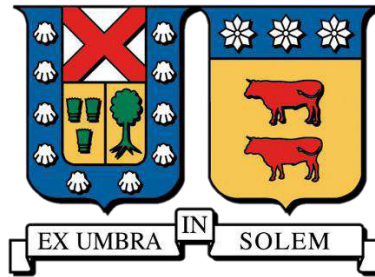


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE ARQUITECTURA

VALPARAÍSO – CHILE



**MÁS ALLÁ DE LA FUNCIÓN: PANELES DE MICELIO Y LINO COMO CATALIZADORES
DE CIRCULARIDAD Y DISEÑO PARA LA ARQUITECTURA REGENERATIVA**

ANTONIA BELÉN RODRÍGUEZ OLIVARES

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE ARQUITECTA

PROFESOR REFERENTE: MASSIMO PALME

JULIO, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: "Más allá de la función: Paneles de Micelio y Lino como catalizadores de circularidad y diseño para una Arquitectura Regenerativa".

Nombre del candidato(a): Antonia Belén Rodríguez Olivares

Carrera / Grado: Arquitectura

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Arquitectura

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Massimo Palme, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 14/08/2025

; Firma:

Massimo Palme

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 14/08/2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Resumen

Esta tesis explora la viabilidad de emplear paneles de biomateriales a base de micelio y lino como alternativa sustentable a los aislantes convencionales en la construcción, en respuesta a la urgente necesidad de reducir los impactos ambientales del sector, incluyendo el alto consumo de recursos, la generación de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero. El estudio analiza si esta alternativa puede representar una solución eficiente desde el punto de vista termoacústico y ambiental, y si al mismo tiempo permite ampliar las posibilidades expresivas del diseño arquitectónico gracias a su capacidad de adaptarse a moldajes, texturas y formas complejas que resultan menos accesibles para los materiales tradicionales.

Para abordar estas inquietudes, se lleva a cabo un análisis térmico y acústico comparativo de los materiales aislantes tradicionales y el panel de micelio y lino, evaluando su desempeño en eficiencia energética y confort interior. Posteriormente, se realiza un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) enfocado en indicadores clave como el consumo hídrico, energético y las emisiones de CO₂. Estos indicadores se ponderan mediante el método Analytic Hierarchy Process (AHP) de Saaty, empleando pesos equitativos para cada indicador, lo que permite obtener un resultado ambiental consolidado. Para una evaluación integral y balanceada, los desempeños térmico, acústico y ambiental se consolidan mediante una evaluación multicriterio, identificando las soluciones más equilibradas con el uso de herramientas como el frente de Pareto.

En cuanto a las posibilidades de diseño arquitectónico, se investigan las aplicaciones y la fabricación del panel de micelio y lino mediante técnicas de moldeado, destacando su capacidad para generar geometrías y texturas únicas que resultan complejas de lograr con materiales convencionales. Este potencial se evalúa cualitativamente mediante una aplicación simplificada del método AHP, abriendo la posibilidad de desarrollar diseños personalizados y adaptables a moldajes complejos, lo que añade un valor estético y funcional a los proyectos arquitectónicos.

Los resultados principales indican que los paneles de micelio y lino no sólo reducen significativamente el impacto ambiental, sino que también ofrecen nuevas oportunidades para el diseño arquitectónico sostenible e innovador. De este modo, esta investigación contribuye al desarrollo de materiales de construcción ecológicos, eficientes y versátiles, alineados con los desafíos contemporáneos de sostenibilidad y eficiencia energética en la arquitectura.

Palabras clave: Biomateriales, Micelio, Aislamiento termoacústico, Análisis de Ciclo de Vida, Diseño arquitectónico.

Abstract

This thesis explores the feasibility of employing mycelium-linen based biomaterial panels as a sustainable alternative to conventional insulation materials in construction, responding to the urgent need to reduce the sector's environmental impacts, including high resource consumption, waste generation, and greenhouse gas emissions. The study analyzes whether this alternative can represent an efficient solution from a thermo-acoustic and environmental standpoint, and whether it simultaneously expands the expressive possibilities of architectural design thanks to its adaptability to molds, textures, and complex forms that are less accessible for traditional materials.

To address these concerns, a comparative thermal and acoustic analysis is conducted for traditional insulation materials and the proposed mycelium-linen panel, evaluating their performance in terms of energy efficiency and indoor comfort. Subsequently, a Life Cycle Assessment (LCA) is performed, focusing on key indicators such as water consumption, energy consumption, and CO₂ emissions. These indicators are weighted using Saaty's Analytic Hierarchy Process (AHP) method, employing equal weights for each indicator, which allows for a consolidated environmental result. For a comprehensive and balanced evaluation, the thermal, acoustic, and environmental performances are consolidated through a multi-criteria evaluation, identifying the most balanced solutions using tools such as the Pareto front.

Regarding architectural design possibilities, the applications and fabrication of the mycelium-linen panel using molding techniques are investigated, highlighting its ability to generate unique geometries and textures that are complex to achieve with conventional materials. This potential is qualitatively evaluated through a simplified application of the AHP method, opening up the possibility of developing customized and adaptable designs for complex molds, which adds aesthetic and functional value to architectural projects.

The main results indicate that mycelium-linen panels not only significantly reduce environmental impact but also offer new opportunities for sustainable and innovative architectural design. Thus, this research contributes to the development of ecological,

efficient, and versatile building materials, aligned with contemporary challenges of sustainability and energy efficiency in architecture.

Keywords: Biomaterials, Mycelium, Thermoacoustic insulation, Life cycle analysis, Architectural design.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi más sincero agradecimiento a mi profesor guía, Massimo Palme, por su invaluable orientación y constante acompañamiento a lo largo de todo este proceso. Su disposición, su aliento y su confianza en mi trabajo fueron fundamentales para la culminación de esta memoria.

Extiendo mi gratitud a los académicos del Departamento de Arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María, por la formación académica recibida. Esta etapa forjó las bases de mi desarrollo profesional, brindándome las herramientas para enfrentar desafíos futuros.

A mi amiga del alma, mi persona, Sofía Arancibia, por más de diez años de amistad incondicional. Por estar siempre, aunque la distancia nos separe, por llamarme la atención cuando era necesario, por animarme cuando flaqueaba, por recordarme que soy capaz incluso cuando yo lo olvidaba, y por siempre alegrarse genuinamente de mis logros.

A mi compañero, cómplice y confidente, por su amor incondicional, su inquebrantable apoyo y por ser mi refugio constante en los momentos de mayor presión. Tu presencia en esta etapa final ha sido mi punto de apoyo constante, gracias a tu paciencia y tu creencia en mí, que me impulsaron a seguir adelante. Gracias por estar siempre ahí, por cada palabra de aliento y por compartir esta alegría conmigo.

A quienes me acompañaron en distintas etapas de esta carrera, incluso si ya no están presentes, gracias por lo que fue y por lo que aprendí en el camino.

Y finalmente, agradezco al destino y a ese impulso interno que me empujó, una y otra vez, a seguir adelante.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por haber contribuido, de distintas maneras, a la culminación exitosa de este proyecto.

DEDICATORIA

Con todo mi amor y dedicación,

Dedico este logro a mis padres, Fernanda Olivares y Cristian Fuentes, por inculcarme el valor del esfuerzo y la resiliencia. Por su amor incondicional, por acompañarme en cada paso, y por haber sido siempre mi base firme, aún en los momentos más inciertos. Gracias por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros, incluyendo este, se los debo a ustedes.

A mi querido abuelo, Víctor Rodríguez, mi gran pilar y cable a tierra. Tu presencia en este momento tan importante de mi vida es la realización de un anhelo profundo. Tu fortaleza es un constante recordatorio de la resiliencia.

A mis hermanos, Francisca Rodríguez y Facundo Fuentes, por ser compañía en la distancia y parte esencial de lo que me impulsa a seguir adelante. Este logro también es un reflejo del apoyo que siempre me han brindado.

A todos ellos —mi familia, mi base y mi impulso— les dedico con gratitud el presente trabajo, por haber fomentado en mí el deseo profundo de superación y de triunfo en la vida.

Finalmente, este esfuerzo, sacrificio y perseverancia también lo dedico a mí misma. Cada paso dado, cada noche de desvelo y cada desafío superado son prueba de mi fortaleza y determinación. Este logro es un recordatorio de lo lejos que puedo llegar cuando creo en mí.

Índice

1. Introducción	14
1.1 Definición de Conceptos clave.....	15
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Hipótesis.....	19
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo general.....	20
1.4.2 Objetivos específicos	20
2. Marco Teórico: Biomateriales en arquitectura y potencial del micelio-lino	21
2.1 Introducción a los biomateriales: Sostenibilidad y materiales en Arquitectura.....	21
2.2 Biomateriales y economía circular	21
2.3 Exploración de Biomateriales: Tipos y Aplicaciones Sostenibles	22
2.3.1 Clasificación y aplicaciones actuales.....	22
2.4 Elección de Biomateriales: Micelio y Lino	26
2.4.1 Introducción a los materiales seleccionados: Contexto Internacional y Nacional	26
2.4.2 Proceso productivo del micelio: entre el cultivo y la fabricación.....	27
2.4.3 Micelio y Lino como biomateriales aplicados en arquitectura	28
2.4.4 Comparación y Justificación: Micelio y Lino frente a otros biomateriales.....	30
2.4.5 Aplicaciones actuales y casos destacados.....	31
2.5 Micelio y Lino: Materiales Pioneros para un Diseño Arquitectónico Sostenible	33
3. Metodología	37
3.1 Selección de Materiales Aislantes Tradicionales para la Comparación.....	37

3.2 Estudio de Casos Referenciales Internacionales	37
3.3 Evaluación del Desempeño Físico (Térmico y Acústico).....	38
3.3.1 Evaluación del Comportamiento Térmico	38
3.3.2 Evaluación del Comportamiento Acústico	38
3.4 Análisis de Ciclo de Vida (ACV).....	38
3.5 Estrategia de Evaluación Multicriterio Cuantitativa	39
3.5.1 Priorización de Indicadores Ambientales (Método AHP)	39
3.5.2 Optimización Integral de Alternativas (Método de Pareto).....	39
3.6 Análisis Proyectual Cualitativo y Definición de Lineamientos de Diseño	39
3.7 Limitaciones de la Metodología	40
4. Materiales de Referencia y Análisis de Casos de Estudio	41
4.1 Materiales aislantes tradicionales: selección para la comparación	41
4.1.1 Lana Mineral (Lana de Roca o Lana de Vidrio)	41
4.1.2 Poliestireno Extruido (XPS).....	41
4.1.3 Espuma de Poliuretano (PUR)	42
4.2 Análisis Técnico y Proyectual de Casos de Estudio.....	43
4.2.1 Hy-Fi (2014) – The Living.....	44
4.2.2 Shell Mycelium (2016) – Beetles 3.3	47
4.2.3 MycoTree (2017) – Hebel, Heisel y Block	52
4.2.4 Monolito Micelio (2018) – Georgia Tech (Dessi-Olive)	56
4.2.5 The Growing Pavilion (2020) – Leboucq, Klarenbeek, Company New Heroes ..	61
4.2.6 My-co Space (2021) – ArtSci MY-CO-X	67
5. Caracterización del Panel Propuesto, Resultados y Análisis	73

5.1 Caracterización del Panel de Micelio-Lino para Evaluación	73
5.2 Desempeño Térmico Comparativo	74
5.2.1 Evaluación Térmica de Materiales Tradicionales.....	77
5.2.2 Análisis Térmico del Panel de Micelio y Lino.....	81
5.3 Desempeño Acústico Comparativo.....	84
5.4 Análisis de Ciclo de Vida	87
5.4.1 Inventario de Ciclo de Vida y Evaluación del Impacto Ambiental.....	88
5.4.2 Evaluación ambiental de materiales tradicionales	89
5.4.3 Evaluación Ambiental del Panel Propuesto de Micelio y Lino.....	91
5.5 Optimización Integral del Desempeño mediante Evaluación Multicriterio.....	95
5.5.1 Normalización de los datos	96
5.5.2 Etapa 1: Priorización de Indicadores Ambientales mediante el Método AHP ..	102
5.5.3 Etapa 2: Optimización Integral mediante el Método de Pareto	106
5.6 Análisis Proyectual Comparativo	110
5.6.1 Síntesis Comparativa de Casos de Estudio.....	111
5.6.2 Discusión de la Síntesis Comparativa de Casos de Estudio.....	115
5.7 Análisis Comparativo Cualitativo: Posibilidades de Diseño Arquitectónico.....	118
5.7.1 Análisis Detallado de las Puntuaciones Cualitativas.....	119
5.7.2 Discusión y Alcances del Análisis Cualitativo	122
5.8 Propuesta de Lineamientos Proyectuales.....	123
5.8.1 Optimización del Diseño Morfológico y Control Biológico	123
5.8.2 Fabricación Controlada para Precisión y Estandarización.....	124
5.8.3 Utilización Estratégica de Residuos Orgánicos Locales como Sustrato	124

5.8.4 Promoción de Ensamblajes Secos y Subestructuras Complementarias Reversibles	125
5.8.5 Desarrollo y Aplicación de Bio-Recubrimientos para Durabilidad Ambiental....	125
5.8.6 El Micelio como Portador de una Narrativa Arquitectónica y Ecológica	126
6. Conclusión: Hacia una Arquitectura del Futuro con Biomateriales Emergentes	127
6.1 Hallazgos Clave.....	127
6.1.1 Viabilidad Técnica y Superioridad Ambiental.....	127
6.1.2 Potencial Arquitectónico y Proyectual Innovador.....	128
6.2 Limitaciones del Estudio	129
6.3 Futuras Líneas de Investigación	129
6.4 Síntesis Final.....	131
Referencias.....	132

Índice de Tablas

Tabla 5.1 <i>Índices de Transmitancia y Resistencia Térmica de cada Zona.</i>	75
Tabla 5.2 <i>Espesores mínimos requeridos para cumplir con la Normativa Térmica.</i>	78
Tabla 5.3 <i>Cálculo de Normativa Térmica Aislantes Tradicionales.</i>	80
Tabla 5.4 <i>Cálculo de Normativa Térmica Aislantes Biomateriales.</i>	82
Tabla 5.5 <i>Comparación de coeficientes de absorción acústica (α) a 500 Hz entre materiales tradicionales y el panel propuesto.</i>	86
Tabla 5.6 <i>Evaluación de Impacto ambiental materiales aislantes tradicionales.</i>	90
Tabla 5.7 <i>Normalización de emisiones de CO₂.</i>	99
Tabla 5.8 <i>Normalización de Consumo Energético.</i>	99
Tabla 5.9 <i>Normalización de Consumo Hídrico</i>	100
Tabla 5.10 <i>Normalización de Transmitancia Térmica.</i>	100
Tabla 5.11 <i>Normalización de Coeficiente de Absorción Acústica (α).</i>	101
Tabla 5.12 <i>Matriz de comparación por pares.</i>	104
Tabla 5.13 <i>Resumen del índice de desempeño ambiental (ACV Global).</i>	105
Tabla 5.14 <i>Normalización de criterios.</i>	107
Tabla 5.15 <i>Variables A.1: Comparación de Variables Técnicas y Productivas.</i>	112
Tabla 5.16 <i>Variables A.2: Comparación de Variables Técnicas y Productivas.</i>	113
Tabla 5.17 <i>Variables B.1: Comparación de Variables Proyectuales y Arquitectónicas.</i>	114
Tabla 5.18 <i>Variables B.2: Comparación de Variables Proyectuales y Arquitectónicas.</i>	115
Tabla 5.19 <i>Criterios de Posibilidades de Diseño Arquitectónico.</i>	119

Índice de Figuras

Figura 2.1 <i>Esquema del método de producción de un biomaterial a base de micelio</i>	28
Figura 4.1 <i>Vistas del pabellón Hy-Fi: exterior (izquierda) e interior (derecha)</i>	44
Figura 4.2 <i>Shell Mycelium: perspectiva exterior (izquierda) e interior (derecha)</i>	47
Figura 4.3 <i>Shell Mycelium: Armado de los paneles (izquierda) y Diagrama Explotado (derecha)</i>	49
Figura 4.4 <i>Shell Mycelium: Rejilla Triangular (izquierda) y Estructura Orgánica (derecha)</i>	50
Figura 4.5 <i>Perspectiva exterior (izquierda) y Proceso de montaje (derecha) de MycoTree</i>	52
Figura 4.6 <i>Detalle de Unión (izquierda) y Bloque Individual (derecha) de MycoTree</i>	55
Figura 4.7 <i>Perspectiva exterior (izquierda) y Perspectiva interior (derecha) de Monolito Micelio</i>	56
Figura 4.8 <i>Esqueleto de refuerzo interno (izquierda) y Montaje in situ (derecha) de Monolito Micelio</i>	58
Figura 4.9 <i>Diagrama de formación de la geometría del Monolito Micelio</i>	59
Figura 4.10 <i>Perspectiva exterior (izquierda) y Perspectiva interior (derecha) de The Growing Pavilion</i>	61
Figura 4.11 <i>Diagrama de Ensamble The Growing Pavilion</i>	64
Figura 4.12 <i>Vista exterior (izquierda) e interior (derecha) de MY-CO SPACE</i>	67
Figura 4.13 <i>Pabellón MY-CO SPACE: estructura y ensamblaje</i>	69
Figura 5.1 <i>Zonificación Térmica Nacional</i>	74
Figura 5.2 <i>Diagrama de Priorización de Desempeño Ambiental</i>	103
Figura 5.3 <i>Visualización Tridimensional de la Frontera de Pareto para el Desempeño de Materiales</i>	108

1. Introducción

En un escenario global marcado por la crisis climática, el agotamiento de recursos y la creciente demanda de soluciones sostenibles, los biomateriales han recobrado protagonismo como alternativa viable en múltiples sectores, particularmente en la construcción. A nivel internacional, países como Alemania, los Países Bajos y Estados Unidos lideran el desarrollo y la aplicación de materiales innovadores como el micelio y los biocompuestos, promoviendo una arquitectura más eficiente y con menor impacto ambiental. De hecho, estos materiales están generando un interés creciente en la investigación y comercialización en Europa y Estados Unidos, particularmente para aplicaciones en la construcción (Jones et al., 2020).

En contraste, Chile enfrenta desafíos críticos: baja eficiencia energética en sus edificaciones, fuerte dependencia de materiales importados y una urgente necesidad de reducir emisiones. A nivel global, el sector construcción es responsable de aproximadamente el 37% de las emisiones de CO₂ y del 34% del consumo energético total (GlobalABC, 2022). En el caso de Chile, estas cifras alcanzan el 22% de las emisiones y del consumo de energía final (Ministerio de Energía, 2022). Estos factores no solo elevan los costos económicos, sino que también intensifican el impacto ambiental de la industria.

En este contexto, los biomateriales locales como el micelio (estructura vegetativa de los hongos) y las fibras de lino emergen como una alternativa para abordar dichos desafíos. Estos materiales han captado la atención por su potencial para ofrecer propiedades como la biodegradabilidad, el buen desempeño termoacústico y un impacto ambiental reducido. Además, su capacidad para adaptarse a moldajes personalizados y formas complejas amplía las posibilidades creativas y funcionales en el diseño arquitectónico contemporáneo.

La relevancia de esta investigación radica en la necesidad de impulsar soluciones constructivas que no dependan exclusivamente de políticas sectoriales, sino que respondan desde el diseño a los principios de sostenibilidad, eficiencia energética y economía circular, promoviendo el uso de recursos regenerativos a lo largo de su ciclo de vida.

Frente a estos desafíos, esta tesis propone una evaluación integral de la viabilidad de los paneles de micelio y lino. El objetivo no es solo analizar sus propiedades termoacústicas y su impacto ambiental a través del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), sino que, a partir de esos resultados técnicos, fundamentar su potencial para aportar un valor estético y funcional innovador en el diseño arquitectónico. Este enfoque busca, por un lado, reducir el impacto ambiental en la construcción y, por otro, impulsar soluciones que sean técnica y ambientalmente coherentes con una nueva narrativa arquitectónica para Chile y el mundo.

1.1 Definición de Conceptos clave

- **Biomateriales:** Materiales derivados de fuentes biológicas renovables —como el micelio o las fibras vegetales— que son biodegradables y presentan un menor impacto ambiental en comparación con los materiales convencionales.
- **Economía circular:** Modelo que busca minimizar residuos y maximizarla reutilización y regeneración de materiales, promoviendo la sostenibilidad durante todo el ciclo de vida de los productos.
- **Micelio:** Es la estructura vegetativa ramificada de los hongos, compuesta por una red de filamentos microscópicos llamados hifas. Utilizado como biomaterial, puede crecer sobre sustratos orgánicos para formar estructuras ligeras y con propiedades aislantes, lo que lo convierte en una alternativa sostenible a materiales de construcción tradicionales.
- **Análisis de Ciclo de Vida (ACV):** Herramienta metodológica que permite evaluar el impacto ambiental de un producto en todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final.
- **Análisis Multicriterio (MCDA):** Metodología que permite evaluar y comparar diferentes alternativas considerando múltiples criterios o atributos, a menudo en

conflicto. En tu estudio, se utiliza para integrar el desempeño ambiental, térmico y acústico, facilitando la toma de decisiones informadas y sostenibles.

- **Propiedades termoacústicas:** Capacidad de un material para reducir la transferencia de calor y sonido, mejorando el confort térmico y acústico de los espacios interiores.
- **Transmitancia Térmica (Valor U):** Es una medida de la capacidad de un material o elemento constructivo para conducir el calor. Un valor U bajo indica una alta resistencia al paso del calor y, por lo tanto, un mejor aislamiento térmico, lo que se traduce en mayor eficiencia energética para la edificación. Se expresa en W/m^2K .
- **Absorción Acústica (Coeficiente α):** Es la capacidad de un material para transformar la energía sonora incidente en otra forma de energía (generalmente calor), reduciendo la cantidad de sonido reflejado. Un coeficiente α cercano a 1 indica alta absorción (excelente aislante), mientras que un valor cercano a 0 indica alta reflexión. Es crucial para el confort sonoro de los espacios.

1.2 Planteamiento del problema

En el contexto de la creciente urgencia por reducir la huella ambiental del sector construcción, especialmente ante el cambio climático y la escasez de recursos, se vuelve fundamental cuestionar los materiales que conforman nuestras edificaciones. Actualmente, el mercado chileno depende mayoritariamente de materiales convencionales como la lana mineral de roca, el poliestireno expandido o la lana de vidrio, que, si bien cumplen con funciones aislantes, presentan altos impactos ambientales, tanto por su proceso de producción como por su escasa biodegradabilidad. Esta situación se agrava con la baja eficiencia energética generalizada de las construcciones en el país y la alta dependencia de materiales importados.

Frente a ello, diversos países han comenzado a investigar y aplicar biomateriales innovadores que ofrecen ventajas ambientales y funcionales. Sin embargo, en el contexto chileno, el desarrollo de alternativas como los biocompuestos de micelio y lino aún es incipiente, y no existe suficiente evidencia empírica sobre su comportamiento térmico, acústico ni sobre su viabilidad ambiental y arquitectónica.

Esta falta de información representa una brecha crítica para el avance hacia soluciones constructivas más sostenibles, especialmente si se busca integrar eficiencia energética, bajo impacto ambiental y flexibilidad de diseño en un solo material. En particular, existe un vacío en la investigación sobre el uso de estos biomateriales desde una perspectiva arquitectónica, especialmente en lo que respecta a su potencial para generar moldajes, geometrías y texturas más versátiles y personalizables que los materiales convencionales, lo que limita su proyección como alternativa técnica y expresiva en el diseño de soluciones constructivas contemporáneas.

Las **preguntas principales** que guían esta investigación son:

- ¿Pueden los paneles de micelio y lino ofrecer una solución eficiente y sostenible frente a los aislantes tradicionales, considerando su impacto ambiental y propiedades termoacústicas?

- ¿Desde una perspectiva arquitectónica, permiten estos biomateriales explorar formas, texturas y moldajes más versátiles y personalizados que los materiales convencionales?
- ¿Representan estos biocompuestos una alternativa técnica y expresiva viable para el avance hacia una arquitectura más sustentable y de bajo impacto ambiental?

1.3 Hipótesis

Los paneles compuestos de micelio y lino se constituyen como una alternativa sostenible y prometedora frente a los aislantes convencionales utilizados en la construcción, al ofrecer un desempeño térmico y acústico competitivo, una huella ambiental reducida validada mediante análisis de ciclo de vida (ACV), y ventajas en diseño arquitectónico por su adaptabilidad a moldajes complejos y texturas personalizadas. En conjunto, estas cualidades contribuyen directamente a los principios de sostenibilidad y economía circular, fomentando el uso de biomateriales renovables y estrategias de diseño orientadas a la reutilización y la eficiencia en el uso de materiales.

1.4 Objetivos

A partir de la hipótesis formulada, se plantean los siguientes objetivos, los cuales estructuran el enfoque metodológico de esta investigación.

1.4.1 Objetivo general

Explorar el potencial de los paneles compuestos de micelio y lino como una alternativa sustentable frente a los aislantes convencionales utilizados en la construcción, a través del análisis comparativo de su desempeño térmico, acústico y ambiental, así como de su viabilidad arquitectónica en términos de moldajes, geometrías y texturas, en concordancia con los principios de sostenibilidad y economía circular.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Evaluar las propiedades térmicas de los paneles de micelio y lino en relación con aislantes convencionales, con el fin de verificar su capacidad de aislamiento y eficiencia energética.
2. Evaluar las propiedades acústicas de los paneles de micelio y lino frente a soluciones tradicionales, en función de su capacidad de absorción y control del sonido.
3. Realizar un análisis de ciclo de vida (ACV) para comparar la huella ambiental de los paneles de micelio y lino con la de materiales aislantes tradicionales.
4. Integrar los resultados del desempeño térmico, acústico y ambiental mediante el análisis multicriterio, para determinar la viabilidad global del panel de micelio y lino frente a sus alternativas convencionales.
5. Investigar el potencial de los paneles de micelio y lino para el desarrollo de moldajes, geometrías y texturas versátiles, evaluando su viabilidad técnica y expresividad desde una perspectiva arquitectónica.

2. Marco Teórico: Biomateriales en arquitectura y potencial del micelio-lino

2.1 Introducción a los biomateriales: Sostenibilidad y materiales en Arquitectura

En un contexto de creciente urgencia climática, la arquitectura contemporánea enfrenta el desafío de reducir significativamente su impacto ambiental, especialmente en términos de consumo energético y emisiones de gases de efecto invernadero. El sector de la construcción representa cerca del 37% de las emisiones globales y el 34% del consumo energético mundial (GlobalABC, 2022), lo que convierte a los materiales de construcción en un foco crítico para la mitigación ambiental. Particularmente, los materiales aislantes convencionales como la lana mineral, el poliestireno extruido (XPS) y el poliuretano (PUR), si bien cumplen una función esencial en la eficiencia energética de los edificios, a menudo conllevan una alta energía incorporada, provienen de fuentes no renovables o plantean desafíos significativos en su disposición final (Appels et al., 2019; Pickering et al., 2016).

Frente a este escenario, los biomateriales emergen como una alternativa estratégica: se trata de materiales derivados de fuentes renovables como plantas, hongos o residuos agrícolas, que no solo presentan un bajo impacto ambiental durante su ciclo de vida, sino que también poseen la capacidad de reintegrarse al entorno de manera biodegradable (Ashby, 2012; Appels et al., 2019). Su incorporación en proyectos arquitectónicos no solo permite reducir las emisiones asociadas a materiales tradicionales como el concreto o el acero, sino que también abre paso a nuevas posibilidades estéticas, funcionales y estructurales, vinculadas a los principios del diseño regenerativo y la sostenibilidad integral.

2.2 Biomateriales y economía circular

El potencial de los biomateriales no reside únicamente en su origen renovable, sino también en su capacidad para integrarse armónicamente dentro del modelo de **economía circular**. A diferencia de los materiales convencionales, cuya producción y descarte siguen una lógica lineal de “extraer-usar-desechar”, los biomateriales permiten cerrar ciclos productivos gracias a su posibilidad de cultivarse a partir de residuos agrícolas y biodegradarse al final de su vida

útil (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Esta característica no solo reduce la dependencia de materias primas vírgenes, sino que también ayuda a gestionar de manera eficiente los desechos orgánicos existentes, disminuyendo la presión sobre vertederos y promoviendo una transición hacia prácticas constructivas regenerativas.

