

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

Thermal and mechanical performance of polylactic acid biocomposites with lignocellulosic fillers

Tomas Jesús Madera Santana ¹

Emilio Pérez Pacheco ²

Carlos Rolando Ríos Soberanis ³

Olivia Guadalupe Ortiz Cel ⁴

RESUMEN

El propósito de esta investigación fue optimizar y caracterizar biocompuestos biodegradables a base de ácido poliláctico reforzados con cáscara de nuez en polvo, con el fin de desarrollar materiales sostenibles de bajo impacto ambiental. Para ello, se elaboraron formulaciones con diferentes proporciones de carga vegetal (10% a 50%) mediante mezclado en estado fundido y moldeo por termocompresión. Se evaluaron propiedades mecánicas mediante ensayos de tracción e impacto, y se realizaron análisis térmicos por calorimetría diferencial de barrido y termogravimetría. Los resultados mostraron que la adición de cáscara de nuez no afecta la temperatura de transición vítrea del PLA, pero reduce moderadamente su cristalinidad y estabilidad térmica. Mecánicamente, se observó una disminución de la resistencia a la tracción con el aumento de la carga, aunque a partir del 30% se recuperó la resistencia al impacto, evidenciando un efecto de tenacidad (toughening). La incorporación de residuos lignocelulósicos permite modificar selectivamente las propiedades del PLA, favoreciendo su aplicación en productos desechables, empaques biodegradables y componentes con exigencias estructurales moderadas. Este enfoque promueve la valorización de residuos agroindustriales bajo un esquema de economía circular.

PALABRAS CLAVES: Biocompuestos; Ácido poliláctico; Cáscara de nuez; Propiedades mecánicas; Sostenibilidad.

Fecha de recepción: 02 de septiembre, 2025.

Fecha de aceptación: 08 de octubre, 2025.

¹ Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., A.P. 1735, 83304 Hermosillo, Sonora, México. madera@ciad.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3844-2800>

² Universidad Modelo, Centro de Investigaciones Silvio Zavala, 97305, Mérida Yucatán, México. Autor para correspondencia: emilioperez@modelo.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-2242-1183>

³ Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., Calle 43 No. 130 x 32 y 34, Chuburná de Hidalgo; CP 97205, Mérida, Yucatán, México. rolando@cicy.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3915-7331>

⁴ Tecnológico Nacional de México/ITS de Calkiní. C.A. Bioprocesos, Av. Ah-Canul, Calkiní, Campeche, C.P. 24900, México, ogortiz@itescam.edu.mx, <https://orcid.org/0000-0003-3159-457X>

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

ABSTRACT

The aim of this research was to optimize and characterize biodegradable biocomposites based on polylactic acid reinforced with walnut shell powder, in order to develop sustainable materials with low environmental impact. Formulations containing varying proportions of plant-based filler (10% to 50%) were prepared through melt blending and compression molding. Mechanical properties were evaluated via tensile and impact testing, while thermal behavior was assessed using differential scanning calorimetry and thermogravimetric analysis. The results showed that the incorporation of walnut shell powder did not affect the glass transition temperature of PLA but moderately reduced its crystallinity and thermal stability. Mechanically, a decrease in tensile strength was observed with increasing filler content; however, impact strength improved from 30% filler content onward, indicating a toughening effect. The inclusion of lignocellulosic waste allows for selective modification of PLA properties, supporting its use in disposable items, biodegradable packaging, and components requiring moderate structural performance. This approach promotes the valorization of agro-industrial residues within a circular economic framework.

KEYWORDS: Biocomposites; Polylactic acid; Walnut shell; Mechanical properties; Sustainability.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el incremento exponencial de residuos sólidos ha generado una fuerte presión sobre los sistemas ambientales, particularmente por la persistencia de los plásticos convencionales. Estos materiales, derivados mayoritariamente de fuentes fósiles, presentan un ciclo de vida extremadamente prolongado y una resistencia significativa a la degradación ambiental, factores que los posicionan como uno de los principales agentes contaminantes a nivel global (Afshar et al., 2025). Como respuesta a esta problemática, ha surgido un área de oportunidad en el que se centra en el desarrollo de materiales poliméricos biodegradables derivados de fuentes renovables, a fin de sustituir parcialmente a los materiales sintéticos tradicionales en aplicaciones donde la durabilidad no es prioritaria (RameshKumar et al., 2020).

