



BIO-AISLANTES TÉRMICOS. ANÁLISIS ENERGÉTICO Y AMBIENTAL

**Aritz Soraluze Tellechea;
Juan Carlos Ríos Fernández**

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En el contexto del cambio climático y el impacto ambiental de la industria de la construcción, los materiales aislantes contribuyen a mejorar el rendimiento térmico de los edificios, reduciendo así la demanda energética y las emisiones de carbono durante su operación. Si bien la mayoría de ellos generan importantes emisiones de carbono durante su producción, los materiales aislantes de origen biológico pueden ofrecer un buen rendimiento con bajas emisiones de carbono. Este artículo busca realizar un análisis energético y ambiental de los materiales aislantes naturales mediante una revisión bibliográfica. Debido a la creciente importancia de las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) en los requisitos de especificación, muchos fabricantes ya divulgan datos ambientales relacionados con sus productos, lo que permite comparar soluciones de aislamiento térmico. En la investigación académica, los impactos ambientales incorporados no se exploran tanto como las propiedades físicas. Además, del análisis de los resultados, se puede concluir que la caracterización de las propiedades físicas de este tipo de material se centra normalmente en la conductividad térmica. Sin embargo, la mayoría de los estudios pasan por alto otros parámetros importantes de estos materiales, como la capacidad térmica, la vida útil y el impacto ambiental. Esto es algo que es necesario superar en futuros desarrollos para permitir una comparación exhaustiva entre las propiedades de diferentes materiales aislantes (convencionales y de origen biológico). [1]

ABSTRACT

In the context of climate change and the environmental impact of the construction industry, insulation materials contribute to improving the thermal performance of buildings, thereby reducing energy demand and carbon emissions during their operation. While most of them generate significant carbon emissions during their production, bio-based insulation materials can offer good performance with low carbon emissions. This article seeks to conduct an energy and environmental analysis of natural insulation materials through a literature review. Due to the increasing importance of Environmental Product Declarations (EPDs) in specification requirements, many manufacturers already disclose environmental data related to their products, allowing for the comparison of thermal insulation solutions. In academic research, embodied environmental impacts are not explored as much as physical properties. Furthermore, from the analysis of the results, it can be concluded that the characterization of the physical properties of this type of material typically focuses on thermal conductivity. However, most studies overlook other important parameters of these materials, such as thermal capacity, service life, and environmental impact. This is something that needs to be overcome in future developments to allow for a comprehensive comparison between the properties of different insulation materials (conventional and bio-based) [1].



INTRODUCCIÓN

Este trabajo fin de máster surge de la iniciativa de Juan Carlos Ríos Fernández, quien lidera una línea de investigación sobre bio aislantes térmicos. La propuesta se centra en la elaboración de un artículo que analiza la situación actual de los bio aislantes térmicos, evaluando su eficiencia térmica e impacto ambiental basándose en la literatura científica disponible.

Las consecuencias del cambio climático en el mundo son bien conocidas, y las publicaciones más recientes muestran una mayor urgencia por abordar la transición hacia un estilo de vida más sostenible en el planeta. Según el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) [1], limitar el calentamiento global a 1,5 °C o incluso 2 °C es prácticamente imposible sin una reducción significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las emisiones deberían reducirse en un 45 % con respecto a los niveles de 2010 antes de 2030 para limitar el aumento de la temperatura y evitar un impacto irreversible [2].

Dentro de este contexto, el sector de la edificación se perfila como un eje central para la reducción de emisiones. En Europa, por ejemplo, los edificios son responsables del 40 % de la energía utilizada, del 36 % de las emisiones de GEI relacionadas con la energía, y el 80 % del consumo energético doméstico está relacionado con el confort térmico [3]. Además, el entorno construido es responsable del 50 % de todos los materiales extraídos y del 35 % de todos los residuos producidos.

Con el avance de la tecnología y el conocimiento de los materiales y polímeros de origen biológico, se han realizado varias investigaciones y desarrollos con respecto a la implementación de materiales de origen biológico en la industria de la construcción para reducir el impacto ambiental y lograr un menor consumo de energía [4]

Los materiales de origen biológico, como la celulosa y otras fibras vegetales como la lana de oveja, se han vuelto cada vez más populares como materiales aislantes en la construcción debido a sus numerosas ventajas sobre los materiales aislantes tradicionales. Una de las principales ventajas de usar materiales de origen biológico es su sostenibilidad, ya que se fabrican a partir de

recursos renovables y tienen una menor huella de carbono que sus homólogos sintéticos. Además, los materiales de origen biológico también poseen excelentes propiedades aislantes, como la conductividad térmica, que ayuda a mejorar la eficiencia energética de los edificios y a reducir los costes de calefacción y refrigeración [5]. Por otro lado, son no tóxicos ni alergénicos, lo que los convierte en una opción más segura y saludable para los ocupantes de los edificios.

Además, presentan la capacidad de mejorar su capacidad de resistencia al fuego mediante la adición de retardantes de llama. Esto no solo ayuda a preservar la vida de los ocupantes, sino también la integridad estructural de los edificios en caso de incendio y los capacita para ser empleados en edificación. Si bien los materiales de origen biológico suelen considerarse más seguros y sostenibles que sus homólogos sintéticos, no son necesariamente intrínsecamente resistentes al fuego. Por lo tanto, la adición de retardantes de llama es un factor importante al utilizar materiales de aislamiento de origen biológico en la construcción [6].

A medida que aumenta la conciencia sobre la importancia de la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental, se prevé una mayor demanda de materiales de aislamiento de origen biológico en la industria de la construcción. Aún existen muchas incógnitas sobre el rendimiento, la durabilidad y la seguridad de estos materiales, así como sobre los posibles impactos ambientales de su producción y uso. Por lo tanto, se necesita más investigación para comprender plenamente los posibles beneficios y limitaciones de los materiales de aislamiento de origen biológico y para desarrollar materiales nuevos y mejorados que satisfagan las necesidades de la industria de la construcción, minimizando al mismo tiempo su impacto ambiental.

MÉTODO DE TRABAJO

El método de investigación se basó en una revisión a través de un enfoque bibliométrico para identificar tendencias en materiales aislantes naturales y su impacto ambiental.

La revisión bibliográfica se realizó a través de las bases de datos Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar.



Las búsquedas se realizaron utilizando como descriptores, en el archivo temático, el término "bio-based" AND "thermal insulation", "natural" AND "thermal insulation", "thermal performance of" AND "bio-insulation", "life cycle assesment of" AND "insultion materials", "straw", "sheep" AND "wool", "Wood" AND "fibers", "hemp", "mycelium", "flax", "cellulose", "thermal" AND "performance", "thermal" AND "efficiency", "thermal" AND "behaviour", "fire" AND "resistance", "biodegradability", "degradation",

Se aplicaron criterios de exclusión al idioma (solo se seleccionaron publicaciones en inglés), año de publicación (solo se consideraron las publicaciones de los últimos 8 años (2018-2025), solo artículos revisados por pares y estudios únicamente enfocados en el contexto de edificación.

En el paso de identificación, se encontraron 523 resultados considerando diferentes combinaciones de palabras clave. Para el siguiente paso, llamado etapa de cribado, se excluyeron las duplicaciones y quedaron 506 resultados. De estos, se excluyeron aquellas publicaciones sobre otros materiales ecológicos que no son para fines de aislamiento de edificios o no están relacionados con la industria de la construcción y finalmente el estudio se quedó en 143 publicaciones.

