

SATE INDUSTRIALIZADO A BASE DE CÁÑAMO CON BAJAS EMISIONES DE COV Y MAYOR EFICIENCIA DE INSTALACIÓN

Juan Carlos Guerrero Ramos¹, Ana María Hurtado Ruiz¹,
Enrique Serra Mercé¹, Rosa Pérez Campos¹, Eleftheria Athanasiadou², Electra Papadopoulou², Irene Beleña Pozo¹

¹ Aidimme Instituto tecnológico, Paterna, España, eserra@aidimme.es

² CHIMAR, Salónica, Grecia, papadopoulou@ari.gr

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo y validación de un sistema de fachada industrializado tipo SATE (Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior) basado en materiales bio-basados, en el marco del proyecto europeo HE SNUG (GA:101123150).

El objetivo principal del proyecto en el que se engloba es fomentar la transición hacia edificios de muy alta eficiencia energética y emisiones netas cero mediante una metodología innovadora que integra la economía circular y la prefabricación industrializada.

El alcance del estudio comprende el diseño, fabricación y evaluación técnica de biopaneles prefabricados bicapa que utilizan fibras de cáñamo y bioadhesivos libres de formaldehído, como núcleo aislante, protegidos por morteros de baja huella de carbono.

Frente a las soluciones SATE convencionales ejecutadas de forma manual en obra, esta propuesta se centra en la industrialización para optimizar la calidad constructiva y reducir los tiempos de ejecución.

La investigación abarca desde la formulación de los materiales hasta su validación en demostradores reales ubicados en diferentes climas europeos.

La metodología incluye la evaluación de la eficiencia térmica a nivel de sistema, con especial énfasis en el diseño de juntas para mitigar puentes térmicos, mejorando las prestaciones de desarrollos previos de AIDIMME como el proyecto EDIFBIO.

Asimismo, se analiza la calidad del aire interior mediante ensayos de emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) bajo la norma ISO 16000 en una cámara a gran escala de 60 m³.

Los resultados confirman que el sistema de prefabricado desarrollado reduce significativamente los tiempos de instalación y puede contribuir a la eficiencia energética de un edificio en el que se instale.

El análisis de ciclo de vida (ACV) respalda la sostenibilidad de la solución al emplear recursos renovables y reciclables, logrando además una envolvente más saludable.

En conclusión, los biopaneles de SNUG ofrecen una alternativa técnica viable para la descarbonización del sector de la construcción.

Palabras clave: sostenible, fachada, aislamiento.



1 Estado del arte.

La transición hacia una construcción climáticamente neutra en la Unión Europea ha impulsado la evolución de los sistemas de aislamiento térmico por el exterior (SATE o ETICS) desde métodos artesanales hacia soluciones industrializadas y prefabricadas que garantizan mayor eficiencia y reproducibilidad del comportamiento térmico [1, 2]. En este contexto, la integración de materiales bio-basados como el cáñamo surge como una alternativa estratégica debido a su capacidad de secuestro de carbono y su excelente comportamiento higrotérmico [3, 4].

La industrialización de estos sistemas mediante paneles prefabricados permite optimizar las juntas de los paneles entre sí y en los encuentros con otros elementos, un punto crítico para mitigar puentes térmicos y mejorar la eficiencia energética global del edificio [1]. Investigaciones recientes demuestran que el uso de fibras de cáñamo y subproductos agrícolas en procesos de fabricación controlada permite obtener conductividades térmicas competitivas (entre $0,055$ y $0,0735 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), manteniendo una huella de carbono significativamente inferior a la de los aislantes sintéticos convencionales [2, 5].

Un aspecto diferenciador en los sistemas de nueva generación es la calidad del aire interior (IAQ). La evaluación de emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) bajo la norma ISO 16000 es fundamental para validar la salubridad de los biocomposites [6, 7]. Aunque los materiales naturales suelen presentar perfiles de emisión favorables, la elección de los adhesivos es determinante. El desarrollo de bioadhesivos libres de formaldehído, basados en lignina, taninos o biomasa licuada, ha demostrado reducciones de hasta un 67% en las emisiones de COV totales en comparación con las resinas urea-formaldehído tradicionales [8, 9]. No obstante, es imperativo realizar ensayos en cámaras a gran escala para monitorizar la liberación de otros compuestos específicos durante el curado y envejecimiento del panel [7, 10].