2.3 Exploración de Biomateriales: Tipos y Aplicaciones Sostenibles

2.3.1 Clasificación y aplicaciones actuales

El desarrollo de biomateriales ha ganado fuerza en la última década como respuesta a la necesidad urgente de reemplazar materiales tradicionales por opciones más sostenibles. Esta categoría abarca una amplia gama de compuestos de origen biológico que ya se están aplicando en sectores como el embalaje, la medicina y, de manera creciente, en la arquitectura. Entre los biomateriales más relevantes destacan los siguientes:

2.3.1.1 Bioplásticos (PLA, PHA)

Los bioplásticos como el ácido poliláctico (PLA) y los polihidroxialcanoatos (PHA) se han posicionado como alternativas biodegradables frente a los plásticos convencionales. El PLA se obtiene a partir de recursos vegetales como el almidón de maíz o la caña de azúcar, mientras que los PHA son sintetizados por ciertas bacterias mediante procesos de fermentación. Aunque su uso en arquitectura aún es incipiente, estos materiales han demostrado potencial en diversas aplicaciones como la impresión 3D, el mobiliario, los envoltorios y los componentes temporales, principalmente debido a su bajo impacto ambiental. En particular, los PHA están cobrando protagonismo en sectores como el embalaje, la medicina y la agricultura, gracias a su versatilidad y biodegradabilidad. Si bien su implementación en construcción todavía es limitada, la creciente exploración de sus propiedades en aplicaciones experimentales refleja un interés activo por integrar estos materiales en soluciones arquitectónicas sostenibles, posicionándolos como materiales de transición con potencial a futuro.

2.3.1.2 Fibras vegetales (cáñamo, lino, bambú)

Estas fibras poseen una alta resistencia específica y buenas propiedades térmicas. El cáñamo y el lino, en particular, han mostrado gran eficacia como aislantes térmicos y acústicos, además de ser cultivados con bajo requerimiento hídrico y sin pesticidas (Pickering et al., 2016; Hamrouni et al., 2024). Las fibras naturales también han vuelto a ganar relevancia en la construcción sostenible por su bajo impacto ambiental y propiedades mecánicas. El cáñamo, conocido por su resistencia y versatilidad, se emplea ampliamente en paneles aislantes, bloques estructurales y como refuerzo en biocompuestos para construcción (Arnaud & Gourlay, 2012; Elfordy et al., 2008). El lino, además de su uso en textiles, se ha incorporado como refuerzo en materiales compuestos de base biológica, mejorando el rendimiento mecánico y térmico de elementos prefabricados (Fiore et al., 2015). Por su parte, el bambú, un recurso renovable de rápido crecimiento, ha sido utilizado tanto en mobiliario como en sistemas estructurales y revestimientos, destacando por su ligereza, flexibilidad y alta resistencia a la tracción (Liese & Tang, 2015; Sharma et al., 2015).

2.3.1.3 Fúngicos (micelio)

El micelio, estructura vegetativa de los hongos compuesta por una red de filamentos llamados hifas, ha emergido como un biomaterial de interés creciente por su capacidad de conformarse en moldes, su ligereza y su descomposición natural al final de su ciclo de vida. Su cultivo se basa en la inoculación de hongos sobre sustratos de residuos agrícolas lignocelulósicos, lo que le confiere un bajo impacto ambiental y una notable circularidad en términos de insumos y residuos (Jones et al., 2020; Appels et al., 2019). En el campo de los materiales fúngicos aplicados a la arquitectura y el diseño, el micelio ha sido empleado en la fabricación de productos como paneles aislantes, embalajes biodegradables, componentes estructurales experimentales e incluso mobiliario, destacando por su adaptabilidad morfológica y capacidad de reemplazar materiales sintéticos como plásticos, espumas o compuestos derivados del petróleo (Yang et al., 2019). Estas propiedades lo sitúan como una alternativa prometedora en el desarrollo de soluciones constructivas más sostenibles y regenerativas.

2.3.1.4 Celulosa

Los biomateriales derivados de celulosa, obtenidos de residuos de papel y cultivos forestales, han ganado relevancia por sus propiedades biodegradables y ligeras. Estos materiales se utilizan en la fabricación de paneles translúcidos, películas biodegradables y embalajes sostenibles. La celulosa bacteriana, producida por ciertas bacterias, ha mostrado un gran potencial en aplicaciones médicas, como vendajes y tejidos regenerativos, gracias a su biocompatibilidad. (Van den Bulcke et al., 2019).

2.3.1.5 Algas

Los materiales derivados de algas, como el alginato y el agar, están siendo investigados por sus aplicaciones en envases biodegradables y en la industria biomédica, aprovechando su alta biodegradabilidad y versatilidad. El **agar** y **alginato** han mostrado propiedades mecánicas comparables a los plásticos convencionales en envases, con una degradación completa en condiciones marinas en tan solo 60 días (Torres et al., 2019). En el ámbito biomédico, destacan por su biocompatibilidad, siendo utilizados en geles para encapsulación celular y liberación controlada de fármacos (Lee & Mooney, 2012). Además, en aplicaciones arquitectónicas, prototipos recientes de paneles elaborados con alginato de algas han demostrado una reducción del 40% en la huella de carbono en comparación con materiales convencionales como los acrílicos, gracias a su biodegradabilidad y características mecánicas adecuadas, con un módulo de elasticidad de 1.5-3 GPa (Heidebrecht et al., 2023; Gómez-Ordóñez et al., 2020).

2.3.1.6 Proteínas

Las proteínas naturales están ganando protagonismo como fuente renovable para el desarrollo de biomateriales. La **caseína**, derivada de la leche, se ha utilizado en la producción de plásticos biodegradables y adhesivos naturales (Khoo et al., 2020), mientras que la **queratina**, extraída de residuos como cabello, plumas o uñas, ha mostrado aplicaciones en materiales de refuerzo y tratamientos de aguas, así como en ingeniería de tejidos y biomedicina (Anand et al., 2024). También se ha investigado la **gelatina**, una proteína

colágena, para aplicaciones en películas biodegradables y sistemas de liberación controlada (Khoo et al., 2020).

2.3.1.7 Residuos agrícolas

Los residuos agrícolas como cáscaras, bagazo, tallos o paja están siendo transformados en materiales de construcción o embalaje. La **paja**, por ejemplo, ha sido utilizada desde hace siglos en la edificación de viviendas, y hoy se reinventa como componente de biocompuestos sostenibles (Tondi & Petutschnigg, 2015). Además, diversos residuos vegetales están siendo utilizados en la fabricación de tableros, adhesivos, bioplásticos y paneles, lo cual contribuye a la economía circular (Khoo et al., 2020). Investigaciones recientes han evaluado el uso de **endocarpio de macaúba**, un residuo agrícola, en la producción de tableros reconstituidos con buen desempeño mecánico, lo que refuerza su viabilidad como alternativa sostenible (Silva et al., 2022).

2.3.1.8 Biocompuestos

Los biocompuestos son materiales formados por la combinación de una matriz, generalmente un polímero natural o sintético, con fibras de origen vegetal u otros refuerzos biodegradables. Su objetivo es mejorar propiedades como la resistencia mecánica, la estabilidad térmica o la capacidad aislante. Según Mohanty et al. (2002), estos materiales permiten sustituir matrices derivadas del petróleo por componentes renovables, lo que contribuye a reducir el impacto ambiental en aplicaciones como el mobiliario, el embalaje, la automoción y la construcción, especialmente en envolventes arquitectónicas y soluciones modulares.

Generalmente, estos materiales se estructuran a partir de una matriz —que puede estar formada por biopolímeros, proteínas o redes fúngicas como el micelio— combinada con un refuerzo de fibras naturales como el lino, el cáñamo o el bagazo. Por ejemplo, los compuestos de almidón se emplean en envases y utensilios compostables, ofreciendo alternativas sostenibles de un solo uso (Rosa & Lenz, 2013). Además, las fibras vegetales como el lino y el cáñamo han demostrado propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones

estructurales ligeras, con módulos de elasticidad que pueden alcanzar hasta 4.4 GPa (Frackowiak et al., 2018).

2.4 Elección de Biomateriales: Micelio y Lino

2.4.1 Introducción a los materiales seleccionados: Contexto Internacional y Nacional

La creciente búsqueda de soluciones sostenibles en arquitectura ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales capaces de reducir el impacto ambiental, sin sacrificar funcionalidad ni calidad estética. En este contexto, el micelio y el lino emergen como dos biomateriales con propiedades sobresalientes para aplicaciones en la envolvente arquitectónica, especialmente en sistemas de aislamiento térmico y acústico. A diferencia de otros biocompuestos o fibras vegetales, estos materiales combinan eficiencia técnica, bajo impacto ambiental y un alto potencial de adaptabilidad formal y visual.

La creciente búsqueda de soluciones sostenibles en arquitectura ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales, y el micelio junto al lino emergen como dos biomateriales con propiedades sobresalientes. A nivel internacional, su aplicación ha sido explorada en diversas investigaciones (Appels et al., 2019; Yang et al., 2019). No obstante, es crucial reconocer los avances ya realizados en nuestro país. En Chile, la investigación sobre el micelio como material de construcción ha ganado terreno, con tesis de pregrado y postgrado en instituciones como la Pontificia Universidad Católica (PUC), la Universidad de Chile y la Universidad de Valparaíso (UV). Estos estudios han abordado desde techumbres con micelio de hongo (Montecinos Narea, 2022) hasta el desarrollo de biomateriales compuestos por micelio y desechos lignocelulósicos (Romero Paz, 2020). El presente trabajo se apoya en estos hallazgos previos, pero se diferencia al explorar la viabilidad de la combinación micelio-lino y su evaluación bajo parámetros técnicos y ambientales comparables, un vacío aún no resuelto en el contexto nacional.

2.4.2 Proceso productivo del micelio: entre el cultivo y la fabricación

El proceso de obtención de biocompuestos miceliales se aleja de las nociones convencionales de “fabricación” para aproximarse a un “proceso de crecimiento” biológico, en tanto depende de las condiciones ambientales que permiten la expansión fúngica dentro de un sustrato orgánico (González y Mayoral, 2013). A diferencia de los sistemas industriales tradicionales, el micelio se comporta como un organismo vivo que coloniza una matriz lignocelulósica, actuando como un agente de autoensamblaje que entreteje fibras naturales con sus propias hifas, sin necesidad de aglutinantes adicionales (Jones et al., 2017; Elsacker et al., 2019).

En términos generales, el proceso comienza con la inoculación del hongo en un medio nutritivo (líquido, en grano o agar), seguido de la preparación del sustrato, que debe ser previamente esterilizado mediante autoclave o pasteurización para eliminar toda forma de contaminación (Conde, 2022; Vanden, 2021). Una vez inoculado el micelio en el sustrato húmedo, este se introduce en moldes previamente desinfectados, cuya geometría determina la forma final del material. El molde se sella, asegurando un microclima controlado que permita la circulación de aire, condición clave para el crecimiento (Albir Ribera, 2021; Vanden, 2021).

El micelio se desarrolla entre 7 a 14 días en condiciones ambientales que suelen oscilar alrededor de 20 °C y una humedad cercana al 80 % (Albir Ribera, 2021). Durante este tiempo, las hifas crecen por extensión apical formando una red fractal entrelazada con capacidad de autorreparación (Islam et al., 2017; Vanden, 2021). Una vez alcanzado el grado de colonización deseado, el material se somete a un tratamiento térmico que tiene como doble propósito: matar al hongo y deshidratar el material (Bayer y McIntyre, 2016; Elsacker et al., 2020). Finalmente, pueden aplicarse tratamientos de posproceso, tales como recubrimientos o acoples, para adaptar sus propiedades a distintos usos (Conde, 2022).

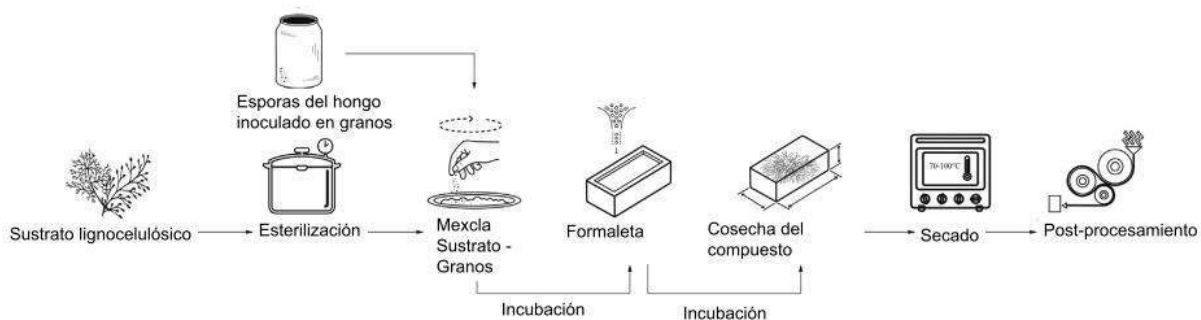


Figura 2.1 Esquema del método de producción de un biomaterial a base de micelio

Nota. De Alzate Restrepo, J. (2023). *Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Colombia). Recuperado de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85699>.

La figura original fue adaptada de Elsacker et al. (2020).

Este sistema presenta múltiples variables críticas —como el tipo de cepa fúngica, el sustrato, la temperatura de incubación, la duración del crecimiento o los métodos de secado— que influyen directamente en las propiedades mecánicas, morfológicas y químicas del material final (Elsacker et al., 2020; Vanden, 2021). La ausencia de un protocolo universal estandarizado refleja su carácter experimental, pero también abre un campo fértil para la exploración técnica y arquitectónica.

2.4.3 Micelio y Lino como biomateriales aplicados en arquitectura

El micelio, estructura vegetativa de los hongos, ha emergido como un biomaterial innovador por su combinación de propiedades térmicas, acústicas y su adaptabilidad al diseño. Su estructura porosa le otorga un desempeño destacado como aislante, con una conductividad térmica entre 0,04 y 0,06 W/m·K y un coeficiente de absorción acústica de 0,6 a 0,8 NRC (Jones et al., 2020; Appels et al., 2019), valores comparables a los de aislantes convencionales como la lana mineral. Además, su cultivo en moldes permite generar geometrías complejas sin mecanizado posterior, facilitando aplicaciones arquitectónicas personalizadas (Yang et al., 2019).

La sostenibilidad del micelio es otro de sus atributos clave: se produce a partir de residuos agrícolas, requiere baja energía y agua, y completa su crecimiento en ciclos cortos bajo condiciones controladas (Appels et al., 2019; Jones et al., 2020). Estudios como los de Yang et al. (2019) destacan que estas características lo posicionan como una alternativa con ventajas ambientales frente a materiales tradicionales e incluso otros biomateriales, como la celulosa bacteriana o los compuestos con fibras vegetales.

Cabe destacar que las propiedades del micelio varían según factores como densidad, porosidad y sustrato empleado. Por ejemplo, su conductividad térmica puede oscilar entre 0,03 y 0,081 W/m·K (Jones et al., 2020), mientras que su desempeño acústico depende del espesor y configuración del panel (Appels et al., 2019), lo que exige especificar condiciones para su evaluación.

Por su parte, las fibras de lino han demostrado potencial como aislante térmico, con una conductividad de 0,067 W/m·K a una densidad de 400 kg/m³ (Hamrouni et al., 2024). Su resistencia mecánica, ligereza y bajo impacto ambiental las posicionan como una alternativa competitiva frente a otras fibras naturales en biocompuestos para la construcción (Pickering et al., 2016).

En comparación con materiales como el yute o el cáñamo, el lino presenta fibras más finas y densas, lo que favorece un mejor desempeño termoacústico. A nivel agronómico, destaca por requerir menos agua y pesticidas durante su cultivo, así como por su ciclo de crecimiento corto (Shahzad, 2012; Bourmaud et al., 2018), lo que refuerza su perfil sostenible.

Adicionalmente, su comportamiento higroscópico y su durabilidad permiten su uso en condiciones de humedad, mientras que su textura suave y estética natural lo hacen especialmente atractivo para aplicaciones visibles en arquitectura interior (Pickering et al., 2016).

2.4.4 Comparación y Justificación: Micelio y Lino frente a otros biomateriales

Ambos materiales no solo son sostenibles, sino que también **presentan ventajas estéticas y funcionales**. El micelio, con su capacidad para crecer en moldes específicos, permite una alta personalización formal, dando lugar a formas orgánicas y superficies texturadas que enriquecen la expresión arquitectónica (Yang et al., 2019; Appels et al., 2019). El lino, por su parte, aporta una textura cálida y natural que puede integrarse visualmente en diseños contemporáneos, ofreciendo una alternativa más duradera frente a otros biomateriales textiles como el cáñamo o el yute (Hamrouni et al., 2024).

Desde el punto de vista técnico, el micelio destaca por su bajo costo de producción, al cultivarse a partir de residuos orgánicos sin requerir altas temperaturas o equipos industriales (Jones et al., 2020; Mayoral González et al., 2010). El lino, aunque presenta un costo mayor que algunas fibras naturales, se eligió específicamente como refuerzo por sus propiedades superiores y su perfil sostenible. Ofrece una mayor durabilidad y rendimiento, justificado por su baja demanda hídrica, su capacidad aislante y sus fibras más finas y densas en comparación con otras fibras naturales como el yute o el cáñamo (Hamrouni et al., 2024). Además, a nivel agronómico, destaca por su ciclo de crecimiento corto, lo cual refuerza su perfil sostenible y justifica su selección como componente clave en el biocompuesto estudiado.

En comparación con biomateriales como el ácido poliláctico (PLA), que requiere procesos industriales complejos, o con las algas, cuya escalabilidad aún es limitada, el micelio y el lino ya cuentan con aplicaciones arquitectónicas a pequeña y mediana escala (Jones et al., 2020; Yang et al., 2019). Su bajo consumo energético en producción, origen renovable, propiedades térmicas y acústicas equilibradas, y su adaptabilidad a distintas geometrías mediante moldajes, los convierten en alternativas altamente competitivas.

Mientras el micelio se produce con rapidez a partir de desechos sin generar emisiones significativas, el lino ofrece un balance entre durabilidad, bajo impacto ambiental y confort visual. Ambos materiales posibilitan una estética menos industrializada y más vinculada al entorno, lo que facilita procesos de diseño sensibles tanto al contexto como al usuario.

En conjunto, esta comparación basada en criterios de sostenibilidad, adaptabilidad formal, eficiencia energética, accesibilidad productiva e innovación estética demuestra que el micelio y el lino representan soluciones relevantes para una arquitectura contemporánea orientada al bajo impacto y al confort ambiental. No solo abordan los desafíos urgentes de eficiencia térmica y acústica, sino que también promueven un lenguaje material alineado con los principios de circularidad y sensibilidad proyectual.

2.4.5 Aplicaciones actuales y casos destacados

En el panorama actual de la arquitectura sostenible, el micelio y el lino han surgido como dos de los biomateriales más prometedores, no solo por sus propiedades técnicas excepcionales sino también por su capacidad de adaptarse a diversas aplicaciones constructivas y de diseño mientras mantienen un perfil ambiental responsable.

El micelio, esa red filamentosa que constituye el sistema vegetativo de los hongos, ha demostrado ser mucho más que un simple material experimental. Empresas innovadoras como Ecovative Design han logrado transformarlo en una solución constructiva viable, desarrollando paneles y bloques que combinan aislamiento térmico y acústico con una notable capacidad de adaptación formal (Appels et al., 2019). Lo que hace particularmente valioso al micelio es su proceso de fabricación: al cultivarse directamente en moldes, puede adoptar formas complejas sin requerir procesos de mecanizado intensivos en energía, ofreciendo así una alternativa sostenible a los materiales convencionales (Yang et al., 2019).

Más allá de la construcción, el micelio está revolucionando otros ámbitos. MycoWorks, por ejemplo, ha ampliado sus aplicaciones al diseño de interiores con Reishi™, un biomaterial cultivado mediante un sistema patentado que permite controlar su forma y textura. Compuesto por micelio y otros elementos naturales, es biodegradable, libre de plástico y ha sido aplicado en superficies para mobiliario y revestimientos, posicionándose como una alternativa sostenible en arquitectura y diseño (MycoWorks, 2022). Paralelamente, su uso en empaques sostenibles también ha sido explorado por empresas como Ecovative Design, que ha logrado

reducir la dependencia de plásticos de un solo uso mediante soluciones basadas en micelio (Ecovative Design, 2023).

En el caso del lino, su revalorización en arquitectura viene marcada por cualidades igualmente destacables. Esta fibra natural, cultivada desde hace siglos, está encontrando un nuevo protagonismo en aplicaciones contemporáneas. En el ámbito del aislamiento, el lino ofrece un rendimiento térmico comparable a materiales sintéticos, pero con una huella ambiental considerablemente menor (Hamrouni et al., 2024). Empresas especializadas están aprovechando estas cualidades para desarrollar paneles aislantes que contribuyen a la eficiencia energética de los edificios sin comprometer la sostenibilidad.

La versatilidad del lino se extiende también a los biocompuestos estructurales, donde su combinación con resinas ecológicas da lugar a materiales ligeros, pero notablemente resistentes, ideales para aplicaciones arquitectónicas diversas (Bcomp, 2023). En el terreno de los acabados interiores, el lino está redefiniendo los estándares estéticos y de durabilidad, ofreciendo alternativas naturales que rivalizan en desempeño con los materiales sintéticos tradicionales mientras mantienen un claro compromiso ambiental.

Lo que hace particularmente valiosa la combinación de micelio y lino es su complementariedad. Mientras el micelio aporta sus cualidades como aislante y su capacidad de adaptación formal, el lino contribuye con sus propiedades estructurales y su versatilidad aplicativa. Juntos, representan un avance significativo en la búsqueda de soluciones constructivas que reconcilian desempeño técnico con responsabilidad ambiental (Jones et al., 2020).

La creciente adopción de estos materiales por parte de la industria, respaldada por investigaciones científicas y certificaciones de sostenibilidad, confirma su potencial para transformar las prácticas constructivas actuales. Desde paneles aislantes hasta revestimientos y elementos estructurales, el micelio y el lino están demostrando que es posible construir de manera más armónica con el entorno natural sin sacrificar calidad ni innovación. Estos ejemplos de aplicación a diversas escalas y contextos serán analizados a

profundidad en el siguiente capítulo, sirviendo como referentes clave para comprender su potencial técnico y proyectual.

2.5 Micelio y Lino: Materiales Pioneros para un Diseño Arquitectónico Sostenible

Si bien los biomateriales como el micelio y el lino han demostrado un potencial notable en diversas aplicaciones —desde embalajes hasta mobiliario y objetos de diseño—, su integración en sistemas de aislamiento para arquitectura representa una oportunidad especialmente estratégica. La investigación sobre biomateriales ha crecido en la última década, pero sigue estando dominada por enfoques experimentales o centrados en aspectos formales. Frente a esta limitación, el presente estudio se centra en los paneles de aislamiento térmico y acústico por su impacto directo en la sostenibilidad arquitectónica. A diferencia de aplicaciones accesorias, estos sistemas participan integralmente en el comportamiento energético y acústico del edificio, siendo responsables de mejoras sustanciales en confort y eficiencia operativa. Esta elección responde a cuatro pilares interrelacionados: impacto ambiental, demanda sectorial, integración en el diseño arquitectónico y relevancia normativa.

En primer lugar, los paneles termoacústicos **inciden directamente** en el **desempeño ambiental** de un edificio. Su capacidad para reducir pérdidas de calor o ganancias térmicas disminuye la demanda energética asociada a climatización, lo que a su vez reduce las emisiones de carbono durante la etapa operativa. Asimismo, al mejorar la absorción del sonido y atenuar los niveles de ruido exterior, estos sistemas aumentan el confort de los espacios habitables, algo especialmente relevante en contextos urbanos densificados. A diferencia de aplicaciones más accesorias, como el mobiliario o los embalajes, los paneles de aislamiento **forman parte de la envolvente constructiva**, lo que les otorga un **rol estructural y duradero** dentro del edificio (GlobalABC, 2022).

En segundo lugar, la creciente **presión por construir de forma más eficiente y sostenible** ha intensificado la demanda de soluciones constructivas basadas en materiales ecológicos. Las regulaciones energéticas, las certificaciones ambientales (como LEED o BREEAM) y las **políticas de descarbonización** del sector han incentivado el desarrollo de **sistemas que no**

solo sean funcionales, sino también sostenibles desde una perspectiva de ciclo de vida. En este sentido, los paneles termoacústicos hechos de biomateriales permiten responder a estas exigencias sin comprometer el desempeño técnico, ampliando así sus posibilidades de inserción en el mercado (UNEP, 2021; Appels et al., 2019).

Otro aspecto crucial es su **potencial de integración** dentro del **diseño arquitectónico**. Mientras que otros productos desarrollados con biomateriales suelen desempeñar un rol decorativo o secundario, los paneles de aislamiento termoacústico **se incorporan directamente en el sistema constructivo**. Esta integración no solo afecta la eficiencia energética del edificio, sino también su expresión material, permitiendo explorar texturas, geometrías y moldajes que transforman al aislamiento en una herramienta proyectual activa. En esta línea, el micelio y el lino ofrecen propiedades plásticas que pueden ser aprovechadas en propuestas formales innovadoras.

Asimismo, su utilización permite explorar caminos diferenciadores dentro de la arquitectura sostenible. La posibilidad de cultivar micelio en moldes adaptables, combinándolo con fibras naturales como el lino, abre un campo fértil para experimentar con formas no convencionales, propiedades personalizadas y soluciones estéticas de bajo impacto ambiental. **Este enfoque no solo responde a criterios técnicos y ambientales**, sino también a **intereses proyectuales y expresivos** cada vez más presentes en la práctica arquitectónica contemporánea (Jones et al., 2020).

Finalmente, centrar el estudio en los paneles de aislamiento permite desarrollar evaluaciones robustas bajo criterios normativos y científicos. La elección de micelio y lino como materiales base responde a su **equilibrio entre desempeño técnico, bajo impacto ecológico y viabilidad de fabricación** con recursos locales. Su potencial para formar parte de sistemas constructivos avanzados —incluyendo geometrías personalizadas y aplicaciones en la envolvente arquitectónica— los posiciona como alternativas pioneras dentro del diseño sostenible. A diferencia de productos con ciclos de vida más cortos, como el embalaje, los paneles se mantienen en uso durante décadas, lo cual justifica la aplicación de herramientas analíticas como el análisis de ciclo de vida (ACV) y la evaluación multicriterio. Estas

metodologías permiten comparar su comportamiento frente a materiales tradicionales, considerando **indicadores ambientales, térmicos y acústicos** de manera integrada y objetiva.

No obstante, a pesar del creciente interés en estos biomateriales, **persisten vacíos relevantes** en su estudio aplicado a la arquitectura. Si bien existen investigaciones que analizan por separado las propiedades del micelio o del lino (Appels et al., 2019; Hamrouni et al., 2024), **predominan estudios fragmentarios** que **no integran sus cualidades** en sistemas constructivos viables y que evalúan su desempeño térmico, acústico y ambiental bajo parámetros cuantitativos comparables. Asimismo, todavía es **limitada** la **exploración** sobre su **adaptación a geometrías complejas** mediante moldajes avanzados, su **viabilidad como alternativa real** frente a materiales industriales consolidados, y su **evaluación** desde una **perspectiva multicriterio** que permita juzgar su rendimiento de forma equilibrada y contextualizada.

Esta tesis busca aportar evidencia concreta para cerrar dichos vacíos mediante una aproximación comparativa basada en datos existentes y análisis multicriterio. A través del estudio de paneles formulados teóricamente con micelio y lino, y su evaluación frente a materiales tradicionales, se examinará su comportamiento técnico y ambiental. Se opta por estos dos materiales no solo por su bajo impacto ecológico y sus cualidades térmicas y acústicas deseables, sino también por su disponibilidad local, bajo costo y potencial de fabricación descentralizada, lo que los vuelve idóneos para modelos constructivos sostenibles y regionalizados, según lo planteado por Appels et al., 2019; Hamrouni et al., 2024.

