

- ▲ **Palabras clave/** Impacto ambiental, sostenibilidad, huella de carbono, ciclo de vida.
- ▲ **Keywords/** Environmental impact, sustainability, carbon footprint, lifecycle.
- ▲ **Recepción/** 14 de diciembre 2021
- ▲ **Aceptación/** 10 de marzo 2022

Análisis comparativo en la rehabilitación de envolvente térmica de cerramientos educacionales con criterio ambiental

Comparative Analysis of Thermal Insulation Restoration with an Environmental Criteria in Educational Infrastructure

Rodrigo Muñoz-Rojas

Arquitecto y Licenciado en Arquitectura, Universidad de La Serena, Chile.
Magister(c) en Hábitat Sustentable y Eficiencia Energética, Universidad del Bío-Bío, Chile.
Asesor profesional, Departamento de Planificación, Secretaría Ministerial de Educación, Región de Coquimbo, Chile.
rodrigo.arq6@gmail.com

Rodrigo Figueroa-San Martín

Ingeniero Constructor, Universidad del Bío-Bío (UBB), Chile.
Doctor en Arquitectura y Urbanismo, UBB, Chile.
Investigador del Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción CITEC, UBB, Chile.
Docente de pre y postgrado de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, UBB, Chile.
rfigueroa@ubiobio.cl

Gerardo Saelzer-Puica

Arquitecto Universidad del Bío-Bío (UBB), Chile.
Doctor en Arquitectura y Urbanismo, Universidad Católica de Lovaina, Bélgica.
Docente de pre y postgrado de la Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, UBB, Chile.
Investigador en arquitectura sustentable, edificación en madera, materiales de la construcción y física de la construcción.
gsaelzer@ubiobio.cl

RESUMEN/ Esta investigación busca verificar la huella de carbono (HC) en envolvente térmica de los cerramientos para proyectos de rehabilitación en infraestructura educacional, utilizando el análisis de ciclo de vida (ACV). El análisis comparativo de los casos se enfoca en materiales aislantes de origen vegetal, mineral y sintético. Los resultados indican que los valores de HC en soluciones comparadas disminuyen solo ahí donde se utiliza aislante térmico local, como el caso de celulosa proyectada y poliestireno expandido (EPS). Las soluciones con aislantes importados de HC negativa en la fase de extracción-fabricación (como losa de corcho o lana de roca), aumentan su huella en la fase de construcción hasta en tres veces respecto de soluciones locales debido a la incidencia del transporte. Se concluye que el impacto del transporte en la construcción de envolventes aumenta considerablemente las emisiones de CO₂ en el ciclo de vida del proyecto, siendo los aislantes locales la solución más sustentable. **ABSTRACT/** This research seeks to verify the carbon footprint in the thermal insulation of enclosures for restoration projects in educational infrastructure, using the life-cycle analysis. The comparative analysis of the cases focuses on vegetal, mineral, and synthetic insulation materials. The results show that the carbon footprint in compared solutions decreases only where local thermal insulation is used, as in the case of blow-in cellulose and expanded polystyrene (EPS). Solutions with imported insulators with negative carbon footprint in the extraction-manufacturing stage (such as cork slabs or rock wool) increase their footprint in the construction phase by up to three times compared to local solutions due to the impact of transportation. The conclusion is that the impact of transportation in the construction of enclosures considerably increases CO₂ emissions in the project's life cycle, with local insulation being the most sustainable solution.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de criterios de sostenibilidad resulta esencial para la reconversión de la industria de la construcción, la cual representa la tercera parte del consumo mundial de recursos (Rivela 2012). Además, es parte de las estrategias metodológicas en distintos países para reducir el calentamiento global, en el marco de esfuerzos cooperativos para limitar el aumento de la temperatura a 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales (IPCC 2019).

El tercer informe de Chile sobre cambio climático 2018 indica que se debe contar de manera urgente con una estrategia que dirija los esfuerzos de adaptación y mitigación al cambio climático en las áreas de infraestructura resiliente y baja en carbono (MMA 2018). Chile se compromete, desde el sector de la construcción a través de la Estrategia de Desarrollo Sustentable, a aportar con la reducción del 20% de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), tomando como base las emisiones proyectadas al año 2020 (MINVU, n.d.). El

plan de desarrollo sustentable actualiza la estrategia y entrega lineamientos y metas para la incorporación de la sustentabilidad en el ciclo completo de la edificación. La meta de esta actualización es que el sector de la construcción nacional tienda a la neutralidad hacia el año 2050 (Construcción 2022).

Infraestructura educacional pública

En el diseño de las políticas públicas, la mitigación de emisiones de GEI aún no se desarrolla en plenitud en áreas tan importantes como la infraestructura educacional. Las

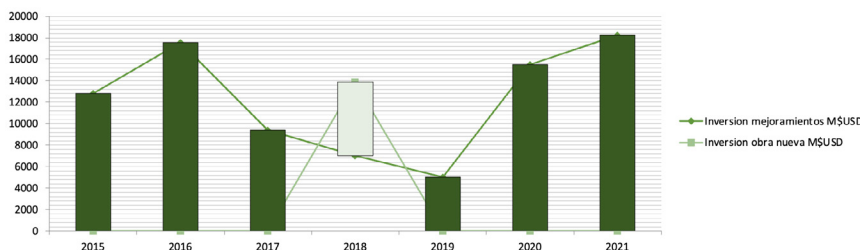


Gráfico 1. Inversión pública en infraestructura educativa, Región de Coquimbo (fuente: Ministerio de Educación, www.inframineducenlinea.cl, 2021).

políticas públicas actuales de sustentabilidad se enfocan principalmente en proyectos de nueva edificación, sin incluir las edificaciones escolares existentes. En el contexto geográfico de la investigación –la región de Coquimbo– la inversión destinada a infraestructura educativa en los últimos siete años se cifra en M\$99.500 USD (gráfico 1). El 86% de los recursos financia proyectos sin criterios medioambientales en edificación existente, mientras que el 14% restante de la inversión regional corresponde a nueva edificación, donde sí existe una política de sostenibilidad. Un número considerable de investigaciones se centra en el potencial de ahorro de energía para futuros proyectos de construcción, mientras que son los edificios existentes los que contribuyen con la mayor parte del uso final mundial de energía y representan aproximadamente el 40% del consumo energético mundial (Wang, Xia, and Zhang 2014).

