

INFORME PROYECTOS— 2025

**MICELIO COMO BIOMATERIAL PARA CONSTRUCCIÓN CON FIBRAS
VEGETALES Y OTROS RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS
“MICEL.IO”**

Informe: Final de Resultados

Número de proyecto: 22500015

Expediente: IMAMCA/2025/2

Duración: Del 01/01/2025 al 31/12/2025

Coordinado en AIDIMME por: Carla Camiña Urgel



GENERALITAT
VALENCIANA

IVACE+i

INSTITUTO VALENCIANO
DE COMPETITIVIDAD
E INNOVACIÓN

AIDIMME
Instituto Tecnológico

ÍNDICE

1.	<u>INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS DEL PROYECTO.....</u>	<u>2</u>
1.1.	<u>BIOMATERIALES A BASE DE MICELIO</u>	<u>2</u>
1.2.	<u>CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS HONGOS</u>	<u>10</u>
2.	<u>ACTIVIDADES REALIZADAS, DESARROLLO DEL PROYECTO</u>	<u>14</u>
3.	<u>RESULTADOS OBTENIDOS</u>	<u>15</u>
3.1.	<u>HONGOS BASIDIOMICETOS.....</u>	<u>18</u>
3.2.	<u>SELECCIÓN Y PROCESADO DE SUSTRATOS</u>	<u>19</u>
3.3.	<u>CRECIMIENTO DEL HONGO EN EL SUSTRATO</u>	<u>26</u>
3.4.	<u>FABRICACIÓN DEL BIOMATERIAL A BASE DE MICELIO</u>	<u>32</u>
3.5.	<u>CARACTERIZACIÓN</u>	<u>40</u>
4.	<u>RESUMEN Y CONCLUSIONES</u>	<u>52</u>
5.	<u>ANEXOS Y BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>55</u>
5.1.	<u>ANEXO I: PRUEBAS INICIALES CON FIBRAS PROVENIENTES DE RESIDUOS Y HONGOS CULTIVADOS.....</u>	<u>55</u>
5.2.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>63</u>

1. Introducción, objetivos del proyecto

Los biomateriales se presentan como una nueva alternativa en los sectores de la construcción y la arquitectura sostenible. De entre ellos, los elaborados a base de micelio se están abriendo camino en este ámbito, ya que sus propiedades son muy prometedoras para una amplia gama de aplicaciones (15). Este sistema de fabricación es conocido como “Micotectura”, y se ha utilizado en diversas exposiciones, casos de estudio y diseño de interiores (12).

El principal impacto del proyecto se centra en el desarrollo de materiales de la construcción completamente biodegradables, constituido por una matriz que permita la valorización de los residuos agroforestales (fibras vegetales u otros restos lignocelulósicos), en el que se emplea el micelio como agente aglutinante. Se obtendrán diversas aplicaciones y fomentarán las alternativas sostenibles.

1.1. Biomateriales a base de micelio

Los biomateriales a base de micelio aportan ventajas en el mercado como la sostenibilidad, reducción de la huella de carbono y contribución a la economía circular (13). Esta técnica utiliza a los hongos, fomentando el crecimiento de las hifas (la red filamentosa) y suprimiendo el cuerpo fructífero (la seta), de modo que se obtiene la proliferación del micelio cuando se encuentran en sustratos adecuados (16). En la mayoría de los casos, el crecimiento del micelio se realiza en moldes junto al sustrato y forma estructuras ligeras, así como biodegradables, que se pueden utilizar para fabricar elementos de construcción para aplicaciones de aislamiento térmico y acústico, resistencia como el hormigón o incluso piezas de mobiliario (14).

Empresas como MycoWorks o ECOVATIVE (figura 1) son pioneras en esto en EE. UU., así como MOGU en Europa. A continuación, se estudian algunas empresas de éxito.



Figura 1. De izq. a dcha, Bloques-ladrillo a base de micelio de MYCOWORKS (2016) y Paneles para aislamiento de ECOVATIVE

ECOVATIVE podría ser considerada la empresa motora de la industrialización del proceso de fabricación del micelio junto al sustrato, iniciando su trayectoria en 2007.

Poseen más de 40 patentes publicadas bajo su propiedad intelectual (28) y comercializan productos especializados bajo una serie de empresas como, por ejemplo, envases biodegradables “Mushroom packaging®” (24), establecidos en Europa bajo “MAGICAL MUSHROOM CO” en Reino Unido, o bien las espumas *MycoFlex Foam®* como parte, finalmente, de su línea de “textil fúngico” bajo la empresa “FORAGER” (26). Disponen de un laboratorio propio en el que incluye un catálogo de cepas para su uso en biomateriales, la granja a escala piloto y las pruebas para el uso comercial (23). En su investigación, operan con cepas comerciales (centrándose hoy en día en *Pleurotus ostreatus*) o bien con nuevos cultivos desarrollados por ellos, utilizando un método patentado que hace crecer al hongo de manera “aérea” unos centímetros por encima del sustrato en sólido, registrado como “AirMycelium™ process”. Además, su línea conocida por *MycoComposite™*, les situó en el mercado con productos, por ejemplo, de aislamiento térmico y construcción. En este ámbito, hace pocos años, abrieron la patente en Europa, a través de un programa asociativo con otras empresas, generando un libre acceso a algunos de sus descubrimientos. De ahí nació, sin ir más lejos, una empresa holandesa de fabricación de urnas totalmente biodegradables a base de micelio llamada Loop Cocoon (41). Uno de sus co-fundadores, el arquitecto Bob Hendriks, llevaba una larga trayectoria, trabajando con el micelio para diversos proyectos arquitectónicos en su estudio Studio Hendriks (40).



Figura 2. Envases de “Mushroom Packaging by ECOVATIVE”, Urnas de “Loop Cocoon” y Proyecto del “Studio Hendriks”

Por otro lado, el artista Philip Ross (co-fundador de **MYCOWORKS**) empezó, alrededor del 2008, su estudio a cerca de la construcción de piezas arquitectónicas a base de sustrato y micelio, a la cual acuñó con el termino de MICOTECTURA (véase referencia en la tabla 1). Pero no instauró la empresa hasta 2013 centrándose, junto a sus socios, en la fabricación del producto tipo “cuero” a base de micelio, que patentaron bajo el nombre de Reishi™ en 2020 (31). Este material es producido con el proceso “Fine Mycelium™ technology”, utilizando el sustrato en sólido y separando al hongo bajo una superficie polimérica, para, posteriormente, extraer una lámina que, tras su prensado y post procesado (como el curado y tintado), posee propiedades y apariencia de cuero. Mas allá de la patente, se ha publicado un artículo con los resultados obtenidos del LCA (análisis de vida de ciclo), donde se demuestra la sostenibilidad del producto a base de micelio frente al cuero convencional (50). Otra empresa con el foco puesto en el “textil fúngico” es **MYCOTECH** en indonesia (32), patentado su cuero MYLEA, que se separa físicamente durante la fabricación de su producto estrella “BIOBO” (Binderless bio-board): panel de 30 x 30 cm para pared. La empresa fundada en 2015 ha sacado una línea de biocomposites a base de micelio llamada MYCL™ Composite, generando otros productos para el diseño de interiores.

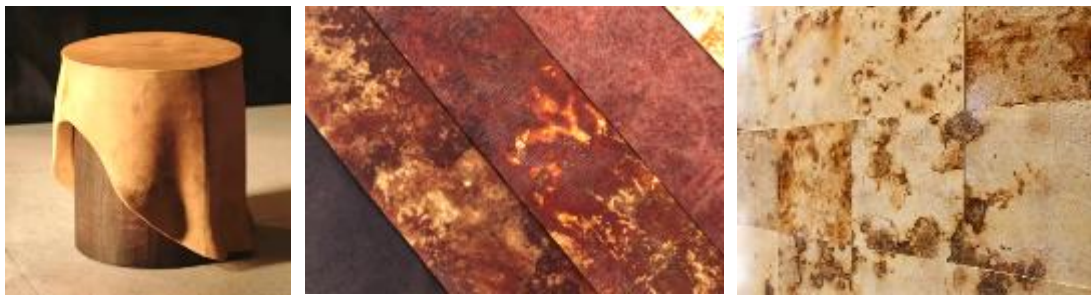


Figura 3. Izda Cuero REISHI TM de Mycoworks sobre madera, centro y dcha Mycotech Lab capas variadas de MYLEA y MYCL TM con tecnología BIOBO

En Europa, también hay un mercado prometedor que fabrica piezas a base de micelio, pero sin duda, la pionera y más conocida es **MOGU** (33). Fue formada en 2015 en Italia, aunque recientemente la empresa ha generado un crecimiento, pasándose a llamar ahora SQUIM, manteniendo la línea MOGU como marca de interiorismo y ampliando su mercado hacia la moda de lujo bajo la marca y producto patentado EPHEA™ (51, 52). Con respecto a los biomateriales de la empresa, se han especializado en el aislamiento acústico para todo tipo de aplicaciones, así como de suelos resilientes y sus productos comerciales poseen distintos diseños, pudiéndose adaptar y ofrecer una amplia gama. Uno de los cofundadores, Maurizio Montalti inicio su carrera con los biomateriales a base de micelio en 2010 al crear el estudio “OFICINNA CORPUSCOLI”, que apuestan por proyectos muy novedosos (véase referencia en la tabla 2). Además, una figura muy importante en el desarrollo de la empresa es su director tecnológico, Antoni Gandia, que se centra en la investigación (también a nivel europeo) y publica artículos científicos reveladores. Un ejemplo de ello es el proyecto europeo FUNGAR (42) donde **MOGU** forma parte del consorcio 2020-2023, junto a Elise Elsacker (Vrije Universidad de Bruselas) y otros científicos. En él se ha explorado la posibilidad, a través de prototipos y tecnología, para la construcción de edificios inteligentes con micelio, una arquitectura viva que “piensa”.



Figura 4. Productos comerciales de MOGU, izda panel de aislamiento acústico (no prensado) centro Suelos resilientes (prensados) abajo “Tiles” arriba “Flex”. Fuente: mogu.bio Derecha EPHEA: abrigo de la colección de Balenciaga

Otra de las grandes empresas a base de micelio es **Biohm** (34), que inicia sus andaduras en 2016 en Londres, creando paneles aislantes (térmicos y acústicos) para edificios. Su capacidad de fabricar materiales a base de micelio para la construcción es bien reconocida. Uno de los logros más llamativos es la producción de biocomposites a base

de cáscara de cacao o naranja y otros residuos de comida (35). Asimismo, la empresa holandesa **Kineco**, que, aunque actualmente solo fabrica para sus socios el producto patentado MyFoam (espumas y cueros), comercializa los sustratos como un “GIY- Grow it yourself”, para que el usuario pueda moldear a su gusto el micelio, tomando la forma deseada (36). También en Reino Unido, se encuentra la startup **Mykor** fundada en 2021, que fabrica aislamientos patentados y biocomposites tipo espumas, como sus paneles estructurales aislados (SIP) MykoSIP™, para paredes externas e internas, así como MykoBead™, relleno de aislamiento (37). Participa en el proyecto europeo INBUILT (Horizon Europe), que se está llevando a cabo desde 2023 hasta 2027, para la construcción de edificios más sostenibles. Su aportación clave es la fabricación de un panel de aislamiento rígido a base de micelio, junto residuos de materiales como los de la industria papelera, además del demostrador con paneles aislantes (TRL 8). Finalmente, de especial mención son dos empresas escandinavas que acaban de emerger, la noruega **Mycela** (2020) de paneles a base de micelio de gran tamaño para el aislamiento acústico (38), así como **Myceen** (estonia, 2021) de biomateriales junto a hongos para la construcción (39).



Figura 5. Biocomposites de Biohm a base de cáscara de cacao y naranja, Sustrato con micelio GIY de KINECO y paneles de MYKOR (proyecto INBUILT)

Como se ha mencionado, en el caso de los proyectos en Europa, se han alcanzado financiaciones tanto de manera regional, así como europea, en relación con la bioconstrucción con micelio. Dentro del programa Horizon Europe (2021-2027) mencionado anteriormente, se forma el “EIC pathfinder”, Consejo europeo de la Innovación, que otorgó en 2021 el proyecto FUNGATERIA con duración de 4 años (44). El estudio se centró en llevar a los biomateriales a base de micelio al contexto de los “Engineered Living Material”. Las investigaciones del consorcio formado por universidades como la de Vrije en Bruselas, se basaron en el concepto del crecimiento adaptativo y “en vivo”, empleando las interacciones del micelio junto a las bacterias y su entorno. Otro ejemplo es el proyecto MYTHIC en Holanda, impulsado por la universidad de Utrecht, así como por MNEXT (Centre of Expertise for Biobased Economy) entre otros, en el que se agrupó las indagaciones en la obtención de aislantes térmicos a base de micelio (45). Se crearon y ensayaron prototipos para obtener aislamientos térmicos, concluyendo que el mejor material de los seleccionados es la celulosa (procesada) obteniendo resultados en la caracterización del material muy prometedores. Además, aplicaron un recubrimiento para mejorar las propiedades de la absorción del agua y la resistencia al fuego, llamado Impershield BioSeal Mycelium.

Actualmente, también se encuentran varios proyectos en ejecución, como es el NeWood (46) del instituto tecnológico Karlsruhe, KIT, entre otros (2024-2026), en el que se espera crear una alternativa a base de micelio a los convencionales tableros técnicos (MDF, OSB, partículas). Los materiales ligeros fabricados como demostradores pretenden cumplir las normativas legales de la industria de la construcción y el mueble, para poder introducir en el mercado estos productos al finalizar el proyecto. Por otro lado, el proyecto Mycell (Leuven-Helsinki university 2025-2026), explorará el potencial del residuo de papel y celulosa en la fabricación de composites a base de micelio (47), para la arquitectura sostenible y espacios habitables inclusivos (en línea con la New European Bauhaus).

En el presente proyecto, el objetivo es estudiar la sinergia entre los residuos agroforestales (fibras vegetales y otras maderas) y el micelio generado por los hongos (que actúa como agente aglutinante o de refuerzo), aligerando el material e impulsando la economía circular. Así pues, se pretende obtener un biomaterial a base de micelio, totalmente biodegradable y de fuentes de aprovechamiento de residuos, para aplicaciones de construcción como aislantes térmicos y acústicos. Para ello, se realiza el estado del arte de los biomateriales, en los sectores de la bioconstrucción y diseño de interiores (51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61). A continuación, se muestra una tabla con algunos de los ejemplos a base de micelio en función de la especie de hongo y sus aplicaciones.

Tabla 1. Proyectos y productos de arquitectura más relevantes utilizando el micelio de diferentes hongos como aglutinante de varios sustratos (parte 1)

Especie de hongo	Mezcla de sustratos	Proyecto	Empresa	Aplicación
Reishi	Arbusto (Acacia mellifera) e invasor (Encroacher bush)	Exterior 2018-2024, MycoHab (antes BioHab) con Mycoblocks https://www.bio-hab.org/	Redhouse studio (arquitectura) y MIT's Center (Massachusetts centro tecnologico- Bits and atoms)	Bloques para Instalaciones para La NASA prototipo en marte. Casa autoportante
Trametes versicolor	Hojas de Maíz, cáscarilla de arroz y otros tallos agrícolas	Exterior 2014, "Hy-Fi tower". https://www.research.autodesk.com/projects/hy-fi/	The living (estudio de arquitectura, que pasa a ser AUTODESK RESEARCH) y ECOVATIVE	Ladrillos para estructura muy elevada con soportes de madera. Exposición temporal
Shitake, entre otros	Subproductos agrícolas y serrín	Exterior, 2013, "Mushroom tiny House". Sandwich de madera https://mushroomtinyhouse.com/	ECOVATIVE	Aislamiento térmico: para paredes, paneles, laminado, aislantes de una casa
Ganoderma (Reishi)	Serrín de residuos de la agricultura	"Mycotecture" 2008-2016 https://www.moma.org/interactives/exhibitions/2013/designandviolence/mycotecture-phil-ross/	Artista Philip Ross (co-fundador MycoWorks)	Bloques para estructuras variadas y elementos constructivos, exhibición en MoMA
Ganoderma (Reishi)	Serrín, paja y fibras desecho (cáscara de la semilla de algodón etc)	Silla "The Yamanaka McQueen" (2012) Colecciones propias del cuero REISHI TM patentado https://www.mycoworks.com/news	Mycoworks	Diseño de interiores, muebles etc
Ganoderma (Reishi), fundamentalmente	Residuos textiles (fibras de algodón, etc). También fibras vegetales (paja, maíz arroz)	Aislamiento acústico y suelos resilientes (2015- actualidad) https://mogu.bio/product/sample-box/	MOGU	Aislamiento acústico, suelos y diseño de interiores. Algunos con marcos/paneles de madera y bioadhesivos o coating bio
Pleorotus ostreatus	Azúcar de caña y serrin	Interior 2017, MycoTree https://brg.ethz.ch/research/prototypes/739	Karlsruhe Institute of Technology + Swiss Federal Institute of technology + Mycotech	Bloques para estructuras, junto a topes de bamboo unidos por barras de metal, cultivados en MYCOTECH
Ganoderma lingzhi (distinto al Reishi)	Sustratos agricultura como algodón, cañamo, espadaña o typha (crecimiento al aire)	Exterior, 2020, "The growing Pavilion 2020". Con soportes de madera https://thegrowingpavilion.com/visit/	"Biobased creations/New heroes" y "Studyo Krown Design" (Netherlands)	Pabellón estructura con recubrimiento resistente

Tabla 2. Proyectos y productos de arquitectura más relevantes utilizando el micelio de diferentes hongos como aglutinante de varios sustratos (continuación)

Especie de hongo	Mezcla de sustratos	Proyecto	Empresa	Aplicación
Ganoderma, Pleorotus, entre otros	cassava, maiz, caña de azucar y serrín	Producción en masa de BioBO http://www.mycelium-resources.info/resource/biobo/	Mycotech	Paneles para pared
Schizophyllum commune	Azolla filiculoides impresión en 3D	“Bio Ex machina” en condiciones en el espacio (marte/la luna) https://www.corpuscoli.com/projects/bio-ex-machina/	OFICINNA CORPUSCOLI	Piezas diseño de interiores imprimidas en 3D
Pleorotus ostreatus	Fibras de coco	Exterior, 2017 “Shell mycelium”. Soportes de madera https://www.archdaily.cl/cl/880342/este-pabellon-vive-y-muere-para-hacer-una-critica-a-la-sostenibilidad	Beetles 3.3 y YAD (Yassin Areddia Design), inspirados por Phil Ross	Pabellón que crece y se degrada en el exterior
Pleorotus ostreatus	Serrín	Exterior 2016, Vancouver. “The grow withous us” https://afjdstudio.net/	AFJD & Research	Bloques para formar un banco urbano a base de micelio, protegido por una capa superior de acrílico
Ganoderma lucidum	Aserrín, papel, textil	Mycocrete https://surfacesreporter.com/articles/175050/mycocrete-an-innovative-eco-friendly-building-material-derived-from-fungi	Universidad de Newcastle y Hub for Biotechnology in the Built Environment (HBBE)	Estructuras arquitectonicas

De la lista, se extrae que los hongos más utilizados son principalmente *Ganoderma lucidum* (Reishi), *Pleurotus ostreatus* (seta ostra) y *Trametes versicolor* (cola de pavo).