La tabla 1 representa las combinaciones de palabras clave realizadas y los resultados encontrados.

Tabla 1. Revisión bibliográfica

Combinaciones de palabras clave	Numero de publicaciones encontradas	Numero de publicaciones encontradas después de aplicar los criterios de	Número de publicaciones encontradas después del análisis del título y el resumen
"Bio-based" AND "thermal insulation"	490	138	45
"natural" AND "thermal insulation"	404	108	32
"thermal performance of" AND "bio-insulation"	339	76	41
'life cycle assesment of" AND "insultion materials'	239	45	25
{'straw" OR "hemp" OR "sheep wool" OR "wood fibers" OR "hemp" OR "mycelium" OR "flax" OR "cellulose" OR "posidonia) AND {"thermal performance" OR "thermal efficiency" OR "thermal behavior"}	1656	147	42
{'fire resistance" OR "biodegradability" OR "degradation resistance") AND {"natural" OR "Bio-based") AND {"thermal insulation"}	44	32	11
Total de publicaciones sin repetición		506	143

Para poder llevar a cabo esta investigación, se revisaron y analizaron una serie de parámetros que vienen representados en la siguiente sección:

parámetros termodinámicos, resistencia al fuego y deterioro o resistencia a la degradación biológica.

Parámetros termodinámicos: La clasificación inicial de los materiales aislantes se basa principalmente en sus propiedades termodinámicas, siendo la densidad un factor crucial que afecta significativamente a otros parámetros. Esta propiedad fundamental se expresa comúnmente en kg/m³ y representa la relación entre la masa y el volumen del material, según la ecuación (1):

$$\rho = m / V \quad (1)$$

Donde ρ simboliza la densidad, m la masa, y V el volumen de la muestra analizada.

Además, la densidad aparente proporciona información sobre la porosidad del material, indicando la cantidad de espacios vacíos y el grado de compactación. Esta característica tiene implicaciones importantes en otras propiedades del aislante.

La eficacia de un material aislante se determina principalmente por su capacidad para impedir el flujo de calor. Esta propiedad se cuantifica mediante la conductividad térmica, representada por los símbolos " κ " o " λ " y medida en W/m·K. La relación entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura se expresa mediante una ecuación derivada de la ley de Fourier (2), donde un valor menor indica un mejor aislamiento.

$$q = -\kappa \times \nabla T \quad (2)$$

Donde q es el flujo de calor en W/ m², κ es la conductividad térmica y ∇T es el gradiente de temperatura expresado en Kelvin por metro.

Para evaluar el rendimiento térmico de elementos constructivos, se emplea comúnmente la norma ISO 9869-1 [7]. Esta establece fórmulas para calcular la resistencia y la transmitancia térmica que vienen representadas en las siguientes ecuaciones (3) y (4)

$$R = (T1 - T2) / \dot{Q} \quad (3)$$

$$U = 1 / (R \times A) \quad (4)$$

Donde $T1$ y $T2$ representan la temperatura entre las dos caras del material donde existe diferencia de temperatura, \dot{Q} es la potencia térmica, U es la transmitancia térmica y A representa el área de la sección transversal a través de la cual fluye el calor. Los valores de R y de U dependen del espesor del material o la solución constructiva.



El análisis térmico de los aislantes debe considerar, además de la conductividad, su capacidad térmica y difusividad, ya que determinan el comportamiento dinámico del calor. Una mayor capacidad térmica reduce la difusividad, lo que ralentiza la propagación térmica. Estas propiedades se relacionan con la conductividad, el calor específico (c_p) y la densidad.

$$\alpha = k / (c_p \cdot \rho) \quad (5)$$

Aquí, α representa la difusividad térmica, parámetro que determina cómo el material almacena y transfiere energía térmica.

Propiedades higroscópicas:

Además de las características térmicas, se tienen una propiedad llamada absorción de agua. Esta es fundamental para garantizar la durabilidad del material y prevenir problemas en la construcción. La norma ISO 62 [8] define el coeficiente de absorción de agua, también conocido como sortividad, que mide la captación de humedad por el material. Este coeficiente se calcula de la siguiente manera: (6)

$$c = \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1} \right) \times 100\% \quad (6)$$

Donde m_2 es la masa del material después de la inmersión en agua; y m_1 es la masa del material después del secado y antes de la inmersión. Algunos estudios de investigación muestran características relacionadas con el agua. Dichos estudios suelen evaluar la absorción de agua del material tras 24 horas de inmersión, ya sea expresada como porcentaje en peso o mediante inmersión parcial, en cuyo caso se reporta como W_p y se expresa en kg/m^2 .

Otra propiedad relevante es el factor de resistencia a la difusión del vapor de agua, denominado valor μ . Este factor compara la permeabilidad al vapor de agua del aire con la del material, indicando la tasa de transmisión de vapor a través de una superficie específica del material en un espesor determinado.

Resistencia al fuego:

La resistencia al fuego es otra característica importante, evaluada según la norma EN ISO 13501-01 [9]. En Europa, esta propiedad se clasifica de A a F, determinando si el material puede contener o propagar un incendio en un edificio.

La tabla 2 muestra la clase obtenida según la resistencia al fuego del material evaluado.

Tabla 2. Clasificación según la resistencia al fuego de los materiales

Descripción	Clase
el mejor	A1
muy bueno	A2
bueno	B
medio	C
pobre	D
muy pobre	E
no clasificable	F

Esta norma también permite clasificar el material en términos de generación de humo y producción de gotas o partículas inflamadas. Además, algunos estudios expresan la tasa de liberación de calor obtenida mediante ensayos calorimétricos con cono, lo cual constituye un indicador clave de la resistencia al fuego del material.

Biodegradabilidad o resistencia a la degradación biológica:

Este último parámetro de estudio incluye la medición de varios factores como pueden ser la pérdida de masa del material después de ser expuesto a condiciones de biodegradación donde se mide el crecimiento de microorganismos sobre la muestra (bacterias, hongos, actinomicetos) mediante cultivos o microscopía.

Además, el tiempo de degradación juega un papel muy importante. Se evalúa cuánto tarda el material en descomponerse en distintas condiciones ambientales (suelo, compost, agua, etc.)

Parámetros ambientales:

Para evaluar el impacto ambiental, los indicadores más comunes son el PCG (Potencial de Calentamiento Global, es decir, kg de CO_2) y la CED (Energía Acumulada, expresada en MJ) considerando las etapas de suministro de materia prima, transporte y proceso de fabricación. Estos indicadores deben calcularse considerando una unidad funcional normalizada. Por ello, se ha definido una unidad funcional (fu) en aplicaciones térmicas de edificación, que corresponde a la cantidad de kg necesaria para proporcionar una transmitancia térmica de $0,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$:

$$fu = \frac{1}{U} \times \lambda \times \rho \times A \quad (7)$$

donde U es la transmitancia térmica igual a $0,15 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$, λ es la conductividad térmica ($\text{W/m} \cdot \text{K}$),



ρ es la densidad (kg/m^3) y A es el área igual a 1 m^2 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez definidas las propiedades de estudio se procede a presentar los diferentes materiales analizados en la literatura. Se expone su comportamiento en función de los criterios establecidos, permitiendo así una comparación entre ellos y una discusión sobre sus ventajas y limitaciones en el contexto de la eficiencia térmica y la sostenibilidad

3.1 Paja

Entre las fibras naturales, uno de los materiales más investigados es el uso de fardos de paja como materiales de construcción [10], [11] a su baja conductividad térmica y alta capacidad calorífica específica, y, por lo tanto, baja difusividad térmica y buena capacidad de aislamiento térmico, especialmente con fibras orientadas aleatoriamente y perpendiculares al flujo de calor.