El ácido poliláctico (PLA, por sus siglas en inglés) es uno de los biopolímeros más prometedores debido a su origen natural (derivado de la fermentación de azúcares de biomasa como el almidón de maíz) y su capacidad de biodegradación en condiciones industriales (Vroman & Tighzert, 2009). A diferencia de los polímeros convencionales como el polietileno (PE) o el poliestireno (PS), el PLA presenta un balance atractivo entre propiedades mecánicas, facilidad de procesamiento, transparencia y compostabilidad. No obstante, pese a estas ventajas, el PLA también muestra limitaciones técnicas como su baja resistencia al impacto, fragilidad y sensibilidad a la humedad, lo que restringe su aplicabilidad en sectores en donde se requiere un alto desempeño mecánico (Sun et al., 2022). Ante estas limitaciones, se han planteado múltiples estrategias para modificar y mejorar las propiedades del PLA, tales como la incorporación de cargas naturales como fibras lignocelulósicas, almidones modificados y partículas vegetales agroindustriales (Kuram, 2022). Estas cargas además de reforzar la matriz polimérica les proporcionan valor agregado a los residuos agrícolas que de otro modo serían descartados, promoviendo un modelo de economía circular. En este sentido, la utilización de subproductos agroindustriales como la cáscara de nuez se presenta como una estrategia viable y sustentable.

En México, se estima que más del 95% de la cáscara de nuez generada por la industria es desechada sin ningún tipo de aprovechamiento, representando un volumen significativo de residuos sólidos agroindustriales (SANJUÁN, 2023). Este subproducto, compuesto por fibras lignocelulósicas con propiedades estructurales interesantes, ha sido objeto de estudios preliminares que destacan su

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

potencial como refuerzo en matrices poliméricas biodegradables. Investigaciones recientes han mostrado que la incorporación de partículas vegetales puede modificar la resistencia mecánica, el comportamiento térmico y la morfología de los compuestos poliméricos, dependiendo de la concentración, el tamaño de partícula y la homogeneidad en la dispersión (Sun et al., 2022).

El presente trabajo tiene como objetivo central la elaboración y caracterización de materiales compuestos biodegradables formulados con PLA como matriz polimérica y cáscara de nuez en polvo como carga. Se estudia sistemáticamente la influencia de la variación de la concentración de la carga sobre las propiedades mecánicas y térmicas del compuesto, con el fin de determinar formulaciones óptimas para aplicaciones específicas en productos que requieren materiales con bajo impacto ambiental.

JUSTIFICACIÓN

La justificación del presente estudio radica en la necesidad de encontrar soluciones sostenibles ante la creciente contaminación de los plásticos derivados del petróleo. En este sentido, el ácido poliláctico (PLA) surge como un biopolímero renovable y biodegradable, pero con limitaciones mecánicas y térmicas que restringen su aplicabilidad industrial. La investigación propone mejorar estas propiedades mediante la incorporación de cáscara de nuez en polvo, un residuo agroindustrial lignocelulósico altamente disponible y subutilizado donde más del 95% de este subproducto se desecha.

En este trabajo se investiga el comportamiento mecánico y térmico de materiales compuestos de PLA/cáscara de nuez. A través de la evaluación de diferentes formulaciones, se pretende determinar la variación de propiedades tales como la resistencia a la tensión, el módulo de elasticidad, la resistencia al impacto y la estabilidad térmica, a fin de tener un conocimiento más profundo sobre las relaciones estructura-propiedad en materiales biocompuestos.

Este proyecto se justifica por su valor científico, ecológico y social, al integrar innovación en materiales, aprovechamiento de residuos y desarrollo sostenible. Se trata de una propuesta alineada con las tendencias globales hacia una economía circular y la transición hacia polímeros más responsables con el medio ambiente.

METODOLOGÍA

Materiales

Para la elaboración del material compuesto biodegradable objeto de este estudio, se emplearon dos componentes principales: ácido poliláctico (PLA) provisto por NatureWorks LLC (PLA 2003D, Ingeo) como matriz polimérica y cáscara de nuez en polvo como carga vegetal de refuerzo. Ambos materiales fueron seleccionados en función de su biodegradabilidad, disponibilidad comercial y compatibilidad estructural, con el fin de desarrollar un biocompuesto sustentable con propiedades mecánicas optimizadas.

