



**UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN**  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL  
SEDE CONCEPCIÓN**

**ANÁLISIS DE MATERIALES PARA AISLAMIENTO TÉRMICO CON  
IMPACTO AMBIENTAL REDUCIDO Y SU POTENCIAL APLICACIÓN EN  
CHILE**

**Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil**

**Profesor tutor: Dr. Mauricio Alejandro Pradena Miquel  
Estudiante: Constanza Andrea Sanhueza Poblete**

© Constanza Andrea Sanhueza Poblete. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile

2025

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En \_\_\_\_\_, el \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ los abajo firmantes dejan constancia que el (la) estudiante \_\_\_\_\_ de la carrera de \_\_\_\_\_ ha aprobado la tesis para optar al título de \_\_\_\_\_ con nota de \_\_\_\_\_.

---

Profesor Evaluador

---

Profesor Evaluador

---

Profesor Evaluador

## DEDICATORIA

*Este trabajo se lo dedico a mis padres, quienes siempre creyeron en mí incluso más de lo que yo misma lo hacía, su apoyo incondicional, dedicación, esfuerzo y amor fueron los pilares que me sostuvieron en este camino. Dejaron de lado sueños y comodidades para que yo pudiera alcanzar los míos.*

*A mis padrinos y primas, por ser mi refugio y mi hogar en Concepción cuando estaba lejos de casa. Su compañía, cariño y apoyo me brindaron la seguridad y calidez que tanto necesitaba en momentos difíciles.*

*A mi familia, por ser mi raíz y motor, por cada palabra de aliento, muestra de amor y gesto que me impulsó a seguir adelante.*

*A mi Mami Juana, por sus oraciones diarias, por darme paz con su amor infinito y acompañarme en cada paso.*

*Para mi querido Max, por ser mi fiel compañía de cuatro patas en casa, por llenar mis días de alegría y recibirme con amor incondicional cada fin de semana.*

*A Magdalena, Ignacia y Eduardo, quienes con su amistad hicieron que cada día de esta carrera fuera menos pesada.*

*Especialmente a mis dos tatas, Tata Porfirio y Tata Mon, que aunque no estén físicamente conmigo, su amor y ejemplo me continúan guiando en cada proceso. Siempre supe que no podía rendirme ni fallarles, ya que ustedes se fueron sabiendo que tendría éxito y se los demostraré cada día.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, deseo expresar mis agradecimientos al profesor guía, Dr. Mauricio Pradena Miquel, por su apoyo, paciencia, dedicación y orientación, los cuales fueron fundamentales para la culminación de esta investigación, brindándome valiosos conocimientos.

Asimismo, agradezco profundamente a Javiera Padilla por su apoyo incondicional, su sabiduría y su compañía a lo largo de este proceso. Su escucha atenta en momentos de frustración y sus palabras de aliento fueron un pilar fundamental para no perder la confianza en mí misma. A lo largo de estos años de carrera, su constante motivación ha contribuido significativamente en mi desarrollo personal y profesional.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1. MOTIVACIÓN.....	3
1.2. OBJETIVOS .....	5
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
1.3. ANTECEDENTES GENERALES.....	6
<b>CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA</b> .....	<b>9</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	9
2.2. CASOS DE ESTUDIO .....	9
2.3. PROPIEDADES Y CONCEPTOS CONSIDERADOS EN EL ANÁLISIS .....	11
2.3.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	11
2.3.2. RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA.....	11
2.3.3. CARBONO EMBEBIDO.....	12
2.3.4. ENERGÍA EMBEBIDA .....	12
2.3.5. BIODEGRADABILIDAD.....	13
2.3.6. TRANSPORTE .....	13
2.3.7. RESISTENCIA AL FUEGO.....	13
2.3.8. USO DE AGLUTINANTE.....	14
2.3.9. PLAN DE PREVENCIÓN Y DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (PPDA).....	14
2.3.10. REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES (OGUC) .....	15
2.3.11. ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE .....	15
2.4. MATERIALES ALTERNATIVOS.....	16
2.4.1. CORTEZA DE EUCALIPTO .....	16
2.4.2. CELULOSA .....	18

2.4.3. CAÑAMO .....	19
2.4.4. LINO .....	21
2.4.5. LANA DE OVEJA.....	23
2.4.6. TRIGO .....	24
2.5. MÉTODO DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO .....	27
2.6. ESTRUCTURA JERÁRQUICA MEDIANTE EL MÉTODO AHP .....	29
2.6.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO .....	29
2.6.2. IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS .....	30
2.6.2.1. CRITERIO: RENDIMIENTO .....	31
2.6.2.2. CRITERIO: SOSTENIBILIDAD.....	31
2.6.2.3. CRITERIO: SEGURIDAD .....	33
2.6.2.4. CRITERIO: REGLAMENTACIÓN SUSTENTABLE .....	34
2.6.3. ALTERNATIVAS.....	36
2.6.4. ÁRBOL DE JERARQUÍAS.....	37
2.7. COMPARACIÓN POR PARES.....	37
2.8. MECANISMO DE VERIFICACIÓN DE COHERENCIA.....	38
2.9. EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD .....	39
<b>CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>40</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	40
3.2. COMPARACIÓN POR PARES DE CRITERIOS.....	40
3.2.1. VERIFICACIÓN DE COHERENCIA DE CRITERIOS .....	41
3.3. COMPARACIÓN POR PARES DE SUB-CRITERIOS .....	41
3.3.1. VERIFICACIÓN DE COHERENCIA DE SUB-CRITERIOS .....	42
3.4. ANÁLISIS DE MATERIALES.....	42
3.5. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS .....	55
3.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	58
<b>CAPITULO 4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO 1. MATRICES DE COMPARACIÓN.....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO 2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE SUB-CRITERIOS.....</b>	<b>92</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. VARIABLES DE ESTUDIO .....	10
FIGURA 2. ÁRBOL DE JERARQUÍAS DEL ESTUDIO.....	37
FIGURA 3. DESEMPEÑO GLOBAL DE CADA ALTERNATIVA .....	58
FIGURA 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.....	59
FIGURA 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA.....	60
FIGURA 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL CARBONO EMBEBIDO .....	60
FIGURA 7. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA ENERGÍA EMBEBIDA .....	61
FIGURA 8. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA BIODEGRADABILIDAD .....	61
FIGURA 9. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL TRANSPORTE .....	62
FIGURA 10. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RESISTENCIA AL FUEGO .....	62
FIGURA 11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL USO DE AGLUTINANTE.....	63
FIGURA 12. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL PPDA.....	63
FIGURA 13. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA OGUC.....	64
FIGURA 14. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE.....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN DE PROPIEDADES DE MATERIALES AISLANTES .....	27
TABLA 2. ESCALA FUNDAMENTAL DEL MÉTODO AHP .....	29
TABLA 3. CRITERIOS Y SUS RESPECTIVOS SUB-CRITERIOS APLICADOS.....	30
TABLA 4. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....	31
TABLA 5. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE FACTOR DE RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DE AGUA .....	31
TABLA 6. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE CARBONO EMBEBIDO .....	32
TABLA 7. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE ENERGÍA EMBEBIDA .....	32
TABLA 8. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE BIODEGRADABILIDAD.....	33
TABLA 9. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE TRANSPORTE .....	33
TABLA 10. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE RESISTENCIA AL FUEGO .....	34
TABLA 11. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO DE USO DE AGLUTINANTE .....	34
TABLA 12. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO PLAN DE PREVENCIÓN Y DE DESCONTAMINACIÓN .....	35
TABLA 13. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA OGUC.....	35
TABLA 14. MEDICIÓN DEL SUB-CRITERIO ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE .....	36
TABLA 15. ALTERNATIVAS DE MATERIALES BIOAISLANTES Y CONVENCIONALES.....	36
TABLA 16. PONDERACIÓN DE CRITERIOS .....	40
TABLA 17. RELACIÓN DE CONSISTENCIA DE CRITERIOS .....	41
TABLA 18. RELACIÓN DE CONSISTENCIA DE SUB-CRITERIOS.....	42

<b>TABLA 19. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....</b>	<b>43</b>
<b>TABLA 20. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LA RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA .....</b>	<b>44</b>
<b>TABLA 21. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO AL CARBÓN EMBEBIDO .....</b>	<b>45</b>
<b>TABLA 22. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LA ENERGÍA EMBEBIDA .....</b>	<b>46</b>
<b>TABLA 23. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LA BIODEGRADABILIDAD.....</b>	<b>48</b>
<b>TABLA 24. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO AL TRANSPORTE .</b>	<b>49</b>
<b>TABLA 25. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LA RESISTENCIA AL FUEGO.....</b>	<b>51</b>
<b>TABLA 26. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO AL USO DE AGLUTINANTE.....</b>	<b>52</b>
<b>TABLA 27. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO AL PPDA .....</b>	<b>53</b>
<b>TABLA 28. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LA REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA OGUC.....</b>	<b>54</b>
<b>TABLA 29. COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS RESPECTO A LOS ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE .....</b>	<b>55</b>
<b>TABLA 30. DESEMPEÑO DE CADA ALTERNATIVA RESPECTO A LOS SUBCRITERIOS .....</b>	<b>56</b>
<b>TABLA 31. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....</b>	<b>81</b>
<b>TABLA 32. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA.....</b>	<b>82</b>
<b>TABLA 33. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: CARBONO EMBEBIDO.....</b>	<b>83</b>
<b>TABLA 34. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: ENERGÍA EMBEBIDA .....</b>	<b>84</b>

<b>TABLA 35. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: BIODEGRADABILIDAD.....</b>	<b>85</b>
<b>TABLA 36. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: TRANSPORTE .....</b>	<b>86</b>
<b>TABLA 37. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: RESISTENCIA AL FUEGO .....</b>	<b>87</b>
<b>TABLA 38. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: USO DE AGLUTINANTE .....</b>	<b>88</b>
<b>TABLA 39. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: PPDA.....</b>	<b>89</b>
<b>TABLA 40. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA OGUC.....</b>	<b>90</b>
<b>TABLA 41. DESEMPEÑO SUB-CRITERIO: ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE .....</b>	<b>91</b>
<b>TABLA 42. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA .....</b>	<b>92</b>
<b>TABLA 43. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA.....</b>	<b>92</b>
<b>TABLA 44. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: CARBONO EMBEBIDO.....</b>	<b>93</b>
<b>TABLA 45. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: ENERGÍA EMBEBIDA .....</b>	<b>93</b>
<b>TABLA 46. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: BIODEGRADABILIDAD.....</b>	<b>93</b>
<b>TABLA 47. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: TRANSPORTE.....</b>	<b>94</b>
<b>TABLA 48. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: RESISTENCIA AL FUEGO .....</b>	<b>94</b>
<b>TABLA 49. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: USO DE AGLUTINANTE.....</b>	<b>94</b>
<b>TABLA 50. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD: PPDA .....</b>	<b>95</b>

**TABLA 51. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD:  
REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA OGUC..... 95**

**TABLA 52. ANÁLISIS DE PRIORIZACIÓN EN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD:  
ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE ..... 95**

## RESUMEN

El sector de la construcción representa aproximadamente el 37% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), de las cuales el 10% proviene de la producción de materiales de construcción. En Chile, este sector contribuye cerca del 23% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI), evidenciando la necesidad de adoptar soluciones más sostenibles. Actualmente, los materiales aislantes convencionales, como el poliestireno expandido y la lana de vidrio, presentan un alto impacto ambiental debido a su elevada huella de carbono y energía embebida. Sin embargo, a pesar de los compromisos internacionales de Chile, como el Acuerdo de París y la meta de neutralidad de carbono para 2050, la falta de regulaciones obligatorias y de incentivos ha dificultado la implementación de alternativas ecológicas alineadas con estos objetivos.

Ante esta problemática, la presente investigación analiza la posible implementación de materiales bio-aislantes como alternativas sostenibles en la construcción. Para ello, se analizó materiales como la corteza de eucalipto, celulosa, cáñamo, lino, lana de oveja y trigo, comparándolos con aislantes convencionales mediante el Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés).

Los antecedentes evidencian que los materiales bio-aislantes presentan una alta eficiencia térmica y un menor impacto ambiental. La celulosa (0,038 W/m<sup>2</sup>\*K) y el lino (0,033 W/m<sup>2</sup>\*K) demuestran una conductividad térmica comparable a la lana de roca (0,033 W/m<sup>2</sup>\*K) y el poliestireno extruido (0,032 W/m<sup>2</sup>\*K). Asimismo, en términos de sostenibilidad, el cáñamo sobresale por su bajo carbono embebido (0,14 kg CO<sub>2</sub>eq/kg). Por otro lado, la lana de oveja destaca con la menor energía embebida (3,59 MJ/kg), en contraste con los valores significativamente más altos de los aislantes sintéticos.

El método AHP identificó en puntaje a la celulosa (0,142), la corteza de eucalipto (0,111) y la lana de oveja (0,109) como las opciones más equilibradas en cuanto a rendimiento, sostenibilidad, seguridad y regulación. Mientras que los aislantes sintéticos obtuvieron puntuaciones más bajas, como el poliestireno expandido (0,057), el poliestireno extruido (0,060) y el poliuretano de (0,076).

Por último, se realizó un análisis de sensibilidad con el propósito de evaluar como la variación en la ponderación de cada sub-criterio afecta la priorización de las alternativas. Se generaron más de 60 casos de estudio, en los cuales se evidenció una clara tendencia en la que los materiales naturales o bio-aislantes mantienen una alta ponderación en la mayoría de los sub-criterios evaluados, reforzando su potencial como material para aplicar en la construcción sostenible.

## ABSTRACT

The construction sector accounts for approximately 37% of global carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions, of which 10% comes from the production of construction materials. In Chile, this sector contributes about 23% of total greenhouse gas (GHG) emissions, highlighting the need to adopt more sustainable solutions. Currently, conventional insulation materials, such as expanded polystyrene and glass wool, have a high environmental impact due to their high embedded carbon and embedded energy. However, despite Chile's international commitments, such as the Paris Agreement and the goal of carbon neutrality by 2050, the lack of mandatory regulations and incentives has hindered the implementation of ecological alternatives aligned with these objectives.

In view of this problem, this research analyzes the possible implementation of bio-insulation materials as sustainable alternatives in construction. To achieve this, materials such as eucalyptus bark, cellulose, hemp, linen, sheep wool and wheat were analysed, comparing them with conventional insulators using the Analytical Hierarchical Process (AHP).

The background evidence shows that bio-insulating materials have high thermal efficiency and a lower environmental impact. Cellulose (0.038 W/m<sup>2</sup>\*K) and linen (0.033 W/m<sup>2</sup>\*K) demonstrate thermal conductivity comparable to rock wool (0.033 W/m<sup>2</sup>\*K) and extruded polystyrene (0.032 W/m<sup>2</sup>\*K). In terms of sustainability, hemp also stood out for its low embedded carbon (0.14 kg CO<sub>2</sub>eq/kg). On the other hand, sheep wool stands out with the lowest embedded energy (3,59 MJ/kg), in contrast to the significantly higher values of synthetic insulators.

The AHP method identified cellulose (0.142), eucalyptus bark (0.111), and sheep wool (0.109) as the most balanced options in terms of performance, sustainability, safety and regulation. Synthetic insulation scored lower, such as expanded polystyrene (0.057), extruded polystyrene (0.060), and polyurethane (0.076), obtained lower scores.

Finally, a sensitivity analysis was performed to evaluate how the variation in the weighting of each sub-criterion affects the prioritization of the alternatives. More than 60 case studies were generated, in which a clear trend is evident where natural or bio-insulating materials maintain a high weighting in most of the sub-criteria evaluated, reinforcing their potential as a potential material to be applied in sustainable construction.

# CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. MOTIVACIÓN

El incremento del consumo de energía y la emisión de gases contaminantes en la producción de materiales de aislación térmica convencionales, ha llevado a la necesidad de adoptar alternativas ecológicas en el diseño y la edificación. Según el último informe realizado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y el Global Alliance for Buildings and Construction (Global ABC), reportan que el sector de la construcción representa el 37% de las emisiones de dióxido de carbono a nivel global y que el 10% de estas emisiones proviene de la producción de materiales (UNEP, 2024). En Chile, la escasa regulación y la falta de incentivos en el sector de la construcción han impedido el levantamiento de información sobre el impacto ambiental. No obstante, desde la publicación del Tercer Informe Bienal de Actualización sobre Cambio Climático en 2018, la Cámara Chilena de la Construcción ha desarrollado estimaciones de emisiones considerando el ciclo de vida completo de los proyectos. A partir de estos análisis, se ha proyectado que el sector de la construcción podría representar aproximadamente un 23% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero en el país (de Vivienda y Urbanismo et al., 2021).

De igual forma, la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable de Chile en el año 2013 estableció la iniciativa de promover practicas constructivas que optimice el uso de recursos naturales y minimicen la huella ecológica de las edificaciones. Según dicha estrategia, "la construcción sustentable se refiere a la incorporación del concepto de sustentabilidad en el proceso de planificación, diseño, construcción y operación de las edificaciones y su entorno" (de Vivienda y Urbanismo, 2013).

Frente a esta problemática, surge una creciente necesidad de desarrollar alternativas ecológicas que utilicen recursos renovables y reduzcan el impacto ambiental. Los materiales de aislamiento tradicionales, como el poliestireno, el poliuretano expandido y

la lana de vidrio, si bien son ampliamente valorados por sus propiedades térmicas, presentan importantes desventajas ambientales. Una de las principales es su baja biodegradabilidad, lo que genera una acumulación significativa en vertederos debido a su volumen y persistencia en el tiempo (López et al., 2014). Además, parte de estos residuos puede llegar al océano y fragmentarse en micro y nano plásticos, afectando los ecosistemas marinos (Song et al., 2020). A esto se suma que su fabricación requiere grandes cantidades de energía, y al no ser biodegradables, su gestión como residuo resulta compleja, lo que contribuye aún más a su impacto ambiental (Fuentealba et al., 2024).

A partir de estos desafíos, surge la motivación para el desarrollo de este proyecto de título, cuyo propósito es identificar y proponer alternativas sostenibles, tales que puedan sustituir o reemplazar los aislantes térmicos tradicionales sin comprometer su desempeño. Estas nuevas opciones deben cumplir con criterios de eficiencia energética, bajo impacto ambiental y posibilidad de implementación, contribuyendo así a la reducción de la huella de carbono en la construcción. En Chile, la incorporación de aislantes sustentables es clave por su diversidad climática, recursos naturales y demanda de edificaciones eficientes. Materiales como corteza de eucalipto, celulosa, cáñamo, lino, lana de oveja y trigo ofrecen propiedades térmicas comparables a los tradicionales, con ventajas como disponibilidad local, menor consumo energético y mejor gestión de residuos. Su aplicación impulsa un modelo constructivo más sustentable y alineado con los objetivos globales de reducción de emisiones.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- Analizar alternativas sostenibles de materiales para aislamiento térmico con menor impacto ambiental y su potencial de aplicación en Chile.

### 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar propiedades de materiales para aislamiento térmico.
- Comparar la sostenibilidad de diferentes alternativas para aislamiento térmico.
- Concluir la viabilidad de aplicación de alternativas sostenibles de aislamiento térmico en Chile, considerando la reglamentación térmica y los compromisos climáticos del país.

### 1.3. ANTECEDENTES GENERALES

La eficiencia energética en edificaciones es un factor clave para mitigar el impacto ambiental del sector de la construcción. Tradicionalmente, se han empleado materiales como el poliestireno expandido y la lana de vidrio para el aislamiento térmico; sin embargo, su producción y desecho conllevan efectos negativos sobre el medio ambiente. Algunos de estos efectos es la lenta degradación, que puede tardar hasta 500 años en descomponerse en vertederos, contribuyendo al calentamiento global (Mollehuara et al., 2022). Además, sus residuos tienden a terminar en los océanos, donde la fotodegradación, impulsada por la luz solar, produce micro y nano plásticos (Song et al., 2020). Esta situación ha impulsado la investigación y desarrollo de alternativas más sostenibles que reduzcan la huella ecológica de los materiales de construcción.

Chile ha adoptado compromisos internacionales para reducir su impacto ambiental en el sector de la construcción. En 2015, el país firmó el Acuerdo de París, bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), comprometiéndose a limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C e idealmente a un máximo de 1.5°C. En 2017, Chile ratificó este acuerdo y estableció metas concretas, incluyendo la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de PIB en un 30% para 2030, con la intención de limitar las emisiones a 95 MtCO<sub>2</sub>eq para ese año (CMNUCC, 2015).

En paralelo, Chile se ha comprometido a alcanzar la neutralidad de carbono para el año 2050 a través de su Contribución Determinada a Nivel Nacional (CDN). Para ello, existen normativas que fomentan la sostenibilidad en la construcción, como la Norma Chilena NCh853, que establece criterios para la eficiencia energética y la sostenibilidad en edificaciones. Además, la Estrategia Nacional de Huella de Carbono (2021) busca regular y concientizar sobre la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, contemplando estándares de construcción bajos en carbono y promoviendo la innovación en el sector. Se estima que las edificaciones generan el 23% de las emisiones de GEI del país, de las cuales aproximadamente 2.576 MtCO<sub>2</sub>eq provienen de la producción de materiales (de Vivienda y Urbanismo et al., 2021).

A nivel global, diversas certificaciones han establecido estándares de sostenibilidad en la construcción. La certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), desarrollada por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (USGBC, por sus siglas en inglés), evalúa el desempeño ambiental de los edificios en áreas como eficiencia energética, uso de materiales sostenibles y calidad ambiental interior. La certificación LEED se ha convertido en una referencia mundial para la construcción ecológica, promoviendo la adopción de prácticas que reducen el impacto ambiental de las edificaciones (EEChile, 2017). Por su parte, la certificación Passivhaus, originada en Alemania, se centra en el diseño y construcción de edificios con un consumo energético mínimo, garantizando condiciones térmicas ideales para los ocupantes. Este estándar enfatiza la utilización de materiales de alta eficiencia térmica y técnicas constructivas que minimizan las pérdidas de energía, contribuyendo significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (EEChile, 2016).

En este contexto, la Corporación de Desarrollo Tecnológico (CDT) ha destacado la innovación en materiales de aislamiento térmico, señalando el uso de nanomateriales y materiales biodegradables que ofrecen ventajas en términos de conductividad térmica y sostenibilidad. Estos avances buscan no solo mejorar la eficiencia energética de las edificaciones, sino también minimizar el impacto ambiental asociado a los materiales tradicionales (CDT, 2023).

