

Elaboración de Biocompuestos de Micelio de Hongo para el Desarrollo de un Panel de Absorción Acústica para Muros de Entramado liviano de Madera

Estudiante: Katherine Alejandra Donoso Cabello

Profesor guía: Gabriel Ernesto Felmer Plominsky

Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Universidad de Chile

Resumen

Los biocompuestos de micelio de hongo con sustratos orgánicos renovables poseen un gran potencial para ser utilizados como materiales de absorción acústica en viviendas. En Chile, los materiales comúnmente utilizados para estos fines corresponden a materiales de alta intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente lana mineral y lana de vidrio. Con el objetivo de evaluar el potencial uso de nuevos biocompuestos de micelio de hongo de las especies *Pleurotus ostreatus* y *Lentinus lepideus* con distintos sustratos provenientes del sector agrícola del país, para mejorar los niveles de absorción acústica de muros tradicionales de viviendas de entramado liviano. Para ello se desarrolló un trabajo experimental en el laboratorio de biotecnología de la Universidad Católica del Maule (UCM), donde se realizaron 70 muestras que sirvieron de base para caracterizar su densidad, porosidad y capacidad de absorción del sonido con un tubo de impedancia acústica de acuerdo a las normas ISO 10534-2 (1998) y ASTM 1050 (1998). Los resultados obtenidos de las muestras estudiadas fueron muy prometedores, con coeficientes de absorción NRC 0,5-0,6 y SAA 0,48-0,64, valores ampliamente satisfactorios en comparación a materiales absorbentes tradicionales. Estas propiedades, además de los bajos costos y la baja intensidad de emisiones asociadas al material resultante podrían sentar la base para contribuir a una construcción más ecológica en el país.

Palabras clave: Biomateriales, Micelio de hongo, Entramados livianos, Construcción en madera, Absorbente acústico, Construcción circular

1. Introducción

Es de vasto conocimiento el impacto de la industria de la construcción sobre el aumento de temperatura a nivel global. Haciéndose responsable del 40% de las emisiones de carbono (CO₂), consumiendo el 50% de los recursos naturales, el 40% de la energía y generando un 50% de residuos sólidos del planeta, de acuerdo a datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2020;2021).

Ante esto, se ha vuelto cada vez más crucial la necesidad de desarrollar nuevos materiales, más sostenibles. Para ello, la nanotecnología y la diversidad química compositiva de los materiales, han evidenciado la enorme capacidad de poder desarrollar innovadores materiales con propiedades específicas. De esta forma, es como han surgido los "Biomateriales", que son materiales desarrollados a partir de recursos biológicos. Una estrategia de biomateriales que ha adquirido un alto interés para la investigación, corresponde a la utilización de micelio de hongo y sustratos naturales para su fabricación. Este compuesto, de acuerdo a la

literatura, por su similitud con ciertas características de la madera como la presencia de lignina entre sus componentes, celulosa y hemicelulosa, respondería favorablemente al trabajar en conjunto.

En el contexto nacional, el sector de la construcción es responsable de cerca del 33% del consumo energético a nivel país y un 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (MMA, 2018). Respecto a la energía consumida en la construcción, un 67% corresponde a la etapa de operación de las edificaciones, **un 30% a la extracción y manufactura de materiales de construcción**, y solo un 3% a la ejecución en obra (CNP, 2021; Banco Mundial, 2020). En Chile, el único biomaterial ocupado de forma masiva, es la madera y corresponde al segundo material de construcción más utilizado en viviendas después del hormigón. Sin embargo, es el primero en edificaciones de viviendas de 1 y 2 pisos de altura, presentando un aumento de un 23% para este último segmento y presenta un crecimiento sostenido en el tiempo en cuanto a su uso (Banco Mundial, 2020; CIM UC, 2019). Específicamente del sector residencial, se estima que cerca de 1,3

millones de viviendas en Chile requieren ser reacondicionadas, debido a bajos estándares cualitativos habitacionales, haciéndose urgente mejorar la habitabilidad de las viviendas existentes y nuevas (CASEN, 2018).

La madera como material constructivo presenta numerosos beneficios. Entre ellos destaca que es un material más eficiente frente a materiales como el hormigón y otros tradicionales. Cuando hacemos referencia a eficiencia, nos referimos a dos factores principalmente: el primero, es el beneficio inherente de la madera en cuanto a su bajo peso, resistencia y capacidad de ser maquinado en seco; aspectos que convierten a la madera en un material idóneo para su uso en estructuras industrializadas y posterior montaje, agilizando los trabajos en obra y reduciendo los tiempos de construcción, y por ende, los costos directos y financieros.

En segundo lugar, la madera es un material con capacidades térmicas altamente aislantes. Esta característica no es menor, ya que gracias a ello, se pueden generar grandes reducciones asociadas a los requerimientos de calefacción de un inmueble. Bajo esta misma línea, de acuerdo a análisis realizados por CIM UC (2019), un edificio habitacional de madera puede llegar a requerir 35% menos de energía para calefacción que un edificio de hormigón armado.

Desde el ámbito acústico, la madera es considerada como un material con excelente capacidad para controlar el ruido. Es ampliamente reconocida como un buen amortiguador del sonido, esto debido a su estructura porosa que permite absorber las ondas sonoras transformándolas en energía calórica por la fricción ejercida entre el aire y los intersticios del material. Sin embargo, si bien la madera es capaz de mitigar parte de las ondas de ruido, gran parte de ellas también logran atravesarla, convirtiéndola, a su vez, en un material altamente transmisor del sonido.

Las condiciones de habitabilidad respecto a estándares mínimos de confort acústico, se vuelve aún más relevante ser atendido con urgencia en viviendas de entramados de madera, puesto que este tipo de viviendas, suelen estar más propensas a sufrir molestias relacionadas a una mala gestión en cuanto a aislación acústica por tres razones principalmente:

- Los elementos constructivos de madera, de acuerdo con la ley de masa, no tienen un gran aislamiento acústico debido a su baja densidad.
- La madera es un alto transmisor de ruido.

- La madera tiene la capacidad de amortiguar o absorber solo una porción de las vibraciones sonoras. Gracias a su estructura celular porosa transforma la energía sonora en calórica, debido al roce y resistencia viscosa del medio, evitando de esta forma transmitir vibraciones a grandes distancias (Pino N., 2016; CORMA, 2007).

Según el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) (2021), el ruido es el contaminante más común y tiene la capacidad de afectar la salud y calidad de vida de las personas. Considerando datos del MMA, en donde se ha identificado que el 50% de las denuncias ambientales corresponden al contaminante ruido, resulta evidente que las soluciones actuales (lana de vidrio y lana mineral, las principales) no rinden resultados favorecedores, por lo tanto, se debe evaluar una nueva forma de responder al problema acústico.

Dentro de las principales causas, se encuentran distintos factores influyentes que convergen en un punto común: la normativa vigente. En la OGUC (2020) se establece:

“Las exigencias acústicas que se señalan en este artículo serán aplicables sólo a los elementos que separen o dividan unidades de viviendas que sean parte de un edificio colectivo, o entre unidades de vivienda de edificaciones continuas, o entre unidades de viviendas de edificaciones pareadas, o entre las unidades de vivienda que estén contiguas a recintos no habitables”

Vale decir, la normativa acústica chilena sólo contempla ámbitos divisorios de las viviendas y conjuntos habitacionales, donde se establece el índice de reducción acústica mínimo para elementos verticales y horizontales de 45 dB y el nivel de presión sonora de impacto máximo para elementos verticales de 75 dB, mas no cubre lo que corresponde a muros interiores ni instalaciones, ni tampoco hace alusión a los tres fenómenos que se engloban dentro del concepto de aislación acústica: la reflexión, absorción y transmisión del sonido. Cada uno de ellos, tiene requerimientos distintos, los cuales no son abordados en la normativa actual, tendiendo a confundir la forma de tratar cada uno de ellos. Por ejemplo, un material aislante acústico, es un pésimo absorbente, ya que su finalidad es reflejar el sonido, por ende, tienden a ser materiales más densos y rígidos. Por su parte, para una buena absorción acústica se requiere de materiales con características particulares, siendo las más

importantes la porosidad (cercana a 1) y la densidad (entre 40-100 Kg/m³) (Castillo, J.; Costa, A., 2012).

En la actualidad, para absorción acústica se encuentran materiales como la lana de vidrio y la lana mineral como principales componentes utilizados con este fin por su excelente rendimiento como absorbentes. Todos estos requieren de procesos industriales importantes y altamente contaminantes ya sea en el proceso de elaboración, en su proceso de vida útil o en la generación de gases tóxicos en casos de incendio.