La conductividad térmica de un panel de aislamiento de paja de trigo de 4 cm de longitud es de $0,046 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, con una densidad de entre 105 y 112 kg/m^3 [12]. Este valor indica su capacidad para resistir la transferencia de calor. Además, la orientación de las fibras puede influir en su rendimiento, mejorando la resistencia térmica y reduciendo el espesor del aislamiento hasta en un 28% si se orientan las fibras perpendicularmente al flujo de calor [13].

Las pacas de paja de trigo presentan un contenido de humedad inicial de entre 11 y 16%, con una absorción de agua del 65 al 75% [14]. Estos valores resaltan la importancia de gestionar la humedad en aplicaciones de paja de trigo, especialmente en climas húmedos.

Debido a la inflamabilidad de la paja suelta, la seguridad contra incendios es una preocupación común en la construcción con fardos de paja. Sin embargo, en comparación con la paja suelta, los fardos de paja compactada presentan una mayor resistencia al aumento de temperatura y a la propagación de las llamas, ya que el proceso de compresión reduce significativamente la presencia de oxígeno y, por tanto, del agente comburente [15]. A pesar de esta mejora, una paca de paja comercial ha sido clasificada en la clase E, lo que

indica que sigue siendo un material combustible, capaz de resistir la ignición solo durante un corto período de tiempo.

Se realizaron pruebas con un producto comprimido como una paca de paja con una densidad de 108 kg/m^3 cubierta con una capa de arcilla de 5 mm solo se carbonizó hasta una profundidad de 55 mm y no propagó las llamas, gracias a su alta densidad [16].

Otro investigador como Wall et al. [17] realizó una prueba de resistencia al fuego en un muro de pacas de paja enlucido con cal, siguiendo la norma EN 1364-1. Se observó que el enlucido de cal se desprendía de la paca de paja después de aproximadamente 90 minutos y que la paca expuesta se carbonizaba negra después de otros 45 minutos. Este comportamiento demuestra que la paja, en ciertas condiciones y con un buen revestimiento puede ofrecer una resistencia al fuego adecuadamente viable.

En otro estudio se empleó una paca de trigo de agricultura convencional, dicho material presentaba una resistencia térmica de $2,5 \text{ m}^2\cdot\text{K/W}$, una capacidad calorífica de $1558 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ y una difusión de vapor de agua de 2μ . Se evaluó el uso total de energía primaria y fue de $1,86 \times 10^2 \text{ MJ}$ presentando un contenido de carbono biogénico de $4,78 \text{ kg C}$ [17].

Por último, se estudia la propiedad de resistencia a la biodegradación. El rango óptimo de temperatura para el crecimiento de moho es de 20 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$, y muchos microorganismos están restringidos a temperaturas inferiores a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ [18]. Según los estudios de [19] y [20], no se observó crecimiento de moho en muestras de paja de trigo cuando se sometieron a condiciones climáticas inferiores al 80% de HR a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ y al 70% de HR a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ durante un período de 100 días. Varios estudios informaron que el contenido de humedad dentro de los fardos de paja que excede los valores umbral que van del 14% al 27% puede causar la degradación de la paja [21] [22]. Generalmente, se recomienda que el contenido de humedad inicial de las pacas de paja durante la construcción no supere el 14-15% y el contenido de humedad durante la operación no supere el 25%. Un investigador [14] observó que, cuando la temperatura ambiente era inferior a $10 \text{ }^\circ\text{C}$, no se producía degradación de la paja a pesar de que el contenido de humedad en



las pacas de paja superaba el 25 % durante un período prolongado.

3.2 Lana de oveja

La lana de oveja se perfila como un bioaislante térmico prometedor en la construcción sostenible. Tradicionalmente usada en la industria textil, es un material natural, renovable y biodegradable, con buenas propiedades térmicas y acústicas. Su aplicación mejora la eficiencia energética y favorece la valorización de residuos ganaderos, apoyando una economía circular.

La conductividad térmica de la lana de oveja suele rondar en condiciones normales entre 0,038 y 0,054 W/m·K, pero su valor aumenta con el aumento del contenido de agua en el material o con el aumento de la densidad aparente [23]. Además, presenta un valor del calor específico de entre 1,9 y 2 kJ/kg·K [24] mientras que para obtener una transmitancia térmica de 0,15 W/m²·K los espesores que se necesitan son de entre 0,22 y 0,3m bastante similares al resto de materiales que se estudiaron [25].

En cuanto a la absorción de agua, que depende de la naturaleza y la composición química del material, se sabe que la fibra de lana contiene algunos químicos, como las amidas, que atraen el agua, alcanzando un valor de absorción de hasta el 35% [26].

Para analizar el factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ), se ha revisado la literatura disponible, obteniendo los siguientes resultados: Un investigador [27] estudió un material aislante térmico a base de lana de oveja en relación con su comportamiento frente al vapor de agua, registrando valores de factor μ entre 2,6 y 9,7. Por su parte, Tünde Orsolya evaluó dos compuestos de lana de oveja cuyos aglutinantes fueron resina acrílica-poliuretánica y látex de caucho natural obteniendo valores de μ de 1,6 y 2,9 respectivamente. Tuzcu midió valores de μ entre 1,20 y 2,12 para la lana de oveja. Finalmente, Bosia desarrolló un panel de lana reciclada con un factor μ de 5-6.

En la figura 1 se representa el análisis comparativo del factor μ en la literatura existente [27], [28], [29] y [30].

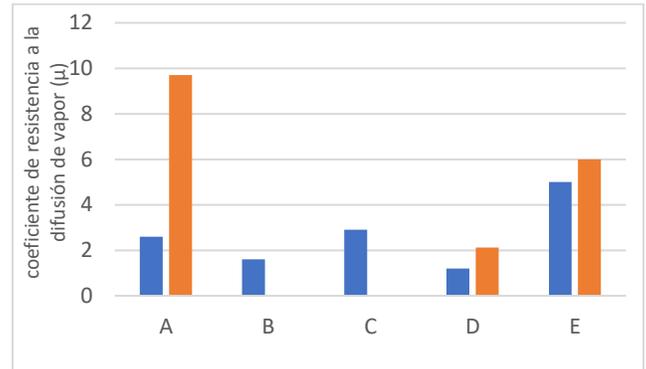


Figura 1. Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua de las muestras: Valores nominales, máximos y mínimos. A: Panel fibra sintética de lana, Hegyi. B: Compuesto lana-resina, Tünde. C: Compuesto lana-látex, Tünde. D: Panel lana, Tuzcu. E: Panel lana reciclada, Bosia

Haciendo referencia a la resistencia al fuego, las fibras de lana obtienen una clase E dentro de la clasificación lo que significa que generalmente son inflamables [26], aunque véase como ventaja la fibra de lana no arde, se carboniza y no contribuyen a la propagación de las llamas principalmente debido a su alto contenido de nitrógeno, alto contenido de humedad y alta temperatura de ignición (560 °C) [30].