Los proyectos de rehabilitación constructiva en los establecimientos educacionales (EE.EE.) no incorporan análisis de sustentabilidad, lo cual implica una contaminación indeterminada y una enorme oportunidad de investigación. Se necesita incorporar variables ambientales en la elección de proyectos de mejoramiento que permitan incentivar de manera más amplia parámetros de entrada cuantitativos, para alcanzar construcciones con bajo impacto ambiental. Las decisiones tomadas durante el diseño inicial de la rehabilitación de envolventes tienen una gran influencia en el rendimiento final de los edificios. Sin embargo, los actuales procedimientos de adjudicación

de proyectos no promueven la evaluación ni la incidencia de la envolvente. Según Nielsen, el nivel de información necesario para evaluar si el diseño puede cumplir los requisitos de certificación de sostenibilidad es insuficiente en las primeras etapas de diseño (Nielsen *et al.* 2016).

El objetivo de sostenibilidad para las envolventes nos acerca a incorporar variables cuantitativas que incidan en la disminución de contaminantes a la atmósfera (Vullo *et al.* 2018). Desde el año 2020, a través de un trabajo intersectorial entre el Ministerio de Educación y el Ministerio de Energía, se incorporó en la Ruta Energética 2018 - 2022 un “Programa de Mejoramiento Energético de la Infraestructura Escolar Pública”, cuyo objetivo es mejorar la calidad de por lo menos 200 EE.EE. Las intervenciones son ejecutadas desde el año 2021 e involucran mejoramientos de la envolvente térmica, instalación de equipos de ventilación, climatización, e iluminación, y, en algunos casos, incorporación de energías renovables (Construye 2025 2020).

Al analizar la sostenibilidad en la envolvente, la aislación térmica se presenta como el elemento clave desde el punto de vista energético y medioambiental. La huella de carbono de los materiales de aislamiento térmico muestra que aquellos elaborados en base a madera causan impacto ambiental mínimo; la celulosa reciclada (en su mayoría papel de periódico) o el aglomerado de corcho, también tienen bajo impacto en el medio ambiente. En ambos productos, una

parte significativa de la huella de carbono se debe a los aditivos que evitan la putrefacción, la descomposición y la combustión. Aislantes minerales –como la lana de vidrio y de piedra– también tienen bajo impacto medioambiental. Los materiales de aislamiento térmico con mayor impacto ambiental son el poliestireno extruido, espuma de poliuretano, espuma de vidrio y lana mineral de alta densidad. Sin embargo estos materiales son robustos, compactos, se instalan más fácilmente, requieren menos mantenimiento, suelen ser más resistentes a las influencias externas y tener una menor conductividad térmica, a pesar de las densidades extremadamente bajas, en promedio de 12 a 35 kg/m³ (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, and Marrero 2016). Esta investigación se sitúa en la reducción de la huella de carbono a través de comparar soluciones constructivas en la etapa de extracción-fabricación y construcción. El ACV se centra en los materiales de aislamiento térmico de la envolvente. El análisis económico y de transmitancia térmica aparecen como variables complementarias para el diseño de la rehabilitación futura.

ESTADO DEL ARTE

La metodología que más se aproxima a una valoración exhaustiva del impacto ambiental de los edificios es el ACV, establecida por las normas ISO14.040/44 (Instituto Nacional de Normalización 2012), que permite cuantificar el impacto medioambiental global en las distintas fases del proyecto, identificando anticipadamente los impactos ambientales que cada decisión determina, las causas y su influencia (Muñoz *et al.* 2012). La huella de carbono ha surgido como una medida de cuantificación del impacto de estos GEI y está respaldada por valoraciones de la industria y tratados internacionales.

Los esfuerzos para reducir las emisiones de GEI en el sector de la construcción se enfocan principalmente en la fase de operación de los edificios. Entre otras razones, esto se debe a los logros conseguidos en la reducción de la demanda de energía operativa. Sin embargo, el uso de la evaluación del ACV puede ayudar

a mejorar el rendimiento medioambiental de los edificios. A los arquitectos y clientes les resulta difícil establecer objetivos de rendimiento medioambiental e interpretar los resultados obtenidos a través de ACV con el fin de mejorar la arquitectura del edificio; por lo tanto, se necesitan valores de referencia o referencias (Hollberg, Lützkendorf, and Habert 2019).

