DISEÑO DE AISLACIÓN TERMOACÚSTICA CON BIOPLÁSTICOS CÍTRICOS EN ESTACIÓN INTERMODAL

MANUEL LARA YÁNEZ
COORDINADOR DE INNOVACIÓN Y EXPERIENCIAS, VICERRECTORÍA DE INTELIGENCIA DIGITAL, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, SANTIAGO, CHILE

CRISTÓBAL MORENO MUÑOZ
DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE GESTIÓN
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
INVESTIGADOR PRINCIPAL DEL CENTRO DE INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍA Y DISEÑO DE MATERIALES PARA EL ENTORNO CONSTRUIDO.

RECIBIDO: 28 DE OCTUBRE DE 2025 // **ACEPTADO:** 14 DE ABRIL DE 2026

ESTA INVESTIGACIÓN ABORDA LA PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL ASOCIADA A LA CONSTRUCCIÓN Y LA DEFICIENTE AISLACIÓN TERMOACÚSTICA EN ESPACIOS URBANOS DE ALTA AFLUENCIA, TOMANDO COMO CASO DE ESTUDIO LA ESTACIÓN INTERMODAL LA CISTERNA, EN SANTIAGO DE CHILE. EL OBJETIVO ES DESARROLLAR Y VALIDAR UN MATERIAL COMPUESTO BIOBASADO, ELABORADO A PARTIR DE CÁSCARAS DE NARANJA Y AGLUTINANTES NATURALES, COMO ALTERNATIVA SOSTENIBLE AL POLIESTIRENO EXPANDIDO (EPS). LA METODOLOGÍA SE ENFOCA EN LA FORMULACIÓN EXPERIMENTAL, FABRICACIÓN DE PROBETAS, ENSAYOS NORMADOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA, TÉRMICA Y ACÚSTICA, Y EL DISEÑO DE UN PROTOTIPO MODULAR PARA SU APLICACIÓN EN ANDENES. LOS RESULTADOS EVIDENCIAN PROPIEDADES DE AISLACIÓN COMPARABLES O SUPERIORES AL EPS, JUNTO CON VENTAJAS EN BIODEGRADABILIDAD, COSTO Y VIABILIDAD PRODUCTIVA DESDE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES. ESTOS HALLAZGOS PERMITEN PROPONER ESTE DISEÑO COMO SOLUCIÓN VIABLE DESDE PEQUEÑAS Y MEDIANAS EMPRESAS, MEDIANTE UN ENFOQUE DE VINCULACIÓN CON EL MEDIO QUE PERMITA SU PRESENTACIÓN COMO PROYECTO DE POLÍTICA PÚBLICA, ORIENTADO A FONDOS GUBERNAMENTALES EN SUSTENTABILIDAD Y EMPRENDIMIENTO. ESTE TRABAJO SE CONSTRUYE A PARTIR DE UNA INVESTIGACIÓN DE MAGÍSTER Y SE PROPONE COMO UNA CONTRIBUCIÓN TÉCNICA Y AMBIENTALMENTE PERTINENTE PARA LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN, ALINEADA CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE 9, 12 Y 13.

PALABRAS CLAVE: BIOPLÁSTICO, CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE, CÁSCARA DE NARANJA, DISEÑO INDUSTRIAL

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (CC BY-NC-ND 4.0).

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción es uno de los sectores de mayor impacto ambiental a nivel global, debido a su alto consumo de recursos naturales y generación de residuos sólidos. En Chile, esta actividad produce más del 50 % de los desechos industriales, lo que plantea desafíos urgentes en sostenibilidad y eficiencia energética (Cámara Chilena de la Construcción, 2022). A ello se suma la creciente complejidad del entorno urbano, donde la contaminación acústica se ha consolidado como un problema ambiental y de salud pública. Según la Organización Mundial de la Salud, la exposición prolongada al ruido puede provocar trastornos auditivos, cardiovasculares, cognitivos y psicológicos, afectando la calidad de vida (Organización mundial de la Salud OMS, 2018, 2022). Este fenómeno es especialmente crítico en infraestructuras de transporte urbano de alta afluencia, como la Estación Intermodal La Cisterna en Santiago de Chile, donde los niveles de ruido oscilan entre 65 y 85 dB, superando los umbrales recomendados y afectando a usuarios y trabajadores (Ministerio del Medio Ambiente, 2023).

Más aún, en la construcción contemporánea, el poliestireno expandido se ha consolidado como uno de los materiales más utilizados para aislación térmica y acústica en infraestructuras urbanas. Sin embargo, su origen fósil, su baja biodegradabilidad y el impacto ambiental asociado a su producción y disposición final evidencian limitaciones significativas frente a los desafíos de sostenibilidad (Prasittisopin et al., 2022).

Ante esta problemática, surge la necesidad de explorar alternativas que integren propiedades de aislación superiores y reduzcan la huella ecológica de los materiales empleados. En este marco, la valorización de residuos agroindustriales, como las cáscaras de naranja, se presenta como una estrategia innovadora. La composición fibrosa y porosa de este subproducto no solo favorece la absorción acústica, sino que también contribuye al aislamiento térmico, ofreciendo un desempeño potencialmente superior al poliestireno expandido (Hernández-Rodríguez et al., 2026).

En este contexto, esta investigación se centra en la falta de soluciones sostenibles que integren aislación acústica y térmica en infraestructuras urbanas, considerando la eficiencia energética y la reducción del impacto ambiental de los materiales. Se plantea la pregunta: ¿puede un material biobasado desarrollado a partir de cáscaras de naranja ofrecer propiedades acústicas y térmicas superiores al poliestireno expandido, constituyéndose en una alternativa sostenible para la construcción?

El objetivo general fue desarrollar un material compuesto biobasado utilizando residuos de cáscara de naranja, validando su desempeño como aislante acústico y térmico. Para ello, se definió el proceso de elaboración, se evaluaron sus propiedades mediante ensayos normados, y se diseñó un panel modular aplicado al caso de La Cisterna. Este estudio, derivado de una investigación de magíster, aporta al diseño sostenible y a la valorización de residuos agrícolas, promoviendo soluciones constructivas alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Naciones Unidas, 2021).

En lo concreto, se postula que el desarrollo de un material biobasado a partir de cáscaras de naranja, con propiedades acústicas y térmicas superiores al poliestireno expandido, constituye una alternativa sostenible para la construcción que responde a diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) En primer lugar, se vincula al ODS 12 al promover la economía circular mediante la valorización de residuos agroindustriales y la reducción del uso de polímeros fósiles. De igual manera, contribuye al ODS 13 al mejorar la eficiencia energética de edificaciones y disminuir las emisiones asociadas al consumo de energía. En el plano de la innovación, se relaciona con el ODS 9, al impulsar nuevas soluciones tecnológicas para infraestructuras resilientes y sostenibles.