La principal desventaja que presenta este tipo de material es la baja resistencia a la degradación biológica ya que se forman microorganismos que deterioran el material. Estudios [30] revelaron que independientemente del tipo de aglomerante (látex o resina) se observaron rastros de microorganismos en las muestras expuestas a un ambiente con alta humedad relativa (95%). Se evaluaron las muestras según la norma EN ISO 846 [31] y se obtuvo un resultado de categoría 2 en una escala del 0 al 5 de intensidad de crecimiento de microorganismos. Esta puntuación indica que los materiales no son resistentes al ataque de microorganismos, ya que contienen nutrientes que favorecen su crecimiento, lo que provoca que hasta el 25 % de la superficie se vea afectada por moho. No obstante, la durabilidad de este material se estima entre 60 y 100 años [24].

Para paliar esta problemática la lana de oveja se puede combinar con tratamientos como el del formaldehído para aumentar la resistencia al ataque de microorganismos, insectos y sus larvas. Con una concentración de 0,5% de formaldehído es suficiente para proporcionar una capacidad de



3.4 Cáñamo

Derivado de la planta *Cannabis sativa*, este material biodegradable se utiliza principalmente en forma de paneles o mezclado con cal para formar biocomposites. Su cultivo requiere pocos insumos, mejora la salud del suelo y contribuye a la captura de carbono, lo que refuerza su valor como alternativa ecológica frente a los aislantes convencionales.

Los productos de cáñamo presentan valores de conductividad térmica que varían entre 0,0544 y 0,0655 W/m·K para densidades comprendidas entre 200 y 300 kg/m³ [42] mientras que el valor del calor específico suele rondar entre 1600 y 1700 kJ/kg·K [24]. Al igual que otros materiales se demostró un aumento en el valor del coeficiente de conductividad térmica (0,049–0,052 W/m·K) con un aumento en la densidad aparente de 109–124 kg/m³ [43]. Véase en la figura 4

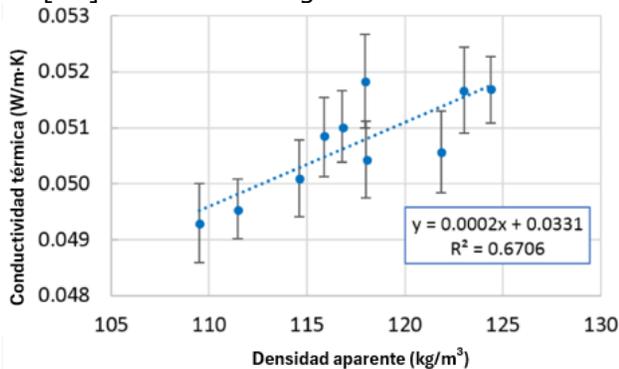


Figura 4. Relación conductividad-densidad en el cáñamo

Sin embargo, debido a la alta porosidad, este material tiene la desventaja de una alta capacidad de absorción de agua, ya que valores superiores al 20% pueden duplicar la conductividad térmica. Por lo general suele presentar una tasa de absorción de humedad del 20% [42]. Asimismo, al igual que la madera, el cáñamo tiene una alta difusión de la humedad lo que permite evitar el uso de barreras de vapor de agua.

Debido a su rápido crecimiento, la biomasa acumulada por los cultivos de cáñamo tiene un efecto significativo en la absorción de CO₂ atmosférico. Se data que una tonelada de cáñamo seco puede almacenar 325 kg de CO₂ teniendo en cuenta la cantidad de emisiones durante el cultivo como el consumo de diésel, el transporte de las semillas, etc [44]. Basándose en la bibliografía, se puede concluir que una placa de

aislamiento térmico de cáñamo tiene una energía incorporada de tan solo 30-35 MJ/kg aunque este valor no se encuentra ajustado a la unidad funcional establecida en el estudio [42]. Por otra parte, para densidades de entre 23 y 68 kg/m³ obtiene unos valores de 6 y 29 kg CO₂ eq/fu respectivamente [25].

Haciendo referencia a la resistencia al fuego, en un análisis experimental, se sometieron bloques de cáñamo a tratamiento térmico en horno y los resultados fueron que los bloques de cáñamo no presentaron ignición con llama, solo combustión sin llama. La capacidad estructural se mantuvo hasta 200 °C, pero a 300 °C la resistencia fue prácticamente nula [45].

En relación con la degradación biológica, un estudio simuló las condiciones de un ático para evaluar el crecimiento de hongos en aislamiento de fibra de cáñamo durante 18 meses, concluyendo que el riesgo de proliferación es bajo [46]. No obstante, la aplicación de recubrimientos como NaOH, silano o epoxi puede prevenir la degradación biológica al reducir la absorción de humedad [47],[48].

3.5 Micelio

El aislamiento de micelio representa un biomaterial innovador obtenido mediante el cultivo de hifas fúngicas en sustratos orgánicos, especialmente residuos agrícolas y forestales. Se ha convertido en una solución prometedora con un alto rendimiento energético [24].

La densidad de los materiales derivados del micelio se sitúa entre 20 y 200 kg/m³, y sus propiedades, estrechamente ligadas a la porosidad y la microestructura, influyen directamente en su conductividad térmica, la cual varía entre 0,03 y 0,07 W/m·K [49]. Asimismo, el calor específico de estos materiales suele rondar entre 7,4 y 10,2 kJ/kg·K y la tasa de absorción de agua entre 17,2 y 37,6% [50],[51].

Considerando su resistencia frente al fuego una investigación evaluó cultivos de micelio desarrollados sobre granos de trigo y cáscara de arroz, obteniendo tiempos de ignición de 12 y 7s, respectivamente, valores comparables al poliestireno extruido (XPS), con 9s, pero inferiores a los de los tableros de partículas, que alcanzaron los 26s. La descomposición del micelio se inició a los 250 °C. Además, los compuestos de micelio con



grano de trigo liberaron menos calor (107 kW/m^2) en comparación con XPS (114 kW/m^2) y los tableros de partículas (134 kW/m^2). Por otro lado, la tasa máxima de liberación de calor fue más baja en los compuestos basados en cáscara de arroz (133 kW/m^2), frente a los de trigo (185 kW/m^2), XPS (200 kW/m^2) y tableros de partículas (503 kW/m^2) [52].

Por otro lado, una de las principales desventajas del micelio es su baja resistencia al agua, que lo hace vulnerable a la humedad y al moho con el tiempo. Según el artista Philip Ross, ladrillos de micelio sin recubrimiento resistieron varios inviernos costeros sin tocar el suelo, manteniéndose funcionales tras secarse. Sin embargo, en contacto directo con el suelo, pueden degradarse en unas seis semanas, mientras que en condiciones estables su vida útil puede alcanzar los 20 años [53].

En cuanto al impacto ambiental, el aislamiento de micelio genera una vía fundamental para el secuestro de carbono, donde el carbono atmosférico se asimila y almacena dentro de su biomasa, obteniendo valores de emisiones de 44 y 109 $\text{kg CO}_2\text{eq/fu}$ para densidades de entre 50 y 260 kg/m^3 respectivamente [25].

3.6 Lino

Las fibras de lino se producen a partir de *Linum usitatissimum*, una planta que contiene un 70% de celulosa y sus fibras tienen una gran capacidad para retener aire, lo que resulta en buenas propiedades de aislamiento [54].