La fase de operación habitualmente es responsable de entre 80% y 90% de las emisiones de CO₂ generadas durante el ciclo de vida del edificio (Radhi and Sharples 2013). Por su parte, González Vallejo (2018) presenta una estrategia para evaluar el impacto económico y ambiental en el CVE, centrándose en las fases de fabricación de materiales y construcción a partir de los datos del presupuesto del proyecto, de las bases de costes de la construcción e indicadores ecológicos (González 2018), para –desde el diseño del proyecto– incidir en la disminución de la huella final en la etapa de operación. Valancius (2018) nos presenta un enfoque metodológico para combinar las evaluaciones de ciclo de vida en las reformas de los edificios hacia un edificio de energía casi nula. Se analiza la eficiencia del aislamiento de la envolvente exterior de un edificio en relación con el consumo de energía primaria no renovable y las emisiones de CO₂, centrándose en diferentes aislantes térmicos. Posteriormente se aplica el método de ACV para verificar el comportamiento medioambiental del aislamiento de la envolvente, identificando los materiales de aislamiento térmico más adecuados para edificios en términos de energía y ecología: lana de roca, lámina de corcho/proyectado y fibra de celulosa proyectada (Valancius 2018).

Arguedas Garro identifica la utilidad de definir criterios de selección y calificación de datos de emisiones de CO₂ en los materiales de edificación, los cuales –por medio de la compilación evaluada y calificada– aporten información al profesional en materia de arquitectura y edificación. El análisis se ejemplifica para rehabilitación de fachadas –con el sistema SATE– que hace gran aporte en eficiencia energética, pero tiene una alta huella de carbono en la fase de extracción-fabricación (Bego and Lanzarote 2020).

METODOLOGÍA

La metodología utilizada sugiere, según Nielsen (2016), seis áreas para apoyar la toma de decisiones, a saber, establecimiento de objetivos de sostenibilidad; criterios de ponderación; diagnóstico de edificios; generación de alternativas de diseño; estimación del rendimiento; y evaluación de alternativas de diseño (Nielsen *et al.* 2016). Estas seis áreas se describen brevemente a continuación.

- El **objetivo de sostenibilidad** es la reducción de la huella de carbono en soluciones constructivas para envolventes de cerramiento a través de su comparación y cuantificación, enfocándose en el aislamiento térmico en la etapa de extracción-fabricación y construcción, según el ACV.
- **Criterio de ponderación:** Para el análisis de transmitancia térmica (U), para las viviendas en Chile se utiliza la Norma Chilena 853/2007, guiándose por los términos de referencia estandarizados de la Dirección de Arquitectura del Ministerio de Obras públicas (Dirección de Arquitectura, MOP, n.d.) y la Norma Técnica 011 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (NTM 11/3 2014). Esta última es considerada dentro de los estándares constructivos del Ministerio de Educación desde el año 2020, dado que Chile no establece una normativa térmica para edificios públicos.

Los datos obtenidos de la emisión de CO₂ son evaluados en la fase de extracción-fabricación del muro de envolvente para 1m², teniendo como referencia el DAP 002:2016, según ISO 14025, EN 15804:2012 y EN 15942 (Tártaro *et al.* 2017). La inclusión del ACV establecida por las normas ISO14.040/44 y la evaluación de la huella de carbono en rehabilitaciones entrega información cuantitativa sobre los materiales a elegir a la hora de diseñar la solución constructiva.

El programa ÁBACO-CHILE (CITEC, Universidad del Bío-Bío 2015) valoriza económica y ambientalmente la envolvente para analizar su desarrollo en la realidad regional. Respecto de la importancia de la envolvente en la rehabilitación energética, los estudios muestran que, en general, la energía para alcanzar el nivel de confort térmico adecuado constituye el mayor

porcentaje de consumo anual en las escuelas (Ali and Hashlamun 2019). De ello podemos deducir las mayores rentabilidades para los sostenedores escolares en el largo plazo.

- **Diagnóstico de los edificios:** En este estudio se seleccionan tres EE.EE. de la comuna de Coquimbo, Chile, zona de clima estepario costero y radiación global horizontal estimada de 1780KW/m² año (Ministerio de Energía 2022). La temperatura es templada, sin grandes oscilaciones térmicas, con una media parcial de 13,6°C; 85% de humedad relativa, precipitaciones promedio de 2 % anual y velocidad de viento de 10Km/h (Dirección general de aeronautica 2022).

La elección de los EE.EE. se basa en las envolventes de cerramiento más representativas para la comuna de Coquimbo, a saber, hormigón armado (55%), estructura de pilares de acero con tabiquería de madera (15%) y albañilería reforzada (20%). Las diferentes envolventes responden a proyectos desarrollados en períodos distintos de la política de planificación estatal (Gilles and Ansaldo 2015) (figura 1):

- ✓ Escuela de Coquimbo con envolvente de cerramiento en hormigón armado H25, espesor 26cm, sin aislante térmico.
- ✓ Escuela Mario Muñoz Silva, con envolvente de cerramiento de 9cm de espesor, conformada por pilares de estructura de acero. Entre pilares presenta una envolvente compuesta por fibrocemento de 7mm en el exterior, yeso cartón de 10mm en el interior, sin aislamiento térmico y tabiquería de madera de estructura 2" x 3" cada 60cm.
- ✓ Liceo de Ciencias y Humanidades San José María Escrivá de Balaguer, con envolvente de cerramiento, albañilería reforzada, muros conformados de ladrillo tipología Santiago Te 9, espesor de 15,4cm y sin aislante térmico.
- Las **alternativas de diseño** responden a variables medioambientales y constructivas existentes. Francesco Leccese, de la Universidad de Pisa, estudia varios tipos de fachadas con distintos espesores de cámara de aire, propuestos a través de un modelo matemático (Ciampi *et al.* 2003). Concluye que, en particular, el rendimiento energético de dichas fachadas está



Figura 1. Fachadas y secciones representativas de las envolventes de cerramiento en los establecimientos educaciones seleccionados (fuente: Elaboración propia, 2021).

fuertemente influenciado por la anchura del conducto de aire, la distribución del material aislante, la intensidad de la radiación solar y la resistencia térmica de la superficie de la pared exterior. El autor afirma que la disposición habitual de la capa aislante en el interior del conducto de aire -cerca de la pared interior- puede no ser el más eficaz desde el punto de vista energético. Es posible encontrar una distribución óptima de material aislante entre la pared interior y el paramento exterior que permita el máximo ahorro energético alcanzado. En todos los casos, la colocación del material aislante cerca de la pared interior es más eficiente que uno cerca el paramento exterior. (Ciampi, Leccese, and Tuoni 2003). A través del estudio de tres tipologías de fachadas ventiladas (Patania et al. 2010) concluyen que el ahorro de energía aumenta si la radiación solar aumenta. Por lo tanto, para un valor constante del coeficiente de absorción y temperatura exterior, la elección de la fachada ventilada es recomendable en sitios con altos valores de radiación solar.