2. Antecedentes

Los hongos son los grandes recicladores del planeta (South Mill, 2015). Habitan en un patrón cíclico que comienza con las esporas, que se convertirán en micelio y luego este generará setas que a su vez producirán nuevamente esporas, iniciando el ciclo una y otra vez (Ecovative Design, s.f.). Esta adaptabilidad del hongo ha sido fuertemente explotada internacionalmente en el ámbito académico y experimental. Se han llevado a cabo diversas investigaciones posicionando al micelio de hongo como potencial base para la fabricación de materiales de construcción basados en una economía circular. Mas las de mayor relevancia para esta investigación son aquellas en donde se pone a prueba la absorción y otros fenómenos acústicos. De acuerdo con algunos de estos estudios, se ha podido determinar que el micelio de hongo tiene un

excelente y atípico comportamiento como absorbente acústico (Holt et al., 2012; Agustina et al., 2019; Islam et al., 2017).

Esto debido a sus filamentos fibrosos estructurales llamadas *hifas*, que consisten en células alargadas separadas entre sí por una pared interna cruzada y porosa. En esta misma línea, se conoce que la porosidad es la principal característica que convierte a la lana de vidrio y lana mineral en excelentes absorbentes acústicos y es producto de la estructura fibrosa y porosa del micelio la cual lo ha posicionado como un material idóneo para este fin.

Alternativamente, surge también el uso de distintos sustratos provenientes de biomasa agrícola. Estos logran conceder una gama aún más amplia de absorbentes, con niveles de absorción del 70-75% o incluso mejor (Pelletier et al., 2013). De acuerdo a la literatura, algunos de los mejores resultados obtenidos con residuos agrícolas como sustratos para la absorción acústica fueron las varillas de pasto (55 dBa), fibra de sorgo (54 dBa), linaza (53,5 dBa), médula de cáñamo (53 dBa) y la paja de arroz (52 dBa). Las propiedades del producto final son muy dependientes del sustrato a utilizar, por ello se debe poner atención al tipo de material lignocelulósico, al tamaño y qué tan fibroso es, puesto que se ha comprobado que las fibras finas proporcionan mejor absorción acústica (Jones et al., 2020).

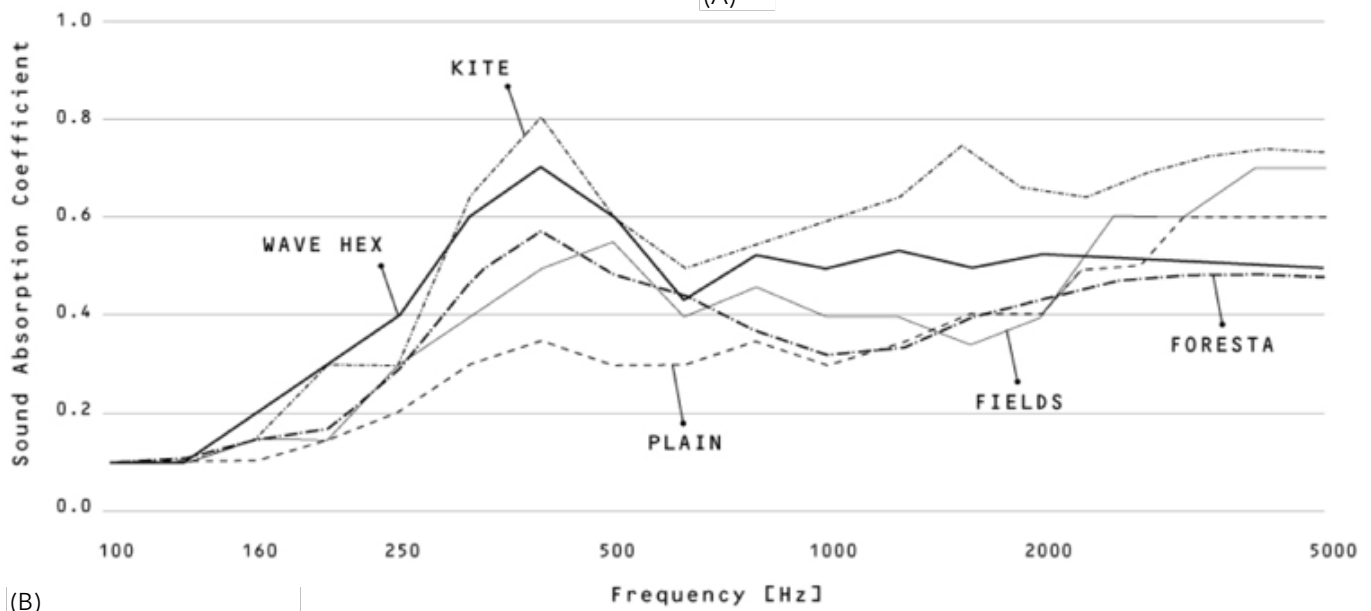
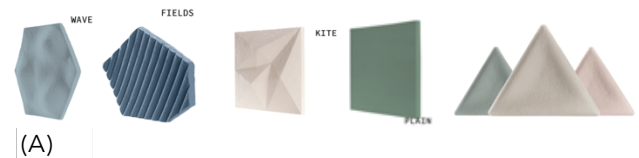


Fig. 1: (A) Absorbentes acústicos Mogu®. De izquierda a derecha: Mogu Wave. (B) Mogu Fields. (C) Mogu Kite. (D) Mogu Plain. (E) Foresta System. (B) Rendimiento de paneles de absorción acústica Mogu®. Fuente: Mogu s.r.l

En el país, el cultivo de cereales es una de las mayores fuentes de producción. En el período 2021/2022, los cinco cereales más cultivados fueron el trigo, la avena, el maíz, la cebada y el arroz, ordenados desde el de mayor a menor producción (Anexo 1) (Odepa, 2022). Por ende, esta es una variable importante a considerar a la hora de abordar esta investigación y al escoger los sustratos con los que se trabajará.

El avance en los estudios del micelio ha decantado en importantes innovaciones de ámbito comercial alrededor del mundo (Jones et al., 2020). Un ejemplo en torno a innovación de biomateriales acústicos en base a micelio de hongo es Mogu®, una empresa italiana que ofrece productos absorbentes acústicos desarrollados con micelio y residuos textiles reciclados apropiados para su aplicación en interiores. Mogu® pone un especial énfasis en el desarrollo de paneles estéticos y con capacidad de absorción para responder a la acústica de los recintos interiores. Ofrece un catálogo con una gama de productos que tienen el objetivo de estilizar recintos y maximizar la absorción del sonido; variando desde productos suaves y espumantes hasta duros y de alta densidad (Fig. 1A).

Mogu Wave; es un panel de pared con propiedades amortiguadoras del sonido, su diseño de olas busca responder a niveles sensoriales visuales y acústicos. Mogu Fields es otro panel con diseño de suaves rayas inspirado en campos sembrados creando patrones ordenados y elegantes. Su respuesta acústica es de mayor nivel de absorción que Wave ante ruidos de mayor frecuencia. Mogu Kite; este panel se inspira en la interacción de la luz y la superficie de los materiales de micelio, creando patrones visuales de reflejos y sombras gracias a su diseño de pliegues geométricos. Este es el panel con mejor respuesta de absorción acústica. Mogu Plain son paneles lisos simples que responden al concepto de "menos es más". Es el que tiene menor respuesta de coeficiente de absorción ante sonidos de menor frecuencia, pero aumenta su eficacia frente a sonidos de mayor frecuencia. Foresta System consiste en un diseño modular inspirado en la sensación de caminar por el bosque, es el único que combina la estética refinada de la madera con micelio. Este logra su mejor rendimiento ante frecuencias de voz (500hz) (Fig. 1B) (Mogu, sf.).

3. Hipótesis de investigación

La elaboración de biocompuestos de micelio de *Pleurotus ostreatus* y *Lentinus lepideus* con residuos de la cosecha de trigo, cebada y arroz permite

alcanzar coeficientes de absorción acústica superiores a la lana mineral y lana de vidrio, comúnmente usados en el mercado nacional, ofreciendo un producto mejorado de mayores prestaciones ambientales.

