

Uso de recursos forestales para la fabricación de bioproductos a base de micelio de hongos: evaluación mecánica de biocompuestos lignocelulósicos. Investigación y documentación de la viabilidad técnica de la bioproducción de materiales alternativos

Lucía Pérez Lago⁽¹⁾, Angel Sánchez⁽²⁾,
Ángeles Cancela Carral⁽³⁾ y Juan Picos⁽⁴⁾
Universidad de Vigo (España)

Resumen: El presente trabajo aborda la producción de biomateriales estructurales mediante el cultivo controlado de micelio fúngico sobre sustratos lignocelulósicos de origen forestal. Se diseñan y moldean prototipos estandarizados, que posteriormente se someten a evaluaciones mecánicas con el fin de analizar el comportamiento de distintas combinaciones hongo-sustrato. La investigación se enmarca en los principios de la bioeconomía circular, proponiendo una alternativa sostenible a materiales sintéticos y revalorizando subproductos forestales desde un enfoque ingenieril e innovador. El estudio persigue documentar la viabilidad técnica del uso de subproductos forestales para la producción de micomateriales moldeables con propiedades estructurales aptas para diversas aplicaciones como embalaje, aislamiento o inclusive construcción. La hipótesis general plantea que la actividad simbiótica estructural del micelio de hongos saprótrofos permite la obtención de biomateriales con propiedades físico-mecánicas comparables a materiales convencionales de baja densidad. Los resultados de los ensayos de flexión sobre 11 combinaciones mostraron una notable variabilidad en la resistencia máxima (FMax entre 34 N y 299 N). La combinación de *Trametes versicolor*-Roble demostró la mayor resistencia y rigidez, mientras que *Ganoderma lucidum* exhibió un comportamiento más dúctil y deformable (hasta 25,77 mm). Se concluye que la viabilidad técnica es prometedora, aunque la alta dispersión de la resistencia (C.V. $\approx$ 100 %) exige una mayor estandarización en el proceso de fabricación para garantizar un desempeño reproducible.

Palabras claves: Micelio - Biocompuestos - Recursos Forestales - Ensayo de Flexión - Bioeconomía Circular

[Resúmenes en inglés y en portugués en las páginas 246-247]

⁽¹⁾ **Lucía Pérez Lago** es graduada en Ingeniería Forestal por la Universidad de Vigo, en la Escuela de Ingeniería Forestal del Campus de Pontevedra, Galicia, España. Este manuscrito parte de su trabajo final de grado, en donde se explora el potencial material de los hongos.

⁽²⁾ **Ángel Sánchez** es catedrático del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Vigo en la Escuela de Ingeniería Industrial en el campus de Vigo. Licenciado en Química, especialidad Química Inorgánica, por la Universidad de Santiago de Compostela (1982), donde también realizó su tesis doctoral en 1987. Ha ocupado diversos cargos de gestión, Director de área de Investigación, Director de departamento, Vicerrector de innovación, Vicerrector de Nuevas tecnologías y Calidad.

Como investigador, pertenece al grupo ChETE Enxeñería Química, Térmica e Medioambiental, es coautor en más de 87 artículos publicados en revistas científicas indexadas en listas de referencia internacionales en el ámbito de la ingeniería, ha participado en más de 100 congresos, lo que le ha permitido obtener seis sexenios de investigación. Ha dirigido 8 tesis doctorales y más de 100 trabajos fin de grado, y junto con su equipo ha registrado siete patentes. Ha participado en numerosos proyectos internacionales docentes como *Tempus* (2013-2016), *HEEMS* (2013-2016), coordinando la mayor parte de ellos, así como en numerosos proyectos y contratos de investigación, más de 30, I+D+i de ámbito regional, nacional e internacional, tanto con financiación pública como privada. Sus líneas de investigación actuales versan sobre los bioproductos, incluyendo los disolventes verdes, y simulación de procesos. La línea de disolventes verdes ha obtenido una importante financiación en el año 2021 (CO-0083-19) y en el 2024 (CO-0001-24). En la actualidad se encuentra dentro de una nueva línea de investigación que relaciona la ciencia con el arte. Su trayectoria refleja una dedicación constante a la enseñanza, la investigación aplicada y la transferencia de conocimiento.