En algunos casos, la sostenibilidad de estos sistemas se refuerza mediante la economía circular, utilizando morteros de baja huella de carbono y aglutinantes como cal o yeso que reducen la energía incorporada [3, 11]. El análisis de ciclo de vida (ACV) confirma que estas envolventes bio-basadas no solo contribuyen a la eficiencia operativa, sino que actúan como sumideros de CO_2 , alineándose con las estrategias globales de descarbonización del sector de la construcción [5, 12].

2 Diseño y Fabricación

El desarrollo de estos biopaneles SNUG se basa en la optimización de materiales aislantes sostenibles y multifuncionales mediante principios de economía circular, utilizando biomásas residuales aglomeradas con bioadhesivos.

El reto principal de esta fase radica en adaptar con éxito un nuevo bio-adhesivo basado en taninos (desarrollado por CHIMAR) a la biomasa seleccionada para sustituir los sistemas convencionales basados en isocianatos de origen fósil.

2.1 Caracterización de las Biomásas Vegetales Evaluadas

Se evaluó una amplia gama de residuos lignocelulósicos procedentes de diversas actividades agrícolas e industriales para determinar su idoneidad como núcleo aislante. Las materias primas testeadas incluyeron:

Cáñamo (cañamiza/shives): Proveniente del tallo del cultivo tras el desfibrado mecánico, con partículas de entre 1,0 y 4,0 cm de longitud.

Maíz y Girasol: Partículas obtenidas de los tallos, con longitudes de 0,4-4,0 cm para el maíz y 0,3-2,0 cm para el girasol.

Posidonia Oceánica: Hojas secas con las dimensiones más elevadas del estudio, alcanzando longitudes de hasta 22,0 cm.

Cáscara de Arroz: Residuo consistente en la protección exterior del grano, con partículas muy uniformes de 0,4-0,6 cm.

Ramas de Cítricos: Madera triturada con partículas de 0,4 a 1,5 cm de longitud.

2.2 Idoneidad de adhesivos

Se investigaron tres tipos de diferentes mezclas químicas para la obtención de aglutinantes con alto contenido renovable y baja toxicidad, desarrolladas por CHIMAR:

-Sistemas Basados en Almidón: Se desarrolló una mezcla sustituyendo parte del isocianato (pMDI) por almidón de patata en una relación óptima de 3:1, determinada por mediciones de viscosidad necesarias para la aplicación mediante pulverización.

-Resinas de Fenol-Formaldehído Modificadas (PTF, PLF, PSF): Se sintetizaron resinas tipo resol sustituyendo un 30% del fenol por tanino, lignina o proteína de soja. Tras observar que el tanino ofrecía el mejor rendimiento, se incrementó la sustitución hasta el 40% (PTF40), nivel que mantenía las propiedades mecánicas sin desviaciones significativas respecto a las resinas fósiles puras.

-Sistema Tanino/Hexametilentetramina (TH): Diseñado para maximizar el contenido biológico, este sistema utiliza tanino como ingrediente básico reticulado con Hexa. La proporción 90/10 se identificó como la más eficaz para garantizar una viscosidad adecuada durante la fabricación de los paneles.

2.3 Compatibilidad y Criterios de Selección Final

La fase de laboratorio evidenció desafíos críticos de compatibilidad; los paneles de cáscara de arroz y Posidonia oceánica resultaron fallidos con ciertos adhesivos, al no lograrse una unión interna adecuada. Además, aunque la Posidonia mostró una excelente conductividad térmica (0,066 W/m·K ver tabla1), su uso industrial se descartó por la complejidad legal de su obtención al ser una especie protegida.

El cáñamo se consolidó como la fibra superior al presentar la mejor cohesión interna (0,61 MPa con PTF40) (ver tabla 1) y una absorción acústica destacada en todas las frecuencias medidas (ver Figura 1). Para la solución final industrializable, se seleccionó la combinación de cañamiza y adhesivo de Taninos con Hexa (TH). Esta elección se fundamentó en la estabilidad de la resina TH, que no requiere almacenamiento refrigerado como la PTF40, y en la proximidad logística del proveedor de fibra de cáñamo.