La densidad de los paneles y rollos de lino comerciales está entre 20 y 30 kg/m^3 , la conductividad térmica entre 0,038–0,042 $\text{W/m}\cdot\text{K}$ y la capacidad calorífica entre 1,4–1,6 $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$. Las fibras de lino se suelen mezclar con poliéster para mejorar la resistencia mecánica y con aditivos como sales de boro para mejorar la resistencia al fuego y a las polillas [55].

Este material presenta una absorción de humedad de 12,3% y el factor de resistencia a la difusión de vapor de agua μ , se sitúa entre 1 y 2.

En un experimento de biodegradabilidad [56], una muestra de lino puro se sumergió bajo tierra en unas condiciones establecidas y se experimentó una rápida pérdida de masa del 90% después de 120 días sumergido, esto se debe al ataque de

microorganismos y macroorganismos en presencia de alta humedad.

En cuanto a la resistencia al fuego obtiene una calificación de clase C, por lo que tiene un comportamiento medio.

El PCG, es de entre 14 y 45 $\text{kg CO}_2\text{eq/fu}$ para densidades de entre 20 y 80 kg/m^3 respectivamente y presenta un CED de 39,5 MJ/kg [25].

3.7 Celulosa

La celulosa es un polisacárido lineal que se encuentra principalmente como componente estructural de las paredes celulares en plantas y algas, aunque también puede ser secretada por algunas bacterias en forma de biopelículas, y se utiliza como bioaislante tanto en forma de relleno suelto como en tableros de fibra [57].

La conductividad térmica de la fibra de celulosa es baja, con un valor de alrededor de 0,039 $\text{W/m}\cdot\text{K}$, presenta una difusividad térmica de $0,046 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ y un calor específico de entre 1,3 y 2 $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ [58].

La tasa de absorción de agua es de 60% para densidades comprendidas entre 30 y 80 kg/m^3 [55].

La celulosa por sí misma es un biopolímero altamente inflamable con un índice de oxígeno limitante (LOI) cercano a 18 [59]. Además, la gran superficie de los aerogeles de celulosa facilita el proceso de ignición. El LOI mide la concentración limitante de oxígeno en una mezcla de oxígeno y nitrógeno necesaria para mantener la combustión una vez que un material se enciende. Por lo tanto, un material con un valor de LOI superior a 21 no debería arder en el aire (a temperatura ambiente) a menos que exista una transferencia constante de calor desde una fuente. La estrategia general explorada para superar este problema es desarrollar aerogeles de celulosa con agentes ignífugos, principalmente nanopartículas inorgánicas.

La energía incorporada de la fibra de celulosa se encuentra entre las más bajas en comparación con otros materiales aislantes naturales y sintéticos. La fibra de celulosa tiene una energía incorporada menor (0,94–3,3 MJ/kg) en comparación con materiales aislantes convencionales como la lana mineral o la lana de roca (16,6–16,8 MJ/kg) y materiales no convencionales [58]. Además,



presenta los valores más bajos de PCG, concretamente se sitúa entre 4,3 y 11 kg CO₂ eq/fu para densidades de entre 30 y 80 kg/m³ respectivamente [25].

En lo que respecta a la resistencia frente a microorganismos como los hongos, una investigación llevó a cabo un banco de ensayos para evaluar el crecimiento de moho en distintos materiales aislantes a base de celulosa. Los resultados mostraron que todos los materiales se ubicaron entre la clase 2 y la clase 5 de crecimiento fúngico. Esto indica que los materiales contienen nutrientes que favorecen el desarrollo de moho. Por lo tanto, se concluye que en todos los casos analizados es necesario aplicar un tratamiento antifúngico [60].

La durabilidad de este tipo de aislante térmico se estima entre 20 y 30 años [24].

3.8 Posidonia Oceánica

Es una planta marina propia del mar Mediterráneo que crece en fondos arenosos. Cuando sus hojas mueren, liberan fibras vegetales que, al ser arrastradas por el oleaje, se compactan de manera natural dando lugar a las conocidas bolas de Neptuno [61].

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica para recopilar las propiedades físicas del material, las cuales se presentan en la tabla 4 [62].

Tabla 4. Características físicas de las fibras de Posidonia Oceánica

Propiedades	Valores
Densidad (kg/m ³)	17-155
Conductividad térmica λ (W/m·K)	0,043-0,07
Difusividad térmica α ×10 ⁻⁶ m ² /s	1,02-0,32
Capacidad calorífica específica cp (J/kg·K)	2500

El contenido de humedad que presenta este material es del 10% similar al de otras fibras naturales, como el algodón o el cáñamo. Un estudio reveló que la absorción de agua a corto plazo del material por inmersión parcial (Wp) fue de 4 kg/m² y un factor de resistencia a la difusión del vapor de agua de 15,9 [63].

En ese mismo estudio se evaluó la propiedad de resistencia a la biodegradación y se afirmó que en muestras sin tratamiento fungicida se podía observar la aparición de moho en sus superficies. Sin embargo, si se le aplica microcápsulas de timol

como fungicida la aparición de moho se anula completamente.

En otra sección se realizaron ensayos calorimétricos de cono para muestras de Posidonia, cáscara de arroz y Poliestireno. Para la Posidonia la pérdida de masa fue de aproximadamente el 40% de la masa inicial. A continuación, en la figura 4 se muestran los resultados obtenidos donde se pueden ver reflejados los 3 parámetros HRR, MAHRE y TSP que representan el calor liberado por los materiales cuando absorben o liberan humedad del entorno.

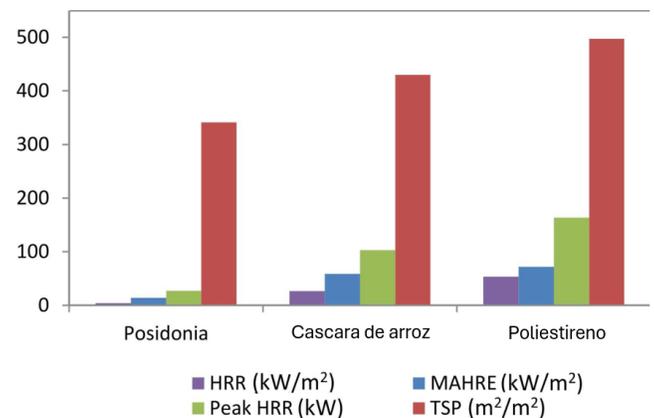


Figura 5. Parámetros evaluados en el estudio de resistencia al fuego de muestras de posidonia, cáscara de arroz y poliestireno. HRR: tasa de liberación de calor instantánea. MAHRE: Valor medio máximo de liberación de calor por unidad de área durante el ensayo. Peak HRR: Valor máximo absoluto de HRR durante todo el ensayo. TSP: Liberación de humo

Estos resultados revelaron una mayor resistencia a la inflamabilidad para la muestra de Posidonia junto con una menor liberación de humo debido a su comportamiento carbonizante, que inhibe la propagación al ser expuesto al fuego.

Finalmente, se evaluó el impacto ambiental, estimándose para la muestra de Posidonia un PCG entre 3,33 y 20 kg CO₂ eq/fu, y una Energía Acumulada (CED) en el rango de 15 a 55 MJ/fu [63].

Una vez analizado el comportamiento y las características de los materiales estudiados, se presentan dos tablas en la que se recopilan las propiedades seleccionadas para el estudio, las cuales permiten comparar y evaluar el rendimiento de los distintos materiales.



Tabla 5. Características físicas de los materiales revisados.

