

DESARROLLO DE ENVASES BIODEGRADABLES A PARTIR DE RESIDUOS DEL CULTIVO DE PLÁTANO PARA LA EXPORTACIÓN DE FRUTAS A LA UNIÓN EUROPEA

DEVELOPMENT OF BIODEGRADABLE PACKAGING FROM BANANA CROP WASTE FOR THE EXPORT OF FRUIT TO THE EUROPEAN UNION

Angie Natalee Naveros Celis (1 Miguel Ángel Quintero; Flor Alba Sánchez; John Kennedy Díaz

1. Magister en Ciencia y Tecnología Agroindustrial, Sena Regional Tolima, Tecnoparque Nodo Tolima. Experta de la línea de Biotecnología y Nanotecnología. SENAGROTIC, Espinal, Colombia. annaverosce@gmail.com

RESUMEN

Este estudio aborda el desarrollo de envases biodegradables a partir de residuos de pseudotallos de musáceas, específicamente de "*Musa acuminata Cavendish*" y "*Dominico-Hartón*". Se formuló y validó un prototipo de lámina biodegradable, evaluando propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de absorción de humedad. Las láminas de "*Dominico-Hartón*" demostraron mayor rendimiento (7.60%) frente a las de "*Cavendish*" (4.66%) y presentaron menor contenido de cenizas (5.20% comparado con 18.50%), lo que garantiza mejor durabilidad y calidad estructural. Las pruebas de resistencia a la tracción y compresión destacaron la capacidad de estas láminas para soportar fuerzas significativas, validando su viabilidad en la industria de envases biodegradables. Esta investigación se alinea con la Directiva Europea 2019/904, respondiendo a la demanda de soluciones sostenibles para la exportación de frutas, ofreciendo alternativas viables al uso de plásticos convencionales.

Palabras Claves:

Calidad Estructural, Directiva Ambiental, Fibras Naturales, Residuos Agrícolas, Sostenibilidad.

ABSTRACT

This study addresses the development of biodegradable packaging from pseudostem residues of Musaceae, specifically "*Musa acuminata Cavendish*" and "*Dominico-Hartón*." A prototype of a biodegradable sheet was formulated and validated, evaluating its physicochemical, mechanical, and moisture absorption properties. The "*Dominico-Hartón*" sheets showed higher yield (7.60%) compared to "*Cavendish*" (4.66%) and lower ash content (5.20% vs. 18.50%), ensuring better durability and structural quality. The tensile and compression strength tests highlighted these sheets' ability to withstand significant forces, validating their viability in the biodegradable packaging industry. This research aligns with the European Directive 2019/904, addressing the demand for sustainable solutions for fruit exports, offering viable alternatives to conventional plastics.

Keywords:

Sustainability, Agricultural Waste, Structural Quality, Natural Fibers, Environmental Directive.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente preocupación por el impacto ambiental de los plásticos ha generado una búsqueda de alternativas sostenibles en la industria de envases. Los plásticos de un solo uso, ampliamente utilizados en sectores como el de alimentos, son responsables de una parte significativa de los desechos sólidos que contaminan los océanos y los ecosistemas terrestres. En respuesta a esta problemática, han surgido iniciativas tanto en el ámbito regulatorio como en el industrial para reducir el uso de plásticos convencionales y promover el desarrollo de materiales biodegradables. En este contexto, el aprovechamiento de residuos agrícolas como fuente de materia prima ha ganado atención como una solución prometedora (Blasi et al., 2023).

Uno de estos residuos con mayor potencial para esta transformación es el pseudotallo del plátano. El plátano es un cultivo de gran importancia en muchas regiones tropicales y subtropicales, como América Latina, donde grandes volúmenes de desechos son generados anualmente por la cosecha de la fruta. Estos residuos, que incluyen pseudotallos, hojas y cáscaras, tienen un alto contenido de fibra y otros componentes que los hacen aptos para el desarrollo de materiales alternativos. En particular, el pseudotallo ha demostrado tener propiedades mecánicas y estructurales adecuadas para la creación de láminas biodegradables, las cuales pueden utilizarse en aplicaciones como envases para productos alimenticios (Cipriani Schirmacher, 2021).

Este estudio se enfoca en el desarrollo de envases biodegradables a partir de los pseudotallos evaluando dos variedades de musácea: "Musa acuminata Cavendish" y "Dominico-Hartón" (Musa AAB Simmonds). Estas dos variedades fueron seleccionadas no solo por su alta disponibilidad en regiones productoras, sino también por las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de sus pseudotallos. Mientras que la variedad "Cavendish" es una de las más cultivadas a nivel mundial, el "Dominico-Hartón" es una variedad tradicional de América Latina, con características estructurales que se espera aporten ventajas significativas en la producción de envases biodegradables (Merais et al., 2022).

