



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO**

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE ECOEFICIENCIA EN ENVOLVENTES TÉRMICAS,
CONSIDERANDO LAS EXIGENCIAS DE LA ORDENANZA GENERAL DE
URBANISMO Y CONSTRUCCIÓN Y EL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN
ATMÓSFERICA POR MP2,5, PARA LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS
CASAS”**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN HÁBITAT SUSTENTABLE Y
EFICIENCIA ENERGÉTICA**

AUTOR: Aracely Rocha Rubilar

PROFESOR GUÍA: Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti

PROF.CO-GUÍA: Dr. Gerardo Saelzer

PROF.ASESOR: Dr.Waldo Bustamante.

CONCEPCIÓN, 1 de marzo de 2021.

Agradecimientos.

En un año 2020 de pandemia mundial y un nivel de estrés altísimo, toda la honra es para Dios. Sin su ayuda, esta investigación no hubiese llegado a puerto. Gracias a él, estuve rodeada del apoyo incondicional de mi familia y profesores guías.

Y todo lo que hagáis, hacedlo de corazón, como para el Señor y no para los hombres; sabiendo que del Señor recibiréis la recompensa de la herencia, porque a Cristo el Señor servís.

(Colosenses 3:23-24).

Resumen

El sector residencial chileno, emite el 66% de emisiones GEI de la industria, consume más del 15% de la energía total del país y es responsable de altos porcentajes de emisiones de material particulado en la zona centro sur de Chile (en las comunas de Temuco y Padre las Casas, por ejemplo, el 82% de las emisiones totales anuales de material particulado grueso (MP10), y el 94% del material particulado fino (MP2,5) están asociados a este sector). Lo anterior, ha ocasionado graves daños en la salud de las personas, y un fuerte impacto en el medio ambiente, asociados principalmente, al mal diseño de viviendas, y al uso de materiales inapropiados para su construcción, lo que a su vez repercute, en altas demandas de calefacción y por ende un alto gasto económico por el uso leña como principal combustible para calefaccionar. Buscando disminuir las emisiones de este material particulado y el impacto asociado, la Autoridad Ambiental Sanitaria, junto con otros organismos sectoriales, han desarrollado un paquete de políticas públicas, entre las cuales están, la implementación de los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA), los que consideran, mayores exigencias de acondicionamiento térmico, a las establecidas en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismos y Construcciones (OGUC). Sin embargo, no integran dentro de sus objetivos en forma directa, la solución de los problemas ambientales de carácter global señalados. Frente a ello, existen importantes brechas y desafíos necesarios de abordar en el corto y mediano plazo, más aún, teniendo en cuenta que existen políticas y lineamientos nacionales asociados a estos problemas, con hojas de ruta establecidas y plazos concretos: metas en carbono neutral al año 2050 y la agenda 2030 hacia un Desarrollo Sostenible. En este contexto, es que la presente investigación, tuvo como principal objetivo evaluar comparativamente el desempeño ecoeficiente de envolventes térmicas seleccionadas desde el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU, de acuerdo a las exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC para la zona térmica 5, y el PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas, con la finalidad de prospectar los impactos ambientales, energéticos y económicos alcanzados en el ciclo de vida de una vivienda. A partir de los límites de sistema que establece la UNE-EN 15978 (etapa de producto y etapa de uso), se seleccionaron envolventes térmicas de techo, muro y piso, que cumplieran con las exigencias de ambas reglamentaciones para la etapa de producto, y se evaluaron combustibles para la etapa de uso (leña, pellet y GLP). Los resultados, permitieron identificar que:

durante la etapa de producto, las envolventes que consideran el acondicionamiento térmico según las exigencias de transmitancia térmica del PDA, aumentan en un 12,4% la energía contenida, en un 8,1% la huella de carbono y en un 7,8% el costo económico, respecto a aquellas envolventes que consideran las exigencias de la OGUC. Sin embargo, al evaluar la etapa de uso, con el PDA, se logra una disminución en la demanda de calefacción, demanda de combustible, huella de carbono, y emisiones de material particulado fino, de un 19,4%, en relación a los a los resultados obtenidos con la aplicación del artículo 4.1.10 de la OGUC. Por otro lado, al analizar cada uno de los combustibles, la leña, resultó ser el combustible peor evaluado (con alta huella de carbono, altas emisiones de material particulado fino y un alto gasto económico), a diferencia del pellet o GLP, quienes presentaron mejores resultados (por ejemplo, un recambio en el uso de leña por GLP, genera un ahorro económico de más del 40%). Respecto a los artefactos que emiten material particulado fino, las salamandras y las chimeneas son las mayores emisoras con un 29% y 23% respectivamente, seguidas por las cocinas a leña con un 17%, las estufas a combustión lenta S/T y combustión lenta C/T con un 14% y 12% respectivamente, el pellet con un 2% y finalmente el GLP, el cual emite 0% de emisiones. Finalmente, en la evaluación del ciclo de vida completo de la vivienda, se identificó que al aumentar los espesores entre los diferentes materiales que componen cada una de las envolventes (para alcanzar las exigencias del PDA), entre las etapas de producto y uso, la primera es la principal causante de las emisiones de huella carbono y demanda de energía (71% y 59% respectivamente).

Palabras Claves: Construcción Sustentable, Indicador Ambiental, Eficiencia Energética, Contaminación Atmosférica, Plan de Descontaminación Ambiental.

Abstract

The Chilean residential sector emits 66% of GEI industries emissions, it consumes more than 15% of the total energy in the country and it is responsible for the high percentage of emissions of particulate material in the south central area of the country. (For example: in Temuco and Padre de las Casas an 82% of total emissions per year of particulate thick material (PM10) and a 94% of particulate thin material (PM2,5) are associated to this area. The aforementioned has caused serious damage to the people's health and a huge impact in the environment. This as a consequence of the inappropriate housing design and the wrong choice of material to build the houses. Consequently there is a high demand for heating which leads to a high economic expenditure for the use of firewood, which is the main fuel for heating.

The environmental authority and others organizations have developed a group of public policies in order to decrease the emissions of this particulate material and all its consequences. An example of these policies is the implementation of the atmospheric decontamination plans (PDA) which consider a higher level of demand for thermal conditioning than the established in the article 4.1.10 of the Ordenanza General de Urbanismos y Construcciones (OGUC). However they do not integrate the environmental problem solution among their aims. Therefore there are gaps and challenges that are totally necessary to address in a short and medium term, especially given that there are national policies and guidelines associated to these problems with established roadmaps and specific deadlines: carbon neutral goal by 2050 and the 2030 agenda towards sustainable development.

In this context, the main aim of this investigation was to evaluate through comparison the eco-efficient performance of thermal envelopes selected from the official list of Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico by MINVU, according to the requirements of the article 4.1.10 of the OGUC for thermic area 5 and the PDA of Temuco and Padre de las Casas, with the purpose of prospecting the environmental, energetic and economic impacts achieved in the life cycle of a home. Based on the system limits established by the UNE-EN 15978 (product stage and use stage), roof, wall and floor thermal envelopes were selected with the common feature that all of them have to fulfill the requirements of both regulations for the product stage, while for the use stage some fuels were evaluated (firewood, pellets and LPG).

The results allowed to identifying that: the product stage, the envelopes that consider thermal conditioning according to the thermal transmittance requirements of the PDA, increase the energy contained by 12.4%, and the carbon footprint by 8.1% and 7.8% the economic cost, with respect to those enclosures that consider the requirements of the OGUC. However, when evaluating the stage of use, with the PDA, a decrease in heating demand, fuel consumption, carbon footprint, and emissions of fine particulate matter is achieved, of 19.4%, in relation to the results obtained with the application of article 4.1.10 of the OGUC. On the other hand, when analyzing each of the fuels, firewood turned out to be the worst evaluated fuel (with a high carbon emission, high particulate thin material and high economic spending), In comparison Pellet and LPG showed better results (for example an exchange in the use of firewood by LPG generates an economic saving of more than 40 Regarding heating artifacts that emit fine particulate matter, salamandra stoves and chimneys are the ones that emit more particulate matter (29% and 23% respectively) followed by wood stoves with a 17%, slow burning stoves S/T and slow burning stoves C/T with a 14% and 12%, pellet with a 2% and finally LGP with a 0% emissions. Finally, in the evaluation of the complete life cycle of the house, it was identified that by increasing the thicknesses between the different materials that set up each of the envelopes (to reach the PDA requirements) the product stage is the main cause of carbon emissions and energy consumption of (71% and 59%).

Keywords: Sustainable Construction, Environmental Indicator, Energy Efficiency, Atmospheric Pollution, Environmental Decontamination Plan.

Índice

Capítulo 1: Introducción	8
1.1. Planteamiento del problema.....	8
1.2. Preguntas de investigación.....	12
1.3. Hipótesis.....	12
1.4. Objetivo general	14
1.5. Objetivos específicos.....	14
1.6. Metodología.	15
2.1.1. Métodos propuestos.....	15
2.1.2. Técnicas de recolección de datos.	16
2.1.3. Técnicas de procesamiento de datos.....	16
2.1.4. Selección del caso estudio.....	17
Capítulo 2: Marco Teórico.	18
2.2. Definición de sustentabilidad y ecoeficiencia.	18
2.2.1. La ecoeficiencia medida a través de indicadores.	20
2.2. Concepto de ACV y su relación con la ecoeficiencia.....	40
2.2.1. ÁBACO-CHILE como banco de datos ambientales y económicos.....	41
2.3. Envoltentes térmicas.....	42
2.3.1. Acondicionamiento térmico.....	43
2.4. Reglamentación térmica.	44
2.4.1. Ordenanza general de urbanismo y construcción (OGUC).....	44
2.4.2. Plan de Descontaminación Atmosférica por MP2,5, para las comunas de Temuco y Padre las Casas.....	47
2.4.3. Análisis comparativo de exigencias térmicas entre la OGUC y el PDA de Temuco y Padre las Casas.....	49
Capítulo 3: Presentación del caso estudio.	51
3.1. Selección de la tipología de vivienda a analizar.....	51
3.2. Descripción del modelo de vivienda a analizar.	54
3.3. Selección de envoltentes desde el Listado Oficial de Soluciones Constructivas del MINVU.	55
3.3.1. Selección de envoltentes térmicas para la techumbre.....	55
3.3.2. Selección de envoltentes térmicas para los muros del 1° piso.	57

3.3.3.	Selección de envolventes térmicas para los muros del 2° piso.	59
3.3.4.	Selección de envolventes térmicas para las ventanas.	61
3.3.5.	Selección de envolventes térmicas para las puertas.	62
3.3.6.	Selección de envolventes térmicas para el piso en contacto con el terreno.	62
Capítulo 4. Análisis de Indicadores de ecoeficiencia del caso estudio.		64
4.1.	Evaluación de los indicadores de ecoeficiencia para la etapa A1 - Suministro de materias primas.....	64
4.1.1.	Límites del sistema.....	64
4.1.2.	Evaluación de la energía contenida (EC) en MJ/m ²	67
4.1.3.	Evaluación de la huella de carbono (HC) en kgCO ₂ eq/m ²	71
4.1.4.	Evaluación del costo económico en \$/m ²	72
4.2.	Evaluación de los indicadores de ecoeficiencia para la etapa B1 – Uso.	74
4.2.1.	Límites del sistema.....	75
4.2.2.	Evaluación de la demanda energética.	76
4.2.3.	Evaluación de la huella de carbono asociada a los combustibles en kgCO ₂ eq/m ²	78
4.2.4.	Evaluación del costo económico asociado a los combustibles en \$/m ²	80
4.2.5.	Evaluación de las emisiones de material particulado fino 2,5 µm por m ²	81
Capítulo 5. Comparación de resultados.....		85
5.1.	Evaluación de la ecoeficiencia para el ciclo de vida completo de la vivienda.	85
Capítulo 6: Conclusiones, limitaciones, contribuciones y futuros estudios.....		89
6.1.	Conclusiones.....	89
6.2.	Limitaciones.....	92
6.3.	Contribuciones y futuros estudios	92
Referencias bibliográficas.....		93
Anexos		112
Anexo A. Cálculo de Energía Contenida y Huella de Carbono de las envolventes seleccionadas con la OGUC – Caso 1.		112
Anexo B. Cálculo de Energía Contenida y Huella de Carbono de las envolventes seleccionadas con el PDA de Temuco y Padre las Casas – Caso 2.		114
Anexo C. Análisis de costos unitarios de las envolventes seleccionadas en la OGUC – Caso 1.		116
Anexo D. Análisis de costos unitarios de las envolventes seleccionadas con PDA - Caso 2.		118

Capítulo 1: Introducción

1.1. Planteamiento del problema.

La industria de la construcción, corresponde a una de las industrias que ha crecido significativamente durante las últimas décadas, aportando al crecimiento económico de los países a nivel mundial (Acosta 2009). Sin embargo, junto a este crecimiento, también se han desarrollado diversos problemas de tipo globales y ambientales, que por lo demás, favorecen el cambio climático, como lo son por ejemplo: la crisis energética, el calentamiento global, aporte a la destrucción de la capa de ozono, emisiones de material particulado, generación de una cantidad de residuos sólidos, erosión de la tierra, alteración de ecosistemas, entre otras (Seng, Magniont y Lorente 2019; MINVU 2018d).

Estudios señalan, que la industria de la construcción, en su etapa de construcción, genera entre un 30% y un 40% de la carga ambiental mundial (Marrero et al. 2020), y que en Europa, por ejemplo, el 36% de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son atribuibles a esta industria (Cellura et al. 2018).

En este contexto, la situación chilena no es muy diferente, ya que durante el ciclo de vida completo de los proyectos de construcción, se genera un 23% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (CChC 2019), y se considera al sector residencial, como uno de los sectores más críticos, responsable del 66% de emisiones GEI de la industria (MMA 2020b), y de consumir más del 15% de la energía total del país (MINVU 2018e).

Sumado a lo anterior, durante la etapa de uso del sector residencial, se generan altos niveles de contaminación del aire, provenientes de las emisiones de material particulado grueso 10 µm (MP10) y fino 2,5 µm (MP2,5), provocados por el uso de leña como principal combustible para calefaccionar (aproximadamente un 40% del país utiliza leña) (MMA 2014) (Air 2018). Cabe señalar, que el consumo de leña, repercute fuertemente en la economía de cada familia, quienes en promedio gastan, \$169.000 pesos al año en la compra de este combustible (CDT 2019).

Es importante mencionar, que altas concentraciones de MP2,5 provocan graves consecuencias sobre la salud de las personas. Según cifras del Ministerio del Medio Ambiente, durante el 2018 alrededor de 3.640 muertes fueron asociadas a enfermedades cardiopulmonares por la exposición prolongada a este contaminante (MMA 2019b), lo cual frente a la aparición del nuevo coronavirus (SARS-CoV-2) o también llamado COVID-19 estas cifras son alarmantes, ya que esta enfermedad se transmite más rápido frente a altas concentraciones de material particulado fino en el aire (Cereceda, Díaz y Seeger 2020). Sumado a ello, los problemas de humedad, mala ventilación al interior de las viviendas y la contaminación intra-domiciliaria (como el humo del tabaco y de los diversos artefactos contaminantes del hogar) también contribuyen en empeorar la salud en los habitantes (Armas M. 2012; MINVU 2018d).

A nivel país, el 97% de las emisiones de material particulado generado por la combustión residencial de leña, corresponden a las comunas de Temuco y Padre las Casas (ubicadas en la región de la Araucanía). Ambas comunas, son reconocidas como zonas saturadas por MP2,5 (Air 2018), donde el 80% de las viviendas, usan leña como combustible para calefaccionar y/o cocinar, por ser económico, estar siempre disponible, y ser fácil de obtener (Emol 2020; Municipalidad de Padre las Casas 2020; Universidad de Chile 2019; Ministerio de Energía 2015b).

Cabe señalar, que los altos porcentajes de MP2,5, del que son responsables Temuco y Padre las Casas, están directamente relacionados con las características climáticas, y el crecimiento demográfico de estas comunas, en las cuales, las temperaturas tienden a variar entre los 3°C en julio y los 22°C en enero, y son las temperaturas de los meses de invierno, las que hacen particularmente intensivo el uso de calefacción residencial a leña. Respecto al crecimiento demográfico, en los últimos 15 años, Temuco ha crecido poblacionalmente en un 15,1% y Padre las Casas un 26,7%, lo que significa un incremento en el sector residencial, y por ende un incremento en las emisiones de MP2,5 (Municipalidad de Temuco 2019; Municipalidad de Padre las Casas 2020).

Debido a los altos índices de contaminación del aire en Temuco y Padre las Casas, es que desde el 2015, comenzó a regir el Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) para ambas comunas de carácter obligatorio, cuyo objetivo principal, es disminuir las emisiones de material particulado fino (se espera que en 10 años, disminuyan en un 67%). Para lograr este objetivo, propone métodos de control del uso de leña, equipos de calefacción energéticamente eficientes, y la incorporación de

estrategias constructivas enfocadas en mejorar el estándar térmico de las viviendas (MMA 2015). Para ello, sustituye e incluye límites de transmitancia térmica máxima superiores, a las establecidas en la reglamentación térmica existente en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) (la OGUC está vigente en todas las regiones de Chile que no tengan implementado un PDA) (MMA 2015; MINVU 1992).

Es importante destacar, que un cambio de reglamentación desde la OGUC a un PDA, implica que a nivel social en las etapas de ocupación de las viviendas, se deban modificar las prácticas habituales de calefacción (Chávez, Gómez y Briceño 2009), y que en las fases de diseño y construcción, se deban seleccionar aislantes térmicos con mayores espesores que sean capaces de dar cumplimiento a estas exigencias, o incorporar el uso de otros materiales con mejores propiedades térmicas (MMA 2015).

Si bien es cierto, con la incorporación del PDA, se busca solucionar uno de los problemas del que es responsable el sector residencial chileno (emisiones de material particulado), no logra integrar el resto de los problemas (emisiones GEI, alto consumo energético, alto gasto económico, entre otros), a pesar de que a nivel gubernamental, existen compromisos relacionados con ellos, como lo son por ejemplo: el Acuerdo París desarrollado el 2015 hacia un carbono neutralidad al 2050 (MMA 2019a), los objetivos definidos en la agenda 2030 hacia un Desarrollo Sostenible como parte de 193 países miembros de la Organización de Naciones Unidas (ONU) (MDS 2017) o las metas del eje 6 de la Ruta Energética 2018-2022, en donde se espera reducir al menos en un 30% la demanda de energía de las viviendas del país, (Ministerio de Energía 2018).

Actualmente, gran parte de los problemas de los cuales es responsable la industria de construcción, y principalmente el sector residencial, en todas las fases de su ciclo de vida, son el resultado de soluciones de diseño, uso de materiales y soluciones constructivas deficientes desde el punto de vista ambiental, las cuales no integran conceptos de sustentabilidad ni de ecoeficiencia, y que repercuten en la fase de uso, y por ende en el ciclo de vida de las viviendas (MINVU 2018a). La mayoría de los materiales utilizados, son obtenidos de productos petroquímicos o de fuentes naturales procesadas con altos consumos energéticos, alta huella de carbono y escasa posibilidad de reutilización, como lo son por ejemplo, el vidrio, la lana de vidrio, el poliestireno expandido o el hormigón (Viegas, Walsh y Barros 2016; Dávalos 2013; Fita 2018).

A partir de lo mencionado anteriormente, es que la presente investigación busca realizar un análisis comparativo del desempeño ecoeficiente de envolventes térmicas, con un enfoque de ciclo de vida, definido en las normas UNE-EN 15978: Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo (AENOR 2012) y la ISO 14040:2006: Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marco de referencia (ISO 14040 2006a), a partir de las exigencias de acondicionamiento térmico descritas en el artículo 4.1.10 de la OGUC y el PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas, con la finalidad de prospectar los impactos ambientales, energéticos y económicos alcanzados en el ciclo de vida de una vivienda.

A saber la ecoeficiencia, corresponde a *una herramienta de gestión cuantitativa, capaz de proporcionar bienes y servicios a un precio competitivo, que satisfaga las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que reduzca progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel compatible con la capacidad de carga estimada del planeta* (Ponce Kress 2017). Dentro de la evaluación de ecoeficiencia, los impactos ambientales se evalúan utilizando la evaluación del ciclo de vida (ACV) según lo prescrito por otras normas internacionales (ISO 14040, ISO 14044) (ISO 14045 2012).

Esta investigación, integra los compromisos ambientales que se ha impuesto el gobierno a nivel país: la carbono neutralidad al 2050 (MMA 2019a), la Agenda 2030 (ONU) (MDS 2017), la reducción del material particulado fino del PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas (MMA 2015) y las metas del eje 6 de la Ruta Energética 2018-2022 (Ministerio de Energía 2018). Evaluará dos categorías de impacto ambiental: el consumo energético, a través de la determinación de la demanda de energía para el ciclo de vida de la vivienda (energía contenida de los materiales en la etapa de producto y energía operacional en la etapa de uso), y la huella de carbono (HC) para el ciclo de vida completo de la vivienda (HC de los materiales en la etapa construcción y HC de los combustibles en la etapa de operación). Adicionalmente, se analizará el costo económico de los materiales en la etapa de producto y el costo económico de los combustibles para la etapa de uso, para finalizar, con la evaluación de las emisiones de material particulado MP_{2,5} generadas por una vivienda en la etapa de uso.

Lo anterior permitiría seleccionar y optimizar envolventes térmicas, logrando identificar qué tipo de viviendas alcanzarían un mayor grado de sustentabilidad y qué materiales conviene utilizar en su

diseño y construcción, para obtener un buen comportamiento energético y amigable con el medio ambiente y con la salud de las personas (Rincón 2011; Rondón Toro y Narea 2012).

1.2. Preguntas de investigación.

1. Una vivienda diseñada con los estándares de acondicionamiento térmico exigidos por el PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas, ¿podría alcanzar estándares de ecoeficiencia, desde el punto de vista ambiental, energético y económico al ser evaluada a lo largo de su ciclo de vida respecto a las exigencias de la OGUC?
2. ¿Qué parámetros determinan el balance económico de una vivienda, con integración de estándares de ecoeficiencia a lo largo de su ciclo de vida?

1.3. Hipótesis.

A través de un análisis comparativo de ecoeficiencia de una vivienda, considerando las estrategias de diseño de acondicionamiento térmico para las envolventes térmicas de techo, muro y piso, según las exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC y el Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) de las comunas de Temuco y Padre las Casas, se consideran las dos siguientes hipótesis:

Hipótesis N°1.

En la etapa de producto o diseño, se eleva en un 30% la energía contenida y la huella de carbono al considerar mejoras térmicas en las envolventes. Mientras que el costo económico, se incrementa en un 10%.

Esta hipótesis se sustenta en dos investigaciones: la primera en la realizada por (Quispe 2016), quien analizó la energía contenida y las emisiones de CO₂ en viviendas unifamiliares con eficiencia energética en España, llegando a la conclusión de que las obras nuevas que incorporan estándares de eficiencia energética impactan en promedio un 30% más en la etapa de uso, que una vivienda existente rehabilitada energéticamente. Y la segunda, corresponde a un análisis preliminar de los costos de los aislantes térmicos realizado por la autora de la presente tesis, quien determinó que la variación de precios por m² de un aislante térmico, como lo es el poliestireno expandido, por ejemplo, que va aumentando su espesor en 25 mm es de un 20%. El análisis se realizó mediante cotizaciones

realizadas al proveedor ETSA (empresa nacional, con más de 20 años en el mercado, que fabrica y provee productos de poliestireno expandido en todas sus formas para los mercados de la construcción (ETSA 2020)).

Hipótesis N°2.

Durante la etapa de uso u ocupación, evaluada para la vida útil de la vivienda, la demanda energética, y en consecuencia la demanda de combustible disminuye en un 50%, la huella de carbono en un 25%, y el material particulado fino de 2,5 μm por consumo de leña para calefacción, disminuye en un 60%.

El porcentaje de disminución de la demanda energética, se justifica con la investigación realizada por (Hernandez 2017), quien realizó un análisis energético de una vivienda social, construida con la reglamentación térmica según el artículo 4.1.10 de la OGUC, versus una vivienda social con estándares más exigentes. Los resultados mostraron, que la demanda de energía para calefacción cae de 119,5 [kWh/m²]al año a 56 [kWh/m²]al año. En otra investigación, (Ayensa Sevilla 2013) señaló que cualquier edificio de más de 20 años de vida útil, se puede conseguir un ahorro de hasta el 50% de la energía consumida en climatización, y mejorar el confort térmico en el interior de los edificios, si se consideran mecanismos de rehabilitación energética.

Del mismo modo, la hipótesis se justifica con las metas que el gobierno se ha propuesto en términos de ahorro energético y carbono neutral. Con la Ruta Energética 2018-2022, se espera reducir en al menos en un 30% la demanda de energía de las viviendas en Chile (Ministerio de Energía 2018), y como parte de los países miembros de la CMNUCC, se espera que al año 2030 se reduzcan en un 25% las emisiones de carbono negro (provocado por diversas combustiones, causante del calentamiento de la atmósfera, mala calidad del aire y efectos negativos sobre la salud humana, entre otros) y al 2050, alcanzar la carbono neutralidad (Gobierno de Chile 2020).

Respecto al material particulado fino de 2,5 μm , el porcentaje considerado se justifica con la propuesta establecida por el gobierno, quien espera disminuir en un 67% las emisiones de material particulado fino para el año 2025, con la implementación del PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas (MMA 2015)

1.4. Objetivo general

Evaluar comparativamente el desempeño ecoeficiente de envolventes térmicas de techo, muro y piso, seleccionadas del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU, de acuerdo a las exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC y el PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas, con la finalidad de prospectar los impactos ambientales, energéticos y económicos alcanzados en el ciclo de vida de una vivienda.

1.5. Objetivos específicos.

OE1. Seleccionar sistemas constructivos representativos de envolventes térmicas de techo, muro y piso, vigentes en el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU, para comparar la transmitancia térmica considerando el cumplimiento de las exigencias del Artículo 4.1.10 de la OGUC y el PDA las comunas de Temuco y Padre las Casas.

OE2. Determinar la energía contenida, huella de carbono y costo económico vinculados a la etapa de diseño de una vivienda, aplicadas a los materiales de los sistemas constructivos de envolventes térmicas seleccionadas, para comparar el desempeño ecoeficiente al aplicar las exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC y el PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas.

OE3. Determinar la demanda energética durante la etapa de uso de una vivienda con y sin aplicación del PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas, para cuantificar la huella de carbono, costo económico y emisiones de material particulado fino 2,5 μm , asociados al combustible utilizado para calefaccionar.

OE4. Evaluar el impacto ecoeficiente de la incorporación del PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas para la toma de decisiones en la construcción de viviendas, con bajo impacto ambiental, buen comportamiento energético y rentables económicamente, evaluadas en un periodo de ciclo de vida estimado.

1.6. Metodología.

2.1.1. Métodos propuestos.

La metodología de investigación corresponde a una la investigación mixta (cuantitativa y cualitativa). Lo anterior se debe a que se analizará la ecoeficiencia de una vivienda, determinando el impacto ambiental y energético alcanzado en el ciclo de vida de esta, a partir de la selección de envolventes térmicas desde el Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU.

Para la determinación de la energía contenida y la huella de carbono asociada al proceso de fabricación de los materiales que componen las envolventes de una vivienda, se ha escogido la herramienta de gestión ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (ECV), de acuerdo a los principios normativos establecidos en la ISO 14.040 – 2006 (Environmental management - Life cycle assessment- Principles and framework), como asimismo en la “Especificación para la evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de productos; y la norma española UNE-EN 15978 (Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo). Mientras que, para determinar el costo económico de los materiales, se utilizará el método de análisis de costos unitarios.

Para la etapa de ocupación de las viviendas, las envolventes no consumen energía directamente, pero sí están relacionadas con el consumo de energía destinada para calefacción, y con la cantidad de material particulado emitido al aire del que es responsable la industria residencial.

Para alcanzar los objetivos planteados, y demostrar la ecoeficiencia de una vivienda a partir de la comparación de las exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC y el PDA de Temuco y Padre las Casas; se propone realizar una medición de la huella de carbono y energía contenida de los materiales que componen la envolvente térmica para ambos casos, buscando relacionar los resultados, con el consumo de energía y emisión de material particulado MP2,5 por calefacción durante la etapa de ocupación de la vivienda. Para ello, se propone utilizar una metodología cuantitativa, en la cual se analizarán dos casos de estudios, considerando para esto una vivienda que incluya en su concepción de diseño las exigencias de la OGUC y otra las exigencias del PDA. La información será sistematizada

y analizada desde un punto de vista ambiental, mediante la utilización de la herramienta de ecoeficiencia ÁBACO-CHILE y simulación energética a través de software AUTODESK REVIT 2021.