En consecuencia, para evaluar objetivamente el desempeño de los paneles propuestos, se ha considerado como base de comparación una selección de materiales aislantes tradicionales ampliamente utilizados en el sector de la construcción. Esta selección incluye opciones convencionales de origen mineral, sintético y vegetal, cuyas propiedades térmicas, acústicas y ambientales serán contrastadas con los resultados obtenidos para el biocompuesto de micelio y lino. El análisis comparativo se desarrollará bajo parámetros

normalizados y criterios de evaluación integrados, permitiendo situar al material propuesto dentro de un marco técnico verificable y contextualizado.

Con ello, el marco teórico sienta las bases para una investigación que no solo pretende demostrar la viabilidad técnica del panel propuesto, sino que también busca aportar una línea de base para futuras investigaciones en el Departamento de Arquitectura de la Universidad Técnica Federico Santa María, sentando un precedente para la integración de biomateriales en los discursos y prácticas de la arquitectura sustentable contemporánea.

3. Metodología

La presente investigación se enmarca en una aproximación teórica y conceptual, por lo que los resultados se basan en un análisis comparativo de la literatura existente y estudios de caso, y no en experimentación empírica en laboratorio. Esta metodología se estructura en seis etapas complementarias que responden a los objetivos planteados y permiten abordar de manera integral el análisis técnico, ambiental y proyectual del panel de micelio-lino propuesto.

3.1 Selección de Materiales Aislantes Tradicionales para la Comparación

Para llevar a cabo una comparación rigurosa entre el panel propuesto y los sistemas tradicionales, se realizará una selección fundamental de materiales aislantes convencionales. Esta selección se centrará en identificar soluciones comúnmente empleadas en la industria de la construcción, basándose en criterios de uso extendido, rendimiento térmico y acústico, y relevancia ambiental. El objetivo será establecer un punto de referencia robusto que permita un análisis comparativo efectivo para las evaluaciones técnicas y ambientales posteriores.

3.2 Estudio de Casos Referenciales Internacionales

Paralelamente a los análisis cuantitativos, se realizará un estudio cualitativo de casos de éxito internacionales que han implementado el micelio a escala arquitectónica (ej. Hy-Fi, MycoTree, The Growing Pavilion, Shell Mycelium, My-co Space, Monolito Micelio). Este análisis detallado se centrará en la identificación de estrategias de diseño (formales, estéticas, programáticas), soluciones constructivas (moldajes, ensamblajes, subestructuras), consideraciones de producción (tiempos de cultivo, sustratos, condiciones ambientales) y la gestión del ciclo de vida del material. Los aprendizajes derivados de estos referentes serán fundamentales para informar las posibilidades proyectuales del panel propuesto y para establecer lineamientos de diseño.

3.3 Evaluación del Desempeño Físico (Térmico y Acústico)

Esta etapa se subdivide en dos análisis cuantitativos fundamentales para caracterizar el comportamiento físico del panel de micelio y lino:

3.3.1 Evaluación del Comportamiento Térmico

Se llevará a cabo un análisis cuantitativo para determinar las propiedades térmicas del panel compuesto de micelio y lino, evaluando su capacidad de aislamiento en comparación con los aislantes convencionales. Este estudio permitirá identificar el grado de eficiencia térmica alcanzado por el panel propuesto frente a las soluciones tradicionales, considerando las exigencias normativas aplicables a la zona térmica correspondiente.

3.3.2 Evaluación del Comportamiento Acústico

Se realizará un estudio de absorción acústica para evaluar la capacidad del panel compuesto en la reducción de la transmisión del sonido, en comparación con materiales aislantes tradicionales. Esta evaluación será clave para determinar su eficacia acústica en entornos arquitectónicos que requieren control del ruido.

3.4 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

Se aplicará un análisis de ciclo de vida de cuna a tumba (cradle to grave) para estimar y comparar la huella ambiental del panel de micelio y lino frente a los materiales aislantes convencionales. La evaluación incluirá indicadores clave como el consumo hídrico, la energía incorporada y las emisiones de CO₂, a partir de datos obtenidos de la base de datos ITeC y de las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) proporcionadas por los fabricantes de cada material tradicional. Esta aproximación permitirá establecer una medida comparativa robusta del impacto ambiental de cada solución.

3.5 Estrategia de Evaluación Multicriterio Cuantitativa

La integración de los resultados cuantitativos obtenidos en las etapas 1 y 2 se realizará mediante una evaluación multicriterio en dos fases:

3.5.1 Priorización de Indicadores Ambientales (Método AHP)

En primer lugar, se aplicará el método Analytic Hierarchy Process (AHP) de Saaty para ponderar la relevancia relativa de los indicadores ambientales derivados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). En este proceso, se asignarán pesos equitativos (0,33 para cada indicador: consumo energético, consumo hídrico y emisiones de CO₂) a los criterios, con el fin de garantizar una evaluación balanceada de su impacto ambiental global.

3.5.2 Optimización Integral de Alternativas (Método de Pareto)

En segundo lugar, se utilizará el método de Pareto para integrar los resultados consolidados del desempeño ambiental con el desempeño térmico y acústico, permitiendo así una valoración integral y comparativa de las alternativas desde una perspectiva de sostenibilidad y eficiencia. Para representar gráficamente las soluciones no dominadas, se realizará una visualización tridimensional de la frontera de Pareto mediante la generación de una envolvente convexa, utilizando el software MATLAB.

3.6 Análisis Proyectual Cualitativo y Definición de Lineamientos de Diseño

Esta etapa final busca articular los resultados técnicos y ambientales con el potencial de diseño del panel de micelio-lino, derivando lineamientos para futuras aplicaciones arquitectónicas. Se desarrollará un análisis comparativo cualitativo para evaluar las posibilidades arquitectónicas y el valor proyectual diferencial del panel de micelio-lino frente a los aislantes convencionales. Esta evaluación se estructurará en torno a **criterios de diseño clave**, tales como: Expresividad Material / Estética, Adaptabilidad Formal / Geométrica, Compatibilidad con Sistemas Modulares y Desmontables, Circularidad Proyectual / Impacto en el Ciclo de Vida, y Potencial Integrador en Diseño Arquitectónico.

La **asignación de valores** para cada material en cada criterio se realizará mediante la aplicación del **método Analytic Hierarchy Process (AHP)**, en el cual se asignarán pesos equitativos a todos los criterios de diseño. Esta decisión metodológica buscará garantizar una **evaluación neutral y holística** de todas las dimensiones proyectuales, evitando la priorización de un aspecto sobre otro. Las comparaciones entre alternativas se ejecutarán de forma directa, valorando su desempeño en una escala de 1 (limitado/bajo) a 3 (alto/innovador), con el fin de explorar tendencias proyectuales más que resultados decisivos. Este proceso se fundamentará en un juicio experto estructurado, derivado del análisis exhaustivo de los casos de estudio internacionales y del conocimiento de las propiedades intrínsecas y el desempeño técnico de los materiales propuestos. Este enfoque proporcionará una visión integral de la aptitud proyectual del panel y permitirá la formulación de los lineamientos de diseño aplicables a futuras implementaciones.

3.7 Limitaciones de la Metodología

Es importante destacar que, dada la naturaleza teórica de este estudio, la metodología no incluye una evaluación formal de pares para validar los resultados cualitativos. Si bien la valoración de los criterios de diseño en la etapa 3.6 se fundamenta en un juicio experto estructurado—derivado del análisis exhaustivo de la bibliografía y los casos de estudio internacionales—, la ausencia de una validación externa con especialistas constituye una limitación inherente al alcance de la tesis. Dicha evaluación podría ser considerada como una futura línea de investigación, utilizando la presente tesis como una base de partida.

4. Materiales de Referencia y Análisis de Casos de Estudio

4.1 Materiales aislantes tradicionales: selección para la comparación

Para realizar una comparación rigurosa entre los paneles termoacústicos de micelio y lino propuestos y los sistemas tradicionales, resulta esencial identificar materiales aislantes convencionales que sean representativos de las soluciones comúnmente empleadas en la industria de la construcción. La selección de estos materiales se basa en criterios de **uso extendido, rendimiento térmico y acústico, y relevancia ambiental**, con el fin de establecer un punto de referencia robusto para el análisis comparativo. A continuación, se detallan cuatro de los materiales aislantes más comunes y relevantes, junto con sus principales características y desafíos ambientales:

4.1.1 Lana Mineral (Lana de Roca o Lana de Vidrio)

Este material destaca por su alta eficiencia en aislamiento térmico y acústico, siendo ampliamente utilizado en diversas aplicaciones constructivas (Berardi, 2017). Su durabilidad y resistencia al fuego lo posicionan como referencia en seguridad pasiva (Papadopoulos, 2005), aunque estudios destacan que su producción intensiva en energía (Asdrubali et al., 2015) y los riesgos de irritación durante su manipulación (EPA, 2011) plantean desafíos socioambientales. Su inclusión en esta comparación permitirá evaluar cómo los biomateriales emergentes pueden competir en rendimiento y seguridad.

4.1.2 Poliestireno Extruido (XPS)

Este termoplástico derivado de petroquímicos ofrece excelente aislamiento térmico y resistencia a la compresión (Cabeza et al., 2010), particularmente útil en elementos estructurales. Sin embargo, análisis de ciclo de vida revelan que su producción genera emisiones significativas de GEI (Stazi et al., 2013), mientras que su baja reciclabilidad (PlasticsEurope, 2020) cuestiona su sostenibilidad a largo plazo. Su comparación con biomateriales resaltarán las diferencias en impacto ambiental y dependencia de recursos no renovables.

4.1.3 Espuma de Poliuretano (PUR)

A pesar de su destacado rendimiento térmico y adaptabilidad (Pargana et al., 2014), su producción emplea isocianatos tóxicos (ECHA, 2019) y genera compuestos orgánicos volátiles (Zhang et al., 2017). Su compleja gestión como residuo (Yang et al., 2021) contrasta con la biodegradabilidad de los materiales propuestos, haciendo especialmente relevante esta comparación para evaluar soluciones circulares.

En conjunto, estos materiales **representan soluciones ampliamente utilizadas** en la industria de la construcción, pero también **evidencian diversos desafíos técnicos y ambientales vinculados a su producción, desempeño y disposición final**. Su caracterización permite establecer un marco de referencia sólido desde el cual evaluar alternativas más sostenibles.

4.2 Análisis Técnico y Proyectual de Casos de Estudio

El creciente interés en los biomateriales ha impulsado la emergencia de diversos **prototipos y pabellones** experimentales que **demuestran** las **capacidades técnicas, estéticas y funcionales** del micelio en la construcción. Estos proyectos no sólo exploran nuevas formas de habitar y construir de manera sostenible, sino que también actúan como laboratorios a gran escala, permitiendo comprender el comportamiento del material en condiciones reales y su percepción por parte del público.

En este contexto, el presente capítulo **condensa y contrasta** los **hallazgos clave** derivados del análisis detallado de **seis casos de estudio internacionales**, que **representan hitos significativos** en la aplicación arquitectónica de biomateriales a base de micelio. Esta síntesis **se estructura** en función de las **variables técnicas y productivas** (tipo de molde, tiempo de cultivo, limitaciones físicas, escalabilidad y montaje) y las **variables proyectuales y arquitectónicas** (capacidad de expresión, viabilidad geométrica, formato/escala y exposición), buscando identificar **patrones, desafíos recurrentes y aportes innovadores**. La comparación no sólo revela las particularidades de cada proyecto, sino que también establece una **base crítica** para la **formulación de lineamientos** de diseño para futuras aplicaciones de micelio, incluyendo el panel de micelio-lino propuesto en esta investigación.

4.2.1 Hy-Fi (2014) – The Living

Hy-Fi se erige como un hito en la arquitectura biofabricada, conceptualizado por el estudio The Living, liderado por David Benjamin, como parte del Young Architects Program del MoMA PS1 en Nueva York (MoMA PS1, s.f.; Arquine, 2014). Este pabellón temporal, construido en el verano de 2014, consistió en una impresionante estructura de tres torres cilíndricas de hasta 13 metros de altura, levantada con aproximadamente 10.000 ladrillos compuestos de micelio y residuos de maíz, cocreados junto a la empresa Ecovative Design (Saporta & Clark, 2016, citado en Almpani Lekka et al., 2021). Su montaje, concebido sin adhesivos sintéticos y como una instalación de bajo impacto ambiental y biodegradable (Arquine, 2014), posicionó al proyecto como un referente de la economía circular en la construcción.



Figura 4.1 *Vistas del pabellón Hy-Fi: exterior (izquierda) e interior (derecha)*

Nota. De Holcim Foundation (s.f.), *Hy-Fi* [Fotografía]. Recuperado de

<https://www.holcimfoundation.org/projects/hy-fi>.

4.2.1.1 Síntesis Material y Constructiva

La materialidad de Hy-Fi se basó en **ladrillos cultivados en moldes prismáticos** utilizando una **mezcla de micelio y residuos de tallos de maíz picados** (Souza, 2020). Este **proceso de crecimiento** del micelio **tomó aproximadamente cinco días**, tras los cuales los ladrillos fueron desmoldados y secados para estabilizar su forma (Valencia, 2014). Este método de

producción, desarrollado a medida por Ecovative específicamente para el encargo, demostró una escalabilidad técnica pionera (Holcim Foundation, 2014). La fabricación de 10.000 unidades posicionó al proyecto como el mayor experimento arquitectónico con materiales compuestos de micelio hasta la fecha (Almpani Lekka et al., 2021), estableciendo un precedente para la posible industrialización de biomateriales.

El montaje de los bloques se realizó de forma manual, aparentemente sin mortero, aunque algunas fuentes mencionan el uso de un "mortero orgánico" para la unión (Arquine, 2014), evidenciando ciertas ambigüedades en la documentación sobre el sistema de fijación empleado. Es crucial destacar que, debido a la resistencia estructural limitada inherente a los ladrillos de micelio para cargas elevadas (Almpani Lekka et al., 2021), fue necesario integrar un refuerzo interno de madera y acero, conservando los tablonces de soporte de los andamios utilizados en el encofrado con el fin de minimizar posibles movimientos (Saporta & Clark, 2016, citado en Almpani-Lekka et al., 2021), lo que subraya la necesidad de soluciones mixtas en aplicaciones a gran escala.

La concepción del ciclo de vida fue fundamental: al finalizar la exposición, la estructura fue desmontada y los bloques de micelio fueron compostados en Nueva York, regresando al ciclo del carbono en un plazo de sesenta días tras su trituración y esparcimiento (Holcim Foundation, 2023; Vandergoot, 2018, citado en Almpani Lekka et al., 2021).

4.2.1.2 Síntesis Proyectual y Arquitectónica

Arquitectónicamente, Hy-Fi desafía la lógica tradicional del ladrillo, creando una estructura esbelta, porosa y de aparente ingravidez que invierte la densidad convencional (Rosenfield, 2014). Su estética orgánica y texturizada, acentuada por la combinación de ladrillos de micelio en la base y elementos reflectantes en la parte superior (cubierta con una película especial de 3M) (Rosenfield, 2014; Almpani Lekka et al., 2021), generó un juego lumínico dinámico. Esta organización material y formal, además de aportar una lectura visual distintiva, favorecía la creación de un microclima interior fresco con circulación ascendente de aire caliente, facilitada por huecos estratégicamente dejados entre los ladrillos para ventilación controlada (Rosenfield, 2014; Almpani Lekka et al., 2021).

En términos de **viabilidad geométrica**, si bien el micelio presenta limitaciones para geometrías de alta complejidad, este caso evidenció su potencial para formas simples, curvas y orgánicas, como las **tres torres circulares entrelazadas** del pabellón (Rosenfield, 2014). El análisis estructural realizado por Arup, combinado con el biodiseño y la ingeniería informática avanzada, validó la estabilidad de las torres frente a cargas como vientos huracanados, lluvias e interacción humana (Holcim Foundation, 2023; Saporta & Clark, 2016, citado en Almpañi-Lekka et al., 2021).

Concebida como una **instalación temporal de gran escala** (13 metros de altura, usando 10.000 bloques) para el programa de verano del MoMA PS1 (Almpañi-Lekka et al., 2021; Holcim Foundation, 2023), y convirtiéndose en la **primera estructura arquitectónica que empleó tecnología de ladrillos de micelio a esta magnitud**, Hy-Fi **no solo fue un hito técnico, sino una declaración pública y performativa**. Su alta visibilidad cultural y mediática, como pieza central del festival Warm Up (ArchDaily, 2014; Holcim Foundation, 2023), y su diseño abierto y transitable, promovieron la conciencia sobre la sostenibilidad, invitando a reflexionar sobre el potencial de los biomateriales en el espacio urbano contemporáneo. El proyecto demostró que el material era viable en condiciones reales de uso arquitectónico y permitió explorar su integración modular dentro de sistemas constructivos existentes.

4.2.2 Shell Mycelium (2016) – Beetles 3.3

Shell Mycelium, una instalación arquitectónica temporal desarrollada por el estudio Beetles 3.3, fue exhibida en la Bienal de Kochi-Muziris 2016, en India, buscando explorar el potencial del micelio como material de construcción emergente para estructuras efímeras (Dezeen, 2017). Concebida como una estructura desmontable y ligera para albergar eventos temporales entre diciembre de 2016 y marzo de 2017 (Dezeen, 2017), la propuesta formó parte del *Movimiento de Degradación*. Esta postura conceptual promueve una "bio-lógica" en arquitectura, basada en la degradación natural de los materiales y una alternativa crítica a las prácticas convencionales de edificación permanente. Fue diseñada específicamente para el sitio, considerando factores como mano de obra local, materiales disponibles y condiciones ambientales (Designboom, 2017; ArchDaily, 2017).



Figura 4.2 *Shell Mycelium*: perspectiva exterior (izquierda) e interior (derecha).

Nota. De Krishna & Govind Raja (2017), *Shell Mycelium* [Fotografía]. Recuperado de

<https://www.archdaily.cl/cl/880342/este-pabellon-vive-y-muere-para-hacer-una-critica-a-la-sostenibilidad/59a096afb22e38a2dc0001a0-this-pavillion-lives-and-dies-through-its-sustainable-agenda-photo>.

4.2.2.1 Síntesis Material y Constructiva

Shell Mycelium se distingue por un enfoque orgánico e *in situ* en su conformación material. El pabellón se construyó sobre una estructura portante de madera contrachapada diseñada con una geometría triangular abierta que funcionó como soporte y molde de cultivo (Almpani

Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017). Para ello, los arquitectos crearon cavidades tipo bandeja en los marcos de madera, que fueron rellenas con un sustrato orgánico inoculado con micelio, el cual se recubrió con fibra de coco que actuaba como un contenedor permeable que favorecía el crecimiento del hongo (Almpani Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017).

Durante el proceso, el micelio se fusionó con la madera estructural, nutriéndose de ella y transformándola parcialmente, desdibujando los límites entre estructura y material de recubrimiento (Dezeen, 2017). Este método no incluyó moldes independientes ni post-procesamiento mecánico (como compresión o cocción), permitiendo una morfogénesis adaptativa y un resultado formal no replicable industrialmente (Syed, 2017). La ausencia de un tiempo de cultivo preciso y la dependencia de condiciones naturales al aire libre sugirieron un proceso más lento y variable; el micelio, inoculado sobre cavidades en la parte superior de la estructura y recubierto con fibra de coco, se desarrolló y luego se secó por exposición solar, formando una "corteza protectora" que inició su degradación paulatina (Almpani Lekka et al., 2021; Syed, 2017). Esta aproximación experimental, si bien favoreció la expresión biológica y la adaptación al sitio, implicó **limitaciones inherentes en la durabilidad, resistencia estructural y estandarización**, ya que el material **no fue estabilizado contra la humedad o radiación mediante compresión o cocción** (Syed, 2017). Esta vulnerabilidad intencional, lejos de ser un defecto, formaba parte integral del enfoque conceptual del proyecto, que buscaba deliberadamente la degradación del pabellón con el tiempo como una crítica a los modelos de sostenibilidad vigentes (Syed, 2017). La escalabilidad técnica fue limitada por su dependencia de condiciones naturales y un enfoque artesanal que privilegió la expresión biológica por sobre la replicabilidad industrial, careciendo de un protocolo estandarizado (Almpani-Lekka et al., 2021; Syed, 2017; Dezeen, 2017).

El **montaje** fue intrínseco al proceso de cultivo, con el micelio creciendo en continuidad con la geometría de soporte, eliminando la necesidad de uniones mecánicas posteriores y conformando una estrategia monolítica de ensamblaje. Este proceso se llevó a cabo en el lugar de exhibición, aprovechando la mano de obra local y adaptándose a las condiciones específicas del sitio (Syed, 2017; Designboom, 2017).

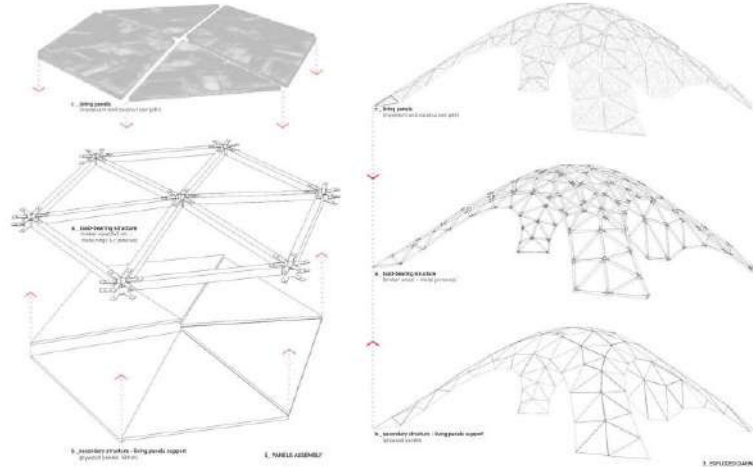


Figura 4.3 *Shell Mycelium: Armado de los paneles (izquierda) y Diagrama Explotado (derecha).*

Nota. De Krishna & Govind Raja (2017), *Shell Mycelium* [Fotografía]. Recuperado de

<https://www.archdaily.cl/cl/880342/este-pabellon-vive-y-muere-para-hacer-una-critica-a-la-sostenibilidad/59a096afb22e38a2dc0001a0-this-pavillion-lives-and-dies-through-its-sustainable-agenda-photo>.

4.2.2.2 Síntesis Proyectual y Arquitectónica

Desde una perspectiva arquitectónica, Shell Mycelium encarna una expresión material radicalmente orgánica e impredecible, donde la estética fibrosa y blanquecina del micelio evidencia su vitalidad inicial y posterior degradación por acción del sol, generando una capa seca y protectora (Syed, 2017; Dezeen, 2017). Este **carácter cambiante y efímero** del material **refuerza el mensaje conceptual** del proyecto, que propone una '**lógica degradable**' como crítica al paradigma de sostenibilidad arquitectónica convencional, **abrazando la entropía y la vida limitada** de los materiales y la construcción permanente (Designboom, 2017; Syed, 2017). El micelio, así, actuó como medio expresivo capaz de transmitir ideas de ciclo vital, transformación y disolución, otorgándole una dimensión performativa más allá de sus propiedades técnicas.

La **viabilidad geométrica** del pabellón se vio condicionada por la estructura portante de madera con una rejilla triangular que sirvió de molde, limitando la forma a sistemas modulares

planos y ligeramente inclinados compatibles con las dimensiones y resistencia de los paneles de madera (Almpani Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017). Si bien el crecimiento directo del micelio in situ y sin post-procesamiento condicionó una morfología no uniforme ni controlada, restringiendo así la precisión geométrica y la repetibilidad, esta aproximación permitió una adaptación dinámica al entorno, evidenciando un potencial para formas orgánicas no convencionales, aunque con limitaciones para su escalabilidad industrial (Syed, 2017).

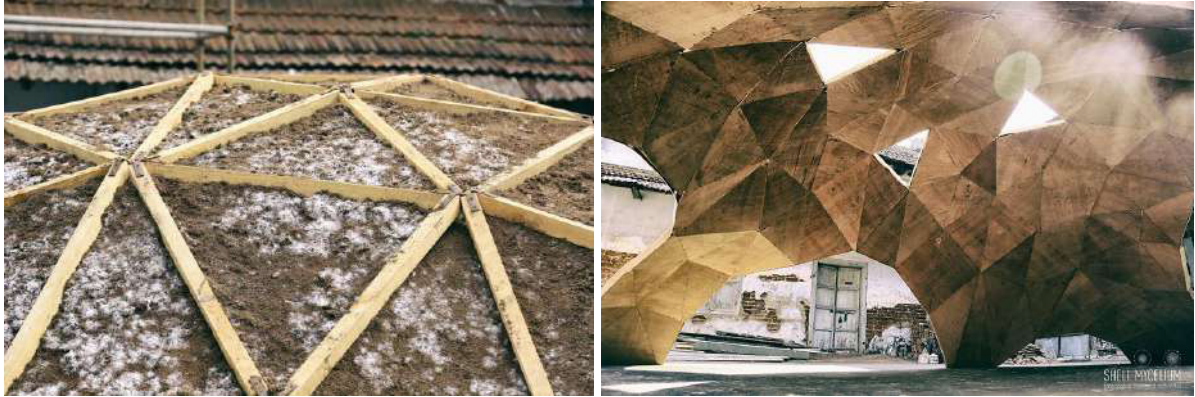


Figura 4.4 *Shell Mycelium: Rejilla Triangular (izquierda) y Estructura Orgánica (derecha).*

Nota. De Krishna & Govind Raja (2017), *Shell Mycelium* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.archdaily.cl/cl/880342/este-pabellon-vive-y-muere-para-hacer-una-critica-a-la-sostenibilidad/59a096afb22e38a2dc0001a0-this-pavillion-lives-and-dies-through-its-sustainable-agenda-photo>.

En cuanto a su **formato y escala**, la obra se configuró como un sistema modular a gran escala, utilizando las cavidades de la estructura de madera contrachapada como moldes naturales. Cada cavidad, funcionando como elemento unitario, permitió la construcción de un volumen continuo mediante su agregación (Almpani Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017). Este formato, condicionado por los marcos de madera, facilitó la replicabilidad local con mano de obra y materiales del sitio, pero restringió la flexibilidad para geometrías variables o curvas complejas (Syed, 2017). Coherente con su naturaleza efímera y experimental, el pabellón fue concebido como una instalación temporal y sensorial, distanciándose de ser un producto industrializable en serie, y evidenció su carácter transitorio al desintegrarse progresivamente tras la exhibición (Syed, 2017; Dezeen, 2017).

La **alta visibilidad arquitectónica** de Shell Mycelium se sustentó en su potente mensaje simbólico y crítico sobre la sostenibilidad y la biodegradabilidad en la arquitectura, visibilizando el ciclo de vida natural de los materiales vivos y su inevitable degradación (Syed, 2017), más que en un rol funcional constructivo permanente. La elección de materiales locales, el montaje *in situ* y la progresiva desintegración del pabellón ante el público enfatizaron su carácter temporal y su función como crítica ambiental (Almpani Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017). De este modo, el pabellón se presentó como una pieza con alta exposición visual y simbólica, promoviendo la reflexión sobre los ciclos de vida de los materiales en el espacio urbano, a través de una pieza que se desintegró progresivamente (Syed, 2017).

4.2.3 MycoTree (2017) – Hebel, Heisel y Block

MycoTree es una estructura autoportante desarrollada por Dirk Hebel, Felix Heisel y Philippe Block, construida para el pabellón de Alemania en la Bienal de Arquitectura y Urbanismo de Seúl (2017) y emplazada en un espacio interior de la misma (Dezeen, 2017). El proyecto explora el potencial estructural del micelio en combinación con procesos de fabricación digital y herramientas de diseño paramétrico. Su geometría fue diseñada mediante Estática Gráfica tridimensional, una técnica que permite generar estructuras funiculares de compresión exclusiva a través del control geométrico de los flujos de fuerza (Heisel et al., 2017).