Por otro lado, se ha registrado la utilización de una serie de sustratos en las referencias bibliográficas para la formación de biomateriales a base de micelio (17, 18, 19, 20, 21). Por lo general, se realizan mezclas de varios componentes madereros y/o fibras vegetales, además de materia orgánica:

- Maderas: serrín o chips de pino, haya, roble; astillas de chopo; fibras de eucalipto y de pino
- Fibras vegetales: fibras de fique, cáñamo, coco, maíz, algodón; paja de colza, de cebada, de trigo; residuos alimenticios como granos de cereales (arroz) o bien del aceite de palma
- Materia orgánica en descomposición, tipo compost, como puede ser los residuos del café, naranjas, etc. Pero también papel o restos de celulosa o algodón.

Dependiendo de la aplicación del biomaterial, es preferible usar un determinado tipo de sustrato, ya que, predomina más en las propiedades finales, la influencia de la naturaleza del propio soporte de partida, que el tipo de hongo utilizado (1).

Para materiales donde las funciones requeridas son del tipo estructurales o, por ejemplo, revestimientos, los descubrimientos indican que es más favorable el uso de madera /serrín, pudiéndose emplear también una mezcla con fibras vegetales o realizar un procesado de prensado para mejorar las propiedades (7). Mientras que, para mejorar las propiedades aislantes, la tendencia es a utilizar fibras vegetales, que, además, algunas ya de por sí son conocidas por ello (como el cáñamo) (62, 63, 64, 65). Sin embargo, en caso concreto del aislamiento acústico, las investigaciones han concluido que, los residuos del sector textil (restos de algodón, denim etc.) aglutinados por el micelio, pueden lograr una gran capacidad de absorción del sonido, debido a que se obtiene una textura tipo espumas (3). A continuación, se muestra una tabla resumen respecto a los sustratos para la fabricación del micelio.

Tabla 3. Resumen de los materiales utilizados para la degradación de la lignina/celulosa por el micelio y sus aplicaciones

Material	Función	Ventaja principal
Micelio + Textil	Acústica	Absorción superior y diseño orgánico
Micelio + Paja/Cáñamo	Aislamiento	Carbono negativo y resistencia al fuego
Micelio + Madera/Serrín	Estructural	Biodegradable al final de su vida útil

La versatilidad de las formas en las que puede crecer el micelio es grandiosa, pudiéndose hasta imprimir en 3D cualquier objeto para después ser cultivado. En bibliografía se han encontrado muestras de todo tipo de formas y dimensiones, algunas más acordes a los ensayos estandarizados para materiales, en cambio otras parecen estar enfocados en investigación y desarrollo de nuevos materiales o incluso al diseño y proyectos artísticos.

Por lo general, se encuentra tamaños pequeños, muy manipulables, o incluso a un nivel demostrativo del potencial como biomaterial, pero también es usual la fabricación de tablas o piezas algo más voluminosas. A continuación, se describen algunos ejemplos

- Ladrillos rectangulares de 10-12 cm de largo, por 7-9 cm de ancho cuadrados
- Paneles de 30 x 30 cm (también varias variantes de 25 x 25 cm por ejemplo), de espesores entre 1 – 3 cm.
- Probetas cilíndricas, de 10-12 cm de largo y 4-5 cm de diámetro
- Muestras pequeñas, en placas Petri. Diámetro de 8 cm con el biomaterial de espesores entre 0,5-1 cm

1.2. Conceptos básicos de los hongos

Se conoce una gran variedad de hongos que pueden ser utilizados para la obtención de biomateriales por lo que es vital profundizar en el estudio de las especies. La micología es la ciencia que estudia a los hongos, pero también la simbiosis que ocurre con la matriz donde crecen, como pueden ser los árboles etc. En este sentido, es interesante la posibilidad de mimetizar a la naturaleza, desde el punto de vista de la relación entre hongos-sustratos, para aportar nuevos materiales más sostenibles.

Para entender estos nuevos materiales, se puede empezar por conocer la naturaleza del hongo y verlo como una red de ingeniería natural. La simbiosis entre el hongo y las raíces de una planta es definida como “Micorriza”. Esta asociación simbiótica ocurre, por ejemplo, con la división Basidiomycota, donde la colonización del hongo forma una red constituida por las hifas, que rodean a la raíz y penetran en el espacio intercelular. El objetivo en la producción de biomateriales es mantener el hongo en su fase de crecimiento del micelio, para que colonice el sustrato de manera homogénea. Por otra parte, el cuerpo fructífero es lo que comúnmente se denomina “seta” y, por lo general, se evita su formación para su aplicación en construcción (67, 68, 69, 70). El micelio es capaz de descomponer polímeros complejos y sintetizar los suyos propios.

Los hongos objeto de estudio son, por tanto, todos basidiomicetos, de pudrición cubica, siendo el chopo/haya el mejor sustrato para su crecimiento óptimo. Son hongos de raíces blancas, que absorben los nutrientes a través de la degradación de los polímeros que contienen los sustratos, debido a la secreción de enzimas que se oxidan y transforman el material (71). Así pues, se genera, un aglutinante natural conocido como micelio, a medida que el hongo va consumiendo el sustrato, construyendo sus propias paredes celulares. Las enzimas encargadas de este proceso son las Lacasas y Peroxidasas, que son excretadas por la pared celular de la hifa para descomponer la lignina o hidrolisis de la celulosa (72). La lignina es un polímero muy rígido y difícil de degradar, ya que su función es la de proteger a las plantas. Por ende, estos hongos son capaces de cambiar la estructura molecular de la lignina/celulosa, convirtiéndola en compuestos de fácil absorción por los microorganismos (proteínas, grasas, carbohidratos). La pared celular, esta compuestas principalmente de quitina, un polisacárido que proporciona rigidez, resistencia al fuego y propiedades hidrofóbicas al biomaterial. Pero también se compone de otros polisacáridos (ej. Glucanos), mano-proteínas, quitosano, ácido poliglucurónico o celulosa, además de pequeñas cantidades.

A diferencia de la lignina, la quitina es un polímero ordenado y semicristalino, compuesto de unidades de N-acetilglucosamina.

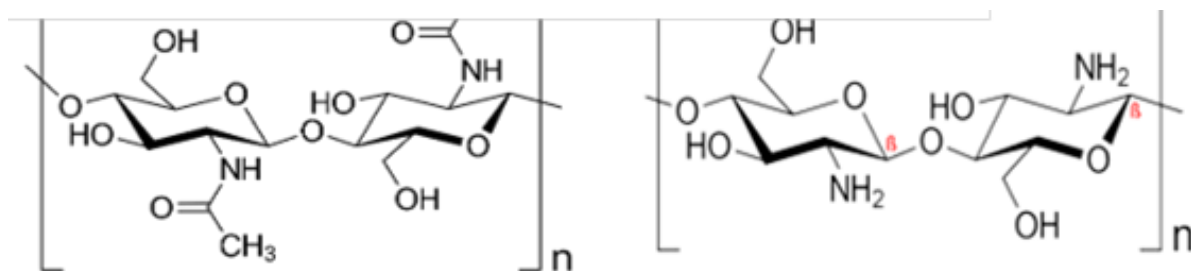


Figura 6. Moléculas de quitina (izquierda) y quitosano (derecha). Fuentes: Wikipedia.

De ellos, las especies de mayor relevancia para su estudio en materiales se detallan a continuación. A destacar que, todos ellos son comestibles, aunque algunas setas no se puedan comercializar en España para tal uso (según lo regula el RD 30/2009), en cambio, se venden en polvo/cápsulas al tratarse de productos medicinales.

- *Ganoderma lucidum* (nombre común Reishi). Es, sin duda, el hongo más utilizado para obtener productos de micelio de todo tipo (desde cuero a ataúdes). La seta (color degradado desde el granate al amarillo y blanco) se comercializa mayoritariamente como productos medicinales. Proceden de Asia, entre otros, y no se encuentra de forma natural en los bosques de Europa.
- *Lentinula edoes* (nombre común Shitake). Seta de comercialización en España para uso alimentario (parte B del RD, en fresco), de procedencia asiática.
- *Pleurotus ostreatus* (nombre común Seta ostra). El más estudiado como micelio para materiales de construcción e incluido en muchas normas de madera (ejemplo. UNE EN 113-1 parte 3). Seta de comercialización en España para uso alimentario (parte B del RD, en fresco), de cultivo común en Europa.
- *Trametes versicolor* (nombre común Cola de pavo). Destaca por su crecimiento más rápido y también aparece en muchas normas (ejemplo UNE EN 113-1 parte 3). Es un hongo mayormente utilizado en productos medicinales, procedente, entre otros de Asia entre otros, no encontrándose de forma natural en los bosques de Europa.

Además, se estudió el método de obtener el micelio de los hongos sobre el sustrato. Para tal efecto, existen distintas formas que se detallan a continuación:

- **Método en grano:**

Comúnmente utilizado en el cultivo de las setas, es muy seguro ya que permite trabajar sin necesidad de mantener unas condiciones estériles en cabina de flujo. Se compran granos de cereales, generalmente de cebada/trigo o avena, con una parte del micelio del hongo adherido a la superficie. Tras humedecerlo y mezclarlo con el sustrato de forma homogénea, el hongo se activa y empieza a colonizar el sustrato seleccionado. La desventaja de esta técnica es que introduce el grano en el sustrato, conformando en el biomaterial que se obtenga

después, siendo una fuente que no viene de la economía circular.

Para el *Pl. ostreatus*, en concreto, se comercializan los granos de cereal con micelio en sacos grandes, de 500 g a 3 kg, por una gran variedad de marcas. Por ejemplo, en “Bolets de Soca”, se encuentra información detallada del cultivo de las setas, en formato de guía, para el crecimiento en sustratos madereros entre otros. El micelio debe conservarse a 2 °C hasta su uso, siendo posible la conservación del micelio sobrante, aunque, para evitar contaminaciones, es recomendable no reutilizar las bolsas. La incubación únicamente necesita un espacio interior a oscuras y con elevada humedad a 24 °C. Es apto para la producción de setas en troncos, con un tiempo de duración que va de los 2 a 6 meses, pero también para la producción de sustratos esterilizados (elaborados con paja, astilla y/o serrín y cereales), siendo el tiempo de crecimiento requerido, mucho más corto.



Figura 7. Micelio de seta ostra en granos de cereal (fuente: boletsdesoca.com)

- **Inoculación en agar:**

Es una técnica extendida en los laboratorios de microbiología. Es eficaz y permite la distinción del hongo por su morfología. Como principal desventaja, es necesario trabajar en ambientes estériles para evitar la contaminación, por lo que lo convierte en un método especializado.

Según lo descrito en (61), una vez el crecimiento coloniza completamente el plato del agar, este puede ser cortado en pequeñas piezas e inocularse directamente en el sustrato.



Figura 8. Inoculación en la cabina de flujo laminar de las instalaciones de AIDIMME

- **Crecimiento en líquido y sumergido:**

Se implementa sobre todo en la industrialización del proceso, al permitir un crecimiento continuado del micelio. Como principal desventaja se determina la necesidad de aumentar el tiempo inicial de crecimiento, para poder generar una mezcla posteriormente mucho más manejable. En un comienzo, se parte igualmente de la placa de cultivo en agar, para trasladar el crecimiento a una fase líquida en frascos/botes adaptados para la aireación. Finalmente, en la etapa del proceso a mayor escala, se puede pasar al cultivo en biorreactores, que permite obtener una corriente en continuo.



Figura 9 Esquema de cultivo sumergido (fase líquida), desde la placa en agar al crecimiento en reactor. Fuente: Enhancing Biomass-Exopolysaccharides Production of Lignosus rhinocerus in a High-Scale Stirred-Tank Bioreactor and Its Potential Lipid as Bioenergy. Siti Rokhiyah Ahmad Usuldi

2. Actividades realizadas, desarrollo del proyecto

El principal impacto del proyecto se centra en el desarrollo de materiales constructivos completamente biodegradables, constituido por una matriz compuesta de fibras vegetales u otros restos lignocelulósicos, en el que se emplea el micelio como agente aglutinante o refuerzo. Este tipo de compuesto permite la valorización de los residuos agroforestales, resultando en un producto natural y ecológico, obteniendo biomateriales a base de micelio para varias aplicaciones, donde podrían reemplazar a los métodos tradicionales y fomentar las alternativas sostenibles.

Los objetivos son los siguientes:

- **Selección de sustratos y de cepas fúngicas.** Investigación de los sustratos provenientes de residuos agroforestales (fibras vegetales y restos de poda) y su interacción con diferentes cepas de hongos.
- **Optimización del proceso.** Experimentación con diferentes variables como temperatura, humedad, pH, acondicionamiento de sustratos, método de esterilización e inoculación, condiciones de moldeado y secado
- **Caracterización de los materiales compuestos.** Evaluación de las propiedades aislantes térmicas y acústicas, así como de las prestaciones mecánicas y otros parámetros de interés para los materiales de construcción.
- **Nuevas aplicaciones y mejora de las prestaciones:** Obtención de los biomateriales para distintas aplicaciones y exploración de nuevas alternativas.

Se han fabricado una serie de biomateriales para diversas aplicaciones. Se utilizaron dos hongos distintos inoculando con el método en agar a los sustratos provenientes de residuos agroforestales (mezcla de fibras vegetales, caña común y cáscara de arroz) para la obtención de biomateriales aislantes térmicos y acústicos. Además, se utilizó el método en grano para uno de los hongos y se inoculó otro de los residuos agroforestales (madera de pino proveniente de restos de poda). Algunas de estas muestras, se llevaron al post-tratamiento de prensado caliente (hot-press) para mejorar sus prestaciones mecánicas, obteniendo un biomaterial densificado. De manera paralela, se escogen dos sustratos comerciales (cáñamo y paja) previamente colonizados por hongos basidiomicetos, para obtener muestras de referencia y así realizar la comparativa de la caracterización de los biomateriales a base de micelio.

Los resultados obtenidos demuestran que el uso del micelio como aglutinante de sustratos es una técnica prometedora para la producción de muestras con distintas aplicaciones.

3. Resultados obtenidos

La metodología empleada en la de fabricación de biomateriales a base de micelio requiere de una serie de pasos y parámetros a tener en cuenta (4, 5, 6, 8, 11). Tras la búsqueda bibliográfica, se ha desarrollado el siguiente esquema del método seguido.