Diversas investigaciones han explorado el uso de materiales naturales y reciclados como aislantes térmicos, destacando opciones como la corteza de eucalipto, la celulosa, el cáñamo, el lino, la lana de oveja y el trigo. Según Wadel (2009), estos materiales no solo presentan una baja conductividad térmica, sino que también contribuyen significativamente a la reducción del impacto ambiental en edificaciones, al tratarse de recursos renovables y reciclables. En esta línea, Mahieu et al. (2015) compararon el desempeño térmico y mecánico de tableros elaborados con cáñamo, lino, trigo y girasol, demostrando que estos materiales presentan propiedades aislantes destacables. Su

efectividad se atribuye a la porosidad natural de los recursos vegetales, lo que refuerza la viabilidad de estas alternativas en aplicaciones constructivas.

Los materiales de origen biológico como la lana de oveja, el lino y la fibra de cáñamo, actúan como almacenamiento de CO<sub>2</sub>, a su vez reduciendo el impacto climático durante su vida útil (FAO, 2016; Lawrence, 2015). Además, contribuyen a la regulación pasiva de la temperatura y humedad gracias a su capacidad higroscópica (Romano et al., 2019; Torres-Rivas et al., 2018). También, en términos de manipulación estos no generan irritaciones, siendo amigables para los usuarios. Asimismo, estos materiales poseen una mayor capacidad calorífica específica en comparación con aislantes minerales como la lana de roca, lo que les permite reaccionar lentamente a los cambios de temperatura y mejorar el confort térmico en edificaciones (Lawrence, 2015). Por el contrario, los materiales sintéticos como el poliestireno expandido (EPS), requieren procesos de fabricación con un alto consumo energético y contribuyen al aumento del potencial de calentamiento global (Pittau et al., 2019).

Entre las alternativas sostenibles investigadas, la corteza de eucalipto ha demostrado ser un material con gran potencial debido a su alta disponibilidad en Chile, ya que las plantaciones de *Eucalyptus nitens* y *Eucalyptus globulus* abarcan aproximadamente el 35% de la superficie forestal del país, con un total de 2.414.208 hectáreas (INFOR, 2017). Debido a esto se ha impulsado la fabricación de paneles de aislamiento térmico, los cuales cuentan con una morfología y alto contenido de fibra que resulta innovador, obteniendo valores de conductividad térmica entre 0.05 y 0.07 W/m\*K, comparables a los de aislantes naturales comerciales (Fuentealba et al., 2016). El aprovechamiento de la corteza de eucalipto como material aislante es una opción prometedora de revalorizar este subproducto forestal y contribuir a una construcción ecológica (Casas-Ledón et al., 2020).

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA**

### **2.1. INTRODUCCIÓN**

La metodología de esta investigación se estructura en ocho secciones. La primera corresponde a los casos de estudio, en donde el enfoque es evaluar la viabilidad de los materiales alternativos. La segunda sección aborda las propiedades y conceptos considerados, seguido de una revisión de la literatura existente sobre los materiales alternativos para aislamiento térmico. En la cuarta y quinta sección, se describe el método utilizado para comparar estas propiedades y la estructura jerárquica respectivamente. Finalmente, se detallará el proceso de comparación de pares, el mecanismo de verificación de coherencia y análisis de sensibilidad en la implementación del método AHP.

### **2.2. CASOS DE ESTUDIO**

Para los casos de estudio, las propiedades evaluadas son las siguientes: (1) conductividad térmica, (2) resistencia a la absorción de agua, (3) carbono embebido, (4) energía embebida, (5) biodegradabilidad, (6) transporte, (7) resistencia al fuego, (8) uso de aglutinante, (9) plan de prevención y de descontaminación atmosférica (PPDA), (10) reglamentación térmica de la OGUC y (11) estándares de construcción sustentable.

Cada una de estas propiedades se analizará en materiales alternativos para aislamiento térmico, los seleccionados fueron: corteza de eucalipto, celulosa, cáñamo, lino, lana de oveja y trigo. De igual manera, el análisis comparativo será con materiales convencionales como: lana de vidrio, lana de roca, poliestireno expandido, poliestireno extruido (XPS, por sus siglas en inglés) y poliuretano. La elección de estos materiales está enfocada en disponer de una variedad de alternativas que presenten un impacto ambiental reducido, buenas propiedades de aislamiento térmico, alta disponibilidad como

subproducto o residuo y factibilidad de implementación en el país. Este enfoque permite analizar y comparar estas opciones junto con materiales sintéticos, siendo esta selección clave para aplicar el método utilizado del Proceso Analítico Jerárquico, el cual permite determinar el potencial de aplicación de cada material, considerando sus ventajas como sus limitaciones.

Considerando estas variables, el análisis de aislamiento térmico comprende 121 combinaciones posibles, representadas en la figura 1.

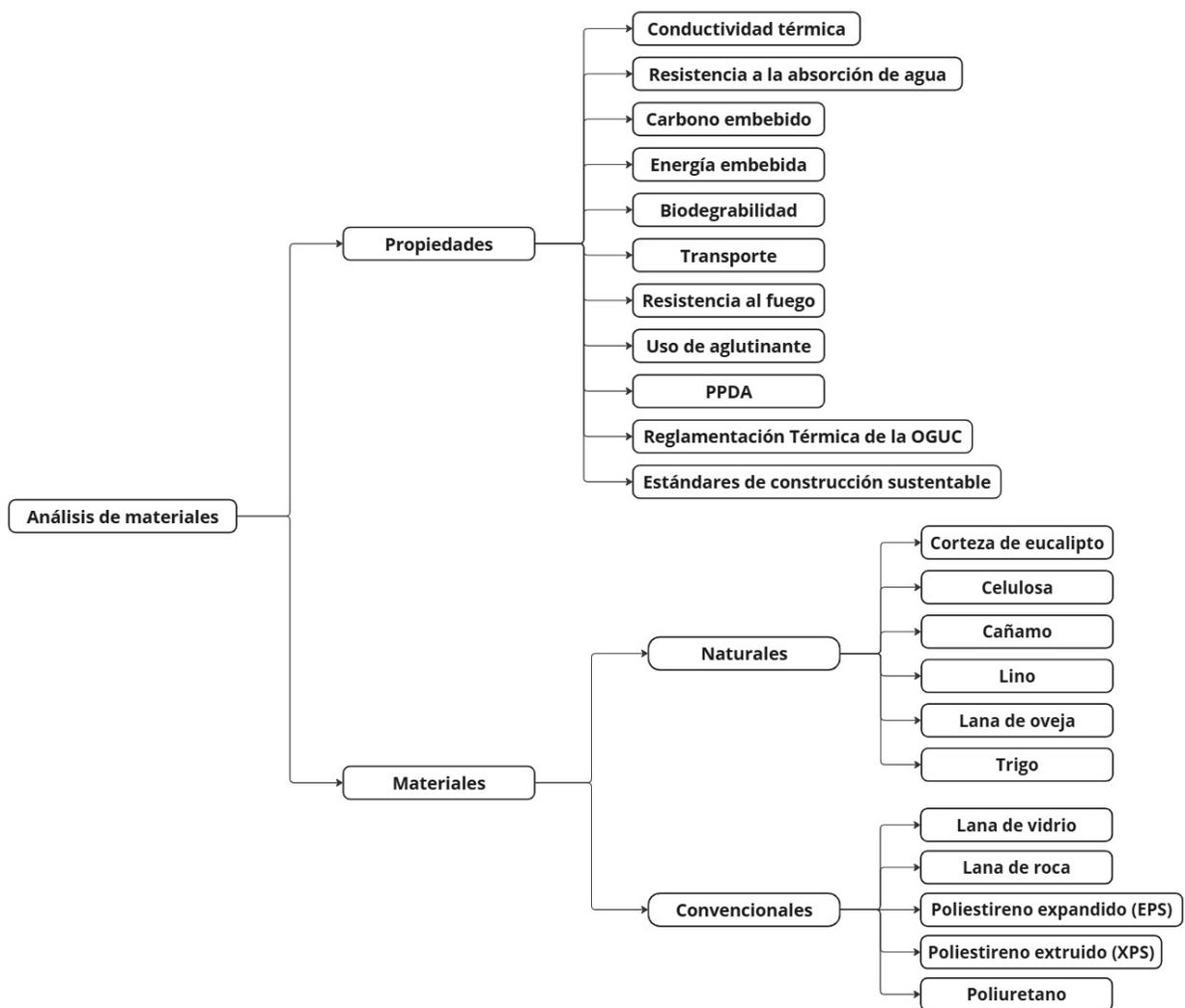


Figura 1. Casos analizados  
Fuente. Elaboración propia

Además, dentro de los factores considerados para la elección de los materiales, se incluye la intención de realizar un análisis aplicado y más realista, vinculado a las características y oportunidades de la región del Biobío, donde se ubica el centro geográfico de Chile. Esta zona no solo concentra una importante capacidad instalada en la industria de la celulosa, que impulsa la búsqueda de nuevos productos más sustentables, sino que también cuenta con una alta disponibilidad de residuos aprovechables como la corteza de eucalipto, lo que refuerza el potencial de los materiales bio-aislantes. A esto se suma el interés personal de la autora, estudiante de la Universidad San Sebastián, sede Concepción, con proponer alternativas sustentables con pertinencia territorial, alineadas al rol social que se espera que puedan cumplir las universidades regionales.

### 2.3. PROPIEDADES Y CONCEPTOS CONSIDERADOS EN EL ANÁLISIS

Como se mencionó anteriormente, se detallan las propiedades y conceptos claves para su posterior aplicación en el método.

#### 2.3.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Capacidad del material para transferir el calor. De acuerdo con la norma NCh853 of. 2007 es la cantidad de calor que, en condiciones estacionarias, atraviesa una unidad de área de un material homogéneo con caras planas y paralelas de extensión infinita y espesor unitario, durante un tiempo determinado, cuando existe una diferencia de temperatura unitaria entre sus superficies. Se expresa en  $W/m^*K$ .

#### 2.3.2. RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA

Parámetro adimensional que mide la capacidad de un material para resistir el paso del vapor de agua en relación con el aire. Un valor elevado de  $\mu$  indica una menor permeabilidad al vapor, mientras que un valor bajo sugiere una mayor facilidad para su tránsito. Este factor es fundamental en la construcción, ya que influye en la prevención

de condensaciones y en la adecuada transpirabilidad de las edificaciones, garantizando un mejor desempeño higrotérmico. Su determinación se basa en la norma NCh852, que establece los criterios para evaluar este comportamiento en distintos materiales de construcción.

### 2.3.3. CARBONO EMBEBIDO

Según la Comisión Europea (2020), el carbono embebido se refiere a “las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la fase no operativa de un proyecto, es decir, las emisiones liberadas a través de los aspectos de extracción, fabricación, transporte, montaje, mantenimiento, sustitución, deconstrucción, eliminación y final de la vida útil de los materiales y sistemas que componen un edificio (de la cuna a la tumba o cradle to grave, en inglés)”. No obstante, también se emplea el enfoque “de la cuna a la puerta” (cradle to gate), el cual establece un límite del sistema que incluye solo las etapas de extracción de materias primas y los procesos de fabricación del producto. Este enfoque excluye la etapa de transporte hacia el sitio de uso, así como las fases de montaje, uso, mantenimiento, sustitución y disposición final del producto.

En el presente estudio, todos los materiales analizados presentan datos de carbono embebido obtenidos que utilizan el enfoque cradle to gate. Por tanto, los valores de carbono embebido considerados no incluyen el transporte hacia el sitio de construcción ni las etapas posteriores a la fabricación, lo cual es importante tener en cuenta al interpretar los resultados.

### 2.3.4. ENERGÍA EMBEBIDA

Cantidad total de energía requerida para producir un material o producto, considerando todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, transporte y disposición final. Es un indicador clave en la evaluación del impacto ambiental de materiales y productos, ya que refleja la energía consumida y, por ende, las emisiones asociadas a su producción (Díaz y del Río, 2014). Sin embargo, en

este estudio los datos utilizados se basan en el enfoque “de la cuna a la puerta”, por lo que solo consideran la energía desde la extracción hasta el producto en planta de producción, sin incluir el montaje, uso o fin de vida.

#### 2.3.5. BIODEGRADABILIDAD

Capacidad de un material para degradarse de forma natural mediante la acción de microorganismos, como bacterias y hongos, convirtiéndose en compuestos más simples y no tóxicos. Este proceso permite que el material se reintegre al medio ambiente sin generar impactos negativos, lo que lo convierte en una opción más sustentable desde el punto de vista ambiental (Ruiz et al., 2013).

#### 2.3.6. TRANSPORTE

Se comprende a la distancia de traslado de insumos desde su lugar de extracción o producción hasta el sitio de estudio. En este estudio, el análisis se centra en la región del Biobío, específicamente en Concepción. Este subcriterio no busca cuantificar directamente las emisiones generadas por el transporte, sino que se utiliza como un indicador de disponibilidad, logística y factibilidad territorial para la implementación de los materiales analizados. Se parte del supuesto de que una menor distancia de transporte puede traducirse, de forma indirecta, en una reducción de la huella ambiental, mejores condiciones de acceso y menores costos asociados al traslado. Además, una planificación eficiente del transporte no solo optimiza procesos logísticos, sino que también ayuda a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, favoreciendo el cumplimiento de objetivos de sostenibilidad en la industria de la construcción (AMCS Group, 2023).

#### 2.3.7. RESISTENCIA AL FUEGO

Se refiere a la capacidad de un material o estructura para mantener su integridad y funcionalidad cuando está expuesto a altas temperaturas, sin sufrir una degradación

significativa en sus propiedades mecánicas durante un tiempo específico. Esta característica se determina a través de ensayos estandarizados, que miden cuánto tiempo puede soportar un material antes de colapsar bajo condiciones de incendio (Ayala y Navarro, 2017).

#### 2.3.8. USO DE AGLUTINANTE

Se evalúa la cantidad y el tipo de aglutinante utilizado en los paneles de aislamiento, clasificándolo en nulo, bajo, moderado o alto según su presencia y función estructural. Los aglutinantes permiten unir las fibras o partículas del material, proporcionando cohesión y resistencia mecánica. Su selección influye en la durabilidad del panel, su desempeño técnico y su impacto ambiental, ya que los de origen sustentable reducen emisiones y facilitan el reciclaje, mientras que los sintéticos pueden mejorar la estabilidad pero aumentar la huella ecológica.

#### 2.3.9. PLAN DE PREVENCIÓN Y DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA (PPDA)

Según el Ministerio del Medio Ambiente (2018), es una herramienta normativa implementada por el gobierno de Chile con el objetivo de reducir la contaminación del aire en zonas urbanas declaradas como saturadas o latentes debido a la alta concentración de contaminantes, como el material particulado (PM2.5 y PM10). Para ello, establece estrategias específicas orientadas a disminuir las emisiones y mejorar la calidad del aire, lo que tiene un impacto positivo en la salud de la población. Dentro de sus principales medidas se encuentran la regulación del uso de leña para calefacción, restricciones a vehículos con altas emisiones y la promoción de la eficiencia energética en edificaciones.

### 2.3.10. REGLAMENTACIÓN TÉRMICA DE LA ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES (OGUC)

Según el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2024), contenido en el artículo 4.1.10 de la OGUC, esta reglamentación define los estándares mínimos de aislamiento térmico que deben cumplir las edificaciones en Chile, ajustados a las distintas zonas climáticas del país. Su objetivo es mejorar la eficiencia energética, reducir el consumo de energía en calefacción y refrigeración, y garantizar el confort térmico dentro de las viviendas. La normativa regula la calidad de los materiales utilizados en la envolvente de los edificios, como techumbres, muros y pisos, estableciendo límites de conductividad térmica que deben cumplirse para minimizar pérdidas de energía. En la zona centro-sur considerada en el estudio, las zonas térmicas de categoría C, D, E, F y H, abarcan las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía. Estas zonas deben cumplir con requisitos específicos de transmitancia térmica (U) para garantizar un adecuado aislamiento en edificaciones. Los valores exigidos en estas regiones oscilan entre 0,30 y 0,80 W/m<sup>2</sup>K, dependiendo de la ubicación y las condiciones climáticas de cada zona.

### 2.3.11. ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE

Según el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2013), es una guía que engloba un conjunto de normativas y certificaciones que buscan asegurar que las edificaciones sean ambientalmente responsables y optimicen el uso de recursos a lo largo de su ciclo de vida. En Chile, estos estándares incluyen certificaciones como LEED, CES (Certificación Edificio Sustentable) y CVS (Certificación Vivienda Sustentable), las cuales evalúan criterios como eficiencia energética, uso de materiales sostenibles, gestión del agua y calidad ambiental interior. Su propósito es reducir el impacto ambiental de la construcción, fomentar la sostenibilidad y mejorar la calidad de vida de sus ocupantes. Para cumplir con este subcriterio, los materiales deben garantizar eficiencia térmica, biodegradabilidad, baja huella de carbono y mínimo impacto en la calidad del aire.

## 2.4. MATERIALES ALTERNATIVOS

En esta sección se presentan los materiales alternativos para aislamiento térmico, junto con sus propiedades, en base a la literatura existente. Para su análisis, se consideran cuatro aspectos fundamentales: rendimiento térmico, sostenibilidad, seguridad y regulación sustentable. Estos aspectos se establecen a partir de las propiedades previamente descritas.

### 2.4.1. CORTEZA DE EUCALIPTO

Los paneles aislantes térmicos de corteza de eucalipto representan una alternativa sostenible en la construcción. Su fabricación permite aprovechar un subproducto forestal, reduciendo residuos y mejorando la eficiencia energética de las edificaciones. Además, estos paneles destacan por su bajo impacto ambiental, alta capacidad de aislamiento térmico y cumplimiento de regulaciones, consolidándose como una solución innovadora y sustentable.

- **Rendimiento:** Los paneles presentan un excelente rendimiento térmico, con una conductividad térmica de  $0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ . Esta propiedad es clave para su aplicación en techos, paredes y suelos, permitiendo reducir la transferencia de calor y mejorar la eficiencia energética de las edificaciones (Casas-Ledeón et al., 2020). La composición principal de estos paneles incluye fibras derivadas de la corteza de eucalipto, compuestas mayoritariamente por celulosa y hemicelulosa, lo que les otorga estabilidad estructural y capacidad de aislamiento térmico (Fuentealba et al., 2016).
- **Sostenibilidad:** El material presenta bajas emisiones de carbono embebido, situándose en  $1.2 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ , así como una energía embebida que varía de  $14.4 \text{ MJ/kg}$ , lo que los posiciona como una alternativa ambientalmente favorable frente a los materiales aislantes tradicionales (Casas-Ledeón et al., 2020). Su

producción a partir de corteza de eucalipto permite aprovechar un subproducto de la industria forestal que, de otra manera, sería considerado un desecho, promoviendo la economía circular y reduciendo la generación de residuos (INFOR, 2024). Además, la disponibilidad de la corteza de eucalipto en Chile, particularmente en las regiones del Biobío, Ñuble y La Araucanía, donde se concentra el 69% de las plantaciones nacionales de esta especie, lo que minimiza los costos y el impacto ambiental del transporte. Su biodegradabilidad también es un factor relevante, ya que al final de su vida útil no generan contaminación persistente en el medio ambiente (Casas-Ledeón et al., 2020).

- Seguridad: Estos paneles presentan una buena resistencia al fuego, gracias a la incorporación de retardantes de llama en su composición, cumpliendo con normativas internacionales en este ámbito (Casas-Ledeón et al., 2020). Este factor es crucial para garantizar la protección de las edificaciones ante incendios. Además, en la fabricación de estos paneles se emplea un 4% de fibras sintéticas bicomponentes, como polietileno y polipropileno, que actúan como aglutinantes al activarse con calor, asegurando la cohesión del material sin necesidad de adhesivos sintéticos adicionales que puedan liberar compuestos volátiles nocivos (Casas-Ledeón et al., 2020). Estos paneles también contienen agentes antifúngicos, lo que mejora su durabilidad y resistencia a la proliferación de microorganismos (Bakatovich et al., 2024).
- Regulación sustentable: Ofrecen una alternativa innovadora que responde a los lineamientos del Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA), dado que su uso en techos, muros y pisos reduce la demanda energética de calefacción en viviendas, contribuyendo a la disminución de emisiones de material particulado (PM2.5 y PM10) (del Medio Ambiente, 2018). Asimismo, cumplen con la Reglamentación Térmica establecida en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC), la cual exige envolventes eficientes energéticamente para minimizar la pérdida de calor en los edificios (de Vivienda y Urbanismo, 1992). Finalmente, estos paneles están alineados con los Estándares de Construcción

Sustentable, ya que promueven el uso de recursos naturales renovables como fibras vegetales en reemplazo de materiales sintéticos, disminuyendo el impacto ambiental asociado a la edificación (de Vivienda y Urbanismo, 2013).

#### 2.4.2. CELULOSA

La celulosa es un polímero natural presente en las paredes celulares de los árboles, y se utiliza en la fabricación de papel, residuos de la industria forestal y otros derivados. Su amplia disponibilidad en la región hace que gane relevancia en el contexto de la construcción sustentable.

- Rendimiento: Los paneles de celulosa destacan por su baja conductividad térmica, con un valor de  $0,040 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ , lo que garantiza un alto desempeño energético en comparación con otros materiales convencionales (Hurtado et al., 2016). Además, presentan una resistencia a la absorción de agua con un valor de  $\mu = 1,7$ , lo que indica una baja resistencia a la difusión del vapor en comparación con otros aislantes, pero que, al mismo tiempo, permite una adecuada regulación higroscópica dentro de las edificaciones (Hurtado et al., 2019; Asdrubali et al., 2012; Deshmukh & More, 2014).
- Sostenibilidad: Los paneles de celulosa presentan un bajo carbono embebido y energía embebida en comparación con aislantes tradicionales. Su energía embebida es de  $0,94 \text{ MJ/kg}$ , lo que es considerablemente menor que la lana de vidrio ( $28 \text{ MJ/kg}$ ) y la lana de roca ( $16 \text{ MJ/kg}$ ) (Hammond & Jones, 2011). En términos de carbono embebido, el valor es de  $0,31 \text{ kgCO}_2\text{eq/kg}$ , lo que refuerza su viabilidad como material de construcción sostenible (Ricciardi et al., 2014; Schiavoni et al., 2016). El panel de celulosa, debido a su bajo peso, reduce el consumo energético durante su transporte. Sin embargo, su mayor ventaja es la producción local en la región del Biobío, donde cinco plantas fabricantes generan más de 2.500.000 toneladas de celulosa (Gysling et al., 2019). Además, la

industria del papel y cartón produce entre 400.000 y 500.000 toneladas anuales, de las cuales cerca del 47% corresponde a papel reciclado (ANIR, 2022).