Figura 4.5 *Perspectiva exterior (izquierda) y Proceso de montaje (derecha) de MycoTree.*

Nota. De Carlina Teteris (2017) y KIT, BRG ETH Zürich & Construcción Sostenible (2017), *MycoTree* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/works/mycotree>.

4.2.3.1 Síntesis Material y Constructiva

MycoTree destaca por su rigurosa aproximación estructural. El conformado de sus componentes se realizó mediante **moldes poliédricos desarrollados digitalmente a partir de estática gráfica tridimensional**. Estos moldes, compuestos únicamente por superficies desarrollables, permitieron su fabricación precisa mediante corte CNC o láser sobre tableros planos (bambú laminado/contrachapado), e incluían uniones dentadas y ranuradas para un ensamblaje sin adhesivos (Almpani-Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017). **El proceso de cultivo del micelio (cepa Ganoderma lucidum) tomó aproximadamente dos semanas en**

condiciones tropicales controladas por Mycotech en Indonesia. El **sustrato**, elaborado con residuos agrícolas locales como **caña de azúcar y raíz de yuca**, aceleró el crecimiento, y los bloques fueron deshidratados para detener la actividad biológica y estabilizar su forma antes del transporte (Arquitectura y Empresa, 2017).

La principal **limitación física** del micelio (debilidad a tracción y flexión) fue ingeniosamente abordada mediante un diseño de compresión pura, optimizado mediante herramientas de **estática gráfica tridimensional**. No obstante, fue necesario reforzar las uniones entre bloques con **placas de bambú y pasadores metálicos** para absorber cualquier esfuerzo ajeno a la compresión pura (Heisel et al., 2017; Almpani-Lekka et al., 2021). Esto evidencia que, si bien el micelio puede comportarse como material portante en compresión, su aplicación estructural requiere sistemas mixtos de refuerzo.

La **escalabilidad técnica** se vislumbra en un flujo de trabajo **replicable** que **integra diseño computacional, fabricación de moldes planos y cultivo controlado**, haciéndolo adaptable a contextos con infraestructura básica de cultivo y control ambiental (Dezeen, 2017; Arquitectura y Empresa, 2017). El **montaje** fue seco y reversible: los componentes cultivados fueron transportados desde Indonesia y **ensamblados en Seúl** mediante **uniones mecánicas** con placas de bambú y pasadores metálicos que conectaban los extremos de los bloques de micelio, garantizando **precisión, expresividad material y la desmontabilidad** del conjunto sin comprometer su estabilidad estructural (Almpani-Lekka et al., 2021; Dezeen, 2017).

4.2.3.2 Síntesis Proyectual y Arquitectónica

Mycotree se manifiesta como una **representación material** de un **cambio de paradigma en la construcción**, al emplear exclusivamente micelio y bambú como materiales estructurales para **cuestionar el modelo extractivista tradicional** (Heisel et al., 2017). En este contexto, el micelio se manifiesta no sólo como un componente físico, sino también como **metáfora** de una **arquitectura orientada a recursos regenerativos**. Los autores articulan esta narrativa estructural señalando que la porción de micelio representa un componente

portante, mientras que la cuadrícula de bambú superior simula la carga aplicada por una losa o techo (Heisel et al., 2017).

La **viabilidad geométrica** es una de sus mayores fortalezas, pues se basa en el empleo de la estática gráfica tridimensional —**una técnica desarrollada por el Block Research Group (ETH Zurich) que permite generar configuraciones espaciales estructuralmente eficientes mediante el diseño con diagramas de fuerza**— para concebir formas poliédricas autoportantes de compresión pura, evitando los esfuerzos de tracción que el micelio no resiste (Heisel et al., 2017). Complementariamente, el **proyecto combina compuestos de micelio con fabricación digital y diseño paramétrico** para traducir estas geometrías complejas a procesos de producción precisos (Almpani-Lekka et al., 2021). Para **resolver la baja rigidez mecánica** del micelio, se implementó un **sistema** de unión con placas de bambú y pasadores de acero que **absorben esfuerzos adicionales y estabilizan** la estructura ante condiciones no estrictamente funiculares (Heisel et al., 2017; Almpani-Lekka et al., 2021). Esta articulación entre forma, material y técnica demuestra una viabilidad geométrica condicionada, pero efectiva, que permite expandir las posibilidades del micelio en aplicaciones arquitectónicas estructurales (Almpani-Lekka et al., 2021).

El **formato y escala** de MycoTree se basan en una estructura tridimensional a escala **arquitectónica**, conformada por una **secuencia de nodos** que **actúan** exclusivamente en **compresión** (Heisel et al., 2017). Si bien fue construida en un contexto experimental, sus autores la conciben como una **metáfora de componentes estructurales aplicables a edificaciones reales**, como columnas ramificadas capaces de sostener techumbres o entrepisos (Heisel et al., 2017; Dezeen, 2017). La estructura consta de docenas de **bloques prefabricados** de micelio que **se soportan por compresión** y se ensamblan con placas terminales de bambú y pasadores metálicos; estos elementos de unión no absorben cargas estructurales, pero estabilizan el conjunto y compensan la baja rigidez transversal del material (Dezeen, 2017). **Cada bloque puede entenderse** como un **"ladrillo orgánico"** de **escala intermedia** que **facilita el transporte y ofrece resistencia** dentro de una lógica estructural funicular. La geometría poliédrica de los elementos, producto directo de la estática gráfica tridimensional, permite desarrollar nodos complejos y su materialización a partir de superficies

desarrollables cortadas con tecnologías CNC o láser, facilitando una **fabricación precisa y con bajo desperdicio** (Heisel et al., 2017).



Figura 4.6 *Detalle de Unión (izquierda) y Bloque Individual (derecha) de MycoTree.*

Nota. De Carlina Teteris (2017) y KIT, BRG ETH Zürich & Construcción Sostenible (2017), *MycoTree* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/works/mycotree>.

Emplazada centralmente en el pabellón de Alemania en la Bienal de Arquitectura y Urbanismo de Seúl (2017), la **exposición y visibilidad arquitectónica** de MycoTree fueron **intencionales**, presentándose como un **manifiesto estructural y material** (Dezeen, 2017). La visibilidad del sistema se enfatizó mediante un montaje exento, sin revestimientos, permitiendo observar la textura del micelio y la lógica de ensamblaje. Desde una lectura crítica, su diseño escultórico y ubicación central la interpretan como una narrativa arquitectónica basada en la simbiosis entre forma, estructura y biología.

4.2.4 Monolito Micelio (2018) – Georgia Tech (Dessi-Olive)

El Monolito Micelio es un prototipo arquitectónico a **escala 1:1** desarrollado en Georgia Tech que explora el potencial del micelio para el **crecimiento monolítico in situ**, como **alternativa crítica** a los **sistemas modulares convencionales** (Dessi-Olive, 2019). **Concebido como un pabellón autoportante** de forma abovedada, fue cultivado a partir de aproximadamente una tonelada de micelio y cáñamo suministrado por Ecovative (Dessi-Olive, 2019; Dessi-Olive, 2022). El sistema constructivo integró un **encofrado híbrido —geotextil flexible interior y contrachapado plastificado exterior—** junto a refuerzos internos de OSB fresado digitalmente (Dessi-Olive, 2019). Inspirado en la lógica de la fundición, el proyecto **buscaba ensayar una técnica que combinara precisión estructural, expresión material y procesos biológicos**. El micelio fue secado al aire, permaneciendo vivo tras el desmoldeo, lo cual derivó posteriormente en el **colapso** de la estructura debido a la **absorción de agua y la falta de estabilización térmica** (Neagu & Tofan, 2022).



Figura 4.7 *Perspectiva exterior (izquierda) y Perspectiva interior (derecha) de Monolito Micelio.*

Nota. De Jonathan Dessi-Olive (2018), *Monolito Micelio* [Fotografía]. Recuperado de <https://jdovaults.com/El-Monolito-Micelio>.

4.2.4.1 Síntesis Material y Constructiva

El Monolito Micelio exploró el **crecimiento monolítico in situ** de micelio y cáñamo (aproximadamente **una tonelada**), como alternativa a los sistemas modulares (Dessi-Olive, 2019). El proceso de cultivo comenzó con el empaquetado del micelio y sustrato dentro de un **molde estructural híbrido**, conformado por **nervaduras de madera** contrachapada y una **envolvente interior de geotextil** de nailon para moldear las superficies curvas (Dessi-Olive, 2019). Este sistema integró refuerzos internos de OSB fresado digitalmente (Dessi-Olive, 2019). El **tiempo de cultivo fue de solo seis días**: el molde se mantuvo cerrado cuatro días, seguido del retiro progresivo del geotextil y desmontaje completo del encofrado al sexto día (Dessi-Olive, 2019).

El material **se secó al aire**, manteniéndose vivo al desmolde, lo que **constituyó su principal limitación física**: la **absorción de agua de lluvia** y la **falta de estabilización térmica** generaron **deformaciones, agrietamientos** y el **eventual colapso estructural** por sobrepeso (Dessi-Olive, 2019, citado en Neagu & Tofan, 2022).

Esta fragilidad **compromete** su **escalabilidad** técnica a **entornos no controlados** (Dessi-Olive, 2019, citado en Neagu & Tofan, 2022). Además, la **dependencia** de un **encofrado híbrido** con contrachapado **plastificado y telas sintéticas** (nailon), muchos de los cuales **terminaron como residuos**, **limita la biodegradabilidad** y la **viabilidad técnica/ambiental** del sistema en una producción repetible (Dessi-Olive, 2022). El uso de **encofrados flexibles** también **introdujo márgenes de imprecisión** geométrica que podrían dificultar la reproducción exacta de formas en mayor escala (Dessi-Olive, 2019).

El **montaje** se realizó como un **'vaciado' continuo, sin piezas modulares, cultivado directamente sobre** este sistema de **encofrado híbrido** (Dessi-Olive, 2019). Este incluyó un **exterior rígido** (contrachapado acrílico perforado) y un **interior flexible** (geotextil de nailon), además de un esqueleto de refuerzo interno de OSB cortado por CNC que funcionó como 'trabajo perdido' y referencia geométrica (Dessi-Olive, 2019). Este sistema, montado sobre una plataforma rodante, facilitó el traslado (Dessi-Olive, 2019). El cultivo **in situ** utilizó sustrato de cáñamo preinoculado, procesado manualmente por un equipo, dejando un espesor

controlado de micelio (Dessi-Olive, 2019). Este enfoque **evitó el ensamblaje posterior por piezas**, pero presentó **desafíos logísticos, ambientales y de precisión constructiva** a gran escala (Dessi-Olive, 2019).



Figura 4.8 Esqueleto de refuerzo interno (izquierda) y Montaje in situ (derecha) de Monolito Micelio.

Nota. De JDO VAULTS (Dessi-Olive, 2018), *Monolito Micelio* [Fotografía]. Recuperado de <https://jdovaults.com/El-Monolito-Micelio>.

4.2.4.2 Síntesis Proyectual y Arquitectónica

Arquitectónicamente, el Monolito Micelio se concibió como un **prototipo especulativo** que **desafía** las convenciones de la **construcción modular**, buscando una **lógica** de crecimiento espacial **continuo e in situ** (Dessi-Olive, 2019). Su **capacidad de expresión material** reside en la **visibilidad intencional de la huella viva del proceso biológico y la textura del micelio** en su superficie (Dessi-Olive, 2019). Esto se logró mediante la interacción con el encofrado híbrido (paneles OSB fresados y geotextil permeable), que no solo permitía la respiración del micelio, sino que también registraba su crecimiento superficial, resultando en un monolito **texturizado y expresivo**. Se buscaba visibilizar las imperfecciones como parte del proceso biológico (Dessi-Olive, 2019).

La **viabilidad geométrica** del Monolito Micelio se basó en el diseño computacional de una **forma abovedada simétrica** que **operaba exclusivamente bajo compresión**, aprovechando la geometría para compensar la baja resistencia del micelio (Dessi-Olive, 2019). Esto implicó un 'proceso de diseño computacional basado en reglas informado estructuralmente', generando la **forma a partir de la reconfiguración de una "columna hongo" y operaciones booleanas** (Dessi-Olive, 2019).

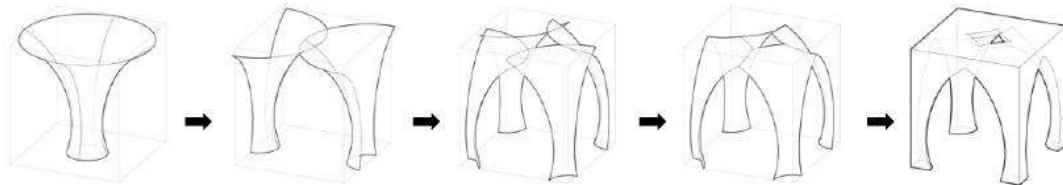


Figura 4.9 Diagrama de formación de la geometría del Monolito Micelio.

Nota. De Dessi-Olive, J. (2019). *Monolithic Mycelium: Growing Vault Structures*. En: *Actas de la 18th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies "Construction Materials & Technologies for Sustainability" (18th NOCMAT 2019)* (pp. [6]). Organizado por Georgia Institute of Technology. Recuperado de: https://wasterush.info/wp-content/uploads/2020/02/Monolithic_Mycelium_Growing_Vault_Struct-1.pdf.

Sin embargo, **su colapso** al absorber humedad —dado que no se secó térmicamente— **evidenció** que, si bien la **viabilidad formal es alta**, la **estabilidad estructural depende** críticamente del **control ambiental** y del **tratamiento post-crecimiento** (Dessi-Olive, 2019).

El **formato y escala** del pabellón alcanzaron una **dimensión arquitectónica completa** (2,5 x 2,5 x 2,5 m), cultivado con ~ 800 kg de compuesto micelial, posicionándolo como un **pionero en el crecimiento monolítico de micelio a gran escala** (Dessi-Olive, 2019). Esta escala permitió evaluar aspectos formales, técnicos y logísticos (como el transporte del encofrado y la exposición pública) (Dessi-Olive, 2019). No obstante, el **uso de materiales de encofrado no reutilizables y refuerzos internos rígidos** reveló **tensiones ecológicas y funcionales** a considerar en futuras aplicaciones a esta escala (Dessi-Olive, 2022).

Concebido como un prototipo arquitectónico a escala 1:1 y cultivado en un proceso de vaciado monolítico, la **visibilidad arquitectónica** del Monolito Micelio radicó en su rol como estudio de caso dentro del **ámbito académico** de Georgia Tech (Dessi-Olive, 2019). Se posicionó como un experimento **pionero** en el **crecimiento in situ** de un **espacio completo sin uniones** visibles (Dessi-Olive, 2019). Su visibilidad se extendió a través de **presentaciones públicas y publicaciones académicas**, posicionándose como un **caso relevante** en la exploración de nuevas materialidades. **Su colapso**, al no ser secado térmicamente y absorber humedad, visibilizó los **desafíos inherentes** a trabajar con biomateriales vivos a escala arquitectónica, generando debate académico y enfatizando la necesidad de un control riguroso del ciclo de vida del biomaterial para su viabilidad constructiva (Neagu & Tofan, 2022).

4.2.5 The Growing Pavilion (2020) – Leboucq, Klarenbeek, Company New Heroes

The Growing Pavilion fue un pabellón **temporal** construido para la Dutch Design Week 2019 en Eindhoven, **concebido como una obra que integra diseño, arquitectura y biología** (Dezeen, 2019; Company New Heroes, 2019). Fue desarrollado por Pascal Leboucq en colaboración con Studio Krown Design, Company New Heroes y el apoyo de la Dutch Design Foundation (Dezeen, 2019; Company New Heroes, 2019). Surgió como un **experimento de construcción de base biológica**, para demostrar la aplicabilidad arquitectónica de materiales y métodos de fabricación (Almpani-Lekka et al., 2021). Su geometría **cilíndrica**, presentaba una **estructura principal de marcos de madera y paredes exteriores de paneles miceliales** compuestos. Estos paneles (200 × 70 cm), fabricados por 'Grown' bajo licencia de Ecovative (certificación C2C Gold), **se montaron en el marco de madera dejando expuesta su superficie escultórica** (Almpani-Lekka et al., 2021). El pabellón también incluyó un cronograma de actividades culturales y conciertos, destacando el uso acústico del micelio (Dezeen, 2019).



Figura 4.10 *Perspectiva exterior (izquierda) y Perspectiva interior (derecha) de The Growing Pavilion.*

Nota. De Oscar Vinck (2019), *The Growing Pavilion* [Fotografía]. Recuperado de <https://www.dezeen.com/2019/10/29/growing-pavilion-mycelium-dutch-design-week/>.

4.2.5.1 Síntesis Material y Constructiva

The Growing Pavilion utilizó **paneles planos de micelio** (hongo *Ganoderma*) **con un sustrato de madera de álamo temblón y cáñamo**, obtenidos de residuos agrícolas de productores locales en Países Bajos (Bitting et al., 2022; The Growing Pavilion, 2022). Cultivados en **moldes cerrados** por Grown (Klarenbeek & Dros), estos paneles **evidenciaron un uso controlado y repetible del micelio** como **material de recubrimiento** no estructural. El **tiempo de cultivo, de cuatro a cinco días** en moldes cerrados en un ambiente oscuro y húmedo con mínima ventilación, le permitió al micelio descomponer los residuos vegetales y a formar una red natural de enlaces entre ellos (Materials Atlas, The Growing Pavilion, 2019). **Tras una semana** en ese entorno, **las piezas se hornearon** a 80°C durante **dos días para detener el crecimiento fúngico y estabilizar la forma** final del material (Materials Atlas, The Growing Pavilion, 2019).

Su principal **limitación física** fue la **susceptibilidad a la humedad exterior y la degradación ambiental** (Almpani-Lekka et al., 2021). Para adaptar el micelio a las condiciones de exposición al aire libre y extender su durabilidad, se recurrió a la aplicación de **dos tipos de biorecubrimientos** (Impershield Coating y Xyhlo Coating), **abordando así** una de las **principales limitaciones** de los MBC **en aplicaciones exteriores** (Almpani-Lekka et al., 2021).

La **escalabilidad técnica** del pabellón se plantea como **replicable y abierta**, con un 'Material Atlas' que documenta procesos técnicos y un análisis de ciclo de vida, **fomentando la cooperación y el acceso abierto a la información** para futuras aplicaciones (Company New Heroes, 2019). Si bien la estructura portante es de marcos de madera y los paneles miceliales son componentes no estructurales (Almpani-Lekka et al., 2021), su **lógica modular y desmontable** permite imaginar escenarios de ampliación o adaptación. En esta misma línea, Pascal Leboucq enfatiza que el desarrollo significativo de biomateriales requiere **acceso abierto a la información y cooperación** para acelerar nuevas aplicaciones (Mycomaker Club, 2020). Esto se complementa con la **facilidad de mantenimiento y sustitución sencilla de paneles**, lo que demuestra la adaptabilidad del sistema. Además, aunque la instalación fue concebida como temporal, la **intención** de que la instalación **permaneciera varios años**

al exterior refuerza su potencial de escalabilidad temporal y geográfica (Mycomaker Club, 2020).

El **montaje** fue **ágil y modular** sobre una subestructura de madera, **utilizando paneles prefabricados de 200 × 70** cm con certificación C2C Gold (Almpañi-Lekka et al., 2021). Esto **facilitó el desmontaje y la potencial reutilización** de los paneles, alineándose con una **lógica de circularidad material** (Dezeen, 2019). El **carácter efímero** de la instalación fue contemplado desde su concepción, buscando compatibilidad entre **sostenibilidad, temporalidad y facilidad de ejecución**. Además del sistema principal, el pabellón **integró múltiples biomateriales en distintas escalas** del conjunto, como algodón orgánico para el drapeado interior, biolaminado para el suelo y bancos de residuos agrícolas (Almpañi-Lekka et al., 2021; Dezeen, 2019), demostrando una **coherencia integral** en la **elección** de materiales biodegradables y renovables.

4.2.5.2 Síntesis Proyectual y Arquitectónica

Arquitectónicamente, The Growing Pavilion se presenta como un **manifiesto multisensorial** que visibiliza el **micelio como un material de alto valor expresivo y comunicacional**. Según Leboucq, el objetivo era ‘transmitir un mensaje más amplio para que mucha gente pudiera descubrir este fantástico material’ (Dezeen, 2019). La **textura** escultórica del **micelio** se **mantiene deliberadamente expuesta** en la **fachada**, reflejando una **voluntad proyectual de visibilizar la materialidad** sin ocultarla tras revestimientos convencionales (Vinck, 2019). Esta **dimensión expresiva** se vio reforzada por el **carácter performativo del pabellón**, que **integró actividades sensoriales** como conciertos, cosecha diaria de hongos y cocina en vivo (Dezeen, 2019).

La **viabilidad geométrica cilíndrica** adoptada en The Growing Pavilion responde a una **estrategia proyectual** que permite **ensamblar paneles planos mediante la curvatura controlada del perímetro**. Esta elección formal —un tambor cilíndrico compuesto por marcos de madera y **paneles miceliales estandarizados** de 200 × 70 cm— evidencia una **lógica de factibilidad** geométrica que **favorece la repetición modular y el montaje eficiente** (Vinck, 2019). Si bien los paneles no cumplen función estructural, su configuración regular permite una integración precisa con la subestructura, lo que habla de cierta flexibilidad geométrica dentro de una forma general contenida (Vinck, 2019).

El **formato y escala** del pabellón se caracterizan por el **uso de paneles miceliales de dimensiones estandarizadas (200 × 70 cm)**, lo que representa un **avance relevante** frente a los **formatos reducidos usualmente explorados** con este material (Vinck, 2019). Esta ampliación de escala permitió ensayar su aplicabilidad en componentes de fachada y arquitecturas efímeras de mediana escala. Los paneles se integran a un sistema modular montado sobre marcos de madera, facilitando el **ensamblaje**, la **repetición y, explícitamente, el desmontaje**, la **reparación y la reutilización** en otros contextos (Vinck, 2019; Dezeen, 2019). Esto posiciona el sistema en una **escala intermedia** —ni estrictamente estructural ni meramente decorativa— con potencial para ser adaptado en otros proyectos de carácter temporal.

La alta **exposición y visibilidad arquitectónica** en la Dutch Design Week 2019 lo posicionaron como una **pieza central y una plataforma de divulgación** para el micelio y otros biomateriales. Emplazado en un espacio público, funcionó como escenario para conciertos, actividades gastronómicas y encuentros diarios, otorgándole un **carácter altamente performativo y comunicacional** (Vinck, 2019; Dezeen, 2019). Según sus autores, el proyecto buscó explícitamente **visibilizar estos materiales** en un **evento de gran exposición cultural**, apostando por un modelo de conocimiento abierto: 'Si quieres lograr un cambio, debes hacer que la información sea de código abierto' (Leboucq en Dezeen, 2019). Esto, junto al desarrollo del Material Atlas por parte del equipo, refuerza su **estrategia de diseminación**, posicionando al pabellón como un **agente de transformación** dentro del discurso arquitectónico contemporáneo (Company New Heroes, 2019).

4.2.6 My-co Space (2021) – ArtSci MY-CO-X

MY-CO SPACE es un proyecto colaborativo del colectivo interdisciplinario ArtSci MY-CO-X (fundado por la biotecnóloga Vera Meyer y el arquitecto Sven Pfeiffer), concebido como una **escultura habitable y prototipo experimental** para **alojamiento temporal** (Almpani-Lekka et al., 2021; Meyer et al., 2022). Construida en 2021 para la exposición "tinyBE – Living in a Sculpture" en Frankfurt, su **diseño paramétrico** se inspira en las **estaciones espaciales del siglo XX**, reinterpretando su lógica en un **contexto de sostenibilidad y recursos limitados** (Meyer, 2022; Sven Pfeiffer, 2021). La morfología del proyecto responde a un diagrama funcional continuo, con una envolvente de micelio reforzado que **aloja zonas de descanso, estudio y exhibición** (Almpani-Lekka et al., 2021).



Figura 4.12 Vista exterior (izquierda) e interior (derecha) de MY-CO SPACE.

Nota. De Wolfgang Günzel (s.f), MY-CO SPACE [Fotografía]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/363562328_MY-CO_SPACE_An_artistic-scientific_vision_on_how_to_build_with_fungi

4.2.6.1 Síntesis Material y Constructiva

MY-CO SPACE se basa en **paneles de micelio** del hongo *Fomes fomentarius*, **cultivado sobre hebras de cáñamo** dentro de moldes **preensamblados** de contrachapado de 4,5 cm de espesor, resultando en aproximadamente **330 unidades** (Almpani-Lekka et al., 2021). El proceso productivo inició con la esterilización del cáñamo y la inoculación, con un **ciclo de**

cultivo de cuatro semanas, tras lo cual los paneles se **secaron en horno** a 60°C durante **dos días** para detener la actividad biológica y consolidar el material (Meyer et al., 2022).

Aunque el micelio ofreció cualidades como ligereza, impermeabilidad y una estructura interna similar a panal, que permite absorber compresión de forma distribuida (Meyer et al., 2022; Kosh, 2023), sus **limitaciones** biológicas **forzaron** la creación de **paneles planos**, lo que derivó en una **piel teselada** y la **necesidad** de una **subestructura** optimizada de madera CNC para la estabilidad (Meyer et al., 2022). Esta **dependencia** de **estructuras auxiliares** y **procesos técnicos complementarios** es **clave** para su aplicación arquitectónica a **escala habitable**.

Su **escalabilidad técnica** es **alta**. El proyecto fue concebido como un **prototipo modular**, diseñado paramétricamente y fabricado con **componentes prefabricados**, lo que facilita su **montaje in situ, desensamblaje** posterior y su **transporte** (Meyer et al., 2022). Esta **lógica favorece** la **posibilidad** de **replicación** en distintos contextos, tanto por la estrategia formal como por la selección de materiales y sistemas constructivos simples. La estructura de soporte, compuesta por arcos de madera de contrachapado fresado CNC y **ensamblada** mediante **tuercas, pernos y escuadras metálicas reutilizables**, **refuerza** esta **lógica** al **permitir el desarme completo** sin pérdida de componentes (Meyer et, 2022).

La naturaleza **digital** de su **diseño** —basado en un **modelo paramétrico optimizado**— también contribuye a su **potencial de adaptación** a otros **usos o escalas** (Almpani-Lekka et al., 2021). Como enfatiza Kosh (2023), la **combinación** de paneles miceliales prefabricados y una subestructura biodegradable apunta a **soluciones sostenibles, replicables y de bajo costo**.

El **montaje y ensamblaje** del pabellón se planteó como un proceso **prefabricado y modular** para **reducir tiempos y materiales** auxiliares en obra (Meyer et al., 2022). El **sistema constructivo** se basa en una **subestructura** ligera de **25 costillas** de contrachapado de 25 mm de espesor, **unidas** a una **base doble** que distribuye las cargas y sirve como espacio de almacenamiento (Meyer et al., 2022). Estas **costillas** están **conectadas** mediante **listones**

horizontales que refuerzan lateralmente la estructura y funcionan también como estanterías (Almpiani-Lekka et al., 2021). Dado el tamaño limitado del contrachapado, las costillas debieron dividirse en dos o tres piezas y luego pegarse entre sí (Meyer et al., 2022). La subestructura se **ensambló** con **herrajes reutilizables** —tuercas, pernos y escuadras metálicas— lo cual **refuerza** su **carácter desmontable y biodegradable** (Meyer et al., 2022).

Los **330 paneles miceliales**, cultivados directamente en moldes hexagonales de madera cortados por láser, se **fijaron** a esta **subestructura siguiendo** su **curvatura general**. Los **marcos** de los paneles, unidos con **box joints y conectores curvos** de tres perforaciones, aseguraron la **continuidad formal** de la envolvente (Meyer et al., 2022). La **condición plana** de cada panel, necesaria por las restricciones del cultivo, dio como resultado una **piel exterior teselada**, cuya **forma global** fue generada algorítmicamente a partir de estructuras **hexagonales inspiradas** en los **anillos bencénicos** del lignino (Meyer et al., 2022).