Tabla 1. Relación de características mecánicas de mezclas PTF40-fibra

Formulación Nº	1	2	3	4	5	6
Adhesivo	PTF40					
Biomasa	Madera	Cáñamo	Limonero	Girasol	Posidónea	Arroz
Cohesión, (MPa)	0.42	0.61	0.09	0.12	0.03	-
Hinchazón 24h a 25°C (%)	32	24.3	23.4	17.6	53.1	43.9
Módulo de ruptura (MPa)	5	9	6.3	2.94	4.23	1.16
Módulo de elasticidad (MPa)	924	1605	906	777	625	0
Formaldeido. mg/100 gr	0.81	1.4	0.52	0.47	0.15	1.26

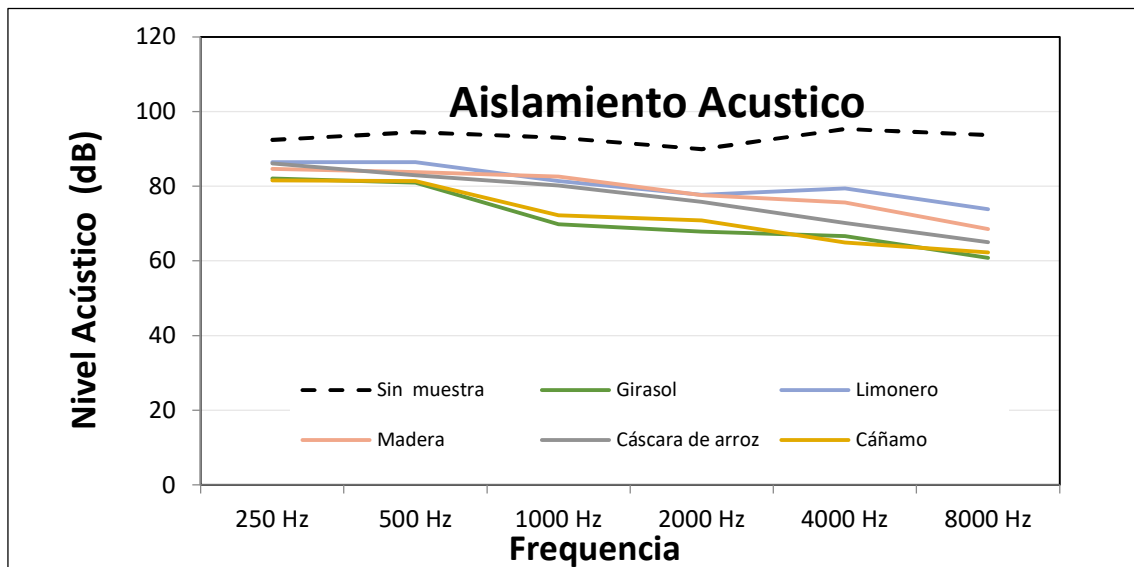


Figura 1. Aislamiento acústico de diferentes paneles de mezclas PTF40-fibra

3 Metodología de fabricación a escala piloto y protocolos de ensayo

3.1. Escalado Industrial y Equipamiento en AIDIMME

La optimización del protocolo de fabricación se realizó en las instalaciones de AIDIMME para simular una producción a escala piloto. Este proceso es fundamental para definir las hojas de especificaciones técnicas que guiarán la futura producción industrial.

El equipamiento principal empleado incluyó una prensa de platos calientes con control de presión, espesor y temperatura y balanzas de precisión para la dosificación exacta de los componentes.

El diseño del biopanel se estandarizó para alcanzar una densidad objetivo de 290 kg/m³. Para la fabricación de cada panel de ensayo, se utilizaron aproximadamente 1,5 kg de fibras de cáñamo (cañamiza) y un porcentaje de resina de entre el 10% y el 12% respecto a la masa de la fibra (aproximadamente 150 g de adhesivo).

3.2. Proceso de fabricación

El proceso se estructuró en las siguientes etapas críticas:

Mezclado: La resina se pulveriza o vierte gradualmente sobre las fibras mientras se agitan mecánicamente durante un periodo aproximado de 5 minutos.

Este tiempo garantiza que la mezcla adquiera una textura "húmeda" homogénea, indicando que la resina ha recubierto adecuadamente la superficie porosa de la cañamiza.