⁽³⁾ **Ángeles Cancela Carral** es profesora titular del departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Vigo en la Escuela de Ingeniería forestal en el campus de Pontevedra. Licenciada en Química, especialidad Química Industrial, por la Universidad de Santiago de Compostela (1993), donde también realizó su tesis doctoral en 1997. Ha ocupado diversos cargos de gestión, entre ellos Secretaria de Departamento (2003-2007), Directora del Área de Calidad de la Universidad de Vigo (2007-2010), Coordinadora del área técnico-experimental en el Grado Universitario de Detectives Privados (2006-2013) y Subdirectora de la Escuela de Ingeniería Forestal (2014-2024) y directora desde el 2024. Desde 2020 coordina el programa de doctorado "Creatividad, innovación social y sostenibilidad", doctorado institucional del campus de Pontevedra. Como investigadora, es coautora de 97 artículos publicados en revistas científicas indexadas en listas de referencia internacionales en el ámbito de la ingeniería, lo que le ha permitido obtener cuatro sexenios de investigación. Ha dirigido 6 tesis doctorales y más de 31 trabajos fin de grado, y junto con su equipo ha registrado dos patentes.

Desde 2010, su labor investigadora se ha centrado en el estudio de microalgas, prestando especial atención a los procesos químicos asociados al aprovechamiento de microalgas y otros residuos forestales. Su trabajo, actualmente, se orienta al uso de residuos y bioma-

sa para obtener productos de valor añadido y energía. Además, impulsado por el doctorado que coordina, ha abierto una nueva línea de investigación que es la Ciencia y el Arte, buscando como el arte se puede introducir en la ciencia y viceversa. Ha participado como coordinadora local o investigadora en distintos proyectos internacionales de carácter docente, entre ellos *MeetYourForest* (2021-2023, Erasmus+ KA2), *Tempus* (2013-2016), *HEEMS* (2013-2016) y el proyecto AECID “Desarrollo de una red virtual para la sostenibilidad ambiental” (2011-2012). Además de numerosos proyectos de investigación, 15, en distintas convocatorias competitivas.

⁽⁴⁾ **Juan Picos** es Ingeniero de Montes por la Universidad Politécnica de Madrid (1996) y Doctor por la Universidad de Vigo (2004) dentro del programa “Ingeniería de Recursos Naturales y Medio Ambiente”.

Desde 1998 desarrolla su labor docente e investigadora en la Escuela de Ingeniería Forestal del Campus de Pontevedra de la Universidad de Vigo, donde actualmente ejerce como Profesor Contratado Doctor en el Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, en el área de Ingeniería Agroforestal. Entre 2017 y 2024 dirigió la Escuela de Ingeniería Forestal, compatibilizando su labor académica con la gestión universitaria. Actualmente es Subdirector de la misma.

Su carrera científica se articula en torno a la gestión forestal sostenible, la silvicultura, la prevención de incendios forestales, los aprovechamientos y la integración entre el monte y la industria, con especial interés en la aplicación de nuevas tecnologías para inventarios forestales, control de recursos y estimación de biomasa. A lo largo de su trayectoria, ha participado en más de cuarenta proyectos de I+D+i de ámbito regional, nacional e internacional, tanto con financiación pública como privada. Además de su labor universitaria, forma parte de diversos comités y grupos de expertos internacionales, entre los que destacan el Team of Specialists on Forest Sector Outlook del Committee on Forests and the Forest Industry de la Comisión Económica para Europa de Naciones Unidas (UNECE) y la European Forestry Commission de la FAO. Asimismo, es experto de la Comisión Europea en los grupos Focus Group on Sustainable Mobilisation of Forest Biomass y Focus Group on Forest Practices & Climate Change (EIP-AGRI, DG AGRI). Su trayectoria refleja una dedicación constante a la enseñanza, la investigación aplicada y la transferencia de conocimiento, contribuyendo activamente al fortalecimiento del sector forestal gallego y europeo.