MARCO TEÓRICO

La industria de la construcción representa uno de los sectores con mayor impacto antropogénico, siendo responsable de más del 20% de los desechos sólidos globales y de aproximadamente el 56% de los residuos industriales en Chile (Ministerio del Medio Ambiente, 2021). Ante este panorama, la transición hacia materiales de aislación sostenibles surge como una estrategia crítica para mitigar la degradación ambiental. En particular, la valorización de residuos agroindustriales, como la cáscara de naranja, para el desarrollo de biocompuestos ofrece una alternativa técnica viable que integra eficiencia térmica, acondicionamiento acústico y baja huella de carbono. Esta aproximación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU (2021), específicamente en los ejes de innovación en infraestructura (ODS 9), producción responsable mediante la economía circular (ODS 12) y la acción urgente contra el cambio climático (ODS 13).

En términos de desempeño, la construcción contemporánea enfrenta exigencias crecientes tanto en aislación térmica como acústica. La contaminación sonora es reconocida por la Organización Mundial de la Salud como uno de los principales problemas de salud pública, recomendando niveles máximos de 65 dB durante el día y 55 dB en la noche (OMS, 2018). En Chile, el Decreto Supremo N°38/2011 del Ministerio del Medio Ambiente regula los niveles de presión sonora, mientras que las normas chilenas NCh 2785/2786.Of2003 establecen ensayos para evaluar el aislamiento acústico de materiales.

En cuanto a eficiencia energética, el Reglamento de Calificación Energética de Viviendas y la NCh 853 definen los requisitos de desempeño térmico en edificaciones. Los aislantes convencionales como el poliestireno expandido (EPS) presentan buen desempeño térmico, pero baja eficiencia acústica, además de ser altamente contaminantes, no biodegradables y con una degradación estimada de hasta 500 años (Carpio Toral, 2018). Estas restricciones evidencian la necesidad de desarrollar alternativas que integren simultáneamente desempeño técnico y sostenibilidad.

Desde esta perspectiva, enfoques como la ecología industrial, que propone el tránsito de sistemas productivos lineales a cíclicos donde los desechos de una industria se transformen en insumos de otra (Asyraf et al., 2022; Huuhka et al., 2020), y la economía circular, que busca optimizar los ciclos de materiales y eliminar residuos a través del rediseño de procesos y productos (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Ambos proponen la transición desde modelos lineales de producción hacia sistemas cíclicos, donde los residuos de una industria se convierten en insumos de otra, optimizando el uso de materiales y reduciendo la generación de desechos. En este marco, los residuos agroindustriales emergen como una fuente relevante de materia prima para el desarrollo de nuevos materiales constructivos.

Entre ellos, los residuos cítricos, particularmente la cáscara de naranja, presentan un alto potencial de valorización. Este subproducto, que puede representar entre el 25% y el 40% del

peso del fruto (Pathak et al., 2017), contiene pectina, celulosa y hemicelulosa, polímeros naturales con propiedades estructurales y gelificantes que lo hacen viable para la fabricación de materiales biobasados (Wu et al., 2018). Su uso permite no solo reducir el impacto de los residuos orgánicos, sino también generar nuevas oportunidades en el ámbito de la construcción sostenible.

La agroindustria de cítricos genera millones de toneladas de residuos cada año, principalmente en forma de cáscaras, que representan entre el 25% y el 40% del peso del fruto (Pathak et al., 2017). En Chile, la producción anual supera los 120 millones de toneladas de fruta fresca a nivel global, de las cuales cerca de 25 millones son destinadas a la industria procesadora, generando grandes volúmenes de desechos orgánicos (Layseca Astudillo, 2021).

En este contexto, el desarrollo de biocompuestos y bioplásticos se posiciona como una línea de investigación relevante. Estos materiales combinan matrices poliméricas naturales con refuerzos vegetales, logrando propiedades mecánicas, térmicas y acústicas comparables a materiales convencionales (Baillie & Vanasupa, 2003). Si bien algunos biopolímeros presentan aún limitaciones en términos de costo o escalabilidad (Raj et al., 2023), diversas investigaciones han demostrado el potencial de materiales derivados de residuos agrícolas, como fibras de caña, bambú o cáscaras de frutas, como aislantes de bajo costo y bajo impacto ambiental (Collivignarelli et al., 2020).

En este cruce entre sostenibilidad, valorización de residuos e innovación material, persiste un desafío crítico: la escasez de soluciones que integren desempeño térmico, absorción acústica y viabilidad ambiental en contextos reales de uso. A pesar de los avances en biocompuestos de fibras naturales, aún existe un vacío en la validación experimental de materiales derivados de residuos específicos y su transferencia a la aplicación concreta en la infraestructura urbana.

En este marco, la presente investigación se sitúa en la intersección entre diseño, ciencia de materiales y sostenibilidad, proponiendo el desarrollo de un biocompuesto basado en cáscara de naranja como alternativa para aislamiento termoacústico. A diferencia de estudios centrados solo en la formulación material, este trabajo articula un proceso integral desde la caracterización físico-mecánica, térmica y acústica, hasta el diseño y validación de un prototipo en un entorno real. Este enfoque permite no solo evaluar el desempeño del material en condiciones controladas, sino también analizar su comportamiento en un contexto urbano específico, estableciendo un puente entre el desarrollo experimental y su potencial implementación en sistemas constructivos.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental iterativo, enmarcado en el paradigma de Material-Driven Design (MDD), con el objetivo de garantizar trazabilidad, reproducibilidad y rigor científico en todas sus fases (Bak-Andersen, 2018). El proceso metodológico se estructuró de manera secuencial, siguiendo la transformación del material desde la obtención de la materia prima hasta su validación en un contexto de aplicación real.

1. OBTENCIÓN Y PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La materia prima utilizada correspondió a cáscaras de naranja provenientes de una planta procesadora de jugos, con el fin de asegurar uniformidad y disponibilidad en el suministro. Se incorporaron tanto el flavedo (capa externa) como el albedo (capa interna), siendo este último el componente estructural más relevante debido a su alta concentración de pectina, celulosa y hemicelulosa.