Formación del tablero y conformado: se emplearon moldes de madera con un espacio interior de 52x52 cm. La mezcla se deposita manualmente en el molde por capas (2 a 3 capas), aplicando una presión manual con una placa metálica tras cada capa para asegurar una distribución uniforme y evitar huecos importantes.

Prensado en caliente: el sistema completo (molde y fibras) se introduce en la prensa precalentada a 180 °C. Inicialmente, se ejerce un pre-prensado hasta que la tapa se introduce en los perfiles del molde para dar forma preliminar al panel. Posteriormente, el panel se desmoldea y se reintroduce en la prensa, protegido por papel de hornear en ambas caras para facilitar el contacto con los platos calientes, pero evitar adherencias. El prensado final se realiza a 180 °C durante 10 minutos, programando la máquina para un espesor de control de 20 mm.

Acondicionamiento y Corte: Una vez enfriados, los paneles se cortan mediante sierra de disco para eliminar los bordes inconsistentes, obteniendo muestras finales de 50x50 cm listas para su caracterización.

3.3. Protocolos de Caracterización y Normativa Europea

La evaluación de las propiedades de los biopaneles se ha regido por el documento de evaluación europeo EAD 040005-00-1201, específico para productos de aislamiento térmico y/o acústico fabricados en fábrica a partir de fibras vegetales o animales. Este marco normativo permite comparar de forma objetiva el rendimiento de las diferentes variantes de biopaneles frente a soluciones comerciales existentes.

Los protocolos de ensayo implementados incluyen:

Propiedades Higrotérmicas: Determinación de la conductividad térmica según EN 12667:2002 y de la capacidad calorífica específica mediante el método de paso isotérmico.

Comportamiento Mecánico: Resistencia a la compresión basada en ISO 3386-2 (para espumas elásticas densas de más de 250 kg/m³), comportamiento a la flexión según EN 12089 y resistencia a la tracción perpendicular siguiendo la norma UNE EN 319.

Durabilidad y Seguridad: Evaluación de la resistencia al ataque fúngico según ISO 846:1997, utilizando biocidas naturales de lavanda y tomillo. La reacción al fuego se determinó mediante el método del calorímetro de cono bajo la norma ISO 5660-1.

Calidad del Aire Interior: Medición de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y formaldehído mediante la serie ISO 16000 y el método de la cámara UNE-EN 717-1.

Este enfoque metodológico integral garantiza que el biopanel SNUG no solo sea una alternativa sostenible, sino que cumpla con todos los requisitos de seguridad y rendimiento exigidos por el Código Técnico de la Edificación y las normativas europeas.

4 Resultados

4.1 Caracterización Física y Calidad de la Biomasa

La caracterización inicial de la biomasa es un paso crítico para predecir la eficiencia del proceso de aglomeración y la durabilidad de la maquinaria industrial. Se realizaron ensayos de contenido de humedad (UNE-EN ISO 18134-1:2023), cenizas (EN ISO 18122:2023) y arena (UNE 56744:1988) comparando las fibras de cáñamo de dos proveedores principales: Cannaenea y KEAS. Los resultados indicaron que la biomasa de Cannaenea posee un contenido de humedad del 9,80% y un nivel de cenizas del 5,09%, mientras que la fibra de KEAS registró valores inferiores, con un 8,32% de humedad y solo un 1,51% de cenizas.

Especial atención merece el contenido de arena, ya que este parámetro afecta directamente a la abrasividad del material durante el corte y procesado. La fibra de KEAS mostró el valor más bajo (0,18%), en contraste con el 1,09% observado en los paneles fabricados con fibra de Cannaenea. Estos datos validan la selección de la biomasa de KEAS para el escalado industrial, ya que un menor contenido de agua y minerales inorgánicos asegura una mayor eficiencia energética en el prensado y protege la vida útil de los equipos de corte.

4.2. Evaluación del Desempeño Térmico.

La conductividad térmica es el indicador fundamental para la función aislante del biopanel. Siguiendo la norma EN 12667:2002, se evaluaron múltiples combinaciones de biomasa y resina. En las fases iniciales de laboratorio, la Posidonia oceanica presentó los mejores valores de aislamiento con conductividades de entre 0,065 y 0,066 W/m·K, seguida por el cáñamo, que mostró valores aceptables en el rango de 0,070 a 0,077 W/m·K dependiendo del adhesivo utilizado. Sin embargo, tras la optimización del protocolo en escala piloto con la combinación final de cáñamo y resina de tanino (TH), se logró alcanzar una conductividad térmica de 0,055 W/m·K.