2.1.2. Técnicas de recolección de datos.

Para realizar el análisis de huella de carbono y energía contenida de los materiales que componen la envolvente de las viviendas en las etapas iniciales, se procederá inicialmente a caracterizar este elemento desde el punto de vista del diseño y sus componentes constructivos, a través de la plataforma ÁBACO-CHILE. Mientras que, para determinar el costo económico, se utilizará el software Notrasnoches, con datos del mismo sistema actualizados hasta junio del 2020.

Posteriormente, para la demanda energética de la vivienda, se realizará simulación dinámica a través del Software AUTODESK REVIT 2021. Este dato, permitirá definir el tipo combustible para calefacción, capaz de satisfacer la demanda energética, determinando de este modo, la huella de carbono y emisiones de material particulado fino, vinculado a cada combustible. Para tal efecto se obtendrán datos desde el informe del Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT), “Usos de energía de los hogares Chile 2018” y del informe desarrollado por el Centro de Sistemas Públicos de la Universidad de Chile, “Evaluación Programa de Recambio de Calefactores a Leña del Ministerio del Medio Ambiente, 2019.

2.1.3. Técnicas de procesamiento de datos.

Con la información recopilada, el procesamiento de la información se realizará a partir de los límites de sistema establecidos en la UNE-EN 15978: Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo (AENOR 2012). Las etapas consideradas serán:

- Etapa de PRODUCTO: A1 - Suministro de materias primas.
- Etapa de USO: B1 – Uso.

En la etapa de PRODUCTO, se utilizarán los datos ambientales existentes en la plataforma ÁBACO-CHILE, desde donde se obtendrán las categorías de impacto ambiental de energía contenida (EC) y huella de carbono (HC), desglosadas para cada material y solución constructiva que forma parte de cada envolvente. Cabe señalar, que ÁBACO-CHILE trabaja internamente con datos ambientales

obtenidos desde la biblioteca del software de estudios de análisis del ciclo de vida SimaPro, el que incorpora a su vez la base de datos Ecoinvent versión 3.0, por lo tanto, la carga ambiental de los materiales, está expresada en la unidad funcional de kilogramo [Kg] de producto, por la unidad de medida de los recursos de la base de datos de ÁBACO-CHILE. En el caso que un material no se encuentre dentro de la base de datos de la plataforma, se obtendrá a partir de los datos obtenidos del Inventario de Carbono y Energía, de la Universidad de Bath (Hammond y Jones 2011), para ello se recomienda ver la **Tabla 15.**

En la etapa de USO para determinar la huella de carbono y emisiones de material particulado fino por $2,5 \mu\text{m}$ de los combustibles, se procederá a calcular la demanda de energía por conceptos de calefacción de la vivienda a partir del diseño y simulación dinámica en Software AUTODESK REVIT 2021, cuyas condiciones de borde se encuentran en el apartado 4.2.2 de este documento.

La huella de carbono del consumo anual de combustible se proyectará a un periodo de estudio de referencia (RSP), según indica la UNE-EN 15978. Este periodo, corresponde a la vida útil de la vivienda, el cual según lo fijado por el Servicio de Impuestos Internos (SII) para bienes físicos del activo inmovilizado, según Resolución N°43, de 26-12-2002, con vigencia a partir del 01-01-2003 de 50 años (SII 2003).

2.1.4. Selección del caso estudio.

El caso de estudio, corresponde a una vivienda tipo casa aislada de dos pisos de $67,9 \text{ m}^2$, cuya materialidad del primer piso es albañilería reforzada y el segundo piso estructura de acero liviano galvanizado. Esta muestra, será evaluada en dos oportunidades aplicando las soluciones constructivas de envolventes térmicas que se señalan a continuación:

- a) Envolventes térmicas con exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC.
- b) Envolventes térmicas con exigencias del PDA de Temuco y Padre las Casas.

El análisis y la justificación de la selección del caso estudio se encuentran en el Capítulo 3: Presentación del caso estudio.

Capítulo 2: Marco Teórico.

En esta sección se tratarán las definiciones como el desarrollo sustentable y su relación con la ecoeficiencia en el área de la construcción. Esto es fundamental para el desarrollo de la investigación, de tal modo de poder lograr un uso más eficiente de los recursos materiales utilizados en envolventes constructivas bajo el marco de la reglamentación actual y futuras reglamentaciones, para fortalecer el compromiso ambiental, económico y social, bajo el alero de la sustentabilidad.

En consecuencia, en la primera parte se tratará de llevar al lector hacia la definición de la ecoeficiencia, integrando conceptos de huella de carbono, demanda energética, ciclo de vida y emisiones de material particulado. Mientras que, en la segunda parte se incluirán las reglamentaciones térmicas vigentes a nivel nacional.

2.2. Definición de sustentabilidad y ecoeficiencia.

El concepto de sustentabilidad, aparece el 1987 cuando se reunió la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, y surgió el informe llamado “Nuestro futuro común” conocido también como “Informe Brundtland”, el cual define desarrollo sostenible o sustentable como: *“Aquel que es también duradero, y es capaz de asegurar la satisfacción de las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”* (Brundtland 1987).

En este sentido, la sustentabilidad en sus tres áreas fundamentales se define como:

1. **Sustentabilidad económica:** busca integrar los elementos del desarrollo sustentable a través del razonamiento tradicional de la economía neoclásica, es decir, que el valor de los bienes es en función de la utilidad o satisfacción que le asignan los consumidores. De este modo, la sustentabilidad económica, corresponde a la cantidad total o máxima que puede consumir un individuo en un período de tiempo sin reducir su consumo en período futuro, asegurando el crecimiento y desarrollo, al mismo tiempo que mejora el bienestar humano, proveyendo empleos decentes, reduciendo desigualdades, reduciendo la pobreza y preservando el capital natural (Haro-Martínez y Taddei-Bringas 2014; Navarro 2017; Bermejo Gomez de Segura 2014; Gudynas 2011)

- 2. Sustentabilidad social:** Se considera alcanzada cuando se hace una distribución de manera equitativa de los costos y los beneficios entre el total de población actual (una economía de alto empleo que le permita a la gente mejorar constantemente su calidad de vida con equidad, de manera que no se generen tensiones sociales inmanejables y un desarrollo políticamente viable), tanto entre las generaciones presentes y futuras (crecimiento integrador). Es decir, se considera que existe sustentabilidad social y desarrollo duradero cuando se invierte en capital humano para lograr una adecuada cohesión social y territorial, papel que deben desarrollar las instituciones y agentes sociales. Se resume que este tipo de sustentabilidad, va de la mano con la económica (Bermejo Gómez de Segura et al. 2010; Navarro 2017; Haro-Martínez y Taddei-Bringas 2014)
- 3. Sustentabilidad ecológica o ambiental:** un sistema debe mantenerse a sí mismo y a todos sus componentes a pesar del paso del tiempo sin alterar su forma y sus características, de modo tal, que éstos continúen proveyendo todos los servicios que son capaces de proveer en la actualidad, a las generaciones futuras. Por lo tanto, los cambios se encontraran dentro de parámetros que se consideren normales, basándose en valores como la eficiencia, equidad, justicia y la capacidad de regeneración y asimilación del ecosistema global, asegurando con la toma de decisiones la sustentabilidad a largo plazo (Navarro 2017; Gudynas 2011; Zuñiga 2015; Haro-Martínez y Taddei-Bringas 2014)

De lo anterior por lo tanto, se desprenden temas como: la competitividad económica, la responsabilidad social y la ecoeficiencia (Inda Tello, Claudia Mirella; Vargas-Hernández 2012). Sin embargo, es esta última la que tiene la capacidad de englobar o unir en forma general todo el concepto de desarrollo sustentable en sus tres áreas, permitiendo el desarrollo de los sectores socioeconómicos, conservando el medio ambiente, los recursos naturales y las condiciones ambientales de las futuras generaciones (Leal 2005; Cantú 2015)

La ecoeficiencia está compuesta por dos palabras: Eco, derivada de “oikos”, que en griego significa “casa” y de Eficiencia, que tiene que ver con la capacidad de obtener mayor rendimiento con el mínimo de desperdicio (Rocha y Azevedo 2016). Este concepto, comenzó a desarrollarse en el

Informe Brundtland, sin embargo, fue en 1992 en la Conferencia de Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, denominada Cumbre de la Tierra o Cumbre de Río (por su realización en Río de Janeiro, Brasil) donde se marca un hito para su desarrollo (Inda Tello, Claudia Mirella; Vargas-Hernández 2012).

En la Cumbre de Río, se adoptaron compromisos para reducir los problemas ambientales, disminuir la pobreza y la inequidad social, y colocó a los seres humanos en el centro de las preocupaciones, al considerar el derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza (Larrouyet 2015; Observatorio de Tendencia Futuro 360° 2018)

En este sentido, si se visualiza la aplicación de la ecoeficiencia en el área de la construcción, esta es capaz de generar una serie de beneficios tales como: menor utilización de los recursos naturales (materiales y energéticos), mejorar la productividad, disminuir los impactos ambientales debidos al crecimiento económico (residuos, materiales tóxicos, contaminación atmosférica), disminuir los riesgos de accidentes, mejorar las medidas de sanidad y seguridad y finalmente mejorar la imagen pública del sector, otorgando mayor confianza al consumidor (Leal 2005). Esto, considerando que los materiales que se utilizan para las construcciones generan una serie de efectos negativos sobre el medio ambiente como lo es el alto consumo energético, gran cantidad de residuos sólidos, contaminación ambiental y la incidencia en el efecto invernadero y capa de ozono (Alavedra et al. 1997).

2.2.1. La ecoeficiencia medida a través de indicadores.

Para medir o evaluar la ecoeficiencia, según los principios básicos establecidos en la Cumbre de Río, se deben establecer una serie de indicadores que permitan obtener resultados tangibles (ONU 1992). Estos indicadores se dividen en indicadores generales e indicadores específicos (Rincón 2011). Los últimos pueden ser creados de acuerdo con las necesidades puntuales de cada empresa (Aguirre 2015), mientras que los indicadores generales o básicos, según señala el informe desarrollado por United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) (Unctad 2004) y lo descrito por (Leal 2005) son los siguientes:

1. **Consumo de energía:** energía total consumida, incluyendo electricidad, combustibles fósiles, biomasa, madera, solar, eólica. La energía es la capacidad de realizar un trabajo y / o la capacidad de proporcionar calor (Leal 2005; Unctad 2004)
2. **Consumo de materiales:** suma del peso de todos los materiales comprados u obtenidos de otras fuentes, incluyendo materias primas, catalizadores o solventes, bienes intermedios, etc. Esto excluye a los empaques, consumo de agua y materiales de uso energético (Leal 2005).
3. **Consumo de agua:** suma de toda el agua fresca comprada de la red pública o privada, o la obtenida de fuentes superficiales o subterráneas, incluyendo agua para refrigeración (Leal 2005; Unctad 2004)
4. **Emisiones de gases con efecto invernadero:** suma de las sustancias que contribuyen al calentamiento global y que establece el Protocolo de Kyoto celebrado en 1997 y que entró en vigencia el 2005 (dióxido de carbono (CO₂); metano (CH₄); óxido nitroso (N₂O); hexafluoruro de azufre (SF₆); hidrofluorocarbonos (HFC); perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SFG)). La contribución de un gas se considera significativa cuando su participación en la contribución total supera el 1% al calentamiento global (ONU 1998; Unctad 2004)
5. **Emisiones de sustancias que dañan la capa de ozono:** suma de todas las sustancias que agotan la capa de ozono ya sea como sustancia pura o como mezcla que contienen cloro y/o bromo, definidas por el Protocolo de Montreal celebrado en 1987, en sus anexos A, B, C o E. La sustancia de referencia que se toma normalmente es CFC (clorofluorocarbonos) (ONU 1987; Unctad 2004)
6. **Emisiones ácidas al aire:** Cantidad de gases o vapores ácidos emitidos al aire (incluyendo NH₃, HCl, HF, NO₂, SO₂ y vapores sulfúricos) provenientes de la combustión de fósiles y procesos reactivos o tratamientos. Son importantes en países que presentan problemas relacionados con ellos (Leal 2005).

7. **Indicadores financieros:** se abocan a valorar los riesgos o beneficios ambientales en relación con los ingresos o ventas netas (Leal 2005).
8. **Generación total de residuos sólidos:** suma total de sustancias y objetos destinados a disposición. Los desechos pueden ser sólidos, líquidos o tener una consistencia pastosa. Las emisiones que contaminan el agua y el aire, aunque no son salida de productos, no se consideran residuos. Son importantes en países que presentan problemas relacionados con ellos (Leal 2005; Unctad 2004).

Estos indicadores permiten medir cuantitativamente la relación ambiental y económica para ciertos problemas ambientales globales, logrando identificar las áreas que provocan avances, retrocesos, desperdicios, pérdidas de recursos u oportunidades de inversión (Ruíz et al. 2017)(Rincón 2011). El cálculo se obtiene mediante la división entre el desempeño ambiental y el desempeño económico o viceversa, según se muestra en la siguiente ecuación definida por (MÜLLER, Kaspar; STURM 2001):

$$\text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{Valor del producto o servicio}}{\text{Influencia ambiental}} \quad \text{o} \quad \text{Ecoeficiencia} = \frac{\text{Influencia ambiental}}{\text{Valor del producto o servicio}}$$

2.1.1. Indicador de ecoeficiencia: consumo de energía

Según lo que especifican en su investigación (Alomá y Malaver 2007), el concepto de energía tiene diversas acepciones y definiciones, no quedando claramente especificado en los diferentes textos de termodinámica que es donde debería estar definido. Por lo que ellos proponen la siguiente definición: *“Propiedad de todo cuerpo o sistema material o no material que puede transformarse modificando su situación o estado”*.

De acuerdo a lo anteriormente señalado, los países constantemente se están transformando y cambiando su situación actual a través del desarrollo económico, para generar bienestar en sus habitantes (Pastén 2012). Ya sea porque desean superar la pobreza, alcanzar el subdesarrollo o mantener y/o aumentar el alto nivel de vida alcanzado (Águila et al. 2011).

Este desarrollo económico, está directamente relacionado con la producción y distribución de energía, basada en el uso de combustibles fósiles como lo son el petróleo, el gas natural, el uranio

y el carbón (Tieri, Comerón y Pece 2014). Sin embargo, el uso indiscriminado de estos, está provocando que cada vez existan menos cantidad, con una tendencia a desaparecer en décadas futuras debido al sobre consumo, así como también, la generación de una gran cantidad de desechos que van al aire, al agua y al suelo, lo cual contribuye al calentamiento global (Alarcón 2011). Otras consecuencias, tienen relación con el aumento de los precios del carbón y del gas natural, junto a otros fenómenos que afectan los costos de la generación de energía eléctrica, como lo es la falta de precipitaciones lo que trae consigo sequías (Fuentes, F; García, Carlos J; Pinto A 2013). Cada uno de estos problemas ha generado mundialmente lo que se conoce como “Crisis Energética” (Mediavilla 2012).

Desde 1980, el consumo de energía a nivel mundial ha aumentado en un 45% (Navarro 2017), y se estima que en promedio un tercio de la humanidad consume un 90% de la energía (Lecuona Neumann, Izquierdo Millán y Rodríguez Aumente 2005). Entre los países más consumidores de energía se encuentran Brasil, China, India, Indonesia, México y Sudáfrica, juntos consumen un tercio de la energía mundial, y se espera que aumente al 40% según las directrices políticas actuales (IEA 2020).

De lo anterior, el sector de Arquitectura, Ingeniería y Construcción contribuye en forma significativa con el alto consumo de energía. Considerando que las personas pasan entre un 80% y un 90% del tiempo en ambientes interiores, los edificios son responsables del 40% del consumo de energía, del 36% de las emisiones de CO₂ y el 40% de residuos de construcción y demolición (Arballo, Kuchen y Chuk 2019; Mercader Moyano, M., Camporeale, P., & Cózar-Cózar 2019). Esta situación significa que se debe intervenir este sector en materia energética, considerándose un elemento clave para cumplir las políticas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Ayensa Sevilla 2013).

Esto se afirma, al momento de dar a conocer el modelo global del desempeño energético el que se define cómo: *“los resultados medibles relacionados con la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de la energía”* (ISO 50001 2011) (**Figura 1**). Debido a esto, es que las políticas propuestas por la Unión Europea, tienen como objetivo principal frenar la crisis energética y avanzar hacia edificaciones cero energías. Para ello ha establecido una serie de estrategias o rutas relacionadas con la eficiencia energética, energía renovable, energía nuclear y captura y

almacenamiento de carbono (se espera una reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 80-95% al 2050 y la incorporación de nuevas tecnologías bajas en carbono, energía renovable, eficiencia energética e infraestructura de red para el mismo año) (UE 2020).



Figura 1. Concepto de desempeño energético (Carretero y García 2012)

Al definirse dentro de este modelo la Eficiencia Energética (EE), esta corresponde a un concepto, que permite hacer un buen uso de la energía que se está consumiendo. Es ahorrar energía sin perder en calidad de vida o en calidad de producción y también, es la optimización de la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos (Ministerio de Energía 2020). Por lo tanto, se considera un aspecto fundamental para mitigar los efectos negativos que ha traído el alto consumo energético a nivel mundial (Altomonte, Coviello y Lutz 2003; Llamas 2009)

La eficiencia energética comprende mejoras desde el lado de la oferta, así como también de la demanda, por lo que se ha incluido en varios sectores económicos a nivel mundial (Poveda 2007). Cabe señalar además, que corresponde a un indicador fundamental al momento de evaluar el desempeño energético de los diversos sectores económicos mencionados anteriormente (Carretero y García 2012).

2.1.1.1. Consumo de energía en Chile

El consumo de energía en Chile ha crecido significativamente en los últimos años (**Figura 2**). Donde el sector que más ha contribuido en esto es el sector de la Industria y Minería, seguido por el sector Comercial, Público y Residencial (Ministerio de Energía 2020).

	Transporte	Industria y Minería	Comercial, Público y Residencial	Sector Energía: Auto Consumo	Consumo Total
1991	37.440	43.815	36.954	4.255	122.464
2001	67.320	75.118	56.282	5.595	204.315
2011	87.189	100.326	71.410	12.504	271.429

Figura 2. Balance nacional de energía desde 1991 (Ministerio de Energía 2020).

De lo mencionado anteriormente, solo el sector residencial consume más del 15% de la energía total del país, por lo que el gobierno se ha propuesto avanzar en la reducción y consumo energético en el sector construcción, a través de estrategias de diseño pasivo, el uso de equipos energéticamente eficientes, uso de energías renovables, utilización de aislación e inercia térmica con altos estándares y medidas de diseño que reduzcan las pérdidas energéticas por infiltración (MINVU 2018e; Ministerio de Energía 2018)

Para cumplir con las propuestas mencionadas en el párrafo anterior, el gobierno chileno a través de los Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile (ECSV), ha establecido rangos de requerimientos máximos de demanda en calefacción y de refrigeración que deben cumplir las viviendas, según la zonificación térmica del país (**Figura 3**). Sin embargo, los ECSV actualmente son de aplicación de carácter voluntario (MINVU 2018e).

ZONAS TÉRMICAS	DEMANDA DE CALEFACCIÓN (kwh/m ² año)			
	2020	2030	2040	2050
Zona A	15	15	15	15
Zona B	90	65	43	15
Zona C	77	56	38	15
Zona D	71	52	35	15
Zona E	117	88	59	30
Zona F	135	100	67	30
Zona G	120	90	60	30
Zona H	120	90	60	30
Zona I	150	110	73	30

ZONAS TÉRMICAS	DEMANDA DE ENFRIAMIENTO (kwh/m ² año)			
	2020	2030	2040	2050
Zona A	10	5	5	5
Zona B	10	5	5	5
Zona C	10	5	5	5
Zona D	15	10	5	5
Zona E	5	5	0	0
Zona F	5	5	0	0
Zona G	0	0	0	0
Zona H	0	0	0	0
Zona I	0	0	0	0

Figura 3. Requerimientos máximos de demandas para viviendas por zona (MINVU 2018e)

Del mismo modo, en la Ruta Energética 2018-2022, el gobierno busca reducir al menos en un 30% la demanda de energía de las viviendas del país, avanzando en el desarrollo de una política pública que incremente la eficiencia energética a nivel residencial, a través del etiquetado de productos (estufas, lavadoras, aspiradoras, microondas, hornos eléctricos, ampollitas y refrigeradores), la calificación energética de viviendas, entre otras (Ministerio de Energía 2018).

2.1.1.2. Cálculo de consumo de energía.

Para determinar el consumo de energía total de un edificio durante su ciclo de vida, se debe diferenciar entre la energía operacional y energía contenida. La primera está relacionada con la etapa de uso (energía consumida para mantener el confort térmico y la iluminación interior), y la segunda, con la energía que conservan los materiales utilizados durante la etapa de construcción (desde la extracción de las materias primas, hasta su manufactura, construcción y transporte), sin dejar de lado, la energía que se va incorporando en los procesos constructivos (incluye máquinas y (Cárdenas et al. 2015; Muñoz Sanguinetti 2013)

Cabe señalar, que la energía contenida (EC) es considerada como una categoría de impacto ambiental y que en los materiales de construcción, depende de la matriz energética de cada país, la tecnología utilizada en cada proceso productivo y de los sistema de transporte utilizado, y se mide en Mj/kg o Mj/m³ (Bustamante 2009) (ver **Tabla 1**). Una vez que se obtiene el cálculo de la energía contenida en el proceso de producción estudiado, es posible determinar las emisiones de GEI (Muñoz Sanguinetti 2013).

Tabla 1: Consumo de recursos energéticos como indicador de impacto ambiental (ISO 14045 2012)

Categoría de impacto ambiental		Unidad de referencia	Factor de caracterización
CONSUMO DE RECURSOS ENERGÉTICOS	Energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del elemento analizado.	MJ	Cantidad Consumida

2.1.2. Indicador de ecoeficiencia: emisiones de gases con efecto invernadero

Actualmente, la tierra se encuentra frente a diversos fenómenos y alteraciones climáticas, tales como derretimiento de los hielos, aumento del nivel del mar, excesivas precipitaciones, entre otros; los cuales han sido generados por lo que se conoce mundialmente como Cambio Climático (MMA, Ministerio del Medio Ambiente - 2014). Este concepto es definido según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) como: *“Un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”* (ONU 1992).

Las principales actividades que han contribuido al cambio climático son la quema de combustibles fósiles y la deforestación (Dávalos 2013). La primera, genera gases de efecto invernadero de origen humano, que se acumulan en la atmósfera y aumentan la temperatura media de la Tierra (Piñeros et al. 2017; OMM 2014). De acuerdo a un informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), la tierra ha aumentado en 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales (IPCC 2018). Y la segunda, partiendo de la concepción de que los bosques absorben dióxido de carbono de la atmósfera y liberan oxígeno mediante la fotosíntesis, cuando se eliminan, dejan de absorber CO₂, aumentando la concentración de este gas en la atmósfera (Ipinza y Barros 2011).

Según definición del IPCC los gases de efecto invernadero (GEI) se definen como: *“Un componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad ocasiona el efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. Además, la atmósfera contiene cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógeno, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, y contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, N₂O y CH₄, el Protocolo de Kyoto contempla los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC)”* (IPCC 2013).

Los GEI de origen primario, son fundamentales para el desarrollo de vida en la tierra, puesto que sin estos la temperatura promedio de la superficie terrestre sería alrededor de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, en lugar de la media actual de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura óptima que permite la existencia de al menos diez millones de especies (Velasquez de Castro Gonzales 2005; NASA 1998). Mientras que los GEI antropógenos (causados o provocados por la acción directa o indirecta del hombre), tienen un potencial de calentamiento global muy elevado, contribuyendo al agotamiento y agujero de la capa de ozono (IPCC 2013). Considerando que el ozono es fundamental para el equilibrio radiativo de la estratosfera (actúa como filtro de las radiaciones nocivas y permite que pase la radiación ultravioleta la que genera la vida en el planeta), un agotamiento excesivo, puede generar efectos nocivos sobre la salud y el medio ambiente de manera irremediable (ONU 1987; Lecuona Neumann, Izquierdo Millán y Rodríguez Aumente 2005).

El principal gas invernadero antropógeno es el dióxido de carbono, que contribuye en un 66% al forzamiento radiactivo (resultante de actividades como el transporte, procesos industriales, calefacción, incineración, entre otras), lo sigue el metano con un 17% (producto que se genera en las fermentaciones), el óxido nitroso con un 6% (generado en la agricultura con el empleo de fertilizantes agrícolas) y los clorofluorocarbonos y gases halogenados menores (propelentes de aerosoles, refrigeración o espumas), que contribuyen en un 11% (OMM 2019; Velasquez de Castro Gonzales 2005) En la **Figura 4**, se puede evidenciar el incremento de los GEIs desde el año 1975 al 2020.

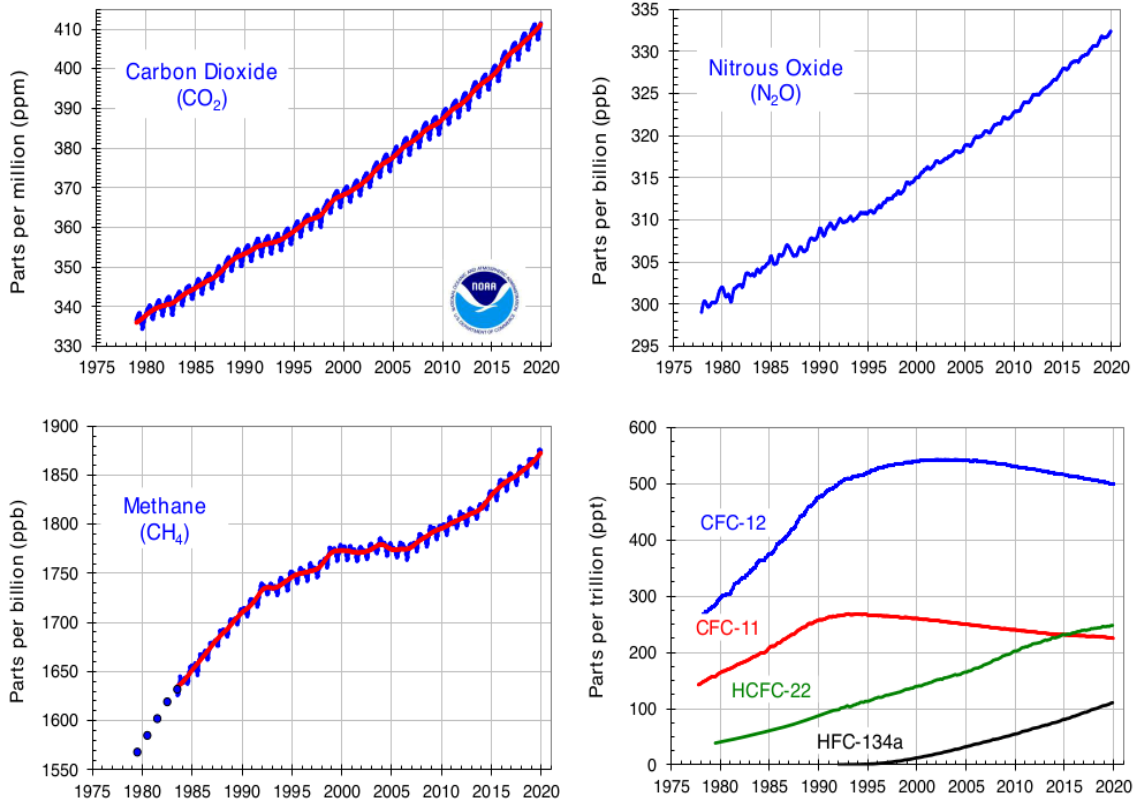


Figura 4. Niveles de GEI en los últimos 45 años (Butler y Montzka 2020).