- **Estimación de rendimiento y evaluación de alternativas de diseño:** En el diseño se incorporan estrategias de sustentabilidad para resolver problemas de confort térmico en aulas a través del aislamiento de muros por el exterior; esto favorece una envolvente térmica continua y disminuye los puentes térmicos (Ministerio de Educación Gobierno de Chile, n.d.). Posteriormente se indagan e incluyen los materiales de aislamiento térmico más adecuados para edificios que cumplan con baja conductividad térmica y presenten la huella de carbono más baja. Para estimar el rendimiento, la situación base (envolventes existentes sin aislamiento térmico) se compara con alternativas de diseño de variada aislación, mejorando la transmitancia térmica y la huella ecológica. Luego, en el programa ÁBACO-CHILE, se hace un análisis medioambiental de las propuestas de rehabilitación, incluyendo el proceso de obra y posterior evaluación económica de las alternativas planteadas (figura 2).

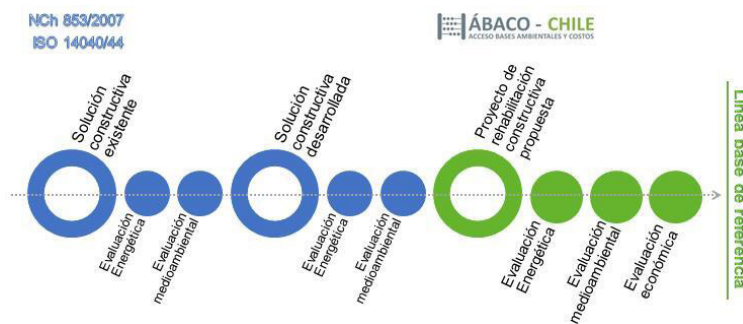


Figura 2. Desarrollo del proceso de investigación, etapas de análisis y construcción de línea base (fuente: Elaboración propia, 2021).

RESULTADOS

Las rehabilitaciones propuestas para la situación base existente (caso 1, 2 y 3) utilizan la estrategia de muro ventilado con aislamiento térmico de losa de corcho, lana de roca y celulosa proyectada; las que son comparadas diferenciadamente para verificar los objetivos de la investigación.

Comparativa de situación base existente y soluciones constructivas desarrolladas:

- **Transmitancia térmica(U).**

Respecto del valor U de cada solución constructiva desarrollada, la lana de roca se observa como el aislante más favorable dentro de los materiales minerales. Sus valores fluctúan -según la solución- entre 0,54 y 0,51W/m²K; en ese sentido, la solución

de albañilería reforzada con aislamiento lana de roca sería la más favorable. En el gráfico 2 se observa que, al incorporar aislantes sintéticos (EPS) y minerales (lana de roca), las diferencias son muy bajas entre ellos, no siendo un parámetro de discriminación para el tipo de aislante a escoger. Es importante destacar que la base comparativa está dada por un espesor de 50mm en el aislamiento elegido; esto cumple la NTM 011 cuya exigencia es de 0,8W/m²K en la zona térmica analizada.

- **Huella de carbono:**

El gráfico 3 presenta la comparación entre la situación base existente y las rehabilitaciones propuestas. Observamos un aumento sustancial de la huella de carbono en las soluciones constructivas que incluyen aglomerado de corcho y lana de roca debido a la distancia desde la fábrica (ambos son importados desde Europa). El EPS se utiliza para la evaluación comparativa por ser el aislante más utilizado en el mercado regional, aunque se presenta como el menos sustentable con 3,71 KgCO₂/Kg. Por lo anterior, es importante realizar la comparación con los aislantes naturales y minerales que fueron determinados como los más amigables con el medioambiente. A modo de ejemplo, la importación de lana de roca -material con emisiones muy baja en la fase de extracción-fabricación (1,04KgCO₂/Kg)- no logra incidir realmente en la disminución de la huella final para la solución constructiva, dada la alta emisión derivada del transporte.

Al concatenar las dos variables analizadas (HC y U), se observa que la solución constructiva de albañilería reforzada con aislante de celulosa proyectada es la más favorable dado los valores de 0,54W/m²K y 0,030 Ton CO₂/m² obtenidos. Por el contrario la solución más desfavorable sería la albañilería reforzada con aglomerado de corcho con valores de 0,62W/m²K y 1,295 Ton CO₂/m². La solución que incorpora aislante natural de celulosa proyectada es una buena alternativa a la hora de tomar decisiones, puesto que su instalación logra disminuir puentes térmicos mejorando el confort térmico interior a diferencia del EPS. Se trata de un aporte significativo para bajar la demanda energética del edificio en etapa de uso.