Complementariamente, se determinó la capacidad calorífica específica mediante el método de paso isotérmico. Este parámetro es vital para entender la inercia térmica del edificio. Los resultados para las fibras de cáñamo se situaron en 1761 J/kgK, mientras que el biopanel aglomerado final registró un valor de 1515 J/kgK. Estos valores se encuentran dentro del rango de los materiales aislantes comerciales, garantizando que el sistema SNUG no solo limita la transferencia de calor, sino que también contribuye a la estabilidad térmica interior.

4.3. Resultados de Aislamiento Acústico

El comportamiento acústico se evaluó siguiendo una metodología basada en la serie EN ISO 10140, midiendo la diferencia de intensidad sonora tras la emisión de ruido rosa (pink noise) a 90 dBA en frecuencias desde los 250 Hz hasta los 8000 Hz. Los ensayos comparativos realizados

con la resina PTF40 revelaron que el cáñamo, la posidonia y el girasol son los tres materiales con mejor desempeño acústico en todas las frecuencias medidas. El cáñamo, en particular, demostró una capacidad de absorción superior, lo que refuerza su idoneidad como material multifuncional capaz de proporcionar tanto aislamiento térmico como confort acústico en envolventes de edificios.

4.4. Comportamiento Mecánico y Resistencia Estructural

La evaluación de las propiedades mecánicas es fundamental. Los ensayos se llevaron a cabo utilizando una máquina universal de ensayos, siguiendo la normativa europea para materiales aislantes y tableros de partículas.

4.4.1 Resistencia a la Compresión (ISO 3386-2)

Para determinar la dureza por compresión, se aplicó la norma ISO 3386-2, específica para materiales elásticos con densidades superiores a 250 kg/m³

El ensayo consistió en medir la fuerza necesaria para producir una deformación del 10% respecto a la altura inicial del espécimen (20 mm).

Los resultados obtenidos muestran que la combinación PTF40-C (fibra de *Cannaenea* con resina PTF40) alcanzó los valores más elevados de dureza por compresión.

No obstante, el biopanel seleccionado de cáñamo y taninos (TH) registró un valor de 585 kPa, lo cual se considera una resistencia excelente para materiales de aislamiento, garantizando que el panel mantenga su integridad bajo las cargas propias de una fachada o incluso en aplicaciones bajo pavimento.

4.4.2 Resistencia a Flexión (EN 12089)

La resistencia a la flexión evalúa la capacidad del material para soportar esfuerzos durante el transporte, la manipulación y la instalación.

Siguiendo el método B de la norma EN 12089, se aplicó una carga en tres puntos sobre probetas. La variante que demostró un mejor rendimiento fue la PTF40-K. Este comportamiento superior se atribuye a las propiedades morfológicas de la fibra de KEAS, que presenta partículas más largas y gruesas en comparación con las de *Cannaenea*, lo que favorece un mejor entrelazado mecánico y transferencia de esfuerzos dentro de la matriz aglomerada. El valor de resistencia a la flexión del biopanel optimizado se situó en 3250 kPa, superando los requisitos mínimos para sistemas SATE prefabricados.

4.4.3. Resistencia a la Tracción Perpendicular (EN 319)

Este ensayo mide la cohesión interna del panel, aplicando una fuerza perpendicular a sus caras hasta la rotura. Es un indicador crítico de la calidad de la unión entre el adhesivo y la fibra.

Los resultados destacaron nuevamente a la combinación PTF40-K por su continuidad y estabilidad en los resultados.

Por el contrario, las muestras aglomeradas con resina de Tanino/Hexa (TH) mostraron una resistencia significativamente menor (0,012 N/mm²), lo cual se atribuye a una menor cohesión intrínseca del adhesivo en comparación con las resinas fenólicas modificadas. Sin embargo, este valor se considera suficiente para la aplicación prevista, dado que el sistema SATE final irá anclado mecánicamente a la estructura existente.

4.4. Emisiones de COV y Calidad del Aire Interior.

La evaluación de las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) se realizó bajo las directrices de la norma ISO 16000, analizando el impacto de los biopaneles en la calidad del aire interior tras 28 días de exposición. Los ensayos incluyeron las cuatro variantes principales: PTF40-K, PTF40-C, TH-K y TH-C.