Considerando que los países industrializados representan aproximadamente el 80% de las emisiones de GEI (Piñeros et al. 2017), en el Protocolo de Montreal (1987) y posteriormente en el Protocolo de Kyoto (1997), estos países se comprometieron a controlar el consumo y la producción de sustancias químicas que contienen cloro y bromo, y a reducir los niveles de emisión de GEI de origen antropógenos (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre) (ONU 1987; 1998). Además se crearon mecanismos de mercado de carbono para compensar estas emisiones a través de los servicios ecosistémicos que los bosques prestan como sumideros de carbono (Aguirre 2015). Así mismo en el Acuerdo Climático de París celebrado el 2015, las Partes de la CMNUCC establecieron medidas para enfrentar los efectos del cambio climático, comprometiéndose a mantener la temperatura mundial por debajo de los 2°C y reduciendo las emisiones de GEI a través de la mitigación, adaptación y resiliencia (ONU 2015).

2.1.2.1. Emisiones GEI en Chile.

En Chile, pese a que las emisiones de GEI son bajas en relación con el resto del mundo, estas se encuentran en aumento significativo debido al crecimiento económico y poblacional del país. De acuerdo a lo que señala (Dávalos 2013), desde 1990 al 2006 las emisiones de GEI aumentaron en un 70%.

Entre los sectores económicos del país, el mayor aporte de gases de efecto invernadero son las del Sector de Energía, con un 78% del total (de este porcentaje, la generación eléctrica por uso de carbón representa el 26%), lo sigue la agricultura con un 10,6%, Procesos Industriales y Uso de Productos con un 6,2%, y los residuos con un 5,2% (Palma 2019).

De acuerdo con lo anteriormente señalado, el sector energía se divide en subcategorías, dentro de las cuales se encuentra la industria manufacturera y de la construcción. Esta última, a nivel internacional genera cerca de un 30% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (CChC 2019), y en las etapas de construcción, uso y demolición, libera un 50% del CO₂ total emitido (Dimoudi y Tompa 2008), desde donde, los movimientos de tierra, aportan entre el 60% y 85% de las emisiones totales generadas sólo en la etapa de construcción, convirtiéndose en la actividad más relevante de este sector (Marzouk, El-zayat y Aboushady 2017). Así mismo, en la producción de aglutinantes, como lo son el cemento, la cal y el yeso, se liberan anualmente aproximadamente 3,06 mil millones de toneladas métricas de CO₂ a la atmósfera (Vinnichenko, Ryazanov y Krot 2018).

En Chile durante todo su ciclo de vida, el sector construcción es responsable de la generación de más de un tercio de las emisiones totales de gases efecto invernadero y de residuos sólidos (MINVU 2018d). De este porcentaje, el sector residencial es responsable del 66% de las emisiones GEI (MMA 2020b) (**Figura 5**).

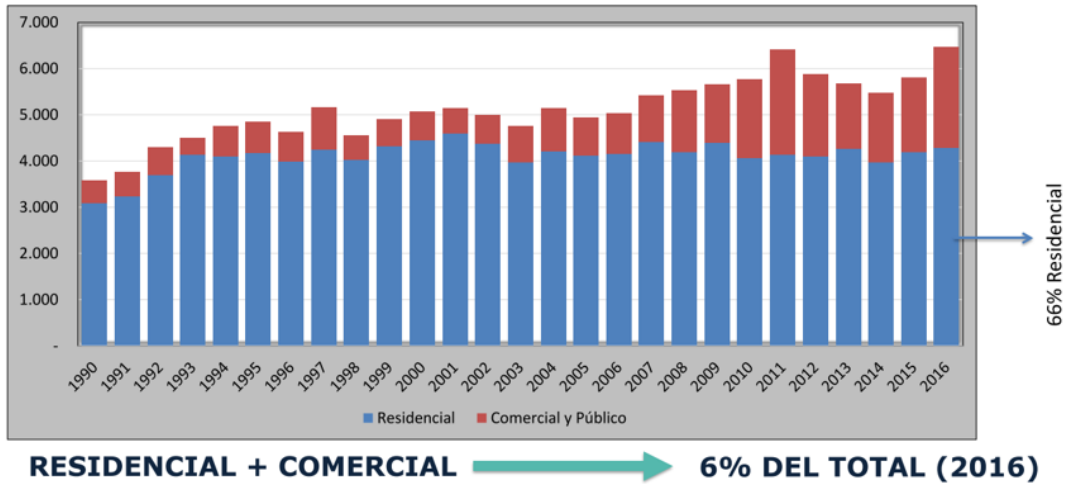
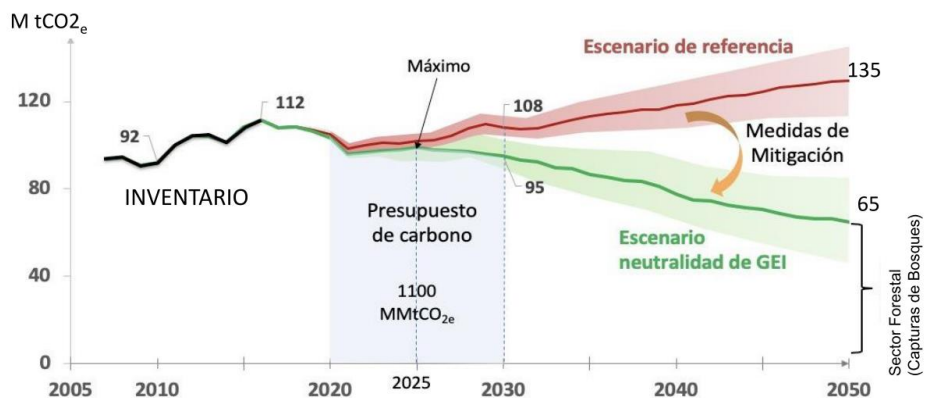


Figura 5. Emisiones GEI (kt CO₂ eq/año). Uso Combustible fósil Sector Edificación y Vivienda (Ciudades) (MMA 2020b)

Debido a lo anterior, Chile como parte de la CMNUCC, se ha propuesto cumplir con los compromisos acordados en los acuerdos y tratados mencionados en párrafos anteriores (Gobierno de Chile 2020). En línea con el Acuerdo de Acuerdo de París, se ha comprometido hacia la carbono neutralidad para el año 2050 (cero emisiones de GEI). Para ello, el Ministerio del Medio Ambiente, se encuentra en proceso de elaboración de una Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) (considerando un horizonte a 30 años), la cual definirá los lineamientos generales a largo plazo que seguirá el país de manera transversal e integrada para enfrentar el cambio climático; transitar hacia un desarrollo bajo en emisiones de gases de efecto invernadero, hasta alcanzar y mantener la neutralidad de emisiones de los mismos; reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia a los efectos adversos del cambio climático; y, dar cumplimiento a los compromisos internacionales asumidos por el Estado de Chile en la materia (MMA 2019a) (Figura 6).



Fuente: Chilean NDC Mitigation Proposal: Methodological Approach and Supporting Ambition. Mitigation and Energy Working Group Report. Santiago: COP25 Scientific Committee

Figura 6. Proyección Carbono Neutralidad 2050 NDC actualizada, presupuesto carbono (MMA 2020b)

2.1.2.2. Medición de los GEI.

De acuerdo a con lo que señalan (Espíndola y Valderrama 2012), existen cuatro métodos para medir y realizar un recuento de los GEI que provocan las actividades humanas sobre medioambiente (Figura 7). Estos se diferencian según el tipo de enfoque (corporativo, producto o una combinación de ambos):

1. Método de Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GEI Protocol), implementado en el 2001 por el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) y sigue estándares de la ISO 14064 (WBCSD 2004).
2. Método de Balance de Carbono (Bilan Carbone), desarrollado por la Agencia del Medio Ambiente y Energía de Francia (ADEME) en el año 2002 y que sigue los estándares de la ISO 14064 (Cerrillo 2017).
3. Método de Especificaciones Públicamente Disponibles (PAS 2050), elaborado en el 2007 por el Instituto Británico de Estandarización y se basa en la norma ISO 14040 de análisis de ciclo de vida y la ISO 14067 de huella de carbono para productos (BSI 2011).
4. Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3), desarrollado por Doménech y colaboradores en el 2004 (Penela, García-Negro y Quesada 2009).

Método	Enfoque	Perimetro	Referencia/ País	Escala	Unidad	Información	Actividades
Protocolo de Gases Efecto Invernadero (GEI Protocol)	CORPORATIVO	Alcance 1: Emisiones Directas provenientes del uso de combustible bajo control de la empresa	Protocolo GEI (2001) (Multinacional)	Empresa: SI	Ton CO ₂ eq/año	Documentación o medición de consumos directos e indirectos de actividades operacionales u organizacionales	Todas las actividades de una organización
		Alcance 2: Emisiones Indirectas por consumo de electricidad		Territorio: NO			
Balace de Carbono (Bilan Carbone)		Alcance 3: Emisiones Subsidiarias o indirectas fuera del control de la empresa	BC (2002) (Francia)	Empresa: SI	Ton CO ₂ eq/año		
			Territorio: SI	kg CO ₂ eq/Unidad funcional	Producto: SI		
Especificaciones Públicamente Disponibles (PAS 2050)	PRODUCTO	Emisiones generadas a lo largo del ciclo de vida del producto en base a dos opciones alternativas: B2B o B2C	Grupo BSI (2008) (UK)	Producto: SI	kg CO ₂ eq/Unidad funcional	Mapas de procesos e inventarios. El Análisis del Ciclo de Vida permite relacionar aspectos operacionales y ambientales	Todas las actividades esencialmente productivas
Método Compuesto de las Cuentas Contables (MC3)	CORPORATIVO + PRODUCTO	Emisiones generadas en una organización sin exceder sus límites, no se incluirán ni clientes, ni proveedores, consorcios o plantas de tratamiento de desechos.	Doménech (2004) (España)	Empresa: SI	Ton CO ₂ eq/año	Básicamente cuentas contables de la organización permitiendo relacionar el aspecto económico al ambiental	Todas las actividades de una organización
			Producto: SI	Ton CO ₂ eq/ton producto			
				Hectáreas Globales (Gha)			

Figura 7. Métodos para la determinación de la huella de carbono (Espíndola y Valderrama 2012).

Cómo los GEI afectan a la atmosfera en distintos grados de radiación y permanecen en ella durante tiempos diferentes, la medida en la que un GEI contribuye al calentamiento global se define como Potencial de Calentamiento Global (PCG) (Quezada, Hsieh y Valderrama 2013), y se utiliza el CO₂, como gas de referencia (al ser el más contribuyente) para medir otros gases de efecto invernadero. El PCG del CO₂ es siempre igual a 1 (IPCC 2013). Así mismo, este PCG se ha denominado también Huella de Carbono, ya que se trata de una medida, en unidades equivalentes de CO₂ (CO₂eq), de las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por un producto o servicio a lo largo de todo su ciclo de vida (Bastante-Ceca et al. 2011). Los CO₂eq incluyen en la suma las emisiones de los demás GEI (Dávalos 2013).

De acuerdo a la definición de Asociación Española para la Calidad (AEC), se define Huella de Carbono (HC) cómo: “La cuantificación de las emisiones, directas e indirectas, de Gases de Efecto Invernadero, en adelante GEIs, (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs y SF₆) que son liberadas a la atmósfera como consecuencia de la actividad de una empresa, del ciclo de vida de un producto, la organización de un evento o de la actividad de una persona” (García Sardina 2013). Cabe señalar además, que la huella

de carbono se considera como un indicador de impacto ambiental (Ipinza y Barros 2011) (ver **Tabla 2**).

Tabla 2: Calentamiento global como indicador de impacto ambiental (ISO 14045 2012).

Categoría de impacto ambiental		Unidad de referencia	Factor de caracterización
CALENTAMIENTO GLOBAL	Fenómeno observado en las medidas de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas	Kg. eq CO ₂	Potencial de Calentamiento Global (PCG)

2.1.3. Indicador de eco-eficiencia: emisiones ácidas al aire.

El aumento de la población mundial y el crecimiento económico, industrial, habitacional, parque automotriz, así como también, los eventos naturales tales como erupciones volcánicas, incendios forestales, tormentas de arena, entre otros, han generado que el aire que se respira sea vea expuesto a diferentes contaminantes (Coloballes 2016) (Franco 2012). Esto, ha traído consecuencias sobre la salud de las personas las que han desarrollado enfermedades del tipo respiratorias, cardiovasculares, mutagénesis y carcinogénesis, entre otras (Gobierno de Chile 2020) (Larrouyet 2015) (Armas M. 2012). El ser humano respira entre 5 a 6 litros de aire por minuto por lo que un alto contenido de aire contaminado resulta claramente perjudicial para la salud (MMA 2016).

Se considera que el aire atmosférico está contaminado cuando este posee cambios y concentraciones anormales, debido a una acumulación excesiva de algunos gases o sustancias contaminantes causadas por las actividades humanas (Coloballes 2016). Entre estas sustancias se encuentran, el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos mal quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO₂), óxidos de azufre (SO₂), y el material particulado (PM) (Palomo 1997). Los primeros 4, corresponden a productos derivados de procesos de combustión (OMS 2006), mientras que el último, corresponden a pequeñas partículas sólidas de polvo, tierra, humo y ceniza volátil, o partículas líquidas formadas a partir de procesos de condensación de algunos gases presentes como niebla en la atmósfera (Rodríguez et al. 2010).

La Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente, define los conceptos “Contaminación” y “Contaminante” como (Ley 19300 1994):

Contaminación: “presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones o concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente” y **Contaminante:** “todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental” (Ley 19300 1994).

Los distintos contaminantes atmosféricos, se pueden clasificar en contaminantes primarios y secundarios. Los primeros son emitidos hacia la atmósfera de manera antropogénica (por ejemplo el monóxido de carbono), mientras que los segundos, se forman en la atmósfera a partir de reacciones químicas de sus precursores (por ejemplo el ozono, el cual se forma por reacciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y óxido de nitrógeno (NO₂) en presencia de calor y luz solar (Ubilla y Yohannessen 2017) (**Figura 8**).

Contaminantes Primarios	Contaminantes Secundarios
Óxidos de carbono (CO)	O ₃ (troposférico)
Compuestos nitrogenados (NO _x , NH ₃ , N ₂ O)	Hidrocarburos oxidados
Compuestos azufrados (SO _x , SO ₂)	Aerosoles orgánicos secundarios
Material Particulado (MP ₁₀ y MP _{2,5})	Sulfatos
Hidrocarburos	Nitratos
Metales	Material Particulado secundario

Figura 8. Principales contaminantes primarios y secundarios presentes en el aire (MMA 2016)

Dentro de los contaminantes primarios, el material particulado (PM) corresponde al contaminante más nocivos para la salud (Román A., Prieto y Mancilla 2004). De acuerdo a la masa y composición de la partícula, se dividen en dos grupos: MP Grueso, con diámetros mayores a 2,5 micrómetros y menores a 10 micrómetros (PM₁₀); y MP Fino, con diámetros menores a 2,5 micrómetros, que se

denominan nanopartículas y provienen de todo tipo de combustión, incluso de aquella que ocurre en los motores de combustión interna (PM_{2,5}) (MMA 2016; Alarcón 2011).

De acuerdo a lo que señala la Organización Panamericana de la salud (OPS 2019), según un reporte de la Organización Mundial de la Salud en el año 2016, estas partículas en Latino América y El Caribe, presentan una alta y excesiva concentración, sobre todo en países como Guatemala, Perú, Suriname y El Salvador (Figura 9).

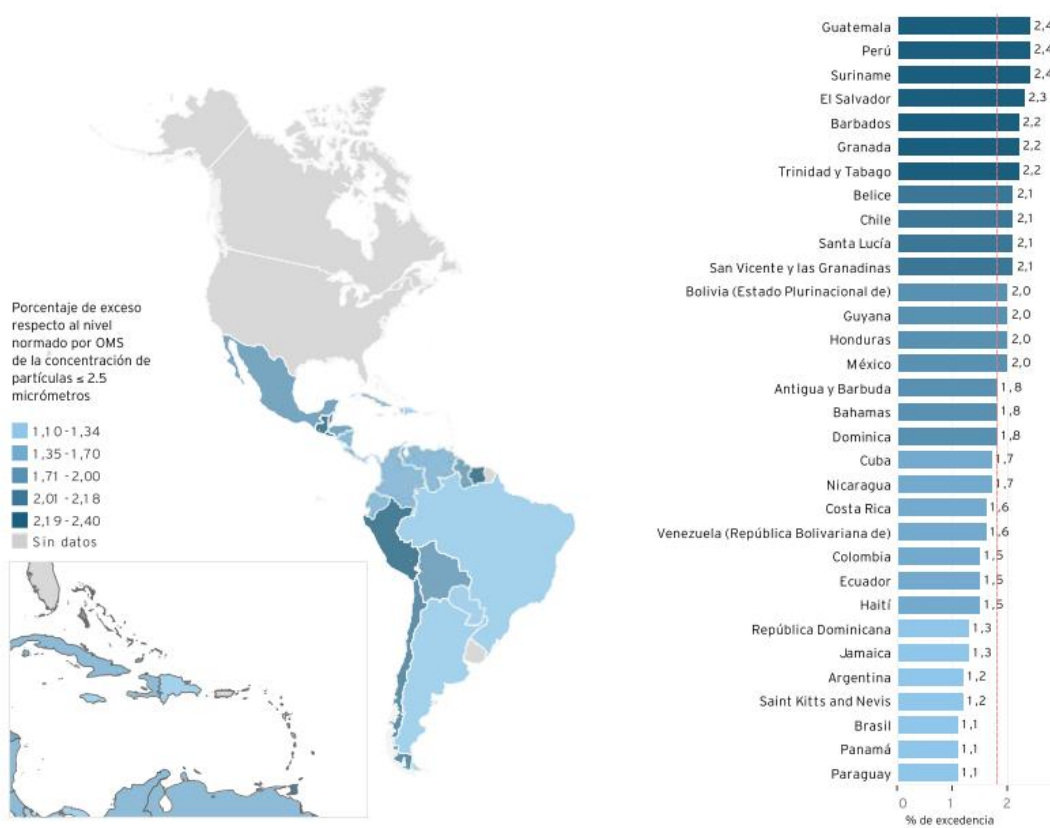


Figura 9. Excedencia del nivel normado por OMS de la media anual de la concentración de partículas $\leq 2,5$ micrómetros en el aire, 2016 (OPS 2019).

2.1.3.1. Emisiones de material particulado en Chile.

Según lo que muestra la Figura 9, Chile se encuentra entre los 10 países que más excede las concentraciones de PM_{2,5} a nivel mundial, cuyas principales fuentes contaminantes provienen del carbono negro, el que corresponde a aquellos contaminantes provenientes del diésel para

transporte terrestre, uso de leña para calefacción y cocina residencial, y del uso de biomasa como energético en el sector industrial (Gobierno de Chile 2020; Vallejos-Romero y Oñate Ñancuqueo 2013).

Las primeras mediciones de la calidad del aire en Chile se realizaron en 1964 (MMA 2016). Sin embargo, fue en 1976 que comenzó a monitorearse periódicamente a través de la creación de una Red de Vigilancia de Calidad de Aire a nivel nacional administrada por el Ministerio de Salud, que abarcaba desde la Región de Coquimbo hasta la de Aysén (desde 2012, el órgano administrador pasó a ser el MMA) (Schonsteiner y Hervé 2019). En la actualidad existen 207 estaciones de monitoreo que trabajan mediante una unidad colectora (cabezal) de aire, y están orientadas principalmente a la medición de material particulado en sus fracciones gruesa (MP_{10}) y fina ($MP_{2,5}$) (MMA 2019b).

De acuerdo con lo que señala el Decreto Supremo N°20 del 2013 (norma de calidad primaria para material particulado respirable MP_{10} , en especial de los valores que definen situaciones de emergencia y deroga Decreto N° 59, de 1998, del Ministerio Secretaría General de la Presidencia), la calidad primaria para material particulado respirable, el MP_{10} debe encontrarse en concentraciones diarias (24 horas) en 120 microgramos por metro cúbico normal ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3\text{N}$), de superar este límite (entre 200 y $299 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se decreta alerta ambiental al ser perjudicial para salud humana, y en $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para la concentración anual (MMA 2013).

Así mismo, el Decreto Supremo N°12 de 2011 (norma primaria de calidad ambiental para material particulado fino respirable $MP_{2,5}$), establece que el $MP_{2,5}$, debe encontrarse en 50 microgramos por metro cúbico ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y en 20 microgramos por metro cúbico ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$), como concentración de 24 horas y anual, respectivamente (MMA 2011).

De este modo, la evaluación de la calidad del aire, se realiza según la fuente de emisión, la cual puede ser fija (como las de las industrias) o móvil (como las de los vehículos motorizados y la combustión a leña residencial) (Palomo 1997).

En el caso de la combustión a leña residencial, cerca del 90% del material particulado fino $MP_{2,5}$ es producto de la calefacción por leña, principalmente en las ciudades del centro sur de Chile, en los meses de invierno (ver **Figura 10**) (MINVU 2018d). Entre los principales artefactos a leña utilizados,

corresponden a salamandras, chimeneas abiertas, estufa de simple y doble cámara, braseros y equipos hechizos, utilizadas para calefaccionar las viviendas o para cocinar (Vallejos-Romero y Oñate Ñancuqueo 2013). Según lo que señala el CDT en su informe “Medición del Consumo Nacional de Leña y Otros Combustibles Sólidos Derivados de la Madera del 2015”, las viviendas que poseen mayor uso de artefactos de calefacción a leña, son de las zonas térmicas del centro sur de Chile: zona térmica 6 (con un 91,1%), zona térmica 5 (con 90,2%), zona térmica 4 (con un 59,8%) y la zona térmica 7 (con un 53,2%) (Ministerio de Energía 2015a).

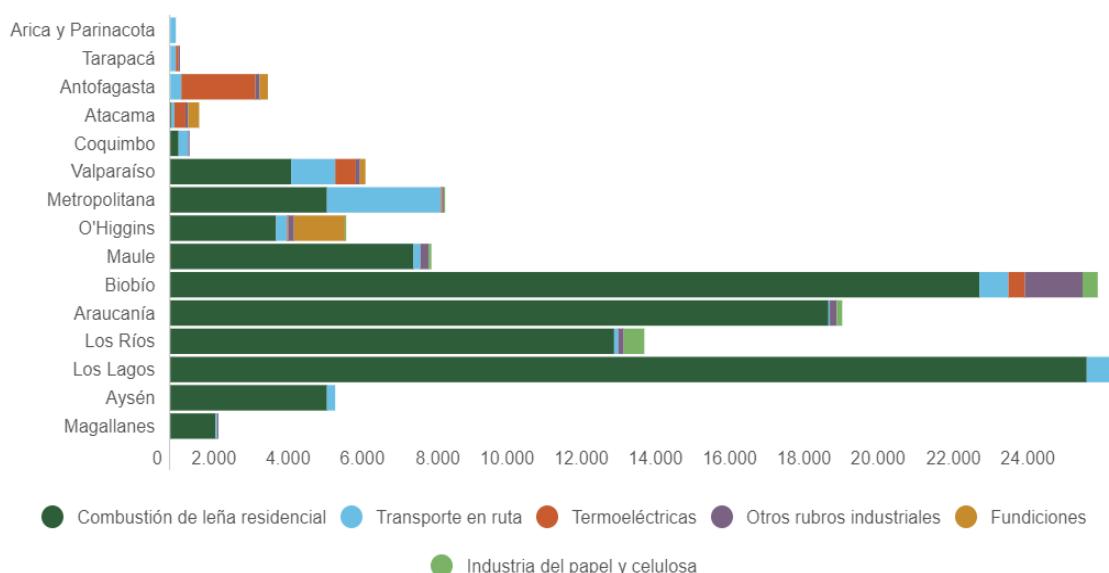


Figura 10. Emisiones de material particulado fino (MP2,5) por región y tipo de fuente (SINIA 2019).

Debido a lo anteriormente señalado, es que en varias comunas del país se han tenido que tomar medidas específicas de descontaminación ambiental y calidad del aire, referidas principalmente al control de la quema de madera residencial y mejoras en la envolvente térmica de viviendas y edificaciones (Gobierno de Chile 2020). Dentro de las medidas tomadas, el gobierno impulsa la Estrategia de Planes de Descontaminación Atmosférica 2014-2018. Para ello, si una zona es declarada como latente (contaminantes en concentraciones entre el 80% y 100% del valor de la norma) o saturada (concentraciones de contaminantes sobrepasan el valor de las normas) se deben crear Planes de Prevención Atmosférica (PPA) o planes de Descontaminación Atmosférica (PDA)

respectivamente (CONAMA 2006). Algunas de los PDA y PPA vigentes en Chile son (UCHile 2019) (Schonsteiner y Hervé 2019):

1. 1993 D.S. N° 252 de MINMinería Complejo Industrial Ventanas.
2. 1993 D.S. N° 132 de MINMinería Fundición Chuquicamata.
3. 1995 D.S. N°180 de MINSEGPRES Fundición Hernán Videla Lira.
4. 1998 D.S. N°164 de MINSEGPRES María Elena y Pedro de Valdivia (actualizado por D.S. N°37/2004).
5. 1998 D.S. N°81 de MINSEGPRES Fundición de Caletones.
6. 1998 D.S. N°164 de MINSEGPRES Fundición de Potrerillos.
7. 1998 D.S. N°16 de MINSEGPRES Región Metropolitana (actualizado por D.S. N°26/2017).
8. 2010 D.S. N°81 de MINSEGPRES Tocopilla.
9. 2013 D.S. N°15 de MMA Rancagua y 17 comunas del valle central de la VI Región.
10. 2014 D.S. N°59 de MMA Andacollo.
11. 2015 D.S. N°8 de MMA Temuco y Padre Las Casas.
12. 2016 D.S. N°18 de MMA Chillán y Chillán Viejo.
13. 2016 D.S. N°46 de MMA Coyhaique MP10.
14. 2016 D.S. N°47 de MMA Osorno.
15. 2016 D.S. N°49 de MMA Talca y Maule.
16. 2017 D.S. N°4 de MMA Los Ángeles.
17. 2017 D.S. N°25 de MMA Valdivia.
18. 2017 D.S. N°25 de MMA Huasco (Plan de prevención).
19. 2018 D.S. N°105 de MMA Comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví.
20. 2019 D.S. N°6 de MMA Comunas de Concepción Metropolitano.

Cabe señalar, que estos planes además de controlar el uso y calidad de la leña y artefactos, controlar las emisiones de fuentes fijas y móviles y brindar educación ambiental, también incorporan criterios para el mejoramiento de la eficiencia térmica de las viviendas, con rangos más exigentes que los declarados en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcción (OGUC) (CONAMA 2006).

2.2. Concepto de ACV y su relación con la ecoeficiencia.

El ciclo de vida, según lo describe la ISO 14040:2006 (Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia) se define como: “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final” (ISO 14040 2006b).

Esta norma, entrega el procedimiento para el análisis de ciclo de vida (ACV) o Life Cycle Assessment (LCA), donde se señala que se deben determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, realizando un inventario de las entradas (flujo de producto, de materia o de energía que entra en un proceso unitario) y las salidas (flujo de producto, de materia o de energía que sale de un proceso unitario) relevantes del sistema, donde se evalúan los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, y se interpretan los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (ISO 14040 2006b) (Tierri, Comerón y Pece 2014).

Por lo tanto, si se considera al edificio como un producto con entradas y salidas, de acuerdo a lo que señala (Zabalza 2012), este debe analizarse durante su ciclo de vida completo (desde la extracción y fabricación de materias primas, hasta las etapas de uso y mantenimiento y su rehabilitación o fin de vida), al momento de realizar en análisis de consumo energético (**Figura 11**).



Figura 11. Ciclo de vida de un producto (Zabalza; Aranda; Scarpellini 2012)

De este modo, el concepto de ACV y ecoeficiencia, encuentran su relación a través de la UNE-EN 15978:2012. Esta norma, está basada en el ACV y permite evaluar el comportamiento ambiental de un edificio a través de indicadores de ecoeficiencia, que describen el impacto ambiental y el impacto del uso de recursos, como lo son por ejemplo el Potencial de Calentamiento Global [Kg CO₂eq] y el Uso de la Energía [MJ] (UNE-EN 2012).

Actualmente, existen varios instrumentos que permiten realizar el cálculo de emisiones de CO₂ y de energía contenida que generan los edificios (González Vallejo 2018). A nivel de proyecto se tienen, por ejemplo:

- LEED (Leadership in Energy & Environmental Design) que corresponde a un sistema de certificación de edificios sostenibles, desarrollado por el Consejo de la Construcción Verde de Estados Unidos (Green Building Council 2020);
- BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology), correspondiente a un método de evaluación y certificación de la sostenibilidad de la edificación (BREEAM 2020) y
- VERDE que es una metodología para la evaluación y certificación ecológica de edificio (GBCE 2020), entre otras.