Transmitancia térmica (U), W/m²k

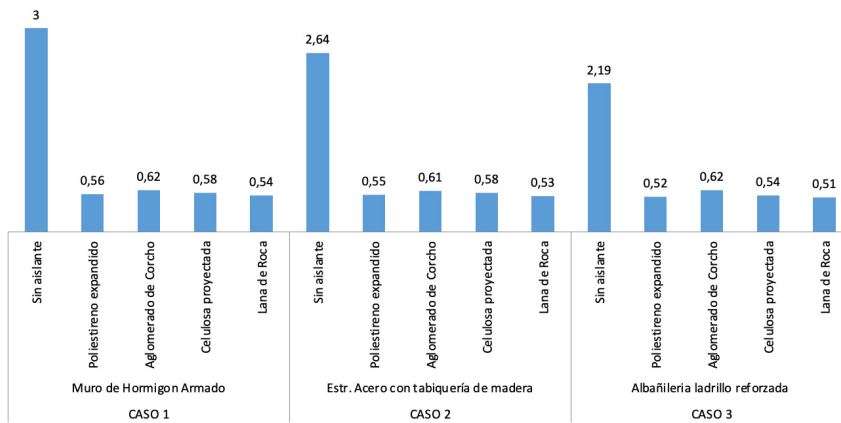


Gráfico 2. Transmitancias térmicas comparadas entre situación base existente (sin aislante) y soluciones propuestas (fuente: Elaboración propia en base a NCh853:2007, 2021).

Huella de carbono generada, TonCO₂/m²

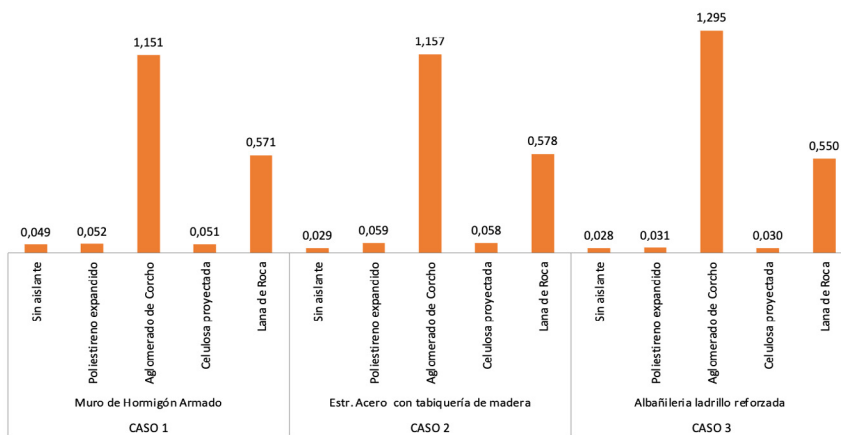


Gráfico 3. Huella de carbono comparada por solución existente (sin aislante) y solución propuesta (fuente: Metodología ACV según ISO 14040-14044, 2021).

Análisis comparativo de la huella de carbono en la ejecución de proyectos de rehabilitación, en plataforma ÁBACO-CHILE.

El análisis comparativo de las envolventes sustentables por m² indica que existen diferencias importantes en la cantidad de CO₂ emitido en la obra ejecutada. La incorporación de celulosa proyectada en el caso 1 muestra un alza de 0,759 Ton CO₂/m². Si observamos los casos más desfavorables, la estructura de acero con tabiquería de madera que incorpora losa de corcho aglomerado genera 1,157 Ton CO₂/m² en la solución de muro; comparada con la ejecución del proyecto que genera 2,92 Ton CO₂/m², esta presenta

un aumento de 1,763 Ton CO₂/m² duplicando las emisiones de CO₂, algo que demuestra la importancia de los factores situados en la etapa de construcción y las implicancias de la estrategia a utilizar en la ejecución de la obra (gráfico 4).

Según el gráfico 5, en la comparación entre los proyectos de rehabilitación que incorporaron aislantes vegetales versus aislante EPS, solo en la solución que incorpora celulosa proyectada para el muro de hormigón armado hay una disminución de 5%. Para el caso 2 y 3, los proyectos que utilizan celulosa proyectada respecto del EPS se comportan de manera similar.

Evaluación económica comparativa en proyectos de rehabilitación

Caso 1. Desde el punto de vista económico, el aislamiento de celulosa proyectada se presenta como la solución más favorable. La solución que utiliza losa de corcho es económicamente la más desfavorable, con una diferencia de 39% respecto de la solución que incorpora celulosa proyectada. El costo de la losa de corcho incide en el valor final del proyecto –aumentado por el gasto del transporte– dado que el material aislante es importado desde Portugal. Por otro lado, la rehabilitación que incorpora celulosa proyectada formada en su mayor parte por papel de diario reciclado tiene fábrica en Chile, lo cual disminuye el gasto en transporte.

Caso 2. En el gráfico 6 se observa que el proyecto que incorpora losa de corcho ostenta el mayor gasto –19%– por sobre los demás proyectos. Las propuestas que utilizan celulosa proyectada como el caso 1 y el caso 2, comparándolas, logran una diferencia de 66% por m² debido a la conformación constructiva de la solución. Por su parte, la diferencia entre la solución con aislante de corcho y aquella que incorpora lana de roca es de 12%. Mientras que el porcentaje de diferencia en el costo de la solución entre EPS y lana de roca es de solo 7%, pero dado que es una solución constructiva con alto porcentaje de madera, la lana de roca aporta como material ignífugo, prestación superior respecto de otros aislantes.