El desarrollo de este prototipo tiene importantes implicaciones ambientales y económicas. Por un lado, contribuye a la reducción de residuos agrícolas y la disminución del uso de plásticos convencionales, que tardan siglos en degradarse. Por otro lado, ofrece una nueva fuente de ingresos para los productores, quienes pueden valorizar subproductos de su actividad agrícola. Además, los envases biodegradables son una alternativa alineada con las normativas internacionales, como la Directiva Europea 2019/904, que busca prohibir el uso de ciertos productos plásticos de un solo uso en la Unión Europea y promover soluciones más sostenibles (European Commission, 2019).

En este sentido, la investigación aborda no sólo la formulación y fabricación de láminas biodegradables, sino también su caracterización a través de pruebas fisicoquímicas y mecánicas que permitan evaluar su viabilidad industrial. Las pruebas incluyen mediciones de resistencia a la tracción, compresión y absorción de humedad, factores clave para garantizar la funcionalidad de los envases en aplicaciones comerciales. Los resultados preliminares muestran que las láminas obtenidas a partir de pseudotallos de "Dominico-Hartón" presentan una mayor resistencia a la tracción en comparación con las de "Cavendish", lo que sugiere que esta variedad podría ofrecer ventajas competitivas en la fabricación de envases para la exportación de productos agrícolas, como frutas frescas.

La implementación de estos envases en la industria de exportación de alimentos, especialmente en mercados como la Unión Europea, representa una oportunidad significativa para cumplir con las crecientes exigencias regulatorias y de sostenibilidad. La Directiva Europea sobre plásticos de un solo uso y la Estrategia de Plásticos del Pacto Verde Europeo están impulsando la transición hacia una economía circular, donde los residuos agrícolas pueden ser una fuente clave de materias primas sostenibles (Plastics Europe, 2024). Esto no solo permite a las empresas cumplir con las regulaciones, sino también mejorar su competitividad en un mercado donde los consumidores valoran cada vez más las soluciones ecológicas.

ESTADO DEL ARTE

En las últimas décadas, el desarrollo de materiales biodegradables a partir de fuentes renovables ha experimentado un crecimiento significativo. Diversas investigaciones han explorado el uso de residuos agrícolas como alternativa para la producción de envases sostenibles, siendo uno de los enfoques más recientes y prometedores el aprovechamiento de pseudotallos de musáceas y otros subproductos agrícolas.

Un estudio de Siracusa et al., (2008) describen las propiedades mecánicas y de barrera de biopolímeros derivados de almidones vegetales, destacando su potencial como envases alimentarios. Además, Shah et al., (2008) exploraron la biodegradabilidad y compatibilidad de bioplásticos, estableciendo parámetros clave para mejorar su desempeño en condiciones reales.

Por otro lado, Sin et al., (2012) definen que el ácido poliláctico (PLA) es un termoplástico que se obtiene de materias primas vegetales, y puede ser procesado con tecnologías convencionales. Es el polímero biodegradable más producido a nivel industrial, utilizado en aplicaciones biomédicas, envases compostables y botellas, y se investiga para la ingeniería de tejidos. Su producción en masa ha reducido los costos, haciéndolo una opción económica para contenedores y bolsas de plástico. Según Bezirhan & Bilgen, (2015) ante el aumento de preocupaciones ambientales y la presión legislativa sobre los desechos plásticos, ha crecido el interés por los bioplásticos como materiales "ecoamigables". Este artículo evalúa su sostenibilidad, ventajas y desventajas, y el crecimiento del mercado global, que se estima entre un 20% y un 25% anual. Si bien ofrecen beneficios como una menor huella de carbono, también enfrentan desafíos, como altos costos y problemas de reciclaje. Es esencial desarrollar tecnologías de producción y estándares internacionales para su gestión.

Scarfato et al., (2015) realizaron un análisis integral de los avances en la mejora de la barrera de difusión y la interacción entre alimentos y envases en polímeros biológicos y biodegradables, centrándose en PLA, almidón y PHA. Se exploran formulaciones con micro y nano-rellenos para mejorar procesabilidad y rendimiento. Aunque estas mezclas mejoran propiedades como la barrera contra agua y oxígeno, muchos estudios se limitan a simulantes, sin

evaluar adecuadamente la migración en alimentos reales. Se requiere más investigación sobre la seguridad de estos materiales en contacto con alimentos y la migración de sustancias nocivas para cumplir con normativas legales. Niaounakis, (2015) en su revisión sobre polímeros biodegradables, subraya la creciente importancia del uso de biopolímeros en la industria del embalaje, destacando el papel de residuos agrícolas en la transición hacia envases más sostenibles.