Figura 4.13 Pabellón MY-CO SPACE: estructura y ensamblaje.

Nota. (a) Diagrama estructural del pabellón MY-CO SPACE. De MY-CO-X (2022).

(b) Ensamblaje del pabellón durante junio de 2021 en Frankfurt/Main para la exposición tinyBE. De Eirund, J. tinyBE (s.f). [Fotografía]. Publicado por TinyBe. Recuperado de: [ResearchGate](https://www.researchgate.net/publication/358111111).

4.2.6.2 Síntesis Proyectual y Arquitectónica

Arquitectónicamente, MY-CO SPACE se proyecta como una **escultura habitable** que explora el micelio como un **medio expresivo** de **reflexión simbiótica y ecológica**. Su **capacidad de expresión** material reside en la **visibilidad intencional** de la **textura**, el **origen biológico** y el **potencial simbiótico**, generando una **experiencia sensorial y discursiva** que **revalora** a los **hongos** como **agentes activos** en el diseño espacial y promueve un debate artístico-científico sobre su rol futuro en la generación de hábitats sostenibles (Meyer et al., 2022; Sven Pfeiffer, 2021). El proyecto **se presenta** como ‘una **reflexión** construida sobre la **cooperación con sistemas biológicos** que almacenan, transforman y reciclan materia orgánica y energía’, simbolizando el **proceso de transformación** que los hongos habilitan en la naturaleza: la **descomposición y recomposición** de materia orgánica y proponiendo una visión utópica de **vivienda basada** en la **simbiosis y el reciclaje** (Meyer et al., 2022). Esta expresividad se extiende al interior con textiles, mobiliario e iluminación de micelio, y equipamiento para la observación microscópica, construyendo un entorno educativo y de exploración activa que propone un nuevo **paradigma** para **habitar con y desde los hongos** (Meyer et al., 2022).

La **viabilidad geométrica** se basó en un **diseño paramétrico** de un ‘diagrama funcional continuo’, que articula una **forma compacta y ergonómica** (5,2 × 6,0 × 3,0 m), capaz de **albergar necesidades** programáticas como **dormir, aprender y exhibir** (Almpani-Lekka et al., 2021). La estructura, diseñada para **responder a criterios espaciales y estructurales**, integró una envolvente curva construida a partir de aproximadamente 300 paneles miceliales recubiertos, ensamblados sobre una subestructura de contrachapado fresado CNC (Almpani-Lekka et al., 2021). La **organización** de la **geometría** externa responde a una **lógica hexagonal inspirada** en la estructura del **anillo bencénico**, una forma de alta **estabilidad estructural** presente en sistemas naturales (Meyer et al., 2022). Esta geometría permitió una **piel facetada** mediante teselación y planarización algorítmica, **optimizando la distribución de esfuerzos** y minimizando el desperdicio en la producción de moldes (Meyer et al., 2022). Los **puntos de contacto** entre **paneles distribuyen** las **cargas** de forma homogénea, reforzado por el comportamiento conjunto del contrachapado y del compuesto micelial (Almpani-Lekka et al., 2021). Aunque inicialmente se pensó en una estructura autoportante,

se **incorporaron arcos** curvos de madera para garantizar la **seguridad** de los visitantes, la **precisión estructural** y la **preservación geométrica** de la forma original (Meyer et al., 2022).

El **formato y escala** del prototipo (5,2 × 6,0 × 3,0 m) lo posicionan como una propuesta **habitable de escala completa** para dos personas (Almpani-Lekka et al., 2021). Esta escala trasciende el uso del micelio en componentes menores, **posicionándolo** para **aplicaciones arquitectónicas livianas, temporales y desmontables**. Sin embargo, los autores reconocen importantes **desafíos en el escalamiento industrial** de estos materiales, especialmente en su **comportamiento** frente al **clima o al fuego** (Meyer et al., 2022). La experiencia del pabellón permitió identificar la compleja interacción entre material, proceso y geometría, subrayando la necesidad de incorporar flujos de trabajo digitales que integren simulación estructural y análisis de propiedades materiales desde las primeras etapas de diseño (Meyer et al., 2022).

La alta **exposición y visibilidad arquitectónica** se logró al ser **exhibido** públicamente durante **tres meses** en Metzlerpark Frankfurt, como parte de la exposición internacional "tinyBE – Living in a Sculpture" (Meyer et al., 2022). El pabellón no solo fue un experimento en condiciones reales de uso y una oportunidad para observar su percepción por un público amplio, sino también una **instalación educativa** que **propició el diálogo** entre **ciencia, arte y sostenibilidad**, visibilizando el potencial del micelio en contextos urbanos. Se trató de un **estudio artístico-científico** que busca **fomentar el debate** sobre el uso futuro de compuestos miceliales en la construcción (Sven Pfeiffer, 2021; Meyer et al., 2022). Al **permitir** a los visitantes **habitar un entorno micelial**, interactuar con **mobiliario y textiles pigmentados por hongos**, e incluso observar redes fúngicas al microscopio —estableciendo conexiones entre lo micro y lo macro— (Meyer et al., 2022), el **proyecto adoptó un enfoque simbiótico entre naturaleza y tecnología**. Este carácter inmersivo proyecta al micelio no solo como componente material, sino como agente narrativo activo en nuevas formas de habitar.

Los diversos casos de estudio analizados demuestran la **versatilidad y el creciente interés** en el **micelio** como biomaterial con un **amplio espectro de aplicaciones arquitectónicas**. Desde estructuras experimentales hasta revestimientos y mobiliario, estos ejemplos ilustran el potencial transformador de los materiales fúngicos en la construcción sostenible. Basándose en estas evidencias y en la urgencia de abordar el impacto ambiental del sector, el presente estudio se enfoca específicamente en la aplicación de paneles de micelio y lino como sistemas de aislamiento térmico y acústico, dada su crucial relevancia para la eficiencia energética y el confort ambiental de las edificaciones.

5. Caracterización del Panel Propuesto, Resultados y Análisis

5.1 Caracterización del Panel de Micelio-Lino para Evaluación

Para el desarrollo de los análisis técnicos y ambientales que se presentan a continuación, se ha proyectado un panel de micelio-lino con características optimizadas para el aislamiento constructivo. Este panel, de naturaleza **aglomerada y compuesta**, ha sido conceptualizado a partir de la revisión de literatura especializada en biomateriales y las lecciones derivadas de los casos de estudio de micelio presentados en el Capítulo 4, los cuales demuestran el potencial del material en diversas aplicaciones arquitectónicas.

El panel propuesto se define por una **composición del 80% de micelio y 20% de fibras de lino**. Esta proporción busca capitalizar las propiedades aislantes inherentes a la estructura fúngica, reforzadas por la contribución de las fibras vegetales. Se prioriza una **estructura de baja densidad y bajo contenido hídrico** para maximizar su desempeño como aislante térmico y acústico.

Para los cálculos iniciales, se estableció un **espesor base de 50 mm** para el panel. No obstante, se evaluará la necesidad de ajustar este espesor en función del cumplimiento normativo en cada análisis de desempeño. Las propiedades específicas de conductividad térmica y absorción acústica para cada componente (micelio y lino), junto con la justificación de los valores seleccionados y los cálculos detallados, serán abordadas en las secciones correspondientes de **Desempeño Térmico Comparativo (5.2.2)** y **Desempeño Acústico Comparativo (5.3)**, respectivamente.

Esta caracterización establece las premisas de base para la evaluación del panel en términos de eficiencia térmica, desempeño acústico, impacto ambiental y viabilidad comparativa frente a materiales aislantes tradicionales, lo que se abordará en las secciones siguientes.

5.2 Desempeño Térmico Comparativo

La eficiencia energética en la construcción es un aspecto fundamental para el desarrollo de edificaciones más sostenibles, confortables y alineadas con las demandas ambientales actuales. En este contexto, el **análisis térmico** se consolida como una herramienta clave para evaluar el desempeño térmico de los elementos constructivos, garantizando su cumplimiento con las normativas regionales y optimizando su funcionalidad.

En Chile, la **Zonificación Térmica Nacional**, establecida por el MINVU, clasifica el territorio en distintas zonas climáticas con requerimientos específicos de aislamiento térmico.



Figura 5.1 Zonificación Térmica Nacional

Nota. De Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (s.f). *Nueva reglamentación térmica*. Recuperado de <https://www.minvu.gob.cl/nueva-reglamentacion-termica/>.

Para la **Zona Térmica C**, que incluye a Valparaíso, es fundamental analizar los índices de **transmitancia térmica (U)** y **resistencia térmica (Rt)**, particularmente en los muros perimetrales, ya que constituyen nuestro foco de interés al evaluar el desempeño de distintos sistemas de aislamiento térmico y su eficiencia energética.

Este análisis no sólo permite comparar los materiales tradicionales con propuestas innovadoras, como los paneles de **micelio y lino**, sino también determinar si estos nuevos biomateriales cumplen con los requisitos mínimos de aislamiento térmico establecidos para la zona. A partir de esta evaluación, es posible diseñar soluciones constructivas que reduzcan la transferencia de calor, mejoren el confort térmico y disminuyan el impacto ambiental en el sector de la construcción.

Tabla 5.1 Índices de Transmitancia y Resistencia Térmica de cada Zona.

ZONA TÉRMICA	COMPLEJO DE TECHUMBRE		COMPLEJO DE MUROS PERIMETRALES		COMPLEJO DE PISO VENTILADO		COMPLEJO DE PUERTAS OPACAS	
	U ^(*)	Rt ^(*)	U ^(*)	Rt ^(*)	U ^(*)	Rt ^(*)	U ^(*)	Rt ^(*)
	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W	W/m ² K	m ² K/W
A	0,84	1,19	2,10	0,48	3,60	0,28	---	---
B	0,47	2,13	0,80	1,25	0,70	1,43	1,70	0,59
C	0,47	2,13	0,80	1,25	0,87	1,15	1,70	0,59
D	0,38	2,63	0,80	1,25	0,60	1,67	1,70	0,59
E	0,33	3,03	0,60	1,67	0,60	1,67	1,70	0,59
F	0,28	3,57	0,45	2,22	0,50	2,00	1,70	0,59
G	0,28	3,57	0,40	2,50	0,39	2,56	1,70	0,59
H	0,25	4,00	0,30	3,33	0,32	3,13	1,70	0,59
I	0,25	4,00	0,35	2,86	0,32	3,13	1,70	0,59

Los valores de referencia utilizados en este estudio se definen de la siguiente manera, según la Norma Chilena NCh 853 (2007):

- **Transmitancia térmica (U):** Representa el flujo de calor por unidad de área y por grado de diferencia de temperatura entre los ambientes separados por un elemento constructivo. Un menor valor de U indica un mejor desempeño en aislamiento térmico.
- **Resistencia térmica (Rt):** Indica la oposición que presentan los elementos de construcción al paso de calor en condiciones estacionarias. A mayor resistencia térmica, mejor aislamiento ofrece el material, ya que limita la transferencia de calor de manera más eficiente.
- **Conductividad Térmica (λ):** Es la capacidad de un material para transmitir (o conducir) el calor. Cuanto mayor sea su valor, más fácilmente pasará el calor a través del material.

5.2.1 Evaluación Térmica de Materiales Tradicionales

5.2.1.1 Determinación y Justificación del espesor mínimo requerido por material

Con el objetivo de estandarizar los cálculos térmicos posteriores y facilitar la comparación entre distintas soluciones, se definirá un espesor unificado de aislación para todos los materiales tradicionales analizados. Para sustentar esta decisión, se estimó primero el espesor mínimo requerido para que cada uno cumpla con los estándares térmicos establecidos en la zona climática correspondiente, según lo exigido por la normativa vigente.

Este cálculo se basa en la siguiente fórmula:

$$\delta = R_t \times \lambda$$

Donde:

- δ : Espesor mínimo requerido del material (en metros).
- R : Resistencia térmica exigida por la normativa para el cerramiento.
- λ : Conductividad térmica del material (en W/m·K).

Los **espesores mínimos** requeridos para que distintos materiales aislantes tradicionales cumplan con dicha exigencia se presentan a continuación, en la Tabla 5.2 Espesores mínimos requeridos para cumplir con la Normativa Térmica.

Tabla 5.2 *Espesores mínimos requeridos para cumplir con la Normativa Térmica.*

Material	Conductividad Térmica (λ)	Espesor mínimo requerido (δ)
Lana mineral de roca	0,034 [W/mK]	42,5 [mm]
Poliestireno Extruido	0,034 [W/mK]	42,5 [mm]
Lana mineral de vidrio	0,032 [W/mK]	40 [mm]
Poliuretano	0,028 [W/mK]	35 [mm]

A partir de estos resultados, se establece un **espesor de referencia de 50 mm** para todos los materiales analizados. Este valor no solo **supera los espesores mínimos requeridos**, sino que además **corresponde a una medida comercialmente disponible y frecuentemente utilizada** en soluciones constructivas reales. Esta decisión permite **homogeneizar el análisis térmico de los sistemas compuestos** que se abordarán a continuación.

5.2.1.2 Evaluación del Sistema Compuesto Estándar

Para evaluar el comportamiento térmico de los materiales aislantes tradicionales en su aplicación real, se considerará su integración dentro de un **sistema compuesto estándar**, representativo de una solución constructiva comúnmente utilizada. Esta evaluación se realizará aplicando la fórmula establecida en la **Norma Chilena NCh 853 (2007)**, la cual permite calcular la **resistencia térmica total (R_t)** del sistema, considerando tanto las **resistencias superficiales interior y exterior** como la **resistencia de cada capa**, determinada a partir de su espesor (δ) y conductividad térmica (λ).

El sistema compuesto analizado incluye las siguientes capas:

- Revestimiento interior de yeso cartón (espesor: 10 [mm], $\lambda = 0,26$ [W/m·K]),
- Material aislante tradicional (espesor: 50 [mm], según lo definido en la sección anterior),
- Revestimiento exterior de fibrocemento (espesor: 6 [mm], $\lambda = 0,23$ [W/m·K]),
- Resistencia superficial interior (**R_{si}**): 0,13 [m²·K/W],
- Resistencia superficial exterior (**R_{se}**): 0,04 [m²·K/W].

Los valores de **conductividad térmica** de los materiales aislantes tradicionales fueron obtenidos desde la base de datos del **Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC)**, mientras que los valores de las capas de **yeso cartón y fibrocemento** provienen del **Anexo A.1 de la NCh 853 (2007)**.

La fórmula utilizada para determinar la **resistencia térmica total** del sistema es la siguiente:

$$R_t = R_{si} + \sum (\lambda \delta) + R_{se}$$

Donde:

- **R_t**: Resistencia térmica total,
- **R_{si}** y **R_{se}**: Resistencias térmicas superficiales interior y exterior,
- **δ**: Espesor de cada capa (en metros),
- **λ**: Conductividad térmica del material (en [W/m·K]).

Una vez obtenida la resistencia térmica total (R_t), se calcula la **transmitancia térmica (U)** del sistema como el inverso de R_t:

$$U = 1 / R_t$$

Bajo esta metodología, se evaluará cada aislante manteniendo el mismo espesor (50 [mm]) y las mismas condiciones de entorno, de modo que los resultados sean **comparables entre sí**. Cabe señalar que el análisis del panel propuesto en base a micelio y lino se desarrolla por separado, dado que responde a una **configuración constructiva y metodológica distinta**.

A continuación, se presentan los valores de transmitancia térmica (U) y resistencia térmica (Rt) obtenidos para cada uno de los materiales aislantes tradicionales analizados, considerando el sistema compuesto previamente definido:

Tabla 5.3 *Cálculo de Normativa Térmica Aislantes Tradicionales.*

Material	R_t [m²K/W]	U [W/m²K]
Lana mineral de roca	1,705	0,586
Poliestireno Extruido	1,705	0,586
Lana mineral de vidrio	1,797	0,556
Poliuretano	2,020	0,495

Los resultados muestran que todos los materiales evaluados **cumplen con la exigencia térmica** de la normativa vigente para muros en la zona climática considerada, al mantenerse por debajo del valor máximo permitido de transmitancia térmica. Entre ellos, **el poliuretano destaca** por presentar el **mejor desempeño térmico**, atribuible a su baja conductividad térmica.

No obstante, esta superioridad térmica debe analizarse en conjunto con su impacto ambiental, que será abordado posteriormente mediante indicadores como las emisiones de CO₂, el consumo hídrico y el requerimiento energético, en el marco del análisis de ciclo de vida (ACV). Esta comparación térmica proporciona una base de referencia frente a la cual se evaluará el comportamiento del panel propuesto de micelio y lino, cuya configuración responde a criterios distintos tanto en términos constructivos como de sostenibilidad.

5.2.2 Análisis Térmico del Panel de Micelio y Lino

El panel propuesto, compuesto por micelio y lino, corresponde a un material aglomerado cuya evaluación térmica requiere un enfoque específico, ya que no se comporta como un aislante homogéneo tradicional. Para estimar su desempeño, se calculará un valor promedio de conductividad térmica que considere la contribución proporcional de cada uno de sus componentes.

Para ello, se aplicará el método del **promedio ponderado**, también conocido como **regla de mezclas**, una herramienta comúnmente utilizada en el análisis de materiales compuestos. Esta metodología permite obtener un valor aproximado de conductividad térmica efectiva (λ) a partir de la siguiente fórmula:

$$\lambda_{\text{mezcla}} = (\% \text{ micelio} \times \lambda_{\text{micelio}}) + (\% \text{ lino} \times \lambda_{\text{lino}})$$

A partir del valor obtenido, se procederá a calcular la **resistencia térmica** (R_t) y la **transmitancia térmica** (U), considerando un espesor estándar de **50 mm**, en línea con los requisitos de aislamiento térmico para la zona climática correspondiente.

Para el presente análisis, la **conductividad térmica del micelio** se definió en base al rango reportado en la literatura científica, comprendido entre 0,04 y 0,08 W/m·K (Aguilar-Ulloa et al., 2015; Rivero Nogueiras, 2016). Sin embargo, dado que el desempeño térmico del micelio puede verse significativamente afectado por variables como la densidad del material, el tipo de sustrato, el grado de compactación y el contenido de humedad —factores reconocidos en estudios como el de Haneef et al. (2017)—, se seleccionó el valor de **0,04 W/m·K** para su incorporación en los cálculos. Esta elección responde a que el panel propuesto prioriza una estructura de baja densidad y bajo contenido hídrico, condiciones que favorecen una menor conductividad térmica. Además, valores similares han sido reportados en investigaciones experimentales recientes, como los 0,038–0,044 W/m·K documentados por Haneef et al. (2017) para biocompuestos de micelio optimizados para desempeño aislante. De esta forma, se asegura una representación técnica coherente con las características del material desarrollado, evitando la inclusión de datos correspondientes a compuestos híbridos con

residuos o materiales compactados, los cuales no reflejan las propiedades del micelio en su estado no modificado.

Por su parte, la **conductividad térmica del lino** se establecerá a partir de los datos experimentales reportados por Hamrounia et al. (2024), quienes evaluaron el comportamiento térmico de fibras de lino en función de su contenido de humedad y grado de compactación. El estudio señala que la conductividad térmica de este material varía entre 0,067 W/m·K, correspondiente a fibras en estado seco, y 0,36 W/m·K en condiciones de alta humedad y compresión. Para efectos de este análisis, se adoptará el valor de **0,067 W/m·K**, asociado a fibras secas, dado que resulta representativo de condiciones de baja humedad requeridas en aplicaciones de aislamiento térmico.

A continuación, se detalla la información obtenida:

Tabla 5.4 Cálculo de Normativa Térmica Aislantes Biomateriales.

Material	Contribución [%]	λ [W/mK]	R_t [m²K/W]	U [W/m²K]
Micelio	80	0,04	-	-
Lino	20	0,067	-	-
Total	100	0,0454	1,10	0,91

5.2.2.1 Cumplimiento Normativo Según Espesor y Composición

A partir de los valores obtenidos para la conductividad térmica efectiva del panel compuesto de micelio y lino ($\lambda_e = 0.0454$ [W/m·K], proporción 80%-20%), se calcularon los índices de resistencia térmica (R_t) y transmitancia térmica (U) para un espesor inicial de 50 mm. Los resultados mostraron que este espesor no cumple con los requisitos normativos, presentando un R_t de 1.10 m²·K/W (por debajo del mínimo requerido de 1.25 [m²·K/W]) y un U de 0.91 [W/m²·K] (por encima del máximo permitido de 0.80 [W/m²·K]).

Para garantizar el cumplimiento normativo, se determinó el espesor mínimo necesario mediante la fórmula de resistencia térmica:

$$R_t = \text{espesor} / \lambda_e$$

Despejando el espesor y ajustando los valores hasta alcanzar los mínimos requeridos ($R_t \geq 1.25$ m²·K/W y $U \leq 0.80$ W/m²·K), se obtuvo que un **espesor de 56.75 mm es necesario** para **cumplir con las especificaciones térmicas**. Este hallazgo demuestra que, manteniendo la proporción original de materiales, un incremento moderado en el espesor del panel (de 50 mm a 56.75 mm) permite lograr el desempeño térmico adecuado según las normativas vigentes.

5.3 Desempeño Acústico Comparativo

Dado que el enfoque de esta tesis se centra en el análisis del material puro —es decir, sin considerar su aplicación dentro de sistemas constructivos compuestos—, no fue posible calcular el índice de reducción acústica ponderado (R_w), exigido por la normativa chilena para muros divisorios habitacionales. Según lo establecido en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (O.G.UC.), específicamente en su capítulo 4.1.6, los elementos divisorios deben contar con un aislamiento acústico no inferior a **45 dB(A)**. Sin embargo, dicha exigencia se aplica a soluciones constructivas completas, lo que impide su aplicación directa al estudio del material en sí mismo.

Para permitir una comparación relativa del comportamiento acústico del panel propuesto con respecto a materiales aislantes tradicionales, se recurrió al uso del **coeficiente de absorción acústica (α)** a una frecuencia de **500 Hz**, parámetro ampliamente reportado en la literatura científica y útil para estimar el potencial de absorción sonora de materiales en bandas medias.

En el caso específico del panel compuesto de micelio y lino, no se hallaron datos experimentales directos para esta combinación en particular. Sin embargo, estudios previos sobre materiales similares permiten realizar una estimación fundamentada de su comportamiento.

Por un lado, Pelletier et al. (2019) reportan valores de absorción acústica para biopolímeros de micelio natural que alcanzan **coeficientes entre 0.55 y 0.70 a 500 Hz**, dependiendo de la configuración del panel y el tipo de micelio utilizado. Estos resultados respaldan la capacidad del micelio para absorber sonido eficientemente en frecuencias medias. De manera complementaria, Appels et al. (2019) subrayan que los compuestos de micelio presentan un buen desempeño acústico debido a su estructura porosa y capacidad de disipar energía sonora.

Por otro lado, respecto al lino, no se identificaron estudios científicos específicos que evaluaran su comportamiento acústico en condiciones controladas. Sin embargo, según datos técnicos publicados por la plataforma *ScienceAlpha* (consultado en 2025), el lino

utilizado como aislante (comercializado como “Ecotain”) presenta un **coeficiente de absorción acústica de $\alpha \approx 0.96$ a 500 Hz para un espesor de 50 mm**. Si bien estos datos no provienen de una fuente científica formal, fueron considerados de manera orientativa debido a la ausencia de referencias más específicas sobre este tipo de fibra natural en aplicaciones acústicas.

A partir de estos antecedentes, se estimó el coeficiente de absorción acústica del panel propuesto utilizando un **promedio ponderado**, considerando la proporción de cada material en la mezcla (80% micelio y 20% lino). Para este análisis, se **mantuvo el espesor inicial de 50 mm**, ya que, a diferencia del análisis térmico donde se requirió un ajuste para el cumplimiento normativo (ver Sección 5.2.2.1), este espesor **demonstró ser óptimo** para la **evaluación** del desempeño acústico.

La fórmula utilizada fue la siguiente:

$$\alpha \text{ prom} = (0.8 \times \alpha \text{ micelio}) + (0.2 \times \alpha \text{ lino})$$

Utilizando el rango reportado para el micelio ($\alpha = 0.55\text{--}0.70$) y coeficiente de absorción reportado para el lino ($\alpha = 0.96$), se calcularon los valores extremos del coeficiente promedio del panel compuesto:

- $\alpha \text{ prom límite inferior} = (0.8 \times 0.55) + (0.2 \times 0.96) = \mathbf{0.632}$
- $\alpha \text{ prom límite superior} = (0.8 \times 0.70) + (0.2 \times 0.96) = 0.56 + 0.192 = \mathbf{0.752}$

Esta estimación permite establecer un rango de absorción acústica para el panel propuesto, lo que entrega una **aproximación más realista de su comportamiento** considerando la naturaleza de sus componentes. Para **efectos de la normalización y comparación** con los demás materiales, se utilizará el valor promedio de este rango ($\alpha = \mathbf{0.692}$), permitiendo así fijar un único valor representativo del desempeño acústico del panel.

A continuación, se presenta una tabla comparativa que reúne los coeficientes de absorción acústica de diversos materiales aislantes tradicionales y naturales, proporcionando un marco de referencia para evaluar el desempeño del panel de micelio y lino frente a soluciones convencionales.

Tabla 5.5 Comparación de coeficientes de absorción acústica (α) a 500 Hz entre materiales tradicionales y el panel propuesto.

Material	Espesor (mm)	α a 500 Hz
Lana mineral de roca	50	0.95
Lana mineral de vidrio	50	0.83
Poliuretano	50	0.32
Poliestireno Expandido	50	0.05 - 0.10
Panel Micelio - Lino	50	0.632-0.752

Nota. Los valores de α para el Panel Micelio-Lino se basaron en un espesor de 50 mm, óptimo para su desempeño acústico y representativo de la literatura. A pesar de que el espesor para cumplimiento térmico es 56,75 mm, el desempeño acústico a 50 mm sigue siendo competitivo. Para el poliestireno expandido (XPS), se usó el valor promedio reportado ($\alpha=0.075$) para la normalización.

Esta estimación por rangos, junto con la comparación presentada, permite observar que el **panel propuesto no solo presenta un desempeño acústico favorable**, sino que **incluso en su límite inferior resulta competitivo** frente a soluciones tradicionales ampliamente utilizadas. Esto **consolida su potencial como alternativa sostenible** en acondicionamiento acústico para la arquitectura.

5.4 Análisis de Ciclo de Vida

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta metodológica desarrollada a partir de los años sesenta, que ha evolucionado hasta convertirse en uno de los métodos más utilizados para evaluar el desempeño ambiental de productos, materiales o procesos, especialmente en el ámbito de la construcción (Arenas Cabello, 2007). Su fortaleza radica en su enfoque integral, que permite cuantificar los impactos ambientales a lo largo de todo el ciclo de vida del producto—desde la extracción de materias primas hasta su fase de disposición final—, identificando puntos críticos y orientando decisiones hacia soluciones más sostenibles (ISO 14040, 2006).

El análisis comparativo desarrollado en este estudio se centra en tres indicadores clave: huella hídrica, energía incorporada y emisiones de carbono, dada su relevancia en la evaluación de sostenibilidad de materiales constructivos (ITeC, 2020; DAPs, 2021). Se comparan distintas alternativas de materiales aislantes comúnmente utilizados en el sector de la edificación —como la lana mineral de roca, lana mineral de vidrio, poliestireno extruido (XPS) y poliuretano (PUR)— frente a una propuesta basada en materiales biobasados compuesta por micelio y lino. El objetivo es orientar la selección de soluciones constructivas con base en criterios de sostenibilidad ambiental.

Dentro de la metodología del ACV, se distinguen distintos enfoques según su finalidad: puede ser descriptivo, comparativo o predictivo (Alegre C., 2017). En este caso, se adopta un enfoque comparativo, ya que el propósito es evaluar el desempeño ambiental relativo entre opciones de materiales aislantes, con el fin de fundamentar decisiones informadas en torno a su selección sostenible. Asimismo, el límite del sistema adoptado corresponde a un análisis “de la cuna a la tumba” (cradle to grave), considerando todas las etapas del ciclo de vida: producción de materias primas, manufactura, transporte, uso y fin de vida útil (Alegre C., 2017).