- Seguridad: En cuanto a su resistencia al fuego, gracias a la incorporación de boratos, estos paneles alcanzan una clasificación A1 en comportamiento frente al fuego, lo que los hace ideales para aplicaciones en construcción segura (Wehkamp, 2013), esta clasificación quiere decir una resistencia de alrededor 60 minutos. Los boratos no solo mejoran la resistencia ignífuga, sino que también previenen la proliferación de microorganismos y protegen contra la humedad, prolongando la vida útil del material (Hurtado et al., 2016). El uso de carboximetilcelulosa como aglutinante y la inclusión de almidón o lignina contribuyen a mejorar la porosidad del material, optimizando su comportamiento mecánico y térmico sin comprometer su estabilidad estructural (Tumusiime et al., 2019).
- Regulación sustentable: Los paneles de celulosa, fabricados a partir de pulpa extraída de recursos forestales renovables como el *Pinus radiata* y el *Eucalyptus nitens*, se alinean con las principales normativas de construcción sustentable en Chile. Su bajo nivel de energía embebida y su destacada capacidad aislante permiten cumplir con la Reglamentación Térmica de la OGUC, mejorando la eficiencia energética en edificaciones. Además, su uso en la envolvente térmica contribuye a los objetivos del Plan de Descontaminación Atmosférica (PPDA), al reducir la demanda de calefacción residencial y, con ello, las emisiones de material particulado. Esta solución también responde a los Estándares de Construcción Sustentable, priorizando materiales renovables, de bajo impacto ambiental y con capacidad de mejorar el confort térmico en climas fríos y templados del país.

### 2.4.3. CÁÑAMO

El cáñamo (*Cannabis sativa* L.) requiere menos agua y pesticidas, lo que lo convierte en una opción renovable con bajo impacto ambiental (Lekavicius et al., 2015). Además, su

capacidad de absorber grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante su crecimiento contribuye significativamente a la reducción de emisiones en la industria de la construcción (Brzyski et al., 2017). Sin embargo, la disponibilidad de este cultivo es limitado por las restricciones legales, a pesar de que el cáñamo industrial contiene menos del 0,3% de THC y no tiene efectos psicoactivos (Lekavicius et al., 2015). En el caso de Chile, su cultivo y uso están regulados por la Ley 20.000 que sanciona el tráfico ilícito de estupefacientes y sustancias psicotrópicas. Para poder cultivar cáñamo en Chile, es necesario solicitar una autorización expresa al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), quien evalúa caso a caso según lo establecido en el Reglamento del Decreto Supremo N° 867 de 2007 del Ministerio de Salud. Estas autorizaciones han sido históricamente restringidas, lo que ha desincentivado la inversión en infraestructura y la investigación sobre sus aplicaciones constructivas.

- Rendimiento: El cáñamo presenta una conductividad térmica de 0,039 W/m\*K, lo que lo sitúa en el rango de los mejores aislantes térmicos naturales, comparándose con materiales como la lana de oveja o el corcho (Lekavicius et al., 2015). Su densidad aproximada de 25 kg/m<sup>3</sup> lo convierte en un material liviano y fácil de manipular en obra. Asimismo, su capacidad de regular la humedad sin comprometer su integridad estructural se refleja en una resistencia a la absorción de agua de 2,3 μ (Brzyski et al., 2017).
- Sostenibilidad: Su capacidad de almacenamiento de carbono embebido, que se estima en 0,14 kg CO<sub>2</sub>eq/kg, lo que significa que no solo evita emisiones, sino que también captura CO<sub>2</sub> de la atmósfera (Kumar et al., 2020). Su energía embebida es de 18,5 MJ/kg, siendo un valor bajo, reduciendo así su huella ambiental en términos de consumo energético en el proceso de producción (Lekavicius et al., 2015). Su alto índice de biodegradabilidad contribuye a promover la economía circular en el ámbito de la construcción. En términos de transporte, Francia y Alemania son los principales productores de cáñamo para aislamiento en Europa, con cultivos de alrededor de 1.500 hectáreas desde 2001 (Kymäläinen & Sjöberg,

2008). En Francia, la asociación InterChanvre reporta 23.600 hectáreas de cultivo. Exportar desde allí implicaría un traslado de 12.100 km aproximadamente.

- Seguridad: Posee una buena resistencia al fuego, pudiendo soportar hasta 45 minutos sin que las llamas se propaguen de manera significativa. Esta característica se potencia con tratamientos ignífugos, como el uso de sales de amonio y bicarbonato de sodio, que mejoran su desempeño en aplicaciones de construcción segura (Lekavicius et al., 2015). En cuanto al uso de aglutinantes, las fibras de cáñamo son combinadas con polímeros biodegradables o aglutinantes naturales en su proceso de fabricación, lo que contribuye a mantener sus propiedades estructurales sin comprometer su sustentabilidad (Latif et al., 2014).
- Regulación sustentable: Se alinea con los lineamientos del PPDA, al mejorar la eficiencia térmica de las edificaciones y reducir la necesidad de calefacción mediante combustibles contaminantes. Además, debido a su baja conductividad térmica, permite cumplir con los estándares exigidos por la reglamentación térmica de la OGUC. Su origen vegetal, capacidad de captura de carbono, alta biodegradabilidad y bajo impacto ambiental lo hacen coherente con los estándares de construcción sustentable. Sin embargo, su principal limitación para su uso masivo es por las restricciones legales mencionadas, a pesar de que en diversos países su uso está regulado y extendido con fines constructivos.

#### 2.4.4. LINO

El lino es una fibra natural que ha ganado relevancia en países europeos como Bélgica, Francia y los Países Bajos, donde se han realizado múltiples investigaciones sobre su potencial en la fabricación de paneles sostenibles (Prabhakaran et al., 2014).

- Rendimiento: Los paneles de lino han demostrado un excelente desempeño térmico, con una conductividad de  $0,033 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ , lo que los convierte en una opción eficiente para el aislamiento térmico y acústico en la construcción (Sánchez et al.,

2019; Prabhakaran et al., 2014; Vaitkus et al., 2014). Además, estos paneles tienen una moderada resistencia a la absorción de agua, con un valor de  $2,3 \mu$ , lo que indica que pueden retener cierta humedad sin comprometer su estructura. Sin embargo, tratamientos adicionales pueden optimizar su durabilidad en ambientes húmedos (Vaitkus et al., 2014).

- **Sostenibilidad:** En cuanto a su impacto ambiental, presentan un carbono embebido de  $1,01 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$  y una energía embebida de  $17,7 \text{ MJ/kg}$  (Schulte et al., 2021). Su capacidad de biodegradabilidad permite que estos paneles se descompongan sin generar residuos contaminantes, contribuyendo a la reducción de desechos industriales y fomentando la economía circular. En la zona centro-sur hay interés en diversificar la rotación de cultivos. La linaza se adapta bien al suelo y clima del valle central de La Araucanía (Vial, 2023) y se usa para producir aceite industrial y semillas. Al igual que en países como Bélgica, Francia y los Países Bajos, en Chile también podría tener potencial como aislante térmico. Si en Chile se estableciera una cadena de valor para este material, la producción en La Araucanía tendría una distancia de transporte de aproximadamente 290 km hasta Concepción.
- **Seguridad:** Los paneles de lino presentan una resistencia al fuego moderada. Siguiendo la norma europea EN 13501-1, tienen una clasificación de clase C, lo que indica que pueden resistir aproximadamente 30 minutos antes de que la combustión se intensifique (Kumar et al., 2020). En cuanto al uso de aglutinantes, la fabricación de estos paneles emplea principalmente resina epóxica mediante un proceso de moldeo por transferencia de resina asistido al vacío, el cual permite la solidificación del material, garantizando un panel liviano pero estructuralmente resistente (Prabhakaran et al., 2014).
- **Regulación sustentable:** Como material natural y eficiente térmicamente, cumple con la reducción de demanda energética para calefacción y la refrigeración, lo que lo hace compatible con el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica

(PPDA) al disminuir las emisiones contaminantes asociadas. Gracias a su baja conductividad térmica, los paneles de lino permiten alcanzar los valores de transmitancia térmica (U) establecidos por la Reglamentación Térmica de la OGUC para zonas climáticas del centro-sur de Chile. Por otro lado, su origen vegetal, su biodegradabilidad y su bajo contenido de compuestos orgánicos volátiles lo hacen consistente con los principios promovidos por los estándares de construcción sustentable, como el uso de recursos renovables, la eficiencia energética y la mejora de la calidad ambiental interior.

#### 2.4.5. LANA DE OVEJA

Los paneles de lana de oveja han emergido como una opción innovadora y sostenible para la construcción, gracias a sus excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico. Además, en un estudio de la ganadería ovina nacional el INE (2011), indicó que en la región de Magallanes en la temporada 2009 - 2010, las explotaciones ovinas con más de 60 animales produjeron más de 7.808.000 kilos de lana.

- Rendimiento: Su conductividad térmica es de  $0,038 \text{ W/m}^{\circ}\text{K}$ , lo que la convierte en un material eficiente para el mantenimiento de temperaturas interiores estables y la reducción del consumo energético en calefacción y refrigeración (Dénes et al., 2018). Además, su baja densidad de  $10 \text{ kg/m}^3$ , facilita su manejo e instalación. Otro factor clave de su rendimiento es su capacidad de absorción de humedad, ya que puede retener hasta un 35% de su peso en agua sin perder sus propiedades aislantes, ayudando a regular la humedad y prevenir la formación de moho en espacios interiores (Majumder et al., 2023).
- Sostenibilidad: Su fabricación tiene una huella de carbono reducida de  $2,9 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ , ya que es un subproducto de la industria ganadera. Además, su energía embebida es de  $3,59 \text{ MJ/kg}$ , lo que disminuye su impacto ambiental en términos de consumo energético (Havelock Wool, 2020). En cuanto al transporte,

en Chile la producción de lana de oveja se concentra en la Región de Magallanes, siendo alrededor de 1800 km de distancia con la región del Biobío.

- Seguridad: Gracias a su composición de queratina, el material se carboniza en lugar de propagar las llamas, ofreciendo una mayor seguridad en caso de incendio (Dénes et al., 2018). Además, el tratamiento con boro ha demostrado mejorar su resistencia al fuego sin afectar sus propiedades aislantes, como indican Altin y Yildirim (2022). En cuanto a los aglutinantes, la fabricación de paneles de lana de oveja sigue un proceso natural que no requiere adhesivos químicos sintéticos, lo que minimiza su impacto ambiental. En el proyecto FITNESs, Pennacchio et al. (2017) desarrollaron un sistema de producción que combina lana reciclada con fibra de cáñamo, mejorando su resistencia sin necesidad de adhesivos sintéticos.
- Regulación sustentable: Su baja conductividad térmica reduce el consumo energético, ayudando a la eficiencia exigida por la OGUC y minimizando las emisiones contaminantes. Es un material natural y biodegradable, con baja huella de carbono y sin emisión de compuestos tóxicos, alineándose con criterios de sustentabilidad.

#### 2.4.6. TRIGO

En la Región del Biobío, el trigo es un cultivo de gran importancia, y su paja representa un recurso abundante con potencial para la construcción sustentable. Actualmente, una gran parte de la paja de trigo es quemada en los campos, lo que genera contaminación y afecta la calidad del aire (Tingting et al., 2014). Sin embargo, su alto contenido de celulosa, lignina y hemicelulosa la convierte en un material viable para la fabricación de paneles, reduciendo la presión sobre los bosques que al usar paja de trigo (un residuo agrícola), se reduce esa necesidad de explotar los bosques para obtener materia prima y promover una alternativa ecológica en la industria de la construcción en Chile (Fonseca et al., 2022).

- Rendimiento: Los paneles de paja de trigo cuentan con conductividad térmica baja de 0,048 W/m\*K, gracias a la estructura fibrosa de la paja tratada y a la estabilidad del yeso, lo que permite reducir la transferencia de calor en edificaciones (Yue et al., 2020; Pan et al., 2017). En cuanto a la resistencia a la absorción de agua, la paja se somete a un tratamiento químico con hidróxido de sodio (NaOH) y un agente silano (KH-602), lo que mejora su capacidad de adherencia y estabilidad estructural, evitando una degradación acelerada en ambientes húmedos (Mehdi et al., 2020, 2022; Ghaffar et al., 2017). Además, presentan una resistencia a la difusión del vapor de agua con un coeficiente de  $\mu = 2,0$ , lo que representa una baja barrera al paso del vapor, permitiendo cierto grado de transpirabilidad del material sin comprometer su integridad en condiciones de humedad (Muthuraj et al., 2019; Flury et al., 2009; Ali et al., 2020).
- Sostenibilidad: Presentan un bajo impacto en términos de carbono embebido y energía embebida. Su producción emite solo 8,18 kg de CO<sub>2</sub> por unidad (Zhang et al., 2008). Además, al aprovechar un residuo agrícola, se fomenta la economía circular y se reduce la contaminación generada por la quema de paja en los campos. Al ser un material natural, los paneles pueden descomponerse sin generar residuos tóxicos, lo que los convierte en una opción viable para construcciones sustentables (Fonseca et al., 2022). En cuanto al transporte, la producción de paja de trigo en la Región del Biobío es significativa. En 2023, la superficie sembrada de trigo en la región alcanzó las 21.704 hectáreas, representando un aumento del 26,2% en comparación con el año anterior (Odepa, 2023). Además, la región procesó el 9,3% de la molienda de trigo a nivel nacional, lo que facilita la obtención de materia prima local sin necesidad de importaciones (INE, 2023).
- Seguridad: Su tiempo de ignición supera los 1200 segundos. Además, conservan el 75,2% de su masa tras pruebas de combustión y emiten menos calor y humo, lo que mejora la seguridad en caso de incendio (Yue et al., 2020). El uso de aglutinantes como la magnesita y el yeso contribuye a la estabilidad del material y

a su resistencia mecánica. La magnesita, un mineral compuesto por carbonato de magnesio ( $MgCO_3$ ), en particular, mejora la cohesión del panel sin comprometer su comportamiento térmico y su sostenibilidad (Yue et al., 2020).

- Regulación sustentable: El uso de paja de trigo como aislante térmico es compatible con el PPDA, ya que al aprovechar un residuo agrícola local y mejorar la eficiencia térmica en viviendas, contribuye a reducir la quema de residuos y uso de sistemas de calefacción. Su baja conductividad térmica permite ser compatible con los requisitos establecidos por la OGUC según nuestra zona climática. Al igual que todos, es un material natural y con bajo impacto ambiental para cumplir con los estándares de construcción sustentable, promoviendo la economía circular.

Para facilitar la comprensión, en la tabla 1 se presenta un resumen de las principales características de los distintos tipos de materiales, tanto naturales como convencionales. Cabe destacar que los datos correspondientes a los materiales convencionales, como la lana de vidrio, la lana de roca, el poliestireno expandido, el poliestireno extruido y el poliuretano, han sido obtenidos del estudio de Kumar et al., 2020.

Además, en la tabla se integra el cuarto aspecto, la regulación sustentable. Posteriormente, mediante el método que se describirá, permitirá analizar el desempeño de los materiales en estos criterios, evaluando su posible aplicación.

Tabla 1. Resumen de propiedades de materiales aislantes

Material	Conductividad térmica	Resistencia a la Absorción de Agua	Carbono embebido	Energía embebida	Biodegradabilidad
	(W/m*K)	( $\mu$ )	(kg CO <sub>2</sub> eq/kg)	(MJ/kg)	
Corteza de eucalipto	0,045	5	1,2	14,4	Alta
Celulosa	0,037	1,7	0,31	0,94	Alta
Cáñamo	0,039	2,3	0,14	18,5	Alta
Lino	0,033	1	1,01	17,7	Alta
Lana de oveja	0,038	1	2,9	3,59	Alta
Trigo	0,048	2	8,18	10,5	Moderada
Lana de vidrio	0,03	1	1,24	14	Baja
Lana de roca	0,033	1	1,05	16,8	Baja
Poliestireno expandido	0,029	20	6,3	80,8	Nula
Poliestireno extruido	0,032	80	7,55	72,8	Nula
Poliuretano	0,022	50	5,9	74	Nula

Material	Transporte	Resistencia al fuego	Uso de aglutinante	PPDA	Reglamentación Térmica de la OGUC	Estándares de construcción sustentable
	(km)	(min)	(proporción)			
Corteza de eucalipto	50	30	Baja	Compatible	Compatible	Cumple
Celulosa	50	60	Baja	Compatible	Compatible	Cumple
Cáñamo	12100	45	Baja	Compatible	Compatible	Cumple
Lino	290	30	Baja	Compatible	Compatible	Cumple
Lana de oveja	1800	25	Nulo	Compatible	Compatible	Cumple
Trigo	100	35	Moderado	Compatible	Compatible	Cumple
Lana de vidrio	500	90	Alta	No Compatible	Compatible	No cumple
Lana de roca	500	120	Alta	No Compatible	Compatible	No cumple
Poliestireno expandido	500	20	Nulo	No Compatible	Compatible	No cumple
Poliestireno extruido	500	30	Nulo	No Compatible	Compatible	No cumple
Poliuretano	500	15	Nulo	No Compatible	Compatible	No cumple

Fuente: Elaboración propia

## 2.5. MÉTODO DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO

El método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), es un método de toma de decisiones multicriterio de investigación desarrollado por Thomas L. Saaty en 1980. En un contexto de incertidumbre, permite integrar datos cuantitativos sobre las

opciones de decisión. Su principal ventaja es que, posibilita la inclusión de aspectos cualitativos que, debido a su complejidad o limitación para ser medidos, suelen quedar fuera del análisis, a pesar de su relevancia.

Este método facilita la organización eficiente y grafica de la información, descomponiendo el problema y analizándolo en partes, visualizar los impactos de los cambios y sintetizar los resultados. Asimismo, se caracteriza por su transparencia y trazabilidad, al ofrecer un modelo que justifica cada elección mediante una escala previamente establecida. A esto se suma que promueve la participación de diferentes grupos de interés, favoreciendo la construcción de consensos. Por otro lado, es flexible y escalable al permitir la incorporación de nuevas alternativas y de actualizar a medida que se obtiene más información. No obstante, Zanazzi (2003) advierte que si la estructura jerárquica se encuentra mal diseñada, los pesos asignados en los criterios pueden distorsionarse generando errores en los resultados. Para mitigar este riesgo, el método incluye un mecanismo de verificación de coherencia, que evalúa la consistencia de los juicios emitidos (Saaty, 1987). Finalmente, el análisis de sensibilidad se lleva a cabo debido a la variabilidad asociada, permitiendo evaluar como esta influye en los resultados y garantizando así una toma de decisiones más robusta y fundamentada.

El AHP se basa en la realización de comparaciones por pares, a través de las cuales se asignan valores relativos a los elementos en cada nivel de la jerarquía. Estas comparaciones se fundamentan en la escala de Saaty, que emplea valores que van del 1 al 9 para representar la intensidad de preferencia entre los elementos evaluados. En esta escala, el valor 1 indica que dos elementos son igualmente importantes, mientras que el valor 9 señala una preferencia extrema de un elemento sobre otro. La escala de Saaty utilizada en este estudio se presenta en la Tabla 2, donde se detallan los valores y su respectivo significado.

Tabla 2. Escala fundamental del método AHP

<b>Intensidad de importancia</b>	<b>Definición</b>	<b>Explicación</b>
1	Igual importancia.	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo.
3	Importancia moderada de uno sobre el otro.	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente una actividad sobre otra.
5	Importancia esencial o fuerte.	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre otra.
7	Importancia muy fuerte.	Una actividad es fuertemente favorecida y su predominio se demuestra en la práctica.
9	Importancia extrema.	La evidencia que favorece una actividad sobre otra es del más alto orden de afirmación posible.
2, 4, 6 y 8	Valores intermedios entre los dos juicios adyacentes.	Cuando es necesario un compromiso.

Fuente. Adaptación de Saaty (1987)

A partir de estas comparaciones, el método permite calcular pesos o prioridades que reflejan la importancia relativa de cada criterio y alternativa, proporcionando una base cuantitativa para la toma de decisiones.

## 2.6. ESTRUCTURA JERÁRQUICA MEDIANTE EL MÉTODO AHP

La jerarquía está estructurada en tres niveles: definición del objetivo, identificación de criterios, sub-criterios y alternativas.

### 2.6.1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO

El objetivo es priorizar los diferentes criterios de aislamiento térmico, para identificar cuáles son las mejores alternativas para la construcción sostenible en Chile,

considerando factores como el desempeño térmico, el impacto ambiental y las regulaciones sustentables.

## 2.6.2. IDENTIFICACIÓN DE CRITERIOS

Los criterios se seleccionan en función de las propiedades previamente descritas, para cumplir con los objetivos específicos de este estudio. Cada criterio representa un aspecto clave de desempeño para los materiales y para más detalle, cada criterio se desglosa en sub-criterios, que permiten obtener características específicas y cuantificables de los materiales. En la tabla 3 se presentan los criterios y sus respectivos sub-criterios, que guiarán el análisis y comparación de los materiales de aislación térmica.

Tabla 3. Criterios y sus respectivos sub-criterios aplicados

<b>Criterios</b>	<b>Sub-criterios</b>
Rendimiento	Conductividad térmica
	Resistencia a la Absorción de Agua
Sostenibilidad	Carbono embebido
	Energía embebida
	Biodegradabilidad
	Transporte
Seguridad	Resistencia al fuego
	Uso de aglutinante
Regulación sustentable	Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica (PPDA)
	Reglamentación Térmica de la OGUC
	Estándares de construcción sustentable

Fuente. Elaboración propia

Además, para la aplicación del método AHP, se asignan valores de la escala de Saaty a cada sub-criterio, permitiendo una evaluación jerárquica y ponderada de los materiales en función de su desempeño en cada aspecto clave. Asimismo, algunos sub-criterios

contaran con una descripción adicional para facilitar su comprensión y contar con una evaluación más precisa.

#### 2.6.2.1. CRITERIO: RENDIMIENTO

El criterio evalúa la eficiencia térmica de los materiales a través de dos sub-criterios: conductividad térmica ( $\lambda$ ) y resistencia a la absorción del agua ( $\mu$ ) presentados en las tablas 4 y 5. Para su análisis dentro del método AHP, se le asignan valores según la escala de Saaty.