4. Objetivo principal y específicos

El objetivo principal de esta investigación es desarrollar un nuevo biocompuesto de micelio de hongo con sustratos en base a residuos agrícolas disponibles en el país que contribuyan a mejorar la capacidad de absorción acústica de muros de tabiquería liviana de madera tradicional. Los objetivos específicos de esta investigación son:

1. Elaborar muestras de biocompuestos de absorción acústica en base a micelio de hongo *Pleurotus ostreatus* y *Lentinus lepideus*, con rastrojo de trigo, bagazo de cebada y cascarilla de arroz.
2. Medir las propiedades físicas y acústicas asociadas a la capacidad de absorción acústica de las muestras.
3. Evaluar la mejor alternativa para el desarrollo de un panel de absorción acústica en base a propiedades acústicas, costos, disponibilidad material, fabricación, maniobrabilidad e impacto ambiental.

5. Métodos y Herramientas

Para cumplir con los objetivos planteados, las muestras de biocompuestos fueron elaboradas en base a tres etapas en el laboratorio de biotecnología de la Universidad Católica del Maule (UCM). Como se puede ver en la Fig. 2, primero se realiza la preparación de los sustratos y las cepas madres correspondientes a cada hongo (Etapa I). Luego se procede a la preparación del medio de transición (Etapa II), que permitirá que el hongo adquiera una primera aproximación a este tipo de sustratos lignocelulósicos y sea más fácil y rápida la colonización en el sustrato final. Por último, se elaboran las muestras en placas circulares o placas Petri (Etapa III). Una vez finalizado el proceso de crecimiento y secado del micelio en las placas, se escogerán tres de las muestras resultantes para finalizar con la realización de pruebas acústicas en el laboratorio de Ingeniería en sonido de Acusonic® (Etapa IV), donde se medirá la capacidad de absorción de cada muestra a través del método de tubo de impedancia (Fig. 2).

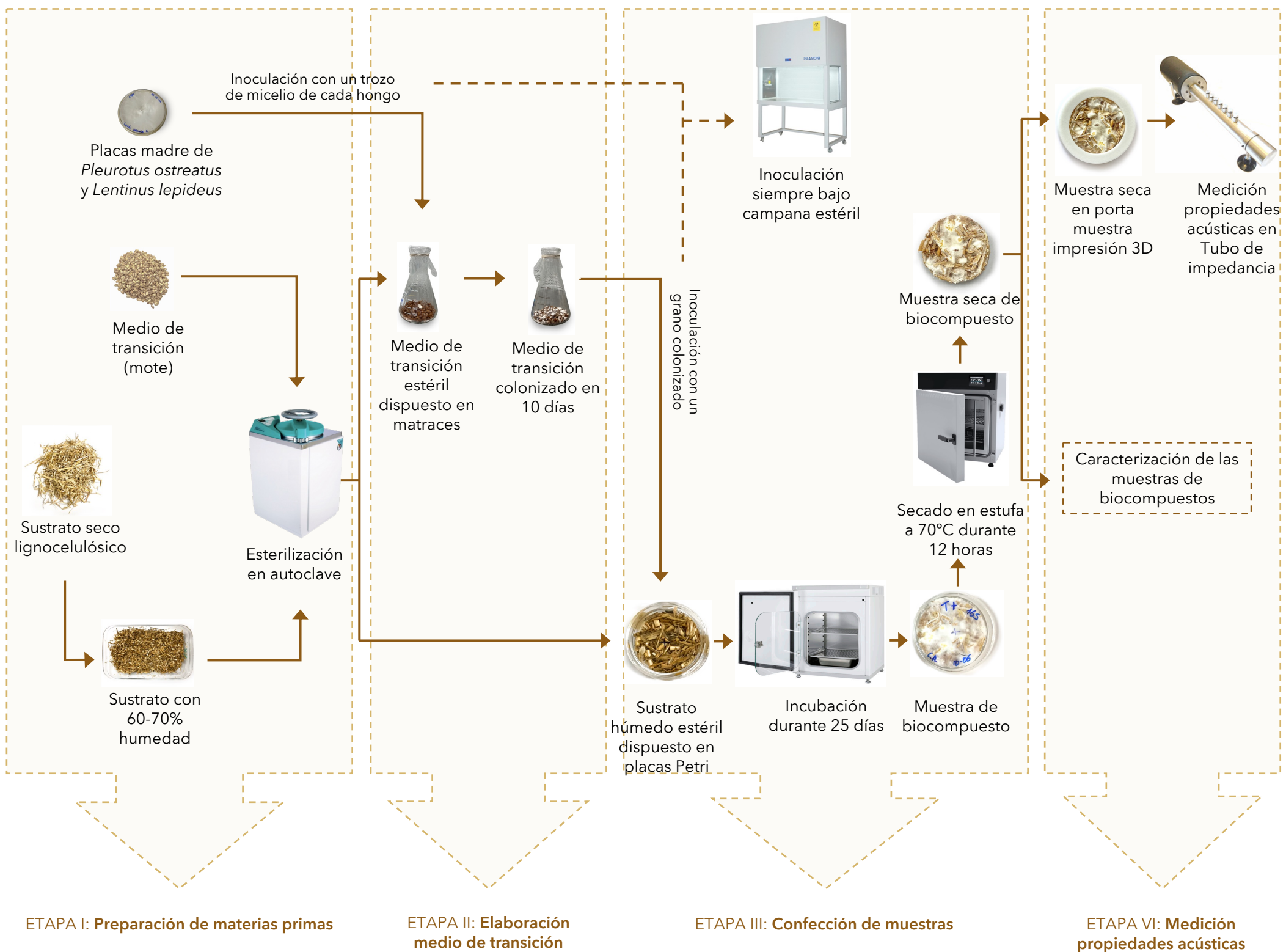


Fig. 2: Síntesis metodológica. Fuente: Elaboración Propia.

Preparación de materias primas (Etapa I). Los dos hongos escogidos para este estudio corresponden a la clasificación *Filo Basidiomycota* del reino Fungi. Ambos son descomponedores de madera, siendo esta característica la que determinó los hongos a utilizar, ya que se trabajará con sustratos orgánicos con una composición química similar a la madera y son de fácil digestión para los hongos.

Pleurotus ostreatus (PO): corresponde a un hongo descomponedor de madera de pudrición blanca. Esto significa que digiere la *lignina* de los compuestos lignocelulósicos, dejando la celulosa y hemicelulosa sin descomponer. Se puede encontrar en el país desde la zona central hasta el sur austral.

Lentinus lepideus(LL): es un hongo descomponedor de madera de pudrición café o parda. A diferencia del anterior, este consume la *celulosa* y *hemicelulosa* de la pared celular de compuestos lignocelulósicos, dejando sin digerir la *lignina*.

Para cada uno de los hongos se prepararon cepas madres (Fig 3A), requeridas para la producción posterior del hongo y realizadas especialmente para esta investigación, a partir de hongos disponibles en el laboratorio. Esto con el fin de contar con disponibilidad a lo largo de todo el proceso en caso de ser necesario.

Para la elaboración de las cepas, en primer lugar, se preparó el medio de cultivo o PDA (Potato Dextrose Agar), que permitirá el crecimiento del hongo y el cual será esterilizado para proceder a la inoculación y al cultivo del hongo bajo campana de flujo laminar BIOBASE® de dimensiones externas 1460 x 800 x 1690 mm, la cual provee de protección durante el proceso experimental, manteniendo un ambiente estéril con un rango de limpieza >99.995% a 0.3 UM.

Cada hongo tuvo tiempos distintos de crecimiento; *PO* tardó 8 días en crecer, mientras que *LE* tardó 10 días. Esta variable de tiempo, fue importante a considerar luego al momento de confeccionar las muestras, puesto que permitió dimensionar los tiempos finales de crecimiento en las placas con sustratos.

Para el caso de los sustratos, se utilizan residuos agrícolas de productores locales; rastrojo de trigo, bagazo de cebada y cascarilla de arroz (Fig. 3B). Estos residuos, que son de difícil degradación y eliminación para el productor, son aprovechados para llevar a cabo la investigación, evitando que sean eliminados a través de métodos que podrían causar un alto impacto ambiental.

El rastrojo de trigo (RT): es el residuo que se obtiene luego de las cosechas del trigo. Es un desecho muy abundante en los campos de cultivo del país y se compone de los tallos, algunas espigas y hojas de la planta del trigo.

El bagazo de cebada (BC): es la materia resultante del proceso de filtrado y prensado del mosto, el cual se obtiene luego de la sacarificación del grano de cebada ya malteado (secado y tostado) en la fabricación de cerveza.

La cascarilla de arroz (CA): es la parte exterior del grano de arroz y corresponde a un subproducto que se genera luego de la cosecha, en el proceso de descascaración del arroz por medio de fricción-abrasión, desprendiendo la cáscara y limpiando el grano.