Materiales	Densidad, ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica, K (W/m·K)	Capacidad calorífica específica, Cp (KJ/kg·K)	Difusividad térmica $\alpha \times 10^{-6}$ m ² /s	Absorción de agua después de 24 horas(%) / Por inmersión parcial, Wp (kg/m ²)
Micelio	20 – 200	0,03 – 0,07	7,4 – 10,2	—	17,2 – 37,6%
Lino	20 – 30	0,038 – 0,042	1,4 – 1,6	—	12,30%
Lana de oveja	30	0,038 – 0,054	1,9 – 2	—	35%
Celulosa	30 – 80	0,039	1,3 – 2	0,046	60%
Fibra de madera	50 – 180	0,038 – 0,055	—	0,308 – 0,515	Wp= 0,063 – 0,093 kg/m ²
Cáñamo	200 – 300	0,0544 – 0,0655	1,6 – 1,7	—	20%
Paja de trigo	105 – 112	0,046	1,558	—	65 – 75%
Posidonia Oceánica	17 – 155	0,043 – 0,07	2,5	1,02-0,32	Wp= 4 kg/m ²

Tabla 6. Características físicas de los materiales revisados.

Materiales	Resistencia a la difusión de agua (valor μ)	Resistencia al fuego	Biodegradabilidad	PCG mín - máx (kg CO ₂ eq/fu)	Energía acumulada (MJ/fu)
Micelio	—	Liberación de calor: 107 KW/m ² ; Tiempo de ignición: 7 – 12 s	Durabilidad: 20 años	44 – 109	—
Lino	1 – 2	Clase C	Perdida de masa: 90% en 120 días	14 – 45	39,5MJ/kg exento de la uf.
Lana de oveja	1,2 – 9,7	Clase E; Temperatura de ignición: 560°C	Clase 2; Durabilidad: 60 – 100 años	6,8 – 20	171,2
Celulosa	—	LOI=18	Clase: 2 – 5; Durabilidad: 20 – 30 años	4,3 – 11	0,94-3,3 MJ/kg exento de la uf.
Fibra de madera	Alta	Clase E	No se ha documentado riesgo de moho	21,7 – 84,2	—
Cáñamo	—	Solo combustión sin llama; capacidad estructural hasta 200C°	Riesgo reducido de proliferación de hongos	6 – 29	30-35 MJ/kg exento de la uf.
Paja de trigo	2	Clase E	No se ha documentado riesgo de moho	—	186
Posidonia Oceánica	15,9	Liberación de calor 13,9 KW/m ² ; Liberación de humo: 341m ² /m ²	Aparición de moho detectable	3,33 – 20	15-55

Por último, se muestran en la figura 6 los valores de PCG correspondientes a los materiales analizados

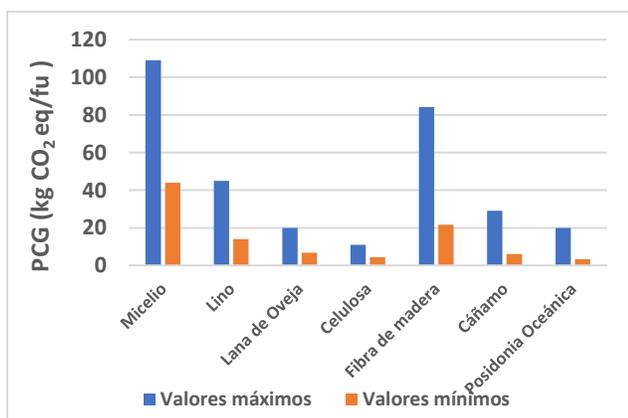


Figura 6. Valores de PCG medidos para los materiales analizados

Los resultados comparativos muestran que los materiales aislantes de origen biológico presentan un comportamiento térmico y ambiental diverso, condicionado por su composición, densidad y estructura interna. En términos de conductividad térmica, la mayoría de los bioaislantes analizados ofrecen valores competitivos respecto a los materiales convencionales, situándose entre 0,03 y 0,07 W/m·K. El micelio destaca por alcanzar el valor mínimo del rango, mientras que el cáñamo presenta los valores más elevados, lo que implica la necesidad de mayores espesores para lograr el mismo aislamiento térmico.

La capacidad calorífica específica muestra también una variabilidad considerable, siendo el micelio y la posidonia oceánica los que presentan los valores más altos, lo que implica una mayor inercia térmica. Por el contrario, materiales como la celulosa y el lino muestran valores más bajos, lo que los hace más sensibles a las variaciones térmicas. En cuanto a la difusividad térmica, los pocos datos disponibles indican un comportamiento favorable en materiales como la celulosa y la fibra de madera, que ralentizan la transmisión del calor.

El comportamiento frente a la humedad es uno de los factores que más condiciona la durabilidad de estos materiales. El cáñamo, la paja de trigo y el micelio presentan tasas de absorción de agua elevadas, lo que podría comprometer su estabilidad sin una protección adecuada. En cambio, el lino y la fibra de madera muestran un mejor comportamiento frente a la absorción, lo que los hace más adecuados en entornos húmedos. En relación con la resistencia a la difusión del vapor de agua, la mayoría de los materiales muestran buena transpirabilidad, salvo la posidonia oceánica, cuyo valor μ es considerablemente más alto, indicando menor permeabilidad.

Respecto a la resistencia al fuego, se observan diferencias relevantes. Aunque la mayoría de los materiales se clasifican como clase E, algunos, como el lino (clase C) y el cáñamo (sin ignición con llama), muestran un comportamiento más seguro. La lana de oveja, por su parte, destaca por su elevada temperatura de ignición (560 °C), mientras que el micelio presenta una baja tasa de liberación de calor, lo que indica un buen potencial con tratamientos adecuados.

En cuanto a la degradabilidad biológica, la mayoría de los materiales requieren condiciones de



uso controladas para evitar el crecimiento de microorganismos. El lino muestra una rápida pérdida de masa en condiciones de alta humedad, mientras que otros como la paja, la fibra de madera o el cáñamo han demostrado mayor estabilidad sin necesidad de tratamientos químicos agresivos.

Desde el punto de vista ambiental, los materiales con menor impacto en términos de emisiones de CO₂ son la celulosa, la posidonia y la lana de oveja. La celulosa destaca también por tener la menor energía acumulada, seguida de la posidonia, lo que refuerza su carácter sostenible. En el otro extremo, materiales como la fibra de madera o la paja de trigo presentan valores más altos tanto en PCG como en CED, lo que debe ser considerado en su evaluación global.

En conjunto, el análisis muestra que no existe un único material óptimo, sino que la idoneidad de cada bioaislante depende del contexto de aplicación, el clima, las exigencias constructivas y los criterios de sostenibilidad priorizados.

CONCLUSIONES

Esta revisión evidenció el amplio potencial de los materiales aislantes de origen biológico, pese a que la mayoría de las publicaciones aún se centran en materiales convencionales o sintéticos. Es fundamental caracterizar adecuadamente estos materiales en su forma más natural, ya que algunos, como la lana de oveja, han demostrado un alto rendimiento térmico sin necesidad de procesamiento intensivo.

Además, se observó una falta de estudios que evalúen el impacto ambiental de estos materiales. La escasez de declaraciones ambientales de producto (DAP) limita su comparación con aislantes convencionales como XPS o EPS. También se identificó una carencia en la caracterización térmica (difusividad), aspecto clave para una correcta rehabilitación de edificios, especialmente los vernáculos.