- Conductividad térmica

Tabla 4. Medición del sub-criterio de conductividad térmica

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición (W/m*K)</b>
1	0,030 – 0,050
3	0,010 - 0,029

Fuente. Elaboración propia

- Resistencia a la absorción del agua

Tabla 5. Medición del sub-criterio de factor de resistencia a la absorción de agua

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición (<math>\mu</math>)</b>
1	0 - 40
3	41 - 80
5	81 - 120

Fuente. Elaboración propia

#### 2.6.2.2. CRITERIO: SOSTENIBILIDAD

El criterio de sostenibilidad analiza el impacto ambiental de los materiales a través de cuatro sub-criterios: carbono embebido, energía embebida, biodegradabilidad y transporte. En las tablas 6, 7, 8 y 9, se asignan valores de importancia a cada subcriterio según la escala propuesta por el autor del método. Además, debido a que la

biodegradabilidad es un subcriterio cualitativo, se incluye una descripción para facilitar su comprensión.

- Carbono embebido

Tabla 6. Medición del sub-criterio de carbono embebido

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición (kg CO<sub>2</sub>eq/kg)</b>
1	valor similares entre sí
3	$\geq 10,1$
5	5,1 – 10
7	$\leq 5$

Fuente. Elaboración propia

- Energía embebida

Tabla 7. Medición del sub-criterio de energía embebida

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición (MJ/kg)</b>
1	$\geq 71$
3	51 – 70
5	26 - 50
7	11 – 25
9	$\leq 10$

Fuente. Elaboración propia

- Biodegradabilidad

Tabla 8. Medición del sub-criterio de biodegradabilidad

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición</b>	<b>Descripción</b>
1	Nulo	No se degrada o tarda más de 500 años.
3	Baja	Demora entre 100 y 500 años.
5	Moderado	Puede tardar entre 10 y 100 años.
7	Moderadamente alta	Tarda de 1 a 10 años en biodegradarse.
9	Alta	Se descompone en menos de 1 año.

Fuente. Elaboración propia

- Transporte

Tabla 9. Medición del sub-criterio de transporte

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición (km)</b>
1	$\geq 401$
3	301 - 400
5	201 - 300
7	101 - 200
9	$\leq 100$

Fuente. Elaboración propia

### 2.6.2.3. CRITERIO: SEGURIDAD

Este criterio analiza la estabilidad y resistencia de los materiales frente a factores de riesgo, considerando dos sub-criterios: resistencia al fuego y uso de aglutinante. Las tablas 10 y 11 respectivamente presentan los valores según escala.

- Resistencia al fuego

Tabla 10. Medición del sub-criterio de resistencia al fuego

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición (minutos)</b>
1	10 – 30
3	31 – 50
5	51 – 70
7	71 – 90
9	≥ 91

Fuente. Elaboración propia

- Uso de aglutinante

Tabla 11. Medición del sub-criterio de uso de aglutinante

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición</b>	<b>Descripción</b>
1	Alto	Depende en gran medida de adhesivos para mantener su forma y estructura.
3	Moderado	Requiere una cantidad equilibrada de adhesivo para garantizar estabilidad y resistencia.
5	Bajo	Se usa poca cantidad de adhesivo, ya que el material tiene cierta cohesión natural.
7	Nulo	El material se mantiene unido sin adhesivos, gracias a su estructura física o proceso de fabricación.

Fuente. Elaboración propia

#### 2.6.2.4. CRITERIO: REGLAMENTACIÓN SUSTENTABLE

El criterio de reglamentación sustentable consiste en sub-criterios cualitativos, por lo que, se incluye una breve descripción para comprender su interpretación. Los subcriterios

presentados en las tablas 12, 13 y 14 son: plan de prevención y descontaminación atmosférica, reglamentación térmica de la OGUC y estándares de construcción sustentable.

- Plan de prevención y descontaminación atmosférica

Tabla 12. Medición del sub-criterio Plan de Prevención y de Descontaminación

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición</b>	<b>Descripción</b>
1	No compatible	Alta emisión de contaminantes, lenta degradación o aglutinantes sintéticos, estos afectan la calidad del aire.
3	Compatible	Bajo impacto ambiental, biodegradables, sin emisiones tóxicas ni partículas en suspensión. Su producción debe requerir poca energía y evitar aglutinantes contaminantes.

Fuente. Elaboración propia

- Reglamentación térmica de la OGUC

Tabla 13. Medición del sub-criterio Reglamentación Térmica de la OGUC

<b>Valor de importancia AHP</b>	<b>Unidad de medición</b>	<b>Descripción</b>
1	Compatible	Compatible con los valores de transmitancia térmica exigidos por la OGUC (0,30 – 0,80 W/m <sup>2</sup> K).
3	No compatible	No compatible con los valores de transmitancia térmica exigidos por la OGUC (0,30 – 0,80 W/m <sup>2</sup> K).

Fuente. Elaboración propia

- Estándares de construcción sustentable.

Tabla 14. Medición del sub-criterio Estándares de construcción sustentable

Valor de importancia AHP	Unidad de medición	Descripción
3	No cumple	El material no garantiza eficiencia térmica, biodegradabilidad, baja huella de carbono ni mínimo impacto en la calidad del aire.
7	Cumple	El material garantiza eficiencia térmica, biodegradabilidad, baja huella de carbono ni mínimo impacto en la calidad del aire.

Fuente. Elaboración propia

### 2.6.3. ALTERNATIVAS

Para este estudio se han identificado diversas alternativas de materiales para aislamiento térmico, incluyendo opciones innovadoras y materiales convencionales ampliamente utilizados en la industria. Las alternativas de la tabla 15 corresponden a las presentadas en los casos de estudio.

Tabla 15. Alternativas de materiales bioaislantes y convencionales

Tipo	Material
Naturales	Corteza de eucalipto
	Celulosa
	Cañamo
	Lino
	Lana de oveja
	Trigo
Convencionales	Lana de vidrio
	Lana de roca
	Poliestireno expandido (EPS)
	Poliestireno extruido (XPS)
	Poliuretano

Fuente. Elaboración propia

## 2.6.4. ÁRBOL DE JERARQUÍAS

Esta representación, conocida como árbol de jerarquías (Saaty, 1987), establece la relación entre la meta general, los criterios de evaluación y las opciones disponibles.

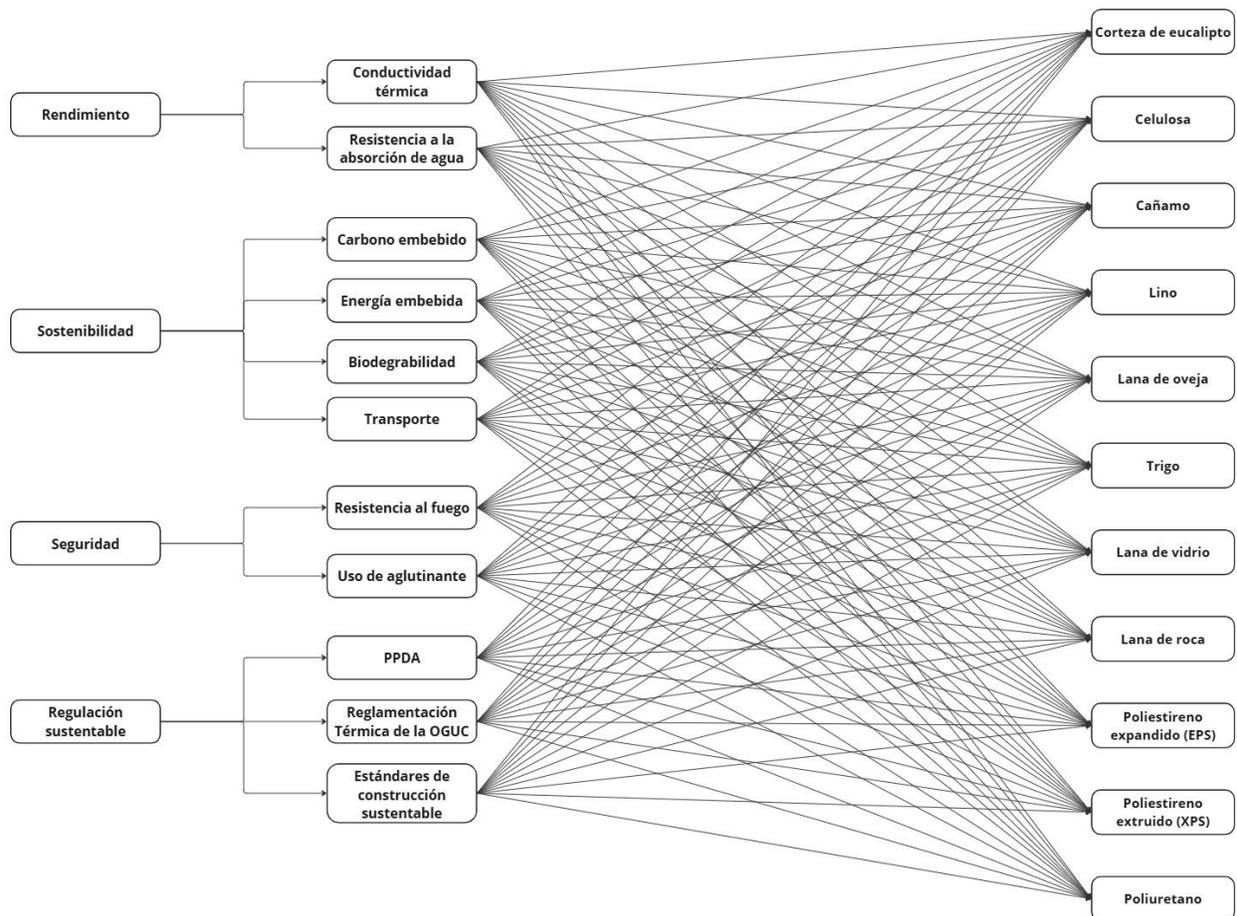


Figura 2. Árbol de jerarquías del estudio  
Fuente. Elaboración propia

## 2.7. COMPARACIÓN POR PARES

El proceso de toma de decisiones mediante el método AHP comienza con la comparación entre criterios, la cual permite establecer la importancia relativa de cada uno con respecto a los demás. Para ello, se construye una matriz de comparación de pares, donde cada criterio se contrasta con los otros utilizando la escala de importancia de Saaty presentada anteriormente.

Para la realización de la matriz de comparación de pares, se procede al cálculo de las ponderaciones de cada criterio, lo que permite determinar su nivel de influencia en la decisión final. Este proceso se desarrolla en los siguientes pasos:

- Normalización de la matriz: Cada elemento de la matriz de comparación se divide por la suma total de su respectiva columna.
- Cálculo de ponderación: Se obtiene el promedio de cada fila normalizada, lo que representa el peso relativo de cada criterio en la decisión. Esta ponderación refleja la importancia de cada criterio en relación con el objetivo de la evaluación.

## 2.8. MECANISMO DE VERIFICACIÓN DE COHERENCIA

El diseño del método incluye un mecanismo para verificar la coherencia de los valores asignados, lo que permite evaluar si las ponderaciones son adecuadas. Los juicios se consideran consistentes cuando el coeficiente de consistencia (CR, por sus siglas en inglés) es igual o menor a 0,1 (10%).

Las fórmulas utilizadas en este proceso de verificación de consistencia son:

- Índice de consistencia (CI, por sus siglas en inglés): evalúa la consistencia de las comparaciones realizadas en la matriz de decisión.

$$CI = \frac{n_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Donde  $n_{max}$  representa el valor máximo de la matriz de comparación y  $n$  es el número de criterios evaluados.

- Índice de aleatoriedad (RI, por sus siglas en inglés): se utiliza para determinar un valor de referencia que depende del número de criterios  $n$ .

$$RI = \frac{1,98 \cdot (n - 2)}{n} \quad (2)$$

- Relación de consistencia (CR): permite evaluar la coherencia de los juicios emitidos durante el proceso de comparación. Si el CR es menor que 0,1, se considera que la matriz de comparación es suficientemente consistente. Un valor mayor indica que la matriz es inconsistente y que requiere ajustes.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

## 2.9. EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD

Debido a la variabilidad o escasez de información, se realiza un análisis de sensibilidad que permite examinar como varían los resultados o ponderaciones de las alternativas, ante modificaciones en la priorización asignada a cada subcriterio. Este análisis consiste en modificar la ponderación relativa de los subcriterios dentro de un rango determinado, generalmente  $\pm 10\%$ , y observar el comportamiento del orden de las alternativas (Avalos et al., 2012).

El propósito de este análisis es verificar robustez y estabilidad de los resultados, asegurando que la decisión final no depende de tan solo de una ponderación. De este modo, se busca responder a la pregunta “¿Qué ocurre si...?”, permitiendo identificar si se alteran las jerarquizaciones. En algunos casos, los criterios considerados más relevantes pueden mantener un orden estable en las alternativas, incluso ante cambios en su ponderación.

## CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos mediante el método AHP. Primero, se desarrolló el método, estableciendo la comparación de pares de los criterios y verificando la relación de consistencia. Posteriormente, se realiza la comparación de los sub-criterios previamente definidos, los cuales son factores fundamentales en la selección de materiales para la construcción sustentable. Finalmente, se llevó a cabo la evaluación de escenarios, identificando las alternativas con mejor ponderación y el análisis de sensibilidad.

Las matrices de comparación se pueden encontrar en el Anexo 1, donde se detallan los valores asignados y el proceso seguido para determinar la importancia de cada material en este aspecto.

### 3.2. COMPARACIÓN POR PARES DE CRITERIOS

En la tabla 16, se presentan las ponderaciones obtenidas para cada criterio a partir del método AHP:

Tabla 16. Ponderación de criterios

<b>Criterios</b>	<b>Rendimiento</b>	<b>Sostenibilidad</b>	<b>Seguridad</b>	<b>Regulación sustentable</b>	<b>Ponderación</b>
<b>Rendimiento</b>	1	1/3	3	7	0,27
<b>Sostenibilidad</b>	3	1	5	9	0,56
<b>Seguridad</b>	1/3	1/5	1	5	0,13
<b>Regulación sustentable</b>	1/7	1/9	1/5	1	0,04

Fuente. Elaboración propia

La tabla 16 muestra que la sostenibilidad es el criterio más importante en el estudio, lo que indica que la selección de materiales para la construcción sustentable prioriza su impacto ambiental y eficiencia a largo plazo. Sin embargo, estos criterios siguen siendo generales, por lo que el enfoque detallado de la investigación se encuentra en los subcriterios, donde se analizan aspectos específicos a partir de estos criterios.

### 3.2.1. VERIFICACIÓN DE COHERENCIA DE CRITERIOS

Tabla 17. Relación de consistencia de criterios

AxP		
1,14	<b>Índice de consistencia (CI)</b>	0,085
2,40	<b>Índice de aleatoriedad (RI)</b>	0,990
0,54	<b>Relación de consistencia (CR &lt; 0,1)</b>	0,086
0,17		
4,26		

Fuente. Elaboración propia

Los juicios se consideran consistentes al tener una relación de consistencia (CR) menor a 0,1 (10%) como lo establece el método.

### 3.3. COMPARACIÓN POR PARES DE SUB-CRITERIOS

En este caso, para garantizar una evaluación equitativa y objetiva de los materiales, se decide asignar a todos los sub-criterios una importancia igual en la escala de Saaty. Esto implica que, en la matriz de comparación de pares, todos los sub-criterios recibieron una calificación de 1 entre sí, indicando que tienen el mismo peso relativo dentro de la toma de decisiones

Al haber otorgado la misma valoración a cada uno, se obtuvo una ponderación de 0,09 para todos los sub-criterios, lo que equivale a un 9% de importancia relativa en la toma de decisiones dentro del modelo de evaluación aplicado.

### 3.3.1. VERIFICACIÓN DE COHERENCIA DE SUB-CRITERIOS

Tabla 18. Relación de consistencia de sub-criterios

AxP		
1,00	<b>Índice de consistencia (CI)</b>	0,00
1,00	<b>Índice de aleatoriedad (RI)</b>	1,62
1,00	<b>Relación de consistencia (CR &lt; 0,1)</b>	0,00
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
1,00		
11,00		

Fuente. Elaboración propia

Como lo establece el método, los juicios deben tener un CR menor a 0,1. En el caso de los sub-criterios al tener una ponderación equitativa, el CR es 0, lo que indica una coherencia total en las comparaciones.

### 3.4. ANÁLISIS DE MATERIALES

Se lleva a cabo la comparación de las alternativas con respecto a los sub-criterios previamente establecidos, los que permitirá evaluar y seleccionar materiales con menor impacto ambiental, asegurando un equilibrio entre todos los sub-criterios y así identificar aquellos que sean candidatos para su posible aplicación en el país.

- Conductividad térmica

En la Tabla 19 se muestran los resultados de la evaluación de los materiales bioaislantes y convencionales según el sub-criterio de conductividad térmica.

Tabla 19. Comparación de alternativas respecto a la conductividad térmica

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,07
Celulosa	0,07
Cáñamo	0,07
Lino	0,07
Lana de oveja	0,07
Trigo	0,07
Lana de vidrio	0,07
Lana de roca	0,07
Poliestireno expandido	0,17
Poliestireno extruido	0,07
Poliuretano	0,22

Fuente. Elaboración propia

Según el análisis, los materiales convencionales como el poliestireno expandido y el poliuretano obtuvieron ponderaciones de 0,17 y 0,22, respectivamente, lo que refleja su mejor desempeño en conductividad térmica, siendo técnicamente más eficientes como aislantes. No obstante, las diferencias con los materiales bioaislantes no son sustanciales, ya que presentan valores de conductividad térmica competitivos, lo que permite considerarlos igualmente viables desde una perspectiva térmica. En este sentido, la ligera ventaja técnica de los materiales sintéticos no justifica descartar el uso de bioaislantes.

- Resistencia a la absorción del agua

En la Tabla 20 se presentan los resultados obtenidos en función del sub-criterio de resistencia a la absorción del agua.

Tabla 20. Comparación de alternativas respecto a la resistencia a la absorción del agua

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,07
Celulosa	0,07
Cáñamo	0,07
Lino	0,07
Lana de oveja	0,07
Trigo	0,07
Lana de vidrio	0,07
Lana de roca	0,07
Poliestireno expandido	0,07
Poliestireno extruido	0,18
Poliuretano	0,22

Fuente. Elaboración propia

Los resultados muestran que los materiales naturales tienen una resistencia a la absorción de agua similar, con una ponderación de 0,07, lo que indica que no tienen una alta resistencia a comparación de determinados convencionales. Esto se debe a su estructura celular más abierta y porosa, que puede permitir la absorción de agua en condiciones de humedad. Como consecuencia, estos materiales pueden requerir tratamientos hidrófugos para mejorar su desempeño en situaciones de alta humedad o exposición directa al agua. En cambio, los materiales convencionales, como el poliestireno extruido y el poliuretano, presentan valores más altos de 0,18 y 0,22, respectivamente, ya que son materiales con una estructura celular cerrada que impide la absorción de humedad. Las celdas cerradas actúan como barreras que impiden la penetración de agua, lo que hace que estos materiales sean más adecuados en entornos con altos niveles de humedad.

- Carbono embebido

La Tabla 21 muestra la ponderación de los materiales en relación con el sub-criterio de carbono embebido, el cual mide la cantidad de carbono generado durante la extracción y producción del material.

Tabla 21. Comparación de alternativas respecto al carbón embebido

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,12
Celulosa	0,12
Cáñamo	0,12
Lino	0,12
Lana de oveja	0,12
Trigo	0,02
Lana de vidrio	0,12
Lana de roca	0,12
Poliestireno expandido	0,04
Poliestireno extruido	0,04
Poliuretano	0,04

Fuente. Elaboración propia

En este aspecto, los materiales naturales destacan al alcanzar las ponderaciones más altas (0,12), evidenciando su bajo impacto ambiental en términos de emisiones asociadas a las etapas iniciales del ciclo de vida. Estos materiales comparten características como un origen renovable, el uso de residuos agroforestales y una producción de baja intensidad energética.

Particularmente, el cáñamo presenta uno de los valores más bajos de carbono embebido reportados (0,14 kg CO<sub>2</sub>eq/kg), lo que se debe, en parte, a su rápida tasa de crecimiento y su capacidad de capturar grandes cantidades de CO<sub>2</sub> atmosférico durante el cultivo. En el caso de la celulosa, su bajo valor (0,31 kg CO<sub>2</sub>eq/kg) está asociado a la eficiencia en la reutilización de residuos de papel reciclado y al aprovechamiento de infraestructura existente en la región del Biobío. Por su parte, la corteza de eucalipto (1,2 kg CO<sub>2</sub>eq/kg) se destaca por revalorizar un subproducto forestal abundante, integrándose a estrategias de economía circular.

En contraste, los materiales sintéticos como el poliestireno expandido, poliestireno extruido y poliuretano obtuvieron una ponderación reducida (0,04), reflejando su mayor huella ambiental. Estos materiales requieren procesos petroquímicos e industriales intensivos en energía, además de una baja biodegradabilidad.

Cabe mencionar que todos los valores utilizados se enmarcan bajo el enfoque “de la cuna a la puerta” (cradle to gate), lo que implica que las emisiones contabilizadas incluyen la extracción de materias primas, transporte de estas y fabricación del material aislante térmico. Este límite del sistema no contempla etapas posteriores como la instalación, uso, mantenimiento o disposición final. Por esta razón, el transporte desde planta hasta el sitio de aplicación en Concepción fue considerado como un sub-criterio independiente, con el fin de evaluar de forma más precisa la pertinencia territorial de los materiales.

- Energía Embebida

En la Tabla 22, se presentan los resultados correspondientes al sub-criterio de energía embebida, el cual evalúa la cantidad de energía necesaria para la extracción y fabricación. La ponderación obtenida permite identificar qué materiales requieren un menor consumo energético en su ciclo de vida expuesto de cradle to gate.

Tabla 22. Comparación de alternativas respecto a la energía embebida

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,06
Celulosa	0,29
Cáñamo	0,06
Lino	0,06
Lana de oveja	0,23
Trigo	0,10
Lana de vidrio	0,08
Lana de roca	0,07
Poliestireno expandido	0,02
Poliestireno extruido	0,02
Poliuretano	0,02

Fuente. Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran que la celulosa (0,29) y la lana de oveja (0,23) destacan con las ponderaciones más altas en este subcriterio, evidenciando su bajo consumo energético en las etapas de extracción y fabricación. Este desempeño se

atribuye a su origen natural y al hecho de que ambos materiales se obtienen a partir de residuos o subproductos.

En el caso de la celulosa, su fabricación a partir de papel reciclado permite evitar la producción de nuevas fibras, lo que disminuye significativamente el uso de energía primaria. Por su parte, la lana de oveja es un subproducto de la actividad ganadera, cuyo acondicionamiento como aislante térmico solo requiere tratamientos mecánicos como el lavado y el cardado, sin necesidad de transformación química.