Para efectos de esta investigación, y debido a que los hongos solo crecen en medios húmedos, era necesario que las cinco variaciones de sustratos alcanzaran un porcentaje de humedad dentro del rango del 60-70%. Puesto que todos los sustratos venían secos, para alcanzar dicho porcentaje, se agregó agua en distintas proporciones, dependiendo del peso y volumen del sustrato a utilizar (Fig. 3C) (Anexo 2).

Elaboración medio de transición (Etapa II). Una vez crecidas las cepas madres, se prepara el medio de transición. Este corresponde a trigo mote y será el encargado de llevar el hongo hacia el sustrato (Etapa III). En esta etapa, se distribuye de 35gr el trigo mote en matraces de 250ml para luego ser esterilizados en autoclave y proceder a inocular con cada hongo bajo campana para evitar contaminaciones en las muestras.

En un periodo de 10 días, el medio de transición está listo para proceder a la inoculación en los sustratos. Una variable importante en este proceso fue que en estos 10 días, *Pleurotus ostreatus* (*PO*) había colonizado todos los granos de trigo mote. Sin embargo, *Lentinus lepideus* (*LL*), presentó un crecimiento levemente más tardío abarcando menos granos de trigo mote. Esto anticipó que *PO* tardaría menos tiempo en colonizar las placas finales.

Confección de muestras (Etapa III). En primer lugar, a partir de los tres sustratos principales, se generaron tres variables. Las primeras dos se produjeron subdividiendo el RT en distintos tamaños del mismo sustrato para luego, en la siguiente etapa, evaluar como se comporta el hongo dependiendo del tamaño de la fibra y, a su vez, cómo la granulometría del sustrato influirá en la

capacidad de absorción acústica de las muestras finales. La tercera variable, se generó con la mezcla de RT y CA para evaluar el crecimiento y velocidad del hongo con dos tipos de alimento, así como también, al ser dos sustratos de distintos tamaños y características, podría influir en la capacidad de absorción acústica del biomaterial resultante.

Rastrojo de trigo "grande" (RTg): RT cortado con tijeras en fibras de hasta 20mm de largo.

Rastrojo de trigo "pequeño" (RTp): RT cortado en fibras muy pequeñas entre 2 - 8mm.

Mezcla RTg + CA (RgC): Se compuso de la combinación de la misma porción de volumen tanto de RTg, como de CA.

Teniendo los cinco sustratos a utilizar listos, se dispone cada uno en 14 placas Petri de 60mm de diámetro y 10mm de espesor, resultando 70 placas en total (Fig. 4). Las cantidades de cada uno varía de acuerdo a su tamaño y peso.

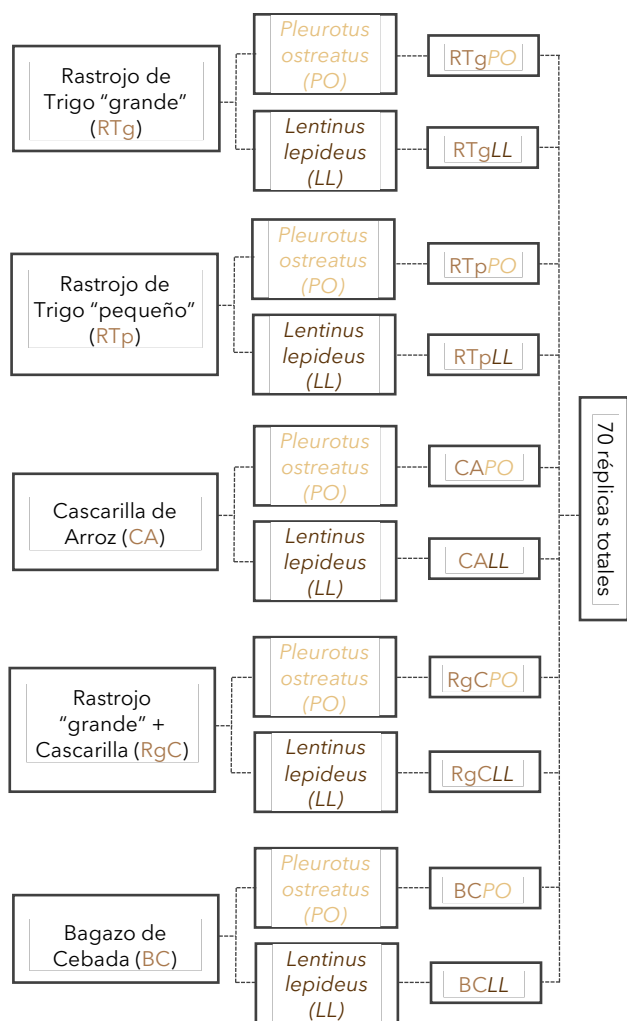


Fig. 4: Distribución réplicas totales. Fuente: Elaboración Propia.

Las 14 placas de RTg se llenaron con 5gr, las de RTp con 6gr, las de CA con 10gr, las de RgC con 5gr y las de BC con 20gr (Anexo 2). Y a continuación, se llevan a esterilizar.

Finalizado el proceso de pasteurización, se procede a cultivar los hongos en cada placa. El proceso de inoculación se realiza bajo campana BIOBASE® a través de los granos de trigo mote (medio de transición) colonizados completamente con los respectivos hongos. Para ello, se dispone solo un grano sobre el sustrato de cada placa, ubicándolo en el centro de la misma, para que el hongo crezca de forma radial. De las 14 placas con un mismo sustrato, 7 se inoculan con PO, y las otras 7 con LL.

Las placas (Fig. 3D) se mantienen en incubadora durante todo el proceso de crecimiento. Se tuvieron en observación durante los primeros 10 días, para supervisar la posible existencia de contaminación por bacterias en las réplicas, al no observarse ningún indicio de contaminación durante ese período, se evidenció que la inoculación se logró exitosamente.



Fig. 3. (A) Cepas madre. (B) Sustratos secos. (C) Sustratos hidratados. (D) Placas con sustratos. Fuente: Elaboración propia.

En un total de 25 días, y habiendo escogido las 10 muestras más avanzadas a la fecha, se desmoldaron y se sometieron a 70°C en estufa de cultivo durante 12 horas para secar las muestras y evitar que el micelio continúe su crecimiento. Transcurridas las 12 horas de secado, las muestras se dejan alcanzar temperatura ambiente.

Medición propiedades acústicas (Etapa IV). En función de las propiedades físicas y acústicas de las muestras, se seleccionaron tres que reunían mejores características para ser sometidas a mediciones de absorción acústica: BCPO, RTgLL y RTpLL (Fig. 5A).

Para la medición de las propiedades acústicas de las muestras, estas fueron trasladadas al laboratorio de Ingeniería en sonido de Acusonic®, en donde se utilizará el método del Tubo de Impedancia con dos posiciones fijas de micrófono normado por las normas ISO 10534-2 (1998) y ASTM 1050 (1998). Este método, se compone de un sistema completo de medición de absorción sonora (Fig. 6). El cual, además del tubo de impedancia de acero inoxidable con 7 posiciones de muestreo y una caja adosada con altavoz al interior con respuesta desde 50 a 5kHz, dos micrófonos para mediciones de respuesta plana, implica la utilización de software BERSALFA_XPress. Este entrega valores de absorción sonora para un rango de frecuencias continuo desde los 100-5k [Hz] a través de dos descriptores: NRC (*Noise Reduction Coefficient*) que indica las propiedades acústicas de un material y SAA (*Sound Absorption Average*) que describe las propiedades absorbentes de un material. Ambos valores varían entre 0 y 1, siendo los más cercanos a 1, los de mejor coeficiente de absorción.

Para la realización de las mediciones, se requirió que las muestras fueran, máximo, de 50mm de diámetro, dimensión normada en la normativa mencionada. Puesto que las muestras se fabricaron con 60mm de diámetro, fue necesario diseñar un porta muestras (Fig. 5B-C) que permitiera adaptar cada una de las tres muestras al tubo de impedancia.

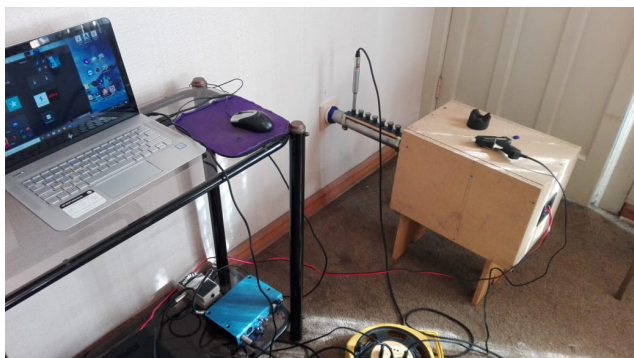


Fig. 6. Equipo utilizado en medición de coeficiente de absorción sonora. Fuente: Acusonic®.