La recolección se realizó mediante un muestreo sistemático durante un período de dos semanas, permitiendo conformar lotes representativos de entre 100 y 200 kg de cáscara fresca. Cada lote fue identificado mediante un código único, registrando fecha de obtención, condiciones de transporte y variables ambientales, con el fin de controlar posibles variaciones asociadas a procesos de degradación.

Posteriormente, las cáscaras fueron sometidas a un proceso de limpieza mediante lavado con agua potable y desinfección con solución diluida de hipoclorito. A continuación, se realizó un presecado al aire y un secado final en horno de convección a 60 °C, hasta alcanzar una humedad residual inferior al 10%, controlada mediante higrómetro digital.

Una vez secas, las cáscaras fueron procesadas mediante molienda mecánica y tamizado, obteniendo un polvo con granulometría controlada (<2 mm). Este material fue almacenado en contenedores herméticos con desecante a temperatura ambiente controlada hasta su utilización en los ensayos. La reducción del tamaño de partícula permitió aumentar la superficie específica del material, favoreciendo la cohesión con los aglutinantes y la formación de una matriz continua, así como el desarrollo de micro-porosidad relevante para el desempeño térmico y acústico.

2. DEFINICIÓN DEL SISTEMA MATERIAL

La siguiente etapa correspondió a la selección de aglutinantes, estableciendo criterios de evaluación basados en su origen vegetal y biodegradabilidad, disponibilidad local, compatibilidad química con los polisacáridos presentes en la cáscara, trabajabilidad de la mezcla y tiempos de curado.

Se seleccionaron cuatro aglutinantes principales: almidón de maíz, pectina reforzada, agar y glicerina como plastificante, explorando combinaciones simples y mixtas. Se realizó un proceso de cribado inicial para descartar formulaciones con problemas de retracción, fisuración o fragilidad, seleccionando aquellas que presentaron mayor estabilidad dimensional y cohesión estructural.

En el marco del estudio, no se identificaron referentes de materiales con propiedades aglutinantes comparables a las de la cáscara de naranja, lo que refuerza el carácter exploratorio del sistema material desarrollado.

3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y FABRICACIÓN DE PROBETAS

Se diseñó una matriz experimental factorial considerando tres variables independientes: porcentaje de cáscara (50%, 60%, 70% y 80%), tipo de aglutinante (cuatro opciones) y contenido de plastificante (0%, 5% y 10%). Esto dio lugar a 24 formulaciones, cada una replicada tres veces, obteniendo un total de 72 probetas.

Las probetas fueron fabricadas en distintas geometrías según los requerimientos de ensayo: discos de 29 y 100 mm de diámetro para ensayos acústicos en tubo de impedancia, placas de 300 × 300 × 30 mm para ensayos térmicos, y cubos de 50 × 50 × 30 mm para ensayos físicos.

El proceso de fabricación incluyó mezclado mecánico controlado, desaireado manual o por vacío, vertido en moldes

normalizados y compactación ligera. El curado se realizó en dos etapas: una inicial a temperatura ambiente para permitir el gelificado de la matriz y una etapa final en horno a 60 °C hasta alcanzar estabilidad de masa. Posteriormente, las probetas fueron acondicionadas en cámara climática a 23 ± 2 °C y 50 ± 5% de humedad relativa durante 48 horas antes de su ensayo.

4. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

Los ensayos de laboratorio se estructuraron en cuatro grupos: físicos, térmicos, acústicos y de biodegradabilidad.

Los ensayos físicos incluyeron la determinación de densidad (ASTM D792), absorción de agua y porosidad (ASTM C272), así como evaluación de estabilidad dimensional y resistencia mecánica básica en compresión y flexión.

Los ensayos térmicos se realizaron conforme a la norma NCh 853, utilizando el método de placa caliente guardada para determinar la conductividad térmica. Se midió el diferencial térmico entre caras del material mediante cámara infrarroja, permitiendo evaluar su comportamiento como aislante.

Los ensayos acústicos se llevaron a cabo mediante tubo de impedancia conforme a la norma ISO 10534-2, obteniendo coeficientes de absorción en un rango de frecuencias entre 125 y 4000 Hz. Los resultados fueron comparados con poliestireno expandido (EPS) de 30 mm como material de referencia.

El análisis de los datos incluyó un ANOVA multifactorial para identificar interacciones significativas entre variables, complementado con pruebas post hoc de Tukey.

En paralelo, se realizó un ensayo de biodegradabilidad basado en la norma ASTM D6400-04. Se prepararon probetas que fueron enterradas en condiciones controladas durante seis semanas, registrando su degradación progresiva para proyectar su comportamiento en condiciones de compostaje.

5. VALIDACIÓN EN CONTEXTO APLICADO

Finalmente, se desarrolló una simulación de aplicación en la Estación Intermodal La Cisterna, modelando el andén en software CAD y parametrizando sus superficies con las propiedades obtenidas experimentalmente. Mediante herramientas de simulación acústica y térmica (Odeon/EASE y COMSOL Multiphysics), se evaluó el comportamiento del sistema antes y después de la instalación de los paneles.

Se estableció como criterio de desempeño una reducción mínima de 3 dB(A) en zonas críticas, junto con mejoras en el confort térmico. Para validar estos resultados, se construyó un prototipo y se realizaron pruebas de campo en un sector representativo, midiendo presión sonora en condiciones reales.

Este conjunto de procedimientos permitió evaluar el material tanto en condiciones controladas como en su aplicación en un entorno urbano, aportando evidencia para su potencial implementación a escala.

RESULTADOS

La caracterización del material desarrollado permitió obtener información cuantitativa sobre su comportamiento térmico, acústico, físico-mecánico y su potencial de biodegradabilidad. A continuación, se presentan los principales hallazgos en comparación con el material de referencia (poliestireno expandido, EPS 30 mm).

FICHA TÉCNICA DEL MATERIAL

TABLA 1. Propiedades físico-mecánicas y ambientales del material óptimo (70% cáscara + pectina).