Introducción

El escenario actual de crisis ecológicas y la creciente presión sobre los recursos naturales demanda una transformación profunda en las acciones y la mentalidad humana, avanzando hacia un equilibrio simbiótico con el planeta. La ingeniería forestal desempeña un papel fundamental en esta transición, promoviendo no solo la gestión racional y multifuncional de los bosques, sino también el desarrollo y valoración de productos y servicios derivados del entorno forestal. Frente a los sistemas extractivos intensos y la obtención

de materias primas limitadas, el biodiseño y la biofabricación de biomateriales a partir de residuos vegetales lignocelulósicos y auto-generados por el micelio de hongos se presenta como un campo de investigación estratégico y emergente. Este nuevo paradigma se basa en el principio de “hacer crecer nuevos materiales en lugar de extraerlos”. Esta estrategia se alinea con los principios de la bioeconomía circular y la gestión forestal sostenible. El uso de residuos lignocelulósicos (como aserrín, cortezas o restos de poda) como sustrato nutritivo para el crecimiento del micelio configura una cadena de valor que maximiza la utilización eficiente de los recursos forestales y mitiga la producción de residuos terminales. Además, se logra revalorizar subproductos forestales de baja calidad, lo que, según Appels *et al.* (2019) (Appels *et al.* 2019), refuerza la sostenibilidad del proceso. El presente estudio se fundamenta en la creciente necesidad de investigar y documentar la viabilidad técnica del uso de subproductos forestales para la producción de biomateriales miceliales moldeables con propiedades estructurales aptas para diversas aplicaciones, como el sector del embalaje, aislamiento o construcción. El trabajo engloba la ingeniería forestal, la micología aplicada y la ciencia de materiales, promoviendo una visión holística de la cadena de valor forestal.

Micelio, propiedades y aplicaciones

Biología estructural del micelio

El micelio constituye la fase vegetativa de la mayoría de los hongos, especialmente Basidiomycota y Ascomycota, y se compone de una red de filamentos denominados hifas. Estas hifas exploran el sustrato orgánico y liberan un amplio repertorio de enzimas extracelulares, como celulasas, ligninasas y hemicelulasas, que despolimerizan la celulosa, hemicelulosa y lignina. Este proceso permite que los compuestos sean absorbidos por las hifas. La organización progresiva de esta red filamentosa da lugar al micelio terciario, que constituye tejidos más complejos y compactos, responsables de la formación de cuerpos fructíferos (Moore, Robson, and Trinci, 2011). El micelio presenta un interés biotecnológico debido a su capacidad para cohesionar partículas mediante su crecimiento filamentoso, lo que le confiere propiedades estructurales para la producción de biocompuestos a partir de sustratos lignocelulósicos. Esta capacidad actúa como un sistema natural de autoensamblaje. Los hongos son una fuente natural de polímeros estructurales como la quitina y la quitosana, a diferencia de la celulosa en las plantas. La pared celular fúngica, compuesta por una red fibrosa de quitina y otros polisacáridos como glucanos y manoproteínas, confiere al micelio propiedades mecánicas similares a materiales lignocelulósicos como la madera o el corcho. Los compuestos miceliales, donde el micelio integra una fase dispersa de relleno lignocelulósico, se clasifican generalmente como espumas debido a la alta cantidad de aire presente, presentando densidades y módulos elásticos inferiores al micelio puro. La fabricación de estos compuestos es un proceso de bajo consumo energético y es capaz de secuestrar carbono, lo que constituye una de sus principales ventajas.

Sustratos lignocelulósicos e interacción fúngica

Los sustratos lignocelulósicos (celulosa, hemicelulosa y lignina) son la base fundamental, proporcionando soporte físico y nutrientes para la colonización fúngica. Los hongos de la podredumbre blanca, como *Trametes versicolor* o *Ganoderma lucidum*, producen lacasas, peroxidasas y celulasas capaces de degradar la lignina y celulosa, colonizando eficientemente el sustrato y generando una red densa de hifas que actúa como un agente de unión natural (Levin, Sun, and Li, 2010). La naturaleza del sustrato condiciona el resultado final. Así, los sustratos fibrosos (paja) favorecen la obtención de materiales con buena resistencia a la tracción, actuando como refuerzo, mientras que los sustratos particulados (serrín) tienden a producir compuestos más homogéneos. Los materiales con alto contenido de lignina suelen ralentizar el crecimiento fúngico. Desde la perspectiva de la sostenibilidad, se emplean habitualmente residuos lignocelulósicos de bajo valor, lo que abarata costes y facilita el reciclaje dentro de una economía circular. Sin embargo, el uso de estos materiales de baja calidad puede limitar el crecimiento fúngico y reducir las propiedades del material compuesto.