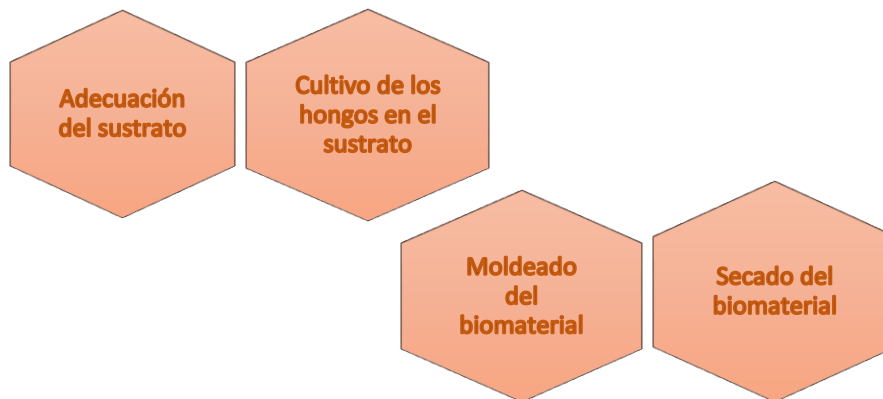


Figura 10. Esquema del proceso

- Primera etapa: sustrato. Se ha de adecuar y esterilizar los sustratos, en este caso provenientes de residuos agroforestales. Para ello, se determinan parámetros como el pH o la humedad del sustrato, así como las condiciones de esterilización (método, temperatura y tiempo).
- Segunda etapa: hongos. Se obtiene el micelio del hongo y se cultiva en el sustrato (en incubadoras, con oscuridad). Se determina el método y las condiciones de cultivo (temperatura y humedad). Este proceso es crucial para la homogeneización del material resultante, por lo que puede llevar más tiempo hasta la colonización del sustrato.
- Tercera etapa: moldeado. Se hace crecer el micelio, en un molde en contacto con la mezcla de sustratos. Las condiciones en la incubadora a oscuridad son de humedad alta (< 80%) y de temperatura media (22-27º C). El tiempo será determinante para establecer la formación homogénea del material, como mínimo se deberá dejar dos semanas de cultivo. Después, se podrá desmoldear para continuar con una estructura más aireada o mantener en el molde e incluso realizar el prensado en frío.
- Cuarta etapa: secado. Se paraliza el crecimiento del hongo para su aplicación como biomaterial. Se determina el tiempo y temperatura de secado, así como la necesidad de un posterior prensado, en frío o en caliente (11). El secado se realiza en estufas sin ventilación y el prensado se realiza en la prensa caliente, hot-press que se muestra a continuación.



Figura 11. Hot- Press en las instalaciones de AIDIMME

En total, el crecimiento del biomaterial requiere de al menos un tiempo de cultivo del hongo (en el sustrato) para una buena homogenización, independientemente del tipo que se utilice, y de un tiempo de crecimiento para la fabricación del material. Por lo que consta de un total de un mes, siendo posible extender hasta 2 y 3 meses, dependiendo de la colonización del hongo en el sustrato y su posterior homogeneización como biomaterial.

Se han fabricado un total de 5 biomateriales distintos:

- Por un lado, se han adquirido sustratos colonizados por completo por micelios de dos hongos distintos, aptos para la fabricación de biomateriales. Estos dos sustratos han servido tanto para tomar un biomaterial de referencia, así como para comparar las prestaciones obtenidas por la fabricación en AIDIMME. Para el moldeado de las muestras, se ha utilizado harina para favorecer el crecimiento en el menor tiempo posible, según recomendaciones del proveedor. Después de dos semanas de incubación, se llevaron a secado en estufa siguiendo el método propio de obtención de biomateriales.
- Además, se ha utilizado el sustrato colonizado por *Pl. ostreatus* (adquirido comercialmente) para la inoculación del sustrato de madera en el presente proyecto y obtener un biomaterial a base de micelio y residuos de *Pinus halepensis*. Se ha aditivado con harina, siguiendo las recomendaciones del proveedor. Tras dos semanas, el sustrato ha sido completamente colonizado por el hongo y se lleva a los moldes pertinentes para los ensayos. Para concluir, se seca la muestra, frenando así el crecimiento del hongo y obteniendo un biomaterial adecuado.
- De manera paralela, se han mejoran las condiciones de obtención de las muestras de micelio sobre residuos de fibras vegetales realizadas en las pruebas iniciales del presente proyecto. En ésta, se comprobó la capacidad de los hongos para fabricar los biomateriales a través de las mezclas de sustratos seleccionados. Es por ello por lo que se han realizado muestras a

mayor escala en los moldes y probetas para su caracterización. Se preparan las proporciones pertinentes de las mezclas de los sustratos, cultivando los hongos a partir de los inóculos en agar junto a dichas mezclas (sin harinas). Tras un periodo inicial de incubación, las muestras se pasan a los moldes para que el material tome su forma adecuada. Posteriormente, se secan las muestras y se procede a realizar los ensayos de resistencia, conductividad térmica, acústica etc.

Finalmente, se llevaron a ensayo las muestras de los 5 biomateriales a base de micelio para su caracterización. Además de la observación por microscopio, se han determinado propiedades tanto térmicas y acústicas, así como la resistencia mecánica (compresión y flexión) además de algunas cualidades físicas (densidad).

Los moldes utilizados para la obtención de los biomateriales varían dependiendo de las muestras resultantes para los ensayos estandarizados. Se utilizan bandejas de plástico con topes para las más grandes con forma cuadrada, de tamaño entre 26-30 cm, así como los moldes metálicos para las probetas normalizadas con forma rectangular, de 15 x 5 x 5 cm. Además, se adquieren moldes hexagonales, con la intención de generar muestras para aplicaciones modulares como podrían ser pavimentos térmicamente aislantes o bien paneles de aislamiento acústico. Se escogen dos tamaños, uno más grande de 23 x 20 cm y otro de 16 x 14 cm, ambos de 4 cm de espesor. Las muestras obtenidas son de entre 1 – 2,5 cm de espesor, pero se requiere de una buena oxigenación, por ello se deja un espacio vacío. Además, se han utilizado unos moldes para muestras demostrativas, con forma de seta.

A continuación, se muestran los moldes adquiridos y utilizados para la obtención de las muestras finales.



Figura 12. Moldes utilizados en la fabricación de los biomateriales, tanto demostrativos como para ensayos

3.1. Hongos basidiomicetos

De los cuatro hongos que más aparecen en bibliografía para su uso en biomateriales a base de micelio, se han seleccionado los siguientes:

- *Trametes versicolor* es una especie que se caracteriza por su crecimiento rápido, lo cual podrá ser interesante para la obtención de elementos de construcción en tiempo récord. Las condiciones de temperatura y humedad idóneas para su cultivo son 20-25 °C y 85-95%.



Figura 13. Seta de *Trametes versicolor* sobre árbol marchito

- También, el *Pleurotus ostreatus* parece dar buenos resultados de crecimiento del micelio por toda la estructura del sustrato, al tener una gran capacidad de crecimiento hacia varios direcciones. Las condiciones de temperatura y humedad idóneas para su cultivo son 20-25 °C y 85-95%.



Figura 14. Seta *Pl. ostreatus* sobre árbol

Tras el estudio de las alternativas, se ha escogido la inoculación en agar ante el método en grano, para no generar una entrada de sustrato que no provenga de un residuo agroforestal. En cuanto el crecimiento sumergido, se valorará para casos en los que sea necesario el crecimiento “en continuo” del micelio, con una producción de biomaterial a nivel escalado industrial.

Se han seleccionado las siguientes cepas para realizar el crecimiento según la inoculación en agar:

- *Trametes versicolor* 20148 CECT (20°C)

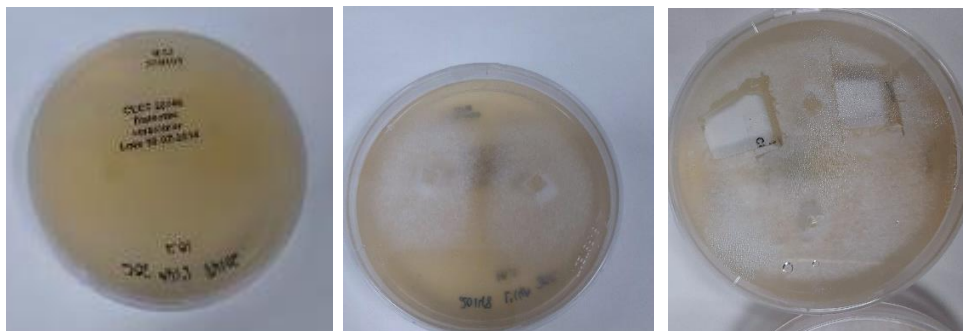


Figura 15. Cepa adquirida 20148 CECT, reverso y anverso. Dcha tras el primer pase de inoculación

- *Pleurotus ostreatus* 20813 CECT (20 °C)



Figura 16. Cepa adquirida 20813 CECT, reverso y anverso. Dcha tras el primer pase de inoculación

3.2. Selección y procesado de sustratos

En el presente proyecto, se requiere la utilización de un sustrato que provenga de residuos agroforestales locales, estando fácilmente disponible, permitiendo alcanzar un proceso sin muchos costes. De entre ellos, se estudia los de procedencia de la comunidad valenciana, los cuales se han trabajado previamente con ellos en otros proyectos. Estos son:

- Fibras de palmera (restos de poda urbanas)
- Caña común (típicamente en los cauces de ríos)
- Pino (fundamentalmente restos de poda de todo tipo)
- Cáscaras de arroz (de la producción del arroz)
- Aserrados (residuos de las industrias del tablero)

Los sustratos seleccionados son un residuo industrial de las fibras de la caña común y de la cáscara del arroz. Se obtienen distintos tamaños, habiendo comprobado su eficacia previamente en el proyecto “MOTOVEGI” así como “PRECONCEP” y “PRESOST”, alcanzando resultados muy esperanzadores para el ámbito de la construcción. Además, se recogen unas virutas de pino proveniente de restos de poda.

En el presente proyecto se utilizan los siguientes sustratos:

- Fibras de caña, *Arundo Donax*, de tamaño grande: denominadas "FIBRAS" o "FC"

Es el desecho industrial de la fabricación de cañas, considerándose un residuo de producción o subproducto de bajo valor añadido.



Figura 17. Fibras de caña de tamaño < 8 mm

- Fibras de caña, *Arundo Donax*, de tamaño pequeño: denominadas "SERRÍN" o "SC"

Viene de los restos del equipo de filtración de la producción de las cañas, es un desecho industrial y actualmente se gestiona como residuo de la fabricación.



Figura 18. Serrín de la corriente de fibras de caña

- Cáscara de arroz: denominada "ARROZ" o "CA"

Restos de la obtención alimenticia del arroz, considerado un residuo industrial o un subproducto en la producción de bajo coste añadido.



Figura 19. Cáscara de arroz

- Pino, *Pinus halepensis*:

Los restos de poda del pino han sido triturados para obtener una fracción manejable a nivel laboratorio. Se considera un residuo agroforestal, de un árbol típicamente mediterráneo y que puede causar problemáticas de gestión cuando hay excedencia.



Figura 20. Pino *halepensis*

Las fibras y cáscara de arroz no vienen trituradas, pero la diferencia en tamaño de cada una de las corrientes es evidente. Por otra parte, el pino se ha triturado en AIDIMME para facilitar su manipulación, obteniéndose una longitud máxima de 5 mm. El sustrato denominado “Fibras de caña”, se ha tamizado para obtener una longitud de 4-8 mm, permitiendo una consistencia estructural suficiente. Mientras que la corriente “Serrín de caña”, es muy compacta, con la intención de utilizarla en mezcla de las dos otras corrientes (fibras de caña y cáscara de arroz) para favorecer el crecimiento del hongo, al estar los nutrientes más disponibles. Por último, la cáscara de arroz tiene un tamaño

intermedio, siendo de estructura más fina y dura.

A continuación, se detallan una serie de factores que podrán afectar en mayor o menor medida a la disponibilidad del sustrato para el hongo.

➤ Humedad:

La humedad del sustrato es un factor fundamental para el crecimiento favorable del hongo. Se ha de acondicionar los sustratos para que sean asimilables por el hongo, ya que suele ser necesario aumentar la humedad de las fibras y compuestos agroforestales, al presentarse en su forma seca.

En este caso, se ha determinado que, un porcentaje cercano al 50% será el óptimo, calculándose como la diferencia entre el peso húmedo y el peso en seco. Pero también son adecuados porcentajes de hasta el 66%. Para ello, se podrá retirar la humedad excedente de distintas maneras, escurriendo en los recipientes, por decantación y/o filtrado, con el uso de papel filtrado etc.

➤ pH:

Por lo general, se ha de aumentar el pH, como medida de acondicionamiento para la generación de los biomateriales, ya que suelen ser más ácidos y pueden causar deficiencias. Pero, se ha de determinar las sustancias químicas adecuadas que puedan favorecer al crecimiento del hongo debido a que no es recomendable obtener valores de pH por encima del 6,8 - 7,5. De hecho, los medios de cultivo generalistas para los hongos suelen ser ajustados a pH 5,6.

Por ello, hay varios métodos para alcanzar un aumento en el parámetro. En muchas referencias bibliográficas se indica que es adecuado utilizar una solución alcalina, dejando a remojo durante varias horas. Se ha registrado varios compuestos que pueden utilizarse:

- Cal viva o hidróxido cálcico. Para 100 g de sustrato, se puede añadir medio litro de solución con 5 g de CaO en total 0,5% (66)
- Carbonato cálcico, que puede ser utilizado como micronutriente
- Sulfato cálcico, yeso. Como solución tampón, también se ha utilizado.

En algunos métodos de cultivo de setas, se ha referenciado el uso de la solución alcalina como práctica de desinfección alternativa, cuando no es posible realizarlo con calor (autoclave o agua hirviendo). Sin embargo, la eficacia del proceso no está comprobada para los sustratos de los biomateriales, además de que dicha inmersión es mucho más prolongada en el tiempo.

➤ Esterilización:

La esterilización del sustrato también es un factor importante, que depende, en mayor medida, del sustrato de partida. La contaminación puede frenar el crecimiento del hongo deseado, así como dañar al biomaterial tras la incubación. Es posible pasteurizar las fibras vegetales, pero para el resto de los sustratos madereros, preferiblemente se requiere de autoclave, para que penetre en la estructura interior. Se puede, por tanto, hervir las fibras en un recipiente con agua, pero requiere de mucho más tiempo de esterilización (1 -2 horas). En cambio, con el uso del autoclave, la duración puede ser de alrededor de 10 - 20

minutos.

La preparación del sustrato consiste en, inicialmente, mantenerlo el día anterior en inmersión con agua o solución alcalina, midiendo el pH cuando sea requerido. Después, en este caso, se ha optado por la esterilización por autoclave, utilizándose como referencia la norma UNE-EN 113-3:2023. En ésta, se determina que las probetas deberán ser esterilizadas durante 20 minutos y posteriormente, a las 24h, se repite una segunda operación durante 10 minutos. La temperatura estándar de esterilización son 121°C, aunque, en algunos casos, se decide adecuar el parámetro a las muestras, reduciendo a 110 °C al ser fibras bastante más finas que las probetas de madera. Finalmente, se mantienen los ciclos establecidos en la norma (121 °C, 20 minutos y el día consecutivo 10 minutos), para prevenir de la posible contaminación.



Figura 21. Izq. sustratos individuales siendo introducidos al autoclave en los recipientes acorde a su volumen. Dcha sustrato de caña (mezcla fibra y serrín) después de la esterilización por autoclave en bolsas para tal fin

A continuación, se muestran los diferentes sustratos de fibras, cubiertos completamente por 300 ml de la solución alcalina (de concentración 8,33 g/l de Ca(OH)_2), durante al menos 18 h.



Figura 22. Sustratos en remojo durante al menos 18h en la solución alcalina

Tras esto, se retira la solución alcalina y se mide el pH tras la primera esterilización. Se ha ido ajustando el pH, reduciendo la cantidad de Ca(OH)_2 que se le añade a la solución

alcalina, al observar que, sobre todo, la muestra de cáscara de arroz da valores por encima de lo deseado (pH del sustrato de arroz ligeramente por encima que el de la caña, pH = 5,6). Finalmente, la concentración adecuada (intermedia para las dos corrientes de sustrato) es de 1 g/l, en suficiente volumen de solución para cubrir todo el sustrato.



Figura 23. Líquido para la medición del pH, recogido tras la adecuación del sustrato

Para un buen crecimiento, la humedad del sustrato a inocular no podrá superar el 66% de la humedad con respecto al peso en seco (frente al peso en húmedo), siendo lo óptimo lograr el 50%. Para alcanzar dicha humedad, se utilizan diversas técnicas de filtrado y reducción de la humedad. Primero, se utiliza la propia bolsa de esterilización para retirar el máximo de solución acuosa posible, incluso por decantación. Posteriormente, y siempre y cuando sea un proceso entre una esterilización y la siguiente, se ha podido filtrar con papel de filtro y embudo, así como extender el sustrato en el papel de filtro para retirar la humedad

La siguiente imagen muestra algunas de las técnicas utilizadas para retirar la humedad. El papel de filtro se obtura muy rápidamente, por lo que no es buen método por si solo. Pero se utiliza para acompañar la decantación de la bolsa con embudo.



Figura 24. Métodos para eliminar parte de la humedad en los sustratos

En cuanto al sustrato de madera, el *Pinus halepensis*, se ha dejado a remojo en agua durante 24h para humedecer y ablandar y se ha esterilizado a 121 °C, 20 minutos en dos días consecutivos, en bolsas de autoclave. El pH es de alrededor de 5,5, adecuado para

el crecimiento de los hongos.



Figura 25. Tratamiento del sustrato *Pino halepensis* en inmersión alargada en agua

Para las mezclas de las fibras, los sustratos se trituran con molino eléctrico para la trituración de grano con cuchillas. El aparato es vibratorio, permitiendo girar el cuerpo del molinillo durante la trituración para alcanzar moliendas más homogéneas.