En contraste, materiales como el poliestireno expandido, el extruido y el poliuretano alcanzan ponderaciones bajas (0,02), lo cual se explica por los altos niveles de energía embebida que demandan sus procesos petroquímicos, además del uso de aditivos y agentes espumantes que requieren un consumo energético elevado durante la producción.

Otros bio-aislantes como la corteza de eucalipto, el cáñamo y el lino presentan una ponderación intermedia (0,06), debido a que, si bien son de origen natural, sus procesos de transformación industrial pueden incluir etapas de secado, prensado o adición de aglutinantes que incrementan su huella energética respecto a opciones más simples como la celulosa o la lana de oveja.

- Biodegradabilidad

La Tabla 23 expone la ponderación de los materiales según su biodegradabilidad, un criterio clave en la sostenibilidad de los materiales de construcción. Se evaluó la capacidad de cada material para descomponerse de manera natural.

Tabla 23. Comparación de alternativas respecto a la biodegradabilidad

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,16
Celulosa	0,16
Cáñamo	0,16
Lino	0,16
Lana de oveja	0,16
Trigo	0,04
Lana de vidrio	0,06
Lana de roca	0,06
Poliestireno expandido	0,02
Poliestireno extruido	0,02
Poliuretano	0,02

Fuente. Elaboración propia

En este criterio, los materiales bioaislantes presentan los valores más altos, con ponderaciones de 0,16, lo que indica que son más biodegradables y generan menos residuos, debido a que su degradación suele ocurrir mediante procesos biológicos, donde los microorganismos descomponen sus componentes orgánicos en un tiempo reducido. En contraste, los materiales convencionales tienen valores mucho menores, alrededor de 0,02, lo que sugiere que su procesamiento es más lento, ya que cuando finalmente se descomponen en más de 500 años incluso, suelen liberar micro plásticos o sustancias tóxicas, aumentando la contaminación ambiental.

Sin embargo en los bio-aislantes, la biodegradabilidad no depende exclusivamente del origen natural del material, sino también de los procesos industriales que este recibe. Por ejemplo, a celulosa puede contener boratos, lignina o almidón, compuestos que no alteran significativamente su descomposición (Hurtado et al., 2016; Tumusiime et al., 2019). La corteza de eucalipto utiliza un 4% de fibras sintéticas como aglutinante térmico y algunos agentes antifúngicos (Casas-Ledeón et al., 2020), mientras que la lana de oveja suele usarse sin adhesivos, aunque puede incorporar boro como retardante de fuego (Altin y Yildirim, 2022).

Estas soluciones permiten mantener un buen nivel de biodegradabilidad sin comprometer la funcionalidad del material. En contraste, otros materiales como el trigo requieren tratamientos más agresivos, incluyendo el uso de NaOH y silanos, que mejoran su cohesión estructural, pero reducen significativamente su capacidad de descomposición natural (Wu et al., 2024).

- Transporte

En la Tabla 24, se presentan los resultados del subcriterio de transporte, el cual evalúa la distancia entre el lugar de producción del material y la ciudad de Concepción, considerando este factor como un indicador de disponibilidad territorial y viabilidad logística, más que como una medición directa de emisiones.

Tabla 24. Comparación de alternativas respecto al transporte

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,24
Celulosa	0,24
Cáñamo	0,02
Lino	0,11
Lana de oveja	0,04
Trigo	0,22
Lana de vidrio	0,03
Lana de roca	0,03
Poliestireno expandido	0,03
Poliestireno extruido	0,03
Poliuretano	0,03

Fuente. Elaboración propia

Los materiales que tienen ponderaciones más altas, entre 0,22 y 0,24, significa que tienen mayor disponibilidad cerca de Concepción. El contar con materiales con disponibilidad, permite menores costos y emisiones en su traslado si se realizara una cuantificación de esto.

Un caso interesante es el del lino, que si bien actualmente no se produce de manera industrial en Chile, su cultivo es técnicamente viable en diversas zonas del país, incluyendo la región del Biobío. Chile presenta condiciones agroclimáticas favorables para el cultivo de lino, especialmente en regiones como La Araucanía, donde ya se cultiva linaza con buenos resultados. Además, el Centro de Genómica Nutricional Agroacuicola (CGNA) ha desarrollado 120 variedades de lino resistentes a la sequía y con mayor rendimiento productivo, capaces de generar hasta un 100% más de semillas bajo estrés hídrico. Estas plantas poseen sistemas radiculares más profundos, lo que permite su cultivo en zonas con menor disponibilidad de agua. Este avance, junto a la creciente demanda de materiales sostenibles, representa una oportunidad real para desarrollar una cadena de valor local que aproveche tanto la semilla como la fibra para producir aislantes térmicos en Chile (CGNA, 2022).

La lana de oveja presenta una baja ponderación (0,04), ya que su producción se concentra principalmente en las regiones australes del país, como Los Ríos, Los Lagos, Aysén y Magallanes. El traslado del material hasta Concepción implica largas distancias, lo que limita su competitividad en contextos donde se prioriza la disponibilidad local. No obstante, su uso podría ser particularmente pertinente en las mismas regiones donde se produce y se potencia la aplicación en otro lugar del país que no es el lugar de estudio.

El cáñamo obtuvo una ponderación de 0,02, en gran parte debido a su limitada disponibilidad en el país. Actualmente, debe ser importado desde Europa, particularmente desde Francia, lo que encarece su acceso y dificulta su incorporación en soluciones constructivas locales. A esto se suman la restricción legal para el cultivo de Cannabis sativa en Chile, incluso en su variante industrial con bajo contenido de THC. Aunque es posible cultivarlo con autorización del SAG, el proceso es complejo y poco promovido, lo que ha limitado su desarrollo a nivel nacional.

- Resistencia al Fuego

La Tabla 25 muestra la ponderación de los materiales en relación con su resistencia al fuego, un aspecto fundamental en la seguridad de las edificaciones. Es un factor crítico para la seguridad en edificaciones, ya que determina el tiempo y la forma en que un material reacciona ante la exposición a altas temperaturas o llamas.

Tabla 25. Comparación de alternativas respecto a la resistencia al fuego

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,02
Celulosa	0,12
Cáñamo	0,05
Lino	0,05
Lana de oveja	0,02
Trigo	0,05
Lana de vidrio	0,30
Lana de roca	0,30
Poliestireno expandido	0,02
Poliestireno extruido	0,04
Poliuretano	0,02

Fuente. Elaboración propia

En general, ninguno de los materiales analizados se destaca significativamente en resistencia al fuego, ya que muchos presentan comportamientos inflamables o combustibles, tanto en los naturales como en los convencionales. Solo la lana de vidrio y la lana de roca alcanzan una ponderación alta 0,30, debido a su naturaleza incombustible. Ambos pueden soportar temperaturas superiores a 600 °C sin degradarse, lo que los hace aptos para sectores donde se requiere protección pasiva contra incendios, como tabiques cortafuego o zonas técnicas.

- Uso de Aglutinante

En la Tabla 26, se presentan las ponderaciones obtenidas para los materiales en función del uso de aglutinante, un factor relevante en la estabilidad estructural y el impacto ambiental de los materiales.

Tabla 26. Comparación de alternativas respecto al uso de aglutinante

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,12
Celulosa	0,12
Cáñamo	0,12
Lino	0,12
Lana de oveja	0,12
Trigo	0,03
Lana de vidrio	0,02
Lana de roca	0,02
Poliestireno expandido	0,12
Poliestireno extruido	0,12
Poliuretano	0,12

Fuente. Elaboración propia

Tanto los materiales bioaislantes como los convencionales presentan valores similares, con la mayoría en 0,12. Lo que indica un uso nulo o bajo de aglutinantes. Esto sugiere que muchos de estos materiales poseen una cohesión intrínseca o requieren una cantidad reducida de adhesivos para su fabricación.

Sin embargo, es importante considerar no solo la cantidad, sino también la naturaleza del aglutinante utilizado. Aglutinantes sintéticos, como los basados en sales de amonio u otros compuestos derivados de recursos fósiles, pueden generar impactos ambientales significativos: contribuyen a la eutrofización si se filtran al agua, aumentan la energía embebida y la huella de carbono del producto, y pueden liberar compuestos orgánicos volátiles que afectan la calidad del aire interior. Además, dificultan la reciclabilidad del material al final de su vida útil.

- Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica

La Tabla 27 contiene los resultados obtenidos para el sub-criterio PPDA, el cual evalúa la contribución de los materiales a la reducción de emisiones contaminantes y al cumplimiento de planos ambientales.

Tabla 27. Comparación de alternativas respecto al PPDA

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,13
Celulosa	0,13
Cañamo	0,13
Lino	0,13
Lana de oveja	0,13
Trigo	0,13
Lana de vidrio	0,04
Lana de roca	0,04
Poliestireno expandido	0,04
Poliestireno extruido	0,04
Poliuretano	0,04

Fuente. Elaboración propia

En este criterio, los materiales bioaislantes tienen mayores ponderaciones, cercanas a 0,13, debido a sus procesos productivos que demandan menor energía, ya que en su mayoría usan subproductos o residuos del material. Además, incluso algunos materiales durante su fase de crecimiento pueden capturar carbono de la atmósfera.

Por otro lado, los materiales convencionales presentan valores más bajos, alrededor de 0,04, lo que refleja su mayor contribución a la contaminación atmosférica. Esto se debe a que sus procesos industriales se basan en la química de polímeros derivados del petróleo, que requieren altas temperaturas, uso de catalizadores, y generan residuos gaseosos que incluyen compuestos orgánicos volátiles y partículas finas.

- Reglamentación Térmica de la OGUC

En la Tabla 28, se presentan las ponderaciones asignadas a los materiales según su grado de cumplimiento con la Reglamentación Térmica de la OGUC.

Tabla 28. Comparación de alternativas respecto a la reglamentación térmica de la OGUC

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,09
Celulosa	0,09
Cañamo	0,09
Lino	0,09
Lana de oveja	0,09
Trigo	0,09
Lana de vidrio	0,09
Lana de roca	0,09
Poliestireno expandido	0,09
Poliestireno extruido	0,09
Poliuretano	0,09

Fuente. Elaboración propia

Los resultados muestran que todos los materiales evaluados obtienen una ponderación equivalente (0,09), lo que indica que cumplen con los rangos de transmitancia térmica exigidos por la OGUC, que oscilan entre 0,30 y 0,80 W/m<sup>2</sup>·K, dependiendo de la zona térmica. Este cumplimiento se debe a que los materiales seleccionados, tanto bioaislantes como convencionales, tienen coeficientes de conductividad térmica suficientemente bajos o pueden alcanzar los valores normativos mediante espesores adecuados.

El cumplimiento de la normativa no depende solo del material, sino también de su espesor, sistema constructivo y zona geográfica. Por ejemplo, aislantes como la celulosa o la lana de oveja cumplen en zonas templadas, pero en climas más extremos, como lo es en la zona austral de nuestro país, requieren mayor espesor o combinarse con otros materiales.

- Estándares de Construcción Sostenible

La Tabla 29 muestra la ponderación de los materiales en función de su cumplimiento con los Estándares de Construcción Sustentable, los cuales abarcan eficiencia energética, impacto ambiental y materiales renovables.

Tabla 29. Comparación de alternativas respecto a los estándares de construcción sustentable

<b>Alternativas</b>	<b>Ponderación</b>
Corteza de eucalipto	0,15
Celulosa	0,15
Cañamo	0,15
Lino	0,15
Lana de oveja	0,15
Trigo	0,15
Lana de vidrio	0,02
Lana de roca	0,02
Poliestireno expandido	0,02
Poliestireno extruido	0,02
Poliuretano	0,02

Fuente. Elaboración propia

Los materiales bioaislantes presentan ponderaciones (0,15) porque son naturales o reciclados, tienen baja energía embebida, alta biodegradabilidad y menores emisiones, lo que los hace más compatibles con certificaciones ambientales como CES o LEED.

En cambio, los materiales convencionales, como el poliuretano y el poliestireno, presentan bajas ponderaciones (0,02) debido a su alto impacto en la fabricación, uso de derivados del petróleo y limitada reciclabilidad. Esto evidencia que los bioaislantes son más adecuados para proyectos sustentables y con menor huella ambiental.

### 3.5. EVALUACIÓN DE ESCENARIOS

Luego de realizar la comparación entre los criterios, sub-criterios y las diferentes alternativas en función de estos subcriterios, se procedió al cálculo de la priorización de

cada alternativa utilizando la función “SUMAPRODUCTO” en Excel. Esta función permitió multiplicar los valores asignados a cada alternativa en cada sub-criterio por su respectiva ponderación y sumar los resultados obtenidos, generando así un puntaje final que refleja el desempeño global de cada opción.

Tabla 30. Desempeño de cada alternativa respecto a los subcriterios

Alternativas	C.T.	R.A.A.	C.E.	E.E.	B.	T.	R.F.	U.A.	PPDA	R.T.	E.C.S.	Priorización
<b>Corteza de eucalipto</b>	0,07	0,07	0,12	0,06	0,16	0,24	0,02	0,12	0,13	0,09	0,15	0,111
<b>Celulosa</b>	0,07	0,07	0,12	0,29	0,16	0,24	0,12	0,12	0,13	0,09	0,15	0,142
<b>Cáñamo</b>	0,07	0,07	0,12	0,06	0,16	0,02	0,05	0,12	0,13	0,09	0,15	0,094
<b>Lino</b>	0,07	0,07	0,12	0,06	0,16	0,11	0,05	0,12	0,13	0,09	0,15	0,101
<b>Lana de oveja</b>	0,07	0,07	0,12	0,23	0,16	0,04	0,02	0,12	0,13	0,09	0,15	0,109
<b>Trigo</b>	0,07	0,07	0,02	0,10	0,04	0,22	0,05	0,03	0,13	0,09	0,15	0,088
<b>Lana de vidrio</b>	0,07	0,07	0,12	0,08	0,06	0,03	0,30	0,02	0,04	0,09	0,02	0,081
<b>Lana de roca</b>	0,07	0,07	0,12	0,07	0,06	0,03	0,30	0,02	0,04	0,09	0,02	0,080
<b>Poliestireno expandido</b>	0,17	0,07	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,12	0,04	0,09	0,02	0,057
<b>Poliestireno extruido</b>	0,07	0,18	0,04	0,02	0,02	0,03	0,04	0,12	0,04	0,09	0,02	0,060
<b>Poliuretano</b>	0,22	0,22	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,12	0,04	0,09	0,02	0,076

Fuente. Elaboración propia

Los resultados obtenidos muestran que la celulosa es la alternativa con mejor desempeño, alcanzando un puntaje de (0,142), seguida por la corteza de eucalipto con (0,111) y la lana de oveja con (0,109).

Aunque tanto la celulosa como la corteza de eucalipto son residuos de la industria forestal, sus procesos de fabricación presentan diferencias. El aislante de celulosa se fabrica a partir de residuos de papel reciclado, a través de un proceso altamente tecnificado que incluye trituración, desfibrado, secado, tratamiento ignífugo con boratos y posterior compactación. Estas etapas están automatizadas, se realizan a gran escala y con alta eficiencia energética, lo que permite obtener un producto homogéneo y con baja energía embebida (0,94 MJ/kg).

En contraste, la corteza de eucalipto, aunque también se valoriza industrialmente, requiere etapas como secado, molienda, adición de fibras sintéticas y prensado térmico para formar paneles, pero su producción aún no está ampliamente estandarizada ni automatizada. Esto se debe, en parte, a que es un recurso menos investigado en el ámbito constructivo, por lo que su desarrollo se encuentra en una etapa inicial y presenta una mayor variabilidad en consumo energético (14,4 MJ/kg)

Además, la resistencia al fuego de la celulosa, que alcanza clasificación A1 gracias al uso de boratos, ofrece una ventaja ingenieril en proyectos normados con altas exigencias de seguridad. Por el contrario, aunque la corteza de eucalipto también cumple con los requisitos de ignifugación, su desempeño es más limitado al utilizar retardantes convencionales y fibras sintéticas.

Pese a estas diferencias, la corteza de eucalipto representa una segunda opción altamente competitiva, especialmente considerando su alta disponibilidad local, su carácter de subproducto forestal y su potencial de valorización dentro de una economía circular. Su uso podría consolidarse como una solución técnica y ambientalmente viable.

La lana de oveja, ubicada en el tercer lugar, obtuvo altos puntajes en energía embebida (0,23) y biodegradabilidad. No obstante, su ponderación se ve limitada por su baja disponibilidad en la región del Biobío, ya que su producción se concentra en las regiones australes.

Un resultado destacado del estudio fue la alta competitividad de los materiales naturales frente a los convencionales. No obstante, este estudio se enfocó en las etapas de extracción y producción del aislante, por lo que aún falta investigación sobre su comportamiento en todo el ciclo de vida, incluyendo uso, mantenimiento y disposición final. Además, aunque los bio-aislantes presentan mayor biodegradabilidad, algunos aún utilizan aglutinantes sintéticos, lo que puede afectar su degradación. En contraste, los aislantes convencionales como el poliuretano, el EPS o XPS no son biodegradables, tienen una energía embebida significativamente mayor (80,8 MJ/kg, 72,8 MJ/kg y 74

MJ/kg respectivamente) y suelen incorporar compuestos derivados del petróleo que dificultan su reciclaje o disposición final.

Finalmente, se presenta un análisis gráfico de esta distribución en la figura 3, mostrando una diferenciación clara entre las alternativas con mayor y menor desempeño.

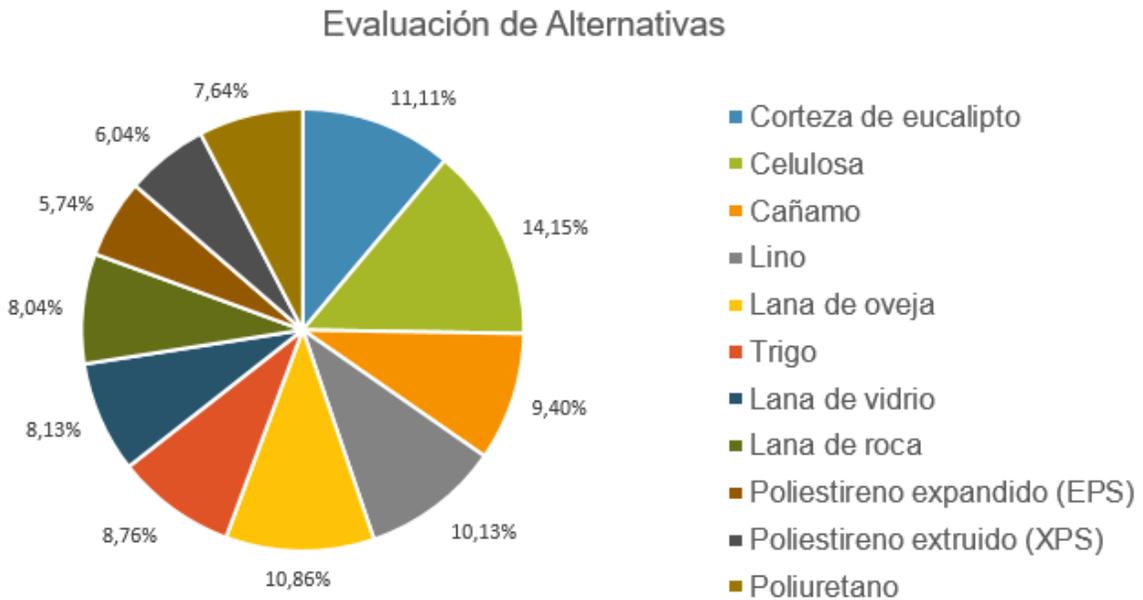


Figura 3. Desempeño global de cada alternativa  
Fuente. Elaboración propia

### 3.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realiza un análisis de sensibilidad con el propósito de evaluar como la variación en la priorización de cada sub-criterio afecta la ponderación de las alternativas. En la metodología utilizada, cada sub-criterio tiene un peso equitativo inicial de aproximadamente 9%. Para evaluar cómo este balance afecta los resultados, se asignaron distintos niveles de importancia a cada sub-criterio, estableciendo pesos de priorización del 10, 20, 30, 40, 50 y 60%, lo que permite analizar su influencia en la jerarquización final de las opciones.

El concepto de peso de priorización implica incrementar progresivamente el peso de un sub-criterio específico, con el fin de evaluar la sensibilidad de las decisiones ante variaciones en las prioridades establecidas.

Como resultado de esta variación, se generan más de 60 casos de estudio, lo que proporciona un análisis detallado y una comprensión más profunda de la estabilidad de los resultados. Además, en la sección de anexos se incluyen las tablas utilizadas para estos análisis de sensibilidad.

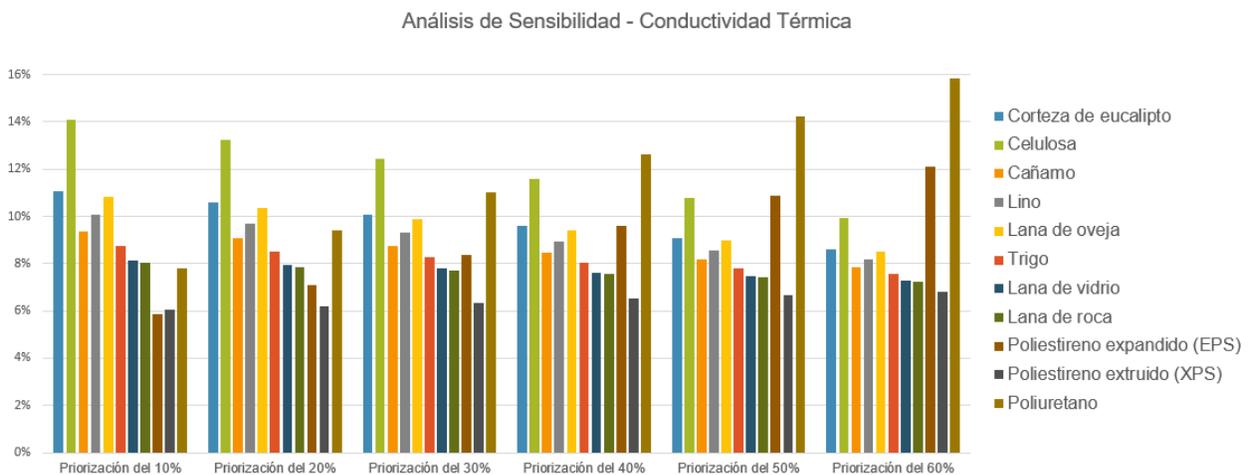


Figura 4. Análisis de sensibilidad de conductividad térmica  
Fuente. Elaboración propia

La figura 4 muestra que, los materiales naturales lideran el subcriterio cuando tienen un peso entre el 10% - 20%. Sin embargo, a medida que su peso aumenta, los materiales convencionales comienzan a liderar la jerarquización. Esto se debe a que cuentan con conductividades menores siendo un buen aislante. A pesar de esta variación, tanto las alternativas naturales como las convencionales presentan un desempeño adecuado en este aspecto.