La normativa europea actual impulsa el uso de materiales con baja huella ambiental, lo que refuerza la necesidad de investigar fibras naturales y procesos más sostenibles. Para ello, se recomienda:

- Analizar la capacidad térmica para entender el comportamiento a largo plazo.

- Usar aglutinantes naturales y optimizar procesos de fabricación.
- Realizar análisis de ciclo de vida completos (de cuna a cuna).

En conclusión, los bioaislantes presentan un alto potencial para mejorar la eficiencia energética y sostenibilidad en la construcción. Se sugiere que futuras investigaciones consideren parámetros como la disponibilidad local, la viabilidad económica y sus aplicaciones en distintos tipos de edificios.

NOMENCLATURA

Tabla 7. Nomenclatura empleada

Símbolo	Descripción
Wp	Absorción de agua por inmersión parcial (kg/m ²)
TGA	Analizador termogravimétrico
cp	Calor específico a presión constante (J/kg·K)
c	Coefficiente de absorción de agua ; Sortividad (%)
MBC	Compuesto a base de micelio
k ; λ	Conductividad térmica (W/m·K)
DAP	Declaraciones Ambientales de Producto
ρ	Densidad (kg/m ³)
α	Difusividad térmica (m ² /s)
β	Efusividad térmica —
GEI	Emisiones de gases de efecto invernadero
CED	Energía acumulada (MJ/fu)
μ	Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua —
q	Flujo de calor (W/m ²)
Δt	Gradiente de temperatura (K)
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LOI	Índice de de oxígeno limitante —
m	Masa (kg)
m ₁	Masa del material después del secado (kg)
m ₂	Masa del material después de la inmersión en agua (kg)
mtf	Masa de la muestra 24 h después del inicio de la prueba (kg)
EPS	Poliestireno expandido
XPS	Poliestireno extruido
PCG	Potencial de calentamiento global (kg CO ₂ eq/fu)
R	Resistencia térmica (m ² ·K/W)
Te	Temperatura del aire exterior (K)
Ti	Temperatura del aire interior (K)
Tse	Temperatura de la superficie externa (K)
Tsi	Temperatura de la superficie interna (K)
U	Transmitancia térmica (W/m ² ·K)
fu	Unidad funcional —
V	Volumen (m ³)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco el apoyo recibido por parte de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI), así como la orientación y revisión del trabajo por



parte de Juan Carlos Ríos Fernández. Este trabajo no habría sido posible sin su valiosa colaboración.

REFERENCIAS

- [1] Shukla, P. R., Skea, J., Slade, R., Fradera, R., Pathak, M., Al, A., Malek, K., Van Diemen, R., Hasija, A., Lisboa, G., Luz, S., Malley, J., & McCollum, D. (Eds.). (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*.
- [3] ML European Commission. (2021). European green deal: Commission proposes to boost renovation and decarbonisation of buildings.
- [4] Pittau, F., Lumia, G., Heeren, N., Iannaccone, G., & Habert, G. (2019). Retrofit as a carbon sink: The carbon storage potentials of the EU housing stock. *Journal of Cleaner Production*, 214, 365-376.
- [5] Platt, S., Maskell, D., Walker, P., & Laborel-Préneron, A. (2020). Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Construction and Building Materials*, 262, 120035.
- [6] Palumbo, M., Lacasta, A. M., Navarro, A., Giraldo, M. P., & Lesar, B. (2017). Improvement of fire reaction and mould growth resistance of a new bio-based thermal insulation material. *Construction and Building Materials*, 139, 531-539.
- [7] UNE-ISO 9869-1:2023 *Aislamiento térmico. Elementos de construc...* (n.d.).
- [8] UNE-EN ISO 62:2008 *Plásticos. Determinación de la absorción de...* (n.d.).
- [9] UNE-EN 13501-1:2019 *Clasificación en función del comportamient...* (n.d.).
- [10] Koh, C. H. A., & Kraniotis, D. (2020). A review of material properties and performance of straw bale as building material. *Construction and Building Materials*, 259, 120385.
- [11] Abu-Jdayil, B., Mourad, A. H., Hittini, W., Hassan, M., & Hameedi, S. (2019). Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials: An overview. *Construction and Building Materials*, 214, 709-735.
- [12] Rojas, C., Cea, M., Iriarte, A., Valdés, G., Navia, R., & Cárdenas-R, J. P. (2019). Thermal insulation materials based on agricultural residual wheat straw and corn husk biomass, for application in sustainable buildings. *Sustainable Materials and Technologies*, 20, e00102.
- [13] Platt, S., Maskell, D., Walker, P., & Laborel-Préneron, A. (2020). Manufacture and characterisation of prototype straw bale insulation products. *Construction and Building Materials*, 262, 120035.
- [14] Robinson, J., Aoun, H. K., & Davison, M. (2017). Determining moisture levels in straw bale construction. *Procedia engineering*, 171, 1526-1534.
- [15] King, B., & Aschheim, M. (2006). Design of straw bale buildings: the state of the art. (*No Title*).
- [16] Janowska-Renkas, E., Król, A., Pochwała, S., Pałubski, D., Adamska, M., & Klementowski, I. (2022). The fire resistance and heat conductivity of natural construction material based on straw and numerical simulation of building energy demand. *Energies*, 15(3), 1155.
- [17] Cosentino, L., Fernandes, J., & Mateus, R. (2023). A review of natural bio-based insulation materials. *Energies*, 16(12), 4676.
- [18] Lawrence, M., Heath, A., & Walker, P. (2009). Determining moisture levels in straw bale construction. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2763-2768.
- [19] Hofbauer, W., Breuer, K., Krueger, N., & Sedlbauer, K. (2005). Toxic mould versus façade-jungle-a comparison of undesirable biological growth on indoor surfaces and outer building coatings. In *International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2005*.
- [20] Hofbauer, W., Krueger, N., Breuer, K., Sedlbauer, K., & Schoch, T. (2008). Mould resistance assessment of building materials-material specific isopleth-systems for practical application. In *International Conference on Indoor Air Quality and Climate 2008*.
- [21] Summers, M. D., Blunk, S. L., & Jenkins, B. M. (2003). How straw decomposes: Implications for straw bale construction. *Ecological Building Network*.