Los resultados de las emisiones totales de COV (TVOC) fueron altamente satisfactorios. Al comparar los datos experimentales con la clasificación francesa de emisiones, que es uno de los estándares más restrictivos en Europa, todas las combinaciones desarrolladas en el proyecto SNUG cumplieron con los niveles exigidos para la categoría A+. Este logro es significativo, ya que demuestra que la sustitución de adhesivos sintéticos por resinas de taninos permite obtener materiales con una toxicidad mínima.

4.5. Resistencia al ataque fúngico (ISO 846:1997)

Dada la naturaleza orgánica de las fibras vegetales, la durabilidad biológica es un factor clave. Se evaluó la resistencia frente a hongos siguiendo la norma ISO 846:1997, testando biocidas naturales basados en lavanda (L) y tomillo (T) para mantener la base biológica del producto en el mayor porcentaje posible.

Las muestras se incubaron durante un periodo de 4 semanas a una temperatura de 23 ± 2 °C y una humedad relativa elevada. Los resultados fueron concluyentes:

Muestras de control (sin tratamiento): Presentaron una intensidad de crecimiento fúngico de nivel 5, con el micelio cubriendo la totalidad de la superficie.

Muestras tratadas (L y T): Registraron una intensidad de crecimiento 0, lo que indica la ausencia total de crecimiento aparente incluso bajo observación microscópica. Esta resistencia total al moho valida la eficacia de los tratamientos naturales empleados para proteger la biomasa en condiciones ambientales adversas.

4.6. Análisis de Ciclo de Vida (LCA) e Impacto Ambiental

4.6.1 Metodología y Alcance del Estudio

La evaluación del impacto ambiental de los biopaneles SNUG se realizó siguiendo una metodología que combina las prácticas generales de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) con los requisitos de la norma EN 15804 y los estándares internacionales ISO 14044.

El estudio adoptó un enfoque ex-ante, lo que permite estimar el impacto de los materiales en un nivel de madurez tecnológica (TRL) comercial ("to-be") a partir de datos obtenidos en ensayos de laboratorio y planta piloto.

Se definieron dos unidades declaradas para el análisis: el enfoque de “*cuna a la puerta*”, que abarca las fases A1-A3 (extracción de materias primas, transporte y fabricación), y un enfoque ampliado de “*cuna a la tumba*” que incluye la instalación y el tratamiento de residuos al final de la vida útil (C1-C4). Para el inventario del biopanel, se consideró una densidad de 240 kg/m³, basándose en una receta que emplea principalmente cañamiza de cáñamo (299 kg/m³), taninos naturales (45,10 kg/m³) y un activador basado en hexametilentetramina (2,14 kg/m³).

4.6.2. Análisis de Contribución por Etapas (A1-A3)

Los resultados del ACV indican que la fase de obtención de materias primas y fabricación (A1-A3) domina el perfil de impacto, superando el 80% en categorías críticas como la

acidificación, la ecotoxicidad y el uso de agua. Dentro de esta fase, los mayores impactos provienen de la producción de taninos y el consumo eléctrico del proceso industrial.

Un aspecto logístico relevante es el transporte de los componentes: mientras que las fibras de cáñamo se transportan desde Turquía (545 km), el tanino recorre una distancia considerable de 3418 km desde el proveedor hasta el fabricante de adhesivos. Esta etapa de transporte representa entre el 20% y el 30% del impacto en categorías como la toxicidad humana y el agotamiento de recursos fósiles.

Este factor puede ser minimizado diseñando un modelo de negocio que emplee recursos locales tanto para la biomasa como para los taninos.

4.6.3. El Rol del Carbono Biogénico y la Comparativa Industrial

El indicador más destacado de la solución SNUG es el carbono biogénico. Este representa el CO₂ secuestrado por la planta de cáñamo durante su fase de crecimiento, actuando como un valor negativo en el balance global de emisiones. Este factor es un indicador positivo extremadamente fuerte, ya que compensa casi en su totalidad las emisiones generadas en el resto de las fases del ciclo de vida.