Análisis de Sensibilidad - Resistencia a la Absorción del Agua

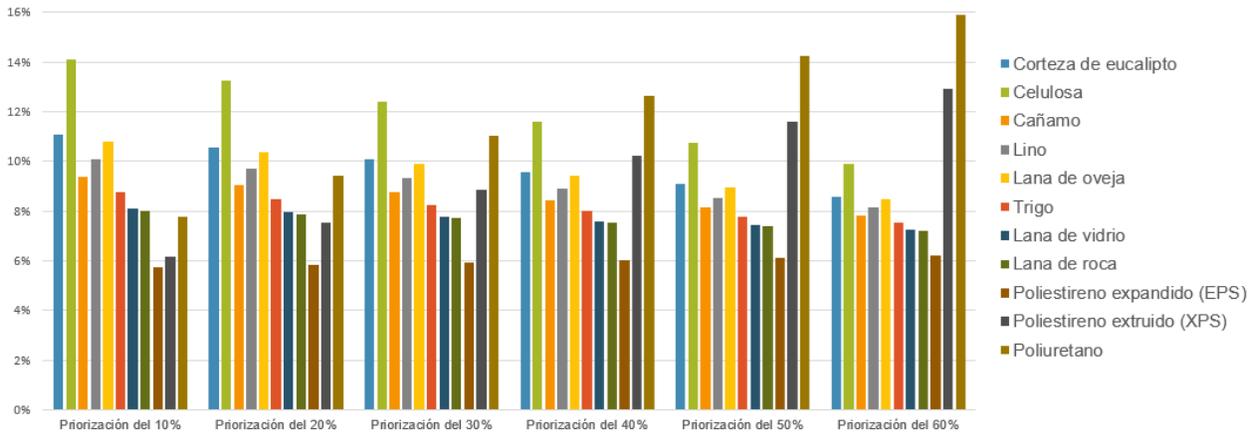


Figura 5. Análisis de sensibilidad de resistencia a la absorción del agua  
Fuente. Elaboración propia

En la figura 5 se observa que cuando la resistencia a la absorción del agua tiene un peso entre el 10% - 20% los materiales naturales destacan. No obstante, conforme aumenta el peso del subcriterio, los materiales convencionales ocupan un buen lugar, debido a su mayor capacidad de absorción de agua, es decir, tienen una mayor resistencia a la humedad.

Análisis de Sensibilidad - Carbono Embebido

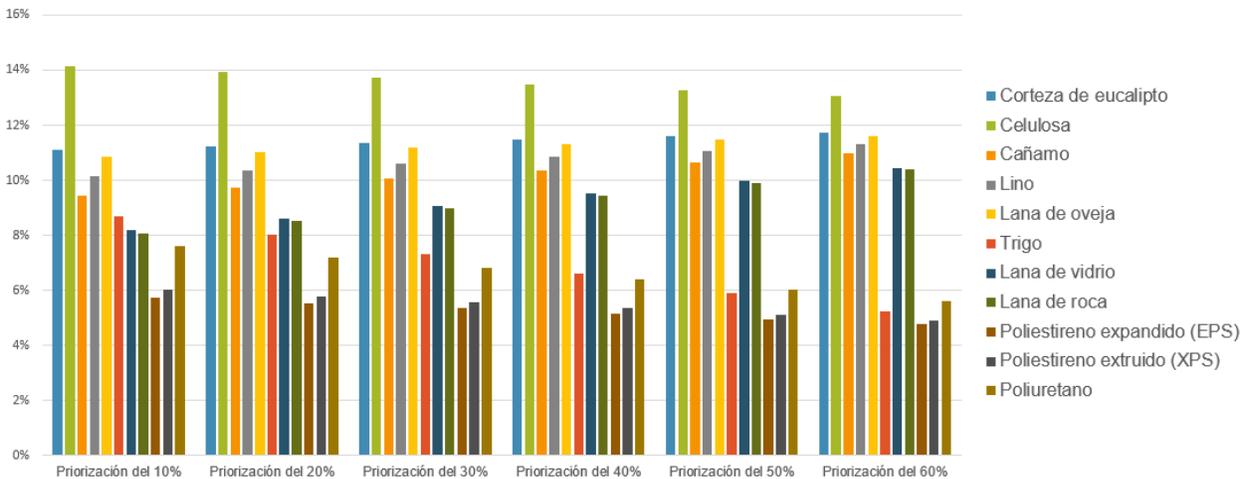


Figura 6. Análisis de sensibilidad del carbono embebido  
Fuente. Elaboración propia

El análisis de la figura 6 muestra una tendencia clara en la que materiales naturales destacan por sus bajos valores de carbono embebido, cuando se considera únicamente la etapa de extracción, transporte interno y fabricación. Este enfoque permite identificar aquellas alternativas que generan menores emisiones durante su producción inicial.

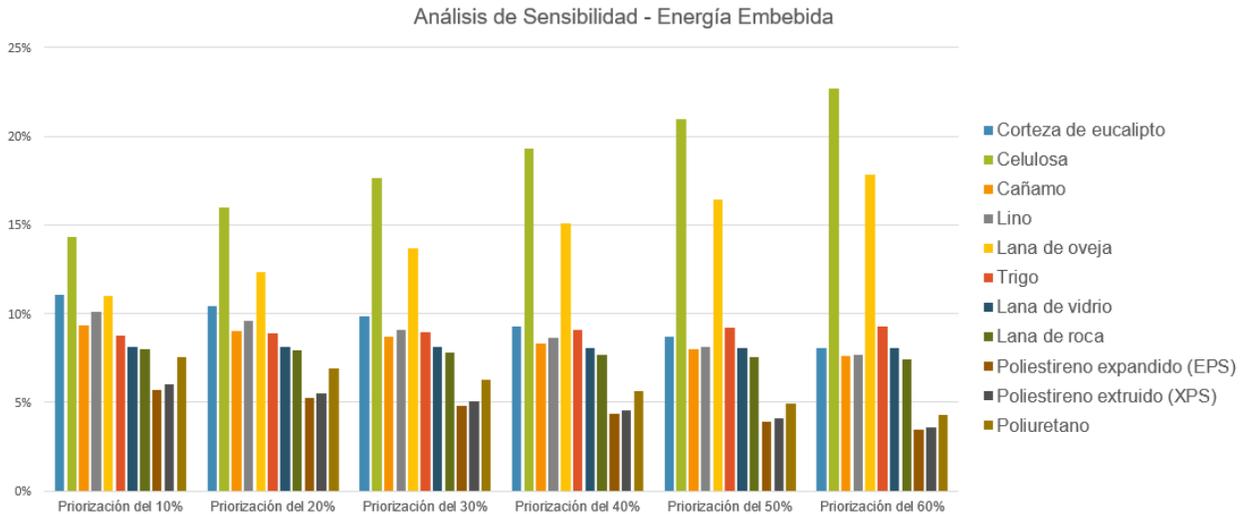


Figura 7. Análisis de sensibilidad de la energía embebida  
Fuente. Elaboración propia

En la figura 7 que, debido a que requieren menor energía en su extracción y fabricación, lo que reduce su impacto ambiental, los materiales como la celulosa, lana de oveja y corteza de eucalipto, cuentan desde un inicio con mejor ponderación.

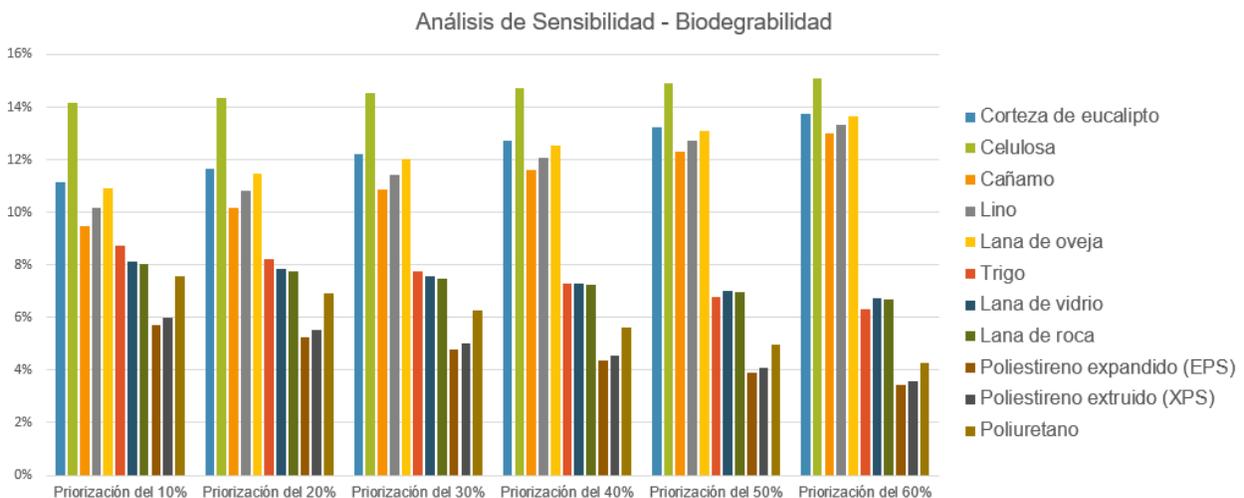


Figura 8. Análisis de sensibilidad de la biodegradabilidad  
Fuente. Elaboración propia

Se observa en la figura 8 que los materiales naturales, lideran la priorización a medida que se incrementa la ponderación de este subcriterio. Esto se debe a que son altamente biodegradables, lo que les otorga una ventaja en términos de sostenibilidad.

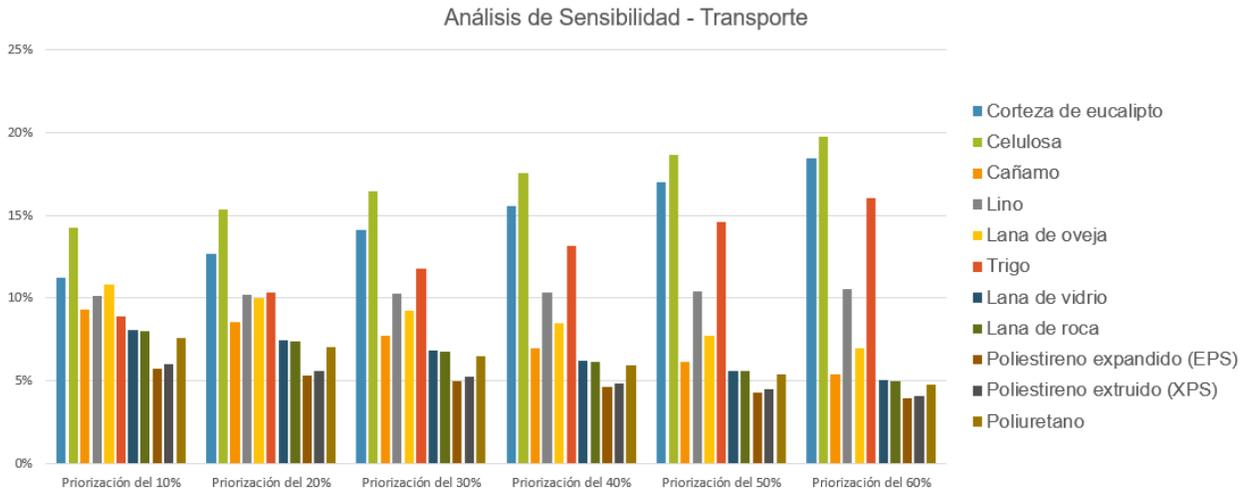


Figura 9. Análisis de sensibilidad del transporte  
Fuente. Elaboración propia

En la figura 9, los materiales que presentan mayor ponderación en este análisis de sensibilidad son aquellos que se encuentran disponibles a menor distancia de la Región del Biobío, lo que implica una mayor viabilidad logística y mejor adaptación territorial para su implementación en proyectos constructivos locales.

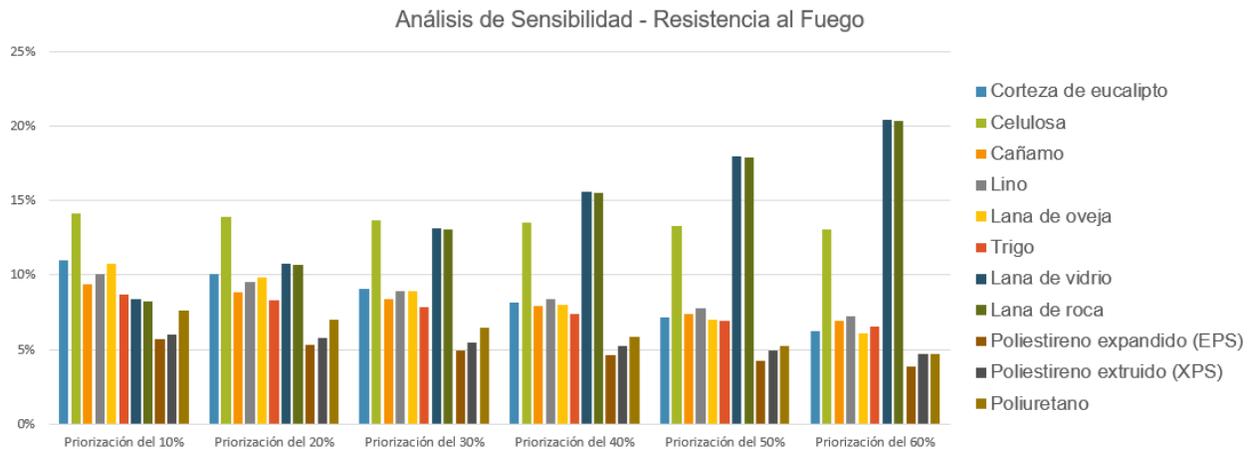


Figura 10. Análisis de sensibilidad de la resistencia al fuego  
Fuente. Elaboración propia

En la figura 10 se observa que a medida que aumenta la ponderación de este subcriterio, los materiales con mayor resistencia al fuego, es decir, aquellos que tardan más minutos en inflamarse, comienzan a liderar la priorización. Se observa que materiales como la lana de roca y la lana de vidrio destacan en este aspecto, mientras que opciones más combustibles presentan una menor priorización.

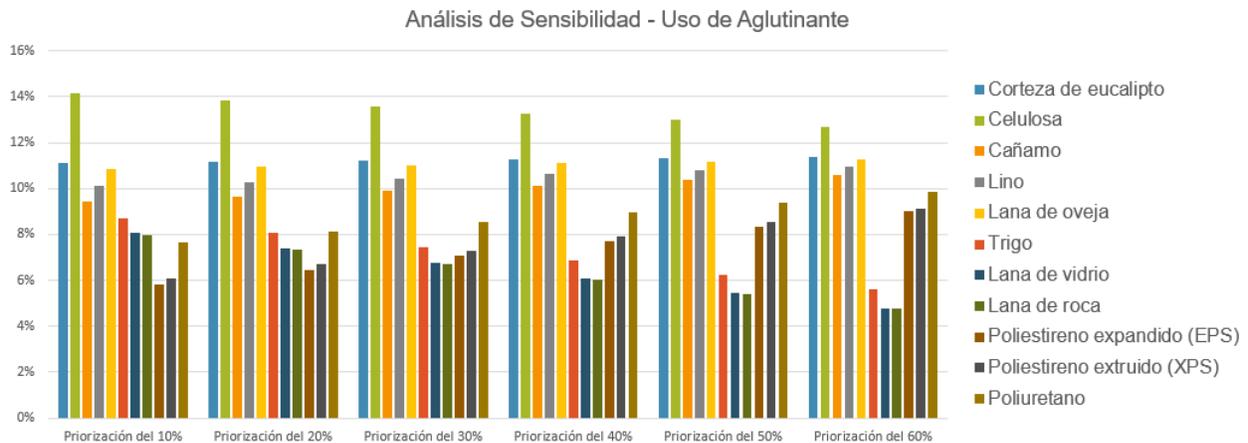


Figura 11. Análisis de sensibilidad del uso de aglutinante  
Fuente. Elaboración propia

Se muestra en la figura 11 que, las alternativas naturales a lo largo de las priorizaciones lideran, ya que requieren una cantidad baja de aglutinantes.

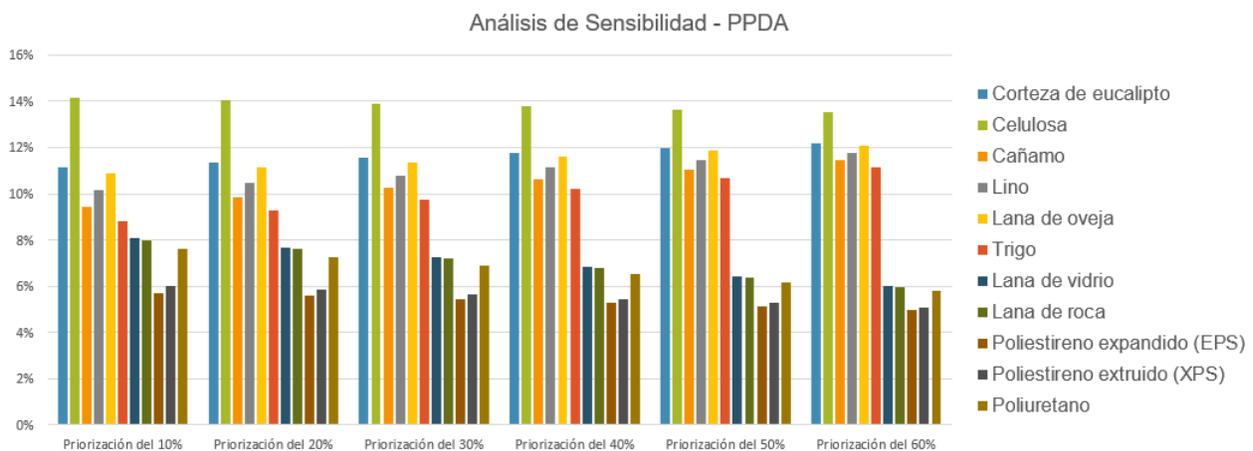


Figura 12. Análisis de sensibilidad del PPDA  
Fuente. Elaboración propia

Los materiales naturales en la figura 12 cuentan con mayor ponderación en cualquiera de los casos, ya que estos cumplen los requisitos de este plan, lo que implica que son menos contaminantes y más eficientes en términos de emisiones.

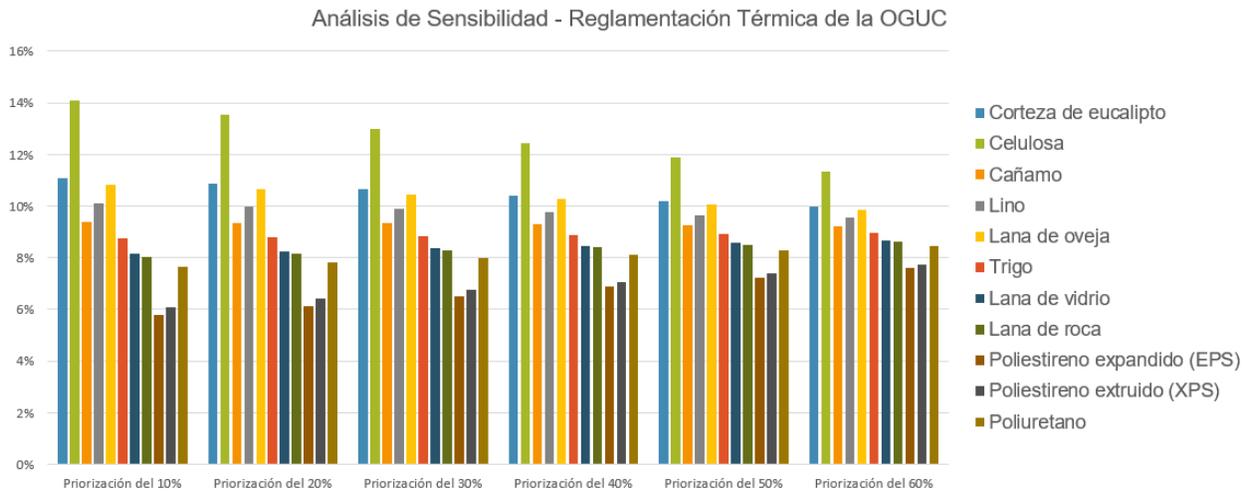


Figura 13. Análisis de sensibilidad de la reglamentación térmica de la OGUC  
Fuente. Elaboración propia

En el caso de la reglamentación térmica de la OGUC mostrada en la figura 13, todos los materiales cumplen con las normativas térmicas establecidas, por lo que, resulta en una distribución equilibrada, a pesar de visualmente tener tendencias pero estas son afectadas por las ponderaciones de otros subcriterios.

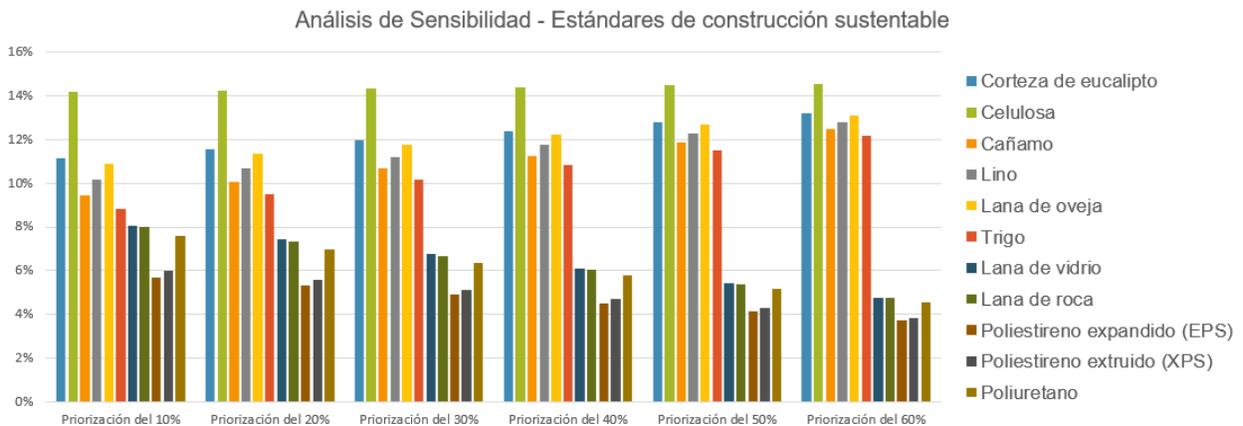


Figura 14. Análisis de sensibilidad de los estándares de construcción sustentable  
Fuente. Elaboración propia

En este subcriterio mostrado en la figura 14, se observa que los materiales naturales desde un inicio cumplen con los estándares de sostenibilidad, por tanto, obtienen una mejor ponderación.