Figura 26. Izqda. Molino para la trituración del grano. Dcha trituración de la fibra de caña en molino

Además, tras la trituración, se tamiza para separar y/o descartar por tamaño y algunos de estos se vuelven a moler para obtener resultados más finos, siendo otros descartados por ser un polvo más complicado de manipular.



Figura 27. Izqda. Fracción caña tamizado fibras $< 6\text{ mm}$ y $> 3\text{ mm}$. Dcha. Polvo cáscara de arroz tamizado $< 2\text{ mm}$

Las esterilizaciones son realizadas en bolsas de autoclave, al haber aumentado el

volumen. Además, se realizan con la solución alcalina para poder mantenerlas a remojo durante el enfriado.

3.3. Crecimiento del hongo en el sustrato

Inicialmente, se realizan pruebas para comprobar el crecimiento de los hongos cultivados en AIDIMME en las fibras vegetales seleccionados, que provienen de residuos agroforestales. En el anexo de la presente memoria, se describe lo realizado. Las primeras conclusiones obtenidas se recogen a continuación:

- Se ha visto que el mejor sustrato para favorecer el crecimiento de *Pl.ostreatus* es la fibra de caña, pero con un tamaño adecuado, siendo un avance prometedor para la obtención del biomaterial.
- En cambio, para *T. versicolor*, parece que el sustrato más conveniente en cuanto al crecimiento del hongo es la cáscara de arroz. Pero el sustrato no resulta adecuado en grandes proporciones para la obtención de un biomaterial resistente, por lo que se ha de mezclar con otros sustratos.
- La mezcla de ambos sustratos, cáscara de arroz y fibras de caña, ha demostrado ser de vital importancia para obtener un biomaterial adecuado
- Además, como diferencias entre los hongos, se observa que el biomaterial creado a partir de *Pl. ostreatus*, tiene un aspecto cristalizado en algunas zonas de su superficie tras el secado. Mientras que el *T. versicolor* mantiene una capa algodonosa.

Tras el aprendizaje resultante de esta prueba, se han cultivado los hongos sobre los residuos agroforestales para la fabricación del biomaterial. El crecimiento de los hongos en los laboratorios de AIDIMME se ha realizado con dos tipos distintos de sustrato:

- Mezcla de *Pinus halepensis* proveniente de los restos de poda y un sustrato comercial de paja colonizado por *Pl. ostreatus* bajo el método spawn (inoculación en grano de cereal)
- Mezclas de fibra de caña y cáscara de arroz para la colonización de *T. versicolor* y *Pl. ostreatus*, bajo el método del agar. Se ha hecho crecer el hongo en una cantidad pequeña del sustrato para que, después, ésta pueda colonizar el resto del sustrato

Por otra parte, se utilizan dos tipos de hongos con sustratos comerciales, éstos son *Ganoderma lucidum* junto al cáñamo, así como *Pl. ostreatus* junto a la paja y cierto porcentaje de cáscara de almendra y salvado.

El sustrato de cáñamo se ha escogido al ser, por sí mismo, un material de referencia en la bioconstrucción. Además, el hongo “seta reishi” (*Ganoderma lucidum*) es el micelio más utilizado para la obtención de biomateriales en cualquier ámbito. Por otra parte, se ha seleccionado el *Pl. ostreatus* para poder comparar las prestaciones de las muestras con aquellos biomateriales obtenidos de la colonización en los laboratorios AIDIMME.

Según indicaciones del producto adquirido, es recomendable añadir entre 5-10% de harina para el moldeado. El sustrato viene en una bolsa cerrada, estando completamente colonizado por el hongo. Una vez abierto, se ha de desmenuzar de

manera homogénea y añadir agua si fuese necesario. Finalmente, se pasa a los moldes y se incuba durante dos semanas, desmoldeando a mitad del proceso para que ambos lados tomen resultados finales similares.

- *Cañamo con Ganoderma lucidum*

El sustrato ha sido inoculado a través del método del grano “spawn”. Al mezclarlo para su homogeneización, se observan los granos de cereal que han servido para el crecimiento del micelio, así como el sustrato de cáñamo muy triturado.



Figura 28. Sustrato adquirido a base de cáñamo colonizado por Reishi, *Ganoderma lucidum*

- *Paja con Pl. ostreatus*

El sustrato ha sido inoculado a través del método del grano “spawn”. Al mezclarlo para su homogeneización, se observan los granos de cereal que han servido para el crecimiento del micelio, así como el sustrato de paja muy triturado. Además, en este caso, se le ha aportado una fuente extra de carbono, como puede ser la cáscara de almendra y una porción de salvado.

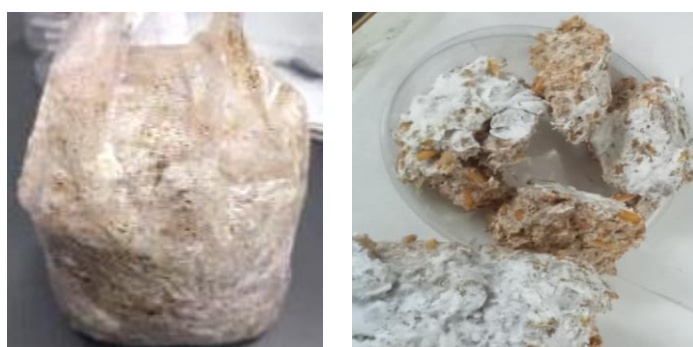


Figura 29. Sustrato adquirido a base de paja y cáscara de almendra colonizado por Ostra gris, *Pleurotus ostreatus*

3.3.1. *Pinus halepensis*

Se detalla la única mezcla realiza para el sustrato de madera junto a *Pl. ostreatus*, con el objetivo de comprobar la sinergia entre el residuo de pino y el hongo (ya que la especie del árbol no es la más favorable para el hongo, siendo el tronco de chopo el más adecuado).

El sustrato de *Pinus halepensis* se ha triturado para obtener partículas de madera de no más de 5 mm. Tras el tratamiento de inmersión prolongada en agua esterilizada (24h) y esterilización en dos días consecutivos (121 °C, 20 minutos), se ha dejado enfriar para su inoculación.

Con el fin de inocular la madera, se ha utilizado el sustrato de paja y cáscara de almendra con salvado previamente colonizado por el hongo *Pl. ostreatus*. Para ello, se ha utilizado un 30% aproximadamente (peso húmedo) de sustrato de paja colonizada comercialmente y mezclándolo con el 70% del pino esterilizado. A esta mezcla se le ha añadido un 5-10% de harina para favorecer el crecimiento del hongo, ya que así lo determina el proveedor para su uso en la fabricación de biomateriales.

Finalmente, tras dos semanas de incubación bajo condiciones de 24 °C y humedad relativa mayor al 95%, el sustrato de madera ha sido completamente colonizado por *Pl. ostreatus*. Se ha demostrado, por tanto, que el *Pinus halepensis* puede ser un buen sustrato para la obtención de los biomateriales.



Figura 30. Inoculación del pino halepensis con *Pl.ostreatus* sobre sustrato de paja y su completa colonización después de dos semanas de crecimiento inicial

Una vez alcanzada la colonización del sustrato realizado en AIDIMME, se efectúan las mezclas adecuadas para obtener los biomateriales a base de fibra de caña y cáscara de arroz. En cuanto a la mezcla de residuos madereros, se obtiene un nuevo sustrato totalmente colonizado por el hongo, que se puede utilizar para la fabricación de biomateriales.

3.3.2. Fibras vegetales

A continuación, se muestran las mezclas realizadas para obtener los biomateriales a base de fibra de caña común y cáscara de arroz.

Se trituran el sustrato de fibras de caña (<8 mm) para conseguir dos tamaños, unas fibras adecuadas (tamizadas entre 6 mm y 3 mm) y otras para obtener las dimensiones del serrín que facilita la compactación. Además, se tritura la cascara de arroz para fomentar la asimilación de la matriz por el hongo, ya que puede resultar más dura. Se tamiza a 3 mm, retirando el polvo que se obtiene (< 2 mm).

Se preparo una pequeña cantidad de sustrato para que, una vez colonizado por cada uno de los hongos, sirviese de inóculo para un peso total mucho más grande. Inicialmente, se realizaron las mezclas M1 y M2 con proporciones distintas de caña y cáscara de arroz para inocular las mezclas M3 y M4, favoreciendo así el crecimiento en dos etapas. Desafortunadamente, la mezcla M1 se vio contaminada y, por tanto, se

preparó una cantidad mayor de M2 para los dos hongos.

➤ M2: mejora de la esterilización del sustrato y cultivo en dos etapas

Se preparan las mezclas para obtener una matriz con más cantidad de cáscara de arroz para fomentar el crecimiento de *T. versicolor*. De igual manera, se utilizará una parte del sustrato para inocular con *Pl. ostreatus*, ya que también se ha observado buen crecimiento en este tipo de matriz (aunque las muestras con mayor cantidad de cáscara de arroz para este hongo son mucho más quebradizas que las de fibra de caña). Se preparan 600 g totales de la mezcla en seco, dejando aproximadamente un 40% para las muestras de *Pl. ostreatus*. Las proporciones de la mezcla de sustratos para M2 son las siguientes:

- Fibra y serrín de caña triturados 50%
- Polvo de caña (<2 mm) 10%
- Cáscara de arroz titurado 40%

Se esteriliza la mezcla de sustratos en tres ciclos, el primero y segundo 110 °C 10 minutos y el tercero 120 °C durante 20 minutos. Se prepara la solución alcalina, con una concentración de Ca(OH)₂ intermedia (1 g/l), obteniendo un pH de la mezcla de 6,61 tras 24 horas en inmersión. En la segunda esterilización se adiciona el micronutriente CaCO₃ a razón de 2 g/l, únicamente en 300 ml, para favorecer el crecimiento. Tras la esterilización, se retira rápidamente la solución sobrenadante para que la humedad de la muestra no aumente en exceso.

Con respecto a la humedad del sustrato, tras retirar la primera solución alcalina, el peso en húmedo del sustrato queda algo por encima del 66 % de humedad. Para reducir ese valor, después de la filtración en embudo del sustrato y con el uso del papel de filtro si es posible, además, se seca con el papel de filtro extendiendo el sustrato. Tras la segunda esterilización, se obtiene un peso de 1,5 kg. Finalmente, se deja enfriar después de la tercera esterilización y se comprueba que el peso húmedo se ha mantenido muy similar, ligeramente por debajo del 60% de humedad.

Se inocula el sustrato con alrededor del 5-10% en peso del hongo en agar, tanto en las bolsas con microperforaciones (*Pl. ostreatus* y *T. versicolor*), así como en el molde grande con forma de hexágono grande a una carga media (*T. versicolor*). Se lleva a una incubación con condiciones de temperatura entre 25 – 28 °C, así como una alta humedad de entre 85-95%.

A) Pl. ostreatus: 4 semanas de cultivo con poco crecimiento

Bolsa con microperforaciones con 560 g en húmedo de la mezcla de sustratos (caña y cáscara de arroz), inoculado con una placa del hongo. Es posible que no se hayan realizado las suficientes microperforaciones en la bolsa para la aireación adecuada.

Después de tres semanas de cultivo, se encuentra, únicamente en una parte inferior de la bolsa, con bastante crecimiento del micelio y se mantiene otra semana más a una temperatura de 25 °C. Tras ello, se considera que la mezcla requiere de mayor crecimiento ya que no se ha formado una compactación del biomaterial. Si bien es cierto que, finalmente, se utiliza

para la inoculación de nuevo sustrato, se le añade nuevamente inóculos del hongo para mejorar el crecimiento. Para ello, tras las observaciones registradas para dicha mezcla y durante las pruebas iniciales, se prepara nuevo sustrato con las fracciones adecuadas para favorecer el crecimiento del hongo y así, junto a este sustrato, fabricar los biomateriales a base de micelio para la caracterización y obtención de resultados.

B) *T. versicolor*: 4 semanas de cultivo y ha habido un crecimiento máximo.

- Bolsa con microperforaciones con 440 g de mezcla de sustratos en húmedo, inoculado con una placa de *T. versicolor*. Esta muestra ha sido completamente colonizada por el hongo, se ha formado el biomaterial compacto, pero sin una forma determinada. Se utiliza para la inoculación de nuevo sustrato, en moldes
- Molde grande hexágono, carga media, con 400 g de mezcla de sustratos en húmedo, inoculado con una placa de *T. versicolor*. El crecimiento ha sido adecuado, aunque no ha colonizado por completo. Se requeriría de más tiempo para fabricar el biomaterial compacto por completo. Aun así, la muestra no es quebradiza y forma porciones muy aglomeradas.



Figura 31. Esterilización del sustrato en bolsas para autoclave (izqda.) e inoculación en los moldes (centro) y bolsas perforadas (dcha.)

Como se observan en las imágenes a continuación, tras 4 semanas de crecimiento, el hongo ha colonizado el sustrato.



Figura 32. Sustrato M2 colonizado por el hongo

➤ M3: sustrato preparado para favorecer el crecimiento de *T. versicolor*

Se prepara la mezcla según las proporciones de la tabla. Se esteriliza en 2 días consecutivos, justo antes del cultivo con los hongos, según las condiciones descritas en la norma estándar EN 133-3: 2023 (primero 121 °C, 20 minutos luego

121°C, 10 minutos). Se mantiene la mezcla en inmersión prolongada en una solución alcalina de 3 litros con 3 g de Ca(OH)₂. Se retira la humedad, escurriendo lo máximo posible la mezcla, hasta alcanzar menos del 60%, siendo el peso en seco 400g y en húmedo 976 g. El pH final es de 7,17. Las proporciones de la mezcla de sustratos para M3 son las siguientes:

- Fibra y serrín de caña triturados 44%
- Polvo de caña (<2 mm) 31%
- Cáscara de arroz titurado 25%

La mezcla M3 se integra completamente con M2 cultivada anteriormente junto a *T. versicolor* durante 4 semanas y se lleva a incubación (25 °C, 90%) en moldes para la fabricación del biomaterial. La mezcla total obtenida contiene un menor porcentaje de cáscara de arroz para fomentar que no se fracture el biomaterial.

Tabla 4. Proporciones de las mezclas de sustratos para la obtención de biomateriales a base de *T. versicolor*

Tipo	Fibra + serrín caña	Polvo caña	Cáscara de arroz
M2	180	36	144
M3	175	125	100
Total	355,00	161,00	244,00
%	47	21	32

➤ M4: sustrato preparado para favorecer el crecimiento de *Pl. ostreatus*.

Se prepara la mezcla según las proporciones de la tabla que se muestran abajo. Se esteriliza en 2 días consecutivos, justo antes del cultivo con los hongos, según las condiciones descritas en la norma estándar EN 133-3: 2023 (primero 121 °C, 20 minutos luego 121°C, 10 minutos). Se mantiene la mezcla bajo inmersión prolongada en una solución alcalina de 3 litros con 3 g de Ca(OH)₂. Se retira la humedad, escurriendo lo máximo posible la mezcla, hasta alcanzar menos del 60%, siendo el peso en seco 450 g y en húmedo 1344 g. El pH final es de 6,80. Las proporciones de la mezcla de sustratos para M3 son las siguientes:

- Fibra y serrín de caña triturados 44%
- Polvo de caña (<2 mm) 44%
- Cáscara de arroz titurado 11%

La muestra M4, se mezcla íntegramente con la M2 cultivada con *Pl. ostreatus* durante 4 semanas, quedando las proporciones como se reflejan en la tabla a continuación.

Tabla 5. Proporciones de las mezclas de sustratos para la obtención de biomateriales a base de *Pl. ostreatus*

Tipo	Fibra + serrín caña (g)	Polvo caña (g)	Cáscara de arroz (g)
M2	120	24	96
M4	200	200	50

Total	320,00	224,00	146,00
%	46	32	21

Se inocula nuevamente con una placa de cultivo en agar de crecimiento medio del hongo y se lleva a incubación (25 °C, 90%) para fomentar la colonización por completo del sustrato. Tras otras cuatro semanas extras de cultivo en un sustrato más conveniente para el hongo (menor cantidad de arroz), se ha visto que el crecimiento era adecuado y se pasa a moldes para la obtención de las probetas del biomaterial.



Figura 33. Sustrato M2+M4 colonizado por el hongo *Pl. ostreatus*, después de un total de dos meses de incubación

3.4. Fabricación del biomaterial a base de micelio

Las muestras preparadas a base de las mezclas propias de sustratos de fibras y la incubación en AIDIMME se llevan a moldes para el desarrollo de un biomaterial. Además, se ha adquirido sustratos colonizados por algunos hongos, para su comparación como material de referencia, que también se ha llevado a moldes, así como para realizar posibles mejoras del biomaterial propio. Para mejorar la obtención de los biomateriales y reducir el tiempo de incubación, se ha propuesto adicionar una pequeña cantidad de harina a los sustratos ya colonizados por los diversos hongos.

3.4.1. Cañamo con *Ganoderma lucidum* – comercial (material de referencia)

El sustrato adquirido, de cáñamo previamente colonizado, se ha mezclado con un 5-10% de harina como indica el proveedor para su moldeado. Tras una semana en los moldes para los ensayos de conductividad térmica y resistencia, se ha retirado el molde para una mayor aireación en ambos lados y se deja otra semana más hasta finalizar su crecimiento.