Dado que en muchos casos la información disponible proviene de bases de datos industriales consolidadas o de Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) que no desglosan detalladamente cada etapa del ciclo, se optó por un enfoque simplificado, empleando datos

agregados por metro cuadrado de material instalado. Esta elección metodológica fue necesaria para garantizar consistencia entre los materiales analizados, y se sustenta en fuentes reconocidas como el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC) y DAP oficiales de los fabricantes.

A fin de asegurar una base de comparación justa, todos los materiales han sido evaluados bajo una **vida útil estándar de 50 años**, valor ampliamente respaldado por la literatura científica como representativo del desempeño de productos de aislamiento térmico en condiciones normales de uso (Papadopoulos, 2005; Asdrubali et al., 2015).

Finalmente, los resultados de este análisis permitirán identificar las alternativas con menor impacto ambiental en las categorías consideradas, contribuyendo a una toma de decisiones más sostenibles en proyectos arquitectónicos y fomentando el uso de materiales con menor huella ecológica en el sector de la construcción.

5.4.1 Inventario de Ciclo de Vida y Evaluación del Impacto Ambiental

Para la evaluación del impacto ambiental de los materiales aislantes, se definió un espesor de **50 mm**, en **concordancia** con los **requerimientos** establecidos por la normativa técnica vigente para muros perimetrales en la **zona térmica C** de Valparaíso. Si bien algunos materiales podrían requerir un ajuste de espesor para cumplir con la normativa (como el panel de micelio-lino en el análisis térmico, ver Sec. 5.2.2.1), este espesor de **50 mm** se utiliza aquí como una **base unificada** para **garantizar** una **comparación ambiental justa** entre todas las alternativas, ya que cumple con los valores de transmitancia térmica (U) y resistencia térmica (Rt) exigidos por la reglamentación.

Con este criterio unificado, se procederá a analizar las **categorías de impacto ambiental** más relevantes en la evaluación de materiales constructivos: **consumo hídrico, energía incorporada y emisiones de carbono**. Los resultados obtenidos para materiales aislantes tradicionales —como lana mineral, poliestireno extruido (XPS) y poliuretano (PUR)— serán comparados con el desempeño de un sistema biobasado compuesto por **micelio y lino**, con

el objetivo de explorar su potencial para **reducir la huella ambiental** en el sector de la construcción, y establecer una base para los resultados del Análisis de Ciclo de Vida (ACV), entregando una perspectiva integral sobre el uso de biomateriales en aplicaciones arquitectónicas sostenibles e identificando **oportunidades de mejora ambiental**.

5.4.2 Evaluación ambiental de materiales tradicionales

Para la estimación del **consumo hídrico**, se utilizaron los valores reportados en las **Declaraciones Ambientales de Producto (EPD, por sus siglas en inglés)** proporcionadas por los fabricantes. Estas declaraciones constituyen fuentes verificadas que cuantifican los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida del material, aportando una base sólida para la comparación.

En cuanto al **consumo energético** y las **emisiones de CO₂ incorporadas**, los datos fueron extraídos desde la plataforma del **Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC)**, ampliamente reconocida por su uso en estudios de ACV y certificaciones ambientales.

La integración de ambas fuentes —EPD e ITeC— garantiza la **consistencia, trazabilidad y validez comparativa** de los datos empleados, permitiendo realizar una evaluación estandarizada entre las distintas opciones de aislamiento.

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos para los materiales aislantes tradicionales seleccionados, considerando los tres indicadores ambientales definidos: consumo energético, emisiones de CO₂ incorporadas y consumo hídrico. Los valores están expresados por metro cuadrado de material instalado con un espesor de 50 mm, permitiendo así una comparación directa entre soluciones equivalentes en términos de desempeño térmico.

Tabla 5.6 Evaluación de Impacto ambiental materiales aislantes tradicionales.

Solución tradicional	Densidad (kg/m³)	Consumo Energético	Emisiones CO₂	Consumo H₂O
Lana mineral (vidrio); λ: 0,032 ; Rt: 1,55 ; 50 mm	80	69.382 MJ/m ²	2.13 Kg/m ²	0,34258 m ³ /m ²
Lana mineral (roca); λ:0,034 ; Rt:1,45 ; 50 mm	70	59.0085 MJ/m ²	4.13362 Kg/m ²	0,0636 m ³ /m ²
XPS; λ: 0,034 ; Rt: 1,50 ; 50 mm	30	175.5 MJ/m ²	25.904 Kg/m ²	7,162 m ³ /m ²
PUR; λ: 0,028 ; Rt: 1,75	32	117.718 MJ/m ²	16.861 Kg/m ²	1,7 m ³ /m ²

Como puede observarse, los materiales de origen sintético como el poliestireno extruido (XPS) y el poliuretano (PUR) presentan valores significativamente más altos en términos de emisiones de carbono y consumo hídrico en comparación con las lanas minerales. Esta información evidencia las diferencias sustanciales en el desempeño ambiental de los materiales comúnmente utilizados, lo cual refuerza la necesidad de explorar alternativas más sostenibles como los biomateriales.

5.4.3 Evaluación Ambiental del Panel Propuesto de Micelio y Lino

A diferencia de los materiales aislantes tradicionales, cuyas Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) y bases de datos estandarizadas como ITeC permiten acceder a información cuantificada sobre impactos ambientales, en el caso del panel propuesto compuesto por micelio y lino no se encontraron datos directos y verificables en fuentes científicas que entreguen valores exactos de consumo hídrico, energético o emisiones de CO₂ para esta combinación de biomateriales. Por este motivo, se procedió a una **estimación fundamentada** utilizando estudios recientes relacionados con la producción de micelio y el cultivo de lino por separado, ajustando los resultados a las proporciones materiales del panel: 80% micelio y 20% lino en peso.

Para estimar la masa de material contenida en 1 m² de panel, se adoptó una densidad referencial de **100 kg/m³**, valor representativo de compuestos de micelio no prensados. Según Appels et al. (2019), este tipo de materiales presenta densidades entre **0.10 y 0.17 g/cm³** (equivalentes a 100–170 kg/m³), dependiendo del sustrato y el método de fabricación. Esta elección permite una comparación razonable con los materiales aislantes tradicionales, cuya densidad suele situarse entre los 30 y 80 kg/m³. Con un espesor final de **56,75 mm (0.05675 m)**, se calculó una masa total de **5.675 kg/m²** para el panel, de los cuales **4.54 kg/m²** corresponden a micelio y **1.135 kg/m²** a lino, en base a la proporción 80/20 establecida en el diseño del material.

5.4.3.1 Consumo Hídrico

El análisis del consumo hídrico del panel propuesto se realizó en función de sus dos componentes principales: micelio y fibra de lino. Para el micelio, se excluyó el impacto vinculado a la producción del sustrato, ya que este corresponderá a la fibra de lino, cuyo consumo hídrico se evalúa de forma independiente. En su lugar, se consideró únicamente el **consumo directo** de agua durante el cultivo del micelio, que incluye procesos como el riego, la esterilización y la limpieza del medio. De acuerdo con De Silva et al. (2023), este consumo equivale a **4.4 litros por kilogramo de micelio seco**. Considerando que el panel propuesto

contiene **4.54 kg/m²** de micelio, el consumo hídrico estimado para este componente asciende a **19.98 L/m²**, equivalente a **0.01998 m³/m²**.

En cuanto a la fibra de lino, no se encontraron estudios que cuantificaran directamente su huella hídrica en términos de litros por kilogramo. No obstante, Sánchez Vallduví y Dellepiane (2023) reportan que el cultivo del lino requiere entre **400 y 450 mm de agua** durante su ciclo, lo que equivale a **400–450 litros por metro cuadrado de superficie cultivada**. Para estimar el consumo hídrico asociado a la cantidad de fibra de lino incorporada en el panel, se consideró un rendimiento agrícola de 0.5 kg/m², valor que representa un escenario productivo óptimo. Este dato se encuentra dentro del rango señalado por publicaciones especializadas como Fibre Bio (s.f.), que lo ubican como un rendimiento esperable para cultivos de lino textil. A partir de esta relación, se calculó que producir **1.135 kg/m² de lino** —cantidad incorporada en el panel compuesto— requeriría entre **908 y 1022 L/m²**, equivalentes a un rango de **0.908 y 1.022 m³/m²**. En conjunto, el consumo hídrico total estimado para el panel se encuentra entre **0.928 y 1.042 m³/m²**. Para efectos de la normalización, se utilizará el valor promedio de este rango, que es de **0.985 m³/m²**, permitiendo así una comparación directa con los demás materiales evaluados en esta investigación bajo una base metodológica coherente.

5.4.3.2 Consumo Energético

El consumo energético del panel se estimó a partir de datos provenientes de estudios ambientales específicos para cada uno de sus componentes. En el caso del micelio, se utilizó como referencia el valor reportado por Albir Ribera (2020–2021), quien, en su análisis sobre materiales sostenibles, cita un estudio de Mayoral González, Keller y Joachim (2010). Según este documento, la fabricación de un metro cuadrado de panel aislante compuesto por micelio y residuos agrícolas, desarrollado por la empresa Ecovative, implica un **consumo energético aproximado de 625 MJ/m²**. Este valor ya corresponde al producto conformado por metro cuadrado, por lo que no fue necesario realizar una conversión adicional en función del peso del micelio, a diferencia del caso del lino, cuyo valor energético fue entregado por unidad de masa y debió ajustarse según el contenido incorporado en el panel. No obstante, el estudio original citado no se encuentra disponible en acceso público, lo que impide verificar con precisión aspectos fundamentales como el espesor del panel, la escala productiva o las

condiciones tecnológicas consideradas. Esta falta de acceso constituye una limitación metodológica relevante, por lo que el dato debe entenderse como una estimación de referencia preliminar, posiblemente influenciada por procesos industriales de alta demanda energética.

Para el lino, se consideró el valor reportado por Palomo Cano (2017), quien indica un consumo energético de **49.03 MJ/kg**. Dado que el panel contiene **1.135 kg/m²**, se estimó un aporte energético de **55.65 MJ/m²**. De este modo, el **consumo energético total** del panel compuesto se estima en **680.65 MJ/m²**.

Este valor refleja el impacto acumulado de ambos materiales, considerando su proporción real dentro del sistema. Aunque puede resultar elevado en comparación con algunos materiales tradicionales, responde a procesos de producción aún en desarrollo, lo que abre espacio para futuras mejoras en eficiencia energética y optimización industrial.

5.4.3.3 Emisiones de CO₂

El cálculo de las emisiones de CO₂ asociadas al panel compuesto por micelio y lino, se realizó siguiendo una metodología coherente con los indicadores anteriores, considerando la proporción de materiales utilizada en el diseño (80% micelio y 20% lino) y expresando los resultados en términos de emisiones por metro cuadrado de panel.

Para el componente del micelio, se adoptó el valor reportado en el estudio de Al-Qahtani, Koç e Isaifan (2023), quienes identificaron que los materiales aislantes de micelio pueden alcanzar emisiones incorporadas negativas de hasta $-298 \text{ kgCO}_2 \text{ eq/m}^3$, al considerar la absorción de dióxido de carbono durante su ciclo de vida. Dado el espesor definido del panel (56,75 mm), se calculó una emisión equivalente de:

$$-298 \text{ kgCO}_2 / \text{m}^3 \times 0,05675 \text{ m} = - \mathbf{16,91 \text{ kgCO}_2 / \text{m}^2}$$

Este valor refleja el **carácter carbono-negativo del micelio** en contextos productivos sostenibles, destacando su potencial como alternativa ecológica en el sector de la construcción.

Por otro lado, el lino presenta una huella de carbono de **3.05 kgCO₂ por kilogramo**, según lo indicado por Palomo Cano (2017). Considerando que en el panel propuesto se incorporan **1.135 kg/m²** de lino, las emisiones asociadas a este componente corresponden a:

$$3.05 \text{ kgCO}_2/\text{kg} \times 1.135 \text{ kg/m}^2 = \mathbf{3.47 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2}$$

De este modo, las **emisiones totales estimadas** para el **panel compuesto** alcanzan los - **13,44 kgCO₂/m²**, evidenciando un comportamiento altamente favorable desde el punto de vista ambiental. Este resultado no solo contrasta positivamente con las emisiones de los materiales aislantes tradicionales analizados, sino que también posiciona al panel propuesto como un material **potencialmente carbono-negativo**, en línea con los principios de la bioeconomía y la construcción sostenible. Además, refuerza el argumento de que los biomateriales emergentes pueden ofrecer soluciones de alto rendimiento con un impacto ambiental significativamente menor.

5.5 Optimización Integral del Desempeño mediante Evaluación Multicriterio

El proceso de optimización integral del desempeño termoacústico y ambiental se llevará a cabo mediante un **análisis multicriterio**, una metodología que permite evaluar de forma simultánea múltiples indicadores pertenecientes a distintas categorías. En este caso, se considerarán tanto variables ambientales —derivadas del análisis de ciclo de vida (ACV)— como parámetros técnicos relacionados con el comportamiento térmico y acústico de los materiales.

Este análisis abarcará **tanto los materiales aislantes tradicionales como el panel propuesto de micelio y lino**, con el objetivo de identificar cuáles de estas alternativas presentan un mejor desempeño global en función de los criterios definidos. La comparación integral permitirá evaluar no sólo el rendimiento específico del panel desarrollado, sino también su comportamiento relativo frente a soluciones convencionales en el contexto arquitectónico.

Para estructurar adecuadamente esta evaluación, se propone llevar a cabo el análisis en **dos etapas complementarias**. En la **primera etapa**, se evaluarán los indicadores ambientales de impacto derivados del ACV: **consumo hídrico, consumo energético y emisiones de CO₂**. Esta etapa se desarrollará mediante el **método AHP (Analytic Hierarchy Process)**, propuesto por **Saaty (1980)**, el cual permite establecer jerarquías de importancia entre distintos criterios a través de matrices de comparación por pares.

En la **segunda etapa**, se integrarán los resultados obtenidos con los indicadores de desempeño térmico y acústico. Para ello, se considerarán el **coeficiente de absorción acústica** como medida del comportamiento sonoro y la **transmitancia térmica (U)** como indicador representativo del comportamiento térmico global. Esta segunda etapa se llevará a cabo mediante el **método de Pareto**, que permite identificar las alternativas más equilibradas desde un enfoque no jerárquico, maximizando el rendimiento global del sistema sin privilegiar una única dimensión.

Ambas etapas comparten un paso metodológico previo indispensable: la **normalización de los datos**. Este procedimiento es esencial para armonizar los distintos indicadores —cada uno expresado en unidades diferentes— y permitir su evaluación conjunta sin introducir sesgos derivados de las magnitudes o escalas.

5.5.1 Normalización de los datos

Como paso previo indispensable para la aplicación del análisis multicriterio en sus dos etapas, se procederá a la **normalización de los datos**. Este proceso permitirá que los indicadores seleccionados —cuya naturaleza y unidades varían ampliamente entre sí, como el consumo hídrico (litros/m²), las emisiones de CO₂ (kgCO₂ eq/m²), la transmitancia térmica (W/m²·K) o el coeficiente de absorción acústica (adimensional)— puedan ser comparados en una **misma escala común**, asegurando una evaluación justa y equilibrada.

La **normalización consiste en transformar los valores originales de cada indicador al rango [0, 1]**, de modo que el valor mínimo observado se transforme en 0 y el valor máximo en 1. Este procedimiento evitará que alguna variable predomine sobre las demás únicamente por la magnitud de sus unidades, y permitirá aplicar los métodos AHP y Pareto sobre una base homogénea.

Se utilizará la siguiente **fórmula lineal de normalización**, ampliamente reconocida en estudios de optimización multicriterio (Marler y Arora, 2004):

$$\text{Valor normalizado} = \frac{\text{Valor observado} - \text{Valor mínimo}}{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}$$

Donde:

- **Valor observado:** Corresponde al dato original del indicador para el panel propuesto.
- **Valor mínimo:** Es el menor valor registrado para ese indicador entre los sistemas comparados.
- **Valor máximo:** Es el mayor valor registrado para ese indicador.

Esta ecuación se aplicará de manera consistente a todos los indicadores. No obstante, dado que en la mayoría de los casos evaluados —como las emisiones de CO₂, el consumo energético, el consumo hídrico y la transmitancia térmica— un **menor valor representa un mejor desempeño ambiental o funcional**, se empleará una **normalización inversa** para dichos indicadores. Solo en el caso del coeficiente de absorción acústica, donde un mayor valor indica un mejor desempeño, se aplicará la fórmula de **normalización directa**.

Una vez completado el procedimiento metodológico y definidas las ecuaciones de normalización, se procederá a aplicar este proceso a los datos obtenidos para todos los materiales aislantes analizados, incluyendo el panel de micelio y lino. Esta etapa transformará los valores originales de cada indicador a una escala común de 0 a 1, creando una **base de datos comparable y coherente**, lista para el análisis a través de los métodos de decisión multicriterio (AHP y Pareto) en las etapas siguientes. Esto garantizará una **evaluación objetiva y comparable** del desempeño ambiental y técnico de las alternativas.

Para ello, se utilizarán las ecuaciones antes descritas —normalización directa o inversa, según corresponda a cada indicador— aplicadas individualmente a:

- Emisiones de CO₂,
- Consumo energético,
- Consumo hídrico,
- Transmitancia térmica (U), y
- Coeficiente de absorción acústica.

Los resultados obtenidos permitirán comparar el desempeño relativo de cada material en una escala común de 0 a 1, lo que servirá como insumo directo para la etapa siguiente del análisis, correspondiente a la aplicación del método de Saaty (1980).

5.5.1.1 Cálculo de los valores normalizados

Con el fin de establecer una base de comparación uniforme entre los diferentes materiales analizados, a continuación, se presentarán los cálculos de normalización para cada uno de los indicadores definidos previamente. Para ello, se aplicarán dos formas de normalización, según la naturaleza del indicador evaluado.

En los casos en que un **mayor valor representa un mejor desempeño**, como el coeficiente de absorción acústica, se aplicará la fórmula de normalización directa:

$$\text{Valor normalizado} = \frac{\text{Valor observado} - \text{Valor mínimo}}{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}$$

Por otro lado, para los indicadores en los que un **menor valor representa un mejor desempeño ambiental**, como las emisiones de CO₂, el consumo energético, el consumo hídrico y la transmitancia térmica, se aplicará una **normalización inversa**, utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{Valor normalizado inverso} = \frac{\text{Valor máximo} - \text{Valor observado}}{\text{Valor máximo} - \text{Valor mínimo}}$$

A continuación, se presentan los cálculos normalizados por cada indicador, considerando tanto los materiales tradicionales como el panel de micelio y lino.

5.5.1.1.1 Normalización de Emisiones de CO₂

Tabla 5.7 Normalización de emisiones de CO₂.

Material	Emisiones de CO₂ (kgCO₂/m²)	Valor Normalizado
Panel Micelio-Lino	-13,44	1,000
Lana mineral de vidrio	2,13	0,604
Lana mineral de roca	4,13	0,553
PUR	16,86	0,230
XPS	25,90	0,000

5.5.1.1.2 Normalización de Consumo Energético

Tabla 5.8 Normalización de Consumo Energético.

Material	Consumo Energético (MJ/m²)	Valor Normalizado
Lana mineral de roca	59,0085	1,000
Lana mineral de vidrio	69,382	0,983
PUR	117,718	0,906
XPS	175,5	0,813
Panel Micelio-Lino	680,65	0,000

5.5.1.1.3 Normalización de Consumo Hídrico

Tabla 5.9 Normalización de Consumo Hídrico

Material	Consumo Hídrico (L/m ²)	Valor Normalizado
Lana mineral de roca	0,0636	1,000
Lana mineral de vidrio	0,34258	0,961
Panel Micelio-Lino	0,985	0,870
PUR	1,7	0,769
XPS	7,162	0,000

5.5.1.1.4 Normalización de Transmitancia Térmica (U)

Tabla 5.10 Normalización de Transmitancia Térmica.

Material	Transmitancia Térmica (U)	Valor Normalizado
PUR	0,495	1,000
Lana mineral de vidrio	0,556	0,800
XPS	0,586	0,702
Lana mineral de roca	0,586	0,702
Panel Micelio-Lino	0,80	0,000

5.5.1.1.5 Normalización de Coeficiente de Absorción Acústica (α)

Tabla 5.11 Normalización de Coeficiente de Absorción Acústica (α).

Material	Absorción Acústica (α)	Valor Normalizado
Lana mineral de roca	0,95	1,000
Lana mineral de vidrio	0,83	0,867
Panel Micelio-Lino	0,692	0,702
PUR	0,32	0,300
XPS	0,05 - 0,10	0,000

5.5.2 Etapa 1: Priorización de Indicadores Ambientales mediante el Método AHP

Para estructurar adecuadamente esta evaluación integral, se propone llevar a cabo el análisis en dos etapas complementarias. En la primera etapa, se evaluarán los indicadores ambientales derivados del análisis de ciclo de vida (ACV): **consumo hídrico, consumo energético y emisiones de CO₂** incorporadas. Dado que estos factores representan impactos ambientales clave en el desempeño de los materiales evaluados, es fundamental establecer una jerarquización de su relevancia relativa.

Con este propósito, se aplicará el **método AHP (Analytic Hierarchy Process)**, propuesto por **Saaty (1980)**, una metodología de análisis multicriterio que permite estructurar decisiones complejas a partir de la comparación por pares entre criterios. El método se basa en la construcción de una matriz de comparación, donde cada indicador se evalúa frente a los demás en términos de su importancia relativa. Las valoraciones se expresan mediante una escala de 1 a 9 propuesta por el autor, en la que el valor 1 representa igualdad de importancia entre dos criterios, y 9 indica una importancia extrema de un criterio sobre otro.

Este procedimiento permite calcular **pesos normalizados** para cada indicador ambiental, los cuales reflejan su contribución relativa en la evaluación global. Estos pesos serán posteriormente utilizados para ponderar los valores normalizados obtenidos en la sección anterior, permitiendo así una comparación equilibrada entre los materiales.

5.5.2.1 Objetivo y Estructura Jerárquica del Problema

El objetivo general de esta etapa es establecer la prioridad relativa entre los tres indicadores ambientales seleccionados, a fin de ponderar adecuadamente su aporte en el análisis integral. La jerarquía del problema puede representarse en el siguiente esquema:



Figura 5.2 *Diagrama de Priorización de Desempeño Ambiental*
Nota. Elaboración propia

5.5.2.2 Construcción de la Matriz de Comparación por Pares

En este caso, se ha optado por asignar una importancia igual entre los tres indicadores ambientales, aplicando una ponderación equitativa. Esta decisión metodológica se basa en la necesidad de mantener un equilibrio objetivo entre los distintos impactos evaluados, evitando sesgos subjetivos en la priorización de un tipo de impacto por sobre otro. Esta estrategia permite una comparación justa entre los materiales al integrar las tres dimensiones ambientales de manera uniforme.

Bajo este supuesto de igualdad de importancia, se construye la siguiente **matriz de comparación por pares**, donde todos los valores entre criterios se fijan en 1:

Tabla 5.12 *Matriz de comparación por pares.*

Indicadores	Consumo hídrico	Consumo energético	Emisiones de CO ₂
Consumo hídrico	1	1	1
Consumo energético	1	1	1
Emisiones de CO ₂	1	1	1

5.5.2.3 Cálculo del Vector de Prioridades

Dado que todas las comparaciones son iguales (valor 1), la matriz es perfectamente consistente y el peso asignado a cada criterio corresponde a un tercio del total. El vector de prioridades normalizado es:

- Consumo hídrico: **0,333**
- Consumo energético: **0,333**
- Emisiones de CO₂: **0,333**

5.5.2.4 Verificación de Consistencia

En este caso, al utilizar una matriz perfectamente equilibrada, el índice de consistencia (CI) es igual a 0, lo que implica un índice de razón de consistencia (CR) también igual a 0. Por tanto, la matriz cumple plenamente con el criterio de coherencia propuesto por Saaty, que establece que CR debe ser inferior a 0,1.

5.5.2.5 Evaluación y Asignación de Pesos Finales

Los valores del vector de prioridades se utilizarán para ponderar los resultados de normalización previamente calculados para cada uno de los indicadores ambientales. De este

modo, se obtiene un único valor agregado de desempeño ambiental (ACV Global) para cada alternativa evaluada, consolidando en un solo índice la información relativa al consumo hídrico, energético y las emisiones de CO₂ incorporadas.

La fórmula utilizada para calcular este **índice ambiental compuesto** fue:

$$\text{ACV Global} = (0,333 \times \text{Índice hídrico}) + (0,333 \times \text{Índice energético}) + (0,333 \times \text{Índice CO}_2)$$

A partir de esta fórmula se calcularon los valores de ACV Global para cada una de las alternativas. Posteriormente, estos valores fueron normalizados para permitir su integración con los demás indicadores de desempeño en la siguiente etapa del análisis multicriterio. La tabla a continuación resume estos resultados:

Tabla 5.13 Resumen del índice de desempeño ambiental (ACV Global).

Material	ACV Global	ACV Normalizado
Lana mineral de roca	0,850	1,000
Lana mineral de vidrio	0,849	0,998
PUR	0,634	0,627
Micelio - Lino	0,623	0,608
XPS	0,271	0

Estos valores normalizados del ACV Global constituirán uno de los tres ejes del análisis multicriterio de la Etapa 2, junto con los indicadores térmicos y acústicos de cada material. En esta segunda etapa, se llevará a cabo una evaluación completa mediante el método de Pareto, lo que permitirá identificar de forma más precisa qué alternativa logra un mejor equilibrio entre desempeño ambiental, térmico y acústico.

5.5.3 Etapa 2: Optimización Integral mediante el Método de Pareto

5.5.3.1 Integración de Criterios de Desempeño Térmico, Acústico y Ambiental

En la segunda etapa, se integrarán los resultados obtenidos con los indicadores de desempeño térmico y acústico. Para ello, se considerarán el coeficiente de absorción acústica como medida del comportamiento sonoro y la transmitancia térmica (U) como indicador representativo del comportamiento térmico global. Junto a estos, se incorporará el resultado consolidado del análisis ambiental (ACV) obtenido en la etapa anterior mediante el método AHP, el cual resume los indicadores de consumo hídrico, consumo energético y emisiones de CO₂ incorporadas en un único valor ponderado.

Esta etapa se llevará a cabo mediante el **método de Pareto**, una técnica ampliamente utilizada en procesos de optimización multicriterio, especialmente en escenarios donde se deben considerar múltiples variables de manera simultánea sin establecer jerarquías explícitas entre ellas (Marler y Arora, 2004). En este enfoque, las alternativas se representan como puntos en un espacio de múltiples dimensiones —cada una correspondiente a un criterio evaluado— y se identifican aquellas que no son dominadas por ninguna otra, conformando lo que se conoce como **frontera de Pareto** (Deb, 2001). Una alternativa es dominada cuando existe otra que es igual o mejor en todos los criterios, y estrictamente mejor en al menos uno.

De este modo, el análisis permite identificar aquellas soluciones que ofrecen **el mejor equilibrio global posible**, sin privilegiar un único criterio, sino manteniendo el compromiso entre todos. Las alternativas pertenecientes a la frontera de Pareto serán, por tanto, las que presenten el mayor potencial desde una perspectiva integral de desempeño termoacústico y ambiental.

5.5.3.2 Desarrollo del Análisis y Comparación Multicriterio

Para proceder con la aplicación del método de Pareto, se consolidaron los valores normalizados de los tres criterios definidos:

- **Indicador ambiental global (ACV)**, obtenido mediante el método AHP en la etapa anterior.
- **Transmitancia térmica (U)**, como indicador del comportamiento térmico.
- **Coefficiente de absorción acústica promedio (α)**, como medida del desempeño acústico.

La siguiente tabla resume los **resultados normalizados** para cada uno de los materiales analizados:

Tabla 5.14 Normalización de criterios.