PROPIEDAD	VALOR OBTENIDO	MÉTODO DE ENSAYO
Densidad aparente	0,35 g/cm³	ASTM D792
Conductividad térmica	0,092 W/m·K	NCh 853
Coef. absorción acústica (NRC)	0,62	ISO 10534-2
Absorción de agua (24 h)	6,8%	ASTM C272
Resistencia a compresión	0,85 MPa	ASTM D695
Biodegradabilidad	>85% en 120 días	Ensayo de compostaje



FIGURA 1. *Probetas fabricadas para ensayos de conductividad térmica y acústica. Fuente: Lara Yáñez, 2024.*



FIGURA 2. *Panel modular prototipo instalado en tramo de prueba de la Estación Intermodal La Cisterna. Fuente: Lara Yáñez, 2024.*

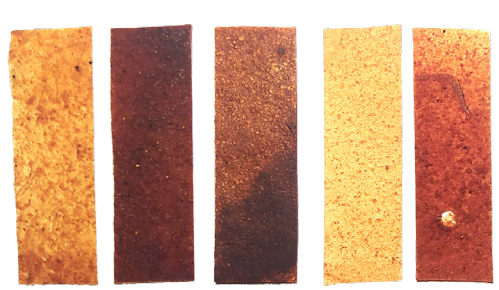


FIGURA 3. *Ensayo en tubo de impedancia para determinar coeficiente de absorción acústica. Fuente: Lara Yáñez, 2024.*

IMÁGENES Y PROTOTIPOS

Las Figuras 1, 2 y 3 ilustran la materialidad de los paneles desarrollados. La caracterización del material permitió definir dimensiones basadas en módulos acústicos existentes: forma cuadrada de 25 × 25 cm y espesor mínimo de 3 cm, equilibrando funcionalidad acústica y térmica. Se exploraron distintas geometrías para lograr coherencia formal tanto en unidades individuales como en su configuración modular. Desde el inicio, el diseño incorporó consideraciones de fabricación, reconociendo la interdependencia entre producto y proceso. Se analizaron ángulos y pliegues que facilitaran el desmolde, validando su viabilidad mediante una matriz de ensayo en madera. Esta etapa permitió optimizar proporciones, asegurar precisión en la producción y mejorar el desempeño del material.

BIODEGRADABILIDAD

La Figura 4 grafica que fue posible predecir el comportamiento de las probetas en condiciones de compostaje debido a la alta higroscopicidad del material, aspecto que fue determinante tras los ensayos de absorción de agua e hinchamiento. Dada la progresión en la descomposición de las probetas en este primer bloque, se proyecta que la degradación del material en un plazo de seis meses en condiciones extremas.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Los resultados del ensayo de conductividad térmica, demostrados en la Tabla 2 que compara la conductividad térmica de diversos materiales, mostraron que las formulaciones óptimas de bioplástico de cáscara de naranja alcanzaron valores entre 0,08 y 0,10 W/m·K, lo que corresponde a un rendimiento equivalente o superior al EPS de referencia (0,036–0,040 W/m·K), considerando el espesor de las placas de ensayo (30 mm).

TABLA 2. *Comparación de conductividad térmica (W/m·K).*

MATERIAL	ESPESOR (MM)	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/M·K)
EPS (referencia)	30	0,038
Bioplástico Naranja (70% + Almidón)	30	0,085
Bioplástico Naranja (70% + Pectina)	30	0,092
Bioplástico Naranja (60% + Agar)	30	0,098
Bioplástico Naranja (70% + Glicerina)	30	0,089

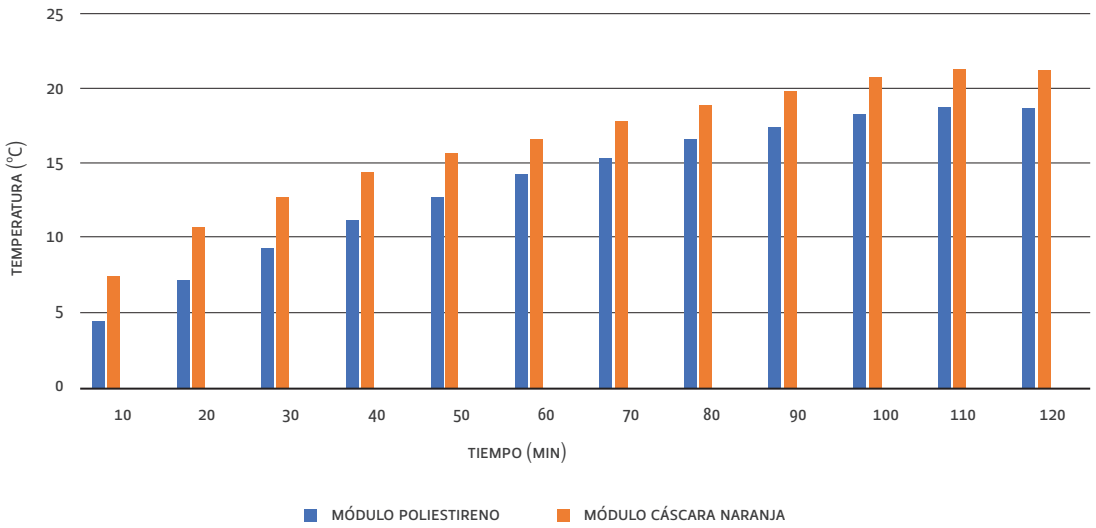


GRÁFICO 1. Conductividad térmica comparada con EPS Fuente: Lara Yáñez, 2024.

El Gráfico 1 muestra las mediciones de temperatura realizadas cada 5 minutos durante un ensayo de 2 horas, comparando los paneles propuestos con un panel patrón de poliestireno expandido. Los resultados evidencian una mayor capacidad de aislación térmica en los paneles de cáscara de naranja, con un diferencial térmico de 21,12 ˚C, superando en un 14 % al poliestireno expandido (18,6 ˚C) a los 120 minutos. Esta mejora se atribuye a la alta porosidad y estructura esponjosa del material, que favorecen la retención de calor y reducen la conductividad térmica. Su incorporación en sistemas compuestos de aislamiento representa una alternativa eficiente y sostenible para aplicaciones térmicas.

Estos resultados deben considerar que el comportamiento registrado responde a un escenario específico dentro de una cámara térmica, con el material dispuesto de forma vertical y ortogonal durante un periodo de 120 minutos. En contraste, las propiedades térmicas en contextos reales de uso están sujetas a variables externas adicionales, como la humedad ambiental y la complejidad de su integración en sistemas constructivos urbanos.

A lo anterior, se suma la influencia de la geometría en los datos recolectados. El desempeño observado, que arrojó un diferencial de 21,12 ˚C, es un resultado directamente vinculado al espesor específico de 30 mm utilizado en el panel de cáscara de naranja durante la prueba, lo que diferencia este valor de una constante térmica universal del material.

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA

Las pruebas en tubo de impedancia demostraron que las formulaciones de bioplástico con 70% de cáscara y 30% de aglutinante presentaron coeficientes de absorción acústica elevados en el rango medio (400–1600 Hz), con un comportamiento superior al EPS en esas bandas, como se puede apreciar en la Tabla 3.