Se ha observado la generación de una “piel” alrededor de la superficie del biomaterial, obteniendo además cambios de color, pasando de un micelio blanco a zonas anaranjadas/marrón oscuras. Esto va en consonancia con lo advertido por el proveedor, quedando zonas donde se ha sobreincubado el hongo. Es decir, cuando el micelio se deja crecer más tiempo del necesario antes de iniciar la fructificación (la formación de setas). El hongo puede haber consumido el sustrato, generando cierta deformación, ya que sus condiciones y estructura física pueden haber sido alteradas. Debido a la descomposición y compactación del sustrato por la sobreincubación, es posible que la muestra pierda volumen aparente y que afecte negativamente a las propiedades del material. Por lo contrario, la piel aporta a la muestra cierto acolchamiento al tacto, incluso después del secado. Esto ocurre, entre otros, ya que la quitina presente en las

hifas ha sido transformada en quitosano.



Figura 34. Moldeado final para el cáñamo con micelio

El secado de las muestras se ha realizado según el método propio, durante dos ciclos distintos de temperatura: 2h a 110 °C y varios días consecutivos a 40 °C hasta obtener masa constante.

Al final del secado, es evidente el aumento de la degradación del sustrato, al obtener muestras con cierto pandeo (muy notable en la muestra hexagonal). Además, todas ellas han sufrido un encogimiento mayor a lo esperado, aproximadamente de 3 cm por cada lado en la plancha y un 10% de media. Las muestras demuestran una alta compactación y rigidez, aunque la piel le aporta cierto acolchonamiento.

Secado	Antes (desmolde)	Después
Plancha conductividad térmica		
Bloque resistencia mecánica		
Hexágono Grande		

Figura 35. Biomaterial a base de Ganoderma lucidum y cáñamo

La muestra hexagonal deformada (de 21 x 19 cm), ha sido llevada a la prensa caliente para la densificación de la pieza. Se ha sumergido en agua durante 3 horas para recuperar cierta flexibilidad al estar completamente seca. Se introdujo en la hot-Press durante un total de 20 minutos a 120 °C a presiones de 3 a 6 bares. Inicialmente, la muestra tiene un espesor de 1,5 cm y se prensa a 1 cm con una presión de 3 bares durante 10 minutos, para reorganizar el material. Después se lleva a una presión de 6 bares durante 5 minutos, donde pasa a ocupar 4 mm de espesor y finalmente, se mantiene 5 minutos más a 4 bares. La pieza queda completamente densificada, sin ocurrir ningún otro cambio aparente.



Figura 36. Prensado en caliente de la muestra hexagonal, quedando densificada

3.4.2. Paja y cáscara de almendra con *Pl. ostreatus* – comercial

El sustrato adquirido, de paja previamente colonizado, se ha mezclado con un 5-10% de harina como indica el proveedor para su moldeado. Tras una semana en los moldes para los ensayos de conductividad térmica y resistencia, se ha retirado el molde para una mayor aireación en ambos lados, dejándolo otra semana más en incubadora.



*Figura 37. Moldes finales para *Pl. ostreatus* en sustrato M2+M4*

El secado de las muestras se ha realizado según el método propio, durante dos ciclos distintos de temperatura: 2h a 110 °C y varios días consecutivos a 40 °C hasta obtener masa constante. En algunas zonas de las muestras, se puede observar la aparición de la “piel”, que ocurre al sobre-incubar, decidiendo parar el crecimiento antes de que ocurra en más zonas.

<i>Secado</i>	Antes (desmolde)	Después
Plancha conductividad térmica		
Bloque resistencia mecánica		

Figura 38. Biomateriales a base de *Pl. ostreatus* en paja y cáscara de almendra

Después de secar las muestras, se observa un encogimiento de las mismas mayor al esperado, pero no tanto como las muestras de reishi-cañamo. La muestra tiene una compactación elevada y cierta rigidez.

3.4.3. Pino halepensis (cultivado en AIDIMME) mezclado con paja y *Pl. ostreatus*

Tras la colonización del sustrato de madera por el hongo *Pl. ostreatus* adquirido como sustrato comercial de paja con micelio, se ha pasado a los distintos moldes. Los moldes se han llevado a incubación durante otras tres semanas más bajo condiciones de cultivo (22 °C, humedad < 90%). Tras la primera semana, se ha desmoldeado las muestras y nivelado la superficie para favorecer la homogeneización.

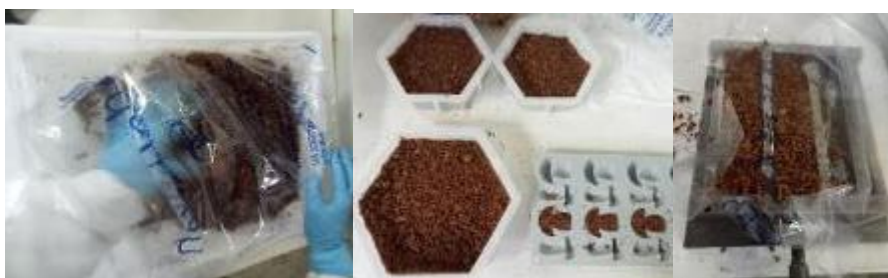


Figura 39. Moldes finales para *Pl. ostreatus* en *Pino halepensis*

El secado de las muestras se ha realizado en varios ciclos, inicialmente a 110 °C durante 2 horas para, después, dejarlo 18 horas a 90 °C permitiendo la pérdida de la humedad. Tras esto, se deja a 50 °C y en la cámara en condiciones estándar (23 °C 50 % de humedad) hasta alcanzar la masa constante.

Secado	Antes (desmolde)	Después (tras secado)
Plancha conductividad térmica		
Bloque resistencia mecánica		
Hexágonos varios tamaños		
Setas demostrativas		

Figura 40. Biomaterial a base de *Pl. ostreatus* y pino halepensis realizado en AIDIMME

Dos muestras hexagonales de 13 x 15 cm se han prensado en caliente para obtener distintas densidades. La muestra que inicialmente se ha preparado con un espesor de 4 cm, ha alcanzado los 15 mm obteniendo una apariencia de tablero densificado (habiéndose cambiado de color a marrón oscuro). Mientras que la muestra de 3 cm se ha prensado hasta obtener un espesor de 2 cm, equiparable a las demás muestras, pero más compactada. Las condiciones en la hot press para ambas han sido de 120 °C durante un total de 40 minutos, inicialmente a 2 bares (8,3 kg/cm²). La densificación a 15 mm de la muestra fue lograda aumentando la presión a 4 bares (16,7 kg/cm²) durante los últimos 20 minutos, habiéndose desbordado parte del material y perdiendo 22 gramos en total (13% en húmedo). A pesar de ello, la muestra mantuvo la forma de origen hexagonal, aunque con los bordes irregulares.



Figura 41 Antes (arriba izda.), durante (arriba centro) y después (las demás) del prensado en caliente de las dos muestras

3.4.4. Caña y cáscara de arroz con *Pl. ostreatus* (cultivado en AIDIMME)

Para la sinergia de *Pl. ostreatus* junto al sustrato de caña y cáscara de arroz, se han obtenido las siguientes proporciones: 46% de fibra de caña y serrín, 32% polvo de caña y únicamente un 21% de cáscara de arroz.

Tras el largo periodo de cultivo hasta que el hongo ha colonizado por completo el sustrato (> a un mes), se ha pasado a los moldes y se han llevado a incubación (24 °C y < 90% de humedad):

- Probetas “bloque” rectangulares normalizadas para construcción
- Probeta “plancha” conductividad térmica 30 x 30 cm
- Muestra hexagonal grande para pruebas acústicas
- Muestras demostrativas en forma de seta



Figura 42. Moldes finales para *Pl. ostreatus* en sustrato M2+M4

Tras dos semanas de incubación, se ha pasado a desmoldar y comprobar el crecimiento. Se deja otras dos semanas más para la homogenización completa de la muestra. En total, la muestra se ha dejado un mes antes del secado, procediendo en dos ciclos: 2 horas a 110°C y varios días consecutivos a 40 °C hasta obtener masa constante.

Secado	Antes	Después (tras secado)
Plancha conductividad térmica		
Bloque resistencia mecánica		
Hexágonos		
Setas demostrativas		

Figura 43. Biomateriales a base de *Pl. ostreatus* en caña y cáscara de arroz realizado en AIDIMME

Se ha observado que las muestras más grandes no han sido compactadas como se esperaba. Mientras que las muestras pequeñas han conseguido la apariencia adecuada. Esto demuestra que se ha de aditivar con una fuente de carbono extra para favorecer el crecimiento inicial homogéneo e impidiendo la aparición de las brechas.

3.4.5. Caña y cáscara de arroz con *T. versicolor* (cultivado en AIDIMME)

Una vez colonizado el sustrato por el hongo, se pasan a los moldes. Las proporciones del sustrato son las siguientes: caña común en fibra-serrín 47% y en polvo 21%, con un 32 % de cáscara de arroz.

Se pasan a los moldes

- Probetas “bloque” rectangulares normalizadas para construcción
- Probeta “plancha” conductividad térmica 30 x 25 cm

- Muestra hexagonal grande para pruebas acústicas
- Muestras hexagonales pequeñas para prensados en frío y caliente
- Muestras demostrativas en forma de seta



Figura 44,. Mezclado de sustratos (inoculado y no inoculado) manualmente y moldeado

Tras 3 semanas de crecimiento, se desmolda y se deja otra semana más con algunos cambios en función del aspecto del biomaterial. Todas las muestras y probetas se desmoldan y se voltean para mejorar la homogeneización en la cara que no estaba en contacto con los respectivos moldes. Los bloques y las setas se dejan sin molde para su completa aireación, mientras que las demás se vuelven a meter en los moldes con prensado, realizado con unos topes de madera que ejercen presión a los lados y arriba. Tras un total de 4 semanas de cultivo después del crecimiento del micelio (etapa de colonización del sustrato), se lleva a cabo el secado.

<i>Secado</i>	Antes	Después (tras secado)
Plancha conductividad térmica		
Bloque resistencia mecánica		

Hexágonos		
Setas demostrativas		

Figura 45. Muestras realizadas en AIDIMME del biomaterial a base de *T. versicolor* en caña y cáscara de arroz

Posterior al secado, además, se realiza el prensado en caliente de una de las muestras. Se inicia el prensado a una temperatura de 80 °C en la hot press, a una presión de 2 bares para un espesor de 2 cm. Se le aplica una presión de 6 bares () durante 10 segundos y se reduce el espesor a 1 cm. Por lo que se mantiene la presión de 2 bares para la posición 9 mm durante 20 minutos, volteando la muestra una vez para que las caras queden homogéneas. Finalmente, debido a que la muestra vuelve a pandearse, se aplica 110°C durante 10 minutos 2 bares, quedando la muestra a un espesor de 8 mm.



Figura 46. Hot Press *Trametes versicolor* caña y cáscara de arroz

Ambas caras de la muestra quedan mucho más regulares y se aprecia la mayor compactación de la muestra, aunque no se ha densificado la pieza.

3.5. Caracterización

Las muestras obtenidas se llevan a ensayos para la caracterización, que se muestran en la siguiente tabla. Desgraciadamente, durante el curso del secado, las probetas de *Pl. ostreatus* en caña y cáscara de arroz (propias de AIDIMME) para determinar las propiedades acústicas y térmicas se han cuarteado demasiado, siendo imposible realizar los ensayos pertinentes.

Tabla 6. Resumen de las muestras obtenidas a base de micelio

Hongo - sustrato	Plancha 26-30 x 26-30 cm	Hexágono 19 x 21 cm	Bloques 14 x 3,5 x 3,5 cm	Hexágonos 13 x 15 cm
Reishi - Cañamo (REFERENCIA)	(*) Espesor: 2,5 cm Ensayo Conductividad Térmica y aislamiento acústico	(*) Espesor: 1,5 cm antes de Hot press	(*) Ensayos Resistencia Mecánica	x
Pleorotus – Paja (COMERCIAL)	Espesor: 2 cm Ensayo Conductividad Térmica y aislamiento acústico	x	Ensayos Resistencia Mecánica	x
Pleorotus – PINO (AIDIMME)	Espesor: 2 cm Ensayo Conductividad Térmica	Espesor: 2 cm Ensayo Aislamiento Acústico	Ensayos Resistencia Mecánica	Espesor: 3 y 4 cm antes de Hot press
Pleorotus – caña y arroz (AIDIMME)	Espesor: 2 cm x	Espesor: 2 cm x	Ensayos Resistencia Mecánica	x
Trametes - caña y arroz (AIDIMME)	Espesor: 2,5 cm Ensayo Conductividad Térmica	Espesor: 2,5 cm Ensayo Aislamiento Acústico	Ensayos Resistencia Mecánica	Espesor: 2 cm antes de Hot press

(*) Nota. Se ha sobreincubado, apareciendo una “piel” por toda la superficie de la muestra, quedando más encogida de lo previsto durante el secado.

A continuación, se pueden observar algunas de las muestras realizadas en AIDIMME, así como las referencias comerciales.

T. <i>versicolor</i>	Plancha 2x cm x 2x cm	Hexágono 21 x 19 cm
Mezcla propia de caña común y cáscara de arroz		

Figura 47. Biomateriales de fibras vegetales y micelio, producidos con el Proyecto financiado FONDOS GVA

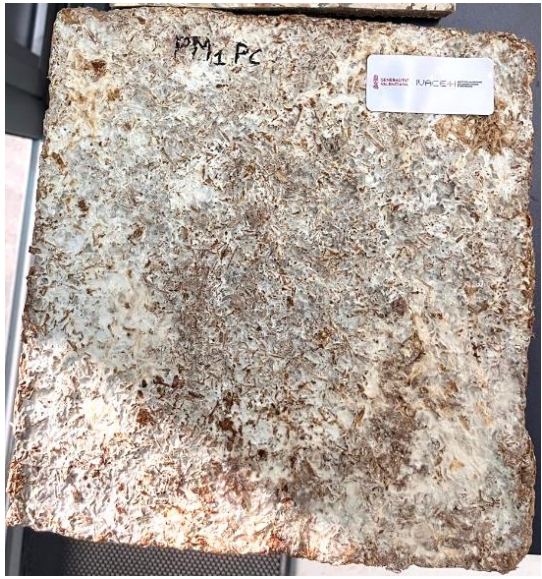
Pl. ostreatus	Plancha (no prensada)	Hot press (densificado arriba)
Pinus halepensis mezcla propia con paja		

Figura 48. 49. Biomateriales de madera y micelio, producidos con el Proyecto financiado FONDOS GVA

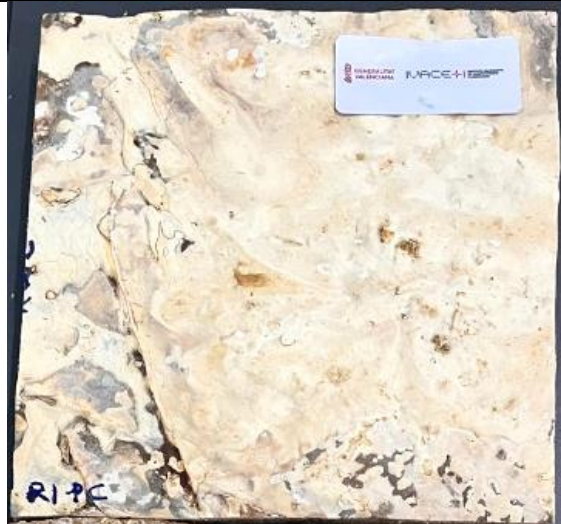
Referencial	Cáñamo	Paja
Mezclas comerciale s de sustrato colonizado por hongos		

Figura 50. 51. Biomateriales de referencia, producidos con el Proyecto financiado FONDOS GVA

3.5.1. Estructura microbiológica: observación microscópica

Se han observado las muestras bajo la lupa MOTIC SM16TR-TLED APO1X, con iluminación LED. Se realiza capturas de imagen a diferentes aumentos (6,10, 20, 60 y 98x), para la comparación de las muestras (figura 45).

Los hallazgos obtenidos demuestran el efecto aglutinante del micelio, pudiéndose observar la red filamentosa que mantiene unidas las piezas en todas las muestras. Asimismo, se manifiestan las diferencias de crecimiento microbiológico según el tipo de

hongo y sustrato, así como el uso o no del aporte extra de la fuente de carbono (en este caso, la harina).