Mientras que a nivel de recursos se encuentran las herramientas:

- Simapro, software de análisis de ciclo de vida para la sostenibilidad (SimaPro 2020).
- La base de datos de costos española BEDEC (que integra al software Simapro ACV) (ITEC 2020) y,
- ÁBACO-CHILE (Acceso Base Ambientales y Costos) que entrega cálculo de emisiones de CO₂ y energía contenida (ÁBACO-CHILE 2020)

2.2.1. ÁBACO-CHILE como banco de datos ambientales y económicos.

ÁBACO CHILE es una plataforma web de gestión digital, pública, escalable y de libre acceso, en base a un banco de costos e indicadores medioambientales orientado a hacer más eficiente el proceso de postulación, evaluación y seguimiento de proyectos de construcción pública y privada en Chile, desde el punto de vista económico, social y ambiental. Corresponde al primer banco de datos paramétrico con integración de indicadores de eco-eficiencia (costos y sustentabilidad) para

proyectos de construcción en Chile y considera bases de datos dinámicas con clasificación de recursos y actividades, campos para describir especificaciones técnicas y enlazar objetos BIM, parámetros ambientales y costo social, para dimensionar el impacto ambiental desde el diseño a la etapa constructiva de una edificación (ÁBACO-CHILE 2020).

Esta plataforma, permite obtener los costos económicos en base a la clasificación de recursos y actividades, que constituyen un proyecto de construcción, así como también, la energía contenida (EC) y las emisiones de CO₂ (Huella de Carbono) de los materiales que componen un proyecto de construcción, en base a los criterios de la cuna a la puerta. Es así que las cargas ambientales son consideradas solo para los recursos materiales, considerando el transporte de estos con un valor promedio de 20 km de distancia de recorrido entregado en la ciudad de Santiago.

2.3. Envoltentes térmicas.

Las envoltentes, son consideradas la piel de los edificios (Baixas 2012). Corresponden a una serie de elementos constructivos a través de los cuales se produce el flujo térmico entre el ambiente interior y el ambiente exterior del edificio (MINVU 2006), y está constituida por muros perimetrales, complejos de techumbres y pisos, y en general, cualquier otro elemento que separe ambientes de temperaturas distintas (INN 2007). La principal función que otorgan, es evitar pérdidas energéticas, procurando un mínimo consumo e impacto ambiental (Lecuona Neumann, Izquierdo Millán y Rodríguez Aumente 2005). Por lo tanto, juegan un rol fundamental al momento de adquirir edificaciones sustentables (Schiller y Evans 2005).

Partiendo de la concepción de que las edificaciones, tienen como objetivo generar un ambiente sano y cómodo para el desarrollo de la actividad humana al interior de ellas, un buen diseño y utilización de materiales apropiados, deben generar las condiciones propicias para que esto ocurra (del Rosario Argúello Méndez y Burgos 2008). En este sentido, el análisis del entorno en el cual será emplazará una edificación (clima, uso que se le dará, geografía, edificios aledaños, entre otros), es fundamental al momento de diseñar y analizar el comportamiento de las envoltentes frente a ello (Bustamante 2009).

Se considera que el primer principio de diseño de envoltentes, es la aislación térmica de estas, a través de la incorporación de un material aislante apropiado (CITECUBB 2012). Una buena elección

de este último, permite obtener condiciones de confort térmico, condiciones básicas de habitabilidad, y también implican reducir fuertemente el consumo de energía y mitigar las emisiones de CO₂ al ambiente (Hernandez 2017).

2.3.1. Acondicionamiento térmico.

El acondicionamiento térmico de una vivienda, corresponde a un elemento clave al momento de evaluar la eficiencia energética de las edificaciones; y depende fundamentalmente de la aislación térmica de las envolventes (Arballo, Kuchen y Chuk 2019).

La aislación térmica se define cómo: *“capacidad de oposición al paso de calor de un material o conjunto de materiales, y que en construcción se refiere esencialmente al intercambio de energía calórica entre el ambiente interior y el exterior”* (MINVU 2006).

La oposición al paso del calor de un material, está determinada por la Conductividad Térmica (λ) de este, la cual se define cómo: *“Cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Se expresa en $W/(m \times K)$ ”* (INN 2007). Mientras menor sea la conductividad de un material, este se considera cómo un buen aislante. La conductividad térmica de algunos materiales utilizados en el sector construcción se encuentran en la **Tabla A.1** de la Norma Chilena 853 del 2007.

Del mismo modo, la oposición al paso del calor de un conjunto de materiales que componen una solución constructiva, está determinada por su Resistencia Térmica (R_t) y Transmitancia Térmica (U). La primera se define como *“Oposición al paso del calor que presentan los elementos de construcción, y se expresa en $m^2 \times K/W$ ”* (INN 2007), y la segunda, como el *“Flujo de calor que pasa por unidad de superficie del elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Corresponde al inverso de la resistencia térmica total RT de un elemento y se expresa en W/m^2K ”* (INN 2007). En ambos casos, el cálculo se señala en la norma NCh 853 del 2007.

Cabe señalar, que mientras menor sea la transmitancia térmica de un elemento constructivo, la edificación tendrá mejor comportamiento térmico desde el punto de vista de demanda de calefacción (Bustamante 2009).

2.4. Reglamentación térmica.

La Reglamentación Térmica, está vigente en Chile desde el año 2000 luego de la incorporación del Artículo 4.1.10. a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC). En este artículo, se definen las exigencias de acondicionamiento térmico, respecto a los límites de transmitancia térmica máxima (o resistencia térmica total mínima) para los diferentes elementos que componen una envolvente. Desde el complejo de techumbre hasta los pisos ventilados (Bustamante 2009). Esta reglamentación es aplicable sólo a las nuevas construcciones realizadas.

Con el paso de los años, también se han desarrollado otras reglamentaciones con exigencias superiores a las definidas en la OGUC de transmitancia térmica, sin embargo, las de la OGUC siguen siendo la base de aplicación. Una de ellas es la de la NCh 1079 of 2008. "*Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico*", cuya aplicación se llevó a cabo, en el documento denominado "Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas" (ECSV), desarrollado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Los ECSV, son de aplicación voluntaria y se distribuyen en 6 tomos (Tomo I Salud y bienestar, Tomo II Energía, Tomo III Agua, Tomo IV Materiales y Residuos, Tomo V Impacto ambiental y Tomo VI entorno inmediato), desarrollaron a partir de la Estrategia Nacional de Construcción Sustentable (ENCS) publicada el año 2013 (MINVU 2018a) (MINVU 2018e) (MINVU 2018b) (MINVU 2018c) (MINVU 2018d)(MINVU 2019).

2.4.1. Ordenanza general de urbanismo y construcción (OGUC).

Según el artículo 4.1.10 de la O.G.U.C., Chile está clasificado en 7 zonas térmicas de acuerdo a los requerimientos de calefacción, y se basa en el concepto de grados día de calefacción. Esta clasificación incluye a todas las regiones de Chile, según se indica en la **Tabla 3**. Se define el término grados día como: "*un período de un día, es la diferencia entre la temperatura fijada como "base", y la media diaria de las temperaturas bajo la temperatura de base, igualando a la "base" aquellas*

superiores a ésta. Dependiendo del período de tiempo utilizado, se puede hablar de grados/día, grados/hora, grados/año, etc.” (MINVU 2006)

Tabla 3: Zonas térmicas por región. Elaboración propia con datos de (CDT y CChC 2015).

Zona térmica	Región
Zona 1	Región de Arica y Parinacota.
	Región de Tarapacá.
	Región de Antofagasta.
	Región de Atacama.
Zona 2	Región de Coquimbo.
	Región de Valparaíso.
Zona 3	Región Metropolitana de Santiago.
	Región del Libertador General Bernardo O’Higgins.
Zona 4	Región del Maule.
	Región del Ñuble.
	Región del Biobío.
Zona 5	Región de La Araucanía.
	Región de Los Ríos.
Zona 6	Región de Los Lagos.
Zona 7	Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.
	Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

Cabe señalar, que según la zona en la cual se construirá, los elementos que constituyen la envolvente de las viviendas, estos deben cumplir con ciertos requisitos (MINVU 2006):

- Tener una transmitancia térmica “U” igual o menor, o una resistencia térmica total “Rt” igual o superior, a la señalada para la zona que le corresponda al proyecto de arquitectura (MINVU 2006)
- Al momento de incluir un material aislante, este debe cumplir con el etiquetado R100 mínimo (valor equivalente a la resistencia térmica (m^2K/W) x 100).
- El porcentaje máximo de superficie de ventanas respecto a paramentos verticales de la envolvente, en relación al tipo de vidrio que se especifique y a la zona térmica en la cual se emplace el proyecto de arquitectura.

Cabe señalar, que el 2008, fue publicada la NCh 1078 "Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico". Esta, a diferencia de la OGUC, establece requisitos de transmitancia térmica según la Zonificación Climática, dividiendo a Chile en 9 zonas, las que se basan en las características del clima; temperatura,

humedad, continentalidad, etc: 1. Norte Litoral (NL); 2. Norte Desértica (ND); 3. Norte Valles Transversales (NVT); 4. Central Litoral (CL); 5. Central Interior (CI); 6. Sur Litoral (SL); 7. Sur Interior (SI); 8. Sur Extremo (SE); 9. Andina (An) (CITECUBB 2012; INN 2008).

Junto a esta nueva clasificación, también entrega nuevas exigencias de transmitancia térmica para las viviendas, dependiendo se la zona en la cual se encuentran. Sin embargo, toda esta reglamentación sólo es empleada en los Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas” (ECSV) del Ministerio de Vivienda y Urbanismos (primer referente en Chile de estándares de Construcción Sustentable para Viviendas), cuya aplicación es voluntaria y las empresas constructoras se siguen guiando por las exigencias establecidas en la OGUC.

Finalmente, los ECSV pasan a ser una guía “voluntaria” de buenas prácticas para mejorar el desempeño ambiental de las viviendas nuevas o usadas, desde la etapa de diseño hasta la de operación, utilizando criterios objetivos y verificables. La primera versión fue lanzada el 2014, y desarrollada en conjunto con Building Research Establishment (BRE), organización británica que se dedica a la consultoría en el sector edificación a nivel global (MINVU 2018a).

2.4.1.1. Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU.

En el año 2011 se aprueba el listado de soluciones constructivas de Acondicionamiento térmico del Ministerio de Vivienda y Urbanismo, en virtud de lo señalado en el Artículo 4.1.10 de la OGUC. Este listado entrega soluciones de acondicionamiento térmico para soluciones de techumbre, muros y pisos ventilados, diferenciando el espesor de los materiales, según cada zona térmica definida en la OGUC. La actualización más vigente es la publicada el 2014. Esta información es pública, y difunde los valores normativos de las soluciones constructivas ensayadas y/o calculadas por profesionales o instituciones competentes, donde todos los materiales fueron ensayado en estado seco y a 20°C de temperatura ambiente (MINVU 2014)

2.4.2. Plan de Descontaminación Atmosférica por MP2,5, para las comunas de Temuco y Padre las Casas.

Debido a las altas concentraciones de material particulado en las comunas de Temuco y Padre las Casas, el año 2010 entró en vigencia el Plan de Descontaminación Atmosférica para MP10. Sin embargo, el 2015 al declararse como zonas saturadas por material particulado MP2,5, se dio inicio a la elaboración del PDA para este material que incluye medidas más exigentes que el anterior. Cabe señalar que: *“Las comunas de Temuco y Padre Las Casas poseen actualmente, una red con 3 estaciones de monitoreo, de distintas fechas de instalación y puesta en marcha, contándose con data de MP10 a partir del año 2001 y para el caso del MP2,5 se cuenta con información continua desde el año 2008 en adelante”*.

El objetivo del PDA por MP2,5, es dar cumplimiento a la norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10 y a la norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable fino MP2,5, en un plazo de 10 años (MMA 2015), cuyas medidas de control tomadas por este plan tienen relación con:

1. Regulación referida al uso y mejoramiento de la calidad de la leña utilizada para calefacción domiciliaria (leña seca).

En este ítem, existe la obligatoriedad a que todo comerciante de leña que realice la actividad en la zona saturada, debe inscribirse en un registro de carácter obligatorio que será administrado por el Municipio, e informar al público la conversión y equivalencia en precio y energía calórica entregada de las unidades de comercialización de leña más utilizadas a través de la instalación de las tablas de Conversión de Energía de la Leña. Además, de la prohibición del uso de leña en calefactores, salamandras, calefactor de cámara simple y hechizo, o cocinas, que no cumpla los requerimientos técnicos de la Norma NCh2907, de acuerdo a la especificación de "leña seca" (contenido de humedad menor o igual a 25% en base seca).

2. Regulación referida al uso y mejoramiento de la calidad de los artefactos.

Esta medida, adopta la prohibición en la zona saturada a utilizar chimeneas de hogar abierto y quemar en los calefactores, carbón mineral, maderas impregnadas, residuos o cualquier elemento

distinto a la leña, briquetas o pellets de madera. Además de la prohibición de uso de calefactores a leña del tipo hechizas, salamandras o cámara simple. Para lograr esto, se lanzará el Programa “Recambio de Calefactores a Leña” del Ministerio de Medio Ambiente entre los años 2014 y 2017, de postulación voluntaria, cuyo principal objetivo, será el recambio de calefactores y cocinas a leña, por equipos de calefacción más eficientes y de menores emisiones de partículas.

El programa contemplará un recambio de al menos 27.000 calefactores y/o cocinas a leña en la zona saturada, en un plazo de 5 años. Al menos 12.000 recambios serán por sistemas de calefacción que utilicen un combustible distinto a la leña.

3. Regulación referida al mejoramiento de la eficiencia térmica de la vivienda.

Esta medida incluye a las viviendas existentes con subsidio de acondicionamiento térmico, otorgado por la Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo de la Región de La Araucanía, y a viviendas nuevas, las que desde el 2018 en adelante deberán cumplir con lo siguiente:

- Se incluyen nuevas exigencias de transmitancia térmica máxima de la envolvente térmica para viviendas.
- Exigencia de los materiales de aislante térmico adosados a elementos de techumbre, muro o piso ventilado con mínimo R100. El valor R100, corresponde a la resistencia térmica del material aislante térmico multiplicada por 100. Se expresa en $[(m^2K) /W] \times 100$. La resistencia térmica del material aislante térmico corresponde al espesor del material (medido en metros) dividido por su conductividad térmica (medida en $[W/(m^2K)]$) (MMA 2015).
- Disminución del riesgo de condensación superficial e intersticial, de las soluciones constructivas elegidas del Listado Oficial de Soluciones Constructivas del MINVU. Esto, debe ser acreditado por el proyectista para la obtención del permiso de edificación.
- Deberán cumplir con la clase de infiltración de aire a 50Pa (ach), valor 7 (sellos de puertas, ventanas, canalizaciones y perforaciones de instalaciones). Mientras que las puertas y ventanas deberán cumplir con el grado de estanqueidad al viento 100 Pa ($m^3/h m^2$), valor del estándar 10.

- Deberán contar con un sistema de ventilación que garantice la calidad del aire interior, acreditado por el proyectista para la obtención del permiso de edificación, según lo establecido en las Normas NCh3308 y NCh3309, según corresponda (sistema mecánico o natural al menos en baño y cocina).
- Control de ganancias solares y aislamiento térmico de sobrecimientos, a través de vanos translúcidos o transparentes y exigencias de aislación térmica de sobrecimiento, para pisos en contacto con el terreno natural.

Junto a lo anteriormente señalado, el Ministerio del Medio Ambiente también mantiene de manera permanente un sistema de seguimiento de la calidad del aire para material particulado, que considera el monitoreo de MP10 y MP2,5.

2.4.3. Análisis comparativo de exigencias térmicas entre la OGUC y el PDA de Temuco y Padre las Casas.

Para realizar una comparación entre ambas reglamentaciones, en primer lugar, se debió establecer la zona térmica a la cual pertenece Temuco y Padre las Casas según la OGUC (Zona térmica 5). Por lo tanto, según lo presentado en el capítulo 2, ítem 2.4, las diferencias que existen entre ambas reglamentaciones, están dadas por las exigencias de los elementos que constituyen la envolvente de las viviendas, respecto al valor de transmitancia térmica máxima permitida (**Tabla 4**).

Tabla 4: Diferencias de transmitancia térmica máxima entre la OGUC y el PDA de Temuco y Padre las Casas. Elaboración propia.

Sistema envolvente	Transmitancia térmica [W/m ² K]	
	OGUC (Zona térmica 5)	PDA Temuco y Padre Las Casas
Techumbre	0,330	0,280
Muro	1,600	0,450
Piso ventilado	0,500	0,500
Ventana	Depende del porcentaje máximo de superficie de ventanas en paramentos verticales de la envolvente y del tipo de vidrio (monolítico o DVH)	3,600
Puerta	No aplica	1,700

De acuerdo a esta **Tabla**, el PDA resulta ser un 15% más exigente en el sistema envolvente techumbre y un 72% más exigente en muros. Además, que, a diferencia de la OGUC, establece un valor exacto de transmitancia térmica para todas las ventanas y puertas que se consideren en el diseño.

Del mismo modo, ambas reglamentaciones declaran que, al momento de elegir el material aislante para el sistema envolvente, este debe cumplir con un R100 mínimo, rotulado según la norma técnica NCh 2251 of 2010. En este caso, se evidencian diferencias significativas entre lo que exige el PDA frente a la OGUC, las cuales se muestran en la **Tabla 5**, a continuación:

Tabla 5: Diferencias R100 mínimo entre la OGUC y el PDA de Temuco y Padre las Casas. Elaboración propia.

Sistema envolvente	R100 mínimo [$m^2K/W \times 100$]	
	OGUC	PDA Temuco y Padre Las Casas
Techumbre	282	357
Muro	50	222
Piso ventilado	183	200

De la **Tabla** anterior se puede evidenciar que el PDA es un 27% más exigente que la OGUC respecto a la envolvente techumbre, en más de un 300% en muros y un 9% para los pisos ventilados.

Capítulo 3: Presentación del caso estudio.

En el presente capítulo se detallará el caso estudio a evaluar; clarificando usos y materialidades, con lo cual se busca establecer la línea base con la que se evaluarán los indicadores de ecoeficiencia.

La selección del caso de estudio, consideró someter a comparación un mismo modelo de vivienda evaluada para dos casos diferentes. El primero, a partir del diseño de envoltente con las exigencias de la OGUC, y el segundo con el diseño de envoltentes según exigencias del PDA de Temuco y Padre las Casas.

3.1. Selección de la tipología de vivienda a analizar.

Para desarrollar este apartado, se realiza un estudio respecto a los indicadores que existen sobre las diferentes superficies y materialidades de mayor uso en Chile y en la región de la Araucanía. Esto permitirá obtener una primera aproximación respecto a las envoltentes térmicas que se deben seleccionar más adelante del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU.

Determinación de la superficie.

Según datos del Observatorio Urbano del MINVU, más del 40% de las casas que han sido ingresadas a la dirección de obras municipales, tienen una superficie de edificación de entre 51 a 70 m², tanto a nivel nacional como en la región de la Araucanía (desde el 2002 a junio del 2020) (**Figura 12**).

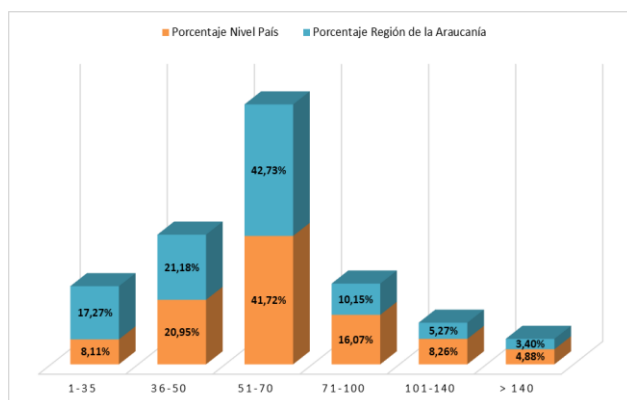


Figura 12. Porcentaje de casas por superficie construida. Obra nueva y regularización de obra nueva desde 2002 – 2020. Elaboración Propia con datos de (MINVU 2020).

Del porcentaje anterior, de acuerdo a su sistema de agrupamiento (aislado, pareado o continuo), un 61% de las casas ingresadas a nivel país, son de tipo aisladas, un 35% pareadas y un 4% de estructuras continuas (MINVU 2020).

Determinación de la Materialidad.

Según datos del Censo Chile del 2017 (INE 2018), a nivel nacional, la materialidad de envolvente de muros con mayor uso en Chile corresponde a la albañilería con un 44,4%, (bloques de ladrillo de arcilla cocido, hecho a mano o en máquina, bloques de cemento, piedra canteada o rústica, entre otros), seguido por la tabiquería forrada por ambas caras con un 23,7% (muro delgado, con estructura soportante en el interior la que puede ser de madera o perfiles metálicos, revestido interior/exteriormente con planchas de madera o entablado, planchas de yeso cartón, fibrocemento, plástico, siding, lata o zinc, entre otros), y un 22,4% a hormigón armado (formado en base a cemento, arena y agua, con una estructura de acero interior).

En la región de la Araucanía, la materialidad predominante en muros con un 60,4% es de tabiquería forrada por ambas caras, seguido por un 15,6% de albañilería, y un 12,9% de tabiquería sin forro interior (muro delgado con una estructura soportante de madera o perfiles metálicos, revestido exteriormente con planchas o tablas de madera, planchas de fibrocemento, lata o zinc, e interiormente muestra en toda su magnitud la estructura del tabique) (INE 2018).

Mientras que, a nivel nacional y en la región de la Araucanía lo que predomina en la construcción de pisos y techos, son el parquet, piso flotante, cerámico, madera, alfombra, flexit, cubrepiso u otro similar y, las planchas metálicas de zinc, cobre, etc. o fibrocemento (tipo pizarreño), respectivamente.

Cabe señalar, que los antecedentes mencionados se pueden visualizar en la **Figura 13**.

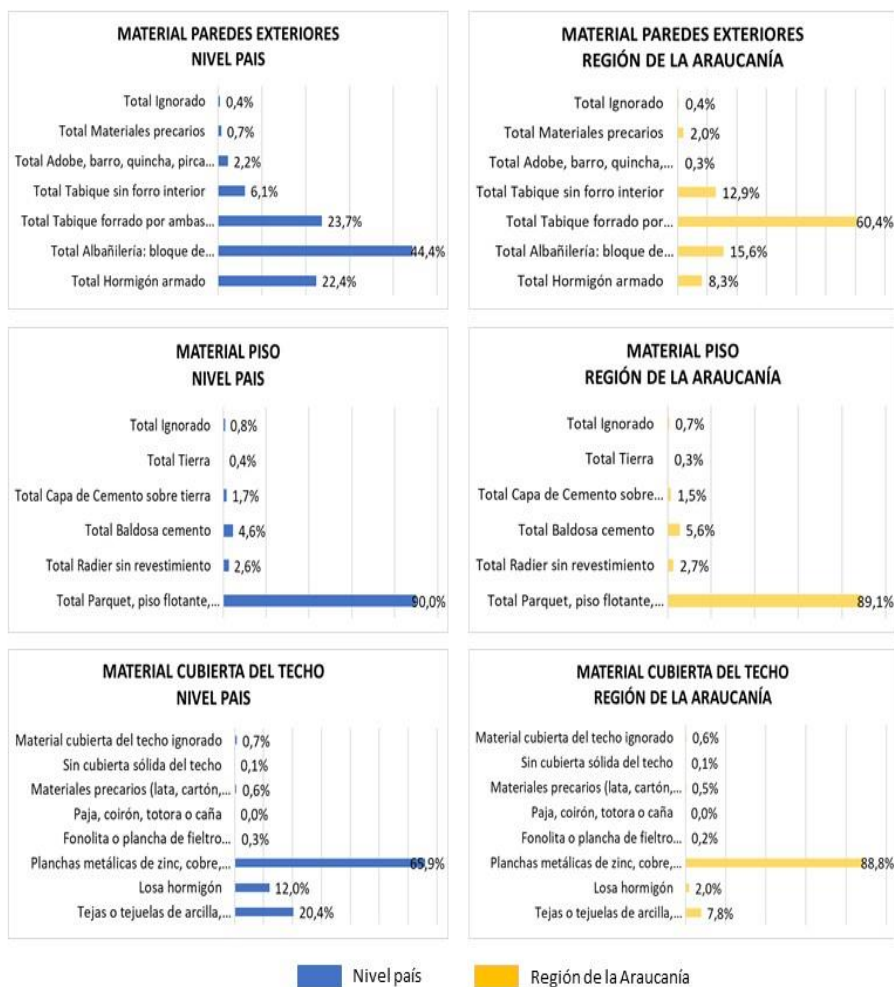


Figura 13. Viviendas particulares ocupadas con moradores presentes a nivel país y en la región de la Araucanía, por material predominante. Elaboración propia con datos del (INE 2018).

Finalmente, con cada uno de los datos mencionados en este apartado, se puede concluir que la vivienda seleccionada en esta investigación, debe estar en el rango de superficie entre los 50 y 70 m², con un sistema de agrupamiento de casa aislada. La materialidad, debe mantener la condición predominante a nivel nacional (albañilería) y la materialidad predominante en la región de la Araucanía (tabiquería forrada por ambas caras), para que sea representativa.

Respecto a la materialidad de la techumbre y piso, el caso estudio incluirá la predominancia a nivel nacional y regional, con planchas metálicas de zinc; y hormigón revestido con cerámico.

3.2. Descripción del modelo de vivienda a analizar.

Según lo que se indicó en el apartado 3.1, el caso estudio es un modelo de vivienda representativa de las comunas de Temuco y Padre las Casas. En términos generales, corresponde a una casa aislada de 67,9 m², de dos plantas y con piso en contacto con el terreno. La materialidad de la envolvente de la primera planta, es de albañilería reforzada (materialidad que predomina a nivel nacional) y la de la segunda, corresponde a una estructura de acero liviano galvanizado (materialidad que predomina en la región de la Araucanía) (ver **Figura 14**).

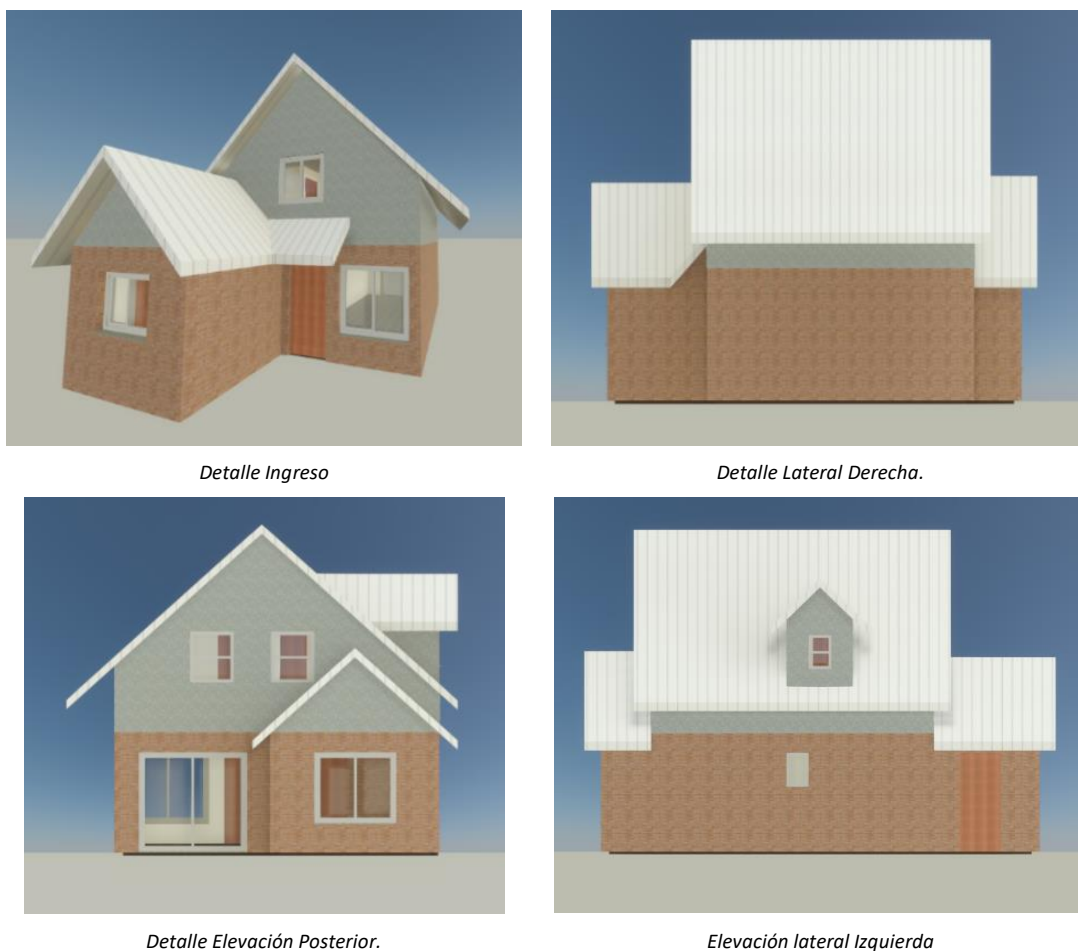


Figura 14. Presentación del diseño del caso estudio.