Elaboración de materiales biocompuestos

Los materiales biocompuestos de PLA/cáscara de nuez fueron elaborados mediante un procedimiento de mezclado en estado fundido y posterior conformado por termocompresión. Previamente al procesamiento, la cáscara de nuez recolectada fue sometida a un tratamiento físico para su adecuación como carga vegetal. Inicialmente, las cáscaras fueron lavadas cuidadosamente con agua destilada para remover impurezas orgánicas y partículas indeseadas. Posteriormente, se

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

realizó un secado térmico en estufa de convección a 105 °C durante 24 h con el objetivo de eliminar la humedad residual y evitar la formación de burbujas o zonas de debilidad en el material final. Una vez secas, las cáscaras se trituraron mecánicamente y se tamizaron para obtener un polvo homogéneo con distribución de tamaño adecuada para mezclado en la matriz polimérica.

Paralelamente, los pellets de PLA se secaron a 60 °C durante 8 h en estufa para reducir el contenido de humedad que pudiera afectar el proceso de fusión. La etapa de mezclado se llevó a cabo en un equipo Plasticorder con cámara de mezclado tipo Brabender. Las formulaciones se prepararon con distintas proporciones en peso de PLA/cáscara de nuez (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 60/40 y 50/50). La temperatura de mezclado se fijó en 180 °C y la velocidad de rotación en 60 rpm durante 10 min. Este proceso permitió fundir el PLA y distribuir la carga vegetal de forma relativamente uniforme en la matriz polimérica. La mezcla obtenida se dejó enfriar a temperatura ambiente, fragmentada manualmente y preparada para su conformado.

Para la elaboración de los materiales biocompuestos, se empleó un sistema de moldeo por compresión térmica utilizando una prensa hidráulica tipo CARVER. El material fragmentado se colocó dentro de moldes metálicos planos y se prensó a 180 °C con una presión constante de 5 Ton durante 5 min. Luego, las placas obtenidas se dejaron enfriar gradualmente bajo presión hasta alcanzar la temperatura ambiente, a fin de evitar deformaciones por contracción térmica.

Posteriormente, se cortaron probetas normalizadas destinadas a ensayos mecánicos. Las dimensiones y geometrías se basaron en las normas ASTM D638 para pruebas de tracción y ASTM D256 para impacto tipo Izod. Las probetas se almacenaron en condiciones controladas (23 °C y 50% de humedad relativa).

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

El análisis térmico por calorimetría diferencial de barrido (DSC) se realizó con un equipo PerkinElmer DSC Diamond. Aproximadamente 8 mg de muestra fueron colocados en cápsulas de aluminio herméticamente selladas y sometidas a un ciclo térmico desde 25 °C hasta 200 °C a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min bajo atmósfera de nitrógeno.

Análisis termogravimétrico (TGA)

La estabilidad térmica y el perfil de degradación fueron evaluados mediante análisis termogravimétrico (TGA), utilizando un equipo PerkinElmer TGA 7. Las muestras, de entre 5 y 10 mg, fueron calentadas desde temperatura ambiente hasta 600 °C a una velocidad de 10 °C/min en atmósfera inerte de nitrógeno.

Resistencia al impacto

La resistencia al impacto se evaluó conforme a la norma ASTM D256 utilizando un impactómetro tipo Izod. Las probetas fueron ranuradas manualmente para inducir la fractura y montadas en posición vertical. El péndulo impactó en la cara opuesta a la ranura, registrando la energía absorbida durante la fractura.

Propiedades Mecánicas

Las pruebas se realizaron en una máquina universal de ensayos mecánicos marca Shimadzu AGS-X, equipada con celdas de carga de 5 kN. La velocidad de desplazamiento del cabezal fue de 5 mm/min, y durante la prueba se registraron los parámetros de esfuerzo máximo, módulo de Young y deformación máxima hasta el punto de ruptura. Cada ensayo fue replicado al menos cinco veces para cada formulación, y los datos fueron analizados estadísticamente mediante promedios y desviaciones estándar. Los especímenes se cortaron conforme a la norma ASTM D638, tipo IV.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