A partir del análisis multicriterio desarrollado mediante AHP, complementado con el análisis de sensibilidad, se concluye que la celulosa se posiciona como el material más favorable para la construcción sustentable, gracias a su destacado rendimiento en subcriterios clave como energía embebida, resistencia al fuego, carbono embebido y producción local.

En este contexto, resulta relevante destacar que la región del Biobío, zona en la que se enmarca este estudio, posee una sólida presencia de la industria de la celulosa. Esta condición no solo fortalece la viabilidad de este material a nivel local, sino que también lo proyecta como una alternativa altamente competitiva a nivel nacional. Chile cuenta con una industria forestal ampliamente desarrollada, concentrada principalmente en las regiones del centro-sur del país, y en particular, en el Biobío operan cinco plantas productoras de celulosa, cuya capacidad conjunta supera los 2.500.000 toneladas anuales (Gysling et al., 2019). La industria del papel y cartón en Chile también representa una fuente relevante de materia prima potencial para la fabricación de aislantes sostenibles. Actualmente, esta industria produce entre 400.000 y 500.000 toneladas anuales, de las cuales cerca del 47% corresponde a papel reciclado (ANIR, 2022). Empresas como CMPC, a través de su filial SOREPA, lideran la recolección y procesamiento de estos residuos postconsumo, que son reincorporados en la elaboración de nuevos productos.

Este factor permite reforzar el aprovechamiento de recursos de origen nacional, promoviendo al mismo tiempo un enfoque territorialmente pertinente y sostenible.

Es importante destacar que el análisis de sensibilidad no tan solo busca confirmar que un material mantiene su rendimiento en todos los escenarios, sino que permite visualizar con mayor claridad las fortalezas relativas de cada alternativa cuando varían las

prioridades de decisión. Por ejemplo, al aumentar el peso del subcriterio de transporte, se favorecen materiales con producción local, como la corteza de eucalipto o la celulosa; si se prioriza la energía embebida, entonces los materiales naturales con bajos requerimientos energéticos como la lana de oveja o la celulosa toman protagonismo.

En ese sentido, el análisis de sensibilidad reafirma que los biomateriales en general tienen ventajas frente a los convencionales.

Para avanzar hacia una adopción a gran escala, se requiere fortalecer el desarrollo y validación de estos materiales a través de políticas públicas, incentivos, normativas específicas y fomento a la investigación aplicada. Además, se recomienda incorporar ensayos de resistencia a la compresión y otras propiedades mecánicas, con el fin de garantizar que los materiales cumplan requisitos estructurales exigidos para su uso en diferentes tipos de edificaciones.

Finalmente, se sugiere realizar un análisis de sensibilidad de los datos para evaluar como varia la ponderación de las alternativas en función de cambios en los datos utilizados.

## CAPITULO 4. CONCLUSIONES

El sector de la construcción es uno de los mayores emisores de gases de efecto invernadero, principalmente por la producción de materiales. Por ello, se vuelve fundamental proponer alternativas de aislamiento térmico que mejoren la eficiencia energética y reduzcan el impacto ambiental. En este marco, la presente investigación tuvo como objetivo analizar diversas alternativas para aislamiento térmico, analizando las propiedades y así concluir su viabilidad en Chile.

A lo largo del desarrollo de esta investigación, se logra cumplir con los objetivos propuestos inicialmente. En relación al primer objetivo específico, se logró identificar y analizar once propiedades claves para caracterizar los materiales de aislamiento térmico. Entre ellas, la conductividad térmica resultó ser un parámetro comúnmente competitivo, ya que todos los materiales seleccionados, tanto naturales como convencionales, presentaron valores entre 0,020 y 0,050 W/m·K, permitiendo concluir que los bioaislantes son viables desde el punto de vista del rendimiento térmico. Además, se identificaron materiales con capacidad de capturar carbono (como cáñamo y lana de oveja), implica que dichos materiales no solo reduzcan emisiones, sino que además compensen parte del CO<sub>2</sub> presente en la atmosfera, contribuyendo de forma activa a mitigar el cambio climático.

En segundo lugar, se logró comparar la sostenibilidad de diferentes materiales para aislación térmica mediante el uso del método del Proceso Analítico Jerárquico, el cual permitió integrar y ponderar los once sub-criterios en base a la escala establecida por Saaty. Como resultado, los materiales de origen natural se posicionaron por encima de los sintéticos siendo parte de los resultados esperados por la investigación. A partir de la aplicación del método se determinó cuales alternativas son las más favorables para sustituir o reemplazar los aislantes térmicos tradicionales sin comprometer su desempeño. La celulosa alcanzo el mayor puntaje con 0,142 siendo la opción más

equilibrada en todas las propiedades evaluadas, seguida por la corteza de eucalipto con 0,111 y la lana de oveja con 0,109.

La celulosa se posiciona como la opción más equilibrada, con bajo carbono embebido (0,31 kg CO<sub>2</sub>eq/kg), baja energía embebida (0,94 MJ/kg), alta resistencia al fuego (clasificación A1, 60 minutos), y cumplimiento normativo en Chile. Además, su disponibilidad local y el aprovechamiento de residuos de papel refuerzan su potencial, considerando que en Chile cerca del 47% del papel producido proviene de material reciclado, lo que complementa la alta producción de celulosa en la Región del Biobío, que alcanza aproximadamente 3.930.000 toneladas anuales, equivalentes al 73,7% del total nacional (INFOR, 2023; ANIR, 2022).

En comparación, la corteza de eucalipto, pese a compartir origen residual, presenta una energía embebida mayor (14,4 MJ/kg) y resistencia al fuego moderada, atribuida al uso de fibras sintéticas (4%) y menor eficiencia térmica por volumen. Sin embargo, su producción local, disponibilidad en la Región del Biobío y carácter circular la convierten en una segunda opción robusta y estratégica, especialmente para proyectos regionales con enfoque territorial.

Otros materiales como el cáñamo y el lino obtuvieron ponderaciones intermedias dentro de la evaluación multicriterio, reflejando un buen desempeño ambiental, pero ciertas limitaciones en su implementación actual en Chile.

En el caso del cáñamo (*Cannabis sativa* L.), este material destaca por su baja huella de carbono, incluso con potencial de ser carbono negativo, debido a su rápido crecimiento, captura de CO<sub>2</sub> y aprovechamiento del tallo. Además, presenta una conductividad térmica competitiva (0,039 W/m·K) y buena resistencia al fuego cuando se fabrica con aglutinantes adecuados. Sin embargo, enfrenta restricciones relevantes, ya que su cultivo está regulado por la Ley N° 20.000 de Drogas, lo que implica autorizaciones especiales del SAG, control del tipo de semilla (contiene menos del 0,3% de THC) y una trazabilidad

estricta del proceso productivo. Estas barreras dificultan la producción a escala industrial, limitando su potencial como aislante ampliamente disponible.

En el caso del lino, aunque actualmente no se produce de forma industrial para fabricar aislantes en Chile, tiene un gran potencial de desarrollo. Existen condiciones agroclimáticas favorables, especialmente en la Región de La Araucanía, donde el INIA y el CGNA han impulsado su cultivo con buenos resultados. Además, se han desarrollado variedades resistentes a la sequía, lo que permite ampliar su cultivo en el centro y sur del país.

En relación con el tercer objetivo específico, se evaluó la potencial aplicación de los materiales seleccionados. La celulosa mostró alta compatibilidad con la reglamentación térmica nacional, cumpliendo los requisitos de la OGUC para la zona centro-sur. Su uso permitiría reducir la demanda de calefacción en ciudades con alta contaminación invernal como Concepción, contribuyendo a las metas del PPDA. Además, su carbono embebido (0,31 kg CO<sub>2</sub>eq/kg) y su capacidad de biodegradación rápida refuerzan su alineación con la meta de carbono neutralidad al 2050.

El análisis de sensibilidad respaldó los resultados al mostrar cómo varían las alternativas al modificar la importancia de los sub-criterios. Este análisis no busca comprobar que un material mantenga un rendimiento constante, sino que permite visualizar de forma más clara las fortalezas específicas de cada opción según las prioridades del proyecto. Por ejemplo, al aumentar el peso del sub-criterio transporte, destacan materiales con producción local como la corteza de eucalipto y la celulosa. En cambio, al priorizar energía embebida o huella de carbono, las alternativas naturales superan ampliamente a los sintéticos. Así, el análisis de sensibilidad permite predecir el comportamiento de los materiales frente a distintos escenarios de decisión, reforzando la utilidad del modelo para apoyar procesos de selección en proyectos reales.

## REFERENCIAS

- Ali, M., Alabdulkarem, A., Nuhait, A., Al-Salem, K., Iannace, G., Almuzaiqer, R., Al-turki, A., Al-Ajlan, F., Al-Mosabi, Y., & Al-Sulaimi, A. (2020). Thermal and acoustic characteristics of novel thermal insulating materials made of Eucalyptus Globulus leaves and wheat straw fibers. *Journal of Building Engineering*, 32, 101452. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101452>
- Altin, M., & Yildirim, G. Ş. (2022). Investigation of usability of boron doped sheep wool as insulation material and comparison with existing insulation materials. *Construction and Building Materials*, 331, 127303. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127303>
- AMCS Group. (2023). Transporte de materiales de construcción: alcanzar los objetivos de sostenibilidad. Recuperado el 30 de noviembre de 2024, de <https://www.amcsgroup.com/es/blog/transporte-de-materiales-de-construccion/>
- Asdrubali, F., Schiavoni, S., & Horoshenkov, K. V. (2012). A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications. *Building Acoust*, 19(4), 283–312. <https://doi.org/10.1260/1351-010X.19.4.283>
- Asociación Nacional de la Industria del Reciclaje (ANIR). (2022). *Estadísticas del reciclaje en Chile 2022*. Recuperado el 12 de abril de 2025, de <https://anir.cl/la-asociacion-nacional-de-la-industria-del-reciclaje-anir-da-a-conocer-las-estadisticas-2022-de-reciclaje-de-envases-y-embalajes-y-cluster-automotriz/>
- Avalos, V., de Dienes, A. H., & Rodriguez, J. (2012). TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERO; APLICACIÓN DEL PROCESO ANALÍTICO JERÁRQUICO (AHP) PARA EL DESARROLLO Y LA SELECCIÓN DE FORMULACIONES DE GALLETAS SIN AZÚCAR. XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.
- Ayala, F. R. R., & Navarro, M. C. (2017). The Structural Fire Engineering a national approach and case of study. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 18(3), 253–

264. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432017000300253&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000300253&lng=es&nrm=iso)

Bakatovich, A., Bakatovich, N., Silva, A., & Gaspar, F. (2024). Thermal insulation materials based on eucalyptus bark fibres. *Construction and Building Materials*, 449, 138559. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138559>

Boogman, D. P. (2014). EPD - environmental product declaration blown insulation made of cellulose fibre. 1–20.

Bouhaj, Y., Sair, S., Ousaleh, H. A., Saadouni, M., Nadi, A., Cherkaoui, O., Tahiri, M., & El Bouari, A. (2024). Harnessing carboxymethyl cellulose as eco-binder to transform polyester textile waste into high-performance fire-resistant thermal insulation panels. *Industrial Crops and Products*, 222(3), 119810. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119810>

Brzyski, P., Barnat-Hunek, D., Suchorab, Z., & Łagód, G. (2017). Composite Materials Based on Hemp and Flax for Low-Energy Buildings. *Materials*, 10(5), 510. <https://doi.org/10.3390/ma10050510>

Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Merli, F., & Ricciardi, P. (2018). Rice husk panels for building applications: Thermal, acoustic and environmental characterization and comparison with other innovative recycled waste materials. *Construction and Building Materials*, 171, 338–349. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.089>

Byoung-Ho Lee , Hee-Soo Kim , Sumin Kim, Hyun-Joong Kim , Bongwoo Lee , Yuhe Deng , Qian Feng , Jiayan Luo. (2011). Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter. *Construction and Building Materials*, 3044–3050.

Casas-Ledón, Y., Salgado, K. D., Cea, J., Arteaga-Pérez, L. E., & Fuentealba, C. (2020). Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark

fibers Author links open overlay panel. Journal of Cleaner Production, 249, 119356.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119356>

CDT. (2023). *Materiales de aislamiento térmico innovadores para Construcción en 2023*. Corporación de Desarrollo Tecnológico. Recuperado el 7 de octubre de 2024, de <https://www.cdt.cl/materiales-de-aislamiento-termico-innovadores-para-construccion-en-2023/>

Centro de Genómica Nutricional Agroacuícola (CGNA). (2022). En CGNA diseñan cultivo resistente a la sequía y más productivo. Recuperado el 9 de abril de 2025, de <https://www.cgna.cl/en-cgna-disenan-cultivo-resistente-a-la-sequia-y-mas-productivo/>

CMNUCC. (2015). El Acuerdo de París. UNFCCC.

de Vivienda y Urbanismo, M. (1992). Decreto Supremo N°47: Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

de Vivienda y Urbanismo, M. (2013). Estrategia Nacional de Construcción Sustentable.

de Vivienda y Urbanismo, M. (2024). MODIFICA DECRETO SUPREMO N° 47, DE VIVIENDA Y URBANISMO, DE 1992, ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES EN EL SENTIDO DE ACTUALIZAR SUS ESTÁNDARES Y NORMAS TÉCNICAS REFERIDAS AL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO, ESTABLECIENDO REQUISITOS Y MECANISMOS DE ACREDITACIÓN PARA LAS EDIFICACIONES QUE SEÑALA.

de Vivienda y Urbanismo, M., de Energía, M., Chile Green Building Council, & Instituto de la Construcción, E. C. (2021). Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector Construcción.

del Medio Ambiente, M. (2018). Decreto Supremo N°6/2018: ESTABLECE PLAN DE PREVENCIÓN Y DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA PARA LAS COMUNAS DE CONCEPCIÓN METROPOLITANO.

- Dénes, O., Florea, I., & Manea, D. L. (2019). Utilization of Sheep Wool as a Building Material. *Procedia Manufacturing*, 32, 236–241. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.208>
- Deshmukh, R., & More, A. (2014). Low Energy Green Materials by Embodied Energy Analysis. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 2(1), 58–65.
- Díaz Rubio, R., & del Río Merino, M. (2014). Cuantificación de las variables que determinan la huella de carbono y energía embebida de los distintos productos de cerámica estructural (cuna a puerta con opciones). *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 53(4), 194–206. <https://doi.org/10.3989/cyv.232014>
- Dionysios I. Kolaitis , Eleni K. Asimakopoulou , Maria A. Founti. (2014). Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: A large-scale compartment fire test. *Construction and Building Materials*, 163–170.
- EEChile. (2016). Passivhaus.
- EEChile. (2017). Certificación LEED.
- Europea, C. (2020). Pacto verde europeo.
- FAO. (2016). Forestry for a low-carbon future: Integrating forests and wood products in climate change strategies. *FAO forestry paper (Vol. 177)*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Feng Qian (冯谦), Deng Yuhe, Kim Hyunjoong, Lei Wen, Sun Zhiwu, Jia Yonggang, Xuan Lin & Kim Sumin. (2007). Observation and analysis of gypsum particleboard using SEM. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater*, 44–47.

- Flury, M., Mathison, J. B., Wu, J. Q., Schillinger, W. F., & Stöckle, C. O. (2009). Water Vapor Diffusion through Wheat Straw Residue. *Soil Science Society of America Journal*, 73(1), 37–45. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0077>
- Fonseca, F. G., Anca-Couce, A., Funke, A., & Dahmen, N. (2022). Challenges in Kinetic Parameter Determination for Wheat Straw Pyrolysis. *Energies*, 15(19), 7240. <https://doi.org/10.3390/en15197240>
- Fuentealba, C., Salazar, J., Vega-Lara, J., & Norambuena-Contreras, J. (2016). New Biobased composite material using bark fibres Eucalyptus. *The 13th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium*, 46–50.
- Fuentealba, C., Segovia, C., Pradena-Miquel, M., & César, A. G. (2024). Efficient Bio-Based Insulation Panels Produced from Eucalyptus Bark Waste. *Forests*, 15(9), 1628. <https://doi.org/10.3390/f15091628>
- Gysling, A. J., Álvarez, V. D. C., Soto, D. A., Pardo, E. J., Poblete, P. A., & Khaler, C. (2019). *Anuario Forestal 2019 [Chilean Statistical Yearbook of Forestry 2019]*. Instituto Forestal [Forestry Institute].
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy (ICE). A BSRIA Guide. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 164(4), 206. <https://doi.org/10.1680/ener.2011.164.4.206>
- Havelock Wool. (2020). *Environmental Product Declaration: Havelock Wool Batt and Loose-fill Insulation* (EPD No. HW–20200605–001). Sustainable Minds Transparency Report. Recuperado el 30 de octubre de 2024, de <https://www.transparencycatalog.com/company/havelock-wool-insulation>
- Herrera, C. J. R., Neira, K. R., & Cárdenas-Ramírez, J. P. (2023). Evaluation of Two Chilean Native Macroalgae: “Pelillo” (*Gracilaria chilensis*) and “Lamilla” (*Ulva* sp.) for Thermal Insulation Application. *Buildings*, 13(10), 2622. <https://doi.org/10.3390/buildings13102622>

- Hurtado, P. L., Rouilly, A., Vandenbossche, V., & Raynaud, C. (2016). A review on the properties of cellulose fibre insulation. *Building and Environment*, 96, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.09.031>
- INFOR. (2024). ANUARIO FORESTAL. Recuperado el 2 de enero de 2025, de <https://wef.infor.cl/index.php/publicaciones/boletines-estadisticos/anuario-forestal>
- INFOR (2023). *Producción de celulosa en Chile – Estadísticas sector forestal*. Recuperado el 9 de abril de 2025, de <https://wef.infor.cl/index.php/sector-forestal/industria-forestal/produccion/produccion-de-celulosa>
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (1971). NCh852: Acondicionamiento ambiental - materiales de construcción - determinación de la permeabilidad al vapor de agua.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2007). NCh 853: Acondicionamiento térmico - Envoltente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.
- Kumar, D., Alam, M., Zou, P. X. W., Sanjayan, J. G., & Memon, R. A. (2020). Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>
- Kymäläinen, H.-R., & Sjöberg, A.-M. (2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. *Building and Environment*, 43(7), 1261–1269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>
- Latif, E., Ciupala, M. A., & Wijeyesekera, D. C. (2014). The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone Wool insulations in vapour open timber frame wall panels. *Construction and Building Materials*, 73, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.060>
- Lawrence, M. (2015). Reducing the Environmental Impact of Construction by Using Renewable Materials. *Journal of Renewable Materials*, 3(3), 163–174. <https://doi.org/10.7569/JRM.2015.634105>

- Lekavicius, V., Shipkovs, P., Ivanovs, S., & Rucins, A. (2015). Thermo-Insulation Properties Of Hemp-Based Products. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 52(1), 38–51. <https://doi.org/10.1515/lpts-2015-0004>
- Mahieu, A., Lenormand, H., Leblanc, N., & Vivet, A. (2015). 100% BIOBASED PARTICLEBOARDS BASED ON NEW AGRICULTURAL WASTES. Conference: First International Conference on Bio-Based Building Materials - ICBBM2015. [https://www.researchgate.net/publication/282847079\\_100\\_BIOBASED\\_PARTICLEBOARDS\\_BASED\\_ON\\_NEW\\_AGRICULTURAL\\_WASTES](https://www.researchgate.net/publication/282847079_100_BIOBASED_PARTICLEBOARDS_BASED_ON_NEW_AGRICULTURAL_WASTES)
- Majumder, A., Achenza, M., Mastino, C. C., Baccoli, R., & Frattolillo, A. (2023). Thermo-acoustic building insulation materials fabricated with recycled fibers – Jute, Wool and Loofah. *Energy and Buildings*, 293, 113211. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113211>
- Mehdi Chougan , Seyed Hamidreza Ghaffar , Ewa Mijowska , Wojciech Kukułka , Pawel Sikora. (2022). High-performance polylactic acid compressed strawboard using pre-treated and functionalised wheat straw. *Industrial Crops and Products*, 114996.
- Mehdi Chougan , Seyed Hamidreza Ghaffar , Mazen J. Al-Kheetan , Mantas Gecevicius. (2020). Wheat straw pre-treatments using eco-friendly strategies for enhancing the tensile properties of bio-based polylactic acid composites. *Industrial Crops and Products*, 112836.
- Midolo, G., Del Zoppo, M., Porto, S. M. C., & Valenti, F. (2024). Recycling of wasted wool fibers from sheep shearing for green building components: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 21, e03623. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03623>
- Mollehuara, M. A., Cuadrado, A. R., Vidal, V. L., & Camargo, S. D. (2022). Systematic review: Analysis of the use of D-limonene to Reduce the Environmental Impact of Discarded Expanded Polystyrene (EPS). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1048, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1048/1/012003>