TABLA 3. Coeficiente de absorción acústica por frecuencia

FRECUENCIA (HZ)	EPS (30 MM)	BIOPLÁSTICO NARANJA (70%+ALMIDÓN)	BIOPLÁSTICO NARANJA (70%+PECTINA)
125	0,10	0,15	0,18
250	0,18	0,28	0,30
500	0,25	0,45	0,50
1000	0,30	0,65	0,70
2000	0,32	0,68	0,72
4000	0,35	0,70	0,75

El Gráfico 2 presenta la comparación entre las curvas de absorción acústica, por frecuencia, entre la aislación acústica del panel poliestireno y el panel acústico de cáscara de naranja.

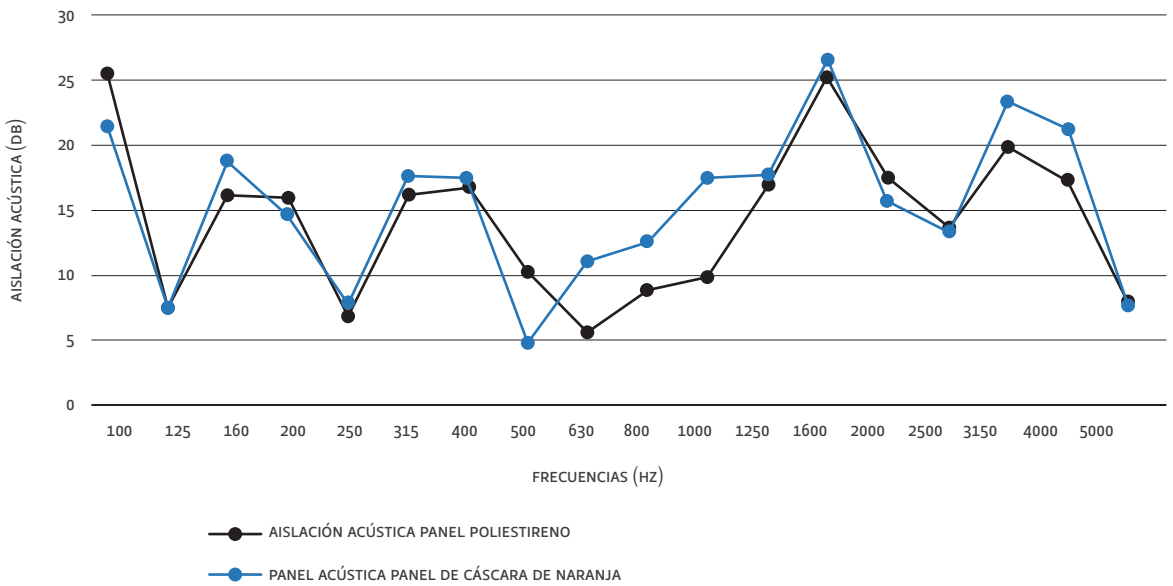


GRÁFICO 2. Curvas de absorción acústica por frecuencia. Fuente: Lara Yáñez, 2024.

Los resultados del Gráfico 2 evidencian que el panel de cáscara de naranja presenta una menor capacidad de aislación acústica en frecuencias bajas (100 a 400 Hz) en comparación con el poliestireno expandido. Sin embargo, entre 630 y 1600 Hz (frecuencias medias-altas), el panel supera consistentemente al poliestireno, destacando especialmente en los 1000 Hz, donde alcanza un 82 % más de aislación. La frecuencia más baja (100 Hz) favorece al poliestireno, mientras que el comportamiento superior del panel propuesto en frecuencias altas se atribuye a la porosidad de la cáscara de naranja, cuya estructura intercelular permite absorber ondas de menor longitud. Al analizar por rangos, se observa que el prototipo de cáscara de naranja tiene mejor desempeño en el rango medio (500 a 1600 Hz), con excepción de los 500 Hz. La máxima aislación registrada fue de 25,83 dB en los 1600 Hz. Aunque el poliestireno muestra un mejor comportamiento inicial, el panel propuesto mejora su rendimiento conforme aumenta la frecuencia. En términos generales, el panel de cáscara de naranja supera al poliestireno expandido en 12 de las 18 frecuencias analizadas, consolidando su eficacia en el rango medio-alto y evidenciando su potencial como material alternativo para aislación acústica.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en la investigación permiten situar el material desarrollado dentro de un marco comparativo con los aislantes convencionales utilizados en la industria de la construcción, como el poliestireno expandido (EPS). La caracterización térmica mostró valores de conductividad entre 0,08 y 0,10 W/m·K, superiores al EPS (≈0,038 W/m·K), pero suficientes para cumplir con rangos aceptables de aislación en aplicaciones de baja y media demanda, especialmente en climas templados como el de la Región Metropolitana de Santiago. La literatura sobre biomateriales indica que los compuestos lignocelulósicos tienden a presentar una mayor conductividad que los polímeros derivados del petróleo debido a su estructura porosa y heterogeneidad (González Donoso, 2020; Rupal y Tank, 2025). Sin embargo, esta aparente desventaja se ve compensada por su baja densidad, renovabilidad y biodegradabilidad, que representan atributos clave en un contexto de economía circular. En este sentido, los hallazgos destacan que la alta higroscopicidad del material permitió anticipar su comportamiento en compostaje, confirmando la relevancia de los ensayos de absorción e hinchamiento. Los resultados proyectan una biodegradación completa en aproximadamente seis meses bajo condiciones extremas, reforzando su potencial como alternativa sostenible en construcción.

En el ámbito acústico, los coeficientes de absorción obtenidos en frecuencias medias y altas (400–2000 Hz) superaron ampliamente al EPS, alcanzando un NRC de 0,62 frente a 0,32 del material de referencia. Este comportamiento concuerda con estudios previos sobre biocompuestos a base de fibras vegetales (Tedjosaputro et al., 2024), que han demostrado que la heterogeneidad interna y la micro-porosidad favorecen la disipación de energía sonora. Este hallazgo es particularmente relevante en el contexto de la Estación Intermodal La Cisterna, donde el ruido dominante se concentra en esas bandas de frecuencia, generadas por motores de buses y flujos peatonales masivos. Desde la

perspectiva de salud pública, esto significa un potencial impacto positivo en la reducción del estrés acústico de los usuarios, en línea con las recomendaciones de la OMS (2022) sobre límites de exposición al ruido urbano.