La superficie de cada una de las envolventes térmicas a considerar (techumbre, muros perimetrales, ventanas, puertas y piso en contacto con el terreno), son las que se indican en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Superficie de envolventes térmicas del caso estudio.

Envolvente	Superficie [m²]
Solución envolvente de techumbre	86,36
Solución envolvente de muro 1° piso	66,34
Solución envolvente de muro 2° piso	47,54
Solución envolvente de ventana	14,20
Solución envolvente de puertas	3,53
Solución envolvente de piso en contacto con el terreno	37,40

3.3. Selección de envolventes desde el Listado Oficial de Soluciones Constructivas del MINVU.

Desde el Listado Oficial de Soluciones Constructivas del MINVU, se seleccionarán las envolventes térmicas de la **Tabla 6**, para los requerimientos de transmitancia térmica descritos en la OGUC para la zona térmica 5 descritas en la **Tabla 4**. Posteriormente, las mismas envolventes, serán modificadas para alcanzar las exigencias térmicas del PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas.

A modo de diferenciación, ambas reglamentaciones se señalarán como:

- **CASO 1:** Envolventes térmicas con las exigencias de acondicionamiento térmico del artículo 4.1.10 de la OGUC para la zona térmica 5.
- **CASO 2:** Envolventes térmicas con las exigencias de acondicionamiento térmico del PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas.

Cabe señalar, que aquellos datos de transmitancia térmica que no estén explícitos en el “listado”, serán determinadas a partir del método de cálculo que indica la Tabla 2 de la Norma Chilena NCh 853 del 2007, titulada “Acondicionamiento térmico – Envolvente térmica de edificios – Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas”(INN 2007).

3.3.1. Selección de envolventes térmicas para la techumbre.

Para la solución de techo, desde el Listado de Soluciones Constructivas del MINVU, se considera una cubierta a dos aguas con cielo inclinado, y se selecciona la envolvente térmica 1.1.M.C3.5 PANEL TechoPol POLIESTIRENO EXPANDIDO DE DENSIDAD 20kg/m³ (ver **Tabla 7**). En el Listado, esta

envolvente no describe explícitamente el valor de transmitancia térmica, por lo que se debió realizar el cálculo de forma manual, según indica la NCh 853 of 2007 para ambos casos de estudio.

Para lo anterior, se determinaron las resistencias térmicas de superficie, con flujo descendente en elementos horizontales o con pendiente menor o igual que 60° respecto a la horizontal, para un elemento de separación con el espacio exterior. La situación del elemento es de separación con espacio exterior o local abierto (INN 2007) .

Tabla 7. Selección de envolventes térmicas para la techumbre.

Envolvente térmica	Caso 1 - OGUC	Caso 2 - PDA
Techumbre	1.1.M.C3.5 PANEL TechoPol POLIESTIRENO EXPANDIDO DE DENSIDAD 20kg/m ³	
Descripción	Sistema constructivo de techo, integrado en un panel que cumple las funciones de aislamiento térmico, cielo interior y cubierta exterior. Está compuesto por dos caras de acero (densidad 7.850kg/m ³ , conductividad térmica 58W/mK) adheridas de forma continua al núcleo aislante de poliestireno expandido de 20kg/m³, de espesor 125 mm para la zona térmica 5 (conductividad 0,0384 W/mK)	Sistema constructivo de techo, integrado en un panel que cumple las funciones de aislamiento térmico, cielo interior y cubierta exterior. Está compuesto por dos caras de acero (densidad 7.850kg/m ³ , conductividad térmica 58W/mK) adheridas de forma continua al núcleo aislante de poliestireno expandido de 20kg/m³, de espesor 150 mm (conductividad 0,0384 W/mK).
Transmitancia térmica envolvente [W/m² x K]	0,288	0,242 (cálculo de transmitancia térmica según NCh 853)
Transmitancia térmica según la exigencia de la reglamentación térmica [W/m² x K]	0,330	0,280

A continuación, en la **Figura 15** se puede visualizar el detalle constructivo de la techumbre para ambos casos de estudio. A la izquierda, el detalle del caso 1, y a la derecha el detalle del caso 2.

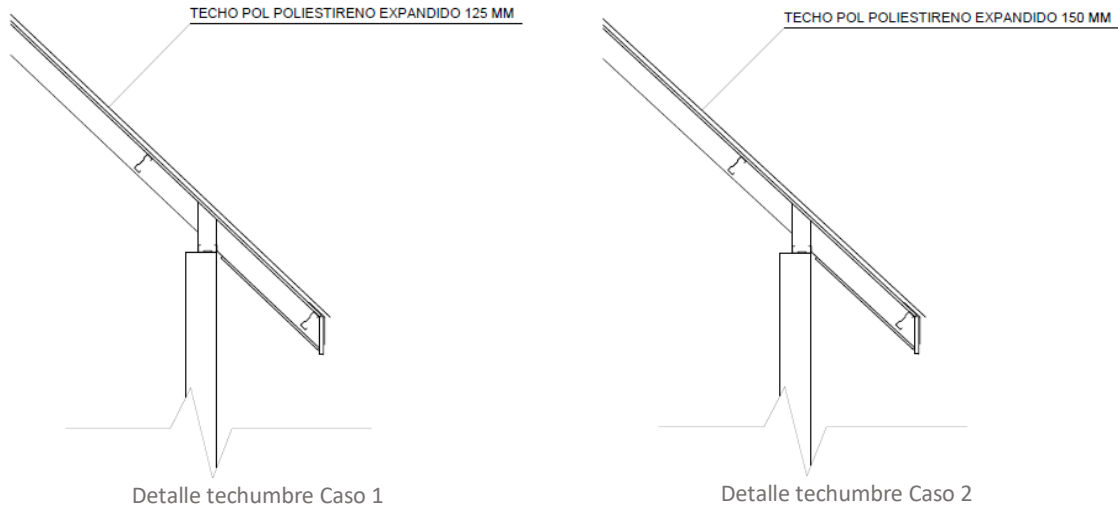


Figura 15. Detalles constructivos de la envolvente térmica del techo para ambos casos de estudio.

3.3.2. Selección de envolventes térmicas para los muros del 1° piso.

En el caso de las envolventes térmicas para los muros de 1° piso, se selecciona una envolvente del Listado de Soluciones Constructivas del MINVU, cuya materialidad predominante a nivel país es la albañilería, según se indicó en el apartado 3.1.

La envolvente seleccionada corresponde a la 1.2.M.B2.2 MURO DE ALBAÑILERÍA DE LADRILLO (29 X14 X 7.1CM DE ESPESOR) CON PLACA POLIGYP RH ADHERIDA, cuya transmitancia térmica para el caso 1, está explícita en el Listado (ver **Tabla 8**). El cálculo de transmitancia térmica para el caso 2, se realizó de forma manual según indica la NCh 853, considerando un flujo horizontal en elementos verticales o con pendiente mayor que 60° respecto a la horizontal. La situación del elemento es de separación con espacio exterior o local abierto (INN 2007).

Tabla 8. Selección de envolventes térmicas para los muros del 1° piso.

Envolvente térmica	Caso 1 - OGUC	Caso 2 - PDA
Muros perimetrales del 1° piso	1.2.M.B2.2 MURO DE ALBAÑILERÍA DE LADRILLO (29 X14 X 7.1CM DE ESPESOR) CON PLACA POLIGYP RH ADHERIDA.	
Descripción	La solución está compuesta por un muro de albañilería de ladrillo titán de medidas 29 x14 x 7,1cm, al cual se le adhiere por el interior, Poligyp RH, adherido al muro con pegamento. El Poligyp RH, se compone de una placa de yeso – cartón de 10mm de espesor, la cual lleva adherida una placa de poliestireno expandido de densidad 15kg/m³ y espesor de 10 mm para la zona térmica 5.	La solución está compuesta por un muro de albañilería de ladrillo titán de medidas 29 x14 x 7,1cm, al cual se le adhiere por el interior, Poligyp RH, adherido al muro con pegamento. El Poligyp RH, se compone de una placa de yeso – cartón de 10mm de espesor, la cual lleva adherida una placa de poliestireno expandido de densidad 15kg/m³ de espesor 80 mm de espesor (conductividad 0,0413 W/mK).
Transmitancia térmica envolvente [W/m² x K]	1,250	0,418 (cálculo de transmitancia térmica según NCh 853)
Transmitancia térmica según la exigencia de la reglamentación térmica [W/m² x K]	1,600	0,450

A continuación, en la **Figura 16** se puede visualizar el detalle constructivo de los muros del 1° piso para ambos casos de estudio. A la izquierda, el detalle del caso 1, y a la derecha el detalle del caso 2.

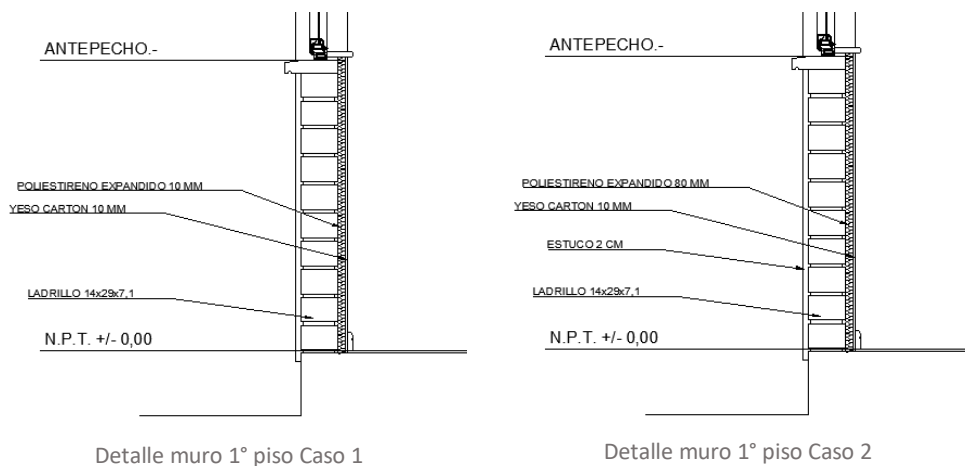


Figura 16. Detalles constructivos de la envolvente térmica del muro del 1° piso para ambos casos de estudio.

En los muros perimetrales de 1° piso, así como también en la techumbre, el caso 2 presenta una mejora en la transmitancia térmica respecto al caso 1, debido a un aumento en el espesor del poliestireno expandido. En la techumbre, el poliestireno expandido de densidad 20 kg/m³ aumenta de 125 mm a uno de 150 mm de espesor; y en los muros perimetrales de 1° piso, el poliestireno expandido de densidad 15 kg/m³, aumenta de 10 mm a uno de 80 mm de espesor). El resto de los materiales que componen las envolventes, se mantienen sin modificaciones entre ambos casos.

3.3.3. Selección de envolventes térmicas para los muros del 2° piso.

La selección de envolventes para los muros del 2° piso, deben corresponder a una estructura liviana, según indicó en el apartado 3.1 de la materialidad predominante en la región de la Araucanía. Para ello, se selecciona desde el Listado de Soluciones Constructivas del MINVU, la envolvente 1.2.M.C26.5 MURO TABIQUE PERIMETRAL CON MONTANTES DE ACERO GALVANIZADO TIPO C DE 60X38X0,85MM, EXTERIOR FIBROCEMENTO DE 8MM, AISLANTE TÉRMICO LANA MINERAL DE 50MM, INTERIOR YESO CARTÓN DE 15MM. Esta envolvente, al igual que la descrita en los muros del 1° piso, trae incorporado el valor de transmitancia térmica para el caso 1, mientras que el valor del caso 2, se debió calcular manualmente (ver **Tabla 9**).

Tabla 9. Selección de envolventes térmicas para los muros del 2° piso.

Envolvente térmica	Caso 1 - OGUC	Caso 2 - PDA
Muros perimetrales del 2° piso	1.2.M.C26.5 MURO TABIQUE PERIMETRAL CON MONTANTES DE ACERO GALVANIZADO TIPO C DE 60X38X0,85MM, EXTERIOR FIBROCEMENTO DE 8MM, AISLANTE TÉRMICO LANA MINERAL DE 50MM, INTERIOR YESO CARTÓN DE 15MM.	
Descripción	<p>Muro tabique perimetral conformado por montantes de acero galvanizado tipo C de 60 x 38 x 0,85mm, distanciados entre ejes a máximo 40cm y de dos soleras (superior e inferior) 62 x 25 x 0,85mm.</p> <p><u>Cara interior:</u> Plancha de yeso cartón estándar de 15mm de espesor.</p> <p><u>Cara exterior:</u> Placa de fibrocemento de 8mm de espesor, terminada en sistema Direct Applied (malla de fibra de vidrio embebida en una capa de mortero acrílico/cemento adhesivo y endurecedor de superficies).</p> <p>El material aislante corresponde a una colchoneta de lana mineral de 50mm de espesor y densidad 40kg/m³, quedando 10mm de cámara de aire que en conjunto responden a la solicitud térmica.</p>	<p>Muro tabique perimetral conformado por montantes de acero galvanizado tipo C de 60 x 38 x 0,85mm, distanciados entre ejes a máximo 40cm y de dos soleras (superior e inferior) 62 x 25 x 0,85mm.</p> <p><u>Cara interior:</u> Plancha de yeso cartón de 15mm de espesor, la cual lleva adherida una placa de poliestireno expandido de densidad 15kg/m³ y espesor de 30 mm.</p> <p><u>Cara exterior:</u> Placa de fibrocemento de 10mm de espesor, terminada en sistema Direct Applied (malla de fibra de vidrio embebida en una capa de mortero acrílico/cemento adhesivo y endurecedor de superficies).</p> <p>El material aislante corresponde a un rollo de lana mineral de 60mm de espesor y densidad 40kg/m³.</p>
Transmitancia térmica envolvente [W/m² x K]	0,880	0,406 (cálculo de transmitancia térmica según NCh 853)
Transmitancia térmica según la exigencia de la reglamentación térmica [W/m² x K]	1,600	0,450

A continuación, en la **Figura 17** se puede visualizar el detalle constructivo de los muros del 2° piso para ambos casos de estudio. A la izquierda, el detalle del caso 1, y a la derecha el detalle del caso 2.

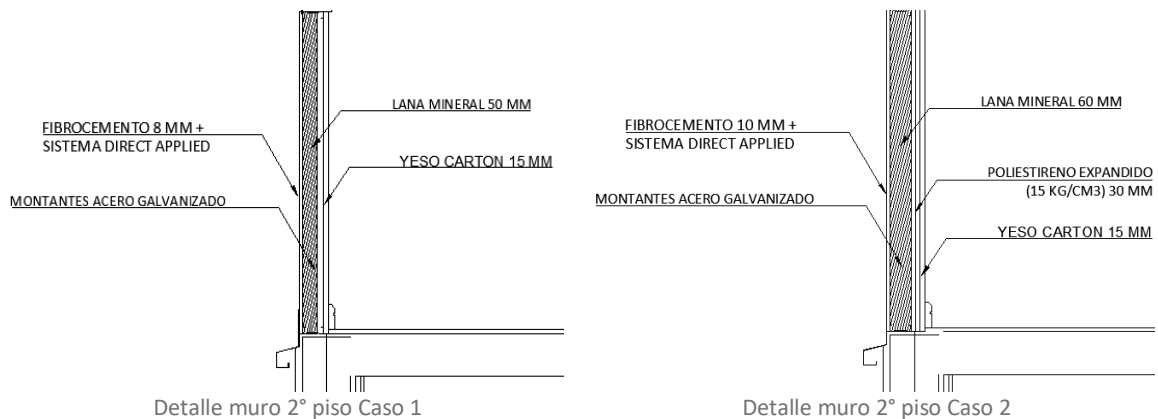


Figura 17. Detalles constructivos de la envolvente térmica del muro del 2° piso para ambos casos de estudio.

En los muros perimetrales del 2° piso, el caso 2 presenta una mejora de la transmitancia térmica respecto al caso 1, ya que se modifican los espesores de dos materiales que componen la solución constructiva (lana mineral y plancha de fibrocemento). En el caso de la lana mineral (densidad 40 kg/m^3), esta es utilizada como aislante térmico, aumentando su espesor de 50 mm en el caso 1, a una de 60 mm de espesor para el caso 2. Mientras que, la plancha de fibrocemento (utilizada como revestimiento exterior), aumenta su espesor de 8 mm en el caso 1, a uno de 10 mm de espesor para el caso 2. Adicionalmente, por la cara interior, también se incorpora una plancha de poliestireno expandido de 15 kg/m^3 de un espesor de 30 mm, y se disminuye el espesor de la plancha de yeso cartón de una de 15 mm a una de 10 mm. El resto de los materiales que componen la envolvente, se mantienen sin modificaciones entre ambos casos.

3.3.4. Selección de envolventes térmicas para las ventanas.

Respecto a las ventanas que se consideran, el Listado de Soluciones Constructivas del MINVU, no incorpora soluciones constructivas de este tipo, por lo que la selección de esta se tomó considerando el criterio de exigencia de transmitancia térmica del caso 2 (ver **Tabla 10**). Para el caso 1, según señala el Artículo 4.1.10, estas deben respetar el porcentaje máximo permitido para esta zona térmica (70% superficie vidriada de transmitancia térmica menor a $2,4 \text{ W/m}^2 \times \text{K}$).

Tabla 10. Selección de envolventes térmicas para las ventanas.

Envolvente térmica	Caso 1 - OGUC	Caso 2 - PDA
Ventanas	VENTANA CORREDERA DE PVC	
Descripción	Sistema Euro-Design Slide. Apertura deslizante (dos y tres rieles) con hasta seis hojas móviles). Capacidad de acristalamiento de 3 a 21 mm. Datos extraídos de la ficha técnica de ventanas REHAU (REHAU 2019).	
Transmitancia térmica envolvente [W/m ² x K]	2,200	
Transmitancia térmica según la exigencia de la reglamentación térmica [W/m ² x K]	Depende del porcentaje máximo de superficie de ventanas en paramentos verticales de la envolvente y del tipo de vidrio (monolítico o DVH)	3,600

3.3.5. Selección de envolventes térmicas para las puertas.

Al igual como en las envolventes de ventanas, el Listado de Soluciones Constructivas del MINVU, no incorpora soluciones constructivas de este tipo, por lo que la selección de esta se tomó considerando el criterio de exigencia de transmitancia térmica del caso 2 (ver **Tabla 11**).

Tabla 11. Selección de envolventes térmicas para las puertas.

Envolvente térmica	Caso 1 - OGUC	Caso 2 - PDA
Puertas de acceso	PUERTAS DE MADERA	
Descripción	Puerta fabricada en MDF/HDF de alta densidad, de espesor 4mm, rellena con poliestireno expandido de densidad 20kg/m ³ de espesor 45mm. Las dimensiones de la puerta son 2000x900x45mm (MOLDTEK 2019)	
Transmitancia térmica envolvente [W/m ² x K]	0,704 (cálculo de transmitancia térmica según NCh 853 of 2007)	
Transmitancia térmica según la exigencia de la reglamentación térmica [W/m ² x K]	Depende del porcentaje máximo de superficie de ventanas en paramentos verticales de la envolvente y del tipo de vidrio (monolítico o DVH)	1,700

3.3.6. Selección de envolventes térmicas para el piso en contacto con el terreno.

En el caso de los pisos, la OGUC y el PDA establecen exigencias sólo para los pisos ventilados, por lo que el Listado de Soluciones Constructivas del MINVU sólo incluye de este tipo. Sin embargo, como se especificó en el ítem 3.1, la tipología de casas mayormente usadas en Temuco y Padre las Casas,

corresponde a casas con pisos en contacto con el terreno, cuyas materialidades corresponden a radier de hormigón revestido con parquet, piso flotante, cerámico, madera, alfombra, flexit, cubrepiso u otro similar. Por lo tanto, se considera una solución de envolvente térmica según se detalla en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Selección de envolventes térmicas para piso contacto con el terreno.

Envolvente térmica	Caso 1 - OGUC	Caso 2 - PDA
Pisos en contacto con el terreno	RADIÉR DE HORMIGÓN REVESTIDO CON CERÁMICA DE PISO.	
Descripción	Corresponde a hormigón 170 kg/cem/m ³ , de espesor de 8 cms, sobre una cama de ripio de 10 cm de espesor (tamaño máximo 1½" y preferentemente de canto rodado). En los pisos de baños, cocinas, estar y comedor, se considera revestimiento de cerámica de 45x45 cm, de 7,2 mm de espesor.	
Transmitancia térmica envolvente [W/m x K]	1,400 (Se considera la transmitancia térmica lineal especificada en la Tabla 4 de la NCh853 of 2007, para un piso corriente en contacto con el terreno (INN 2007))	
Transmitancia térmica según la exigencia de la reglamentación térmica [W/m x K]	No aplica.	

Tal como se puede ver en las **Tablas 10, 11 y 12**, las envolventes seleccionadas para ventanas, puertas y pisos en contacto con el terreno, para ambos casos se mantienen sin modificaciones, considerando sólo las exigencias descritas en el PDA de Temuco y Padre las Casas.

Finalmente, en la **Tabla 13** se muestra un resumen con los valores de transmitancia térmica por solución constructiva para cada caso estudio.

Tabla 13. Resumen comparativo de valores de U de solución de envolventes térmicas seleccionadas, según requerimiento.

	Transmitancia térmica					
	Techumbre	Muros perimetrales 1° piso	Muros perimetrales 2° piso	Ventanas	Puertas de acceso	Piso en contacto con el terreno
	[W/m ² x K]	[W/m ² x K]	[W/m ² x K]	[W/m ² x K]	[W/m ² x K]	[W/m x K]
Caso 1	0,288	1,250	0,880	2,200	0,704	1,400
Caso 2	0,242	0,418	0,406			

Capítulo 4. Análisis de Indicadores de ecoeficiencia del caso estudio.

En el desarrollo del Capítulo 4, se evaluarán los indicadores de ecoeficiencia para las etapas del ciclo de vida que indica la Norma UNE-EN 15978: Etapa de PRODUCTO (A1 - Suministro de materias primas) y para la Etapa de USO (B1 – Uso).

En la primera etapa, se aplicará la plataforma ÁBACO-CHILE (descrita en el apartado 2.2.1) para determinar la energía contenida (EC) y la huella de carbono (HC) de los materiales que componen las envolventes térmicas de la vivienda en su conjunto para ambos casos de estudio (con OGUC y con PDA). Mientras que, para los cálculos del indicador económico, se utilizará el Software Notrasnoches Presupuesto de Obras año 2020, mediante análisis de costos unitarios.

En la evaluación de la etapa de uso, se utilizará el software Revit 2021 (mediante simulación dinámica), para el cálculo de la demanda de energía por calefacción, la cual será la base de cálculo para determinar el consumo de combustible y finalmente, la huella de carbono y el material particulado que emiten los combustibles destinados para calefaccionar la vivienda.

4.1. Evaluación de los indicadores de ecoeficiencia para la etapa A1 - Suministro de materias primas.

4.1.1. Límites del sistema.

Los límites del sistema se evaluarán según lo estipulado en la norma UNE-EN 15978. Para esta investigación, el análisis se desarrollará de la cuna a la puerta, considerando en los análisis, sólo los materiales que constituyen las envolventes de ambos casos de estudios. Se deja fuera del análisis, el transporte de materiales, y las maquinarias, los equipos y la mano de obra requerida para ejecutar cada solución constructiva.

Consideraciones:

- El panel TechoPol, que corresponde a la solución de envoltente para la techumbre, no se encuentra especificado en las bases de datos de la plataforma ÁBACO-CHILE. Por lo que se procedió a realizar un desglose de este, considerando en el análisis cada uno de los materiales que lo componen.

- Para el caso del análisis económico, los costos unitarios fueron obtenidos a partir de la información entregada por el Software Notrasnoches Presupuesto de Obras año 2020. Cabe señalar, que se utiliza este software ya que lleva más de 20 años en el mercado, y posee las bases de datos de costos de las cadenas de comercio de dos grandes empresas que distribuyen materiales de construcción a nivel nacional; Sodimac e Easy, con costos actualizados hasta el 31 mayo del 2020 (ONDAC, 2020); a diferencia de la herramienta ÁBACO-CHILE, quien posee costos de materiales actualizados hasta agosto del 2019 y sólo para la ciudad de Santiago de Chile (ÁBACO-CHILE 2020).
- Los costos unitarios de los materiales que no se encontraron en la base de datos del Software Notrasnoches, fueron obtenidos de cotizaciones realizadas por la investigadora, a proveedores existentes en las comunas de Temuco y Padre las Casas.
- Aquellos materiales, cuyos datos ambientales de energía contenida (EC) y huella de carbono (HC), no se encuentran disponibles en la plataforma ÁBACO-CHILE (ver **Tabla 14**), fueron determinados a partir de los datos obtenidos del Inventory of Carbon and Energy (ICE) Version 2.0 de Bath University, disponible en la web, cuyo proceso productivo es similar al de Chile (Hammond y Jones 2011).

Tabla 14. Inventario de energía contenida y huella de carbono de materiales no disponibles en la herramienta ÁBACO-CHILE (Hammond y Jones 2011).

Material	Energía Contenida	Huella de carbono
Expanded Polystyrene	88,6 [MJ/kg]	3,29 [kgCO ₂ eq/kg]
Mineral wool	16,6 [MJ/kg]	1,28 [kgCO ₂ eq/kg]
Fibre Cement Panels - (Colour) Coated:	15,3 [MJ/kg]	1,28 [kgCO ₂ /kg]
MDF	11 [MJ/kg]	0,39 _{foS} +0,35 _{bio} [kgCO ₂ /kg]

- En la **Tabla 15**, se detallan los cálculos de entrada para la energía contenida y la huella de carbono totales para los materiales descritos en la **Tabla 14**. Para ello, se considera la Unidad Funcional (UF) definida en la ISO 14.040, para asegurar que todos los resultados del análisis de ciclo de vida (ACV) sean comparables (ISO 14040, 2006). Para la energía contenida se utiliza la unidad funcional MJ/m² y para la huella de carbono kgCO₂eq/m².

Tabla 15. Cálculo de energía contenida y huella de carbono de materiales para la etapa de fabricación y construcción. Fuente: Elaboración propia, con datos de indicadores obtenidos del Inventario de Carbono y Energía de la Universidad de Bath (Hammond y Jones 2011).