Más recientemente, Temitayo Oyewo et al., (2023) estudiaron la viabilidad de utilizar pseudotallos de plátano para la producción de biopolímeros, mostrando resultados prometedores en términos de resistencia a la tracción y biodegradabilidad en condiciones compostables. Yilmaz, (2014) analizaron las propiedades mecánicas de envases biodegradables fabricados a partir de celulosa de residuos agrícolas, destacando su potencial para aplicaciones en la industria alimentaria.

En el campo normativo, Hopewell et al., (2009) realizaron una revisión sobre el impacto de las regulaciones ambientales en la adopción de envases biodegradables. Finalmente, Song et al., (2009) estudian el impacto ambiental de la transición a bioplásticos en la industria de embalaje, concluyendo que los polímeros biodegradables desempeñarán un papel creciente en el embalaje, siendo inapropiados para vertederos por su potencial de liberar metano. Además, son mejores para compostaje, por lo que deben separarse en los hogares. Sin embargo, se necesita certificación clara y etiquetado para asegurar su biodegradación en sistemas industriales y domésticos. Concluyen que la conciencia pública y una infraestructura adecuada son esenciales para maximizar sus beneficios.

METODOLOGÍA

El desarrollo de láminas biodegradables a partir del vástago de plátano se llevó a cabo en varias etapas, que incluyeron la recolección, procesamiento, caracterización y validación de las láminas obtenidas. Se trabajó con dos variedades: *Musa acuminata Cavendish* y *Dominico-Hartón*, seleccionadas por su disponibilidad y propiedades estructurales. La metodología se divide en las siguientes fases:

Recolección y Preparación de Materia Prima

Los pseudotallos fueron recolectados de cultivos locales, asegurando que estuvieran frescos y libres de contaminantes. Una vez recolectados, se cortaron en secciones de aproximadamente 30 cm y se transportaron a las instalaciones del laboratorio de Biotecnología y Nanotecnología del Tecnoparque Nodo Tolima.

Posteriormente, los pseudotallos fueron sometidos a un proceso de limpieza con agua corriente para eliminar residuos de tierra y partículas. Luego se dejaron secar al aire durante 24 horas.

Secado y Tratamiento Químico

Los pseudotallos limpios se secaron en un horno de convección forzada a 105°C durante 2 a 4 horas, dependiendo del tamaño y grosor de los cortes. Este proceso fue esencial para reducir el contenido de humedad de la materia prima.

Una vez secos, los pseudotallos se sometieron a un tratamiento químico con una solución de NaOH al 1.2% para facilitar la separación de las fibras. Posteriormente, se realizó un blanqueo con NaClO al 50-60%, que permitió mejorar las propiedades estéticas y de biodegradabilidad de las fibras obtenidas.

Formación de Láminas Biodegradables

Las fibras extraídas de los pseudotallos se sometieron a un proceso de molienda y tamizado, seguido por la adición de carbonato de calcio (CaCO_3) en una proporción del 6%. Esta mezcla se moldeó y prensó en moldes a una presión y temperatura controladas para obtener las láminas biodegradables.

Las láminas obtenidas se dejaron secar a temperatura ambiente controlada y en condiciones de baja humedad para asegurar su estabilidad estructural.

Caracterización Fisicoquímica

Las láminas resultantes fueron sometidas a pruebas fisicoquímicas para evaluar sus propiedades. Se midió el pH, contenido de humedad y color. La pureza de las láminas se determinó a través de la prueba de cenizas, la cual cuantificó el material inorgánico presente en cada muestra.

Pruebas de Higroscopicidad y Mecánicas

La higroscopicidad, es decir, la capacidad de absorción de humedad de las láminas, fue evaluada en un ambiente controlado con una humedad relativa del 95% y una temperatura de 10°C. Se realizó un recubrimiento de las láminas haciendo uso de almidón de yuca, cera de abejas, parafina y una muestra control (Figura 1). Los cambios en el peso de las muestras fueron registrados durante un período de tiempo.

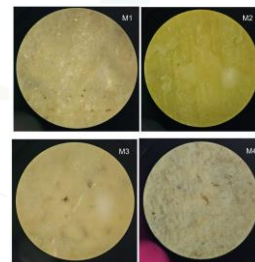


Figura 1. Prueba de Absorción de Humedad. Muestra con almidón de yuca (M1), muestra con cera de abejas (M2), muestra con parafina (M3) y muestra control (M4).