El análisis térmico mediante Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) permitió evaluar el comportamiento térmico de las mezclas de ácido poliláctico (PLA) con cáscara de nuez en diferentes proporciones (ver tabla 1). Los parámetros que se identificaron fueron la temperatura de transición vítrea (T_g), la temperatura de cristalización en frío (T_c) y la temperatura de fusión (T_m), a fin de comprender el efecto de la incorporación del refuerzo lignocelulósico en la estructura térmica del PLA. Los resultados obtenidos indican que la temperatura de transición vítrea (T_g) se mantuvo constante en 60 °C para todas las formulaciones, desde la mezcla pura (100/0) hasta la de mayor contenido de carga (50/50). Este comportamiento sugiere que la presencia de la cáscara de nuez no interfiere significativamente con la movilidad de las cadenas amorfas del PLA en la región vítrea. La estabilidad de T_g también implica que no existe una interacción química fuerte entre la matriz y la carga que modifique drásticamente la estructura amorfa del polímero. Sun et al. (2022), reportaron que el PLA mantiene una T_g estable cuando se incorpora con fibras vegetales no reactivas químicamente, debido a la mínima interacción a nivel molecular entre la matriz y la carga. En contraste, se observó una tendencia descendente en la temperatura de cristalización (T_c) con el aumento del contenido de cáscara de nuez. Mientras que el PLA puro presentó una T_c de 100 °C, las mezclas con 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de cáscara de nuez mostraron valores de 97 °C, 96 °C, 95 °C, 94 °C y 94 °C respectivamente. Esta disminución sugiere que las partículas vegetales actúan como agentes heterogéneos que alteran la cinética de cristalización del PLA. Sin embargo, la reducción no es abrupta, lo cual indica una interferencia moderada en el ordenamiento molecular, posiblemente debido a una dispersión parcial o a una compatibilidad física limitada entre los componentes. Ouchiar et al. (2016), evaluaron biocompuestos de PLA con diferentes residuos agrícolas y observaron una disminución de T_c como resultado del efecto barrera de las partículas vegetales, las cuales dificultan el crecimiento de cristales al interferir físicamente en el empaquetamiento ordenado de las cadenas poliméricas. Este fenómeno también ha sido interpretado como una consecuencia del efecto diluyente de la fase lignocelulósica en la estructura cristalina del PLA (SANJUÁN, 2023).

La temperatura de fusión (T_m) también evidenció una ligera disminución a medida que aumentó la proporción de carga vegetal. Para el PLA puro se registró una T_m de 151 °C, descendiendo gradualmente hasta 148 °C en las formulaciones con 40% y 50% de cáscara de nuez. Esta variación marginal puede asociarse con una disminución en la cristalinidad general del sistema, atribuible a la posible interferencia de las partículas de cáscara en la organización regular de las cadenas poliméricas durante el enfriamiento o recalentamiento. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Scaffaro et al. (2021), que documentaron que la incorporación de fibras vegetales no sólo reduce el grado de cristalinidad, sino también modifica levemente el punto de fusión del PLA al generar una distribución más heterogénea de cristales con menor perfección estructural. Esta disminución también ha sido atribuida a la presencia de microdefectos o zonas de discontinuidad en la matriz polimérica ocasionadas por la inclusión de partículas naturales con geometría irregular y polaridad superficial diferente (Reichert et al., 2020).

Estos resultados sugieren que, aunque la incorporación de la cáscara de nuez no altera significativamente la fase amorfa del PLA, sí afecta moderadamente el proceso de cristalización y la estabilidad térmica del material en estado fundido. Tales efectos pueden ser atribuibles a la presencia de componentes no poliméricos como lignina, celulosa y hemicelulosa en la cáscara, que interrumpen parcialmente la regularidad de la estructura semicristalina del PLA.

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

Tabla 1. Resultados del análisis de DSC de los materiales Biocompuestos.