ENVOLVENTE	MATERIALES	ESPESO R [m]	m ²	VOLUMEN TOTAL [m ³]	DENSIDAD [kg/m ³]	PESO [kg]	ENERGÍA CONTENIDA [MJ/kg]	EMISIONES GEI [kg CO ₂ eq/kg]	ENERGÍA TOTAL [MJ/m ²]	EMISIÓN GEI TOTAL [kg CO ₂ eq/m ²]
Techumbre OGUC	Poliestireno expandido de 20kg/m ³ _espesor 125 mm	0,125	1	0,125	20,00	2,50	88,60	3,29	221,50	8,23
Techumbre PDA	Poliestireno expandido de 20kg/m ³ _espesor 150 mm	0,150	1	0,150	20,00	3,00	88,60	3,29	265,80	9,87
Muro 1° OGUC	Poliestireno expandido 15 kg/m ³ _espesor 10mm	0,010	1	0,010	15,00	0,15	88,60	3,29	13,29	0,49
Muro 1° PDA	Poliestireno expandido 15 kg/m ³ _espesor 80mm	0,080	1	0,080	15,00	1,20	88,60	3,29	106,32	3,95
Muro 2° PDA	Rollo lana mineral 40kg/m ³ _espesor 60mm	0,060	1	0,060	40,00	2,40	16,60	1,28	39,84	3,07
Muro 2° PDA	Poliestireno expandido 15 kg/m ³ _espesor 30mm	0,030	1	0,030	15,00	0,45	88,60	3,29	39,87	1,48
Muro 2° OGUC	Plancha fibrocemento 1000kg/m ³ _espesor 8mm	0,008	1	0,008	1.000,00	8,00	10,40	1,09	83,20	8,72
Muro 2° PDA	Plancha fibrocemento 1000kg/m ³ _espesor 10mm	0,010	1	0,010	1.000,00	10,00	10,40	1,09	104,00	10,90
Puerta PDA	Plancha MDF	0,004	1	0,008	450,00	3,60	11,00	0,74	119,34	5,63
	Poliestireno expandido de 20kg/m ³ _espesor 45 mm	0,045	1	0,045	20,00	0,90	88,60	3,29		

4.1.2. Evaluación de la energía contenida (EC) en MJ/m².

Se realizaron los cálculos a través de la plataforma ÁBACO-CHILE, para la evaluación de la energía contenida (categoría de impacto ambiental del indicador de ecoeficiencia consumo de energía), emitidas durante la etapa A1 – Suministro de materias primas de la vivienda. Para ello, se procedió a descomponer las distintas soluciones constructivas de la envolvente (según lo detallado en el ítem 3.3), e ingresarlas a la plataforma para su evaluación. Cabe señalar, que en el caso de estudio N° 2 (con PDA), algunos materiales no se encontraron en la base de datos de ÁBACO, y se debieron considerar los cálculos de la **Tabla 15**.

A continuación, en la **Figura 18** se muestran los primeros resultados obtenidos en los cálculos de EC por m² de envolvente, seleccionadas desde el Listado Oficial de Soluciones constructivas del MINVU, para ambos casos de estudio.

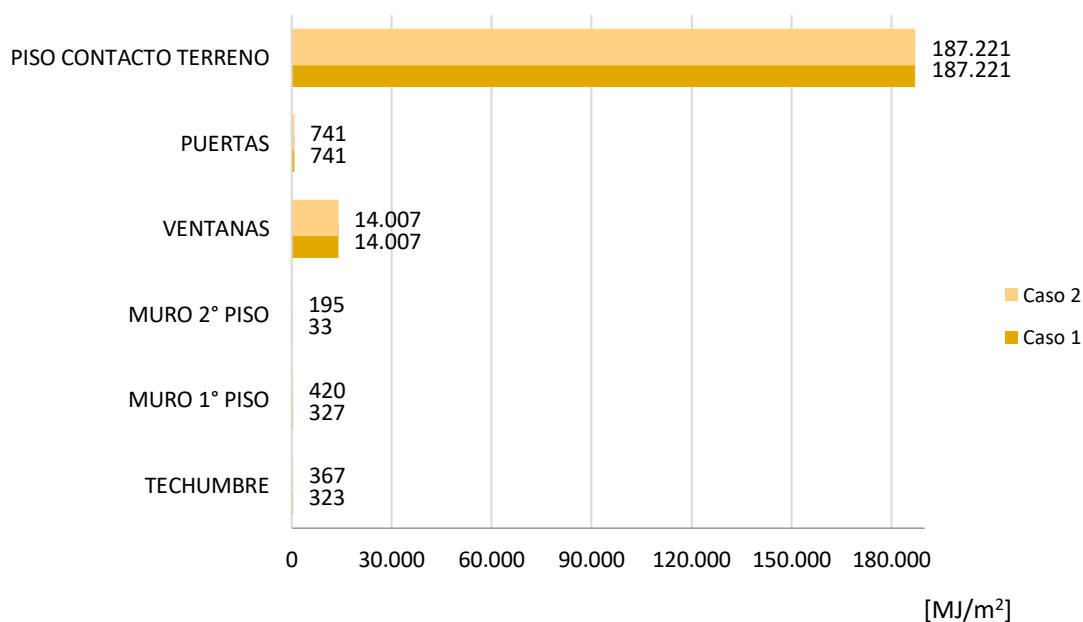


Figura 18. Primeros resultados de EC de las envolventes por casos de estudio.
Fuente: Plataforma ÁBACO-CHILE y Universidad de Bath.

De acuerdo a lo que señala la **Figura 18**, la energía contenida de los materiales que componen el caso 2 (con PDA), es mayor en todos los casos, a la energía contenida de los materiales del caso 1 (con OGUC). Sin embargo, se destacan los resultados obtenidos en la envolvente de muro del

segundo piso de la vivienda; donde el caso 2, resulta ser 5,8 veces mayor a la energía contenida del caso 1. Esta diferencia, se debe principalmente a los resultados del revestimiento exterior correspondiente a la plancha de fibrocemento, la cual, al incrementar su espesor de 8mm a 10mm, incrementó su energía contenida en más de un 95% (ver **Tabla 16**).

Tabla 16. Tabla comparativa de resultados de EC de la envolvente de muro 2° piso.

Código ÁBACO	Descripción	Uni	Energía contenida [MJ]	Código ÁBACO	Descripción	Uni	Energía contenida [MJ]
Solución envolvente de muro 2° piso – caso 1			m²	33,245	Solución envolvente de muro 2° piso – caso 2		
MTCCQ0150	Metalcom montante (60x38x0,5mm x 3m)	m	3,623	MTCCQ0150	Metalcom montante (60x38x0,5mm x 3m)	m	3,623
MTCCQ0152	Perfil tabique metalcon 3m C61x20x0,5mm/1,16kg x unidad	uni	2,139	MTCCQ0152	Perfil tabique etalcon 3m C61x20x0,5mm/1,16 kg x unidad	uni	2,139
MTCCT0069	Caja 100uni autoperforante 8x1/2" cabeza de lenteja	uni	1,437	MTCCT0069	Caja 100uni autoperforante 8x1/2" cabeza de lenteja	uni	1,437
MTCCT0480	Caja 100uni clavo disparo 3,7x25 galvanizado	uni	0,001	MTCCT0480	Caja 100uni clavo disparo 3,7x25 galvanizado	uni	0,001
MTCCT3161	Caja 50uni tornillo autoperforante 6x1"	uni	0,016	MTCCT3161	Caja 50uni tornillo autoperforante 6x1"	uni	0,016
MTIIA0005	Rollo 24kg lana mineral 0,5x1,2m/50mm/revestidas 2 caras/12m2 x rollo	m ²	22,409	-	Rollo lana mineral 40kg/m ³ _espesor 60mm	m ²	39,840
MTRRF0020	Plancha fibrocemento 8mmx1,20x2,40m textura lisa	m²	1,879	-	Plancha fibrocemento 1000kg/m³_espesor 10mm	m²	104,000
MTRRY0026	Plancha yeso cartón R/H 15mmx1,20x2,40m	m ²	3,619	-	Poliestireno expandido 15 kg/m ³ _espesor 30mm	m ²	39,870
				MTRRY0026	Plancha yeso cartón R/H 15mmx1,20x2,40m	m ²	3,619

El elevado porcentaje de diferencia que presentó la plancha de fibrocemento (que incrementó en solamente 2mm su espesor entre un caso y otro), permitió visualizar que los datos de entrada que estaba entregando la plataforma ÁBACO-CHILE, específicamente para este material, no coincidían con los datos de entrada que entregaba el Inventario de la Universidad de Bath, ni tampoco con los datos de entrada de otras base de datos, como por ejemplo la base de datos Ecoinvent versión 3.0. A continuación, se muestra una tabla comparativa con los datos de entrada de una plancha de

fibracemento cuya unidad funcional se encuentra en MJ/kg, según indica el Inventario de la Universidad de Bath y la base de datos Ecoinvent versión 3.0 (ver **Tabla 17**).

Tabla 17. Tabla comparativa de datos de entrada [MJ/kg] de una plancha de fibracemento.

	ENERGÍA CONTENIDA [MJ/Kg]	
	UNIVERSIDAD DE BATH	ECOINVENT VERSIÓN 3.0
Plancha de fibracemento	10,400	7,770

A raíz de lo señalado en la **Tabla 16** y **Tabla 17**, es que se vuelve a realizar el análisis, pero considerando los datos de entrada de la plancha de fibracemento de 8 mm de espesor, según los cálculos realizados en la **Tabla 15**, es decir con los datos de entrada proporcionados por el Inventario ICE de la Universidad de Bath. Los resultados obtenidos, son los presentados en la **Figura 19** (el desglose completo para ambos casos se encuentra en los Anexo A y B).

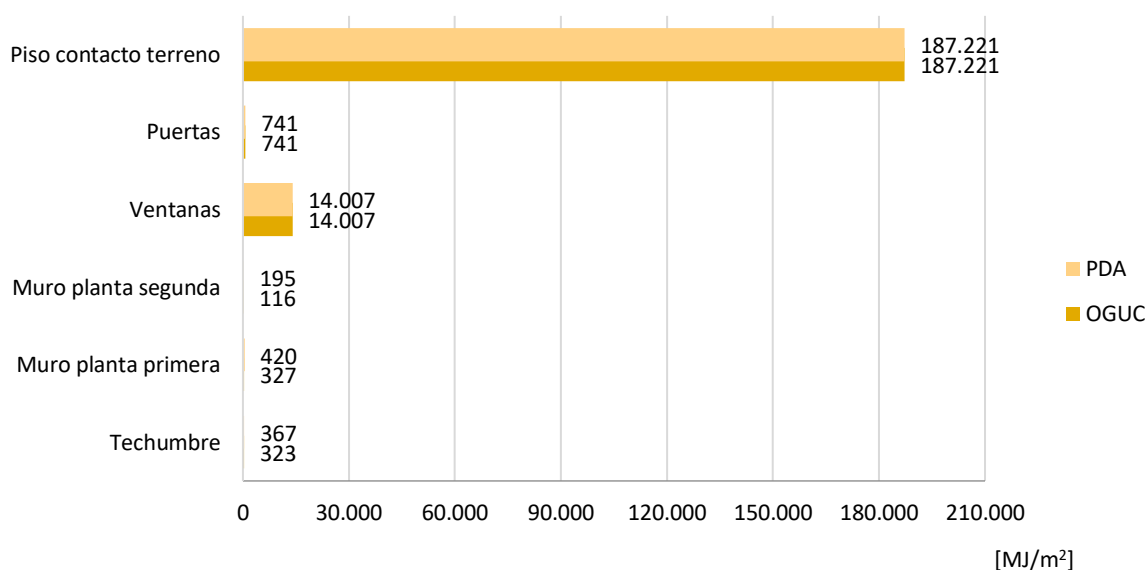


Figura 19. Resultados finales de EC de las envolventes por casos de estudio.

Fuente: Plataforma ÁBACO-CHILE y Universidad de Bath

De la **Figura 19**, se observa que el caso 2 para las tres soluciones que fueron modificadas, posee mayor energía contenida que el caso 1. Se evidencia que la techumbre del caso 2 es un 12,1% superior a la del caso 1, el muro del primer piso del caso 2, es un 22,2% superior al del caso 1 y la envolvente del muro del segundo piso del caso 2 es un 40,2% superior, respecto a la envolvente del caso 1. Sobresale en este análisis, el muro del 1° piso del caso 2, el cual posee mayor energía

contenida de las tres envolventes modificadas, debiéndose principalmente a que incluye como material un ladrillo reforzando hueco, con un gran porcentaje de energía contenida debido a su proceso de fabricación (del total de energía contenida de esta envolvente, un 64% se le atribuye al ladrillo, un 25% al poliestireno expandido de 80 mm de espesor y un 6% a los sacos de cemento utilizados para el mortero de pega).

Por otra parte, la solución de muro del segundo piso es la que presenta una mayor diferencia entre ambos casos (con un 40% de diferencia entre los resultados de energía contenida); debiéndose principalmente a que en el caso 2, se incorporó un nuevo material para cumplir con las exigencias del PDA (poliestireno expandido en la cara interior), y se aumentó el espesor de los materiales existentes (lana mineral y fibrocemento). En el caso de las envolventes de la techumbre y el muro del primer piso, el aumento de energía contenida del caso 2, se debe principalmente al aumento de espesor del poliestireno expandido.

A modo de ejemplo, la **Figura 20**, muestra los resultados del análisis de energía contenida por Mj/m^2 de una plancha de poliestireno expandido de diferentes espesores.

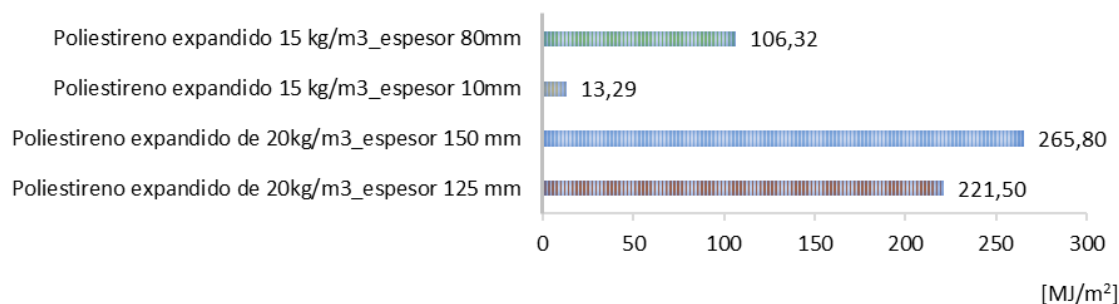


Figura 20. Energía contenida del poliestireno expandido con diferentes espesores.

Cabe señalar además, que el piso en contacto con el terreno y las ventanas, no presentan diferencias entre un caso y otro según lo indicado en los apartados 3.3.4, 3.3.5 y 3.3.6. Sin embargo, de las 6 envolventes analizadas, ambas soluciones son las que poseen una mayor cantidad de energía contenida, debiéndose principalmente, a la incorporación del hormigón en pisos y el PVC en las ventanas, materiales que poseen una gran cantidad de energía contenida debido a su proceso de producción ($187.192 MJ/m^3$ el hormigón; y $14.006 MJ/m^2$ el PVC) (ÁBACO-CHILE 2020).

4.1.3. Evaluación de la huella de carbono (HC) en kgCO₂eq/m².

Al igual que en apartado anterior, se realizaron los cálculos a través de la plataforma ÁBACO-CHILE, para la evaluación de la huella de carbono (categoría de impacto ambiental del indicador de ecoeficiencia emisiones GEI), emitidas durante la etapa A1-Suministro de materias primas, para la construcción de la vivienda. Para ello, se procedió a descomponer las distintas soluciones constructivas de la envolvente (según lo detallado en el apartado 3.3), e ingresarlas a la plataforma para su evaluación, desde donde se obtuvieron los resultados que se presentan en la **Figura 20** (el desglose completo para ambos casos se encuentra en los Anexo A y B).

Para los cálculos de los materiales que no se encuentran disponibles en la plataforma ÁBACO-CHILE, se consideró lo planteado en la **Tabla 15**. El mismo criterio se consideró para las planchas de fibrocemento, luego de evidenciar que el dato de entrada de la energía contenida para este material específicamente, en ÁBACO-CHILE arrojaba un error.

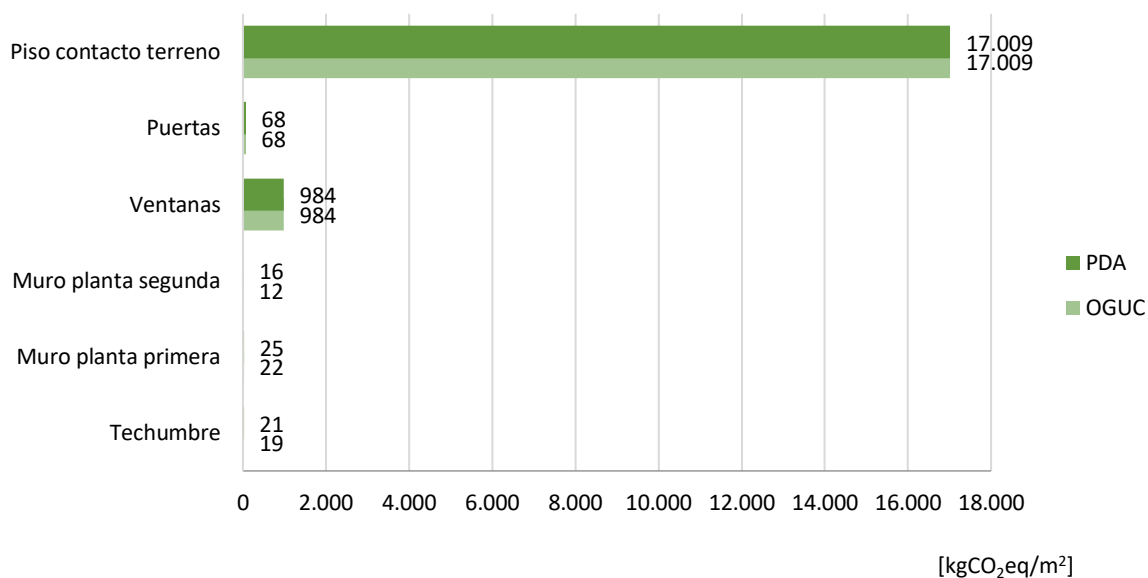


Figura 20. Resultados finales de HC de las envolventes por casos de estudio.
Fuente: Plataforma ÁBACO-CHILE y Universidad de Bath

De acuerdo a lo que señala la **Figura 20**, el caso 2 (con PDA) presenta mayor HC que el caso 1 (con OGUC) en cada una de las envolventes estudiadas, debiéndose principalmente al aumento en el espesor de los materiales que se consideraron en este caso, de tal modo de alcanzar la transmitancia térmica requerida. Se repite, lo indicado en la evaluación de energía contenida, cuya mayor

diferencia entre ambas soluciones, se da en el muro del segundo piso con un 26,56%, lo sigue el muro del primer piso con un 13,85% y la techumbre con un 7,99%. Estos porcentajes, evidencian que cuando se aumentan los espesores de los materiales, durante el proceso productivo de los mismos, se genera mayor carga ambiental. A modo de ejemplo, la **Figura 21** muestra la HC de una lana mineral, al aumentar de 50 a 60 mm de espesor (este material, con ambos espesores, fue considerado en la envolvente del muro del segundo piso como aislante térmico).

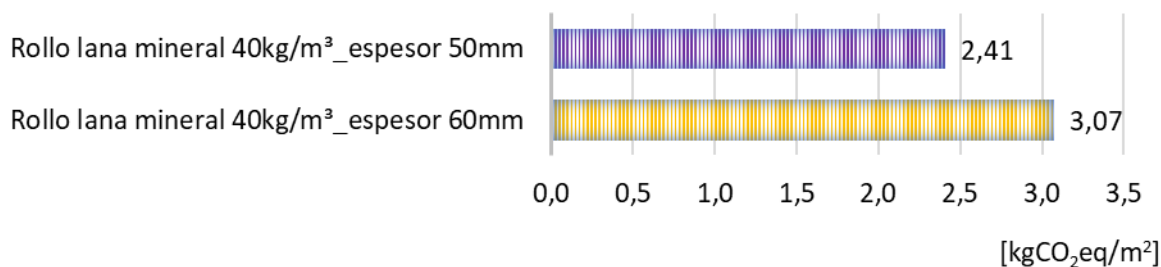


Figura 21. HC de la lana mineral de espesor 50mm y espesor 60 mm.

4.1.4. Evaluación del costo económico en \$/m².

La evaluación económica, se realiza para los materiales que componen las envolventes para la etapa de construcción de la vivienda. Para ello, se procedió a realizar un análisis de costos unitarios para cada una de las envolventes. Los costos unitarios de los materiales, se obtuvieron a través de la búsqueda de estos en la base de datos del Software Notrasnoches (con base de datos disponibles de los proveedores Sodimac e Easy de Temuco). En el caso de los materiales sin registro en esta base de datos, se procedió a realizar una cotización a los proveedores existentes en las ciudades de Temuco y Padre las Casas.

Los resultados obtenidos fueron separados por solución constructiva de envolvente, permitiendo diferenciar con esto, el impacto económico de cada una de las soluciones entre sí en \$/m², según se detalla en la **Figura 22** a continuación (el desglose completo para ambos casos se encuentra en los Anexo C y D).

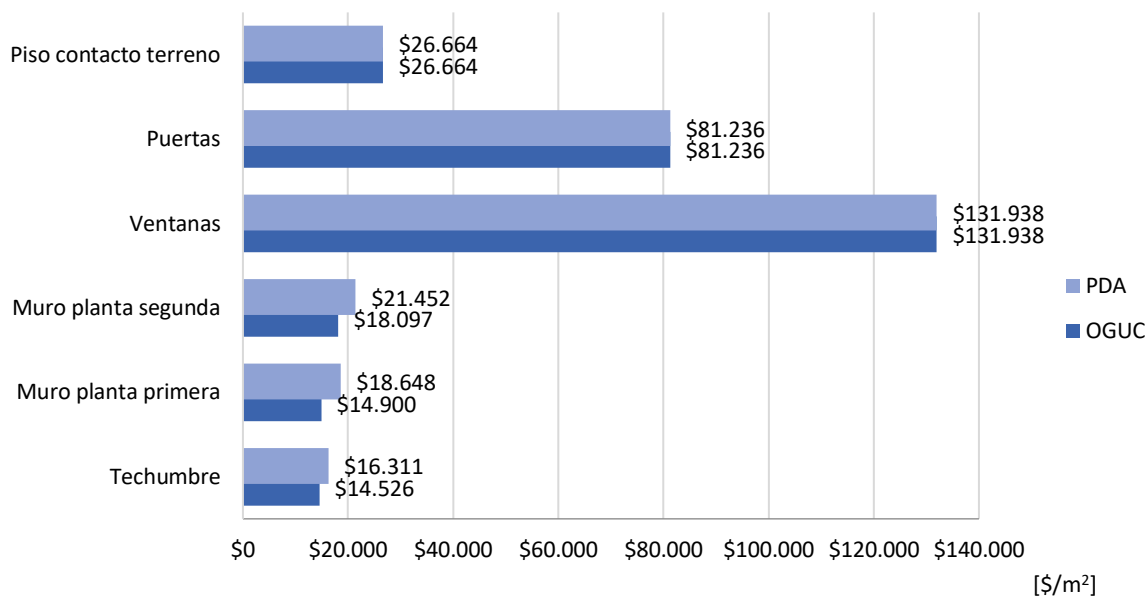


Figura 22. Resultados finales del costo económico unitario de cada envolvente térmica.

De la **Figura 31**, es posible visualizar que en las tres envolventes en las cuales se realizaron modificaciones en el caso 2, de tal modo de alcanzar los requerimientos térmicos del PDA (techumbre, muro del 1° piso y muro del 2° piso), el costo económico unitario aumentó. La mayor diferencia de costos, se da en el muro del primer piso, en el cual el caso 2 es un 20,1% más caro que el caso 1, debiéndose principalmente, al aumento de espesor del poliestireno expandido de 15 kg/m³ de densidad. Según las cotizaciones realizadas, el poliestireno de 10mm de espesor tiene un valor de \$536 pesos por m²; mientras que el poliestireno de 80mm de espesor, tiene un valor de \$4.284 pesos por m², esto es un 87% más caro.

Con lo mencionado en el párrafo anterior, se demuestra que, a mayor espesor de los materiales, mayor es el costo económico de estos. Además, es posible evidenciar que las envolventes de ventanas, puertas y piso en contacto con el terreno, corresponden a aquellas envolventes que generan un alto impacto en el costo de construcción de la vivienda, debiéndose principalmente a los materiales suministrados.

A modo de ejemplo, en la **Tabla 18**, se muestra un análisis de las envolventes del caso 2, dentro de un presupuesto (itemizado) de construcción por m² construido. En el itemizado, se puede observar

el porcentaje de incidencia de cada una de las envolventes, pero sólo considerando el suministro de los materiales, no están consideradas las máquinas y equipos, ni la mano de obra requerida para su ejecución.

Tabla 18. Ejemplo de un itemizado presupuestado para la construcción de la vivienda por m².

Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total	% Incidencia
Techumbre	m ²	1	\$16.311	\$16.311	5,50%
Muro 1° piso	m ²	1	\$18.648	\$18.648	6,30%
Muro 2° piso	m ²	1	\$21.452	\$21.452	7,20%
Ventanas	m ²	1	\$131.938	\$131.938	44,50%
Puertas	m ²	1	\$81.236	\$81.236	27,40%
Piso contacto terreno	m ²	1	\$26.664	\$26.664	9,00%
Costo directo \$/m²				\$296.249	100,00%

De la tabla anterior, se observa que un 45% de costo corresponde a las ventanas, un 27% a las puertas, un 9% al piso en contacto con el terreno, un 7% al muro del segundo piso, y un 6% a la techumbre y el muro del 1° piso. Las ventanas de PVC y las puertas, presentan un alto costo económico unitario por las características que deben tener cada una para cumplir con las exigencias del PDA. Sin embargo, en una construcción que incorpora la totalidad de metros cuadrados por actividad, son las actividades de obra gruesa las que tienen un alto impacto económico dentro del presupuesto (construcción de cimientos de hormigón y albañilerías). Este resultado es similar a la investigación realizada por (González Vallejo 2018), quien determinó que en un proyecto de construcción, las actividades que tienen mayor impacto económico son las excavaciones, cimentaciones, estructuras, albañilería, instalaciones y revestimientos, dentro de los cuales, el hormigón y las cerámicas son los que generan un impacto económico más alto.

4.2. Evaluación de los indicadores de ecoeficiencia para la etapa B1 – Uso.

Para determinar la incidencia del PDA en el análisis de ciclo de vida de la vivienda, en comparación con la OGUC, y su aporte en la generación de huella de carbono y material particulado, se realiza en primer lugar una simulación dinámica a través del Software AUTODESK REVIT 2021. Este software permite calcular la demanda de calefacción a través de una herramienta integrada en Revit, a partir del modelo arquitectónico de la vivienda, definiendo la localización, colocando espacios y designando zonas (AUTODESK 2021).

Posteriormente, la huella de carbono del consumo anual de combustible se proyectará a un periodo de estudio de referencia (RSP) de vida útil, según indica la UNE-EN 15978.

4.2.1. Límites del sistema.

Consideraciones:

- La evaluación de la HC para la etapa de ocupación, se determinó a partir de los resultados de demanda de energía de la vivienda para ambos casos de estudio considerando la huella de carbono y el poder calorífico de los combustibles: leña, gas y pellet (ver **Tabla 19**). Se consideran estos combustibles, ya que el consumo de energía por combustible total del país corresponde a un 39,6% a la leña y a un 31,4% al gas. Mientras que el pellet es considerado como uno de los combustibles de recambio considerados en el PDA (MMA 2015) (CDT 2019).

Tabla 19. HC y PCI de los combustibles de leña, GLP y Pellet.

	Huella de Carbono (HC) [kgCO ₂ eq/kg]		Poder Calorífico (PCI) [kWh/kg]	
Leña	1,721	Dato obtenido de la empresa chilena Poch Ambiental en su informe "Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero" (POCH 2008)	4,94	Dato promedio de las especies de roble, coigüe, lingue, eucaliptus, aramo, radial y ulmo, con un contenido de humedad del 25%. Según señala el informe "Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera" (Ministerio de Energía 2015a).
Gas Licuado del Petróleo (GLP)	2,9575	Dato obtenido de la investigación realizada por (Kairies 2020). Kairies, obtuvo el dato desde la herramienta de cálculo del Gobierno de Zaragoza.	14,07	Dato obtenido de la investigación realizada por (Kairies 2020). Kairies, obtuvo el dato desde la Agencia Chilena de Eficiencia Energética.
Pellet.	0,059	Dato obtenido de la investigación realizada por (Kairies 2020). Kairies, obtuvo el dato desde el estudio publicado por la revista Biomass & Bioenergy el año 2006	4,8	Dato obtenido de la investigación realizada por (Kairies 2020). Kairies obtuvo el dato de la empresa Ecomas (empresa encargada de la fabricación y comercialización de pellet de madera en Chile).

- La evaluación del costo económico de los combustibles, se obtuvo de datos de proveedores para la ciudad de Temuco, según se detallan en la **Tabla 20**.

Tabla 20. Costo económico de los combustibles.

Combustible	Costo unitario	Proveedor.
Saco de leña 25kgs	\$5.990 pesos chilenos.	Sodimac Temuco.
GLP	448,14 US\$/ton	Según la Tabla de precios de paridad - Inversionistas y Mercado – ENAP, con fecha 03 de diciembre del 2020 (ENAP 2020) .
Bolsa Pellet 18 kilos	\$3.790 pesos chilenos	Sodimac Temuco.