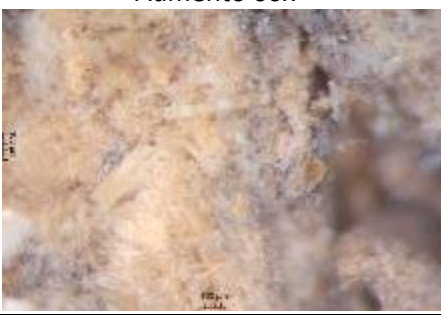
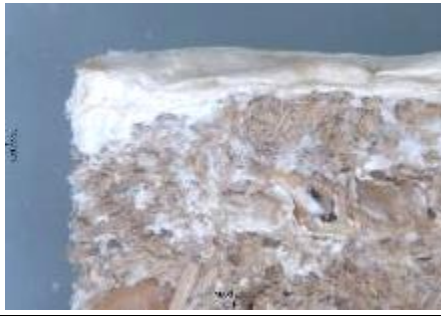
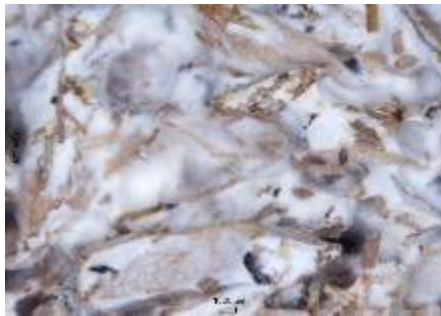
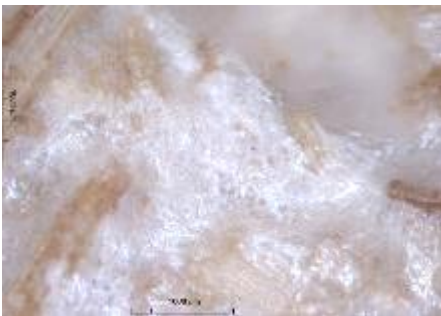
Primero, en las imágenes efectuadas a las muestras a base de Ganoderma y cáñamo, se puede observar que se ha generado un biomaterial mucho más compacto, además de la formación de la “piel”. Asimismo, se encuentran relativamente pocos espacios vacíos y muchas zonas con aglomeraciones, por lo que es probable que las fibras de cáñamo hayan sido trituradas en exceso para ciertas aplicaciones aislantes.

En cuanto a las muestras de Pleorotus en paja y cáscara de almendra, también se observa la estela en la superficie, debido a la sobreincubación, pero en esta ocasión se percibe que el tamaño de fibras es más adecuado para las prestaciones aislantes.

Para las imágenes del mismo hongo junto al 70% de la madera de pino (30% de la paja anteriormente descrita), se observan las diferencias en las fibras de los distintos materiales. Además, ampliando la zona del micelio, se puede percibir que la estructura en forma de red filamentosa y algo algodonosa.

Por último, en referencia a las imágenes para las muestras de caña y cáscara de arroz con los dos hongos objeto de estudio, se observa la cohesión entre ellos. La estructura del micelio para Pleorotus deja una imagen casi cristalizada, observándose la red de las hifas. Además, se puede observar que esta muestra es la que menor crecimiento presenta, en concordancia con lo quebradizo del material y el impedimento de realizar algunos ensayos con estas piezas al haberse fracturado. Mientras que para el Trametes versicolor, se observa un crecimiento bastante más avanzado, parecido al del resto de muestras. Además, se expone en la imagen, las áreas del crecimiento tan algodonoso, muy características de dicho hongo.

Figura 52. Imágenes a diferentes aumentos efectuadas con la lupa adquirida

Reishi – Cañamo REFERENCIA	Aumento 6x 	Aumento 60x 
Pleorotus – Paja COMERCIAL	Aumento 6x 	Aumento 60x 
Pleorotus – PINO 70% (AIDIMME) paja 30% (comercial)	Aumento 10x 	Aumento 60x 
Pleorotus – caña y arroz (AIDIMME)	Aumento 6x 	Aumento 40x 
Trametes - caña y arroz (AIDIMME)	Aumento 10x 	Aumento 98x 

3.5.2. Conductividad térmica

La metodología empleada para este ensayo está basada en la UNE EN 12667 (*Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica*) donde se determina la conductividad térmica, λ . Se han utilizado muestras de 25 x 25 cm con espesor variable e introduciéndolas en el equipo NETZSCH HFM 436 Lambda para la determinación de la conductividad térmica en tres puntos: 10 °C, 20 °C y 30 °C.

La caracterización térmica se lleva a cabo mediante el instrumental de laboratorio medidor de flujo de calor (HFM). Este equipo determina la densidad del flujo térmico a partir del gradiente de temperatura establecido a través de la probeta, colocada entre los dos platos (caliente arriba y frío abajo). La diferencia de potencial térmico entre ambas caras de la muestra se registra mediante sensores de precisión en contacto directo con su superficie. Finalmente, el equipo muestra los resultados de conductividad térmica del material relacionando el flujo de calor medido con el salto térmico obtenido. Las muestras, tras alcanzar la masa constante, han sido acondicionadas hasta el momento de realizar los ensayos en una cámara a 23 °C y 50% de humedad. Se muestra a continuación la imagen del equipo junto al sistema de refrigeración, así como la inserción de la probeta.



Figura 53 Equipo para la determinación de la conductividad térmica e introducción de la muestra

Los resultados obtenidos indican que la muestra comercial de *Pl. ostreatus* en paja y cáscara de almendra posee la mayor capacidad de aislamiento, con valores por debajo de 0,04. La plancha fabricada a base de caña y cáscara de arroz con *T. versicolor* demuestra unos muy buenos valores, siendo incluso mejores que los obtenidos por la muestra de referencia de Reishi en cáñamo. Ésta última, ha superado el límite para considerarlos aislantes térmicos a una temperatura de 30 °C. Esto puede ser debido a que las prestaciones de la muestra son más adecuadas para otro tipo de aplicaciones de mayor resistencia mecánica y no tanto de aislamiento. Además, pueden haber confluido otros factores como el tamaño de las fibras (el sustrato venía ya muy triturado) o bien por el consumo excesivo del sustrato en la sobreincubación y aparición de la “estela”, que podría resultar en un número menor de espacios “vacíos”. Por otro lado, la muestra de Pino halepensis (*Pl. ostreatus*) con paja, ha obtenido resultados muy prometedores.

Tabla 7. Resultados obtenidos de conductividad térmica a 3 temperaturas

Parámetro	Reishi - cañamo	Pleorotus Paja con c. de almendra	Pleorotus pino con paja	Trametes – caña con c. arroz
Espesor (cm)	2,17	1,58	2,17	2,36
Densidad (kg/m ³)	280	317	217	158
λ 10 °C (W/m-k)	0,0478	0,0366	0,0462	0,0428
λ 20 °C (W/m-k)	0,0496	0,0381	0,0482	0,0444
λ 30 °C (W/m-k)	0,0516	0,0399	0,0506	0,0458

Hay que remarcar, además, que se han obtenido valores más adecuados que aquellos registrados para los materiales de los sustratos de partida en proyectos anteriores como PRECONCEPT y PRESOST. Para la cáscara de arroz se obtienen valores de 0,055W/m -K para el aislante con densidad 290 kg/m³.

3.5.3. Aislamiento acústico

Se han realizado ensayos cualitativos bajo un método propio, basados en el principio de cámaras reverberantes adyacentes, tomando como referencia lo descrito en la norma UNE-EN ISO 140-1.

Para la evaluación del comportamiento acústico de los biomateriales se utilizan las cajas emisora y receptora junto al sellado perimetral, diseñadas previamente en AIDIMME, realizando una adaptación de la norma a escala reducida para ensayos de laboratorio. El volumen de control escogido es de 1:10 respecto a las dimensiones normativas (que exigen al menos 50 m³). La cámara emisora presenta unas dimensiones de 60 x 70 x 50 cm, mientras que la cámara receptora cuenta con las mismas dimensiones, pero de una profundidad reducida a 40 cm. La primera de ellas dispone de una estructura de doble panel de MDF de 4 cm de espesor, integrando un núcleo de membrana acústica de alta densidad (Tecsound de Soprema) para maximizar el confinamiento del sonido. La cámara receptora se ha construido con una sola capa de aislante MDF y recubierto en su interior con espuma absorbente en la mitad de su superficie con la finalidad de mitigar reverberaciones internas que pudieran distorsionar las lecturas. En ambas aperturas, es decir, en el marco intermedio que hay que hacer coincidir, se han incorporan 3 capas de aislante MDF y una lámina Tecsound en los bordes para reforzar así el aislamiento.

Por tanto, el sistema permite la inserción de las muestras mediante el maro intermedio, que actúa como soporte para las probetas, las cuales deben de tener un tamaño mínimo de 15 x 15 cm. Además, las cámaras están montadas sobre ruedas, facilitando el desplazamiento y alineación respecto al marco de la muestra. Una vez se han unido las dos cajas junto al marco, se ha de asegurar mediante correas de amarre con trinquete, o, en este caso, con la herramienta sargento de carpintería (gato de apriete). Esta compresión mecánica garantiza el cierre hermético del conjunto, eliminando puentes acústicos y filtraciones de ruido exterior que pudiesen comprometer la integridad de los resultados.

En cuanto al equipo de sonido, se han requerido los siguientes elementos:

- Ordenador para reproducir el sonido rosa
- Amplificador de sonido de la marca KS modelo KPA-200
- Altavoz coaxial SPR-50 de 16" con un rango de 70 a 29000 Hz. Impedancia de 4 ohm.
- Sonómetro

El ensayo se realiza reproduciendo una muestra de audio a distintas frecuencias y registrando las tomas de lectura del nivel sonoro en dBA del sonómetro. Inicialmente se realiza una lectura sin probetas, en "blanco", para así posteriormente poder obtener la reducción del nivel sonoro en comparación con el valor sin la probeta.

Se realizan 5 repeticiones de cada serie de frecuencias (incluyendo el blanco), obteniendo una media de las mediciones y un promedio final, así como la desviación entre las lecturas del sonómetro en decibelios (dBA).



Figura 54. Izda. Montaje complete, centro colocación de la muestra, derecha introducción del sonómetro

Los resultados indican que todos los biomateriales obtenidos, son considerados aislantes acústicos sobre todo para altas frecuencias, como se podría esperar por sus bajas densidades, mostrando una disminución de los decibelios registrados (frente a los alcanzados por el blanco). Los valores para la mezcla de caña y cáscara de arroz con *T. versicolor*, son muy parecidos al de los valores de referencia y comercial (*Reishi* junto al cáñamo, así como *Pleorotus* con paja y cáscara de almendra). Esta tendencia no es sostenida por la muestra de *Pleorotus* en pino, el único que queda por encima.

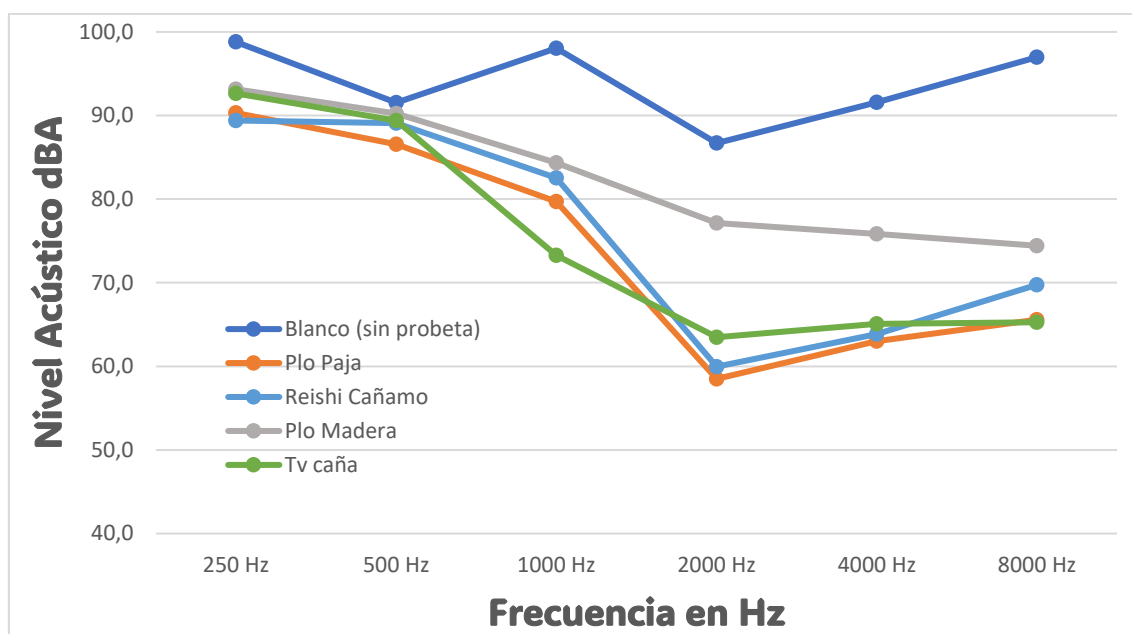


Figura 55. Gráfica del nivel acústico para las distintas muestras

Como se observa en la gráfica, la muestra comercial de Pleurotos en paja ha alcanzado el aislamiento acústico cerca del 32% de reducción en altas frecuencias, siendo la media del 20%. No se ha quedado atrás la muestra realizada en AIDIMME de residuos agroforestales de caña y cáscara de arroz junto al *Trametes versicolor*, que ha obtenido el mismo valor, aunque con una media un poco por debajo (19,8%). Ambas han sido algo superiores a los resultados obtenidos por la muestra de referencia a base de Reishi y cañamo, seguramente debido a la sobreincubación y la aparición de la “piel”. Finalmente, la probeta a base del 70% de madera (*Pinus halepensis*) ha obtenido una reducción de media de 11,4%, por lo no es un resultado comparable y demuestra baja capacidad aislante acústico, aunque puede ser útil para alguna aplicación menos exigente.

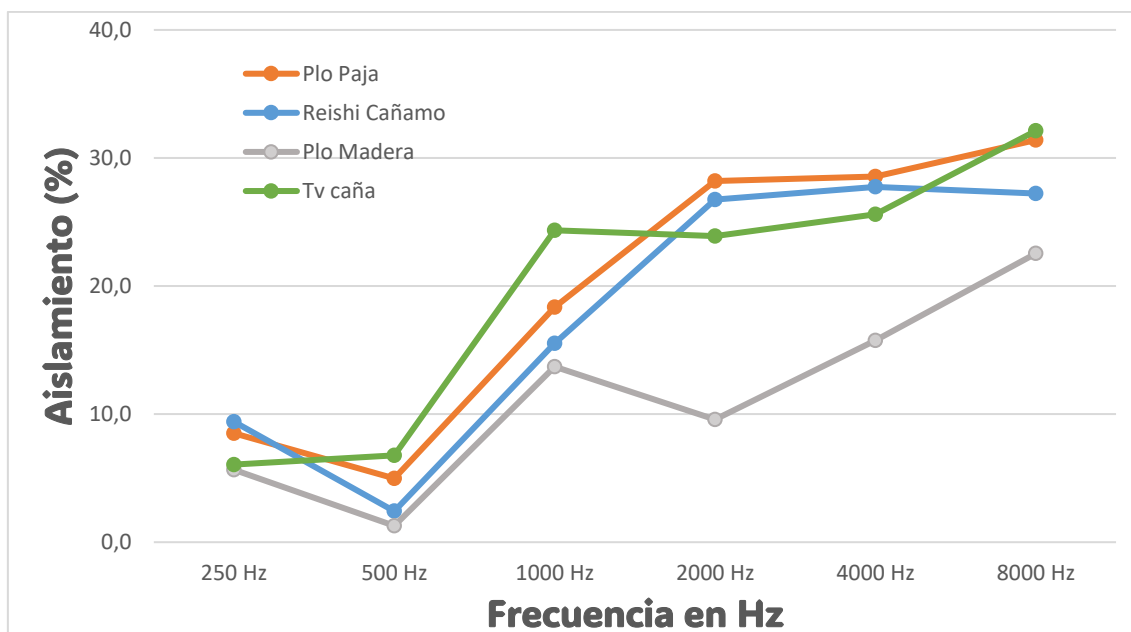


Figura 56. Gráfica del aislamiento acústico para las distintas muestras

Los valores medios de aislamiento obtenidos en el proyecto PRECONCEPT, de materiales con cáscara de arroz quedaron alrededor de 15 (%) dBA de aislamiento aparente, alcanzando el pico entre 20-25 (%) dBA .

3.5.4. Resistencia Mecánica: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión

Se han obtenido dos muestras para cada uno de los 5 tipos en total de combinación hongo-sustrato. Se ha aplicado la norma UNE-EN 1015-10, ya que las muestras tienen las dimensiones idóneas, a pesar de que el material es distinto al mortero endurecido.

La resistencia a la flexión se determina mediante la aplicación de una carga en tres puntos de probetas prismáticas de dimensiones 160 mm × 40 mm × 40 mm hasta provocar su rotura. La resistencia a la compresión se determina en cada una de las dos mitades (semiprismas) resultantes del ensayo anterior. Ambos ensayos se realizan con la Máquina universal para ensayos estandarizados, Zwick Roell Z150, como se muestra en las siguientes imágenes.



Figura 57. Tracción y compresión de Izquierda Reishi-cañamo y derecha Pleurotus-pino

En la resistencia a la compresión se determina la resistencia de la probeta como la carga máxima soportada por la probeta dividida por su sección transversal o en su defecto por la resistencia a la compresión al 10%.

Se registra la resistencia a la flexión y compresión de cada probeta, aproximadamente a 0,05 N/mm², y el valor promedio con una aproximación de 0,1 N/mm².