Material	ACV	Transmitancia térmica (U)	Absorción acústica (α)
Lana mineral de roca	1,000	0,702	1,000
Lana mineral de vidrio	0,998	0,800	0,867
PUR	0,627	1,000	0,300
Micelio - Lino	0,608	0,000	0,702
XPS	0,000	0,702	0,000

Estos datos permiten representar cada alternativa como un punto en un espacio tridimensional, cuyas coordenadas corresponden a los valores de los tres criterios evaluados. La aplicación del método de Pareto consiste en identificar aquellas alternativas que no son superadas por ninguna otra en todos los criterios a la vez, es decir, que **no son dominadas**. Una alternativa será parte de la **frontera de Pareto** si no existe otra que sea igual o mejor en todos los indicadores, y estrictamente mejor al menos en uno de ellos.

Con esta información, se generó una visualización tridimensional que permite identificar gráficamente las soluciones más equilibradas desde el punto de vista térmico, acústico y ambiental. Estas alternativas, al no ser dominadas, representan las opciones más robustas para un diseño eficiente desde una perspectiva integral de sostenibilidad.

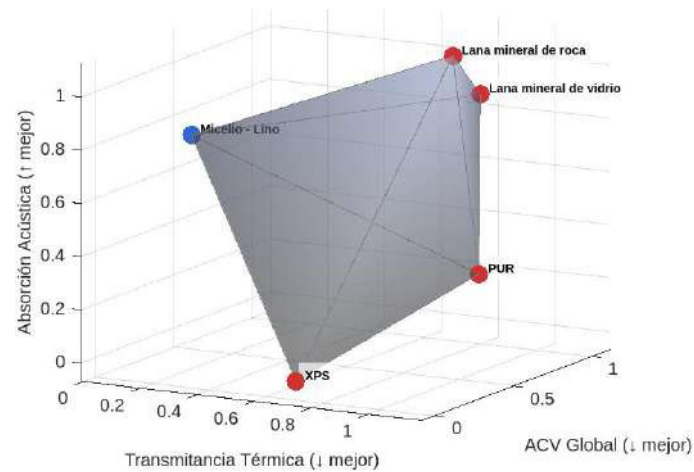


Figura 5.3 Visualización Tridimensional de la Frontera de Pareto para el Desempeño de Materiales.
Nota. Elaboración propia

5.5.3.3 Resultados y Análisis de la Frontera de Pareto

Del análisis gráfico y comparativo se identificaron tres materiales que se ubican en la frontera de Pareto: **la lana mineral de roca, la lana mineral de vidrio y el panel de micelio-lino**. Estos tres materiales presentan configuraciones que no son dominadas por ninguna otra alternativa dentro del espacio de evaluación, lo que indica que cada uno ofrece ventajas destacadas en al menos uno de los criterios sin verse ampliamente superado en los demás, y por tanto, **representan las soluciones más equilibradas** desde una **perspectiva conjunta** de sostenibilidad ambiental, desempeño térmico y comportamiento acústico.

Por otro lado, los materiales **XPS y PUR** quedan fuera de la frontera de Pareto. El XPS, a pesar de tener una buena transmitancia térmica (U), presenta valores nulos en desempeño ambiental y acústico, lo cual lo hace claramente dominado por otras alternativas. En el caso del PUR, aunque muestra un rendimiento térmico óptimo, su baja absorción acústica y su impacto ambiental relativamente elevado lo posicionan por debajo de las soluciones más equilibradas.

El **panel de micelio-lino**, en particular, **logra posicionarse dentro de la frontera de Pareto** gracias a su destacable equilibrio entre desempeño ambiental —incluyendo emisiones negativas— y una absorción acústica favorable, lo que lo convierte en una **alternativa prometedora** desde una **visión integral de sostenibilidad**. Aunque no alcanza los valores máximos en cada criterio por separado, su rendimiento combinado permite que no sea dominado por ninguna de las soluciones tradicionales, validando así su potencial como material sostenible de nueva generación.

Además, sus ventajas a largo plazo en términos de **biodegradabilidad, uso de materias primas naturales y potencial de circularidad** ofrecen un valor adicional relevante para la industria de los materiales de construcción. A través de la **normalización y el análisis jerárquico**, se ha logrado evaluar de manera comparativa su desempeño global frente a materiales tradicionales, lo que **abre puertas a futuras mejoras, adaptaciones y aplicaciones más sostenibles** en el ámbito arquitectónico y constructivo.

5.6 Análisis Proyectual Comparativo

El análisis multicriterio desarrollado en la Sección 5.5 (Optimización Integral del Desempeño mediante Evaluación Multicriterio) permitió comparar de forma sistemática e integral el desempeño térmico, acústico y ambiental de diversas soluciones constructivas, incorporando tanto materiales tradicionales como una propuesta basada en biomateriales. La aplicación combinada del método AHP y del enfoque de Pareto ofreció una visión complementaria — jerárquica y no jerárquica— que facilitó la identificación de materiales no solo eficientes desde un punto de vista técnico, sino también con alto potencial de sostenibilidad. Dentro de este marco, el panel de micelio-lino logró posicionarse dentro de la frontera de Pareto, revelando su viabilidad como solución alternativa y competitiva frente a las opciones convencionales.

A partir de estos resultados, la presente sección se enfocará exclusivamente en el estudio arquitectónico del panel de micelio-lino propuesto, explorando no solo sus cualidades formales, táctiles y expresivas, sino también su potencial de aplicación en sistemas constructivos contemporáneos. Esta parte abordará aspectos proyectuales vinculados a su integración espacial, sus posibilidades de moldaje y textura, y el modo en que este biomaterial podría contribuir a la definición de geometrías y soluciones constructivas sostenibles dentro del campo de la arquitectura.

5.6.1 Síntesis Comparativa de Casos de Estudio

Tras el análisis individual de los seis casos de estudio seleccionados, presentados en detalle en el Capítulo 4 (Análisis Técnico y Proyectual de Casos de Estudio), se presenta a continuación una lectura comparativa para identificar **patrones recurrentes, singularidades y relaciones críticas** en la exploración del micelio como material arquitectónico. Esta comparación se estructura en torno a dos conjuntos principales de variables cualitativas:

- **Variables Técnicas y Productivas (A):** Que engloban aspectos materiales, estructurales y constructivos de los sistemas desarrollados, incluyendo el tipo de molde, métodos de cultivo, limitaciones físicas, escalabilidad técnica y montaje.
- **Variables Proyectuales y Arquitectónicas (B):** Que abordan la dimensión espacial, expresiva y cultural de los proyectos, tales como la capacidad de expresión material, viabilidad geométrica, formato y escala del elemento, y su exposición y visibilidad arquitectónica.

Dado el volumen y la complejidad de la información, la comparación se desglosa en cuatro tablas diferenciadas: Tabla 5.15 para Variables A.1, Tabla 5.16 para A.2, Tabla 5.17 para B.1 y Tabla 5.18 para B.2. Esta organización permite mantener una lectura clara y ordenada sin sacrificar la profundidad del análisis.

Tabla 5.15 Variables A.1: Comparación de Variables Técnicas y Productivas.

Variable / Caso	Hy-Fi	Shell Mycelium	MycTree	Monolito Micelio	Growing Pavilion	My-Co Space
Tipo de Molde y Método de Conformado	Moldes prismáticos estándar con mezcla de micelio y tallos de maíz picados. Producción controlada en fábrica.	Molde estructural de madera contrachapada con cavidades tipo bandeja, cultivadas in situ con micelio en bandejas recubiertas de fibra de coco, sin post-procesamiento.	Moldes planos de bambú/contrachapado cortados CNC, ensamblados sin adhesivos. Alta precisión geométrica.	Molde estructural con costillas de madera contrachapada y geotextil de nailon como encofrado flexible para curvas complejas. Cultivo in situ sin secado térmico.	Moldes cerrados planos (200 × 70 cm) usados para cultivar micelio de <i>Ganoderma</i> en sustrato agrícola, enfocados en seriación estandarizada.	Moldes preensamblados de contrachapado de 4,5 cm de espesor, con cultivo de <i>Fomes fomentarius</i> sobre cáñamo esterilizado. Secado en horno y montaje posterior.
Tiempo de Cultivo o Producción	5 días de cultivo en moldes, seguido de desmoldeo y secado térmico para estabilización	Tiempo no especificado; crecimiento progresivo bajo clima local y secado solar natural.	2 semanas de cultivo controlado con cepa <i>Ganoderma lucidum</i> mediante sistema controlado, seguido de deshidratación	Tomó 6 días en total: 4 días de cultivo activo con molde cerrado, seguidos de 2 días de consolidación sin geotextil (retirado progresivamente). Sin secado térmico; secado al aire.	4–5 días de cultivo en moldes cerrados y en ambiente oscuro y húmedo; desmoldeo tras 7 días. Secado a 80 °C por 2 días.	4 semanas de incubación en moldes preensamblados, seguido de secado térmico a 60 °C durante 2 días para inactivación.
Limitaciones físicas	Baja resistencia estructural; requirió refuerzos internos de madera y acero para estabilidad.	Sin post-tratamiento; expuesto al clima. Vulnerable a humedad y radiación. Durabilidad limitada y sin control geométrico.	Buen desempeño en compresión, pero débil ante tracción/flexión. Necesitó refuerzos con bambú y metal para uniones.	Colapso parcial por absorción de agua; sin secado térmico. Poca precisión formal por uso de encofrado flexible. Dependencia de materiales no biodegradables	El micelio, por su naturaleza biológica, es vulnerable a la humedad y a la intemperie. Esta limitación se abordó mediante biorecubrimientos que mejoraron su resistencia climática.	Paneles planos obligatorios por condiciones de cultivo; sin doble curvatura. Necesitó subestructura de madera optimizada y segmentada, complejizando el ensamblaje.

Tabla 5.16 Variables A.2: Comparación de Variables Técnicas y Productivas.

Variable / Caso	Hy-Fi	Shell Mycelium	Mycotree	Monolito Micelio	Growing Pavilion	My-Co Space
Escalabilidad técnica	Alta. Producción de 10.000 unidades mediante sistema parcialmente industrializado con Ecovative.	Limitada, cultivo in situ sin repetibilidad ni protocolos. Aproximación artesanal y contextual.	Replicable. Diseño digital + cultivo biológico. Adaptable a contextos con control climático básico.	Baja. Sin secado térmico ni moldes reutilizables. Geometría imprecisa. Dependencia de condiciones ambientales.	Potencial replicable. Documentación abierta. Lógica modular y reemplazo sencillo de paneles.	Alta. Prefabricado, desmontable y trasladable. Diseño digital adaptable. Ensamblaje simple y reutilizable.
Montaje y Ensamblaje	Ensamblaje manual de ≈ 10.000 ladrillos. Posible uso de mortero orgánico. Anclaje con tornillos. Compostado tras uso.	Cultivo directamente sobre estructura. Sin uniones mecánicas. Ensamblaje in situ contextual y artesanal.	Uniones mecánicas con placas de bambú y pasadores. Sistema seco, reversible y desmontable.	Sistema monolítico cultivado in situ. Encofrado híbrido con plataforma rodante. Sin ensamblaje modular.	Paneles prefabricados montados sobre estructura de madera. Ensamblaje ágil y desmontaje posible.	Subestructura CNC prefabricada. Ensamblaje modular con pernos. Paneles fijados siguiendo curvatura.

Tabla 5.17 Variables B.1: Comparación de Variables Proyectuales y Arquitectónicas.

Variable / Caso	Hy-Fi	Shell Mycelium	MycoTree	Monolito Micelio	Growing Pavilion	My-Co Space
Capacidad de Expresión Material	Expresa una estética orgánica mediante ladrillos de micelio texturizados, combinados con materiales reflectantes que generan juegos de luz y sombra. La disposición invertida desafía la lógica constructiva tradicional, destacando su potencial climático y visual.	Propone una estética impredecible y efímera basada en el crecimiento libre del micelio, cuya textura cambiante visibiliza su ciclo vital. El material actúa como medio performativo que transmite transformación y crítica a la durabilidad convencional.	Emplea el micelio como metáfora de una construcción regenerativa. Su expresión material comunica una narrativa estructural donde el cultivo y crecimiento urbano reemplazan procesos extractivos.	La textura del micelio se potencia mediante encofrados permeables que registran su crecimiento, revelando tanto la lógica estructural como la biológica. La intención no es ocultar imperfecciones, sino hacerlas parte del lenguaje expresivo.	La textura del micelio se potencia mediante encofrados permeables que registran su crecimiento, revelando tanto la lógica estructural como la biológica. La intención no es ocultar imperfecciones, sino hacerlas parte del lenguaje expresivo.	El micelio es explorado como agente simbiótico y ecológico. El proyecto integra materialidad, mobiliario, textiles y luz fúngica en un entorno sensorial y educativo que revaloriza el rol de los hongos en el habitar sustentable.
Viabilidad geométrica	Formas curvas y esbeltas mediante diseño asistido por computador. Estructura de 13 m validada por Arup. Limitada a geometrías simples.	Rejilla triangular de madera como guía geométrica. El crecimiento libre del micelio impide precisión y repetibilidad. Adaptabilidad local.	Geometrías poliédricas autoportantes mediante estética gráfica 3D. Fabricación digital precisa. Limitada a cargas de compresión.	Geometría simétrica diseñada computacionalmente. Forma abovedada derivada de "columna hongo". Colapsó por la humedad al no secarse.	Geometría cilíndrica simple que permite el montaje de paneles rectangulares. Favorece la modularidad, sin función estructural.	Forma curva derivada del modelo paramétrico hexagonal. Teselación y planarización algorítmica. Reforzada con arcos de madera.
Formato y Escala	Instalación temporal de gran escala. 10.000 bloques modulares. Micelio probado en contexto real.	Sistema modular efímero a escala media. Cavidades como moldes locales.	Estructura de bloques prefabricados con nodos poliédricos. Escala intermedia y replicable.	Escala completa 2,5 x 2,5 x 2,5 m. Cultivo monolítico de 800 kg. Tensiones ecológicas en materiales auxiliares.	Paneles de 200 x 70 cm. Escala media, desmontables y reutilizables. Potencial de aplicación efímera.	Prototipo habitable de 5,2 x 6,0 x 3,0 m. Micelio aplicado a escala arquitectónica. Se identifican desafíos de escalado industrial.

Tabla 5.18 Variables B.2: Comparación de Variables Proyectuales y Arquitectónicas.

Variable / Caso	Hy-Fi	Shell Mycelium	MycoTree	Monolito Micelio	Growing Pavilion	My-Co Space
Exposición y visibilidad ARQ	Instalación central del MoMA PS1. Alta visibilidad mediática. Experiencia pública directa con biomateriales. Conciencia urbana sobre sostenibilidad.	Instalación crítica y efímera. Degradación pública del material como manifiesto. Reflexión ambiental sobre el ciclo de vida de los materiales.	Expuesto en pabellón alemán de la Bienal de Seúl. Diseño escultórico y montaje exento evidencian micelio como manifiesto material.	Instalación académica experimental. Visibilidad en medios especializados. Exploración crítica sobre escalabilidad y condiciones ambientales de cultivo.	Estructura central en Dutch Design Week. Alta exposición cultural. Plataforma para divulgar biomateriales. Modelo de código abierto y replicabilidad.	Exhibición de tres meses en Metzlerpark Frankfurt. Instalación educativa y sensorial. Interacción directa con materiales fúngicos. Diálogo entre arte, ciencia y sostenibilidad.

5.6.2 Discusión de la Síntesis Comparativa de Casos de Estudio

La revisión de estos seis casos de estudio, sintetizada en las tablas anteriores, revela un panorama diverso pero convergente en la exploración del micelio como biomaterial arquitectónico. Estos ejemplos no solo ilustran las capacidades actuales del material, sino que también establecen los **criterios fundamentales** y los **desafíos** que deben considerarse en la proyección de nuevas soluciones, como el panel de micelio-lino objeto de esta investigación.

Desde el punto de vista **técnico y productivo**, observamos una evolución desde los primeros experimentos de gran volumen y desafíos estructurales (Hy-Fi) hacia prototipos que optimizan el control geométrico y la integración con fabricación digital (MycoTree, My-co Space), o que exploran la construcción in situ con sus riesgos asociados (Monolito Micelio). Mientras que Hy-Fi y MycoTree lograron tiempos de cultivo relativamente cortos (5 días a 2 semanas) con secado térmico para estabilizar el material, Shell Mycelium y Monolito Micelio, al optar por el secado al aire o el crecimiento continuo, enfrentaron limitaciones significativas en durabilidad y estabilidad. Esto subraya la **criticidad de un proceso de estabilización post-cultivo** (como el secado térmico) para la viabilidad constructiva del micelio, un aprendizaje crucial

para la caracterización y análisis técnico del panel micelio-lino proyectado, donde se asumen propiedades que garanticen su estabilidad y durabilidad. La **escalabilidad técnica** se ha visto potenciada por la modularidad y el diseño paramétrico (The Growing Pavilion, My-co Space), que permiten la prefabricación y el ensamblaje ágil, aunque persisten los retos de producción a gran escala y la dependencia de infraestructuras de cultivo controladas. Estos avances señalan la dirección hacia una posible industrialización del panel de micelio-lino, aunque los desafíos de escalabilidad deben ser abordados en futuras etapas de desarrollo.

En el ámbito **proyectual y arquitectónico**, todos los casos comparten una profunda capacidad de expresión material, visibilizando las texturas orgánicas y el origen biológico del micelio. Sin embargo, **difieren en su aproximación**: desde la estética industrializada del ladrillo (Hy-Fi), pasando por la morfogénesis impredecible (Shell Mycelium), la precisión estructural paramétrica (MycoTree, My-co Space), hasta la continuidad monolítica (Monolito Micelio). La **viabilidad geométrica** del micelio se ha explorado desde las formas curvas simples hasta las complejas estructuras de compresión pura, aunque con la constante **necesidad de refuerzos auxiliares o subestructuras** (presentes en Hy-Fi, MycoTree, The Growing Pavilion y My-co Space), y la dependencia del **control ambiental** (evidente en el colapso del Monolito Micelio). La **escala** de los elementos ha evolucionado de ladrillos a paneles de gran formato, y la **visibilidad arquitectónica** de estos proyectos trasciende la función para convertirse en manifiestos conceptuales y plataformas educativas, promoviendo una nueva narrativa sobre la sostenibilidad y la bio-integración en la arquitectura. Estos aspectos son fundamentales para comprender el potencial estético y funcional del panel micelio-lino en un contexto arquitectónico, informando su caracterización proyectual.

Estos estudios de caso no solo demuestran la plasticidad y el potencial multifacético del micelio, sino que también iluminan los **desafíos persistentes**: la resistencia estructural a la tracción, la durabilidad en exteriores sin tratamiento, la necesidad de estabilización, y la eficiencia en la escalabilidad industrial. Sin embargo, la constante búsqueda de soluciones innovadoras y la creciente integración con el diseño computacional y la biofabricación, como se ha evidenciado en My-co Space y The Growing Pavilion, consolidan al micelio como un material con un futuro prometedor en la construcción sustentable y en la redefinición de la

relación entre arquitectura y naturaleza. La comprensión de estos **logros y retos** es crucial para el **análisis de viabilidad del panel de micelio-lino proyectado** y para la **formulación de lineamientos** que orienten su futura aplicación y desarrollo en la arquitectura contemporánea.

5.7 Análisis Comparativo Cualitativo: Posibilidades de Diseño Arquitectónico

Más allá de sus propiedades técnicas y ambientales, la elección de un material constructivo impacta directamente en las posibilidades de diseño y la expresión arquitectónica. Este análisis cualitativo compara el panel de micelio-lino propuesto con aislantes convencionales a través de criterios de diseño que reflejan su potencial estético, formal y conceptual. La valoración se basa en los hallazgos de los casos de estudio internacionales y las características intrínsecas de cada material.

La valoración de cada material en relación con los criterios de diseño se realizó aplicando el **método Analytic Hierarchy Process (AHP) con pesos equitativos para cada criterio**, reflejando un juicio experto estructurado. A continuación, se detalla la justificación para las puntuaciones asignadas a cada material, donde una puntuación más alta indica mayores posibilidades de diseño (escala de 1: limitado/bajo, a 3: alto/innovador).

La valoración del desempeño de cada material en relación con los criterios de diseño se realizó aplicando el **método Analytic Hierarchy Process (AHP)**. En este enfoque, si bien se asignaron **pesos equitativos a todos los criterios** de diseño (para asegurar una evaluación holística sin priorizar un aspecto sobre otro), la **puntuación de cada alternativa para cada criterio se estableció en una escala de 1 (limitado/bajo) a 3 (alto/innovador)**. Esta asignación refleja un juicio experto estructurado, fundamentado en el análisis de los casos de estudio.

A continuación, se presenta la Tabla 5.19 con las puntuaciones asignadas, seguida de la justificación detallada para cada valoración.

Tabla 5.19 *Criterios de Posibilidades de Diseño Arquitectónico.*

Material / Criterios	Expresividad Material / Estética	Adaptabilidad Formal / Geométrica	Compatibilidad con Sistemas Modulares y Desmontables	Circularidad Proyectual / Impacto en el Ciclo de Vida	Potencial Integrador en Diseño Arquitectónico	Valoración Global
Panel Micelio - Lino	3	3	3	3	3	3
Lana Mineral (Roca/Vidrio)	1	1	2	2	1	1.4
Poliestireno Extruido (XPS)	1	1	2	1	1	1.2
Poliuretano (PUR)	1	1	2	1	1	1.2

5.7.1 Análisis Detallado de las Puntuaciones Cualitativas

5.7.1.1 Panel Micelio-Lino Propuesto

- **Expresividad Material / Estética (3):** Su textura orgánica, color natural, y la visibilidad de las fibras y el proceso de crecimiento (como se ve en los casos de estudio como Shell Mycelium o The Growing Pavilion) le otorgan un valor estético intrínseco y una singularidad que permite que el material sea expuesto como parte del diseño.
- **Adaptabilidad Formal / Geométrica (3):** Gracias a su capacidad de crecimiento en moldes, el micelio permite explorar y crear formas complejas, curvas y orgánicas (ej. MycoTree, My-co Space), que son inalcanzables con materiales rígidos y estandarizados.
- **Compatibilidad con Sistemas Modulares y Desmontables (3):** El panel propuesto se concibe para ensamblajes en seco y sistemas modulares, lo que facilita su prefabricación, montaje, desmontaje y, fundamentalmente, la reversibilidad para futuras reutilizaciones o el compostaje.

- **Circularidad Proyectual / Impacto en el Ciclo de Vida (3):** Su origen biológico y renovable, su capacidad de biodegradación al final de su vida y sus emisiones de CO2 negativas (según el ACV) lo posicionan como un material con un impacto significativo en los principios de la economía circular. Si bien la energía incorporada en su proceso productivo es considerable, su valor radica en su contribución a la descarbonización del ciclo de vida de los materiales y a la regeneración de recursos.
- **Potencial Integrador en Diseño Arquitectónico (3):** El micelio no es solo un aislante, sino un material que promueve una nueva narrativa arquitectónica. Su uso permite explorar estéticas innovadoras, redefinir relaciones entre biología y construcción, y comunicar un compromiso con la sostenibilidad, integrándose como un elemento conceptual y expresivo del diseño.

5.7.1.2 Lana Mineral (Roca/Vidrio)

- **Expresividad Material / Estética (1):** Material fibroso y homogéneo, diseñado para ser oculto dentro de los sistemas constructivos. No se valora por su estética intrínseca y su exposición no es común ni deseada.
- **Adaptabilidad Formal / Geométrica (1):** Se presenta en paneles o rollos, y aunque es flexible en una dirección (rollos), su uso principal es para superficies planas. La creación de geometrías complejas es difícil y requiere procesos adicionales.
- **Compatibilidad con Sistemas Modulares y Desmontables (2):** Generalmente se instala en sistemas modulares de tabiquería, y puede ser desmontable. Sin embargo, su manipulación puede generar fibras y no es biodegradable, lo cual limita su circularidad post-desmontaje.
- **Circularidad Proyectual / Impacto en el Ciclo de Vida (2):** Posee cierto contenido reciclado y puede ser reciclable si se gestiona adecuadamente, aunque no es biodegradable. Su impacto ambiental es significativamente menor que los plásticos, pero superior al micelio.

- **Potencial Integrador en Diseño Arquitectónico (1):** Cumple una función técnica esencial (aislamiento), pero no suele ser un elemento que determine la forma, la estética o la narrativa del diseño arquitectónico.

5.7.1.3 Poliestireno Extruido (XPS) y Poliuretano (PUR)

- **Expresividad Material / Estética (1):** Son plásticos con acabado uniforme y a menudo brillante, diseñados para ser totalmente revestidos. No aportan valor estético ni se exponen en el diseño.
- **Adaptabilidad Formal / Geométrica (1):** Se presentan en paneles rígidos. Adaptarse a formas curvas o complejas requiere corte y moldeo en fábrica o en obra, con limitaciones significativas.
- **Compatibilidad con Sistemas Modulares y Desmontables (2):** Se utilizan en sistemas de paneles estandarizados y pueden ser desmontables. Sin embargo, su origen sintético y la dificultad de reciclaje post-uso limitan su contribución a sistemas verdaderamente circulares.
- **Circularidad Proyectual / Impacto en el Ciclo de Vida (1):** Son materiales derivados del petróleo, no biodegradables, con alto consumo energético y emisiones de CO2 en su producción (según su ACV). Su potencial de circularidad es muy bajo.
- **Potencial Integrador en Diseño Arquitectónico (1):** Son materiales puramente funcionales. Su rol en el diseño se limita a sus propiedades de aislamiento térmico, sin influir en la estética, la narrativa o la forma de un proyecto arquitectónico.

5.7.2 Discusión y Alcances del Análisis Cualitativo

El análisis comparativo cualitativo de las posibilidades de diseño arquitectónico, realizado mediante el método AHP con pesos equitativos, revela una clara ventaja diferencial del panel de micelio-lino propuesto frente a los aislantes convencionales. Los resultados consolidados de esta evaluación demuestran que el Panel Micelio-Lino alcanza una puntuación promedio de 3.0, mientras que la Lana Mineral (Roca/Vidrio) se sitúa en 1.4, y el Poliestireno Extruido (XPS) y Poliuretano (PUR) en 1.2.

Estos promedios evidencian que, mientras materiales como la lana mineral, el XPS y el PUR cumplen primariamente una función técnica y se integran de manera neutra o puramente funcional en los sistemas constructivos, el panel de micelio-lino demuestra un potencial proyectual cualitativamente superior en criterios como la expresividad material, la adaptabilidad formal, la circularidad y su capacidad integradora en el diseño. Este hallazgo subraya la relevancia de explorar biomateriales que no solo responden a las exigencias térmicas y ambientales, sino que también amplían el repertorio formal y estético de la arquitectura contemporánea, ofreciendo nuevas narrativas para una práctica constructiva más consciente y sostenible. Los resultados de esta evaluación cualitativa, en conjunto con los análisis técnicos y ambientales previos, son fundamentales para la formulación de los lineamientos proyectuales que guiarán la aplicación de este biomaterial.

5.8 Propuesta de Lineamientos Projectuales

Los siguientes lineamientos projectuales consolidan los aprendizajes cualitativos derivados del análisis de los casos de estudio internacionales con los resultados cuantitativos y ambientales obtenidos en la evaluación técnica del panel de micelio-lino propuesto. Lejos de clausurar la exploración, estas directrices buscan ofrecer una base flexible y crítica para futuras aplicaciones arquitectónicas con biomateriales emergentes, sentando las bases para una práctica de diseño más consciente y sostenible.

5.8.1 Optimización del Diseño Morfológico y Control Biológico

La inherente capacidad del micelio para adaptarse a diversas configuraciones morfológicas, tal como se evidenció en la viabilidad geométrica de MycoTree y My-co Space, abre un vasto campo para la exploración de geometrías complejas, orgánicas y ligeras. Para capitalizar este potencial, es fundamental integrar herramientas de diseño paramétrico y computacional (como Grasshopper o Rhino). Estas no solo permiten generar formas estructuralmente eficientes que operen predominantemente a compresión –mitigando la debilidad del micelio a tracción, como brillantemente demostró MycoTree–, sino que también facilitan la simulación temprana de propiedades mecánicas y ambientales. Además, la experiencia del Monolito Micelio nos enseña la criticidad de un control riguroso del proceso biológico y las condiciones ambientales (humedad, temperatura, ventilación) durante el crecimiento y post-cultivo para asegurar la estabilidad y durabilidad de la forma proyectada. Es precisamente esta capacidad de moldeo la que permite al panel de micelio-lino propuesto adaptarse a distintas soluciones constructivas. Este potencial se complementa con la viabilidad técnica demostrada del panel, que cumple con la normativa térmica para la Zona C de Valparaíso con un espesor de 56.75 mm y presenta una absorción acústica competitiva en el rango de 0.632-0.752 a 500 Hz, confirmando así su desempeño como material aislante.