- Finalmente, se considera el periodo de estudio de referencia (RSP), para una vida útil fijada por el Servicio de Impuestos Internos (SII) de 50 años (SII 2003).

4.2.2. Evaluación de la demanda energética.

La demanda energética que se estudiará en esta apartado, corresponde a la cantidad de energía que requiere un edificio para proveer confort a sus ocupantes y se mide en kWh/m² año (CITEC UBB 2013).

4.2.2.1. Parámetros de simulación.

Para establecer los parámetros de simulación en el software Revit 2021, se consideró el tipo de edificación, ubicación geográfica, la carga de ocupación, los horarios de uso, la iluminación entre otros aspectos que se detallan a continuación (ver **Tabla 21**).

Tabla 21. Parámetros de simulación.

Parámetros	Descripción.
Diseño de la vivienda:	67,9 m ² (metros cuadrados de edificación entre el primer y segundo piso).
Localización geográfica	Temuco.
Ocupación	Se establece una ocupación para una familia de 4 personas (dos adultos y dos niños).
Hermeticidad al aire	Los datos se obtuvieron del “Manual de Hermeticidad al Aire de Edificaciones” (CITEC UBB 2013): <ul style="list-style-type: none"> • Índice de aire exterior por persona: 2,5 [l/s persona]. • Índice de aire exterior por Área: (0,3) [l/s m²]. • Hermeticidad al aire de edificaciones (Valor de n50 límite propuesto para la ciudad de Temuco): 5 [1/h].

	<ul style="list-style-type: none"> Renovaciones de aire por hora a 50Pa (sistemas de ventilación de las viviendas en estado cerrado): 3,69 [renov/hora].
Escenarios de simulación.	Se establecieron para el caso 1 y caso 2, según lo especificado en el apartado 3.3.

4.2.2.2. Resultados de simulación.

Después de realizar el análisis en el software Revit, los resultados de la simulación se presentan en la **Tabla 22**, en la cual se comparan las demandas proyectadas en la etapa de diseño para ambos casos de estudio y se incorpora el cálculo de la demanda de combustible estimado por año y por m² de construcción.

Tabla 22. Demanda de calefacción y demanda de combustible entre los requerimientos de la OGUC y el PDA de Temuco y Padre las Casas.

Fuente: Elaboración Propia.

	Demanda de calefacción		Demanda de combustible por año [kg/año/m ²]		
	[kWh/m ² /año]	[MJ/m ² /año]	Leña	Pellets	GLP
Caso 1	121,42	437,11	24,58	25,30	8,63
Caso 2	97,88	352,37	19,81	20,39	6,96

De la **Tabla 22** se evidencia que el caso 2 (con PDA), presenta menor demanda de calefacción y una menor demanda de combustible que el caso 1 (OGUC), generada por la mejora térmica realizada a través del aumento de los espesores de los materiales aislantes utilizados en cada una de las envolventes, y a la incorporación de nuevos materiales (en la envolvente del segundo piso), que permiten alcanzar la transmitancia térmica requerida por el PDA.

En términos porcentuales, la mejora en la demanda de calefacción es de un 19,4%. Este porcentaje, si bien no cumple con el 30% establecido por el gobierno en la Ruta Energética 2018-2022 (Ministerio de Energía 2018), la demanda de 97,88 [kWh/m²/año] que arrojó el caso con PDA, cumple con la propuesta que indica el Tomo II de los Estándares de construcción sustentable para Viviendas en Chile (ECSV), que hace referencia a la Energía para Zona Térmica F (correspondiente a Temuco y Padre las Casas), la cual indica que en el año 2020 la demanda de calefacción debe ser de 135 [kWh/m²/año] (ver **Figura 3** del apartado 2.1.1.1).

Del mismo modo, a partir del poder calorífico que tiene cada uno de los combustibles analizados, los resultados arrojan que con el uso de Gas Licuado (PCI 14,07 kWh/kg), hay menor demanda de

combustible, comparado con el pellet (PCI de 4,8 kWh/kg) y con la leña (PCI 4,94 kWh/kg), lo que lo hace más ecoeficiente desde el punto de vista energético. Estos resultados, coinciden con la investigación realizada por (Kairies-Alvarado, Muñoz-Sanguinetti y Martínez-Rocamora 2021), permitiendo visualizar que, en los cálculos posteriores, influirán directamente en los indicadores económicos y ambientales.

4.2.3. Evaluación de la huella de carbono asociada a los combustibles en kgCO₂eq/m².

La evaluación de la HC para la etapa de uso, se encuentra calculada en base a la demanda anual de calefacción y la demanda de combustible por año descritos en la **Tabla 22**. Los que serán multiplicados por las emisiones de HC de cada combustible declarados en la **Tabla 19**.

A partir de los datos mencionados anteriormente, se presenta la **Tabla 23**, en la cual se muestran las emisiones anuales de combustible por m², y las emisiones generadas para la vida útil de la vivienda a 50 años, según información del SII (SII 2003).

Tabla 23: Emisión HC para etapa de uso por caso de estudio.

	Demanda de combustible por año [m ² /kg/año]			Emisión anual combustible [kgCO ₂ eq/kg/m ²]			Emisión (50 años) combustible [kgCO ₂ eq/kg/m ²]		
	LEÑA	PELLETS	GLP	LEÑA	PELLETS	GLP	LEÑA	PELLETS	GLP
Caso 1	24,58	25,30	8,63	42,30	1,49	25,52	2.115,02	74,62	1.276,12
Caso 2	19,81	20,39	6,96	34,10	1,20	20,57	1.704,97	60,16	1.028,71

De la **Tabla 23**, es posible evidenciar que el caso 2, tiene menor emisiones de combustibles que el caso 1, al ser evaluados por m² y por los años de vida útil de la vivienda. Del mismo modo, de los combustibles analizados en esta investigación, la leña es la que emite mayor cantidad de HC con un 61%, la sigue el GLP con un 37% y el pellet con un 2% (ver **Figura 23**).

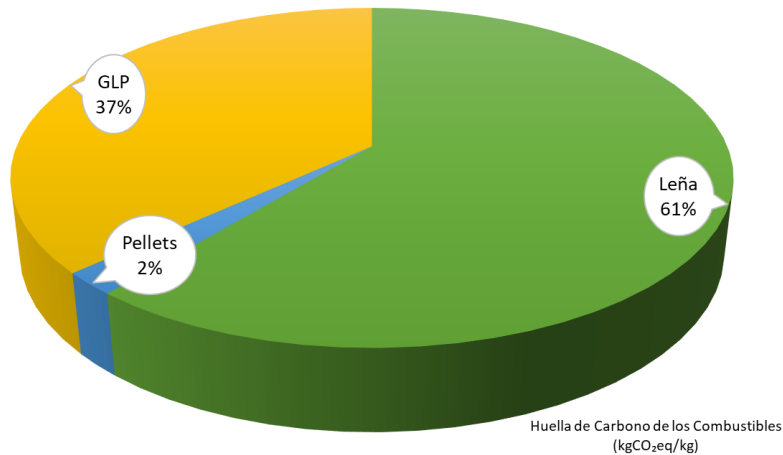


Figura 23. Emisiones de huella carbono por efecto de los combustibles [kgCO₂eq/kg/m²].

Estos porcentajes, permiten visualizar que los esfuerzos del PDA por disminuir el uso de leña a nivel país, no solamente influirían en el material particulado fino MP2,5; sino que también, en los esfuerzos para alcanzar la carbono neutralidad (MMA 2019a). De igual modo, se pueden observar que, una medida de recambio en las estrategias de calefacción, está en la posibilidad de utilizar el GLP, ya que emite menos del 50% de los GEI al ambiente y, además, tal como se mencionó en el apartado 4.2.2.2, de los tres combustibles analizados es el que posee mayor PCI. Sin embargo, sigue siendo el pellet, el combustible que menos contamina al ambiente, a pesar de que se requiera una mayor cantidad de kilogramos de este para calefaccionar (este análisis se verá en mayor detalle, una vez que se realice el análisis económico de cada combustible, en el apartado 4.2.4).

Para complementar lo dicho en el párrafo anterior, a modo de ejemplo, la **Figura 24**, muestra un detalle comparativo de los resultados del análisis del caso 2 (con PDA), respecto a la demanda de combustible anual y su HC. La información está expresada en kg de combustible a utilizar al año en 1m² para alcanzar la demanda de calefacción (97,88 kWh/m²/año), y en kgCO₂eq por kilo de combustible para 1 m², respectivamente.

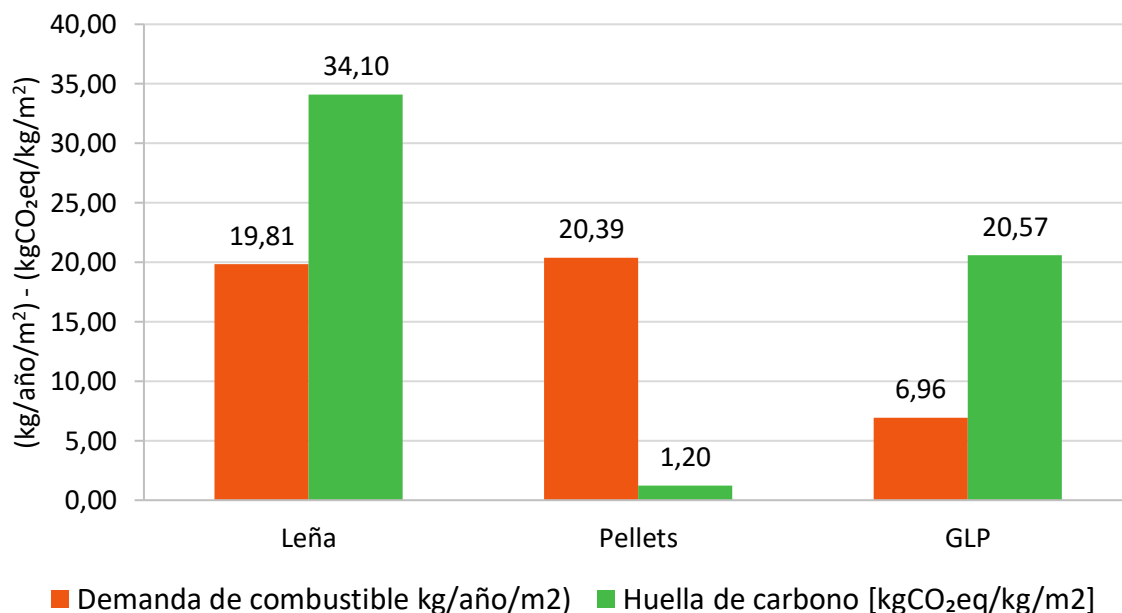


Figura 32. Demanda y HC de los combustibles en la etapa de uso - caso 2.

4.2.4. Evaluación del costo económico asociado a los combustibles en \$/m².

La evaluación de costo económico para la etapa de uso, se realizó en función del poder calorífico y los costos de los combustibles, señalados en las **Tablas 19 y 20** respectivamente. De este modo, se procedió a calcular el costo de cada combustible en función de los kilogramos necesarios para alcanzar la demanda de calefacción, para luego completar el análisis económico a partir de la demanda de combustible declarado en la **Tabla 20**. A continuación, en la **Tabla 24** se muestran los resultados del análisis.

Tabla 24. Evaluación económica de los combustibles.

	Demanda de combustible [m ² /kg/año]			Costo económico [\$ /kg/m ² /año]			Costo económico vida útil [\$ /kg/m ² / 50 años]		
	Leña	Pellets	GLP	Leña	Pellets	GLP	Leña	Pellets	GLP
Caso 1	24,58	25,30	8,63	\$5.889	\$5.326	\$2.908	\$294.456	\$266.309	\$145.417
Caso 2	19,81	20,39	6,96	\$4.747	\$4.294	\$2.344	\$237.369	\$214.679	\$117.225

De la **Tabla 24**, se puede extraer que el caso 2 resulta ser más económico que el caso 1 en un 19,4% para todos los combustibles analizados, debiéndose principalmente, a que tiene menor demanda de combustible gracias a la mejora térmica incorporada (menos demanda, menos uso de

combustibles). Del mismo modo, al analizar los combustibles por separado, el gas licuado resulta ser un 18% y 22% más económico que el pellet y la leña respectivamente (ver **Figura 32**).

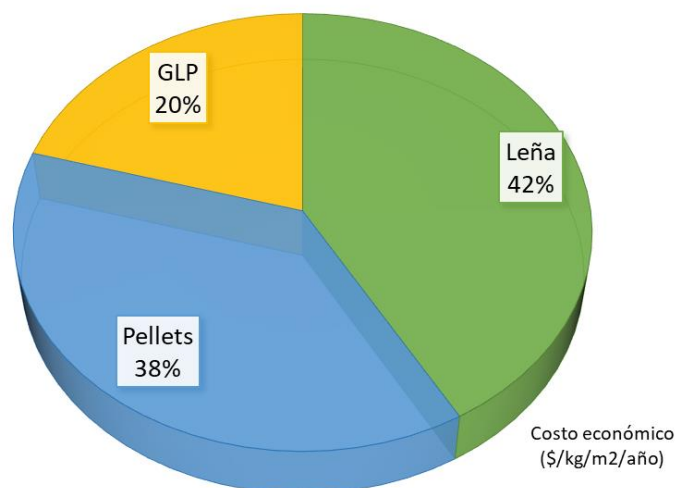


Figura 32. Costo económico de los combustibles en \$/kg/m²/año.

El resultado anterior, resulta ser significativo si se consideran además los resultados obtenidos en los cálculos de la huella de carbono del apartado 4.2.4. En resumen, la leña, corresponde al combustible menos eficiente desde el punto de vista de su HC y el costo económico, el GLP, corresponde al segundo combustible que emite menos HC, pero es el más económico de los tres debido a su alto poder calorífico, y el pellet, sin dudarlo es el combustible que menos HC emite, pero no es el más económico.

4.2.5. Evaluación de las emisiones de material particulado fino 2,5 µm por m².

Para la evaluación del material particulado fino 2,5 µm, se consideran los Factores de Emisión (FE) de cada combustible (ver **Tabla 25**). Los FE, corresponden a los promedios estadísticos del flujo de contaminantes, emitidos por unidad de combustible procesado o por unidad de energía consumida, y generalmente se miden en grMP_{2,5}/kg de combustible (Pereira 2012).

Tabla 25. Factores de emisión para combustión residencial de material particulado fino 2,5 µm

	Emisiones de material particulado [grMP _{2,5} /kg de combustible]		
	Leña seca (% Humedad < 25%)	Leña húmeda (% Humedad > 25%)	Referencia
Cocina a leña	7,00	13,00	(SICAM 2015)
Combustión lenta S/T*	5,80	11,00	(SICAM 2015)
Combustión lenta C/T**	4,90	10,20	(SICAM 2015)
Salamandra	11,80	34,10	(SICAM 2015)
Chimenea	9,20	26,60	(SICAM 2015)
Calefactor a pellet	1,80	-	(SICAM 2015)
GLP	0,17		(SINCA 2011)

*S/T: Sin templador.

**C/T: Con templador.

De este modo, se realiza el análisis para la etapa de uso, a partir de los datos de la demanda anual de cada combustible por metro cuadrado de vivienda (ver **Tabla 22**), multiplicados por el factor de emisión de cada combustible (**Tabla 25**). Los resultados se muestran a continuación en las **Tablas 26** y **27**, considerando el uso de leña en estado húmedo y seca.

Tabla 26. Emisiones anuales de material particulado MP2,5– Leña seca.

	Emisiones de material particulado [grMP _{2,5} /kg de combustible/m ² /año]						
	Leña seca					Calefactor a pellet	GLP
	Cocina a leña	Combustión lenta S/T	Combustión lenta C/T	Salamandra	Chimenea		
Caso 1	172,05	142,56	120,44	290,03	226,13	45,53	1,47
Caso 2	138,70	114,92	97,09	233,80	182,29	36,71	1,18

Tabla 27. Emisiones anuales de material particulado MP2,5– Leña húmeda.

	Emisiones de material particulado [grMP _{2,5} /kg de combustible/m ² /año]						
	Leña húmeda					Calefactor a pellet	GLP
	Cocina a leña	Combustión lenta S/T	Combustión lenta C/T	Salamandra	Chimenea		
Caso 1	319,53	270,37	250,71	838,14	653,80	45,53	1,47
Caso 2	257,58	217,95	202,10	675,65	527,05	36,71	1,18

En las **Tablas 26** y **27**, se visualiza que el caso 2 (con PDA) respecto al caso 1 (con OGUC), presenta una disminución en las emisiones de material particulado fino del orden del 19,4%, gracias a que se mejoró térmicamente la envolvente de la vivienda. Esto da cuenta, que una correcta selección de soluciones constructivas de envolventes, afectan directamente con la cantidad de emisiones de material particulado fino al ambiente.

En otro análisis, si se comparan los resultados del caso 2 para los artefactos que consideran leña húmeda y leña seca en su proceso de combustión, se refleja una diferencia en la emisión de material particulado de aproximadamente un 40% (ver **Figura 33**). A raíz de esto, es que el PDA hace hincapié en sus artículos en prohibir el uso de leña húmeda para calefacción y/o cocción de alimentos (MMA 2015). Sin embargo, hasta el 2017 faltando dos años para cumplir los plazos estipulados en el PDA de Temuco y Padre las Casas, el avance del programa de recambio de artefactos era de tan sólo un 10,3% respecto a las metas propuestas (Universidad de Chile 2019).

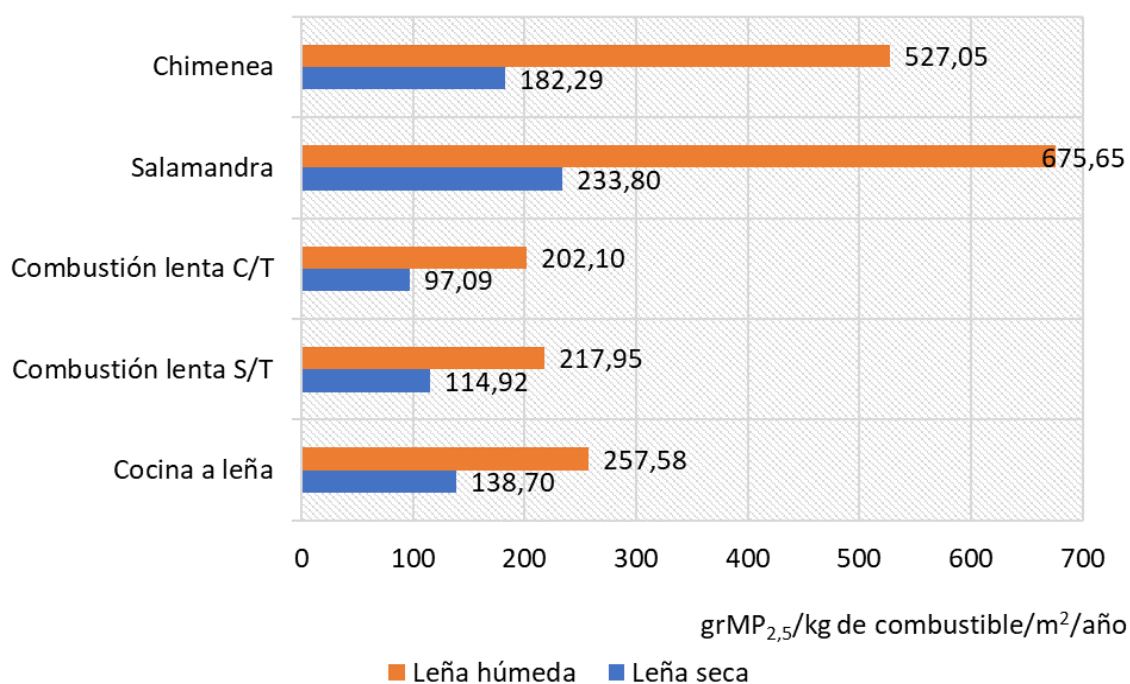


Figura 33. Emisiones anuales de material particulado fino MP2,5, de artefactos que utilizan leña húmeda y leña seca. Ejemplo para el caso de estudio N°2.

De la misma forma, comparando cada uno de los posibles artefactos a utilizar en una vivienda, se aprecia que la salamandra es el mayor contaminante con un 29%, seguida por la chimenea con 23%, cocina a leña con un 17% y las estufas a combustión lenta S/T y combustión lenta C/T con un 14% y 12% respectivamente. Mientras que el GLP, corresponde al combustible menos contaminante (ver **Figura 34**). Recordar que, a su vez el GLP también corresponde al combustible más económico, según el análisis realizado en el apartado 4.2.4.

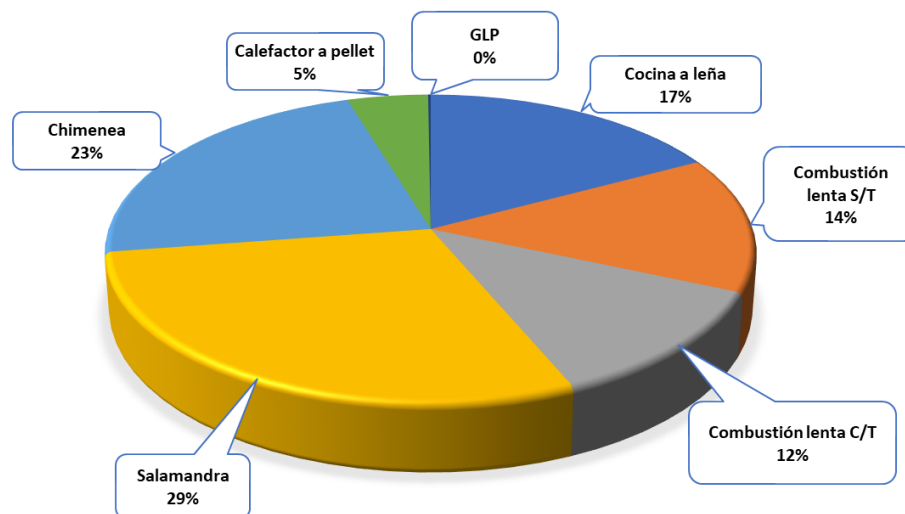


Figura 34. Emisiones anuales de material particulado fino MP2,5 por tipo de artefacto.

De lo anterior, también es importante mencionar que según estudios del Ministerio del Medio Ambiente, un calefactor a pellet tiene una eficiencia superior al 75%, en comparación a una estufa a leña que tiene una eficiencia del 50% (MMA 2020a), por lo que el pellet, es considerada una opción de calefacción ecoeficiente, ya que es responsable solamente del 5% de las emisiones de material particulado fino MP2,5 anuales por m², y es el segundo combustible más económico.

Finalmente, las emisiones de material particulado fino de la vivienda para 1 m² cuadrado construido, evaluada para una vida útil de 50 años, son las que se muestran en la **Tabla 28**. En esta tabla sólo se consideró la leña en estado seco.

Tabla 28. Emisiones de material particulado por m2 y una vida útil de 50 años.

	Emisiones de material particulado [grMP _{2,5} /kg de combustible/m ² /50 años]						
	Leña seca					Calefactor a pellet	GLP
	Cocina a leña	Combustión lenta S/T	Combustión lenta C/T	Salamandra	Chimenea		
Caso 1	8.603	7.128	6.022	14.502	11.306	2.277	73
Caso 2	6.935	5.746	4.854	11.690	9.114	1.835	59

Capítulo 5. Comparación de resultados.

En el capítulo 5, se desarrollará en profundo el análisis de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, de los indicadores de ecoeficiencia para ambos casos de estudio, calculados para la etapa de PRODUCTO (A1 – Suministro de Materias Primas) y la etapa de USO (B1 – Uso), con lo cual se obtendrá la evaluación completa de la vivienda durante su ciclo de vida completo.

5.1. Evaluación de la ecoeficiencia para el ciclo de vida completo de la vivienda.

A partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 4, se demuestra que las envolventes evaluadas bajo las condiciones del PDA de Temuco y Padre las Casas (Caso 2), durante la etapa A1 de Producto, aumentan en promedio un:

- 12,4% la energía contenida de los materiales que componen las envolventes por m² construido.
- 8,1% la huella de carbono de los materiales que componen las envolventes por m² construido.
- 7,8% el costo económico de los materiales que componen las envolventes por m² construido.

Con lo anterior, se logra verificar que, al aplicar el PDA, impacta negativamente en la etapa A1 de la vivienda, por lo tanto, toma relevancia, considerar materiales con baja carga ambiental al momento de diseñar la envolvente.

En la etapa de uso, que es cuando una familia habita la vivienda (evaluada en 50 años de vida útil), se logra verificar el asertividad que tiene la aplicación de esta normativa, ya que disminuyen en promedio un:

- 19,4% las emisiones de material particulado fino por MP2,5 (objetivo principal del PDA), la demanda de energía, huella de carbono y el costo económico de los combustibles.

Respecto a este porcentaje, si bien es cierto, se logra una disminución en las emisiones de material particulado fino, este porcentaje no cumple con el 67% que tiene como meta el PDA de Temuco y Padre las Casas en 10 años desde la entrada en vigencia del Plan, por lo que se debe evaluar a nivel de gobierno.

Por otro lado, si se evalúan los indicadores de huella de carbono y energía contenida, considerando los m² totales de las envolventes descritas en la **Tabla 6**, promediando los resultados de ambos casos de estudio, se logra verificar que es en la Etapa A1, donde la vivienda consume la mayor cantidad de energía y emite la mayor cantidad de huella de carbono (ver **Figura 35**).

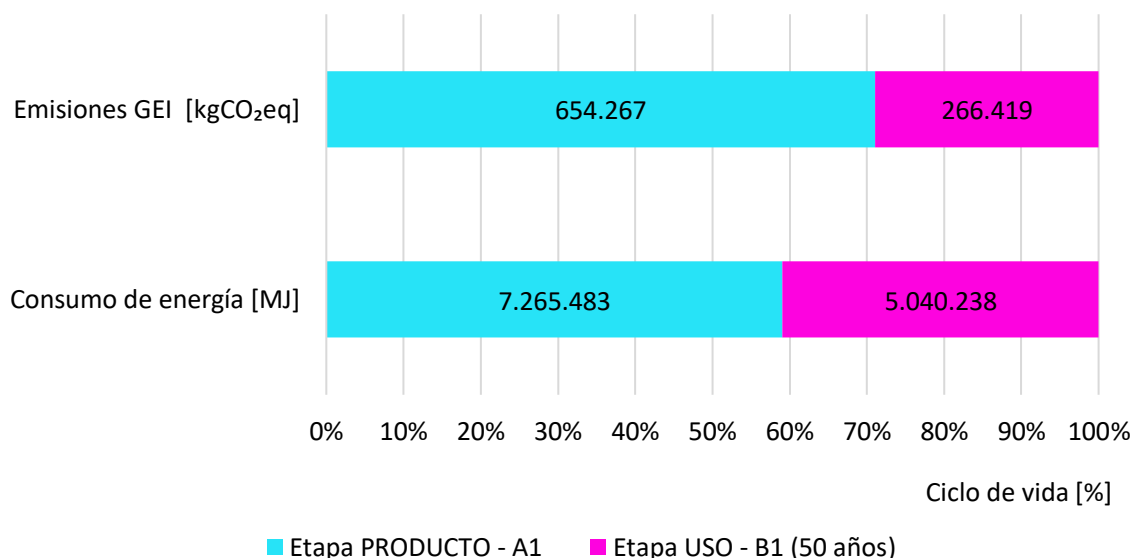
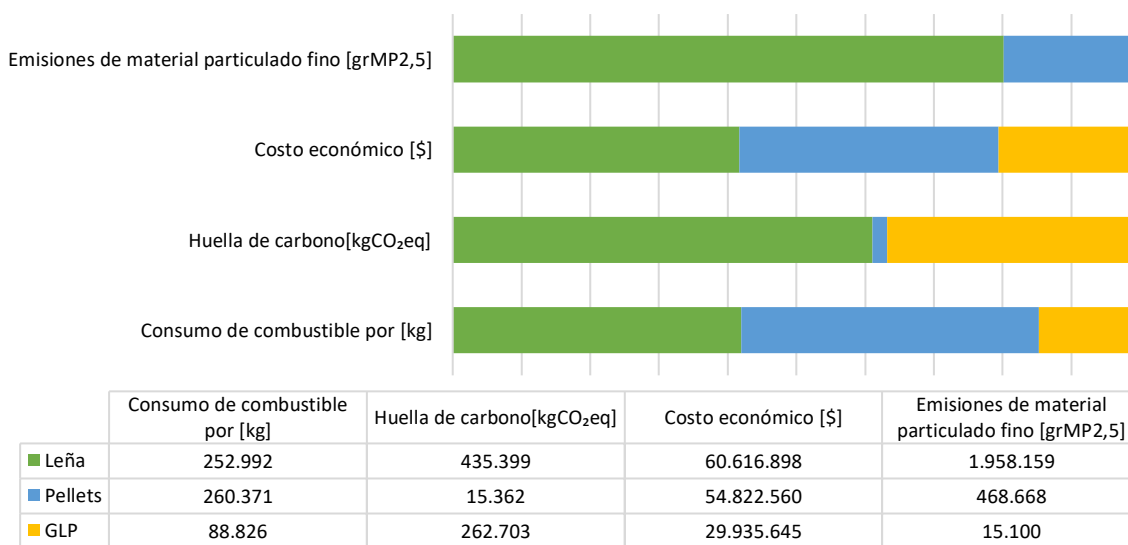


Figura 35. Energía consumida y huella de carbono durante el ciclo de vida de la vivienda.