Las ventajas respecto a los aislantes convencionales se pueden sintetizar en tres dimensiones: ambientales, sociales y técnicas. Desde la dimensión ambiental, el uso de cáscara de naranja como materia prima representa una solución de valorización de residuos agroindustriales que, de otro modo, se convertirían en desechos orgánicos de alta carga contaminante. Además, el material es biodegradable y compostable, lo que contribuye a cerrar el ciclo de vida y reducir la huella de carbono asociada a la construcción. En lo social, el desarrollo de materiales basados en residuos abre oportunidades para la creación de cadenas de valor locales y colaboraciones entre el sector agrícola, la industria de la construcción y el mundo académico, fomentando la innovación territorial. Desde lo técnico, la modularidad de los paneles facilita su integración en sistemas constructivos existentes y su potencial personalización para distintas aplicaciones (muros divisorios, cielos acústicos, recubrimientos).

Sin embargo, la escalabilidad de este tipo de materiales enfrenta desafíos significativos. Uno de ellos es la variabilidad de la materia prima, ya que la composición química de la cáscara de naranja puede variar según la temporada, la variedad del fruto y las condiciones de procesamiento agroindustrial. Este factor puede afectar la consistencia de las propiedades del material, lo que obliga a establecer estándares de clasificación y protocolos de pretratamiento. Otro desafío es la resistencia mecánica limitada en comparación con materiales sintéticos, lo que restringe su uso en aplicaciones estructurales y lo posiciona principalmente como aislante complementario o recubrimiento. Además, la implementación a escala industrial requiere superar barreras de costo, ya que, si bien la materia prima es abundante y de bajo valor, los procesos de secado, molienda y curado demandan energía y tiempo, lo que puede elevar el costo de producción frente a aislantes convencionales producidos en masa.

En cuanto a la aceptación en la industria, la normativa de construcción juega un rol clave. Actualmente, la certificación de materiales en Chile se centra en el cumplimiento de normas NCh, lo que implica la necesidad de validar el bioplástico en laboratorios acreditados y realizar ensayos a escala real antes de su adopción en proyectos públicos o privados. Sin embargo, la tendencia hacia la construcción sustentable y los Objetivos de Desarrollo Sostenible abre un espacio para la incorporación de materiales innovadores en licitaciones de infraestructura, especialmente en proyectos que buscan certificaciones ambientales como LEED, BREEAM o CES.

Finalmente, la discusión sobre la viabilidad del material no debe limitarse a su desempeño técnico, sino considerar también su impacto sistémico. Tal como señala la Fundación Ellen MacArthur (2015), el verdadero potencial de los biomateriales no reside únicamente en reemplazar polímeros sintéticos, sino en transformar la relación entre residuos y recursos, generando ciclos productivos regenerativos. En este sentido, el panel modular de bioplástico de cáscara de naranja no solo constituye una alternativa material a los aislantes convencionales, sino también un modelo de innovación sostenible que integra diseño, ciencia y conciencia ambiental.

CONCLUSIÓN

La investigación demostró que es viable elaborar un panel modular aislante a partir de bioplásticos formulados con cáscara de naranja y aglutinantes de origen vegetal como una alternativa al uso más tradicional del poliestireno expandido (EPS). A modo de referencia, el EPS es el aislante térmico y acústico más utilizado en la construcción, gracias a su bajo costo, ligereza, facilidad de instalación y amplia disponibilidad. Su dominio en el mercado lo convierte en el estándar mínimo de desempeño frente al cual deben compararse nuevas alternativas sostenibles. Aunque otros materiales como la lana de vidrio ofrecen buenas propiedades, ellas presentan mayores costos y complejidad de instalación, lo que refuerza la preferencia por el EPS. En este contexto, comparar el biocompuesto de cáscara de naranja con el EPS resulta metodológicamente necesario: al demostrar un rendimiento térmico un 14% superior y propiedades acústicas competitivas, valida su potencial como alternativa sostenible y técnicamente viable para la construcción.

Las formulaciones óptimas exhibieron una conductividad térmica en el rango 0,08–0,10 W/m·K, un coeficiente de absorción acústica (NRC) aproximado de 0,62 para la formulación 70% cáscara + pectina, y una biodegradabilidad superior al 85% en ensayos de compostaje acelerado. Estos resultados indican que, aunque el desempeño térmico no iguala al de los aislantes poliméricos de alta especificación (p. ej. EPS en conductividad absoluta), el bioplástico ofrece una combinación competitiva de prestaciones acústicas, baja densidad y ventajas ambientales (valorización de residuos, compostabilidad), lo que lo posiciona como candidato excelente para aplicaciones no estructurales orientadas a mejorar el confort acústico y térmico en entornos urbanos (revestimientos, paneles modulares de andenes, cielos acústicos, mamparas).

Estos resultados se alinean con las tendencias descritas en la literatura sobre materiales lignocelulósicos y biocompuestos, especialmente en lo referido a su comportamiento acústico. La microestructura porosa y la heterogeneidad interna de estos compuestos favorecen la disipación de energía sonora, lo que se traduce en coeficientes de absorción elevados en rangos de frecuencia media y alta, tal como han reportado estudios previos. En paralelo, la presencia de componentes biogénicos y aire encapsulado en la matriz contribuye a una mayor conductividad térmica en comparación con espumas sintéticas de célula cerrada, lo que plantea desafíos en términos de eficiencia energética. Ante esta condición, la literatura especializada propone estrategias de diseño que incluyen geometrías moduladas, cámaras de aire y sistemas multicapa, orientadas a compensar la menor resistencia térmica sin comprometer el desempeño acústico. En este contexto, el bioplástico desarrollado a partir de cáscara de naranja demuestra una correspondencia significativa con el estado del arte: destaca por su capacidad de absorción sonora, su potencial de valorización ambiental y su adaptabilidad en procesos de manufactura modular. Además, su implementación abre posibilidades para generar cadenas de valor locales, reducir costos logísticos y fomentar empleo territorial, siempre que se articulen adecuadamente los sistemas de acopio y procesamiento. Estas ventajas funcionales, ambientales y socioeconómicas refuerzan su viabilidad como alternativa sostenible frente a los aislantes convencionales, aunque persisten desafíos técnicos que deben ser abordados mediante diseño y estrategias de integración constructiva.