Aplicaciones y comparativa con materiales convencionales

Los biocompuestos miceliales han despertado un creciente interés por su carácter renovable y biodegradable. Sus aplicaciones incluyen desde el empaquetado sostenible: sustituyen a las espumas sintéticas (poliestireno expandido) gracias a su buena capacidad de absorción de impactos y aislamiento térmico, la construcción: se exploran como materiales aislantes, paneles de baja densidad y elementos no estructurales, con propiedades comparables a materiales convencionales en aislamiento acústico y térmico, el diseño: fabricación de objetos como lámparas y mobiliario experimental, la industria textil y la biomedicina: sustitutos sostenibles del cuero y soportes para cultivo celular o membranas filtrantes. La ganancia en sostenibilidad es clara ya que la energía necesaria para fabricar compuestos de micelio se sitúa en torno a 7,7 MJ/kg, frente a los 83,5 MJ/kg del poliestireno extruido (XPS), una reducción superior al 90% (Appels *et al.*, 2019). Además, generan entre un 45% y un 70% menos de carbono incorporado (GEI) que materiales sintéticos convencionales (Jones *et al.* 2019). En cuanto al comportamiento térmico, los compuestos miceliales exhiben una conductividad térmica entre 0,036 y 0,06 W/m·K, comparable a aislantes convencionales. Su densidad (entre 110 y 250 kg/m³) es superior al XPS (de 15 a 30 kg/m³), lo que limita su aplicación en elementos portantes, restringiendo su uso a paneles aislantes, embalaje y diseño de interiores.

Objetivos e hipótesis del trabajo

El objetivo principal del trabajo es investigar y documentar la viabilidad técnica de la bioproducción de materiales alternativos mediante el cultivo de micelio fúngico sobre sustratos lignocelulósicos de origen forestal. Los objetivos específicos incluyen la selección y caracterización de cepas y sustratos, la optimización de las condiciones de incubación para

la cohesión del micelio, la fabricación de prototipos estandarizados mediante moldeado y su sometimiento a evaluaciones técnicas (prueba de flexión) para evaluar consistencia y resistencia. Finalmente, se busca establecer relaciones entre las variables biológicas (hongo), fisicoquímicas (sustrato) y las propiedades caracterizadas, para identificar combinaciones óptimas y escalables. La hipótesis general que inspira este estudio es que la actividad simbiótica estructural establecida por especies fúngicas saprótrofas sobre matrices lignocelulósicas, bajo condiciones controladas de fermentación en estado sólido, permite la obtención de biomateriales con propiedades físico-mecánicas comparables a materiales convencionales de baja densidad. Se plantearon dos hipótesis específicas. La primera hipótesis era esperar una colonización más rápida y homogénea en aquellas especies con mayor producción de enzimas lignolíticas, dando lugar a una red micelial más densa y cohesionada. La segunda, que las propiedades fisicoquímicas del sustrato (composición lignocelulósica, granulometría, pH, humedad y relación C/N) tienen una influencia directa sobre la eficiencia del crecimiento micelial y la calidad final del bioproducto. Un sustrato adecuado favorecerá la colonización tridimensional, y por tanto, la formación de un material compacto y resistente.

Parte experimental

Selección del hongo y el sustrato

Se eligieron tres especies de Basidiomycetes conocidas por su capacidad de degradar lignocelulosa y formar redes miceliales densas y cohesivas como puede observarse en la *Tabla 1*. La selección de sustratos se basó en criterios biológicos, técnicos y de sostenibilidad. Se emplearon cuatro sustratos lignocelulósicos, hidratados al 62% de humedad total cuyas características principales se encuentran en la *Tabla 2*.

Tabla 1. Especies ensayadas como generadoras de micelio.

Especie	Nombre Común	Características de crecimiento	Aplicación
<i>Pleurotus ostreatus</i>	Seta de ostra	Crecimiento rápido (14–21 días); micelio denso.	Buena cohesión y resistencia mecánica.
<i>Ganoderma lucidum</i>	Reishi	Micelio denso y fibroso, alto contenido de quitina.	Incrementa rigidez y resistencia a la humedad.
<i>Trametes versicolor</i>	Cola de pavo	Colonización eficiente sobre sustratos ricos en lignina.	Optimiza la estructura del material final.

Tabla 2. Materiales usados como sustratos de los cultivos de micelio.