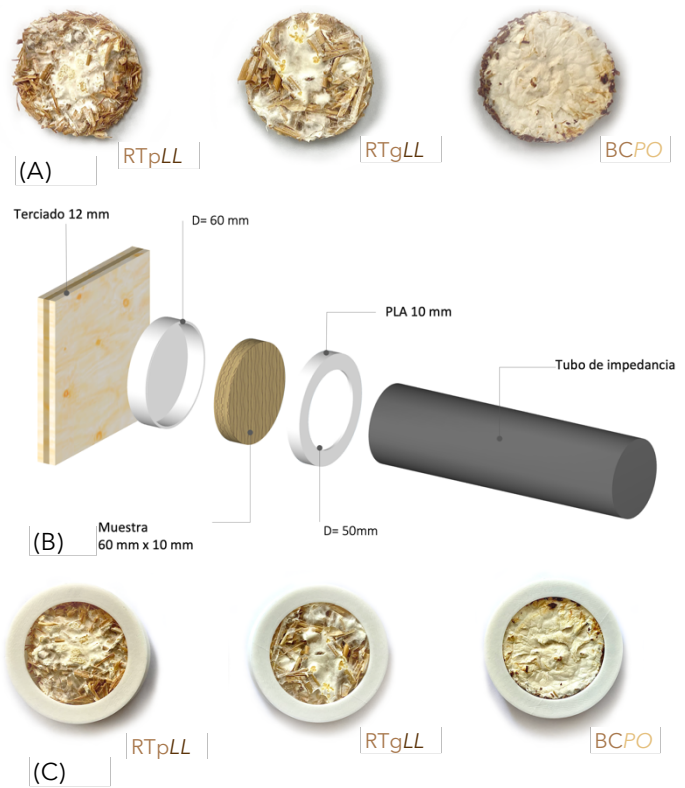


Fig. 5. (A) Muestras secas escogidas. (B) Porta muestras impresión 3D. (C) Muestras en porta muestras. Fuente: Elaboración propia.

6. Resultados

6.1. Tiempos de crecimiento

Durante el proceso de crecimiento del micelio al interior de las placas, se observaron distintos fenómenos. En primer lugar, ambos hongos tuvieron tiempos de crecimiento relativamente homogéneos, sin embargo, *PO* presentó un crecimiento levemente más acelerado en sus respectivas placas. En segundo lugar, definitivamente el sustrato fue un factor importante, puesto que el mismo hongo también tenía tiempos de crecimiento distintos, dependiendo del sustrato en el cual se encontraba.

Como se puede observar en la Fig. 8, en las primeras dos semanas, la placa con crecimiento mas acelerado correspondía al hongo *PO*, tal como se había descrito en la Etapa II. A su vez, este crecimiento se ve afectado por el sustrato en el que se encuentra el hongo. En este sentido, las placas con sustrato BC (BCPO y BCLL), si bien presentan un crecimiento rápido durante la primera semana, a partir de la segunda mantiene un crecimiento menos acelerado y poseen un micelio mucho más condensado que el resto de los sustratos. Por el contrario, en el caso de las placas con RT inoculadas

con hongo *LL* (RTgLL y RTpLL), poseen un crecimiento ascendente constante durante la segunda y tercera semana, pero con un micelio mucho más fino.

A partir de la segunda semana, comenzó a observarse muy pocos cambios en el crecimiento de las placas (Fig. 8). Por ende, si bien aún no se lograba la colonización completa de los hongos al interior de las distintas placas (Fig. 7A-B), por motivos de tiempo, fue necesario escoger una muestra por cada hongo-sustrato (10 muestras) de aquellas que se encontraban más avanzadas en su crecimiento, esto con el fin de lograr alcanzar los objetivos planteados, dentro del tiempo establecido para esta investigación. A los 25 días, se seleccionaron las 10 muestras más avanzadas (Fig. 7C), se secaron y luego de alcanzar temperatura ambiente, 4 se desarmaron completamente por falta de contenido aglutinante, es decir; micelio de hongo. Por lo tanto, de las 6 restantes se seleccionaron las que se utilizaron para ser evaluadas acústicamente. Es importante mencionar que pese a que solo se logró culminar el proceso con 10 muestras, las 60 restantes continuaron su proceso de crecimiento fuera de esta investigación.

Paralelamente, se determinó que el estancamiento de las muestras se debió a falta de oxígeno al interior de las placas. Por lo tanto, se traspasan a placas de mayor tamaño y con más aire disponible para que puedan seguir su crecimiento. Este es un punto importante a considerar en próximas experimentaciones, ya que fue el factor clave que provocó el retraso en el crecimiento natural del micelio.

En base a estos primeros resultados y a diferencia de lo que ocurrió en la Etapa II, se puede interpretar que las muestras inoculadas con *LL* efectivamente requieren de menos tiempo para su crecimiento, sin embargo será el sustrato el que determinará cuál muestra adquirirá las características más prometedoras. Dicho lo anterior, en esta instancia, se puede pronosticar que las muestras con RT podría ser la que presente mejores cualidades como absorbente acústico debido, principalmente, a la densidad de su micelio y su capacidad y rapidez para abarcar el espacio disponible al interior de la placa manteniendo espacios de aire en su interior, facilitando la conformación de poros.

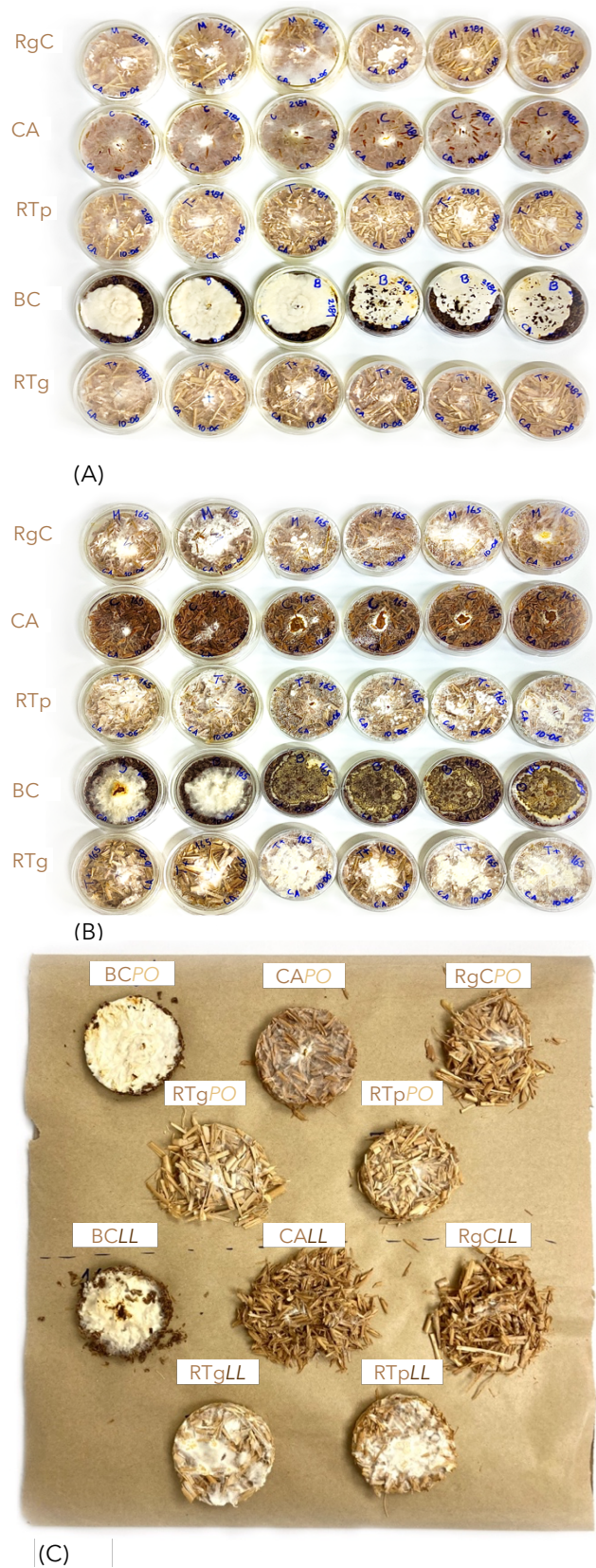


Fig. 7: (A) Estado de muestras de PO a 25 días de la inoculación. (B) Estado muestras de LL a 25 días de la inoculación. (C) Muestras secas. Fuente: Elaboración Propia.