POSIBILIDADES DE ESCALABILIDAD Y DESAFÍOS PARA IMPLEMENTACIÓN EN LA INDUSTRIA

La escalabilidad del biocompuesto desarrollado se proyecta como una oportunidad concreta para articular innovación material, sostenibilidad territorial y desarrollo productivo. Una estrategia clave consiste en establecer vínculos directos con plantas procesadoras de cítricos o empresas de jugos, lo que permitiría asegurar un suministro constante, homogéneo y trazable de cáscara como materia prima. Paralelamente, la implementación de plantas piloto y producción por lotes facilitaría la optimización de procesos críticos como el secado y la molienda, promoviendo economías de energía mediante recuperación de calor y uso eficiente de recursos. En una etapa inicial, se propone su aplicación en contextos de baja exigencia estructural pero alta demanda ambiental, como recubrimientos de andenes, paneles acústicos en estaciones o separadores interiores en edificios públicos. Estas aplicaciones podrían beneficiarse de certificaciones ambientales (LEED, BREEAM, CES), posicionando al material como una alternativa competitiva frente a aislantes convencionales.

No obstante, su inserción en la industria enfrenta desafíos técnicos y normativos que deben abordarse estratégicamente. La variabilidad estacional de la materia prima —en términos de variedad, humedad y composición de pectina y celulosa— exige protocolos robustos de clasificación y pretratamiento, incluyendo control de granulometría y ensayos rápidos de calidad. Las propiedades mecánicas y la durabilidad frente a humedad, radiación UV y agentes biológicos requieren mejoras o soluciones de diseño, como encapsulado o combinación con soportes rígidos, además de ensayos de envejecimiento y resistencia al fuego, indispensables para cumplir con exigencias regulatorias.

La ausencia de estándares específicos para bioplásticos en obra civil y transporte público demanda colaboraciones con laboratorios acreditados para validar el cumplimiento de normas NCh y códigos de edificación. Asimismo, los costes energéticos asociados al procesamiento —especialmente en las etapas de secado y molienda— deben ser optimizados mediante estrategias de recuperación de calor, uso de energías renovables y principios de economía circular. Finalmente, los tratamientos de seguridad vinculados a la inflamabilidad y la emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) deben ser evaluados rigurosamente, incorporando barreras físicas o retardantes compatibles con criterios de sostenibilidad.

RECOMENDACIONES SOBRE RECUBRIMIENTOS O ENCAPSULADOS PARA MEJORAR EL DESEMPEÑO EN CONDICIONES REALES

Para proyectar el uso del panel de cáscara de naranja más allá de condiciones controladas de laboratorio y asegurar su desempeño frente a humedad, roce y uso intenso, es necesario integrar estrategias de recubrimiento o encapsulado que permitan proteger el material sin comprometer su carácter biobasado ni su potencial circular. Dado que los ensayos demostraron una alta absorción de agua y un incremento significativo del hinchamiento debido a la naturaleza higroscópica de la pectina, celulosa y hemicelulosa presentes en la cáscara, resulta fundamental reducir la exposición directa a la humedad. Para ello, una primera recomendación es incorporar recubrimientos de origen natural o minerales, tales como ceras vegetales, emulsiones minerales o sellos biodegradables a base de polisacáridos modificados, que generan una película superficial que ralentiza el ingreso de agua sin sellar por completo la respiración del material, evitando condensación interna o pérdida de integridad estructural.

En aplicaciones donde el panel esté expuesto a tránsito de personas, roce constante o potencial vandalismo como ocurre en la Estación Intermodal La Cisterna se sugiere no dejar el biocompuesto expuesto directamente, sino integrarlo dentro de un sistema de encapsulado tipo "sándwich". En esta configuración, el panel funciona como núcleo aislante, protegido por una capa externa más resistente que absorba impactos y desgaste. Dichas capas pueden consistir en laminados delgados de madera, tableros de baja densidad, placas microperforadas o paneles acústicos continuos que permitan mantener intactas las propiedades térmicas y acústicas del material interno sin quedar vulnerable a daños físicos. Esta estrategia, además de proteger, facilita la mantención y prolonga la vida útil del sistema completo.

En situaciones donde sea fundamental preservar la capacidad de absorción acústica visible, una alternativa viable es recubrir el panel con tejidos técnicos, mallas respirables o geotextiles no tejidos. Este tipo de terminación ofrece una barrera frente al polvo, suciedad y desgaste por roce, a la vez que permite el paso del sonido hacia el material absorbente, sin alterar su comportamiento acústico. Esta solución también tiene la ventaja de ser reemplazable, lo que contribuye a un diseño orientado al mantenimiento y la extensión del ciclo de vida.

Finalmente, cualquiera de las soluciones propuestas debe considerar criterios de desensamblaje y separación de materiales, de forma que el panel pueda ser retirado, mantenido o reciclado sin depender de uniones irreversibles. Evitar recubrimientos rígidos, termoestables o adheridos permanentemente es fundamental para preservar la compostabilidad o revalorización futura del núcleo de cáscara de naranja.

En este contexto, se plantea la vinculación con pequeñas y medianas empresas como vía estratégica para escalar esta solución, articulando proyectos de política pública orientados a la capacitación, la implementación territorial y el acceso a fondos gubernamentales en sustentabilidad, innovación y emprendimiento local.

REFERENCIAS:

Asyraf, M. R. M., Syamsir, A., Zahari, N. M., Supian, A. B. M., Ishak, M. R., Sapuan, S. M., Sharma, S., Rashedi, A., Razman, M. R., Zakaria, S. Z. S., Ilyas, R. A., & Rashid, M. Z. A. (2022). Product development of natural fibre-composites for various applications: Design for sustainability. *Polymers, 14*(5), 920. https://doi.org/10.3390/polym14050920

Baillie, C., & Vanasupa, L. (2003). *Navigating the materials world: A guide to understanding materials behavior*. Academic Press.

Bak-Andersen, M. (2018). Cuando la materia conduce a la forma: El diseño guiado por el material (MDD, Material Driven Design) y la sostenibilidad. *Temes de Disseny, 34*, 10–31. https://www.raco.cat/index.php/Temes/article/download/343481/434620

Cámara Chilena de la Construcción. (2022). *Memoria anual CChC 2022*. https://old.cchc.cl/centro-de-informacion/publicaciones/publicaciones-otras-publicaciones/memoria-anual-cchc-2022

Collivignarelli, M. C., Cillari, G., Ricciardi, P., Miino, M. C., Torretta, V., Rada, E. C., & Abbà, A. (2020). The production of sustainable concrete with the use of alternative aggregates: A review. *Sustainability, 12*(19), 7903. https://doi.org/10.3390/su12197903

Gamón Torres, R., & Carpio Toral, M. P. (2014). *Diseño estructural de una vivienda aplicando el sistema constructivo steel framing* [Trabajo de titulación de pregrado, Universidad del Azuay]. Repositorio Institucional de la Universidad del Azuay. http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/3635

Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition* (Vol. 1). https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition.* https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition

González Donoso, Á. A. (2020). *Evaluación de propiedades físicas, mecánicas y térmicas de un biomaterial elaborado con micelio de hongos de pudrición café en sustratos lignocelulósicos* [Tesis de pregrado, Universidad de Valparaíso]. Repositorio Bibliotecas UV. https://repositoriobibliotecas.uv.cl/items/051ac0cd-a5d9-490d-9f92-d41f79b47ed3

Hernández-Rodríguez, E. A., Estrada-Arteaga, C., & Robles, I. (2026). Agro-industrial waste potential toward a circular bioeconomy of orange peel. In K. Joshi, L. Navalgund, N. M. Mubarak, M. H. Dehghani, & V. B. Shet (Eds.), *Waste engineering and management* (pp. 265–286). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-032-15915-1_13

Huuhka, S., & Vestergaard, I. (2020). Building conservation and the circular economy: A theoretical consideration. *Journal of Cultural Heritage Management and Sustainable Development, 10*(1), 29–40. https://doi.org/10.1108/JCHMSD-06-2019-0081

Lara Yáñez, M. A. (2024). *Diseño de un panel modular desarrollado con bioplásticos de cáscaras de naranjas para la aislación acústica y térmica del área de andenes de la "Estación Intermodal La Cisterna"* [Tesis de magíster, Universidad del Desarrollo, Facultad de Diseño]. https://hdl.handle.net/11447/9286

Layseca Astudillo, G. (2021). *Año Internacional de las Frutas y Verduras 2021: Oportunidades para la agricultura chilena.* Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, Ministerio de Agricultura de Chile. https://bibliotecadigital.odepa.gob.cl/bitstream/handle/20.500.12650/70606/ArtInternacionalFrutasVerduras2021.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2021). *Sexto reporte del estado del medio ambiente.* https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/12/REMA-2021.pdf

Ministerio del Medio Ambiente. (2023). *Mapa de ruido del Gran Santiago Urbano 2023.* https://ruido.mma.gob.cl/mapas-de-ruido/

Naciones Unidas. (2021). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2021.* https://digitallibrary.un.org/record/3932350/files/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2021_Spanish.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2018). *Environmental noise guidelines for the European region.* https://www.who.int/publications/i/item/9789289053563

Organización Mundial de la Salud. (2022). *Norma mundial para la escucha segura.* https://www.who.int/es/news/item/02-03-2022-who-releases-new-standard-to-tackle-rising-threat-of-hearing-loss

Pathak, P. D., Mandavgane, S. A., & Kulkarni, B. D. (2017). Fruit peel waste: Characterization and its potential uses. *Current Science, 113*(3), 444–454. https://doi.org/10.18520/cs/v113/i03/444-454

Prasittisopin, L., Termkhajornkit, P., & Kim, Y. H. (2022). Review of concrete with expanded polystyrene (EPS): Performance and environmental aspects. *Journal of Cleaner Production, 366*, 132919. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132919

Raj, H., Tripathi, S., Bauri, S., Choudhury, A. M., Mandal, S. S., & Maiti, P. (2023). Green composites using naturally occurring fibers: A comprehensive review. *Sustainable Polymer & Energy, 1*(2), 10010. https://doi.org/10.35534/spe.2023.10010

Rupal, A., & Tank, I. (2025). Materials efficiency in construction: Development, selection, and life cycle assessment. In D. Bajaj (Ed.), *Handbook of construction project management* (pp. 1461–1486). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-96-7631-6_48

Tedjosaputro, M., Evangel, S., Vahdati, F., & Amiri, K. (2024). Examining sound insulation properties of bamboo-based composite material: A literature review. In *57th International Conference of the Architectural Science Association*, ANZAScA 2024 (pp. 426–433). Architectural Science Association. https://archscience.org/wp-content/uploads/2025/03/Examining-sound-insulation-properties-of-bamboo-based-composite-material_A-Literature-Review.pdf

Wu, G. A., Terol, J., Ibanez, V., López-García, A., Pérez-Román, E., Borredá, C., Domingo, C., Tadeo, F. R., Carbonell-Caballero, J., Alonso, R., Curk, F., Du, D., Ollitrault, P., Roose, M. L., Dopazo, J., Gmitter, F. G., Rokhsar, D. S., & Talon, M. (2018). Genomics of the origin and evolution of *Citrus*. *Nature, 554*(7692), 311–316. https://doi.org/10.1038/nature25447

MANUEL LARA YÁNEZ
manuel.lara@uc.cl
COORDINADOR DE INNOVACIÓN Y EXPERIENCIAS, VICERRECTORÍA DE INTELIGENCIA DIGITAL, PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE, SANTIAGO, CHILE
ORCID ID: 0009-0008-8230-5903

DISEÑADOR INDUSTRIAL DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA Y MAGÍSTER EN DISEÑO E INNOVACIÓN SOSTENIBLE DE LA UNIVERSIDAD DEL DESARROLLO. FUE COORDINADOR EN HUB DE INNOVACIÓN UTEM, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA, SANTIAGO, CHILE. SUS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN SE ORIENTAN AL DISEÑO ESTRATÉGICO, LA INNOVACIÓN PÚBLICA Y EL DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES.

CRISTÓBAL MORENO MUÑOZ
cristobal.morenom@usach.cl
DIRECTOR DEL DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE GESTIÓN
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
INVESTIGADOR PRINCIPAL DEL CENTRO DE INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍA Y DISEÑO DE MATERIALES PARA EL ENTORNO CONSTRUIDO.
ORCID ID: 0000-0002-6477-5118

DISEÑADOR INDUSTRIAL, DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA METROPOLITANA, CON ESPECIALIDAD TÉCNICA EN INGENIERÍA Y DESARROLLO EN MATERIALES PLÁSTICOS DEL CENTRO TECNOLÓGICO FUNDACIÓN ASCAMM, ESPAÑA, Y DOCTOR EN DISEÑO, FABRICACIÓN Y GESTIÓN DE PROYECTOS INDUSTRIALES, UNIVERSITAT POLITÉCNICA DE VALENCIA. SU LÍNEA DE INVESTIGACIÓN SE CONCENTRA EN DISEÑO Y CONSULTORÍA EN DESARROLLO DE PRODUCTOS EN POLÍMEROS; METODOLOGÍAS PROYECTUALES PARA EL DESARROLLO DEL DISEÑO COMO DISCIPLINA VINCULANTE EN ÁREAS DEL QUEHACER EDUCATIVO Y PROFESIONAL.