Material del sustrato	Características
Serrín de Roble (<i>Quercus sp.</i>)	Rico en lignina y celulosa; favorece a especies ligninolíticas. Alta densidad y lignina que ralentizan la colonización inicial
Serrín de Pino (<i>Pinus sp.</i>)	Menor densidad y lignina; adecuado para compuestos ligeros. Contiene resinas naturales que pueden inhibir la colonización, requiriendo pretratamiento
Paja de Cereal	Fibroso, de baja densidad, rico en hemicelulosa y celulosa; poca lignina. Favorece la rápida colonización por <i>P. ostreatus</i> y genera bioproductos de alta porosidad
Astillas de Haya + Serrín de Roble	Combinación que busca un equilibrio entre resistencia del roble y porosidad de la haya, para mayor rigidez y estabilidad dimensional

Métodos de cultivo y fabricación de prototipos

Preparación del inóculo y colonización inicial

El inóculo se preparó utilizando grano de mijo como soporte nutritivo, debido a su alto contenido en carbohidratos y proteínas. El grano (180 g por botella) fue esterilizado en autoclave a 121 °C y 1,2 bar durante 2 horas y 30 minutos. La inoculación se realizó en cabina de flujo laminar, utilizando 5 mL de micelio líquido de cada especie, lo que aseguraba una distribución uniforme y numerosos puntos de inicio de colonización. La colonización completa del grano se alcanzó en aproximadamente dos semanas.

Esterilización del sustrato e inoculación

Los sustratos preparados (62% de humedad) se introdujeron en bolsas de cultivo con filtro de 0,5 µm y se esterilizaron en autoclave a 121 °C, 1,2 bar, durante 3 horas y 30 minutos. La inoculación se realizó bajo condiciones estériles, utilizando una dosis de 45 g de micelio en grano por bolsa. Las bolsas se incubaron en oscuridad a 23 °C hasta la colonización completa del sustrato, que se alcanzó en aproximadamente 10 días.

Moldeado, consolidación y deshidratación

El sustrato micelial colonizado se agitó, rompiendo parcialmente la estructura fibrosa para facilitar el llenado homogéneo de los moldes de polipropileno de 1200 mL (18 cm x 11 cm x 7 cm). Se aplicó una presión ligera y uniforme para asegurar la compactación, crucial para la densidad final y cohesión interna. Se obtuvieron 24 moldes (dos réplicas por combinación). Los moldes se incubaron nuevamente en oscuridad total a 23 °C durante cuatro

semanas para permitir la consolidación completa del biocompuesto. Tras el desmolde, se observó que la muestra *Pleurotus ostreatus*-Roble no había alcanzado la consolidación suficiente y se fragmentó, por lo que fue descartada. Los 11 biocompuestos restantes se deshidrataron en un deshidratador eléctrico a 70 °C durante 18 horas. Este proceso neutraliza el micelio y consolida la estructura, aumentando la densidad y resistencia mecánica. En la *Figura 1* se muestra la morfología de los testigos de micelio preparados. Todos ellos son del mismo tamaño, la diferencia radica en la composición del sustrato y el tipo de hongo que se utiliza para la siembra del micelio. El ejemplo de la figura muestra un testigo bien formado lo cual no ha ocurrido en todos los casos, como se explicará más adelante.



Figura 1. Brick de micelio perfectamente consolidado y desmoldado (Fuente: elaboración propia).

Evaluación mecánica: prueba de flexión

El análisis se llevó a cabo en el laboratorio de maderas de la Universidad de Vigo, utilizando una Máquina Universal de Ensayos Electromecánica MTE-100 (capacidad de 100 kN). El ensayo se realizó en configuración de tres puntos. Las probetas, con dimensiones de 18 cm × 11 cm × 7 cm, se apoyaron con una luz de ensayo de 16 cm. La velocidad de aplicación de la carga se fijó en 10 mm/min para asegurar que la rotura se produjera en más de 35 segundos. Se registraron las curvas carga – deformación y los parámetros mecánicos de interés: Resistencia Máxima Específica (RMax), Deformación en el punto de Carga Máxima (E.FMax) y Fuerza Máxima Soportada (FMax).