Caso 3. Se presenta una clara ventaja del EPS, pero se muestra la viabilidad de la utilización de celulosa proyectada sobre la solución constructiva que incorpora lana de roca y losa de corcho aglomerado. El costo por m² del proyecto que utiliza lana de roca frente al que incorpora EPS, presenta una diferencia de 12%, cifra considerablemente menor respecto de la solución que incluye losa de corcho, cuya diferencia es de 42%. Al comparar los proyectos de rehabilitación observamos que, para el caso 2, todas las soluciones presentan valores sobre el gasto regional por m² (\$110.58 USD), lo que hace complejo su desarrollo. La losa de corcho supera –en todos los casos simulados– la

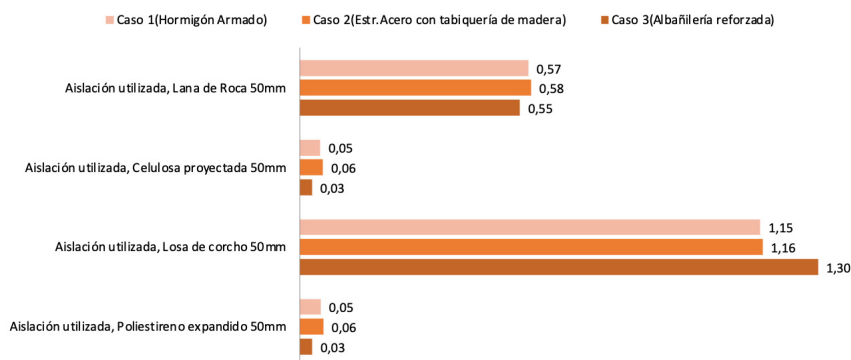


Gráfico 4. Comparativa de huella de carbono según aislamiento térmico utilizado en cada rehabilitación constructiva, TonCO₂/m² (fuente: Plataforma ÁBACO-CHILE, 2021).

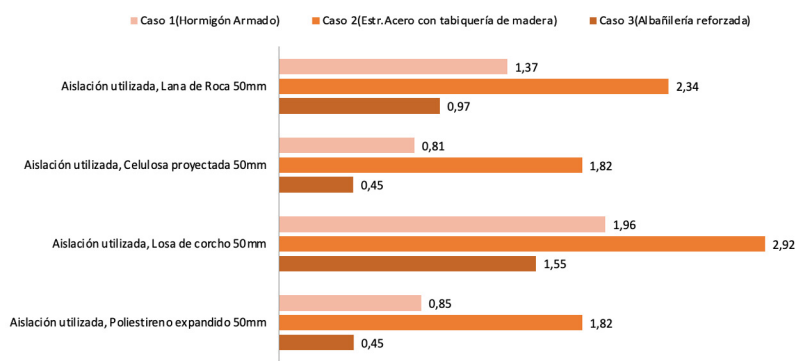


Gráfico 5. Valores de proyectos comparando aislamiento térmico, TonCO₂/m² (fuente: Plataforma ÁBACO-CHILE, 2021).

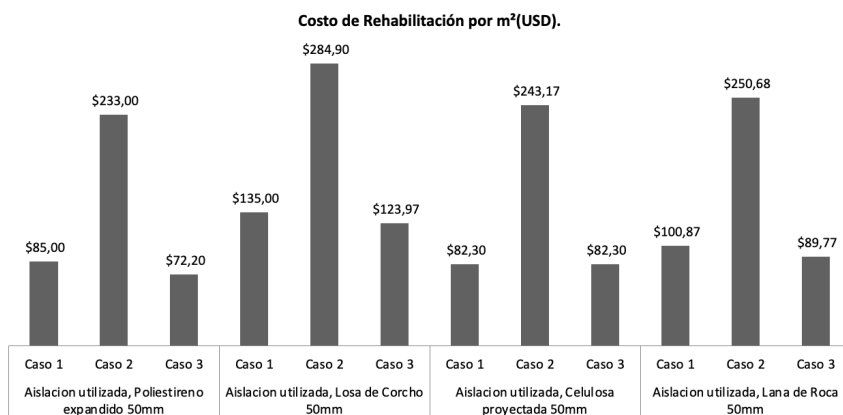


Grafico 6. Gasto comparativo por tipo de aislamiento en proyectos de rehabilitación (fuente: Plataforma ÁBACO-CHILE, 2021).

línea de gasto regional por m² de proyecto. Se observa que el 50% de los casos simulados está dentro del rango aceptado, centrándose principalmente en EPS y celulosa proyectada como los más favorables, para los casos 1 y 3.

DISCUSIÓN

La investigación nos muestra que el diseño de soluciones constructivas para envolventes de cerramiento deben entrelazar las exigencias de transmitancia térmica y el uso de materiales sostenibles, aportando así en la disminución de la huella de carbono para la etapa de construcción y uso del edificio. Entonces, el aislamiento térmico debería situarse entre las inversiones más eficaces para el ahorro energético y la consiguiente reducción del impacto medioambiental de los edificios (Kunič 2017). El análisis de la huella de carbono es relevante en el caso de proyectos sustentables en la política pública educacional ya que permite –a través del ACV– tener una visión completa del impacto ambiental sobre las estrategias de diseño para acercarse de esta manera a los objetivos de sostenibilidad planteados.

Al observar los resultados del análisis de los tres casos de estudio, se determina que la amplia variedad de soluciones de rehabilitación para la envolvente térmica cumple con

los requisitos de la NTM 011, utilizando un espesor aislante de 50mm. Además, que la correcta elección del aislante tiene mayor incidencia en la huella de carbono de la solución constructiva para la envolvente del establecimiento educacional solo si la fábrica está ubicada cerca del lugar de la rehabilitación.

La estrategia de rehabilitación y la elección de los materiales aislantes es de suma importancia, dado que la vida útil promedio que se suele considerar para edificios en distintos países es de 50 años; esto acusa, para el ACV, una etapa de uso extensa. La amplia gama de resultados se debe a la variedad de edificios, los materiales, la vida útil considerada y las condiciones geográficas y climáticas (Isasa et al. 2014).