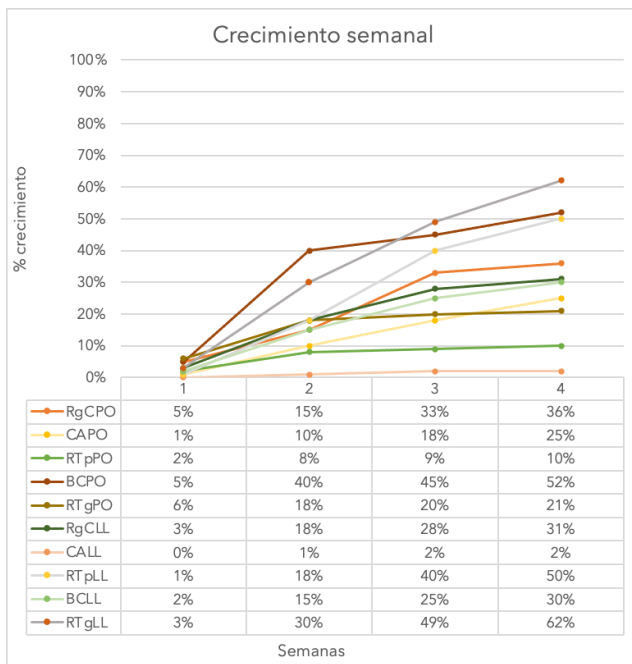


Fig. 8: Tiempo promedio de crecimiento de las muestras. Fuente: Elaboración propia.





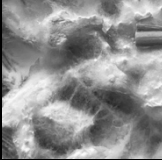
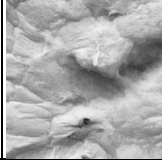
6.2. Caracterización de las muestras

Es importante señalar que al someter las muestras a un proceso de secado, significó una disminución en el tamaño, resultando en muestras circulares de 50mm de diámetro y 10mm de espesor. Esto por supuesto tuvo una implicancia en el cálculo de la densidades respectivas. Sin embargo, como se puede observar en la Tabla 1, las muestras RTpLL y RTgLL presentan densidades muy favorables considerando que la literatura establece que un buen absorbente acústico presenta una densidad comprendida entre 40-100 Kg/m³. Por su parte, la muestra BCPO, claramente se escapa de este rango, por ello se desprende, como primer indicio que no entregaría resultados prometedores como absorbente acústico.

Por otra parte, al no ser posible cuantificar el volumen de aire disponible en cada placa seca, no fue posible en esta instancia determinar la porosidad que adquirió cada una de las muestras. No obstante, a partir de los datos que se pueden observar en la Tabla 1, se puede inferir ciertas características importantes con respecto a la porosidad de las muestras.

Visualmente, en las fotografías se alcanza a observar la textura de las muestras y en base a ello, se especula que presentan características muy semejantes a un material poroso. Más aún en aquellas con sustrato RT, en donde se percibe que se generan pequeños espacios de aire entre cada

Tabla 1: Características de muestras secas finales. Fuente: Elaboración propia.

	RTpLL	RTgLL	BCPO
			
			
Peso húmedo	5,37 gr	4.49 gr	15.7 gr
Peso seco	1,53 gr	1.57 gr	4.77 gr
Densidad	77,94 Kg/m ³	79,97 Kg/m ³	242,99 Kg/m ³

fibra, lo cual es favorecedor para la conformación de poros. Asimismo, el micelio que las conforma, se puede apreciar mucho menos denso, de hecho, más bien se observa un micelio con capacidad aglutinante, y que le otorga estructura uniendo cada fibra, sin cerrar completamente los espacios de aire entre ellas. Por el contrario, no ocurre lo mismo con la muestra BCPO, que como se evidencia en la fotografía y en su densidad, no se logran apreciar poros visibles y más bien presenta un micelio muy condensado que no permite el paso del aire, ni la conformación de poros.

Estos primeros acercamientos, permiten entregar indicios preliminares con respecto al comportamiento de las tres muestras en su capacidad como potenciales absorbentes acústicos previo a ser sometidas a pruebas acústicas. A modo especulativo, tal como se previó de acuerdo a los tiempos de crecimiento y frente a las características expuestas, las muestras RTpLL y RTgLL, podrían ser las que aparentemente reúnen mejores propiedades físicas para responder como mitigadores de ondas sonoras.

6.3. Mediciones acústicas

Las evaluaciones acústicas realizadas por Acusonic tuvieron un tiempo de demora acotado de 4 días y arrojaron resultados ampliamente prometedores (Anexo 4). Estos se componen de una respuesta de coeficiente de absorción sonora a través de dos

descriptores: NRC (coeficiente de reducción de ruido), que describe las propiedades acústicas de un material y SAA (promedio de absorción del sonido) que indica las propiedades absorbentes del material, ambos indicadores varían entre 0 y 1. Como se expone en la Fig. 9B, los comportamientos en las distintas frecuencias de las tres muestras fueron muy diversos, a diferencia de la lana mineral y de vidrio que presentan un comportamiento lineal ascendente.

La muestra BCPO, que corresponde a la que reunió las características menos favorables, presenta coeficientes de absorción superiores a los absorbentes tradicionales en un rango de frecuencias 160-400 Hz y tiene respuesta similar a estos materiales frente a ondas sonoras de 2000 Hz. Esto permite dilucidar las especulaciones de la sección anterior y demuestra que a pesar de ser un biocompuesto con alta densidad en comparación al rango idóneo, logra responder satisfactoriamente frente a ondas sonoras, que si bien son ondas de menor frecuencia, se encuentran dentro del rango de frecuencias audibles emitidas en un hogar. Sin embargo, recalcar que su mejor coeficiente de absorción se encuentra frente a ondas de frecuencias de 2000Hz. En promedio, esta muestra logra un NRC y SAA de 0,6 y 0,58, respectivamente, valores superiores a la lana de vidrio y muy cercanos a la lana mineral (Fig 9A).

Por su parte, la muestra RTpLL, entrega una respuesta ascendente muy similar a la lana de vidrio, lo que se puede corroborar también en sus valores de NRC y SAA (Fig. 9A), superando su comportamiento únicamente frente a frecuencias de 315 Hz. No obstante, resulta inesperada su respuesta frente a ondas sonoras de 2000-2500 Hz, en donde se asemeja e incluso supera levemente a la lana mineral en su coeficiente absorbente. Estos resultados también resultan esclarecedores puesto que la muestra en cuestión cuenta con una densidad promisoría.