Las pruebas mecánicas incluyeron la medición del grosor de las láminas utilizando el método ISO 534 y pruebas de resistencia a la tracción según la norma ISO 1924-2. Esto permitió evaluar la capacidad de las láminas para soportar tensiones y cargas mecánicas sin romperse.

a) Medición del Grosor

El grosor de las láminas se midió según la norma ISO 534, utilizando un micrómetro digital con precisión de 0.01 mm (Figura 2). Esta medición se realizó en varios puntos de cada muestra para obtener un valor promedio.



Figura 2. Prueba de Resistencia a la Compresión, método del anillo.

b) Resistencia a la Compresión

La resistencia a la compresión se evaluó siguiendo la norma ISO 9895, aplicando una carga constante sobre las láminas hasta que se produjera una deformación significativa o la fractura de la muestra. El valor de resistencia se calculó dividiendo la fuerza aplicada por el área de la sección transversal.

c) Resistencia a la Tracción

Para la resistencia a la tracción RT , se utilizó la norma ISO 1924-2. La resistencia se determinó utilizando la siguiente ecuación:

$$1) \quad RT = \frac{F}{A}$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada en Newtons (N),
- A es el área de la sección transversal de la probeta en mm^2

d) Elongación Total (ε)

La elongación total se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$2) \quad \varepsilon = \frac{(L_f - L_0)}{L_0} * 100$$

Donde:

- L_f es la longitud final de la probeta después del ensayo de tracción (mm),
- L_0 es la longitud inicial de la probeta (mm).

e) Cálculo de la Energía de Absorción de Tracción (EAT)

La energía absorbida por la probeta hasta su fractura se calculó integrando la curva de tensión-deformación. La ecuación utilizada fue:

$$3) \quad EAT = \int (F * \Delta L)$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada en cada punto de la curva de tensión-deformación,
- ΔL es el cambio de longitud de la probeta a lo largo del ensayo.

Las láminas fueron preparadas en probetas siguiendo las dimensiones estándar, y sometidas a las pruebas descritas utilizando una máquina de tracción universal equipada con celdas de carga para registrar la fuerza aplicada. Las pruebas de tracción se realizaron a una velocidad constante de deformación, registrando los datos de fuerza y elongación para calcular las propiedades mecánicas mencionadas.

RESULTADOS

• Caracterización de la Materia Prima

Se analizaron dos muestras: pseudotallos de banano (*Musa acuminata Cavendish*) y pseudotallos de plátano (*Dominico-Hartón*). Las muestras mostraron diferencias significativas en términos de peso, humedad y pH. El plátano presentó mayor peso (24,000 g) y menor contenido de humedad (91.399%) en comparación con el banano (12,010 g, 95.470%). El pH fue más elevado en el pseudotallo de plátano (5.37 frente a 4.92 en el banano), lo que sugiere diferencias en la estabilidad química que pueden influir en el tratamiento posterior.

• Caracterización de las Láminas Resultantes

Las láminas de plátano *Dominico-Hartón* mostraron un rendimiento superior (7.60%) en comparación con las láminas de banano (4.66%), lo que indica mayor eficiencia en el proceso de conversión de material en láminas. Sin embargo, las láminas de plátano podrían requerir ajustes para garantizar su estabilidad en condiciones de alta humedad, ya que presentan una mayor susceptibilidad a la absorción de agua (6.60% de humedad).

• Prueba de Cenizas

El contenido de cenizas es un indicador de la pureza del material. Las láminas de banano presentaron un contenido de cenizas del 18.50%, significativamente más alto que las láminas de plátano, que alcanzaron un 5.20%. Un menor contenido de cenizas en las láminas de plátano sugiere una mayor integridad estructural, lo cual es deseable para aplicaciones donde se requiere resistencia mecánica.

• Prueba de Higroscopicidad

Una de las conclusiones más destacadas de este estudio es que las láminas de plátano *Dominico-Hartón* no requieren ningún tratamiento previo para

mantener una excelente resistencia frente a la absorción de humedad. A pesar de haberse evaluado varios tratamientos superficiales, como cera de abejas, parafina y almidón, las láminas sin tratamiento demostraron un comportamiento higroscópico adecuado. Las muestras sin tratamiento presentaron un aumento de peso mínimo del 1.53%, comparado con el 3.52% de las láminas tratadas con parafina. Este resultado sugiere que las láminas de *Dominico-Hartón* pueden ser utilizadas directamente, sin necesidad de aplicar recubrimientos adicionales, lo que simplifica significativamente el proceso de producción. Al eliminar estos tratamientos, se logra una reducción de costos y tiempos de fabricación, mejorando la eficiencia del proceso sin comprometer la calidad del producto final, especialmente en aplicaciones donde la exposición a la humedad es limitada.