Ventajas y desventajas del tipo de aislamiento

Losa de corcho. La ventaja es su naturaleza vegetal y huella de carbono baja en la fase de extracción-fabricación; pero dado que el material se elabora fuera de Chile, importarlo afecta directamente la huella de carbono final, el costo por m² y el tiempo de entrega. Estas variables hacen que incluir el producto no sea conveniente en los proyectos de mejoramiento constructivo o de rehabilitación de energía.

Celulosa proyectada. La celulosa es un producto interesante dado que viene de material reciclado (papel o cartón), la investigación revela todas sus virtudes desde el punto de vista medioambiental. Los análisis realizados arrojan la huella de carbono más favorable en comparación con otros materiales utilizados, pero su implementación requiere de un cambio cultural. Elementos como la suciedad en la ejecución de la partida, mano de obra especializada, maquinarias y equipos específicos, subcontratación o capacitación laboral disminuyen la voluntad de usarlo por parte de proyectistas y ejecutores de proyectos.

Lana de roca. Según los datos obtenidos, este material ofrece buenas prestaciones medioambientales que se conjugan de manera correcta con el costo del m². A diferencia del EPS –que en varios análisis se acerca a datos positivos– la lana de roca sí responde de manera ignífuga y no requiere mano de obra especializada, ni subcontratación como sucede con la celulosa proyectada; además, es un material simple de instalar. Puesto que lamentablemente aún es importado su valor ambiental resulta desproporcionado en el análisis final de la huella de carbono generada.

Poliestireno expandido. Es el material más utilizado en el mercado dado su bajo costo y facilidad de instalación. De origen sintético, su respuesta al fuego no es positiva; además, es poco amigable con el medioambiente en etapa de fabricación y reciclaje. Desde el punto de vista de la investigación, los gráficos muestran que se comporta bien a nivel de huella de carbono solo en el diseño de la solución (gráfico 4), pero en el proceso de construcción de la obra su aporte disminuye (gráfico 5), No es conveniente su utilización en envolventes compuestas, como en el caso 2.

CONCLUSIONES

El proyecto de investigación se hace cargo de desarrollar estrategias de cuantificación del impacto ambiental en etapa de diseño del proyecto. Estas estrategias integrales logran ser un aporte para el desarrollo científico en la construcción y el diseño sustentable de soluciones constructivas

puesto que incorpora una selección diferente e innovadora de materiales. Junto con ello se logra incentivar las estrategias de reducción de emisiones de efecto invernadero según los compromisos adquiridos por Chile en el Convenio Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.(MINVU, n.d.).

En esta investigación se constata que muchas envolventes en espacios educativos carecen hoy de los estándares arquitectónicos y constructivos mínimos desde el punto de vista sustentable. Por lo tanto, es necesario evaluar las distintas estrategias constructivas y los materiales a utilizar desde la etapa de diseño de los proyectos, incluyendo variables de sostenibilidad en la decisión de las soluciones a desarrollar.

Respecto de la hipótesis planteada, es posible diseñar envolventes sustentables y disminuir la huella de carbono generada por los proyectos

de rehabilitación de la envolvente utilizando materiales aislantes de carácter natural y mineral, y con emisiones bajas en etapa de fabricación. Sin embargo, eso no asegura que en la etapa de construcción se mantenga una contaminación medioambiental baja puesto que esa etapa incluye otras variables, como la instalación de faena y los cierres provisorios. Además, generalmente se utilizan distintos materiales, máquinas y herramientas que también inciden en la huella de carbono de la ejecución del proyecto y que dependen de la estrategia constructiva utilizada.

Desde el punto de vista económico, el incremento del costo de la solución sustentable por m² es inferior al 10% respecto de las soluciones existentes en varios casos del estudio. Los aumentos en estas propuestas no superan el 20% en ningún caso; incluso en el caso 1 el gasto disminuye en comparación

con la utilización de EPS, cuando se usa celulosa proyectada.

Desde el punto de vista medioambiental, los materiales sustentables por sí solos no logran disminuir la emisión de CO₂ final del proyecto. En ese sentido, la incidencia en la huella de carbono de la etapa de construcción es muy relevante para el logro del objetivo planteado.

Dentro de los hallazgos principales observados y en relación con la extensión de nuestro país, el transporte ocupa un espacio importante en la huella de carbono generada. Ello da luces sobre las estrategias que se deben utilizar en las licitaciones de obras, donde la distancia marca claramente un daño ecológico en la ecuación y muestra que los materiales se deben obtener dentro de un radio sustentable en términos ambientales y económicos. ▲■●