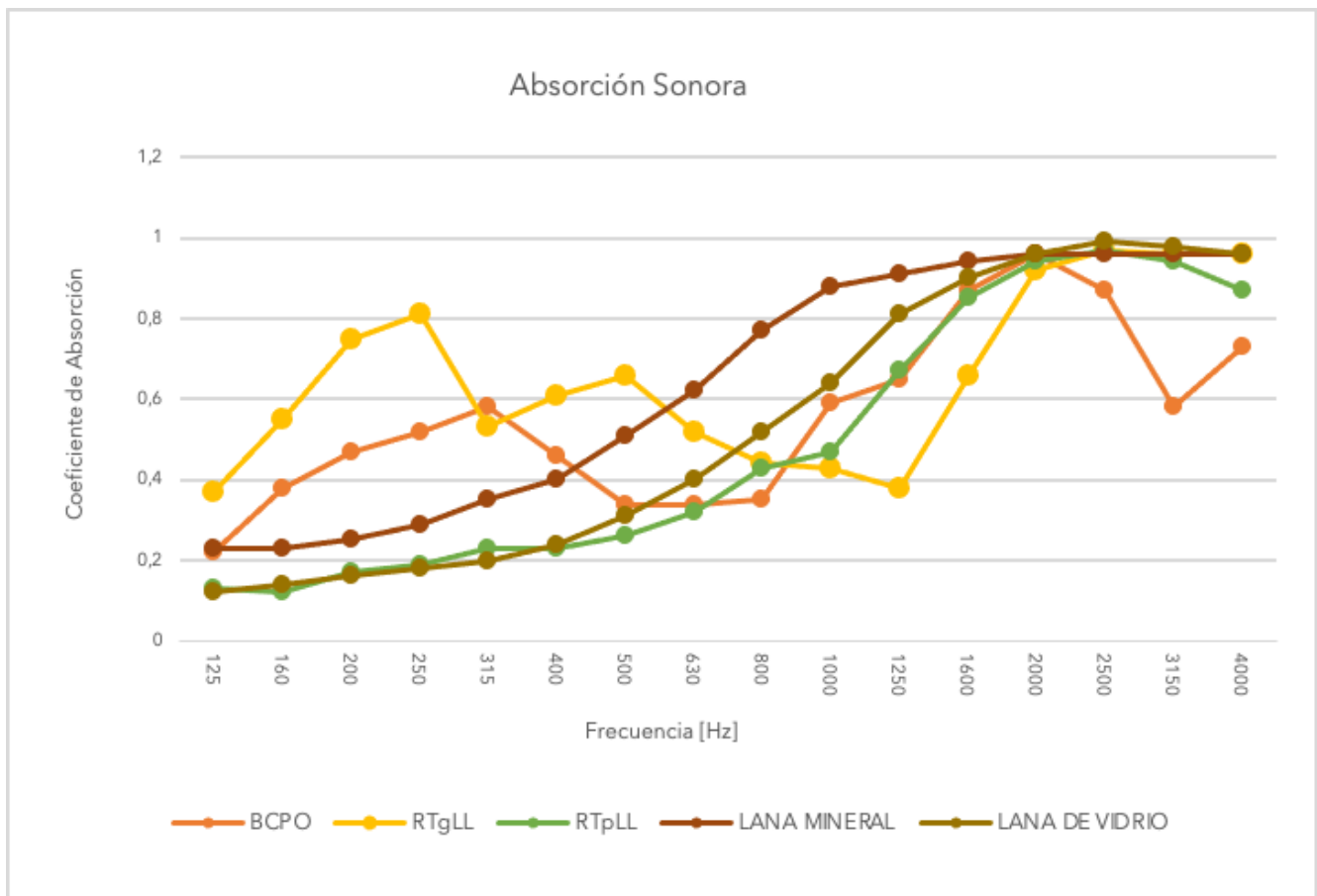
La muestra RTgLL fue la que entregó mejores respuestas de absorción acústica, basta con observar sus indicadores de NRC y SAA casi idénticos a la lana mineral (Fig. 9A). Aunque disminuye su rendimiento frente a frecuencias entre 630-1600 Hz, supera ampliamente a los dos materiales tradicionales en su respuesta ante emisiones de ruido con un rango de frecuencias entre 125-500 Hz (como referencia, la voz ronda entre 100-200 Hz). A su vez, también aumenta e iguala a la lana mineral y de vidrio en su eficacia frente a ondas sonoras de mayor frecuencia entre 2000-4000 Hz. Estos resultados coinciden mucho

más con las características y inferencias previas a la medición de sus propiedades acústicas.

Los resultados alcanzados por las tres muestras son, sin duda, interesantes. Más aún considerando que las muestras se sacaron anticipadamente de su proceso de crecimiento para lograr obtener resultados acústicos y no alcanzaron el 100% de cobertura del micelio en sus respectivas placas. Esto puede representar un factor importante a considerar en futuras investigaciones, puesto que, si bien, mostraron buen rendimiento absorbente acústico en esta instancia, sin duda este se puede ver afectado ya sea positiva o negativamente con el crecimiento del micelio.

Por otra parte, se comprueba y se destaca la importancia del sustrato, frente a los resultados obtenidos. Cabe recordar que las tres muestras contenían sustratos con granulometrías distintas; el bagazo un sustrato pequeño y granuloso (BCPO), el rastrojo de trigo con fibras cortadas pequeñas entre 2-8mm (RTpLL) y el rastrojo de trigo con fibras más grandes de hasta 20mm (RTgLL). Si se compara el mismo sustrato con granos distintos (RTp y RTg), desprende en base a los resultados obtenidos que un sustrato fibroso y más alargado responde de mejor manera como absorbente acústico. Esto debido, seguramente, a lo que se anticipó con respecto al crecimiento del micelio en la muestra en particular, el cual logró unificar el sustrato a través de sus filamentos sin consumir completamente el sustrato y dejando espacios de aire entre las fibras, permitiendo la conformación de poros. Por el contrario, la muestra con RTp, al contener el mismo sustrato pero en formato más pequeño, significó que cubrió más volumen al interior de la placa dejando poco espacio vacío que permitiera el traspaso del aire y la conformación de poros.

Con respecto a la muestra con BC, ciertamente sorprendió su respuesta acústica. Con densidad mucho más alta que las otras dos muestras y con un sustrato mucho más pequeño, logró respuestas mejores que RTp en la mayoría de las frecuencias estudiadas, lo que se ve reflejado en sus indicadores NRC y SAA, que además, se acercan bastante a los valores de la muestra con RTg. Este resultado inesperado, se especula que podría deberse al hongo que la componía. Recordar que de las tres, fue la única muestra con PO que se logró estudiar acústicamente. En este sentido, resultaría interesante poder corroborar esta hipótesis y medir el comportamiento de la muestra BCLL, para comparar y dilucidar el motivo de su imprevisto comportamiento.



(A)

	LANA MINERAL	LANA VIDRIO	RTPLL	RTGLL	BCPO
NRC	0,66	0,52	0,5	0,6	0,6
SAA	0,65	0,53	0,48	0,64	0,58

(B)

Fig. 9: (A) Comparativa de coeficientes de absorción sonora de las muestras y absorbentes tradicionales. (B) Datos propiedades acústicas y absorptoras de las muestras y absorbentes tradicionales. Fuente: Elaboración Propia en base a resultados otorgados por Acusonic (Anexo 4)

7. Discusión

Como se evidenció en la revisión de la literatura científica reflejada en la introducción, el micelio de hongo se posiciona poco a poco como una alternativa más ecológica para responder a ámbitos de la construcción satisfactoriamente. En el caso de esta investigación, apunta al sector específico de la acústica en la construcción y fue diseñada para

evaluar distintos biocompuestos con el objetivo de conseguir respuestas favorables como absorbentes acústicos que permitan, en un futuro próximo, reemplazar el uso de materiales tradicionales altamente contaminantes que se encuentran en el mercado al día de hoy.

Los resultados obtenidos en este estudio, proporcionan soporte concluyente respecto a la viabilidad de un biocompuesto de micelio de hongo

con sustratos orgánicos renovables para ser utilizado como absorbente acústico en muros de viviendas de entramados livianos.

7.1. Comparativa con absorbentes tradicionales

Los resultados de las mediciones acústicas fueron más que clarificadores con respecto al rendimiento de los tres biocompuestos que se pusieron a prueba frente a la lana mineral y lana de vidrio. Aunque ninguna de las muestras superó significativamente los coeficientes de absorción de ambos materiales, las tres presentaron indicadores prometedores, indicando que reúnen las características y capacidad necesaria para otorgar un buen rendimiento acústico.

Por una parte, la muestra de biocompuesto RTgLL, como se ha predicho, reunió los resultados más sólidos obteniendo coeficientes de absorción similares a la lana mineral. Esto resultó inesperado puesto que como se mencionó, las muestras no se encontraban listas en su 100% en cuanto a lo que se esperaba que creciera el micelio. Sin embargo, resultó ser un hallazgo importante para este estudio, ya que por ello surge el cuestionamiento de cuánto debería dejarse crecer el micelio para que logre su mejor rendimiento acústico. En el caso de esta muestra, se encontraba en su 62% de crecimiento al momento de secarla, y con ese porcentaje de micelio arrojó resultados ampliamente consistentes con su coeficiente de absorción sonora en comparación a la lana mineral.

Por su parte, la muestra BCPO, en base a su rendimiento como absorbente acústico, también sorprendió. No solo por las características de la muestra, su densidad y su sustrato, sino porque presentaba un crecimiento del micelio incluso menor a la muestra de RTgLL. En este caso, como se mencionó, sería muy relevante estudiar si el causante de su buen comportamiento se debe, efectivamente, al micelio de PO o si hay algún otro factor influyente en el biocompuesto.

7.2. Materias primas

Hongos. Con respecto a lo último señalado, es importante mencionar que en esta investigación se utilizó hongos de dos tipos: pudrición blanca y pudrición parda o café. Esto fue una innovación en este estudio, puesto que en la literatura hay poca o nula evidencia que sugiera el uso de micelio de hongos de pudrición café. Esto se vuelve relevante porque resultó un hallazgo inesperado el hecho de que los mejores resultados obtenidos, los presenta

la muestra con *Lentinus lepideus* (LL), hongo de pudrición café. Bajo esta misma línea, también sería relevante continuar los estudios en base al hongo en particular (u otros de pudrición café) y poder medir su rendimiento acústico en el resto de los sustratos que no se alcanzó a medir en esta investigación.