En comparación con productos comerciales, como el tablero de partículas convencional (Kastamonu chipboard) que presenta una densidad muy superior (630 kg/m³), el biopanel SNUG ofrece una alternativa de menor peso y reducida huella de carbono. El estudio incluyó un análisis de sensibilidad sobre la producción de tanino, adoptando un enfoque conservador (11 kg CO₂ eq/kg de tanino) debido a la alta energía necesaria en los procesos de extracción basados en agua, asegurando así que el perfil ambiental del producto no sea subestimado. En conclusión, la capacidad del biopanel para actuar como sumidero de carbono y su origen, a partir de residuos, lo posicionan como una solución estratégica para la construcción circular.

5 Conclusiones

La combinación de baja conductividad térmica, alta capacidad calorífica y excelente respuesta acústica posiciona al biopanel de cáñamo como una solución técnica de alto valor añadido frente a otras alternativas.

Aunque las formulaciones con resina PTF40 presentan un rendimiento mecánico superior en todas las categorías, la solución basada en Tanino/Hexa de CHIMAR con fibra de KEAS ha sido seleccionada para la industrialización debido a su equilibrio entre propiedades mecánicas suficientes, mayor contenido biológico y superior estabilidad logística de la resina (evitando la necesidad de refrigeración constante).

La investigación y el desarrollo llevados a cabo en el proyecto SNUG han permitido validar la viabilidad técnica, ambiental y de seguridad de una nueva generación de biopaneles aislantes. Las conclusiones principales de este estudio se resumen en los siguientes puntos:

Optimización de Materiales Bio-basados: El cribado de biomásas residuales determinó que el cáñamo industrial (cañamiza) es la fibra más adecuada para la producción de paneles de aislamiento. A diferencia de otras fibras como la cáscara de arroz (inestable en la aglomeración) o la Posidonia oceánica (compleja de obtener por ser especie protegida), el cáñamo ofrece un equilibrio superior en propiedades mecánicas, durabilidad y aislamiento acústico.

Sustitución de Adhesivos Sintéticos: Se ha logrado sustituir con éxito los isocianatos de origen fósil por bioadhesivos de baja toxicidad. Aunque la resina PTF40 mostró un rendimiento mecánico ligeramente superior, la resina de Tanino/Hexametilentetramina (TH) fue seleccionada para la industrialización debido a su mayor contenido biológico y, fundamentalmente, a su estabilidad logística, ya que no requiere almacenamiento refrigerado por debajo de 5 °C.

Rendimiento Térmico y Mecánico: Los biopaneles optimizados de 290 kg/m³ alcanzaron una conductividad térmica de 0,055 W/m·K, situándose en rangos competitivos para materiales de origen vegetal. Mecánicamente, los valores de resistencia a la compresión (585 kPa) y flexión (3250 kPa) garantizan la robustez estructural necesaria para su integración en sistemas de fachada tipo SATE.

Salud y Seguridad: El cumplimiento de la clasificación A+ en emisiones de COV y la validación de niveles de formaldehído por debajo de los límites de seguridad (<50 ppb) confirman que estos materiales mejoran significativamente la calidad del aire interior en comparación con los tableros convencionales. Además, el uso de biocidas naturales de lavanda y tomillo proporciona una resistencia total al moho (Intensidad 0). Lo que pone de manifiesto su potencial uso para sistemas de aislamiento interiores.

Sostenibilidad y Economía Circular: El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) confirma que el carbono biogénico capturado por el cáñamo compensa casi en su totalidad las emisiones de las fases de producción y transporte (A1-A3). La valorización de residuos agrícolas bajo un enfoque de proximidad minimiza el impacto ambiental y fomenta la economía circular en el sector de la construcción.

Industrialización: La definición de un protocolo de fabricación estandarizado en planta piloto (prensado a 180 °C durante 10 minutos) permite el escalado inmediato de la solución para su implementación en los demostradores reales del proyecto.

6. Agradecimientos

Los autores de este estudio desean agradecer a la Comisión Europea por la financiación del proyecto SNUG. El consorcio SNUG está cofinanciado por la subvención n.º 101123150 de la Comisión Europea.