Discusión de resultados

Resultados Cuantitativos Y Análisis De Variabilidad

La resistencia máxima específica (RMax) varió entre 0,57 y 9,97 N/mm, con un coeficiente de variación (C.V.) cercano al 100%. Esta extrema dispersión indica que la capacidad de los materiales para resistir esfuerzos no es consistente entre las probetas, un fenómeno atribuible a la influencia de la heterogeneidad en la compactación, la variación en la densidad aparente o las diferencias en el grado de entrelazamiento del micelio según el sustrato. La fuerza máxima soportada (FMax) osciló entre 34 N y 299 N, con una media de 137,6 N y una desviación estándar de 83,3 N (C.V. $\approx$ 60.5%). A diferencia de la resistencia, la deformación máxima (E. FMax), determinada en el rango de 7,9 a 25,8 mm, mostró una dispersión moderada (C.V. $\approx$ 39%). Esta estabilidad sugiere que, a pesar de la variabilidad en resistencia, las probetas presentan un modo de fallo relativamente predecible y una cierta ductilidad intrínseca. Este perfil asemeja los biocompuestos a materiales ligeros y de baja densidad, orientados a aplicaciones no estructurales o de absorción de impactos. En la *Figura 2* se muestran las curvas representativas de los ensayos fuerza-extensión. En la *Figura 3*, las curvas fuerza-tiempo.

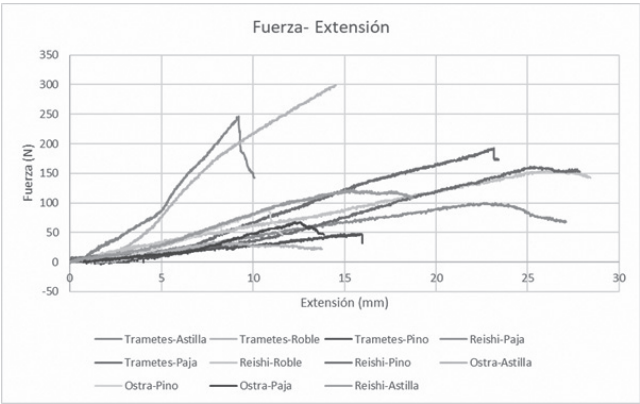


Figura 2. Fuerza (N)- extensión (mm). Comparativa global.

Comparación de comportamiento entre especies y sustratos

La respuesta temporal mostró que Trametes-Roble, Trametes-Astilla y Ostra-Pino alcanzaron la FMax rápidamente, soportando altos esfuerzos con baja capacidad de deforma-

ción. El resto de las muestras requirieron más tiempo, lo que indica una mayor capacidad de deformación y absorción de energía. Las combinaciones Trametes-Roble y Trametes-Astilla exhibieron la pendiente inicial más pronunciada, indicando un mayor módulo de elasticidad o rigidez. El Trametes, un hongo ligninolítico especializado, mostró su máximo potencial en sustratos leñosos densos (Roble y Astilla), dando lugar a un biomaterial rígido y resistente (299 N y 246 N). Se observó una contrariedad en los resultados experimentales ya que la muestra Trametes-Paja (193 N) superó a Trametes-Pino (48 N). Esto se podría explicar por la presencia de compuestos fenólicos y resinosos (terpenos, ácidos resinólicos) en el pino, que pudo tener como consecuencia el inhibir, parcial o localmente, el crecimiento micelial, reduciendo la cohesión estructural y resultando en una FMax significativamente más baja.

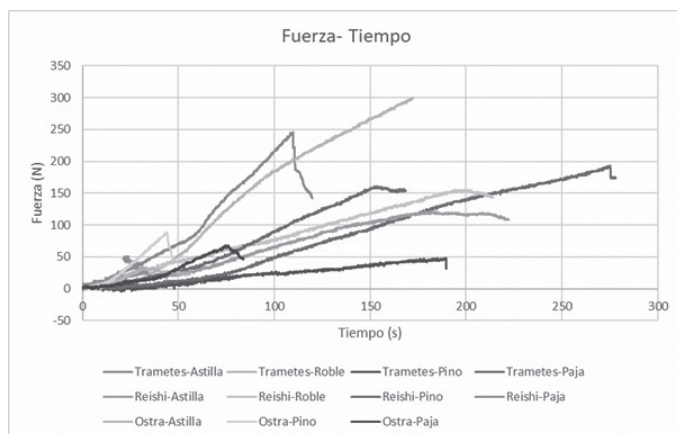


Figura 3. Curvas Fuerza (N)-Extensión (mm). Comparativa *Trametes* vs. *Reishi* sobre sustrato Roble (Para ilustrar el contraste entre rigidez y ductilidad).