Sustratos. Con respecto a los residuos agrícolas utilizados, demás está recalcar el motivo del exitoso comportamiento del rastrojo de trigo. No obstante, es importante reconocer la importancia que implica el hecho de que este sustrato en particular rindiera mejores resultados en cuanto al futuro escalamiento de un biocompuesto en base a rastrojo de trigo.

Se recuerda que el trigo es el cereal con mayor producción anual en el país, y también el con mayor extensión de cultivo a lo largo del territorio. A diferencia, por ejemplo, del arroz que se cultiva únicamente en algunas regiones específicas, en mucha menor cantidad y que, además, requiere de importantes condiciones hídricas que en el contexto ambiental actual, es muy difícil proporcionar. Dicho esto, lo que se quiere plantear es lo siguiente:

- Es un cereal con requerimientos ambientales bajos y se cuenta con amplia disponibilidad de la materia prima a lo largo del país
- esta, al ser un residuo, implica bajos costos aparentes
- y, además, al ser un deshecho que tiende a eliminarse a través de prácticas contaminantes, se ayudaría a evitar la emisión de más gases de efecto invernadero.

Todos estos factores son relevantes a la hora de considerar que se espera que en un futuro se logre la producción masiva de este biocompuesto para su comercialización y para promover a través de ello, la utilización y la manufacturación de materiales constructivos más amigables con el medio ambiente.

8. Conclusión

Los resultados de la presente investigación indican que los biocompuestos estudiados de micelio de hongo con residuos agrícolas se mostraron consistentes en su capacidad para proporcionar una alternativa ecológica de absorción acústica para su uso en muros de viviendas de entramado liviano de madera.

De esta manera se cumplió satisfactoriamente el objetivo principal de esta investigación. Y con los resultados obtenidos, se podría proceder a

desarrollar un panel de absorción acústica. Sin embargo es importante recalcar que aún es posible conseguir un biocompuesto con un rendimiento aún mayor a los obtenidos, puesto que no se logró comprobar la hipótesis que sugería que estos biocompuestos lograrían alcanzar coeficientes de absorción mayores a los materiales tradicionales como la lana mineral y la lana de vidrio.

Asimismo, esta investigación deja abiertas muchas aristas para ser abordadas por futuras investigaciones. Se sugiere un mayor estudio en los hongos de pudrición café, puesto que fue el que arrojó resultados más prometedores en este estudio. Así como también es necesario seguir trabajando para conseguir mejores coeficientes de absorción acústica, centrándose en el estudio de los sustratos, así como también evaluar los porcentajes de crecimiento del micelio requeridos para la conformación de biocompuestos más porosos y, por ende, con mejor respuesta acústica que los absorbentes tradicionales actuales.

Dicho lo anterior, si bien los biocompuestos analizados en este estudio no lograron rendimientos superiores a estos materiales, si presentaron comportamientos muy similares que impulsan a continuar con estas investigaciones y conseguir finalmente nuevas alternativas que además de tener un excelente rendimiento acústico, también sean biodegradables, de bajos costos y de bajo impacto medioambiental tanto en su proceso de uso como de fabricación.

Agradecimientos

En particular, me gustaría agradecer a todo el equipo detrás de esta investigación; al equipo UCM por concederme una sólida base con conocimientos biotecnológicos y por su constante colaboración, supervisión y acompañamiento en el proceso experimental. Al profesor Gabriel Felmer por su guía y apoyo constante, sus valiosos comentarios y opiniones, y por despertar mi interés en la academia. En el proceso, muchas personas contribuyeron indirecta o directamente en este estudio, a todas ellas; muchas gracias.

Referencias

Agustina, W., Aditiawati, P., Kusumah, S., & Dungan, R. (2019). Physical and mechanical properties of composite boards from the mixture of palm sugar fiber and cassava bagasse using mycelium of *Ganoderma*

lucidum as a biological adhesive. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 374.

ASTM.I. E1050-98. (Ed.). (1998). Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones, and a Digital Frequency Analysis System. En ASTM E1050-98: Vol. 04.06 (pp. 1-11). <https://doi.org/10.1520/E1050-98>

Banco Mundial. (2020). La construcción de viviendas de madera en Chile. Banco Mundial. Washington: Eds: Terraza, H.; Donoso, R.; Victorero, F.; Ibañez, D.

CASEN. (Octubre de 2018). CASEN 2017: Vivienda y Entorno. Recuperado el Diciembre de 2021, de Encuesta CASEN, Ministerio de Desarrollo Social: http://observatorio.ministeriodesarrollosocial.gob.cl/storage/docs/casen/2017/Resultados_vivienda_casen_2017.pdf

Castillo; Costa, J. A. (2012, mayo). Características físicas de materiales absorbentes sonoros porosos. <https://www.profesores.frc.utn.edu.ar/electronica/fundamentosdeacusticayelectroacustica/public/file/FAyE0412E1-Castillo-Costa.pdf>

CIM UC. (2019). Análisis del estado de la construcción en madera en Chile : Estadísticas de elección de materialidad y costos de construcción. Recuperado el Diciembre de 2021, de Centro de Innovación en Madera UC: <https://madera.uc.cl/es/transferencia/minvucim-uc/603-2017-decreto-138-analisis-de-evaluacion-economica-decon-uc>

Comisión Nacional de Productividad. (2021). Informe anual 2020. CNP, Santiago.

CORMA 2007. Manual de construcción de viviendas en madera. Chile. Corporación Chilena de la Madera. P 23. <https://www.madera21.cl/wp-content/uploads/2016/11/Cap%C3%ADulo-1.La-construccion-de-viviendas-en-madera-completo-sin-introduccion-5.pdf?x61407>

Ecovative Design. (s.f.). Ecovative. Recuperado el Diciembre de 2021, de <https://ecovative.com>

Holt, G., McIntyre, G., Flagg, D., Bayer, E., Wanjura, J., & Pelletier, M. (2012). Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 6, págs. 431-439.

- IEA. (Junio de 2020). Tracking Buildings 2020. Paris, Francia. Recuperado el Diciembre de 2021, de IEA: <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2020>
- IEA. (2020). Emissions of major air pollutants, 2018 and 2040 in the Stated Policies Scenario. IEA, Paris, Francia.
- IEA. (2021). Global energy-related CO2 emissions by sector, 2020. IEA, Paris, Francia.
- International Organization for Standardization (ISO) 10534-2. (1998). Acoustics - Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes - Part 2: Transfer Function Method. International Organization for Standardization, Geneva.
- Islam, M., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. (12 de Octubre de 2017). Morphology and mechanics of fungal mycelium. Scientific Reports, 7(13070).
- Jones, M., Mautner, A., Luenco, S., Bismarck, A., & John, S. (2020). Engineered mycelium composite construction materials from fungal biorefineries: A critical review. Materials & Design Vol. 187.
- MMA. (2018). Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero en Chile serie 1990-2016. Santiago, Chile.
- MMA. (2021). Ruido ambiental: el ruido es un contaminante invisible. Santiago, Chile. Recuperado el Noviembre de 2021, de Ministerio del Medio Ambiente: <https://ruido.mma.gob.cl/temas/>
- Mogu. (s.f.). Mogu: Radical by nature. Recuperado el Diciembre de 2021, de Mogu: <https://mogu.bio>
- ODEPA. (2012). Mercado del trigo en Chile: producción y comercialización en la temporada 2011/12. Recuperado el Diciembre de 2021, de Oficina de Estudios y Políticas Agrarias: <https://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/6105.pdf>
- OGUC. (2020). Art. 4.1.6. Las exigencias acústicas.
- Pelletier, M., Holt, G., Wanjura, J., Bayer, E., & McIntyre, G. (Noviembre de 2013). An evaluation study of mycelium based acoustic absorbers grown on agricultural by-product substrates. ELSEVIER: Industrial Crops and Products, 51(ISSN 0926-6690), págs. 480-485.
- Pino, N. (2016). Comportamiento acústico de tres tipos de viviendas: un prototipo de vivienda de emergencia fabricado bajo el sistema constructivo sip (Structural Insulated Panel), una vivienda social y una vivienda de emergencia actual (mediagua). Memoria de Título, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile, Santiago.
- South Mill. (6 de Noviembre de 2015). Recuperado el Diciembre de 2021, de South Mill Champs: <https://southmill.com/es/blog/mushrooms-the-great-recyclers/>

Anexos

Anexo 1: Cultivos anuales de cereales

Anexo 2: Especificaciones de sustratos por placa

Anexo 3: Informes de resultados de estudios de absorción acústica

Todos los anexos están disponibles en la carpeta web:

<https://drive.google.com/drive/folders/1cTzWjtZtSf0R78GMBGIm8bGStjy2O7Sb?usp=sharing>