5.8.2 Fabricación Controlada para Precisión y Estandarización

A pesar de su origen biológico, la producción de componentes de micelio puede y debe ser precisa y estandarizada para su integración en sistemas constructivos contemporáneos. Esto se logra mediante el uso de moldajes personalizados y de alta precisión, preferentemente fabricados con tecnología CNC o escaneo 3D, como se observó en la estrategia de MycoTree para sus componentes poliédricos o en los paneles de The Growing Pavilion. Estos moldes no solo definen la forma, sino que son clave para garantizar condiciones ambientales estables (humedad, temperatura, luz) durante el cultivo, crucial para la homogeneidad del material. Basado en la experiencia de los casos de estudio exitosos, un ciclo de producción recomendable contempla al menos cuatro semanas de incubación para una colonización óptima, seguido de un secado térmico a 60°C por 48 horas. Este paso es vital para detener la actividad fúngica y estabilizar dimensionalmente el material, garantizando las propiedades térmicas y acústicas específicas que el panel de micelio-lino propuesto ha demostrado alcanzar (por ejemplo, el cumplimiento normativo en Resistencia Térmica para la Zona C con 56.75 mm de espesor y su coeficiente de absorción acústica de 0.632-0.752 a 500 Hz).

5.8.3 Utilización Estratégica de Residuos Orgánicos Locales como Sustrato

Una de las ventajas intrínsecas y éticas del micelio como biomaterial es su capacidad para crecer sobre diversos residuos orgánicos. Se debe priorizar el uso de flujos de residuos locales y de bajo valor como el cáñamo, lino (como en el caso del panel propuesto), desechos agrícolas, aserrín o tallos de maíz (Hy-Fi). Esta elección no solo fomenta la economía circular al revalorizar subproductos que de otro modo serían desechados, sino que también reduce drásticamente la huella de carbono y el consumo energético asociados al transporte de materias primas. Además, contribuye a la reducción de la dependencia de materiales extractivos convencionales, generando un impacto ambiental significativamente menor, tal como lo valida el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) realizado en esta investigación para el panel de micelio-lino propuesto, que estima emisiones negativas de CO₂ (-13,44 kgCO₂/m²) y un consumo hídrico y energético total estimado que, aunque puede ser optimizado, se posiciona como una alternativa de menor impacto ambiental comparado con materiales sintéticos como el XPS y PUR, reafirmando su rol como una alternativa altamente sostenible.

5.8.4 Promoción de Ensamblajes Secos y Subestructuras Complementarias Reversibles

Para garantizar la reversibilidad del ciclo de vida y facilitar el desmontaje y la reutilización o compostaje del material, es crucial priorizar los sistemas de ensamblaje en seco. Métodos como los encajes reversibles (box-joint, conectores curvos), pasadores metálicos o tornillos (como se vio en MycoTree y My-co Space) deben ser priorizados, evitando el uso de adhesivos permanentes que comprometan la biodegradabilidad. Complementariamente, y reconociendo las limitaciones estructurales del micelio a tracción y flexión evidenciadas en casos como Hy-Fi y Monolito Micelio, se hace indispensable el uso de una subestructura complementaria. Esta debe ser de madera fresada digitalmente (CNC), liviana, adaptable a la forma del panel y también diseñada para el desmontaje, siguiendo el modelo eficiente y optimizado de My-co Space. Esta estrategia de sistema mixto no solo garantiza la estabilidad y seguridad estructural necesarias para el panel propuesto (que actúa como un aislante no estructural), sino que también maximiza el potencial de circularidad de todo el conjunto arquitectónico.

5.8.5 Desarrollo y Aplicación de Bio-Recubrimientos para Durabilidad Ambiental

Dada la inherente susceptibilidad del micelio a la humedad y a la degradación ambiental en exposición directa, como dramáticamente mostró el Monolito Micelio, es imprescindible el desarrollo y aplicación de recubrimientos naturales e hidrorrepelentes. Estos recubrimientos, como los empleados exitosamente en The Growing Pavilion (Impershield y Xyhlo Coating), deben aumentar significativamente la resistencia del panel frente a la intemperie sin comprometer su compostabilidad al final de su vida útil. La búsqueda de estas soluciones debe enfocarse en mantener y realzar la textura y color natural del micelio, permitiendo que la materialidad biológica se exprese plenamente mientras se asegura la funcionalidad y durabilidad del panel propuesto en aplicaciones arquitectónicas exteriores. La durabilidad del panel de micelio-lino propuesto en las diversas zonas climáticas de Chile, con su variabilidad de humedad y temperatura, dependerá críticamente de estas soluciones de protección.

5.8.6 El Micelio como Portador de una Narrativa Arquitectónica y Ecológica

Finalmente, y trascendiendo su función puramente técnica como aislante o componente, el panel de micelio se posiciona como un portador de una profunda narrativa ecológica y cultural. Su capacidad de expresión material, destacada en todos los casos de estudio (desde la estética orgánica de Hy-Fi hasta la manifestación biológica de Shell Mycelium o la simbiótica de My-co Space), reside en la visibilidad de su textura inherente, sus irregularidades sutiles y las huellas del proceso de cultivo. Esta autenticidad refuerza su valor como manifiesto material que desafía los modelos extractivos tradicionales y promueve una arquitectura más consciente de sus orígenes y destinos. Proyectualmente, el micelio no solo ofrece nuevas posibilidades formales, sino que invita a una reconexión con los ciclos naturales, transformando el acto de habitar en una experiencia más orgánica, ética y reflexiva sobre nuestro impacto ambiental. La evaluación multicriterio mediante AHP y Pareto del panel de micelio-lino propuesto valida esta narrativa, al posicionarlo en la frontera de Pareto junto a soluciones convencionales líderes, no solo por su desempeño técnico (térmico y acústico), sino crucialmente por su impacto ambiental superior (emisiones negativas), lo que lo convierte en una opción integralmente sostenible y en un símbolo de las nuevas generaciones de biomateriales para la construcción.

6. Conclusión: Hacia una Arquitectura del Futuro con Biomateriales Emergentes

La presente tesis ha investigado de forma exhaustiva el potencial del panel de micelio y lino como una solución constructiva sostenible, abordando su viabilidad desde una triple perspectiva: técnica, ambiental y proyectual. Los hallazgos obtenidos permiten extraer las siguientes conclusiones fundamentales:

6.1 Hallazgos Clave

6.1.1 Viabilidad Técnica y Superioridad Ambiental

Los análisis cuantitativos realizados confirman la viabilidad técnica y la superioridad ambiental de la solución desarrollada como alternativa aislante. Desde una perspectiva térmica, el panel propuesto, con un espesor de 56.75 mm, demuestra un comportamiento eficiente que cumple con la normativa chilena vigente para la Zona C de Valparaíso, superando los requisitos mínimos de resistencia térmica. En cuanto a su desempeño acústico, si bien la evaluación se centró en el coeficiente de absorción a 500 Hz debido a la naturaleza del material puro, este biomaterial exhibe un rango competitivo (0.632-0.752), comparable e incluso superior a diversos aislantes tradicionales. Crucialmente, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) reveló una huella ambiental significativamente menor, destacando su capacidad para generar emisiones negativas de CO₂ (aproximadamente -13,44 kgCO₂/m²) y un consumo hídrico y energético total estimado que, aunque con áreas de optimización, se posiciona favorablemente frente a los materiales sintéticos convencionales. La culminación de esta evaluación, a través del Análisis Multicriterio mediante AHP y el método de Pareto, posicionó a dicho panel en la frontera de Pareto, junto a la lana mineral de roca y la lana mineral de vidrio. Esto evidencia que, a pesar de no ser superior en cada criterio individualmente, la propuesta desarrollada ofrece un equilibrio óptimo entre desempeño termoacústico y su impacto ambiental, consolidándolo como una alternativa integralmente sostenible y no dominada por ninguna de las soluciones tradicionales en su desempeño global.

6.1.2 Potencial Arquitectónico y Proyectual Innovador

Desde una perspectiva arquitectónica y proyectual, la investigación ha revelado que el innovador material trasciende la mera función técnica, posicionándose como una solución con un valor expresivo y conceptual innovador y cualitativamente superior. El análisis detallado de seis casos de estudio internacionales (Hy-Fi, Shell Mycelium, MycoTree, Monolito Micelio, The Growing Pavilion y My-co Space) demostró la extraordinaria plasticidad y adaptabilidad formal del micelio, permitiendo la exploración de geometrías complejas, orgánicas y ligeras, así como la generación de nuevas estéticas a partir de su textura natural y el proceso de cultivo. Esta versatilidad se vio confirmada por el análisis comparativo cualitativo de las posibilidades de diseño, donde el panel investigado obtuvo consistentemente la máxima valoración en criterios clave: su expresividad material única, su adaptabilidad formal y geométrica sin parangón frente a materiales rígidos, su compatibilidad intrínseca con sistemas modulares y desmontables (facilitando la reversibilidad del ciclo de vida), su circularidad proyectual (desde el origen a la biodegradación), y su alto potencial integrador para generar una nueva narrativa arquitectónica. Este contundente contraste con los aislantes convencionales –diseñados para ser ocultos y con limitaciones formales–, valida la capacidad del biomaterial para ser un catalizador para una arquitectura que no solo es eficiente y sostenible, sino también auténtica, sensorial, y profundamente conectada con los ciclos biológicos y los principios de la bioeconomía.

En conjunto, esta investigación demuestra que la viabilidad técnica y ambiental del panel de micelio y lino es la base que valida su potencial proyectual y expresivo. Los hallazgos cuantitativos, que confirman la superioridad ambiental y el desempeño termoacústico del material, son precisamente los que permiten sustentar una nueva narrativa arquitectónica. Esta narrativa ya no se limita a explorar la estética o la forma, sino que se construye a partir de las propiedades intrínsecas del material, promoviendo una arquitectura que es tan sostenible en su desempeño como innovadora en su expresión. El material no solo ofrece una solución eficiente, sino que se posiciona como un catalizador para repensar los procesos de diseño y construcción desde una perspectiva de regeneración y circularidad.

6.2 Limitaciones del Estudio

A pesar de los prometedores hallazgos que validan el potencial del panel de micelio y lino, es fundamental reconocer las limitaciones inherentes a esta etapa de la investigación. El estudio se centró en la evaluación comparativa del material y su potencial a nivel teórico, simulado y conceptual, a partir de datos de la literatura y modelos de cálculo. En este sentido, un aspecto a destacar es que, para la caracterización del compuesto, si bien se consultaron estudios sobre compuestos de micelio, fue necesario recurrir a estimaciones basadas en datos de literatura para sus componentes individuales (micelio y lino) debido a la ausencia de información directa y verificable para la proporción específica (80% micelio - 20% lino) definida para esta solución. Esto implica que su comportamiento a largo plazo en condiciones arquitectónicas reales y su durabilidad ante la intemperie requieren validación mediante experimentación física y monitoreo continuo en un entorno de obra. Asimismo, si bien se estimó su impacto ambiental, una evaluación económica exhaustiva de su cadena de suministro y costos de producción a escala industrial no fue parte del alcance de esta tesis. Finalmente, la investigación se concentró en el material como aislante no estructural, por lo que su potencial como componente estructural primario o en aplicaciones de carga más complejas no fue explorado en profundidad.

6.3 Futuras Líneas de Investigación

Estas limitaciones abren un vasto campo para futuras líneas de investigación:

- **6.3.1 Implementación de prototipos arquitectónicos a escala real** y su monitoreo en condiciones operacionales para validar el desempeño del panel y evaluar su resistencia a la degradación ambiental a largo plazo.
- **6.3.2 Optimización de los procesos de fabricación y escalado**, explorando la automatización y la eficiencia energética para una producción masiva y estandarizada.
- **6.3.3 Análisis de viabilidad económica detallado** que contemple los costos de producción, distribución y reciclaje, esencial para su inserción en el mercado.

- **6.3.4 Desarrollo de sistemas constructivos híbridos y uniones específicas**, así como la exploración del potencial estructural del micelio.
- **6.3.5 Formulación de nuevas normativas y certificaciones** para biomateriales emergentes en la construcción.

6.4 Síntesis Final

En síntesis, esta tesis ha investigado el potencial del panel de micelio y lino como una alternativa constructiva viable, posicionándolo como un precedente para la arquitectura del futuro. El estudio sugiere que, más allá de sus competitivas propiedades termoacústicas y una huella ambiental notablemente reducida (marcada por emisiones de CO2 negativas), este biomaterial trasciende la mera funcionalidad al ofrecer atributos proyectuales que podrían ampliar las posibilidades expresivas, formales y conceptuales del diseño arquitectónico. En este sentido, su incorporación se presenta como un potencial catalizador para un cambio de paradigma, permitiendo integrar nuevas narrativas vinculadas a la circularidad, la ética ambiental y la innovación material. Este estudio subraya la urgencia y la viabilidad teórica de transicionar hacia una arquitectura biofabricada y circular, donde los materiales dejan de ser meros componentes para convertirse en portadores de una narrativa de regeneración, ética y respeto por los ciclos naturales. Al fusionar la rigurosidad científica, la innovación tecnológica y la visión del diseño, el panel de micelio y lino no es solo una propuesta, sino la vanguardia tangible de una nueva era de biomateriales que prometen redefinir nuestra relación con el entorno construido, forjando cimientos para una arquitectura verdaderamente regenerativa, consciente y simbiótica con la vida misma.

Referencias

- Alegre, C. (2017). *Análisis de ciclo de vida y comparación de diferentes materiales de construcción aplicados a una vivienda unifamiliar* [Trabajo de Fin de Grado]. Universitat Politècnica de València.
- Albir Ribera, A. (2021). *Análisis de materiales sostenibles, ciclo de vida y su aplicación en construcción* [Tesis de máster]. Universitat Politècnica de València. <https://riunet.upv.es/handle/10251/182421>
- Almpani-Lekka, S., Pfeiffer, S., Schmidts, C., & Seo, S. (2021). Design with living organisms: An architectural research on mycelium-based composites. *Fungal Biology and Biotechnology*. <https://fungalbiolbiotech.biomedcentral.com/articles/10.1186/s40694-021-00124-5>
- Alzate Restrepo, J. (2023). *Desarrollo de biomaterial a base de micelio y residuos madereros para el campo de la construcción* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/85699>
- Anand, P., Venu, H., & Sangeetha, D. (2024). Keratin biomaterial for biomedical applications: A review. *Materials Today: Proceedings*, 94, 2100–2107. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.12.356>
- Appels, F. V. W., Camere, S., Montalti, M., Karana, E., Jansen, K. M. B., Dijksterhuis, J., & Wösten, H. A. B. (2019). Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites. *Materials & Design*, 161.
- Arenas Cabello, J. (2007). *Análisis del ciclo de vida: Evaluación de impactos ambientales*. Universidad Politécnica de Madrid.

Arnaud, L., & Gourlay, E. (2012). *Bio-aggregate-based building materials: Applications to hemp concretes*. ISTE Ltd and John Wiley & Sons.

Arquine. (2014, 30 de junio). *Hy-Fi*. <https://arquine.com/hy-fi/>

Arquitectura y Empresa. (2017, 27 de diciembre). *Mycotree, una estructura sostenible a base de micelio y bambú*. <https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/mycotree-una-estructura-sostenible-a-base-de-micelio-y-bambu>

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., & Schiavoni, S. (2015). A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*, 4, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2015.05.002>

Ashby, M. F. (2012). *Materials and the environment: Eco-informed material choice* (2da ed.). Butterworth-Heinemann. (Nota: Asumo que es un libro y la 2da edición).

Bayer, E., & McIntyre, G. (2016). *Method for producing grown materials and products made thereby* (U.S. Patent No. US9485917B2). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US9485917B2/en>

Berardi, U. (2017). A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 123, 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.014>

Bitting, S., Derme, T., Lee, J., Van Mele, T., Dillenburger, B., & Block, P. (2022). Desafíos y oportunidades en la ampliación de aplicaciones arquitectónicas de materiales basados en micelio con fabricación digital. *Biomimetics*, 7(2), 44. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7020044>

- Bourmaud, A., Beaugrand, J., Shah, D. U., Placet, V., & Baley, C. (2018). Towards the design of high-performance plant fibre composites. *Progress in Materials Science*, 97, 347–408. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.05.005>
- Cabeza, L. F., Castell, A., Medrano, M., Leppers, R., & Zubillaga, O. (2010). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Company New Heroes. (2019). *Material Atlas, The Growing Pavilion*. <https://companynewheroes.com/wp-content/blogs.dir/18/files/2019/10/the-growing-pavilion-atlas.pdf>
- Conde Santiago, Í. (2021). *Biocompuestos de micelio y sus posibles aplicaciones en la arquitectura* [Tesis de pregrado]. Universidad de Valladolid. <https://uvadoc.uva.es/handle/10324/50464>
- Designboom. (2017, 25 de julio). *Shell mycelium – Degradation movement manifesto*. <https://www.designboom.com/architecture/shell-mycelium-degradation-movement-manifesto-07-25-2017/>
- Dessi-Olive, J. (2019). Monolítico micelio: Estructuras de bóveda en crecimiento. En 18.^a *Conferencia Internacional sobre Materiales No Convencionales y Tecnologías*. https://wasterush.info/wp-content/uploads/2020/02/Monolithic_Mycelium_Growing_Vault_Struct-1.pdf
- Dessi-Olive, J. (2022). Strategies for growing large-scale mycelium structures. *Biomimetics*, 7(3), 129. <https://doi.org/10.3390/biomimetics7030129>

- Dezeen. (2017, 26 de agosto). *Fungus-covered pavilion designed to decompose in critique of sustainability*. <https://www.dezeen.com/2017/08/26/shell-mycelium-fungus-pavilion-beetles-3-3-yassin-arredia-design-kerala-india/>
- Dezeen. (2017, 4 de octubre). *Mycotree is a tree-like structure made from mushrooms and bamboo*. <https://www.dezeen.com/2017/10/04/mycotree-tree-like-structure-mushrooms-bamboo-seoul-biennale/>
- Dezeen. (2019, 29 de octubre). *Pavilion grown from mycelium acts as pop-up performance space at Dutch Design Week*. <https://www.dezeen.com/2019/10/29/growing-pavilion-mycelium-dutch-design-week/>
- Dreger, K., Meyer, A., & Weiss, T. (2022). Fiberglass exposure and occupational safety in construction workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 64(3), 112–125. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000002431>
- Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., & Goudet, L. (2008). Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2116–2123.
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Artificial intelligence and the circular economy: AI as a tool to accelerate the transition*. <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/publications>
- Elsacker, E., Vandelook, 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). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213954>

- Elsacker, E., Vandeloock, S., Van Wylick, A., Ruytinx, J., De Laet, L., & Peeters, E. (2020). A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites. *Science of the Total Environment*, 725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138431>
- European Chemicals Agency. (2019). *Annex XV report: Isocyanates*. <https://echa.europa.eu/>
- Fiore, V., Scalici, T., Nicoletti, F., Vitale, G., Prestipino, M., & Valenza, A. (2015). Effect of external basalt layers on durability behaviour of flax reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 72, 62–70.
- GlobalABC. (2020). *Resumen ejecutivo del Informe sobre situación mundial de los edificios y la construcción de 2020*. Alianza Mundial para los Edificios y la Construcción (GlobalABC)/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. https://globalabc.org/sites/default/files/2021-02/Buildings-GSR-2020_ES_SPANISH.pdf
- Gómez-Ordóñez, E., Jiménez-Escrig, A., & Rupérez, P. (2020). Bioactive potential of algal polymers in sustainable materials. *Carbohydrate Polymers*, 241, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116420>
- González, I., Mayoral, E., Vázquez, M. A., & Ortiz, P. (2013). Diseño de prototipos de materiales biosintéticos para su uso como materiales de construcción. *Medio Ambiente*, 142, 14–19. https://www.researchgate.net/publication/265844881_Diseño_de_prototipos_de_materiales_biosintéticos_para_su_uso_como_materiales_de_construcción
- Hamrouni, I., Jalili, H., Ouahbi, T., Taibi, S., Jamei, M., & Mabrouk, A. (2024). Thermal properties of a raw earth-flax fibers building material. *Construction and Building Materials*, 423, 135828. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135828>

- Heidebrecht, A., Reuter, S., & Hofmann, J. (2023). Algae-based biopolymers in architecture: Potential for carbon-neutral building materials. *Building and Environment*, 228, 109876. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109876>
- Holcim Foundation. (2023). *Ecology of mushroom brick stacks up perfectly*. <https://www.holcimfoundation.org/about/news/project-updates/ecology-of-mushroom-brick-stacks-up-perfectly>
- International Labour Organization. (2018). *Safety and health in the use of chemicals at work*. <https://www.ilo.org/global/topics/safety-and-health-at-work/lang--en/index.htm>
- International Organization for Standardization. (2006). *ISO 14040: Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. <https://www.iso.org/standard/38456.html>
- International Organization for Standardization. (2007). *ISO 10456: Building materials and products — Hygrothermal properties*. <https://www.iso.org/standard/43118.html>
- Islam, M. R., Tudryn, G., Bucinell, R., Schadler, L., & Picu, R. C. (2017). Morphology and mechanics of fungal mycelium. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13295-2>
- Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions. *Energy and Buildings*, 43(10), 2549–2563. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.05.015>
- Jones, M. P., Huynh, T. T., Hu, R., John, P. B., & John, S. (2017). Mycelium Composites: A Review of Engineering Characteristics and Growth Kinetics. *Journal of Bionanoscience*, 11(4), 263–270. <https://doi.org/10.1166/jbns.2017.1440>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108397>
- Khoo, Z. X., Teo, E. Y., Yap, Y. L., Dong, Y., Liu, Y., Cai, P., Li, Z., Loh, X. J., & Chan, S. Y. (2020). Natural polymers for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 111, 110817. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110817>
- Kosh, S. (2023). A review of mycelium-based bio-composites and their possible application in architecture. *ShodhKosh: Journal of Visual and Performing Arts*, 4(2SE), 176–185. <https://doi.org/10.29121/shodhkosh.v4.i2SE.2023.676>
- Lee, K. Y., & Mooney, D. J. (2012). Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science*, 37(1), 106–126. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
- Liese, W., & Tang, T. K. H. (2015). Properties of the bamboo culm: Botanical and anatomical features. En *Tropical Forestry Handbook* (pp. 1–20). Springer.
- Meyer, V. (2022). Conectando las ciencias de los materiales con la biología fúngica: Un mar de posibilidades. *Fungal Biology and Biotechnology*, 9(5). <https://doi.org/10.1186/s40694-022-00137-8>
- Meyer, V., Schmidt, B., Freidank-Pohl, C., Schmidts, C., & Pfeiffer, S. (2022). MY-CO SPACE: An artistic-scientific vision on how to build with fungi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078, 012070. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1078/1/012070>
- Ministerio de Energía. (2022). *Edificación*. <https://energia.gob.cl/edificacion>

- MycoMaker Club. (2020). *The Growing Pavilion: La belleza y el poder de los bio-materiales*. <https://mycomaker.club/the-growing-pavilion-la-belleza-y-el-poder-de-los-bio-materiales/>
- MY-CO-X. (2021). *The world of fungi: MY-CO SPACE*. Sven Pfeiffer. <https://svenpfeiffer.de/project/the-world-of-fungi>
- Neagu, B. C., & Tofan, B. (2022). *Can mycelium shape the future of architecture?* [Conferencia]. https://figshare.leedsbeckett.ac.uk/articles/conference_contribution/Can_mycelium_shape_the_future_of_architecture_/28956809/1?file=54302927
- Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.05.006>
- Pargana, N., Freire, F., Santos, P., & Silva, A. (2014). Environmental life cycle assessment of thermal insulation materials for buildings. En *Sustainable Building Materials* (pp. 45–62). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-07605-8_3
- Pickering, K. L., Efendy, M. G. A., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- PlasticsEurope. (2020). *Plastics – The facts: An analysis of European plastics production, demand and waste data*. <https://www.plasticseurope.org/>
- Rosenfield, K. (2014, 5 de febrero). *The Living gana P.S.1 con el proyecto Compostable Brick Tower*. ArchDaily en Español. <https://www.archdaily.cl/cl/02-333620/the-living-gana-p-s-1-con-el-proyecto-compostable-brick-tower>

- Sabrina Syed. (2017, 26 de septiembre). *Este pabellón 'vive y muere' para hacer una crítica a la sostenibilidad*. ArchDaily en Español. (J. T. Franco, Trad.). <https://www.archdaily.cl/cl/880342/este-pabellon-vive-y-muere-para-hacer-una-critica-a-la-sostenibilidad>
- Shahzad, A. (2012). Hemp fiber and its composites – A review. *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973–986. <https://doi.org/10.1177/0021998311413623>
- Sharma, B., Gato, A., Bock, M., Mulligan, H., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo: State of the art. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Construction Materials*, 168(2), 57–67.
- Silva, C. D., Avaliatcha, S. C., & Santos, R. C. (2022). Avaliação de painéis de madeira reconstituída com diferentes proporções de endocarpo de macaúba. *Revista Científica de Engenharia de Biosistemas*, 16(3), 94–104. <https://doi.org/10.18011/bioeng2022v16n3p94-104>
- Souza, E. (2020, 10 de octubre). *¿Edificios de hongos? Las posibilidades del micelio en la arquitectura*. ArchDaily Colombia. <https://www.archdaily.co/co/949011/edificios-de-hongos-las-posibilidades-del-micelio-en-la-arquitectura>
- Stazi, F., Mastrucci, A., & Di Perna, C. (2013). Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: An Italian case study. *Building and Environment*, 58, 119–129. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.006>
- The Growing Pavilion. (2022). [Página oficial del proyecto]. <https://thegrowingpavilion.com/>
- Tondi, G., & Petutschnigg, A. (2015). Middle European panel products from agricultural residues. *Agricultural and Forest Meteorology*, 187, 110–116. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.002>

- Torres, M. D., Chenlo, F., Moreira, R., & Vázquez, M. (2019). Agar-based materials for sustainable packaging. *Journal of Applied Phycology*, 31(1), 473–483. <https://doi.org/10.1007/s10811-018-1519-x>
- United States Environmental Protection Agency. (2011). *Mineral wool production: National emission standards for hazardous air pollutants*. <https://www.epa.gov/>
- Valencia, N. (2014, 8 de julio). Biodiseño: YAP MoMA inaugura Hy-Fi, la torre de ladrillos orgánicos y compostables. *ArchDaily Perú*. <https://www.archdaily.pe/pe/623576/biodiseno-yap-moma-inaugura-hy-fi-la-torre-de-ladrillos-organicos-y-compostables>
- Van den Bulcke, J., De Boever, L., & De Windt, I. (2019). Cellulose-based insulation materials for sustainable building applications. *Journal of Building Engineering*, 25, 100798. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100798>
- Vanden, E. (2021). *Mycelium matters: An interdisciplinary exploration of the fabrication and properties of mycelium-based materials* [Tesis doctoral]. Vrije Universiteit Brussel.
- Vandergoot, J. (2018). *Architecture and the forest aesthetic: A new look at design and resilient urbanism*. Routledge.
- Yang, X., Hu, J., Song, W., & Zhang, J. (2021). Bio-based polyurethane foams for thermal insulation: A review. *Polymers*, 13(11), 1820. <https://doi.org/10.3390/polym13111820>
- Zhang, X., Li, H., Huang, Y., & Wang, Q. (2017). Volatile organic compounds (VOCs) emission from polyurethane foam insulation materials. *Building and Environment*, 115, 118–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.015>