7. Referencias

- [1] Ricciardi, P., Belloni, E., Merli, F., & Buratti, C. (2021). *Sustainable Panels Made with Industrial and Agricultural Waste: Thermal and Environmental Critical Analysis of the Experimental Results*. Applied Sciences, 11(2), 494.
- [2] Cucchiella, F., Rotilio, M., Barile, G., & Stornelli, V. (2024). *Renovation Wave: a bioeconomy panel produced with waste*. Journal of Cleaner Production, 456, 142868.
- [3] Chandrakar, N. (2023). *Review of thermal performance, hygrothermal behaviour, and carbon sequestration in hemp concrete in order to make it an energy-efficient and eco-friendly material*. International Journal of Masonry Research and Innovation, 8(2-3), 260-285.
- [4] Deborde, L., Lanos, C., Collet, F., Delsalle, J., Colson, V.. (2023). *From the Lab Scale to the Construction Site Scale: Properties of Hemp Thermal Insulation*. Rilem Bookseries, 43, 119.
- [5] Vilaboa Díaz, A., Francisco López, A., & Bello Bugallo, P. M. (2022). *Analysis of Biowaste-Based Materials in the Construction Sector: Evaluation of Thermal Behaviour and Life Cycle Assessment (LCA)*. Waste and Biomass Valorization, 13, 4983–5004.
- [6] De Kort, J. M. A., Gauvin, F., Loomans, M. G. L. C., & Brouwers, H. J. H. (2023). *Emission rates of bio-based building materials, a method description for qualifying and quantifying VOC emissions*. Science of The Total Environment, 905, 167158.
- [7] Richter, M.; Horn, W.; Juritsch, E.; Klinge, A.; Radeljic, L.; Jann, O. (2021). *Natural building materials for interior fitting and refurbishment—what about indoor emissions?* Materials, 14, 234.

- [8] Janiszewska-Latterini, D., Hochmańska-Kaniewska, P., Kwaśniewska-Sip, P., Czajka, M., & Pędzik, M. (2024). *Effect of wood adhesive modification with liquefied lignocellulosic biomass and nanocellulose on the formaldehyde and volatile organic compounds emissions of particleboards*. *Wood Material Science & Engineering*, 19(2), 451–461. <https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2258119>
- [9] Miyamoto, K., Grigsby, W., & Tohmura, S. I. (2019). *Using Renewables in Panelboard Resins to Influence Volatile Organic Compound Emissions from Panels*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 39(3), 166–177. <https://doi.org/10.1080/02773813.2018.1533977>
- [10] Gonçalves, S., Curling, S. F., Ormondroyd, G., Paiva, N. T., Martins, J., Magalhães, F. D., & Carvalho, L. H. (2026). *Volatile organic compound (VOC) emissions from no-added-formaldehyde lignosulphonate/pMDI particleboards and their effect on indoor air quality*. *Wood Material Science & Engineering*, 21(1), 9–17. <https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2396431>
- [11] Demir, İ., & Doğan, C. (2020). *Physical and Mechanical Properties of Hempcrete*. *The Open Waste Management Journal*, 13, 26-34. DOI: 10.2174/1874312902014010026
- [12] N. Berdai, Z. E. Krimi, J. Elhaini and H. Moustabchir, (2025) *Hempcrete for Energy-Efficient Buildings: A Review of Thermal and Environmental Performance* International Conference on Electrical Systems & Automation (ICESA), Troyes, France, 2025, pp. 1-6, doi:0.1109/ICESA66763.2025.11281225.
- [13] ISO 16000: Indoor air - Part 3, 6, 9, 11: *Determination of emissions of volatile organic compounds and formaldehyde*.
- [14] EN 12667:2002: *Thermal performance of building materials and products - Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods*.
- [15] ISO 846:1997: *Plastics - Evaluation of the action of microorganisms*.
- [16] ISO 3386-2: *Flexible cellular polymeric materials - Determination of stress-strain characteristics in compression - Part 2: High-density materials*.
- [17] DIN EN 12089: *Thermal insulating products for building applications - Determination of bending behaviour*.
- [18] ISO 5660-1:2015: *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method)*.
- [19] EN 15804:2012+A2:2019: *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*.
- [20] ISO 14044: *Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines*.
- [21] UNE EN 319: *Particleboards and fibreboards - Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board*.
- [22] UNE-EN ISO 29767: *Thermal insulating products for building applications - Determination of short-term water absorption by partial immersion*.
- [23] EAD 040005-00-1201: *Factory-made thermal and/or acoustic insulation products made of vegetable or animal fibres*.