Tabla 8. Resultados obtenidos en los ensayos mecánicos realizados

Probeta	Tipo	Densidad	Resistencia a la flexión	Resistencia a la compresión
		(kg/m ³)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
R3 y R4 BR	Reishi en cáñamo	298	0,64	0,34
P2 y P3 BR	Pleorotus en paja y c. almendra	293	0,52	0,19
PP 1 y 2 BR	Pleorotus en Pino y paja	251	0,53	0,09
PC3 y PC4 BR	Pleorotus en caña y c. arroz	228	0,04	0,03
T5 y T6 BR	Trametes en caña y c. arroz	155	0,09	0,04

Los resultados obtenidos van en correlación a lo descrito con respecto al crecimiento en las observaciones microscópicas; las muestras con una colonización del micelio densa y homogénea, en consecuencia, han obtenido valores más altos.

Los mejores valores han sido obtenidos por la muestra de referencia con Reishi y cáñamo, debido a su compactación y buen crecimiento. A su vez, la muestra de Pleorotus en paja comercial, también demuestra tener resistencia tanto a la flexión como a la compresión. Las dos muestras a base de caña y cáscara de arroz obtienen valores bajos, pero están en el rango esperado en comparación con bibliografía.

En Mitchell Jones et al (2020), se recoge una tabla resumen con los datos disponible a cerca de los resultados de ensayos de resistencia mecánica. La tabla, aunque incompleta por falta de información, sirve para comparar los valores obtenidos.

Tabla 9. Comparación de algunas propiedades mecánicas reflejadas en varios estudios de referencia

Tipo	Sustrato con micelio	Densidad (kg/m ³)	Compresión, E (MPa)	Tracción, $\sigma_{ultimate}$ (MPa)
Flexión (3)	Serrín de haya	170	9	0,29
	Paja de colza	115	1,5	0,14
	Fibras de algodón	130	1	0,05
Compresión	Estopa de cáñamo/cañamiza (1)	94	0,64	-
	Paja de trigo (73)	192	-	0,17
	Virutas de pino (1)	87	0,14	-

De especial mención, el caso de los datos de compresión para el cáñamo (densidad 94 kg/m³) y el pino (87 kg/m³) descrito en Elsacker et al, en el que, como se ve en la tabla, el pino da valores muy por abajo del cáñamo. Esta tendencia es muy similar a los resultados obtenidos en el presente proyecto.

4. Resumen y conclusiones

Tras el estudio realizado se han llegado a los siguientes avances.

- Verificación de la metodología para el crecimiento y optimización del proceso a pequeña escala:
 - Se han validado los protocolos de acondicionamiento y esterilización de sustratos, así como las condiciones de cultivo y crecimiento del micelio y, finalmente los parámetros del secado de los biomateriales. Este último punto se ha visto crucial tanto para el control de la contaminación, como para el acabado final del biomaterial.
 - Se ratifica la función del micelio como un agente aglutinante biológico eficaz, capaz de compactar residuos agroforestales en matrices sólidas y consistentes mediante la red de hifas
 - La adición de fuentes complementarias de carbono (harina o celulosa) se identifica como un factor crítico para aumentar el crecimiento en etapas tempranas, así como fomentar mayor cohesión e impedir la contaminación. En este sentido, el método en grano optimiza la velocidad de colonización frente al método de inoculación agar
 - Por otra parte, es interesante la interacción especie de hongo - sustrato. Según lo determinado en las pruebas iniciales, se registró una mayor afinidad específica del *Pl. ostreatus* hacia la caña común, mientras que *T. versicolor* mostró una preferencia por la cáscara de arroz.
 - La sobreincubación del micelio en el molde, permite la formación de una película superficial que difiere en morfología. Esta es denominada como estela o “piel” y, si bien mejora la textura y el acabado estético, induce un mayor gradiente de contracción volumétrica durante la fase de secado.
 - Las propiedades físico-mecánicas finales están supeditadas a la naturaleza del sustrato lignocelulósico más que a la especie fúngica *per se*, siempre que exista una correcta tasa de colonización en dicha matriz.
 - El prensado en caliente permite una densificación de la muestra de apariencia similar a los tableros de madera y derivados, o bien, homogeneizar las superficies de las muestras.
- Caracterización acústica y térmica:
 - Los biocomposites de caña común y cáscara de arroz inoculados con *Trametes versicolor* presentaban excelentes prestaciones como aislantes termoacústicos. Sus propiedades son comparables con materiales convencionales, pudiéndose considerar aislantes térmicos y acústicos, ofreciendo una alternativa biodegradable y sostenible (proveniente de residuos de fibras vegetales), apta para aplicaciones directas o paneles tipo sandwich o bien junto a planchas de metal.
 - No se ha podido ensayar la muestra con el mismo sustrato, pero con el hongo *Pleurotus ostreatus*, ya que las muestras grandes no poseen la cohesión requerida y se ha obtenido un material más quebradizo. Se demuestra la necesidad de añadir una fuente de carbono, para favorecer la etapa de

crecimiento inicial, como puede ser la harina o celulosa (proveniente de residuos, como podrían ser los de la industria del papel). De todos modos, la extrapolación de la muestra de características similares (mismo sustrato junto a otro hongo) demuestra el potencial aislante de este tipo de biomateriales.

- Las limitaciones se ven reflejadas en las muestras de madera de *Pinus halepensis*. Éstas han mostrado un déficit en la atenuación acústica y valores de conductividad térmica inferiores. No obstante, su alta densidad tras el prensado en caliente (hot-press) sugiere un potencial uso en aplicaciones de resistencia mecánica.
- Por otra parte, de entre los biomateriales de referencia escogidos, el que ha alcanzado mejores resultados ha sido el de paja en comparación con el cáñamo. Probablemente, esto se deba a que las fibras de paja conservaran las características adecuadas para dichas prestaciones (ej. Dimensiones).

➤ Resistencia a la flexión y compresión

- Existe una correlación directa entre la homogeneidad de la red hifal (observada mediante microscopía) y la capacidad de carga del material. Los resultados para el sustrato de cáñamo han sido más altos, mientras que en bio-composites de pino, aunque alineados con la literatura actual, han comprendido valores más bajos a los resultados esperados. Éstos, requieren quizás una optimización mediante, por ejemplo, el ajuste del tamaño de partícula del sustrato para mejorar la transferencia de esfuerzos.
- En consonancia, las muestras de caña común y cáscara de arroz evidencian que las aplicaciones para dichas piezas no deberán ser estructurales o que conlleven una resistencia mecánica. Se opta, en este caso, por propiedades de aislamiento térmico y/o acústico, o bien como relleno junto a un refuerzo rígido.

➤ Aplicaciones y densificación

- La técnica de hot-press permite la obtención de paneles de alta densidad similares a los tableros de fibras de madera (MDF), tanto para cáñamo así como para el pino. En el caso de sustratos de pino, es imperativo el uso de moldes de contención para evitar la pérdida de masa y garantizar la estabilidad dimensional durante el prensado.
- Se ha mejorado las características de las muestras de caña común con cáscara de arroz, al obtener tras el prensado en caliente, un nivelado de las caras superficiales.
- Se ha demostrado que el biomaterial a base de micelio con sustrato de caña y cáscara de arroz es buen aislante térmico y acústico y será idóneo para dichas aplicaciones, siendo sus propiedades comparables a los materiales convencionales.
- En cuanto al biomaterial a base de micelio con sustrato de pino, principalmente, podría utilizarse en aplicaciones para materiales prensados, como sustitutivo del MDF, libre de formaldehído y completamente biodegradable, proveniente de residuos biomásicos.

➤ Prospectiva y líneas de mejora.

- Implementar medidas para acelerar el crecimiento y aumentar la homogeneidad del material, además de la optimización nutricional incorporando fuentes de carbono como puede ser la harina o celulosa.
- Seleccionar hongos de crecimiento más favorable y rápido en sustratos, que demuestren una mayor asimilación en sólido y no en medios de cultivos preparados, tanto de las mismas especies, así como ampliar a nuevas cepas.
- Investigar los sistemas de cultivo como vía para obtener precursores más homogéneos. Evaluar la fermentación en líquido (LSF) y el cultivo sumergido o bien, favorecer el crecimiento bajo el método de grano
- Explorar la escalabilidad del proceso para su industrialización, ya que es una limitación a la hora de poner en el mercado el nuevo producto. Implementar el diseño de infraestructuras de biofabricación controlada (granjas de micelio), que permita una producción estable.
- Fabricar prototipos para la puesta en el mercado de productos aislantes (por ejemplo, paneles sándwich con micelio) o tableros densificados (hot-press del biomaterial a base de micelio)
- Estudiar las propiedades frente al fuego de los materiales a base de micelio para aplicaciones de construcción con resistencia a incendios.
- Obtención de biomateriales para la aplicación en muebles, tanto del sustrato como del “textil” para su uso como forraje o tapicería.
- Integración tecnológica en los nuevos modelos de construcción, como pueden ser la fabricación aditiva (impresión 3D) o el desarrollo de arquitectura “viva” y autoregenerativa.

5. Anexos y bibliografía

5.1. ANEXO I: PRUEBAS INICIALES CON FIBRAS PROVENIENTES DE RESIDUOS Y HONGOS CULTIVADOS

Se realizaron pruebas iniciales para determinar la capacidad de dos hongos para crecer en los sustratos seleccionados. Se ha trabajado previamente con estos hongos en el laboratorio de AIDIMME, siendo de especial mención la norma EN 113-3:2023.

El sustrato se esteriliza por separado, a 110°C durante 10 minutos, dos días consecutivos justo antes de inocular.

5.1.1. Crecimiento del hongo y cultivo del micelio

Se han escogido dos sustratos diferentes procedente de la caña común (de dos tamaños distintos, serrín y fibras) y la cáscara de arroz, todas de origen local, que aparecen como residuo de bajo valor o subproductos industriales. El serrín de la caña se ha añadido expresamente con la intención de mezclarlo con los demás para aportar una mayor cohesión de la muestra. Éste y los otros dos sustratos (Fibra de caña y cáscara de Arroz), se introdujeron por separado en placas Petri estériles (9 y 15 cm de diámetro), tras haberse, primero, sumergido en la solución alcalina y, después, esterilizado por autoclave. Todo ello, con la utilización de material estéril en una cabina de flujo laminar para impedir cualquier tipo de contaminación. Además, se comprueba la sinergia de los hongos frente a los tres sustratos (caña en “serrín” y “fibras” así como la cáscara de “arroz”)

a) *Pleorotus ostreatus*

Se preparan 5 muestras en total, dos de ellas con una mezcla para comprobar la sinergia de sustratos. El peso se determina en seco (antes del moldeado) y las dimensiones del moldeado en húmedo.

- Inoculación directa: tras dos meses de incubación en placas Petri pequeñas, se obtiene unas probetas tipo tortas. Estas se llevan a secado completo entre 80 - 120 °C durante distintos tiempos.

Se han utilizado mezclas de fibra y serrín de caña o bien de cáscara de arroz y serrín de caña introducidas, carga media-alta:



Figura 58. Inoculación y crecimiento inicial de *Pl. ostreatus* sobre fibra y serrín de caña

Tabla 10. Proporciones preparadas para el *Pl. ostreatus* de caña común y cáscara de arroz inoculación directa

Mezclas ostreatus	Pl.	Fibra (7g) y serrín (4g) de caña	Fibra de caña (4g) y c. arroz (4g)
Gramos (g) en seco		11	8
Diámetro (cm)		8,00	8,00
Superficie placas (cm²)		25,13	25,13
Espesor (cm)		0,8	0,8
Densidad g/cm³		0,55	0,40

- Mezcla de fibra y serrín de caña: se obtiene una torta con bastante compactación, como se observa en las siguientes imágenes



Figura 59. Biomaterial fabricado a base de micelio, antes del secado, en una mezcla de fibras de caña de distinto tamaño con *Pl. ostreatus*

- Mezcla de cáscara de arroz y serrín de fibra de caña: se obtiene una torta con cierta compactación, pero de mayor fragilidad, como se observa en las imágenes



Figura 60. Biomaterial fabricado a base de micelio, antes del secado, en una mezcla de cáscara de arroz y fibra de caña (tamaño serrín) con *Pl. ostreatus*

- Inoculación en dos fases: diferentes sustratos por separado se inoculan durante 2 meses para, posteriormente, mezclar el sustrato con más proliferación del hongo.

La fibra de caña y cáscara de arroz se introducen de manera individual en dos placas Petri, una grande (15 cm) y otra pequeña (9 cm) con una carga baja. El “Serrín” (fibra de caña de menor tamaño) se introduce de manera individual en una placa Petri pequeña poco rellena, dejando algún espacio vacío. En este caso, el sustrato de serrín de caña es el que se ha mezclado por completo para realizar dos únicas placas, que se mantienen otras dos semanas más en condiciones de cultivo.

Tabla 11. Proporciones preparadas para el *Pl. ostreatus* de caña común y cáscara de arroz inoculación en dos etapas

Individual <i>Pl. ostreatus</i>	Fibra de caña		Cáscara de arroz		Serrín de fibra de caña
Gramos (g) en seco	11	3	5	3	6
Diámetro (cm)	14	<8	14	<8 (7/8)	8,00
Superficie placas (cm²)	43,98	14,13	43,98	21,99	25,13
Espesor (cm)	0,7	0,5	0,7	0,5	0,5
Densidad g/cm³)	0,36	0,42	0,16	0,27	0,48

- Fibra de caña: se observa crecimiento, pero no ha colonizado el sustrato, posiblemente debido a que no hay tanto contacto entre fibras.
- Cáscara de arroz: se observa crecimiento, pero no ha colonizado el sustrato, posiblemente debido a que no hay tanto contacto entre fibras. Además, se observa un crecimiento vertical, no tanto horizontal, indicando posiblemente que el hongo necesita una mayor disponibilidad del alimento
- Serrín de fibra de caña: se observa una proliferación del hongo en todo el sustrato, por lo que se utilizará para impulsar el crecimiento en las otras corrientes de sustrato.
- Las nuevas mezclas: se dejan en condiciones de incubación durante 4 semanas, para comprobar la eficacia del crecimiento en dos fases.

La mezcla de fibra de caña se compone de la placa individual (pequeña + grande) además de la placa individual de tamaño serrín. Se ha obtenido una torta compacta que puede ser manipulada fácilmente. A continuación, se muestra el estado final de crecimiento, antes de llevarlo al secado.



Figura 61. Torta de la mezcla de fibras de caña antes de llevar al secado

La mezcla de cáscara de arroz se compone de la placa individual (grande + pequeña) así como de la placa de fibra de caña de tamaño serrín. Se ha obtenido una torta compacta que se siente frágil a la hora de manipular. A continuación, se muestra el estado final de crecimiento



Figura 62. Torta de la mezcla de cáscara de arroz y fibras de caña (serrín) antes de llevar al secado

b) *Trametes versicolor*

Se preparan 5 muestras en total, dos de ellas con una mezcla para comprobar la sinergia de sustratos. El peso se determina en seco (antes del moldeado) y las dimensiones del moldeado en húmedo.

Se ha visto que el crecimiento de este hongo es más esponjoso en las partes aireadas del sustrato, tal y como se detalla en la bibliografía. Por ello, se desmoldan las pruebas tras un mes de crecimiento, para favorecer la homogeneidad del material obtenido. Se pasan a placas Petri más grande y se mantiene el crecimiento durante varias semanas.



Figura 63. Inoculación inicial y crecimiento antes del desmolde

Se han utilizado mezclas de sustrato (fibra y serrín de caña o bien cáscara de arroz junto al serrín de caña), además de las pruebas individuales (fibra de caña, serrín de caña y cáscara de arroz). Todas ellas han sido inoculadas en placas Petri pequeñas (9 cm) con una carga media-alta de sustrato, para obtener biomateriales más compactos. Se ha introducido mayor sustrato, en comparación con la anterior (pruebas iniciales de *Pl. ostreatus*), ejerciendo presión con utensilios estériles (pinzas), quedando la placa completamente rellena. Además, se han repartido mejor las fibras vegetales en el espacio delimitado por la placa, sobre todo colocando las fibras de caña de una forma algo más ordenada, retirando aquellas que, por tamaño, no favorezca la homogeneidad.

Tabla 12. Proporciones preparadas para *T. versicolor*, de caña común y cáscara de arroz

Trametes versicolor	Fibra de caña	Serrín y fibra de caña	Cáscara de arroz	Mezcla C. arroz con serrín	Serrín de fibra de caña
Gramos (g) en seco	10	9	7	8	9
Diámetro (cm)	8,00	8	8	8	8
Superficie placas (cm²)	25,13	25,13	25,13	25,13	25,13
Espesor (cm)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Densidad g/cm³)	0,66	0,60	0,46	0,53	0,60

- Cáscara de arroz: tras dos semanas después del desmolde se finaliza el proceso de crecimiento para ver el efecto del secado en la esponjosidad. Como se puede observar en las imágenes, se obtiene, en menos tiempo, una torta compacta similar a las producidas anteriormente (otro hongo), pero de cierta fragilidad.



Figura 64. Izqda. material tras desmolde y preparación para mantener en condiciones de cultivo. Dcha. Tras dos semanas de cultivo, el material está listo para el secado

- Mezcla cáscara de arroz y fibra de caña (tamaño serrín): como se observa en las imágenes, después del desmolde, la esponjosidad característica del hongo se pierde, pero mantiene el efecto aglutinante que se requiere para el biomaterial. Tras un total de dos meses, se ha obtenido una torta compacta pero algo quebradiza.