Respecto al *Ganoderma lucidum* se puede decir que destaca por generar bricks dúctiles y flexibles. La *Reishi* mostró un comportamiento mecánico relativamente homogéneo y con una pendiente suave en su fase inicial, sugiriendo una flexibilidad inicial y capacidad de absorción de energía mediante deformación elástica. Las combinaciones *Reishi*-Roble y *Reishi*-Pino alcanzaron valores máximos de carga próximos a 160 N, con deformaciones de hasta 25,77 mm. Este comportamiento dúctil se debe a que, aunque *Reishi* está adaptado a degradar lignina, desarrolla una red micelial menos densa pero muy extensiva, permitiendo una gran capacidad de deformación antes de la fractura. El rendimiento es menor en Paja (100 N), probablemente porque la baja lignificación no estimula fuertemente la producción de enzimas ligninolíticas del hongo, dando lugar a una estructura más laxa. Sobre la *Pleurotus ostreatus* se debe destacar la baja cohesión de los bricks que

generados. La *Pleorus ostreatus* generó los biomateriales de menor resistencia (34 N a 88 N). Es un colonizador rápido, pero forma una matriz menos compacta con hifas más delgadas, lo que reduce la rigidez y resistencia del biomaterial. El descarte de la muestra con Roble indica que este sustrato de alta lignificación no es el indicado para una colonización eficiente. La combinación hongo-sustrato que mayor fuerza soporta antes de ceder es *Trametes-Roble* (299 N), seguido de *Trametes-Astilla* (246 N).

La variabilidad observada, lejos de ser una limitación, abre un amplio abanico de posibilidades para la adaptación funcional del material. Las combinaciones rígidas (*Trametes-Roble/Astilla*) son prometedoras para aplicaciones que requieran rigidez estructural (paneles constructivos, componentes de carga ligera). Las combinaciones dúctiles (*Reishi* en Pino o Roble) son adecuadas para aplicaciones donde la absorción de energía sea deseable (embalajes biodegradables, elementos de aislamiento o materiales amortiguadores).

Conclusiones

A partir de ese trabajo se confirma la viabilidad técnica de la bioproducción de biomateriales a partir de micelio de hongos y residuos forestales. El rendimiento óptimo se ha observado para la combinación *Trametes versicolor* – Roble, que proporcionó el material más rígido y resistente a la flexión (299 N), demostrando que la especialización ligninolítica se maximiza en sustratos densos de madera dura. La ductilidad Funcional de la *Ganoderma lucidum* generó materiales dúctiles y flexibles, con la mayor capacidad de deformación (hasta 25,77 mm), ideales para aplicaciones de aislamiento y absorción de energía. No obstante, se observa una necesidad de estandarización en los ensayos de este tipo de materiales dada la elevada dispersión de los resultados (C.V. $\approx$ 100 %), lo subraya la necesidad de optimizar y estandarizar variables críticas del proceso (compactación y pretratamiento del sustrato) para lograr un desempeño mecánico consistente y reproducible, ya que este tipo de nuevos biomateriales carecen de una composición y tramamientos específicos así como normativas específicas.

Referencias bibliográficas

- Alzate, J. 2023. *Desarrollo de Biomaterial a Base de Micelio y Residuos Madereros Para El Campo de La Construcción*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85699>.
- Gonzalez Vega, A. S. and Gonzalez Vega, A. T. 2023. *Evaluación del ciclo vegetativo del hongo Reishi (Ganoderma Lucidum) con diferentes sustratos en el Cantón la Maná*. Proyecto de investigación, Universidad Técnica de Cotopaxi Extension La Maná.
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J. and Wösten. H. A. B. 2019. *Fabrication Factors Influencing Mechanical, Moisture- and Water-*