- [22] Steen, A. S., Steen, B., & Bainbridge, D. (1994). *The straw bale house*. Chelsea Green Publishing.
- [23] Schiavoni, S., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988-1011.
- [24] Al-Qahtani, S., Koç, M., & Isaifan, R. J. (2023). Mycelium-based thermal insulation for domestic cooling footprint reduction: A review. *Sustainability*, 15(17), 13217.
- [25] Cascione, V., Roberts, M., Allen, S., Charbel, C., Maskell, D., Dams, B., ... & Emmitt, S. (2025). Evaluating environmental impacts of bio-based insulation materials through scenario-based and dynamic life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-20.
- [26] Dénes, O., Florea, I., & Manea, D. L. (2019). Utilization of sheep wool as a building material. *Procedia Manufacturing*, 32, 236-241.
- [27] Hegyi, A., Dico, C., & Szilagyi, H. (2020). Sheep wool thermal insulating mattresses behaviour in the water vapours presence. *Procedia Manufacturing*, 46, 410-417.
- [28] Bosia, D., Giordano, R., & Savio, L. (2011). A sustainable building product: Advanced insulation panels obtained by recycling regional sheep's wool. *TECHNE-Journal of Technology for Architecture and Environment*, 110-115.
- [29] Tuzcu, T. M. (2007). Hygro-thermal properties of sheep wool insulation. *Delft University of Technology*, 409, 410.
- [30] Dénes, T. O., Iştoan, R., Tămaş-Gavrea, D. R., Manea, D. L., Hegyi, A., Popa, F., & Vasile, O. (2022). Analysis of sheep wool-based composites for building insulation. *Polymers*, 14(10), 2109.
- [31] ISO, E. (1997). 846; Plastics. Evaluation of the Action of Microorganisms. *International Organization: Geneva, Switzerland*.
- [32] Patnaik, A., Mvubu, M., Muniyasamy, S., Botha, A., & Anandjiwala, R. D. (2015). Thermal and sound insulation materials from waste wool and recycled polyester fibers and their biodegradation studies. *Energy and buildings*, 92, 161-169.
- [33] Cetiner, I., & Shea, A. D. (2018). Wood waste as an alternative thermal insulation for buildings. *Energy and Buildings*, 168, 374-384.
- [34] Snow, J., Herzog, B., & O'Brien, L. (2024). Characterization of Wood Fiber Insulation for the Development of Wood Fiber-Insulated Panels (WIPs) for Use in Building Envelope. *BioResources*, 19(3).
- [35] Kawasaki, T., Zhang, M., & Kawai, S. (1998). Manufacture and properties of ultra-low-density fiberboard. *Journal of Wood Science*, 44, 354-360.
- [36] Jerman, M., Palomar, I., Kočí, V., & Černý, R. (2019). Thermal and hygric properties of biomaterials suitable for interior thermal insulation systems in historical and traditional buildings. *Building and Environment*, 154, 81-88.
- [37] ISO: 15148: 2002; Hygrothermal performance of building
- [38] Lafond, C., & Blanchet, P. (2020). Technical performance overview of bio-based insulation materials compared to expanded polystyrene. *Buildings*, 10(5), 81.
- [39] Your STEICO partner. (n.d.).
- [40] Lamoulie, J., Le Bayon, I., Draghi, M., Roger, M., Pompeo, C., Gabille, M., ... & Kutnik, M. (2015). Use of bio-based insulation materials in buildings: modelling of hygrothermal conditions in use-resistance of a wood fibre material to moulds according to climatic conditions. *Academic Journal of Civil Engineering*, 33(2), 149-155.
- [41] Rasmussen, T. V., & Nicolajsen, A. (2007). Assessment of the performance of organic and mineral-based insulation products used in exterior walls and attics in dwellings. *Building and Environment*, 42(2), 829-839.
- [42] Gaujena, B., Agapovs, V., Borodinecs, A., & Strelets, K. (2020). Analysis of thermal parameters of hemp fiber insulation. *Energies*, 13(23), 6385.
- [43] Kosiński, P., Brzyski, P., Tunkiewicz, M., Suchorab, Z., Wiśniewski, D., & Palczyński, P. (2022). Thermal properties of hemp shives used as insulation material in construction industry. *Energies*, 15(7), 2461.
- [44] Pervaiz, M., & Sain, M. M. (2003). Carbon storage potential in natural fiber



- composites. *Resources, conservation and Recycling*, 39(4), 325-340.
- [45] Shewalul, Y. W., Quiroz, N. F., Streicher, D., & Walls, R. (2023). Fire behavior of hemp blocks: A biomass-based construction material. *Journal of Building Engineering*, 80, 108147.
- [46] Deborde, L., Andres, Y., Lanos, C., & Collet, F. (2024). Assessment of fungal development risk on bio-based thermal insulation. *Industrial Crops and Products*, 222, 119889.
- [47] Sepe, R., Bollino, F., Boccarusso, L., & Caputo, F. (2018). Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites. *Composites Part B: Engineering*, 133, 210-217.
- [48] Liu, M., Thygesen, A., Summerscales, J., & Meyer, A. S. (2017). Targeted pre-treatment of hemp bast fibres for optimal performance in biocomposite materials: A review. *Industrial crops and products*, 108, 660-683.
- [49] Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., ... & Savino, E. (2019). Physico-mechanical and thermodynamic properties of mycelium-based biocomposites: A review. *Sustainability*, 11(1), 281.
- [50] Schritt, H., Vidi, S., & Pleissner, D. (2021). Spent mushroom substrate and sawdust to produce mycelium-based thermal insulation composites. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127910.
- [51] Ali, S. A., Fahmy, M. K., Zouli, N., Abutaleb, A., Maafa, I. M., Yousef, A., & Ahmed, M. M. (2023). Fabrication of thermal insulation bricks using pleurotus florida spent mushroom. *Materials*, 16(14), 4905.
- [52] Jones, M., Bhat, T., Huynh, T., Kandare, E., Yuen, R., Wang, C. H., & John, S. (2018). Waste-derived low-cost mycelium composite construction materials with improved fire safety. *Fire and Materials*, 42(7), 816-825.
- [53] *Building with Mushrooms - Critical Concrete*. (n.d.). Retrieved April 15, 2025
- [54] Moyse, J., Lecomte, S., Marcou, S., Mongelard, G., Gutierrez, L., & Höfte, M. (2023). Overview and management of the most common eukaryotic diseases of flax (*Linum usitatissimum*). *Plants*, 12(15), 2811.
- [55] Yildiz, G., vjesnik, M. Y.-T., & 2020, undefined. (2020). Comparative performance evaluation of conventional and renewable thermal insulation materials used in building envelopes. 283-289.
- [56] Akonda, M., Alimuzzaman, S., Shah, D. U., & Rahman, A. M. (2018). Physico-mechanical, thermal and biodegradation performance of random flax/polylactic acid and unidirectional flax/polylactic acid biocomposites. *Fibers*, 6(4), 98.
- [57] Long, L. Y., Weng, Y. X., & Wang, Y. Z. (2018). Cellulose aerogels: Synthesis, applications, and prospects. *Polymers*, 10(6), 623.
- [58] Hurtado, P. L., Rouilly, A., Vandebossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and environment*, 96, 170-177.
- [59] Tian, C., Shi, Z., Zhang, H., Xu, J., Shi, J., & Guo, H. (1999). Thermal degradation of cotton cellulose. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 55(1), 93-98.
- [60] Petcu, C., Hegyi, A., Stoian, V., Dragomir, C. S., Ciobanu, A. A., Lăzărescu, A. V., & Florean, C. (2023). Research on Thermal Insulation Performance and Impact on Indoor Air Quality of Cellulose-Based Thermal Insulation Materials. *Materials*, 16(15), 5458.
- [61] Khiari, R., Mhenni, M. F., Belgacem, M. N., & Mauret, E. (2010). Chemical composition and pulping of date palm rachis and *Posidonia oceanica*—A comparison with other wood and non-wood fibre sources. *Bioresource Technology*, 101(2), 775-780.
- [62] Hamdaoui, O., Ibos, L., Mazioud, A., Safi, M., & Limam, O. (2018). Thermophysical characterization of *Posidonia Oceanica* marine fibers intended to be used as an insulation material in Mediterranean buildings. *Construction and building materials*, 180, 68-76.
- [63] Pascual, A. M., Romero, M. L., Serra, E., Guerrero, J. C., & Perez, R. (2024). Sustainable insulation panel for buildings made of rice husks and *posidonia*. *Construction and Building Materials*, 445, 137983.