PLA/Nuez	T _g (°C)	T _c (°C)	T _m (°C)
100/0	60	100	151
90/10	60	97	150
80/20	60	96	149
70/30	60	95	149
60/40	60	94	148
50/50	60	94	148

Análisis termogravimétrico (TGA)

Los resultados del análisis termogravimétrico (TGA) se presenta en la figura 1. La gráfica de TGA muestra claramente las curvas de pérdida de masa en función de la temperatura, permitiendo identificar las etapas térmicas dominantes y cuantificar el efecto de la carga vegetal sobre la resistencia térmica de la matriz polimérica. La curva correspondiente al PLA puro (100/0) muestra una única etapa principal de degradación, que se inicia alrededor de 330 °C y culmina cerca de 390 °C, lo cual es característico del mecanismo de descomposición del PLA asociado a la ruptura de sus enlaces éster y la formación de productos volátiles como lactida. Esta descomposición bien definida coincide con lo reportado por Sun et al. (2022), que establecieron un intervalo de degradación térmica del PLA entre 320 y 380 °C en atmósfera de nitrógeno. Con la incorporación progresiva de cáscara de nuez (desde 10% hasta 50%), se observó un desplazamiento del inicio de la degradación hacia temperaturas ligeramente menores, junto con un ensanchamiento de la región de pérdida de masa. Este comportamiento puede atribuirse a la naturaleza térmicamente menos estable de los componentes lignocelulósicos presentes en la cáscara, tales como hemicelulosa, celulosa y lignina, que se degradan a temperaturas entre 200 y 380 °C. Según Petchwattana et al. (2020), la hemicelulosa suele degradarse alrededor de 200-280 °C, la celulosa entre 280-350 °C y la lignina entre 250-500 °C, lo que explica la superposición de eventos térmicos en las formulaciones con mayor contenido de carga.

En particular, se aprecia que las formulaciones con 40% y 50% de cáscara de nuez presentan una pérdida de masa más gradual y una mayor cantidad de residuo sólido a temperaturas superiores a 500 °C, lo cual se relaciona con la presencia de cenizas y residuos carbonosos originados por la lignina. Este resultado es similar a lo reportado por Sun et al. (2022), quienes observaron un aumento en la cantidad de residuo no volátil en compuestos PLA reforzados con fibras vegetales, y lo atribuyeron a la naturaleza aromática y parcialmente recalcitrante de las estructuras lignocelulósicas. En cuanto a la temperatura de degradación máxima, se observó una leve disminución con el incremento de la carga vegetal, lo que sugiere que la incorporación de cáscara de nuez reduce la estabilidad térmica general del material. Sin embargo, esta reducción es moderada y no compromete significativamente la capacidad del material para ser procesado por métodos térmicos convencionales cuyas temperaturas de operación se mantienen por debajo de los 230 °C. Según SANJUÁN (2023), esta clase de comportamiento es común en biocompuestos donde la carga vegetal actúa como nucleante estructural, pero introduce puntos de inicio de degradación térmica anticipada.

El análisis TGA mostró que la incorporación de cáscara de nuez afecta de forma predecible el perfil de degradación térmica del PLA, sin alterar drásticamente su estabilidad dentro del intervalo de manufactura. Este tipo de respuesta es característico de materiales biocompuestos con fases orgánicas heterogéneas, y refleja la integración funcional de un residuo agroindustrial como componente activo del sistema polimérico. Los datos obtenidos refuerzan la viabilidad del desarrollo

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

de materiales biodegradables reforzados, compatibles con procesos térmicos industriales y con propiedades ajustables en función del contenido de carga.

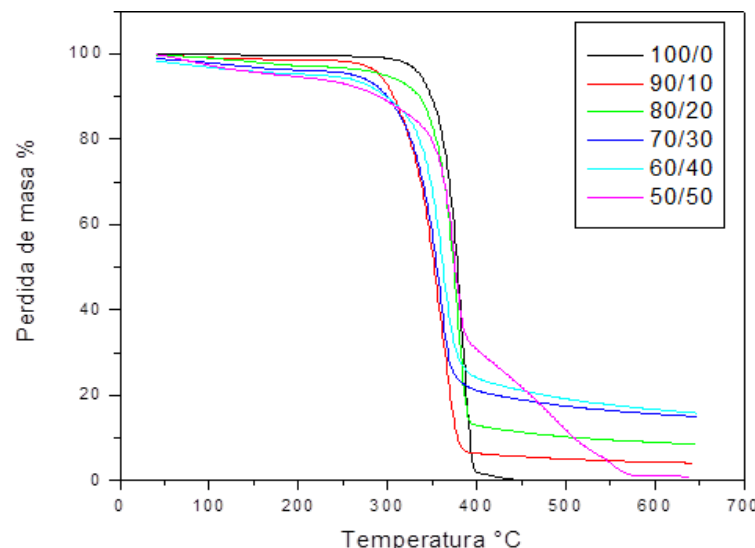


Figura 1. Resultados del análisis de TGA del material biocompuesto PLA/Nuez.