BIBLIOGRAFÍA

- Ali, Hikmat, and Rifqa Hashlamun. 2019. "Envelope Retro Fit Tting Strategies for Public School Buildings in Jordan." *Journal of Building Engineering* 25 (June): 100819. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100819>.
- Bego, Apolonia, and Serrano Lanzarote. 2020. "Valencia, España, Diciembre 2020 1."
- Ciampi, M., F. Leccese, and G. Tuoni. 2003. "Ventilated Facades Energy Performance in Summer Cooling of Buildings." *Solar Energy* 75 (6): 491-502. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.010>.
- CITEC, Universidad del Bio-Bio, Chile. 2015. "ÁBACO-Chile." MOP DA-MDS. 2015. <http://abacochile.cl/>.
- Construcción, Instituto de la. 2022. "Plan Nacional de Construcción Sustentable: Cómo Transformamos Ideas En Acciones." Instituto de La Construcción. 2022. <https://www.iconstruccion.cl/opinion/plan-nacional-de-construccion-sustentable-como-transformamos-ideas-en-acciones/>.
- Construye 2025. 2020. "Eficiencia y Sostenibilidad En La Infraestructura Educativa." Noticias Construye 2025. 2020. <https://construye2025.cl/2020/10/02/eficiencia-y-sostenibilidad-en-la-infraestructura-educativa/>.
- Dirección de Arquitectura, MOP, Gobierno de Chile. n.d. *TDRe MOP-DA*. <https://arquitectura.mop.gob.cl/centrodokumental/Paginas/default.aspx>.
- Dirección general de aeronautica. 2022. "DGA - Dirección Meteorologica de Chile." DGAC. 2022. <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/historico/temperaturaHistoricaAnual/290004>.
- Gilles, Claudia Torres, and Sandro Maino Ansaldo. 2015. "Evolución de Los Sistemas Constructivos En La Arquitectura Escolar Chilena Del Siglo XX." *Actas Del Noveno Congreso Nacional y Primer Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de La Construcción, Segovia, 13 a 17 de Octubre de 2015*, no. Cuadra: 1693-1702. <http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/164-Torres.pdf>.
- Hollberg, Alexander, Thomas Lützkendorf, and Guillaume Habert. 2019. "Top-down or Bottom-up ? - How Environmental Benchmarks Can Support the Design Process." *Building and Environment* 153 (February): 148-57. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.02.026>.
- Instituto Nacional de Normalización, Chile. 2012. "Norma Chilena ISO 14040." *Iso 14040*.
- IPCC. 2019. *Calentamiento Global de 1,5 °C. Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/IPCC-Special-Report-1.5-SPM_es.pdf.
- Isasa, M., Cristina Gazulla, Zabalza I., X. Oregi, Partidário P., and L. Duclos. 2014. "EnerBuilCA: Life Cycle Assessment for Energy Efficiency in Buildings." *World SB 2014*, no. July 2015: 1-32.
- Kunić, Roman. 2017. "Carbon Footprint of Thermal Insulation Materials in Building Envelopes." *Energy Efficiency* 10 (6): 1511-28. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9536-1>.
- Martínez-Rocamora, A., J. Solís-Guzmán, and M. Marrero. 2016. "LCA Databases Focused on Construction Materials: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 565-73. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>.
- Ministerio de Educación Gobierno de Chile. n.d. "Transformando Espacios Educativos: Guía Para Intervenciones de Conservación 2020." https://issuu.com/die-dep/docs/gu_a_criterios_de_dise_o.
- Ministerio de Energía. 2022. "Explorador Solar." Explorador Solar. 2022. <https://solar.minenergia.cl/exploracion>.
- MINVU, Gobierno de Chile. n.d. *Estrategia Nacional de Construcción Sustentable*. https://csustentable.minvu.gob.cl/wp-content/uploads/2014/11/Estrategia-Constructuion-Sustentable_ENERO-2014_VF_Baja.pdf.
- MMA. 2018. *Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile Sobre Cambio Climático 2018*. <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf>.
- Muñoz, C., C. Zaror, G. Saelzer, and A. Cuchi. 2012. "Estudio Del Flujo Energético En El Ciclo de Vida de Una Vivienda y Su Implicancia En Las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, Durante La Fase de Construcción Caso Estudio: Vivienda Tipología Social. Región Del Biobío, Chile." *Revista de La Construcción* 11 (3): 125-45. <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2012000300011>.
- Nielsen, Anne N., Rasmus L. Jensen, Tine S. Larsen, and Søren B. Nissen. 2016. "Early Stage Decision Support for Sustainable Building Renovation - A Review." *Building and Environment* 103: 165-81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.009>.
- NTM 11/3. 2014. "Requisitos y Mecanismos de Acreditación Para Acondicionamiento Ambiental de Las Edificaciones . Parte 3 : Calidad Del Aire Interior ." http://xi.serviu.cl/vivienda/ANEXOS_CONCURSO/NTM_11_2.pdf.
- Patania, F., A. Gagliano, F. Nocera, A. Ferlito, and A. Galesi. 2010. "Thermofluid-Dynamic Analysis of Ventilated Facades." *Energy and Buildings* 42 (7): 1148-55. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.006>.
- Radhi, Hassan, and Stephen Sharples. 2013. "Global Warming Implications of Facade Parameters: A Life Cycle Assessment of Residential Buildings in Bahrain." *Environmental Impact Assessment Review* 38: 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.06.009>.
- Rivela, Beatriz. 2012. "Propuesta Metodologica de Aplicacion Sectorial de ACV Para La Evaluacion Ambiental de La Edificación En España." *Tesis Doctoral*, 556.
- Tártaro, Ana S., Teresa M. Mata, António A. Martins, and Joaquim C.G. Esteves da Silva. 2017. "Carbon Footprint of the Insulation Cork Board." *Journal of Cleaner Production* 143: 925-32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.028>.
- Valancius, Kestutis. 2018. "Analysis of the Payback of Primary Energy and CO2 Emissions in Relation to the Increase of Thermal Resistance of a Building Energy & Buildings Analysis of the Payback of Primary Energy and CO 2 Emissions in Relation to the Increase of Thermal Resistance O." no. September. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.037>.
- Vallejo, Patricia González. 2018. "In the Life Cycle of Residential Buildings : The Construction." *Revista Hábitat Sustentable* 8: 32-51.
- Wang, Bo, Xiaohua Xia, and Jiangfeng Zhang. 2014. "A Multi-Objective Optimization Model for the Life-Cycle Cost Analysis and Retrofitting Planning of Buildings." *Energy and Buildings* 77 (September 2018): 227-35. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.025>.