• Pruebas Mecánicas

Las pruebas de resistencia a la tracción, según la norma ISO 1924-2, demostraron que las láminas de plátano *Dominico-Hartón* superaron significativamente a las de banano en términos de resistencia (5.176 N/mm² frente a 1.943 N/mm²). Además, el plátano presentó un mejor comportamiento en resistencia a la compresión (ISO 9895), con un valor de 200 N/mm², lo que indica que este material podría ser más adecuado para aplicaciones donde se requiere soportar cargas pesadas sin deformarse (Figura 3).



Figura 3. Prototipo desarrollado en el laboratorio de Biotecnología y Nanotecnología del Tecnoparque Nodo Tolima, para la exportación de frutas a la Unión Europea.

CONCLUSIONES

Las láminas biodegradables desarrolladas a partir de pseudotallos de plátano *Dominico-Hartón* demostraron un rendimiento superior en términos de resistencia mecánica y eficiencia de producción. Con un 7.60% de rendimiento frente al 4.66% de las láminas de banano *Musa acuminata Cavendish*, las láminas de plátano también mostraron una mayor resistencia a la tracción, alcanzando 5.176 N/mm² en comparación con 1.943 N/mm² para las láminas de banano. Además, el contenido de cenizas fue significativamente menor en las láminas de plátano (5.20% frente a 18.50%), lo que indica una mayor pureza del material y, por ende, una mejor durabilidad estructural. Las pruebas de higroscopicidad evidenciaron que las láminas de plátano no requieren tratamientos adicionales, como cera o parafina, para mantener una absorción de humedad aceptable. Estos resultados, junto con su destacada resistencia a la compresión (200 N/mm²), confirman que las láminas de plátano son una alternativa eficiente y sostenible para envases biodegradables, simplificando el proceso de producción y reduciendo costos, todo mientras se cumplen las normativas internacionales de sostenibilidad.

REFERENCIAS

1. Bezirhan, E., & Bilgen, H. D. (2015). A Review: Investigation of Bioplastics. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 9, 188-192. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2015.02.007>
2. Blasi, A., Verardi, A., Lopresto, C. G., Siciliano, S., & Sangiorgio, P. (2023). Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview. *Recycling*, 8(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/recycling804006>
3. Cipriani Schirmacher, I. (2021). *Assessment of different EU policies to reduce the environmental impact of single-use plastics: A German perspective* [Thesis, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg]. <https://reposit.haw-hamburg.de/handle/20.500.12738/11105>
4. European Commission. (2019). *Directive (EU) 2019/904 of the European Parliament and of the Council on the reduction of the impact of certain plastic products on the environment*. | FAOLEX. <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/L-EX-FAOC187670/>

5. Hopewell, J., Dvorak, R., & Kosior, E. (2009). Plastics recycling: Challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2115-2126. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0311>
6. Merais, M. S., Khairuddin, N., Salehudin, M. H., Mobin Siddique, M. B., Lepun, P., & Chuong, W. S. (2022). Preparation and Characterization of Cellulose Nanofibers from Banana Pseudostem by Acid Hydrolysis: Physico-Chemical and Thermal Properties. *Membranes*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/membranes12050451>
7. Niaounakis, M. (2015). *Biopolymers: Applications and Trends*.
8. Plastics Europe. (2024, septiembre 4). *Plastics Europe • Enabling a sustainable future*. Plastics Europe. <https://plasticseurope.org/>
9. Scarfato, P., Di Maio, L., & Incarnato, L. (2015). Recent advances and migration issues in biodegradable polymers from renewable sources for food packaging. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(48). <https://doi.org/10.1002/app.42597>
10. Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246-265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
11. Sin, L. T., Rahmat, A., & Rahman, W. (2012). *Polylactic Acid: PLA Biopolymer Technology and Applications*.
12. Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 19(12), 634-643. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
13. Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2127-2139. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0289>
14. Temitayo Oyewo, A., Olugbemiga Oluwole, O., Olufemi Ajide, O., Emmanuel Omoniyi, T., & Hussain, M. (2023). Banana pseudo stem fiber, hybrid composites and applications: A review. *Hybrid Advances*, 4, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100101>
15. Yilmaz, N. D. (2014). Agro-Residual Fibers as Potential Reinforcement Elements for Biocomposites. En *Lignocellulosic Polymer Composites* (pp. 231-270). John Wiley & Sons,

Ltd.

<https://doi.org/10.1002/9781118773949.ch11>