Figura 65. Izqda. material tras desmolde y preparación para mantener en condiciones de cultivo. Dcha. Tras 1 mes de cultivo, el material está listo para el secado

- Fibra de caña: se observa crecimiento, pero no hay colonización completa del sustrato, tras varias semanas después del desmolde. Se utiliza para la mezcla de fibra y serrín, para fomentar la compactación, ya que no se observa el efecto aglutinante característico de los biomateriales a base de micelio.
- Mezcla de Fibras de caña y tamaño tipo serrín: tras un total de dos meses, se ha obtenido una torta, con cierta compactación, pero frágil a la hora de manipular



Figura 66. Tras dos Semanas después del desmolde (izqda.), se mezcla con la otra corriente de fibra de caña (centro) para fomentar la obtención del biomaterial (dcha).

- El “Serrín” (fibra de caña de menor tamaño), finalmente, se pasa a una placa más grande ya que está demasiado compacta y húmeda. Tras dos semanas de cultivo, no se ha observado el crecimiento que en las demás muestras.

Se ha descartado esta prueba al no haber obtenido el crecimiento adecuado, tanto por la densidad como la humedad excesiva.

5.1.2. Secado de las muestras

Tras varias semanas de incubación, se procede al secado.

a) *Pl. ostreatus*

4 muestras: dos de fibra de caña (directa y en fases) y dos de cáscara de arroz (directa y en fases). Las muestras directas son de tamaño pequeño y las de dos fases de tamaño grande.

- Muestras pequeñas directas: 2 meses (9 semanas) de cultivo, quedando contaminada durante el secado la torta de caña. Ciclo de 3 h a 80°C, 2 h 100°C, 4h a 120 °C
- Muestras grandes de 2 fases: ciclo de 2h 100 °C y 4h a 120 °C

<i>Pl. ostreatus</i>	Parte superior	Parte inferior
Fibras de caña y tamaño serrín. Arriba: pequeñas Abajo: grandes		

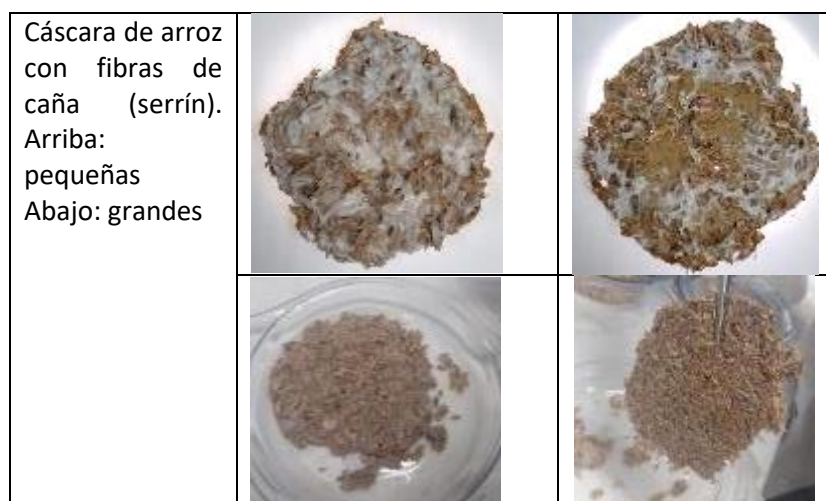


Figura 67. Secado pruebas preliminares con *Pl. ostreatus*

b) *T. versicolor*

- Pruebas individuales: secado a 8h a 120 °C.

La prueba con cáscara de arroz tiene un crecimiento mayor, obteniéndose la torta en un periodo más corto de tiempo. Visualmente esta más compactada (parece que ha actuado mayor agente aglutinante), mientras que la de caña parece más “suelta”. Se lleva antes al secado para comprobar que la esponjosidad del crecimiento no afecta a la compactación. También se ha visto que el tiempo de secado es crucial, y que, por tanto, es mejor efectuar ciclos cortos de temperatura.

Por otro lado, la prueba individual de fibra de caña se utiliza para la mezcla con serrín ya que en la prueba individual con serrín únicamente, no ha habido un crecimiento adecuado. Finalmente, después de más de dos meses, se descarta la prueba individual de serrín.

- Pruebas con mezclas: secado en dos ciclos: 120 °C, 3 h y 100°C 1 h

Tras el secado, se comprueba que la mezcla con mucha cantidad de arroz no mantiene la estructura moldeada y se fractura con cierta facilidad. La mezcla con fibra y serrín de caña, aunque presenta compactación en la superficie, no mantiene la probeta unida por completo.

<i>T. versicolor</i>	Parte superior	Fractura/Parte inferior
Cáscara de arroz. Secado: 8h a 120 °C.		

Cáscara de arroz con fibras de caña (serrín) Secado: 2 ciclos 120 °C, 3 h 100°C 1 h		
Fibras de caña y tamaño serrín. Secado: 2 ciclos 120 °C, 3 h y 100°C 1 h		

Figura 68. Secado pruebas preliminares *T. versicolor*

5.2. BIBLIOGRAFÍA

1. Elsacker, E., Vandeloock, S., Brancart, J., Peeters, E., & De Laet, L. (2019). Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates. *PLoS One*, 14(7), e0213954.
2. Elsacker, E., Søndergaard, A., Van Wylick, A., Peeters, E., & De Laet, L. (2021). Growing living and multifunctional mycelium composites for large-scale formwork applications using robotic abrasive wire-cutting. *Construction and Building Materials*, 283, 122732.
3. Appels, F. V., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M., Dijksterhuis, J., ... & Wösten, H. A. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161, 64-71.
4. Cartabia, M., Girometta, C. E., Milanese, C., Baiguera, R. M., Buratti, S., Branciforti, D. S., ... & Dondi, D. (2021). Collection and characterization of wood decay fungal strains for developing pure mycelium Mats. *Journal of Fungi*, 7(12), 1008.
5. Dehn, F., & Kotan, E. (2021). Evaluation of physical properties of mycelium-based bio composites for use as facade insulation material.
6. Răut, I., Călin, M., Vuluga, Z., Oancea, F., Paceagiu, J., Radu, N., ... & Jecu, L. (2021). Fungal based biopolymer composites for construction materials. *Materials*, 14(11), 2906.
7. Nussbaumer, M., Van Opdenbosch, D., Engelhardt, M., Briesen, H., Benz, J. P., & Karl, T. (2023). Material characterization of pressed and unpressed wood–mycelium composites derived from two *Trametes* species. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103063.
8. Charpentier-Alfaro, C., Benavides-Hernández, J., Poggerini, M., Crisci, A., Mele, G., Della Rocca, G., ... & Palanti, S. (2023). Wood-decaying fungi: From timber degradation to sustainable insulating biomaterials production. *Materials*, 16(9), 3547.
9. Sun, W., Tajvidi, M., Hunt, C. G., McIntyre, G., & Gardner, D. J. (2019). Fully bio-based hybrid composites made of wood, fungal mycelium and cellulose nanofibrils. *Scientific reports*, 9(1), 3766.
10. Van Wylick, A., Elsacker, E., Yap, L. L., Peeters, E., & De Laet, L. (2022). Mycelium composites and their biodegradability: An exploration on the disintegration of mycelium-based materials in soil. *Construction Technologies and Architecture*, 1, 652-659.
11. Jones, M., Bhat, T., Kandare, E., Thomas, A., Joseph, P., Dekiwadia, C., ... & Wang, C. H. (2018). Thermal degradation and fire properties of fungal mycelium and mycelium-biomass composite materials. *Scientific reports*, 8(1), 17583.
12. Almpiani-Lekka, D., Pfeiffer, S., Schmidts, C., & Seo, S. I. (2021). A review on architecture with fungal biomaterials: the desired and the feasible. *Fungal Biology and Biotechnology*, 8(1), 17.
13. Yang, L., Park, D., & Qin, Z. (2021). Material function of mycelium-based bio-

- composite: A review. *Frontiers in Materials*, 8, 737377.
14. Alemu, D., Tafesse, M., & Mondal, A. K. (2022). Mycelium-based composite: the future sustainable biomaterial. *International journal of biomaterials*, 2022(1), 8401528.
 15. Jones, M. (2024). Waste-derived Mycelium materials for non-structural and semi-structural applications (Doctoral dissertation, RMIT University).
 16. Butu, A. L. I. N. A., Rodino, S., Miu, B., & Butu, M. (2020). Mycelium-based materials for the ecodesign of bioeconomy. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 15(4), 1129-1140.
 17. Feijóo Vivas, K., Bermúdez Puga, S. A., Rebolledo, H., Figueroa, J. M., Zamora, P., & 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 Fungal mycelium-bioproducts development: A new material culture and its impact on the transition to a sustainable economy.
 18. Attias, N., Danai, O., Tarazi, E., Pereman, I., & Grobman, Y. J. (2019). Implementing bio-design tools to develop mycelium-based products. *The Design Journal*, 22(sup1), 1647-1657.
 19. Sydor, M., Cofta, G., Doczekalska, B., & Bonenberg, A. (2022). Fungi in mycelium-based composites: usage and recommendations. *Materials*, 15(18), 6283.
 20. Brandić Lipińska, M., Maurer, C., Cadogan, D., Head, J., Dade-Robertson, M., Paulino-Lima, I. G., ... & Rothschild, L. J. (2022). Biological growth as an alternative approach to on and off-Earth construction. *Frontiers in Built Environment*, 8, 965145.
 21. Chen, L., Zhang, Y., Chen, Z., Dong, Y., Jiang, Y., Hua, J., ... & Yap, P. S. (2024). Biomaterials technology and policies in the building sector: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 22(2), 715-750.
 22. Irbe, I., Loris, G. D., Filipova, I., Andze, L., & Skute, M. (2022). Characterization of self-growing biomaterials made of fungal mycelium and various lignocellulose-containing ingredients. *Materials*, 15(21), 7608.
 23. <https://ecovative.com/>
 24. <https://mushroompackaging.com/>
 25. <https://www.grown.bio/>
 26. <https://forager.bio/>
 27. <https://www.sceltamushrooms.com/ourcelia/>
 28. <https://patents.justia.com/assignee/ecovative-design-llc>
 29. <https://www.residuosprofesional.com/ecovative-patente-materiales-micelio-alternativa-plastico/>
 30. <https://equityzen.com/company/ecovatedesigns/>
 31. <https://www.mycoworks.com/paris>
 32. <http://www.mycelium-resources.info/contributor/mycl-mycotech-lab/>
 33. <https://mogu.bio/>
 34. <https://www.biohm.co.uk/mycelium>
 35. <https://vegconomist.com/materials/biohm-regenerative-construction-materials/>
 36. <https://www.kineco.bio/>
 37. <https://www.mykor.co.uk/>
 38. <https://www.mycela.no/products/mycowall-panel>

39. <https://myceen.com/building-materials>
40. <https://www.studiohendrikx.com/>
41. <https://loop-biotech.com/es/>
42. <https://www.fungar.eu/>
43. <https://www.inbuilt-project.eu/>
44. <https://www.fungateria.eu/>
45. <https://www.mnext.nl/en/projects/mythic-2/>
46. <https://www.urlaubsarchitektur.de/en/magazine/newood-mycelium-miracle-for-the-building-industry/>
47. <https://research.kuleuven.be/portal/en/project/3E241302>
48. https://www.research-in-germany.org/idw-news/en_US/2025/9/2025-09-18_Can_Fungi_Revolutionize_Thermal_Insulation_.html
49. <https://www.corpuscoli.com/projects/bio-ex-machina/>
50. Williams, E., Cenian, K., Golsteijn, L. et al. Life cycle assessment of MycoWorks' Reishi™: the first low-carbon and biodegradable alternative leather. *Environ Sci Eur* 34, 120 (2022). <https://doi.org/10.1186/s12302-022-00689-x>
51. Benetti, B., Conti, F., & Dimitriadis, P. (2025). Mycelium-based leather: A review on post-processing treatments and material enhancements. *Environmental and Climate Technologies*, 29(1), 390-404.
52. Elsacker, E., Vandeloek, S., & Peeters, E. (2023). Recent technological innovations in mycelium materials as leather substitutes: a patent review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 11, 1204861.
53. Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. *Materials & Design*, 187, 108397.
54. Javadian, A., Le Ferrand, H., Hebel, D. E., & Saeidi, N. (2020). Application of mycelium-bound composite materials in construction industry: A short review. *SOJ Materials Science & Engineering*, 7(2), 1-9.
55. Jiménez-Obando, G., Arcila, J. S., Tolosa-Correa, R. A., Valencia-Cardona, Y. L., & Montoya, S. (2025). Development and Characterization of Mycelium-Based Composite Using Agro-Industrial Waste and *Ganoderma lucidum* as Insulating Material. *Journal of Fungi*, 11(6), 460.
56. Hohlberg, V. S. C. (2021). Uso de material a base de micelio para la elaboración de componente prefabricado que resulte compatible con construcciones sustentables: construcción de centro de interpretación y Turismo en Bahía Exploradores (Master's thesis, Pontificia Universidad Católica de Chile (Chile)).
57. Essamhi Saidi, Kamila, (2024). Bioconstrucción y biomateriales compuesto a base de micelio, el biomaterial sostenible del futuro en bioarquitectura. Trabajo final de Máster, en Tecnología de Edificación, Universidad Politécnica de Cartagena.
58. Fuentes-Cantillana Monereo, Ignacio (2020). Bio Fabricación. Micelio como material de construcción: biocomposite en sustratos lignocelulósicos. Trabajo Fin de Grado en Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.
59. Portella Ruiz, Kateren Victoria (2024). Producción de biomateriales a partir de micelio de hongos basidiomicetos. Tesis Ingeniería ambiental, UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA, Peru.
60. Román-Ramos, J. D., Luna-Molina, F. J., & Bailón-Pérez, L. J. (2014). Encofrado

- perdido constituido por paja cohesionada con micelio como sustituto del poliestireno expandido. *Informes de la Construcción*, 66(Extra-1), m006-m006.
61. Alzate Restrepo, J. (2023). Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
 62. Yang, L., & Qin, Z. (2023). Mycelium-based wood composites for light weight and high strength by experiment and machine learning. *Cell Reports Physical Science*, 4(6).
 63. Pelletier, M. G., Holt, G. A., Wanjura, J. D., Bayer, E., & McIntyre, G. (2013). An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. *Industrial Crops and Products*, 51, 480-485.
 64. Christos, R. E., Hartanti, A., & Subali, D. (2024). The Potential of Mycofoam as a Biocomposite Material with Various Substrate and Mushroom Compositions. *Jurnal Sumberdaya Hayati*, 10(1), 7-14.
 65. Vašatko, H., Gosch, L., Jauk, J., & Stavríc, M. (2022). Basic research of material properties of mycelium-based composites. *Biomimetics*, 7(2), 51.
 66. Sánchez, José & Royse, Daniel. (2017). La Biología, el cultivo y las propiedades nutricionales y medicinales de las setas *Pleurotus* spp..
 67. Altamirano Cabay, Kevin Javier & Ortiz Bastidas, Ángela Sofía (2022). Construcción de un Biorreactor para la obtención de micelio infinito del hongo Portobello (*Agaricus brunnescens*) y *Pleurotus ostreatus* mediante la Técnica Honey Tek. Trabajo de Integración Curricular, INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.
 68. Sabantina, L., Kinzel, F., Hauser, T., Többer, A., Klöcker, M., Döpke, C., ... & Ehrmann, A. (2019). Comparative study of *Pleurotus ostreatus* mushroom grown on modified PAN nanofiber mats. *Nanomaterials*, 9(3), 475.
 69. Muñoz Castillo, Felipe Alberto (2020) Sistematización de pruebas de crecimiento en medios de cultivo sólido para hongos silvestres descomponedores de madera en el contexto del desarrollo de biomateriales de micelio. Caso de estudio: Monumento Abierto. Seminario de Título para optar al Título de Ingeniero en Biotecnología Molecular, Universidad de Chile.
 70. Paula Natali Jimenez Martinez Sthefania Piña Correa (2024) Caracterización Del Hongo Micorrízico Y El Uso De Micelio Como Biomaterial De Construcción En Colombia. Proyecto Curricular de Ingeniería Ambiental, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
 71. Garcés, S., & Llobell, A. (2003). Purification and characterization of a laccase from the white root rot fungus *Rosellinia necatrix*
 72. Haneef, M et al 2017 dvanced Materials From Fungal Mycelium: Fabrication and Tuning of Physical Properties. *Scientific Reports*
 73. A. Ghazvinian, P. Farrokhsiar, F. Vieira, J. Pecchia, B. Gursoy, Mycelium-based biocomposites for architecture: assessing the effects of cultivation factors on compressive strength, The eCAADe and SIGraDi Conference, University of Porto, Portugal, 2019.

AIDIMME

Instituto Tecnológico

Domicilio fiscal —

C/ Benjamín Franklin 13. (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 366 070 | Fax 961 366 185

Domicilio social —

Leonardo Da Vinci, 38 (Parque Tecnológico)
46980 Paterna. Valencia (España)
Tlf. 961 318 559 - Fax 960 915 446

aidimme@aidimme.es
www.aidimme.es