Resistencia al impacto

Los resultados de los ensayos de impacto se presentan en la figura 2. Este análisis sirvió para determinar la capacidad del material para absorber energía (ver figura 2B) bajo cargas dinámicas repentinas. Los resultados obtenidos muestran una tendencia no lineal en la resistencia al impacto conforme se incrementa la fracción de cáscara de nuez en la matriz de PLA (ver figura 2B). La formulación sin carga (100/0) presentó una resistencia al impacto de 1.27 J/m, la más alta del conjunto, lo cual es característico del PLA puro con buena cohesión interna. Sin embargo, al incorporar 10% de cáscara de nuez, la resistencia disminuyó drásticamente a 0.95 J/m, evidenciando una pérdida de integridad estructural inicial debido posiblemente a una mala dispersión o pobre adhesión interfacial entre la carga vegetal y la matriz. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado por Nirmal Kumar et al. (2022), quienes afirman que la introducción de fibras vegetales no tratadas puede actuar inicialmente como puntos de iniciación de fractura si no se logra una buena compatibilidad química. A partir del 20% de carga, se observa una recuperación progresiva de la resistencia al impacto. La formulación con 50% de cáscara alcanzó 1.24 J/m, un valor comparable al PLA puro, lo que sugiere que, a mayores concentraciones, la carga vegetal no solo deja de ser un defecto, sino que contribuye mecánicamente al comportamiento del material. Esta mejora puede estar relacionada con un cambio en el mecanismo de fractura, donde la distribución más densa de partículas permite mayor absorción de energía por mecanismos como el desvío de grietas, la fricción interfacial o la deformación de las partículas vegetales. SANJUÁN (2023) observaron comportamientos similares en compuestos PLA reforzados con residuos agrícolas, indicando que una mayor cantidad de carga puede inducir fenómenos de toughening por microfragmentación y deflexión de grieta. Además, estudios como el de Mysiukiewicz y Barczewski (2020) han mostrado que la morfología y tamaño de partícula de la carga vegetal influyen significativamente en la capacidad del material para resistir impactos. Cuando las partículas están suficientemente dispersas y bien ancladas en la matriz, pueden actuar como sitios de absorción de energía, lo cual explicaría el desempeño creciente de las formulaciones con 30% o más de cáscara de nuez. Sin embargo, es

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

importante señalar que esta mejora no implica un comportamiento completamente dúctil, ya que el material mantiene su fragilidad característica, aunque con una mayor capacidad de disipación de energía en los niveles más altos de carga.

Estos resultados muestran que la adición controlada de cáscara de nuez puede optimizar la respuesta al impacto del PLA si se superan las barreras de dispersión y compatibilidad interfacial. Las formulaciones con 40% y 50% de carga se comportan de manera comparable o incluso ligeramente superior al PLA puro, lo cual resulta prometedor para aplicaciones donde se requiere cierto nivel de tenacidad sin sacrificar biodegradabilidad.

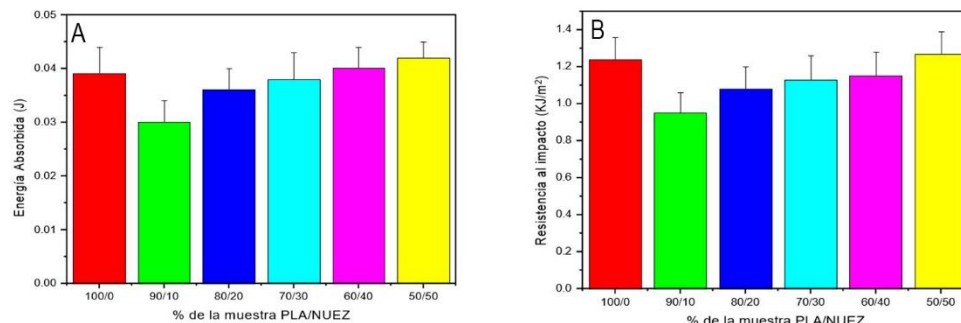


Figura 2. Resultados de las pruebas de impacto: A, Energía absorbida; B, Resistencia al impacto.

Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas de los biocompuestos PLA/cáscara de nuez se evaluaron mediante ensayos de tracción para determinar la resistencia máxima, el módulo de elasticidad y la deformación unitaria y se presentan en la tabla 2. Los resultados indican una clara disminución en las propiedades mecánicas a medida que se incrementa la concentración de cáscara de nuez en la matriz polimérica, mostrando la influencia de la carga lignocelulósica sobre la integridad estructural del PLA. El PLA puro (100/0) presentó los valores más altos en todos los parámetros evaluados, con una resistencia a la tracción de 45.6 MPa, una deformación máxima del 2.9% y un módulo de elasticidad de 4866 MPa. Estos resultados son similares con lo reportado en la literatura para PLA semicristalino procesado por compresión (Sun et al., 2022). Al incorporar un 10% de cáscara de nuez, se observó una disminución notable en la resistencia (31.7 MPa) y en la deformación (1.78%), así como una reducción significativa del módulo de elasticidad (3141 MPa). Este comportamiento podría deberse a una interferencia inicial de las partículas vegetales con la continuidad de la matriz y una posible falta de adhesión interfacial efectiva. A partir de 20% de carga, la disminución en las propiedades mecánicas se observa más pronunciada. En la formulación con 50% de cáscara de nuez, la resistencia a la tracción cayó a 5.24 MPa y el módulo disminuyó a 1622 MPa, mientras que la deformación máxima fue del 0.3%. Esta degradación del comportamiento mecánico se asocia a factores, como la baja compatibilidad entre la matriz hidrofóbica y la carga hidrofílica, la posible aglomeración de partículas y la generación de defectos estructurales que actúan como iniciadores de fractura (Shi et al., 2015).

El comportamiento observado es congruente con lo reportado en estudios similares sobre biocompuestos reforzados con fibras vegetales. Stevens (2013) señalaron que, sin el uso de agentes compatibilizantes, el aumento en la fracción de carga vegetal suele deteriorar las propiedades de

Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido poliláctico con cargas lignocelulósicas

tracción debido a la frágil adhesión interfacial y a la discontinuidad estructural inducida por la presencia de partículas rígidas y heterogéneas. No obstante, también se ha documentado que esta pérdida de propiedades puede ser controlada o incluso revertida mediante el uso de tratamientos químicos a la carga, como el acoplamiento con anhídrido maleico o silanos, que mejoran la afinidad química entre fases (SANJUÁN, 2023). Si bien los resultados indican una disminución significativa en el rendimiento mecánico con el aumento del contenido de cáscara de nuez, es importante considerar que el objetivo del material no es competir con polímeros estructurales de alto rendimiento, sino ofrecer una solución biodegradable y de bajo impacto ambiental para aplicaciones donde no se requiere alta resistencia mecánica. La reducción en las propiedades puede ser aceptable en productos de un solo uso, empaques secundarios o componentes biodegradables de baja exigencia estructural.

Tabla 2. Resultados de las pruebas a tensión de materiales biocompuestos.

PLA/Nuez	Resistencia a la tensión (MPa)	Deformación (%)	Módulo de elasticidad (MPa)
100/0	45.6 ± 4.5	2.9 ± 0.29	4866.48 ± 1992.97
90/10	31.68 ± 5.03	1.78 ± 0.27	3140.98 ± 830.28
80/20	13.14 ± 2.04	0.56 ± 0.07	1707.84 ± 124.44
70/30	13.93 ± 1.53	0.58 ± 0.08	1996.93 ± 612.54
60/40	8.97 ± 1.86	0.38 ± 0.06	1897.91 ± 287.08
50/50	5.24 ± 0.063	0.30 ± 0.04	1621.84 ± 295.62