- Related Properties of Mycelium-Based Composites. *Materials & Design* 161, p. 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.027>.
- Feijóo-Vivas, K., Bermúdez-Puga, S. A., Rebolledo, J., Figueroa, J. M., Zamora, P. and Naranjo-Briceño, L. 2021. Bioproductos Desarrollados a Partir de Micelio de Hongos: Una Nueva Cultura Material y Su Impacto En La Transición Hacia Una Economía Sostenible.” *Bionatura* 6 (1): 1637–52.
- Fuentes Cantillana, I. 2020. *Bio Fabricación. Micelio Como Material de Construcción: Bio-composite En Sustratos Lignocelulósicos*. Trabajo de Fin de Grado, Universidad Politécnica de Madrid.
- Holgado Rojas, M. E. 2024. Idoneidad Del Micelio de Hongos Para La Producción de Micomateriales. *Q'EUÑA* 6.
- Jones, M. P., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., and John, S. 2019. Engineered Mycelium Composite Construction Materials from Fungal Biorefineries: A Critical Review. *Materials & Design* 187: 108397. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>.
- Levin, L. N., Sun, S. H. and Li, J. 2010. Enzymatic Degradation of Lignocellulosic Biomass by White-Rot Fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology* 87 (4): 1303–14.
- Mené, R., and Volpe, M. A. 2021. *Diseño de Materiales: Productos a Base de Micelio Con Residuos Nativos*. XIV Jornadas de Sociología, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Buenos Aires.
- Moore, D., Robson, G. D. and Trinci, A. P. J..2011. *21st Century Guidebook to Fungi*. Cambridge University Press.

Abstract: This work addresses the production of structural biomaterials through the controlled cultivation of fungal mycelium on lignocellulosic substrates of forest origin. Standardized prototypes were designed and molded, subsequently undergoing mechanical evaluations (flexural testing) to analyze the behavior of different fungus-substrate combinations. The research is framed within the principles of the circular bioeconomy, proposing a sustainable alternative to synthetic materials and revaluing forest by-products from an innovative engineering perspective. The study aims to document the technical viability of using forest by-products for the production of moldable mycomaterials with structural properties suitable for various applications such as packaging, insulation, or construction. The general hypothesis proposes that the structural symbiotic activity of saprotrophic fungal mycelium allows obtaining biomaterials with physical-mechanical properties comparable to conventional low-density materials. The flexural test results on 11 combinations showed notable variability in maximum resistance (FMax between 34 N and 299 N). The *Trametes versicolor*-Oak combination demonstrated the highest resistance and rigidity, while *Ganoderma lucidum* exhibited more ductile and deformable behavior (up to 25.77 mm). It is concluded that the technical viability is promising, although the high dispersion of resistance (C.V. $\approx$ 100 %) demands greater standardization in the manufacturing process to ensure reproducible performance.

Keywords: Mycelium - Biocomposites - Forest Resources - Flexural Testing - Circular Bioeconomy

Resumo: O presente trabalho aborda a produção de biomateriais estruturais por meio do cultivo controlado de micélio fúngico sobre substratos lignocelulósicos de origem florestal. São projetados e moldados protótipos padronizados, posteriormente submetidos a avaliações mecânicas com o objetivo de analisar o comportamento de distintas combinações fungo-substrato. A investigação insere-se nos princípios da bioeconomia circular, propondo uma alternativa sustentável aos materiais sintéticos e revalorizando subprodutos florestais a partir de uma abordagem engenheirizada e inovadora.

O estudo busca documentar a viabilidade técnica do emprego de subprodutos florestais para a produção de micomateriais moldáveis com propriedades estruturais adequadas a diferentes aplicações, tais como embalagens, isolamento ou mesmo componentes construtivos. A hipótese central sustenta que a atividade simbiótica estrutural do micélio de fungos saprófitos possibilita a obtenção de biomateriais com propriedades físico-mecânicas comparáveis às de materiais convencionais de baixa densidade.

Os resultados dos ensaios de flexão realizados sobre 11 combinações evidenciaram uma notável variabilidade na resistência máxima (FMax entre 34 N e 299 N). A combinação *Trametes versicolor*-Carvalho apresentou os maiores valores de resistência e rigidez, enquanto *Ganoderma lucidum* demonstrou um comportamento mais dúctil e deformável (até 25,77 mm). Conclui-se que a viabilidade técnica é promissora, embora a elevada dispersão dos resultados (C.V. $\approx$ 100%) exija maior padronização do processo de fabricação, de modo a garantir um desempenho reprodutível.

Palavras-chave: Micélio - Biocompostos - Recursos florestais - Ensaio de flexão - Bioeconomia circular