- Muthuraj, R., Lacoste, C., Lacroix, P., & Bergeret, A. (2019). Sustainable thermal insulation biocomposites from rice husk, wheat husk, wood fibers and textile waste fibers: Elaboration and performances evaluation. *Industrial Crops and Products*, 135, 238–245. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.04.053>
- Pennacchio, R., Savio, L., Bosia, D., & F. Thiebat, G. Piccablotto, A. Patrucco, S. Fantucci. (2017). Fitness: Sheep-wool and Hemp Sustainable Insulation Panels. *Energy Procedia*, 111, 287–297. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.030>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.304>
- Prabhakaran, S., Krishnaraj, V., Senthil kumar, M., & Zitoune, R. (2014). Sound and Vibration Damping Properties of Flax Fiber Reinforced Composites. *Procedia Engineering*, 97, 573–581. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.285>
- Ricciardi, P., Belloni, E., & Cotana, F. (2014). Innovative panels with recycled materials: Thermal and acoustic performance and Life Cycle Assessment. *Applied Energy*, 134, 150–162. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.112>
- Romano, A., Bras, A., Grammatikos, S., Shaw, A., & Riley, M. (2019). Dynamic behaviour of bio-based and recycled materials for indoor environmental comfort. *Construction and Building Materials*, 211, 730–743. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.126>
- Ruiz, M., Pastor, K., & Acevedo, A. (2013). Biodegradability of disposable products in a vermicomposting system. *Información Tecnológica*, 24(2), 47–56. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200007>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617–3631. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.014>
- Salas, C., Donoso, P. J., Vargas, R., Arriagada, C. A., Pedraza, R., & Soto, D. P. (2016). The Forest Sector in Chile: An Overview and Current Challenges. *Journal of Forestry*, 114(5), 562–571. <https://doi.org/10.5849/jof.14-062>
- Sánchez, G. F. G., Lopez, R. E. G., Osorio, A. M. R., & Arroyo, E. H. (2019). Fique as thermal insulation morphologic and thermal characterization of fique fibers. *Cogent Engineering*, 6(1), 1579427. <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1579427>
- Schiavoni, S., D'Alessandro, F., Bianchi, F., & Asdrubali, F. (2016). Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 988–1011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.045>
- Schulte, M., Lewandowski, I., Pude, R., & Wagner, M. (2021). Comparative life cycle assessment of bio-based insulation materials: Environmental and economic performances. *GCB Bioenergy*, 13(6), 979–998. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12825>
- Seyed Hamidreza Ghaffar. (2020). Wheat straw biorefinery for agricultural waste valorisation. *Green Materials*, 8(2), 60–67. <https://doi.org/10.1680/jgrma.19.00048>
- Song, Y. K., Hong, S. H., Eo, S., Han, G. M., & Shim, W. J. (2020). Rapid Production of Micro- and Nanoplastics by Fragmentation of Expanded Polystyrene Exposed to Sunlight. *Environmental Science & Technology*, 54(18), 11191–11200. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c02288>
- Tingting Shi, Yongqiang Liu, Libo Zhang, Lu Hao & Zhiqiu Gao. (2014). Burning in agricultural landscapes: an emerging natural and human issue in China. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0060-9>

- Torres-Rivas, A., Palumbo, M., Haddad, A., Cabeza, L. F., Jiménez, L., & Boer, D. (2018). Multi-objective optimisation of bio-based thermal insulation materials in building envelopes considering condensation risk. *Applied Energy*, 224, 602–614. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.079>
- Tumusiime, E., Kirabira, J. B., & Musinguzi, W. B. (2019). Long-life performance of biogas systems for productive applications: The role of R&D and policy. *Energy Reports*, 5, 579–583. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.05.002>
- UNE. (2019). UNE-EN 13501-1:2019: Clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación. Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego.
- United Nations Environment Programme}, & {Global Alliance for Buildings and Construction. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction - Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/45095>.
- Vaitkus, S., Karpavičiūtė, R., Vėjelis, S., & Lekūnaitė, L. (2014). Development and Research of Thermal Insulation Materials from Natural Fibres. *Key Engineering Materials*, 604, 285–288. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.604.285>
- Wadel, G. (2009). Aislamientos térmicos renovables y reciclados de lana de oveja y algodón: un aporte a la construcción sostenible. *Revista De Arquitectura*, 15(20), 27–32. <https://doi.org/10.5354/0719-5427.2009.27962>
- Wehkamp, A. (2013). *Productive Biogas: Current and Future Development. Five Case Studies Across Vietnam, Uganda, Honduras, Mali and Peru*.
- Yannay Casas-Ledón , Mauricio Flores , Romel Jiménez , Frederik Ronsse , Jo Dewulf, Luis E. Arteaga-Pérez. (2019). On the environmental and economic issues associated with the forestry residues-to-heat and electricity route in Chile: Sawdust gasification as a case study. *Energy*, 170, 763–776. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.132>

- Yue Kong, Liang Bing, Zhao Mingyuan, Tang Zhongqiu, Wang Feng, Liu Jian, Liu Weiqing. (2019a). Mechanical properties and fire resistance of gypsum-based composites with wheat straw. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 36(6), 300–307. <https://doi.org/10.11975/j.issn.10026819.2019.18.037>
- Yue Kong, Liang Bing, Zhao Mingyuan, Tang Zhongqiu, Wang Feng, Liu Jian, Liu Weiqing. (2019b). The influence of elevated temperatures on wood-adhesive joints by Fourier Infrared Spectrum Analysis. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 3179–3183.
- Yue Kong, Liang Bing, Zhao Mingyuan, Tang Zhongqiu, Wang Feng, Liu Jian, Liu Weiqing. (2020). Effect and mechanism of modification of particle-gypsum composites with melamine-urea-formaldehyde resin. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 300–307.
- Zaini, L. H., Solt-Rindler, A., Hansmann, C., Veigel, S., & Gindl-Altmutter, W. (2024). Lightweight cellulosic insulation panels made from oil palm trunk fibers. *Industrial Crops and Products*, 222, 119497. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119497>
- Zanazzi, J. L. (2003). ANOMALÍAS Y SUPERVIVENCIA EN EL MÉTODO DE TOMA DE DECISIONES DE SAATY. *Problemas Del Conocimiento En Ingeniería y Geología*, 1, 148–170.
- Zhang, H., Ye, X., Cheng, T., Chen, J., Yang, X., Wang, L., & Zhang, R. (2008). A laboratory study of agricultural crop residue combustion in China: Emission factors and emission inventory. *Atmospheric Environment*, 42(36), 8432–8441. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.015>

## ANEXO 1. MATRICES DE COMPARACIÓN

Tabla 31. Desempeño sub-criterio: conductividad térmica

SUBCRITERIO: CONDUCTIVIDAD TÉRMICA											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Celulosa	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Cáñamo	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Lino	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Lana de oveja	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Trigo	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Lana de vidrio	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Lana de roca	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1	1/3
Poliestireno expandido	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1/3
Poliestireno extruido	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3
Poliuretano	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
<b>Total</b>	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	7,67	13,00	4,33

Matriz normalizada											Ponderación
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,04	0,08	0,08	0,07
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,13	0,08	0,08	0,17
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,13	0,08	0,08	0,07
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,39	0,23	0,23	0,22

Fuente. Elaboración propia

Tabla 32. Desempeño sub-criterio: resistencia a la absorción del agua

<b>SUBCRITERIO: RESISTENCIA A LA ABSORCIÓN DEL AGUA</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Celulosa	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Cáñamo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Lino	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Lana de oveja	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Trigo	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Lana de vidrio	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Lana de roca	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Poliestireno expandido	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/3	1/3
Poliestireno extruido	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1/3
Poliuretano	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1
<b>Total</b>	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00	7,00	4,33

<b>Matriz normalizada</b>											<b>Ponderación</b>
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,05	0,08	0,07
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,14	0,08	0,18
0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,43	0,23	0,22

Fuente. Elaboración propia

Tabla 33. Desempeño sub-criterio: carbono embebido

<b>SUBCRITERIO: CARBONO EMBEBIDO</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Celulosa	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Cáñamo	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Lino	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Lana de oveja	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Trigo	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1
Lana de vidrio	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Lana de roca	1	1	1	1	1	5	1	1	5	5	5
Poliestireno expandido	1/5	1/5	1/5	3	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1
Poliestireno extruido	1/5	1/5	1/5	3	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1
Poliuretano	1/5	1/5	1/5	3	1/5	1	1/5	1/5	1	1	1
<b>Total</b>	7,80	7,80	7,80	16,20	7,80	39,00	7,80	7,80	39,00	39,00	39,00

<b>Matriz normalizada</b>											<b>Ponderación</b>
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,03	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,13	0,13	0,13	0,06	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12
0,03	0,03	0,03	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
0,03	0,03	0,03	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
0,03	0,03	0,03	0,19	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04

Fuente. Elaboración propia

Tabla 34. Desempeño sub-criterio: energía embebida

Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1/9	1	1	1/7	1/5	1	1	5	5	5
Celulosa	9	1	9	9	1	5	5	5	9	9	9
Cáñamo	1	1/9	1	1	1/7	1	1	1	5	5	5
Lino	1	1/9	1	1	1/7	1/5	1	1	5	5	5
Lana de oveja	7	1	7	7	1	3	3	3	9	9	9
Trigo	5	1/5	1	5	1/3	1	1	1	5	5	5
Lana de vidrio	1	1/5	1	1	1/3	1	1	1	7	7	7
Lana de roca	1	1/5	1	1	1/3	1	1	1	5	5	5
Poliestireno expandido	1/5	1/9	1/5	1/5	1/9	1/5	1/7	1/5	1	1	1
Poliestireno extruido	1/5	1/9	1/5	1/5	1/9	1/5	1/7	1/5	1	1	1
Poliuretano	1/5	1/9	1/5	1/5	1/9	1/5	1/7	1/5	1	1	1
<b>Total</b>	26,60	3,27	22,60	26,60	3,76	13,00	14,43	14,60	53,00	53,00	53,00

Matriz normalizada											Ponderación
0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,06
0,34	0,31	0,40	0,34	0,27	0,38	0,35	0,34	0,17	0,17	0,17	0,29
0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,06
0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,02	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,06
0,26	0,31	0,31	0,26	0,27	0,23	0,21	0,21	0,17	0,17	0,17	0,23
0,19	0,06	0,04	0,19	0,09	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,10
0,04	0,06	0,04	0,04	0,09	0,08	0,07	0,07	0,13	0,13	0,13	0,08
0,04	0,06	0,04	0,04	0,09	0,08	0,07	0,07	0,09	0,09	0,09	0,07
0,01	0,03	0,01	0,008	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
0,01	0,03	0,01	0,008	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
0,01	0,03	0,01	0,008	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02

Fuente. Elaboración propia

Tabla 35. Desempeño sub-criterio: biodegradabilidad

<b>SUBCRITERIO: BIODEGRADABILIDAD</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	5	3	3	9	9	9
Celulosa	1	1	1	1	1	5	3	3	9	9	9
Cáñamo	1	1	1	1	1	5	3	3	9	9	9
Lino	1	1	1	1	1	5	3	3	9	9	9
Lana de oveja	1	1	1	1	1	5	3	3	9	9	9
Trigo	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1	1/3	1/3	5	5	5
Lana de vidrio	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1	1	3	3	3
Lana de roca	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	3	1	1	3	3	3
Poliestireno expandido	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Poliestireno extruido	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/5	1/3	1/3	1	1	1
Poliuretano	1/9	1/9	1/9	1/9	1/9	1/5	1/3	1/3	1	1	1
<b>Total</b>	6,20	6,20	6,20	6,20	6,20	32,60	18,33	18,33	59,00	59,00	59,00

Matriz normalizada											Ponderación
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,16	0,16	0,15	0,15	0,15	0,16
0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,08	0,08	0,08	0,04
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Fuente. Elaboración propia

Tabla 36. Desempeño sub-criterio: transporte

<b>SUBCRITERIO: TRANSPORTE</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	9	5	9	1	9	9	9	9	9
Celulosa	1	1	9	5	9	1	9	9	9	9	9
Cáñamo	1/9	1/9	1	1/9	1/9	1/9	1	1	1	1	1
Lino	1/5	1/5	9	1	5	1/5	5	5	5	5	5
Lana de oveja	1/9	1/9	9	1/5	1	1/9	1	1	1	1	1
Trigo	1	1	9	5	9	1	7	7	7	7	7
Lana de vidrio	1/9	1/9	1	1/5	1	1/7	1	1	1	1	1
Lana de roca	1/9	1/9	1	1/5	1	1/7	1	1	1	1	1
Poliestireno expandido	1/9	1/9	1	1/5	1	1/7	1	1	1	1	1
Poliestireno extruido	1/9	1/9	1	1/5	1	1/7	1	1	1	1	1
Poliuretano	1/9	1/9	1	1/5	1	1/7	1	1	1	1	1
<b>Total</b>	3,98	3,98	51,00	17,31	38,11	4,14	37,00	37,00	37,00	37,00	37,00

<b>Matriz normalizada</b>											<b>Ponderación</b>
0,25	0,25	0,18	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,25	0,25	0,18	0,29	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
0,03	0,03	0,02	0,01	0,00	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
0,05	0,05	0,18	0,06	0,13	0,05	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,11
0,03	0,03	0,18	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
0,25	0,25	0,18	0,29	0,24	0,24	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,22
0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
0,03	0,03	0,02	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Fuente. Elaboración propia

Tabla 37. Desempeño sub-criterio: resistencia al fuego

<b>SUBCRITERIO: RESISTENCIA AL FUEGO</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1/5	1/3	1/3	1	1/3	1/9	1/9	1	1	1
Celulosa	5	1	5	5	5	5	1/9	1/9	5	5	5
Cáñamo	3	1/5	1	1	3	1	1/9	1/9	3	1	3
Lino	3	1/5	1	1	3	1	1/9	1/9	3	1	3
Lana de oveja	1	1/5	1/3	1/3	1	1/3	1/9	1/9	1	1	1
Trigo	3	1/5	1	1	3	1	1/9	1/9	3	1/3	3
Lana de vidrio	9	9	9	9	9	9	1	1	9	9	9
Lana de roca	9	9	9	9	9	9	1	1	9	9	9
Poliestireno expandido	1	1/5	1/3	1/3	1	1/3	1/9	1/9	1	1	1
Poliestireno extruido	1	1/5	1	1	1	3	1/9	1/9	1	1	1
Poliuretano	1	1/5	1/3	1/3	1	1/3	1/9	1/9	1	1	1
<b>Total</b>	37,00	20,60	28,33	28,33	37,00	30,33	3,00	3,00	37,00	30,33	37,00

<b>Matriz normalizada</b>											<b>Ponderación</b>
0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
0,14	0,05	0,18	0,18	0,14	0,16	0,04	0,04	0,14	0,16	0,14	0,12
0,08	0,01	0,04	0,04	0,08	0,03	0,04	0,04	0,08	0,03	0,08	0,05
0,08	0,01	0,04	0,04	0,08	0,03	0,04	0,04	0,08	0,03	0,08	0,05
0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
0,08	0,01	0,04	0,04	0,08	0,03	0,04	0,04	0,08	0,01	0,08	0,05
0,24	0,44	0,32	0,32	0,24	0,30	0,33	0,33	0,24	0,30	0,24	0,30
0,24	0,44	0,32	0,32	0,24	0,30	0,33	0,33	0,24	0,30	0,24	0,30
0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,10	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04
0,03	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02

Fuente. Elaboración propia

Tabla 38. Desempeño sub-criterio: uso de aglutinante

<b>SUBCRITERIO: USO DE AGLUTINANTE</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Celulosa	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Cáñamo	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Lino	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Lana de oveja	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Trigo	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1	3	3	1/5	1/5	1/5
Lana de vidrio	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1	1	1/5	1/5	1/5
Lana de roca	1/5	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1	1	1/5	1/5	1/5
Poliestireno expandido	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Poliestireno extruido	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
Poliuretano	1	1	1	1	1	5	5	5	1	1	1
<b>Total</b>	8,60	8,60	8,60	8,60	8,60	41,67	45,00	45,00	8,60	8,60	8,60

<b>Matriz normalizada</b>											<b>Ponderación</b>
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02	0,03
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12

Fuente. Elaboración propia

Tabla 39. Desempeño sub-criterio: PPDA

<b>SUBCRITERIO: PPDA</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Celulosa	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Cáñamo	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Lino	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Lana de oveja	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Trigo	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3
Lana de vidrio	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1	1
Lana de roca	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1	1
Poliestireno expandido	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1	1
Poliestireno extruido	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1	1
Poliuretano	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1	1	1	1
<b>Total</b>	<b>7,67</b>	<b>7,67</b>	<b>7,67</b>	<b>7,67</b>	<b>7,67</b>	<b>7,67</b>	<b>23,00</b>	<b>23,00</b>	<b>23,00</b>	<b>23,00</b>	<b>23,00</b>

<b>Matriz normalizada</b>											<b>Ponderación</b>
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Fuente. Elaboración propia



Tabla 41. Desempeño sub-criterio: Estándares de construcción sustentable

<b>SUBCRITERIO: ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE</b>											
Alternativas	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido (EPS)	Poliestireno extruido (XPS)	Poliuretano
Corteza de eucalipto	1	1	1	1	1	1	7	7	7	7	7
Celulosa	1	1	1	1	1	1	7	7	7	7	7
Cáñamo	1	1	1	1	1	1	7	7	7	7	7
Lino	1	1	1	1	1	1	7	7	7	7	7
Lana de oveja	1	1	1	1	1	1	7	7	7	7	7
Trigo	1	1	1	1	1	1	7	7	7	7	7
Lana de vidrio	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1	1	1	1
Lana de roca	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1	1	1	1
Poliestireno expandido	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1	1	1	1
Poliestireno extruido	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1	1	1	1
Poliuretano	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1/7	1	1	1	1	1
<b>Total</b>	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	6,71	47,00	47,00	47,00	47,00	47,00

Matriz normalizada											Ponderación
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Fuente. Elaboración propia

## ANEXO 2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE SUB-CRITERIOS

Tabla 42. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: conductividad térmica

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	11%	13%	9%	10%	10%	9%	8%	8%	7%	6%	9%
Priorización del 30%	10%	12%	9%	9%	10%	8%	8%	8%	8%	6%	11%
Priorización del 40%	10%	12%	8%	9%	9%	8%	8%	8%	10%	7%	13%
Priorización del 50%	9%	11%	8%	9%	9%	8%	7%	7%	11%	7%	14%
Priorización del 60%	9%	10%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	12%	7%	16%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 43. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: resistencia a la absorción del agua

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	11%	13%	9%	10%	10%	9%	8%	8%	6%	8%	9%
Priorización del 30%	10%	12%	9%	9%	10%	8%	8%	8%	6%	9%	11%
Priorización del 40%	10%	12%	8%	9%	9%	8%	8%	8%	6%	10%	13%
Priorización del 50%	9%	11%	8%	9%	9%	8%	7%	7%	6%	12%	14%
Priorización del 60%	9%	10%	8%	8%	8%	8%	7%	7%	6%	13%	16%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 44. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: carbono embebido

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	11%	14%	10%	10%	11%	8%	9%	9%	6%	6%	7%
Priorización del 30%	11%	14%	10%	11%	11%	7%	9%	9%	5%	6%	7%
Priorización del 40%	11%	13%	10%	11%	11%	7%	10%	9%	5%	5%	6%
Priorización del 50%	12%	13%	11%	11%	11%	6%	10%	10%	5%	5%	6%
Priorización del 60%	12%	13%	11%	11%	12%	5%	10%	10%	5%	5%	6%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 45. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: energía embebida

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	10%	16%	9%	10%	12%	9%	8%	8%	5%	6%	7%
Priorización del 30%	10%	18%	9%	9%	14%	9%	8%	8%	5%	5%	6%
Priorización del 40%	9%	19%	8%	9%	15%	9%	8%	8%	4%	5%	6%
Priorización del 50%	9%	21%	8%	8%	16%	9%	8%	8%	4%	4%	5%
Priorización del 60%	8%	23%	8%	8%	18%	9%	8%	7%	3%	4%	4%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 46. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: biodegradabilidad

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	12%	14%	10%	11%	11%	8%	8%	8%	5%	6%	7%
Priorización del 30%	12%	15%	11%	11%	12%	8%	8%	7%	5%	5%	6%
Priorización del 40%	13%	15%	12%	12%	13%	7%	7%	7%	4%	5%	6%
Priorización del 50%	13%	15%	12%	13%	13%	7%	7%	7%	4%	4%	5%
Priorización del 60%	14%	15%	13%	13%	14%	6%	7%	7%	3%	4%	4%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 47. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: transporte

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	13%	15%	9%	10%	10%	10%	7%	7%	5%	6%	7%
Priorización del 30%	14%	16%	8%	10%	9%	12%	7%	7%	5%	5%	6%
Priorización del 40%	16%	18%	7%	10%	9%	13%	6%	6%	5%	5%	6%
Priorización del 50%	17%	19%	6%	10%	8%	15%	6%	6%	4%	4%	5%
Priorización del 60%	18%	20%	5%	11%	7%	16%	5%	5%	4%	4%	5%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 48. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: resistencia al fuego

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	10%	14%	9%	10%	10%	8%	11%	11%	5%	6%	7%
Priorización del 30%	9%	14%	8%	9%	9%	8%	13%	13%	5%	5%	6%
Priorización del 40%	8%	14%	8%	8%	8%	7%	16%	16%	5%	5%	6%
Priorización del 50%	7%	13%	7%	8%	7%	7%	18%	18%	4%	5%	5%
Priorización del 60%	6%	13%	7%	7%	6%	7%	20%	20%	4%	5%	5%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 49. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: uso de aglutinante

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	11%	14%	10%	10%	11%	8%	7%	7%	6%	7%	8%
Priorización del 30%	11%	14%	10%	10%	11%	7%	7%	7%	7%	7%	9%
Priorización del 40%	11%	13%	10%	11%	11%	7%	6%	6%	8%	8%	9%
Priorización del 50%	11%	13%	10%	11%	11%	6%	5%	5%	8%	9%	9%
Priorización del 60%	11%	13%	11%	11%	11%	6%	5%	5%	9%	9%	10%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 50. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: PPDA

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	11%	14%	10%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	7%
Priorización del 30%	12%	14%	10%	11%	11%	10%	7%	7%	5%	6%	7%
Priorización del 40%	12%	14%	11%	11%	12%	10%	7%	7%	5%	5%	7%
Priorización del 50%	12%	14%	11%	11%	12%	11%	6%	6%	5%	5%	6%
Priorización del 60%	12%	14%	11%	12%	12%	11%	6%	6%	5%	5%	6%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 51. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: reglamentación térmica de la OGUC

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 30%	11%	13%	9%	10%	10%	9%	8%	8%	7%	7%	8%
Priorización del 40%	10%	12%	9%	10%	10%	9%	8%	8%	7%	7%	8%
Priorización del 50%	10%	12%	9%	10%	10%	9%	9%	9%	7%	7%	8%
Priorización del 60%	10%	11%	9%	10%	10%	9%	9%	9%	8%	8%	8%

Fuente. Elaboración propia

Tabla 52. Análisis de priorización en análisis de sensibilidad: estándares de construcción sustentable

Priorización	Corteza de eucalipto	Celulosa	Cáñamo	Lino	Lana de oveja	Trigo	Lana de vidrio	Lana de roca	Poliestireno expandido	Poliestireno extruido	Poliuretano
Priorización del 10%	11%	14%	9%	10%	11%	9%	8%	8%	6%	6%	8%
Priorización del 20%	12%	14%	10%	11%	11%	10%	7%	7%	5%	6%	7%
Priorización del 30%	12%	14%	11%	11%	12%	10%	7%	7%	5%	5%	6%
Priorización del 40%	12%	14%	11%	12%	12%	11%	6%	6%	5%	5%	6%
Priorización del 50%	13%	14%	12%	12%	13%	12%	5%	5%	4%	4%	5%
Priorización del 60%	13%	15%	12%	13%	13%	12%	5%	5%	4%	4%	5%

Fuente. Elaboración propia