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

El objetivo de la investigación fue caracterizar el comportamiento de los materiales biocompuestos elaborados con PLA/nuez y analizar el efecto de la concentración de carga vegetal sobre la estructura del material. Los resultados obtenidos en este estudio demuestran que la incorporación de cáscara de nuez como carga lignocelulósica en matrices de ácido poliláctico (PLA) permite modificar sus propiedades térmicas y mecánicas. Los análisis térmicos mostraron que, si bien la temperatura de transición vítrea se mantuvo constante, se evidenció una ligera reducción en la cristalización y la temperatura de fusión del PLA, así como una disminución moderada de su estabilidad térmica. Los resultados de las propiedades mecánicas mostraron una pérdida progresiva en resistencia a la tracción y módulo de elasticidad con el incremento de la carga, atribuida a una pobre interacción interfacial entre matriz y refuerzo. No obstante, a partir de 30% de cáscara de nuez se evidenció una recuperación de la resistencia al impacto, lo que sugiere un efecto toughening por dispersión y deflexión de grietas inducida por las partículas vegetales. Estos resultados son relevantes para el desarrollo de materiales sostenibles, debido a que es posible reutilizar residuos agroindustriales en biopolímeros de bajo impacto ambiental. Los biocompuestos PLA/cáscara de nuez estudiados poseen potencial para aplicaciones no estructurales como empaques biodegradables, utensilios de un solo uso y productos que requieran resistencia moderada, aportando a la transición hacia una economía circular y al diseño de materiales ecológicamente responsables.

REFERENCIAS

- Afshar, S. V., Boldrin, A., Christensen, T. H., Corami, F., Daugaard, A. E., Rosso, B., & Hartmann, N. B. (2025). Disintegration of commercial biodegradable plastic products under simulated industrial composting conditions. *Scientific Reports*, 15(1), 8569.



**Desempeño térmico y mecánico de biocompuestos de ácido
poliláctico con cargas lignocelulósicas**

- Kuram, E. (2022). Advances in development of green composites based on natural fibers: A review. *Emergent Materials*, 5(3), 811-831.
- Mysiukiewicz, O., & Barczewski, M. (2020). Crystallization of polylactide-based green composites filled with oil-rich waste fillers. *Journal of Polymer Research*, 27, 1-17.
- Nirmal Kumar, K., Dinesh Babu, P., Surakasi, R., Kumar, P. M., Ashokkumar, P., Khan, R.,...Gebreyohannes, D. T. (2022). Mechanical and thermal properties of bamboo fiber-reinforced PLA polymer composites: A critical study. *International Journal of Polymer Science*, 2022(1), 1332157.
- Ouchiar, S., Stoclet, G., Cabaret, C., & Gloaguen, V. (2016). Influence of the filler nature on the crystalline structure of polylactide-based nanocomposites: new insights into the nucleating effect. *Macromolecules*, 49(7), 2782-2790.
- Petchwattana, N., Naknaen, P., & Narupai, B. (2020). Combination effects of reinforcing filler and impact modifier on the crystallization and toughening performances of poly (lactic acid). *Express Polymer Letters*, 14(9).
- RameshKumar, S., Shaiju, P., & O'Connor, K. E. (2020). Bio-based and biodegradable polymers-State-of-the-art, challenges and emerging trends. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 21, 75-81.
- Reichert, C. L., Bugnicourt, E., Coltelli, M.-B., Cinelli, P., Lazzeri, A., Canesi, I.,...Agostinis, L. (2020). Bio-based packaging: Materials, modifications, industrial applications and sustainability. *Polymers*, 12(7), 1558.
- SANJUÁN, L. A. E. (2023). Caracterización química, física y mecánica de materiales compuestos con matriz de ácido poliláctico y refuerzo particulado de cáscaras de marañón elaborados a través de la técnica de moldeo por deposición fundida.
- Scaffaro, R., Maio, A., Gulino, E. F., Alaimo, G., & Morreale, M. (2021). Green composites based on PLA and agricultural or marine waste prepared by FDM. *Polymers*, 13(9), 1361.
- Shi, X., Zhang, G., Phuong, T. V., & Lazzeri, A. (2015). Synergistic effects of nucleating agents and plasticizers on the crystallization behavior of poly (lactic acid). *Molecules*, 20(1), 1579-1593.
- Stevens, C. V. (2013). *Bio-based plastics: materials and applications*. John Wiley & Sons.
- Sun, Y., Zheng, Z., Wang, Y., Yang, B., Wang, J., & Mu, W. (2022). PLA composites reinforced with rice residues or glass fiber—a review of mechanical properties, thermal properties, and biodegradation properties. *Journal of Polymer Research*, 29(10), 422.
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2(2), 307-344.