavó. junto con las placas Petri.

**Para la inoculación del cultivo** Se tomó un cultivo de *Bacillus subtilis*, proveniente de un semillero de investigación y se utilizó la técnica de sembrado masivo. Las placas fueron incubadas durante la noche a 37°C.

**Para el montaje del biorreactor** se necesitaron varios pasos:

- Preparación del buffer de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$**  Se prepararon 2L de una solución de este buffer que sería el medio en el biorreactor. Dado que la acidez inicial era demasiado alta, se basificó la solución con 400 mL de KOH para ajustarla a un pH de 6.4, con el objetivo de evitar la acidificación del medio durante la producción de azúcares.
- Proceso de esterilización y preparación del reactor:** La solución buffer fue esterilizada en la autoclave horizontal. Posteriormente, la mezcla fue colocada en el recipiente de 10 L con agitación magnética constante en una plancha de calentamiento a ~45°C para mantener la homogeneidad.
- Maceración de los residuos de banano:** Se maceraron 442 g de residuos de banano, exclusivamente de la cáscara. La mezcla fue agregada al biorreactor, donde se integró con el medio preparado. Y el agar nutritivo también macerado

## 7. Resultados y Análisis

A la hora de desmontar el biorreactor se encontró que estaba en tres fases, en el fondo una sedimentación, en el medio solución y en la parte superior, flotando restos espumosos de la materia prima. El proceso de preparación y manejo del medio de cultivo y el reactor se vio afectado por la falta de tiempo y algunos equipos necesarios, así como las variables que se exponen a continuación:

- Inicialmente se planeó medir el contenido de azúcares en °Brix, no se contó con el equipo adecuado, por lo que no se pudieron evaluar los azúcares fermentables.
- No se logró incorporar un consorcio microbiano debido a limitaciones de tiempo y falta de disponibilidad del organismo.
- El uso de pseudotallos y hojas quedó excluido, limitando la evaluación de la biomasa disponible.

Por lo anterior, los objetivos de medición, análisis y observación no pudieron cumplirse de la forma esperada

## 7. Conclusión

El proyecto presentó grandes limitaciones; específicamente en materia de implementación del diseño experimental, la cuantificación de azúcares los consorcios microbianos y la optimización del biorreactor, pese a los esfuerzos no se logró obtener resultados concluyentes que permitan afirmar o comparar la eficiencia del pretratamiento; sin embargo, el proceso permitió identificar áreas claves de posible mejora, donde destacan la necesidad de estandarizar el método experimental para repetirlo con los microorganismos de forma individual y evaluar su verdadera actividad en el consorcio para definir una eficacia

superior de un método sobre los demás, definir una forma de cuantificar la disponibilidad de azúcares fermentables y evaluar si las diferencias de disponibilidad de azúcares fermentables tienen un impacto significativo en la tasa de producción de bioetanol o si presenta una variable más a estudiar.

## 8. Referencias

- Arias-Giraldo, S., & López-Velasco, D. M. (2019). Reacciones químicas de los azúcares simples empleados en la industria alimentaria. *Lámpsakos*, 22(22), 123–136. <https://doi.org/10.21501/21454086.3252>
- Asocaña. (2022). Sector Agroindustrial de la Caña. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215#>
- Delgado, J. E., Salgado, J. J., Perez, R., & Salgado Behaine, J. J. (2015). Perspectivas de los biocombustibles en Colombia (Vol. 14, Issue 27). Dirección de cadenas agrícolas y forestales. (2020). CADENA DE BANANO.
- Giwa, A. S., Sheng, M., Maurice, N. J., Liu, X., Wang, Z., Chang, F., Huang, B., & Wang, K. (2023). Biofuel Recovery from Plantain and Banana Plant Wastes: Integration of Biochemical and Thermochemical Approach. In *Journal of Renewable Materials* (Vol. 11, Issue 6, pp. 2593–2629). Tech Science Press. <https://doi.org/10.32604/jrm.2023.026314>
- Gupta, P. K., Basu, S., Rana, V., Malik, S., & Panchadhyayee, A. (2024). Utilization of non-concentrated banana pseudostem sap waste for converting to bioethanol: In vitro and in silico evidence. *Waste Management Bulletin*, 2(3), 109–119. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.07.002>



- Ibarra, M., & Márquez, L. (2022). Identificación de usos potenciales para el aprovechamiento de los residuos generados en el proceso de beneficio del plátano (*Musa paradisiaca*) var. Hartón.
- International Atomic Energy Agency. (2023). Reducción de los gases de efecto invernadero en la agricultura | OIEA.  
<https://www.iaea.org/es/temas/reduccion-de-los-gases-de-efecto-invernadero>
- Kumari, A., Agarwal, A., Aggarwal, A., Kaur, G., Sharma, K., Nehra, M., Raizada, P., & Siddhu, A. (2022). Scope of Banana By-Products: A Potent Human Resource. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 11(9), 104–112.  
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2022.1109.012>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022, May 24). *Colombia, presente con su agenda ambiental en el primer día del Foro Económico Mundial* -.  
<https://www.minambiente.gov.co/colombia-presente-con-su-agenda-ambiental-en-el-primer-dia-del-foro-economico-mundial/>
- Samantaray, B., Mohapatra, S., Mishra, R. R., Behera, B. C., & Thatoi, H. (2024). Bioethanol production from agro-wastes: a comprehensive review with a focus on pretreatment, enzymatic hydrolysis, and fermentation. In *International Journal of Green Energy* (Vol. 21, Issue 6, pp. 1398–1424). Taylor and Francis Ltd.  
<https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2253871>
- 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. In *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts* (Vol. 16, Issue 1). BioMed Central Ltd.  
<https://doi.org/10.1186/s13068-023-02295-2>