En la **Figura 35**, se visualiza que en la etapa PRODUCTO, los materiales que componen las envolventes y que son utilizados durante la fase de construcción de una vivienda, emiten el 71% del total de emisiones de huella de carbono y consumen el 59% del total de energía, con lo cual se puede dar cuenta que, en la fabricación de estos, se genera la mayor carga ambiental de la vivienda debido a los procesos utilizados para su obtención (León-Velez y Guillén-Mena 2020). Por ejemplo, el proceso de fabricar poliestireno expandido (material comúnmente utilizado como aislante térmico) consiste en una polimerización para convertir el estireno (materia prima) en gránulos de poliestireno expandible, para ello, se deben aplicar a una mezcla química diversos componentes que permiten esta expansión, a temperaturas del orden de los 220 °C -260 °C (Unión Europea 2009). En todo este proceso, se consume una gran cantidad de energía y se libera una gran cantidad de emisiones GEI al ambiente, lo cual se incrementa, a medida que también aumentan los espesores de las planchas que se utilizan (para profundizar revisar la **Figura 20**).

De igual modo, en la misma **Figura 35** se visualiza que la etapa de USO, corresponde al 29% y 41% del total de las emisiones GEI y consumo de energía respectivamente a lo largo del ciclo de vida de la vivienda. Ambos indicadores, están directamente relacionadas con las mejoras térmicas que se consideran en las envolventes, las cuales favorecen a la demanda de calefacción, y por ende, la demanda de combustible. Por lo tanto, una menor demanda de calefacción, es equivalente a una menor demanda de combustible (revisar **Tabla 22**), pero esto a su vez significa, que una menor demanda de calefacción, también es equivalente a considerar materiales aislantes de mayores espesores y mayores cargas ambientales, lo cual impacta negativamente en la etapa de PRODUCTO.

Por otro lado, respecto a los combustibles considerados en la etapa de USO evaluada en 50 años de vida útil, se demuestra que el pellet es el combustible que emite significativamente menos huella de carbono comparado con la leña y el GLP (con más de 1000% de diferencia), la leña es el más caro desde el punto de vista económico y el GLP es el que emite una menor cantidad de material particulado fino. A modo de ejemplo, se muestran los resultados obtenidos en el caso 2 (ve **Figura 36**). Cabe señalar, que para el cálculo de las emisiones de material particulado fino, se considera leña en estado seco que es lo que exige el PDA de Temuco y Padre las Casas.



Etapa B1 (50 años de vida útil)

Figura 36. Evaluación de los combustibles leña, pellets y GLP para la etapa de USO – B1.

En la **Figura 36**, se observa que la leña, a pesar de ser el combustible mayormente utilizado en la zona centro sur de Chile, debido a prácticas que se transmiten de generación en generación gracias a su fácil obtención (Ministerio de Energía 2012), corresponde al combustible peor evaluado de los tres, en cada uno de los indicadores. Tiene un menor poder calorífico, es decir, que 1 kg de leña, emite menos calor que 1 kg de pellet o GLP, por lo tanto, para calefaccionar una vivienda, se requiere una mayor cantidad de kilos de leña, que kilogramos de pellet o GLP. Esto repercute directamente, en el ámbito económico de las familias que hacen uso de este combustible para calefaccionar y/o cocinar, las cuales, tienen que desembolsar más dinero en la compra de leña para alcanzar la demanda energética de la vivienda. Además, corresponde al combustible que más contamina el ambiente (mayor HC y emisiones de material particulado fino).

Así mismo, el pellet (combustible propuesto como alternativa del gobierno en el “Programa de Recambio de Artefactos a Leña”, para las comunas de Temuco y Padre las Casas (Pereira 2012)), si bien corresponde al combustible con menor huella de carbono, no es el más económico, ni tampoco es el que emite una menor cantidad de material particulado fino (MP2,5). Por lo tanto, se debería reevaluar el PDA y el programa de recambio, respecto al GLP como otra alternativa de recambio ya que es el más económico y el que emite menos material particulado fino.

Capítulo 6: Conclusiones, limitaciones, contribuciones y futuros estudios

En el desarrollo de este capítulo se sintetizarán las principales conclusiones asociadas al estudio realizado y al cumplimiento de los objetivos propuestos, las limitaciones encontradas, las contribuciones de la tesis y futuras líneas de investigación derivadas de ella.

6.1. Conclusiones

El objetivo de esta investigación, se centró en evaluar comparativamente el desempeño ecoeficiente de envolventes térmicas de techo, muro y piso, seleccionadas del Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico del MINVU, de acuerdo a las exigencias del artículo 4.1.10 de la OGUC y el PDA de las comunas de Temuco y Padre las Casas, con la finalidad de prospectar los impactos ambientales, energéticos y económicos alcanzados en el ciclo de vida de una vivienda. Los resultados, permitieron identificar que, al aumentar los espesores entre los diferentes materiales que componen cada una de las envolventes (para alcanzar las exigencias del PDA), se ve favorecida la etapa de USO, ya que disminuyen en un 19,4% la demanda de calefacción, la demanda de combustible, la huella de carbono, y las emisiones de material particulado fino. Sin embargo, se ve perjudicada la etapa de PRODUCTO, ya que aumentan en promedio un 9,4%, la energía contenida, la huella de carbono y el costo económico de los mismos.

Lo anterior es relevante, ya que, al evaluar la vivienda durante su ciclo de vida completo, la etapa de PRODUCTO resultó ser la principal causante de las emisiones de huella carbono y consumo de energía (71% y 59% respectivamente). De este modo, si el gobierno espera cumplir con las metas planteadas, como lo son, por ejemplo, la carbono neutralidad y la ruta energética, las reglamentaciones, no sólo deben considerar indicadores que repercutan de forma positiva en la etapa de USO (como es el caso del PDA), sino que deben adoptar la ecoeficiencia, con un enfoque en el ciclo de vida completo de una vivienda, y que integre, además, cada una de las metas que se esperan alcanzar a nivel país. De lo contrario, siempre se mejorará en un sólo indicador, para cierta etapa del ciclo de vida, pero se empeorarán otros, haciendo el camino cada vez más complicado.

Dentro de este mismo contexto, toma importancia la creación o profundización de herramientas de uso público, que permitan a los diseñadores evaluar viviendas desde las etapas iniciales. En esta

investigación, se utilizó ÁBACO-CHILE, sin embargo, se logró identificar que la plataforma de bien público tiene una base de datos finita (de un solo edificio de referencia), lo que imposibilita evaluar cualquier otro tipo de envolventes. De la misma manera, en los indicadores de ecoeficiencia evaluados, sólo se logró obtener datos para los recursos materiales, sin considerar la mano de obra, ni las máquinas y equipos, que forman parte de una obra de construcción. En este sentido, si se consideraran la energía contenida, huella de carbono y el costo económico de estos recursos, sería aún más relevante el porcentaje de incidencia que tiene la etapa de producto a lo largo del ciclo de vida de una vivienda.

Por otro lado, durante la etapa de USO, el porcentaje de mejora que se obtuvo aplicando el PDA en la demanda de energía que arrojó esta investigación (19,4%), no cumple con las metas planteadas por el gobierno en la Ruta Energética 2018-2022 (30%). Sin embargo, el valor obtenido, permite alcanzar la demanda máxima de calefacción que establecen los Estándares de Construcción Sustentable para Viviendas de Chile (ECSV), para el año 2020 en la zona térmica F, pero hay que recordar, que los ECSV actualmente tienen una aplicación de carácter voluntario en el sector construcción, por lo que no existe comparación con una normativa de carácter obligatoria, o con las metas impuestas por el gobierno.

Otro aspecto relevante de concluir, es que, de los tres combustibles analizados, el GLP, debido a su alto poder calorífico, tiene una mejor capacidad de calefaccionar una vivienda en comparación al pellet y la leña. Además, resultó ser el combustible más económico, y el que emite menos material particulado fino de 2,5 μm de los tres. En este contexto, y considerando que la leña es el principal combustible utilizado en las zonas centro sur de Chile (sobre todo en Temuco y Padre las Casas), una buena posibilidad de recambio de artefactos a leña, sería el de artefactos a GLP, con los cuales, las familias lograrían un ahorro económico de más del 40% en la compra de combustibles para calefaccionar. Este porcentaje es relevante, ya que Padre las Casas corresponde a una comuna mayoritariamente de tipo rural.

Con respecto a lo mencionado, es importante señalar que, entre los artefactos a leña evaluados, las salamandras y las chimeneas corresponden a los mayores contaminantes de material particulado fino de 2,5 μm . Además que, haciendo uso de leña seca, se logra disminuir este contaminante en un 40%, respecto al uso de leña húmeda. De este modo, y considerando el daño que genera en la salud

de las personas el material particulado fino de 2,5 μm , es que toma importancia la urgencia que tiene la implementación de estrategias, que permitan eliminar el uso de leña húmeda y/o cambiar los artefactos que utilizan leña para calefaccionar. Sin embargo, según datos del Ministerio del Medio Ambiente, hasta el 2017, faltando sólo dos años para cumplir algunos de los plazos estipulados en el PDA de Temuco y Padre las Casas, el avance del "Programa de Recambio de Artefactos" era de tan sólo un 10,3% respecto a las metas propuestas, por lo que estaría faltando mayor énfasis de parte del gobierno en este sentido.

En lo que referido a las emisiones de GEI, el combustible más contaminante continúa siendo la leña con un 61%, seguida por GLP con un 37% y el pellet con un 2%. Por lo que el pellet, también es una buena opción de calefacción ecoeficiente, ya que es responsable solamente del 5% de las emisiones de material particulado fino MP2,5 anuales por m^2 , y es el segundo combustible más económico de los tres.

Finalmente, referente al cumplimiento de las hipótesis planteadas, al comparar las exigencias de acondicionamiento térmico del PDA con las de la OGCU, ninguna pudo validarse. En el caso de la primera hipótesis, la cual tiene relación con la etapa de PRODUCTO, se esperaba un aumento del 30% en la energía contenida y la huella de carbono, y de un 10% en el costo económico, obteniendo un aumento del 12,1% de la energía contenida, 8,1% huella de carbono y un 7,8% del costo económico. En lo que respecta a la segunda hipótesis, referida a la etapa de USO, se esperaba que la demanda energética, y la demanda de combustible disminuyeran en un 50%, la huella de carbono en un 25%, y las emisiones de material particulado fino de 2,5 μm en un 60%; lográndose finalmente una disminución promedio del 19,4%.

En consecuencia, de los porcentajes obtenidos, es que nuevamente, se enfatiza en la importancia y urgencia que tiene la elaboración de normativas de carácter obligatorias para el sector construcción, que consideren la ecoeficiencia a lo largo del ciclo de vida completo de los proyectos de edificación, debido al significado que esto tiene no sólo para el medio ambiente, sino que también, para la salud y economía de las personas, tal como se pudo demostrar en esta investigación.

6.2. Limitaciones

Las limitaciones encontradas al momento de desarrollar la tesis, son las siguientes:

- Actualmente, ÁBACO-CHILE es la única plataforma de uso público que existe en Chile, que permite obtener indicadores de ecoeficiencia (energía contenida y huella de carbono). Sin embargo, esta sólo incluye los recursos materiales que forman parte de un presupuesto de construcción, y deja fuera a la mano de obra y las máquinas y equipos, recursos que también son responsables de consumir y emitir energía y huella de carbono respectivamente.
- No existen disponibles Declaraciones Ambientales de Productos (DAP) de origen chileno, que permitan obtener en profundidad el impacto real de los materiales que se utilizan en el sector construcción.
- Finalmente, las reglamentaciones existentes en Chile, no integran los indicadores de ecoeficiencia que fueron analizados en esta investigación, lo que hace más difícil evaluar los proyectos de forma global.

6.3. Contribuciones y futuros estudios

La principal contribución de la investigación está centrada en dar a conocer que la aplicación de una nueva reglamentación térmica, permite obtener viviendas más ecoeficientes, respecto a una reglamentación anterior. Sin embargo, las modificaciones no logran alcanzar los objetivos propuestos en la misma, ni los propuestos a nivel país. En este sentido, es clave que al momento de proponer nuevas reglamentaciones o modificaciones a las existentes, integren la ecoeficiencia, es decir indicadores energéticos, ambientales, económicos y sociales, con un enfoque de AVC y en etapas temprana (la etapa de diseño es crucial, ya que 80% del impacto ambiental se determina en la etapa de diseño)

La investigación logró identificar que, durante la etapa de PRODUCTO, una vivienda consume y emite la mayor cantidad de energía y huella de carbono a lo largo de su ciclo de vida, y que, en la etapa de USO, el combustible más ecoeficiente resultó ser el GLP, ya que integra el indicador económico, las emisiones de material particulado fino y las emisiones de huella de carbono.

Respecto de las líneas de investigación que pueden desarrollarse basadas en esta tesis, se proponen las siguientes:

- Análisis comparativo de ecoeficiencia de envolventes térmicas, para dar cumplimiento a diversos PDA aplicados en Chile considerando el ciclo de vida de las viviendas.
- Análisis comparativo de los indicadores de energía contenida y huella de carbono de envolventes térmicas, considerando todos los recursos involucrados en la construcción de viviendas. Esto es, recursos materiales, mano de obra y maquinarias.
- Análisis comparativo de ecoeficiencia de envolventes térmicas, para dar cumplimiento a diversos PDA aplicados en Chile considerando casos de estudio en situación reales.
- Análisis de los costos de ciclo de vida aplicados a una vivienda en Chile, a través de la evaluación de materiales de aislantes naturales.

Referencias bibliográficas

ÁBACO-CHILE, 2020. ABACO Chile – abaco. *abacochile.cl* [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020].
Disponible en: <http://abacochile.cl/>.

ACOSTA, D., 2009. Arquitectura y construcción sostenibles: CONCEPTOS, PROBLEMAS Y ESTRATEGIAS. *DEARQ Revista de Arquitectura de la Universidad de los Andes*, no. 4. ISSN 20113188. DOI <https://doi.org/10.18389/dearq4.2009.02>.

AENOR, 2012. UNE-EN 15978: Sostenibilidad en la construcción. Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Métodos de cálculo. . S.l.:

ÁGUILA, E., SOHR, R., PARKER, C. y ZANELLI, J., 2011. *Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático*. S.l.: s.n. ISBN 9789563031188.

AGUIRRE, P., 2015. *Sustentabilidad: Principios y prácticas Vol.1* [en línea]. S.l.: s.n.
ISBN 9783736990562. Disponible en:

[http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4494/1/libro sustentabilidad Vol_1.pdf](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/4494/1/libro_sustentabilidad_Vol_1.pdf).

AIR, I., 2018. *2018 World Air Quality Report PM2.5 Ranking*. S.l.: s.n.

ALARCÓN, P., 2011. Movilidad urbana, consumo de energía y calidad del aire. *Letras Verdes, Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, no. 8. ISSN 1390-6631. DOI 10.17141/letrasverdes.8.2011.893.

ALAVEDRA, P., DOMÍNGUEZ, J., GONZALO, E. y SERRA, J., 1997. La construcción sostenible: el estado de la cuestión. *Informes de la Construcción*, vol. 49, no. 451, pp. 41-47. ISSN 0020-0883. DOI 10.3989/jc.1997.v49.i451.936.

ALOMÁ, E. y MALAVER, M., 2007. Energía Y Teorema De Carnot. *Educere* [en línea], vol. 11, no. 38, pp. 477-487. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3155320>.

ALDOMONTE, H., COVIELLO, M. y LUTZ, W.F., 2003. Recursos naturales e infraestructura. . S.l.:

ARBALLO, B.D., KUCHEN, E. y CHUK, D., 2019. Optimización de la eficiencia energética aplicando confort térmico adaptativo en un edificio de oficinas público en San Juan-Argentina. *Revista Hábitat Sustentable* [en línea], vol. 9, no. 1, pp. 58-67. Disponible en: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.01.05>.

ARMAS M., R., 2012. Declaración de la Academia Chilena de Medicina sobre la contaminación atmosférica de Santiago. *Revista Chilena de Pediatría*, vol. 83, no. 5, pp. 505-506. ISSN 03704106. DOI 10.4067/S0370-41062012000500016.

AUTODESK, 2021. Preparación del análisis de cargas de calefacción y refrigeración | Productos Revit 2021 | Autodesk Knowledge Network. [en línea]. [Consulta: 3 febrero 2021]. Disponible en: https://knowledge.autodesk.com/es/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2021/ESP/Revit-Analyze/files/GUID-3C15EA1E-9372-4FD7-95DF-296E9647E23E-htm.html?us_oa=akn-us&us_si=e7e1497b-963a-4ee7-af52-cafd2a7c2798&us_st=calefacción.

AYENSA SEVILLA, J.I., 2013. *Herramienta de evaluación energética en edificios* [en línea]. S.l.:

Universitat Politècnica de València. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/37897>.

BAIXAS, J.I., 2012. Envolventes: La piel de los edificios. *Arq*, no. 82, pp. 2-5. ISSN 07160852.

BASTANTE-CECA, M.J., VIÑALES-CEBOLLA, R., TORREGROSA-LÓPEZ, J.I., LO-IACONO-FERREIRA, V.G. y CAPUZ-RIZO, S., 2011. ¿Es la Huella De Carbono el mejor indicador ambiental, o simplemente el más sencillo? *XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos* [en línea], no. July. Disponible en: http://www.aepro.com/index.php/en/repository/congresos/congresos_huesca2011/congresos_huesca2011_08/ES-LA-HUELLA-DE-CARBONO-EL-MEJOR-INDICADOR-AMBIENTAL-O-SIMPLEMENTE-EL-MÁS-SENCILLO/.

BERMEJO GOMEZ DE SEGURA, R., 2014. Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis. *Del desarrollo Sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis* [en línea]. S.l.: Disponible en: http://publ.hegoa.efaber.net/assets/pdfs/315/Sostenibilidad_DHL.pdf?1399365095.

BERMEJO GÓMEZ DE SEGURA, R., ARTO OLAIZOLA, I., HOYOS RAMOS, D. y GARMENDIA OLEAGA, E., 2010. Menos es más: Del desarrollo sostenible al decrecimiento sostenible. *Cuadernos de trabajo Hegoa = Lan Koadernoak = Working papers*, no. 52, pp. 1-28. ISSN 2340-3187.

BREEAM, 2020. Breeam. El Certificado de Construcción Sostenible. [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020]. Disponible en: <https://breeam.es/>.

BRUNDTLAND, G.H., 1987. Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. *Documentos de las Naciones, Recolección de un ...* [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Informe+de+la+comision+mundial+sobre+el+medio+ambiente+y+el+desarrollo.+nuestro+futuro+comun#5>.

BSI, 2011. PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. British Standards Institution, London. . S.l.:

BUSTAMANTE, W., 2009. Guía de Diseño para la Eficiencia Energética en la Vivienda Social. *MINVU*.

S.I.:

BUTLER, J.H. y MONTZKA, S.A., 2020. The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI). *Noaa* [en línea]. Disponible en: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/>.

CANTÚ, P., 2015. Ecoeficiencia y sustentabilidad. *Ciencia UANL*, vol. 71, no. January, pp. 6. DOI 2007-1175.

CÁRDENAS, J.P., MUÑOZ, E., RIQUELME, C. y HIDALGO, F., 2015. Simplified life cycle assessment applied to structural insulated panels homes Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels). *Revista Ingeniería de Construcción* [en línea], vol. 30, pp. 33-38. ISSN 07162952. DOI 10.1016/j.jpsychires.2010.04.005. Disponible en: www.ricuc.cl.

CARRETERO, A. y GARCÍA, J.M., 2012. Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora. *AENOR*. S.I.:

CCHC, 2019. El Sector de la Construcción ante el Desafío Climático Global. . S.I.:

CDT, 2019. Usos de energía de los Hogares Chile 2018. . S.I.:

CDT y CCHC, 2015. MANUAL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO CRITERIOS DE INTERVENCIÓN. . S.I.:

CELLURA, M., GUARINO, F., LONGO, S. y TUMMINIA, G., 2018. Climate change and the building sector: Modelling and energy implications to an office building in southern Europe. *Energy for Sustainable Development* [en línea], vol. 45, pp. 46-65. [Consulta: 8 septiembre 2020]. ISSN 23524669. DOI 10.1016/j.esd.2018.05.001. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S097308261731431X>.

CERECEDA, F., DÍAZ, L. y SEEGER, M., 2020. El Covid-19 y la Contaminación. Condiciones invernales de baja temperatura favorecerían su propagación. *InduAmbiente* [en línea], no. 164, pp. 48-52. [Consulta: 23 diciembre 2020]. Disponible en: <https://www.induambiente.com/destacamos/el-covid-19-y-la-contaminacion>.

CERRILLO, S.R., 2017. Carbon footprint calculation model for the Mexican food equivalent system.

Jonnpr, vol. 2, no. 6, pp. 226-232. DOI 10.19230/jonnpr.1240.

CHÁVEZ, C., GÓMEZ, W. y BRICEÑO, S., 2009. Costo-Efectividad de Instrumentos Económicos para el control de la Contaminación. El Caso del Uso de Leña*. *CUADERNOS DE ECONOMÍA*, vol. 46, pp. 197-224.

CITEC UBB, 2013. *Manual de hermeticidad al aire de edificaciones*. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796.

CITECUBB, 2012. «Evaluación de Estrategias de Diseño Constructivo y de Estándares de Calidad Ambiental y Uso Eficiente de Energía en Edificaciones Públicas, Mediante Monitorización de Edificios Construidos». *Manual de diseño pasivo y eficiencia energética en edificios públicos* [en línea]. S.l.: Disponible en: [http://www.arquitecturamop.cl/centrodocumental/Documents/Manual-de-diseno-pasivo-y-eficiencia-energetica-en-edif Publicos_Parte1.pdf](http://www.arquitecturamop.cl/centrodocumental/Documents/Manual-de-diseno-pasivo-y-eficiencia-energetica-en-edif-Publicos_Parte1.pdf).

COLOBALLES, N.V.S., 2016. El control de la contaminación atmosférica en México (1970-1980): Tensiones y coincidencias entre el sector salud y los industriales. *Dynamis*, vol. 37, no. 1, pp. 187-209. ISSN 02119536. DOI 10.4321/S0211-95362017000100009.

CONAMA, 2006. Planes de prevención y de descontaminación. . S.l.:

DÁVALOS, A., 2013. Chile y el carbono: La mitigación para un desarrollo sostenible. *Hormigón sustentable: Una nueva mirada a los materiales de construcción*, pp. 19-22.

DEL ROSARIO ARGÚELLO MÉNDEZ, T. y BURGOS, A.C., 2008. Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10 × 10 Con Techo-Chiapas del CYTED. *Informes de la Construcción*, vol. 60, no. 509, pp. 25-34. ISSN 00200883.

DIMOUDI, A. y TOMPA, C., 2008. Energy and environmental indicators related to construction of office buildings. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 53, no. 1-2, pp. 86-95. ISSN 09213449. DOI 10.1016/j.resconrec.2008.09.008.

EMOL, 2020. ¿Es Temuco la ciudad más contaminada del Mundo?: Expertos y autoridades analizan

polémico artículo de medio especializado | Emol.com. 23 de Julio de 2020 | 08:01 | Por Daniela Toro, *Emol* [en línea]. [Consulta: 15 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2020/07/23/992757/temuco-contaminacion-analisis-expertos.html>.

ENAP, 2020. Tabla de precios de paridad - Inversionistas y Mercado - ENAP. [en línea]. [Consulta: 7 diciembre 2020]. Disponible en: https://www.enap.cl/pag/66/1295/tabla_de_precios_de_paridad.

ESPÍNDOLA, C. y VALDERRAMA, J.O., 2012. Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Informacion Tecnologica*, vol. 23, no. 1, pp. 163-176. ISSN 07168756. DOI 10.4067/S0718-07642012000100017.

ETSA, 2020. Quiénes Somos. [en línea]. [Consulta: 1 febrero 2021]. Disponible en: <http://www.etsa.cl/quienes-somos/>.

FITA, S., 2018. Residuos agrícolas para el aislamiento térmico y acústico en la construcción. *Revista Ecoconstrucción*, pp. 26-31.

FRANCO, J.F., 2012. Contaminación atmosférica en centros urbanos. desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio bogotá. En: Crecimiento económico y calidad de aire, *Revista Escuela de Administración de Negocios*, no. 72, pp. 193-204. ISSN 0120-8160.

FUENTES, F; GARCÍA, CARLOS J; PINTO A, F., 2013. *Energía y Ciclo Económico en la Economía Chilena* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en: <http://fen.uahurtado.cl/wp-content/uploads/2010/07/version-energia-paper-EC-revisada.pdf>.

GARCÍA SARDINA, G., 2013. *Huella de Carbono - Carbon Footprint* [en línea]. 2013. S.l.: s.n. Disponible en: http://www.aec.es/c/document_library/get_file?uuid=c25fc97e-13e8-47b1-bd9d-1d2a28a50e9f&groupId=10128.

GBCE, 2020. Herramientas de Evaluación de Edificios | www.gbce.es. *gbce.es* [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020]. Disponible en: <http://www2.gbce.es/es/pagina/herramientas-de-evaluacion-de-edificios>.

GOBIERNO DE CHILE, 2020. Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile. Actualización 2020. [en línea]. S.l.: Disponible en: https://www4.unfccc.int/sites/ndcstaging/PublishedDocuments/Chile/First/NDC_Chile_2020_español.pdf.

GONZÁLEZ VALLEJO, P., 2018. Herramienta para la estimación de costes económicos y ambientales en el ciclo de vida de edificios residenciales. Fase de construcción. *Revista Hábitat Sustentable*, vol. 8, no. 2, pp. 32-51.

GREEN BUILDING COUNCIL, U., 2020. LEED rating system | U.S. Green Building Council. [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.usgbc.org/leed>.

GUDYNAS, E., 2011. Desarrollo y sustentabilidad ambiental: diversidad de posturas, tensiones persistentes. *La Tierra no es muda: diálogos entre el desarrollo sostenible y el postdesarrollo*, pp. 69-96.

HAMMOND, G. y JONES, C., 2011. A BSRIA Guide. Embodied Carbon: The Inventory of Carbon and Energy. *Ice* [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.ihsti.com/tempimg/57c152b-ENVIRO2042201160372.pdf%0Awww.bath.ac.uk/mech-eng/sert/embodied%0A>.

HARO-MARTÍNEZ, A.A. y TADDEI-BRINGAS, I.C., 2014. Sustentabilidad y economía: la controversia de la valoración ambiental. *Economía Sociedad y Territorio*, vol. 2014. ISSN 14058421. DOI 10.22136/est002014395.

HERNANDEZ, H., 2017. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA VIVIENDA PARTIR DE LA REGLAMENTACIÓN EN AISLAMIENTO TÉRMICO A SOCIAL: ANÁLISIS DE MEJORAS TÉRMICA. *Revista ingeniería al día, U Central* [en línea], Disponible en: http://revistaingenieriaaldia.ucecentral.cl/rev_4/art_7.pdf.

IEA, 2020. Global Energy Review 2020. *Global Energy Review 2020*. S.l.:

INDA TELLO, CLAUDIA MIRELLA; VARGAS-HERNÁNDEZ, J.G., 2012. Ecoeficiencia Y Competitividad: Tendencias Y Estrategias Con Metas Comunes. En: Notas en Red: Comentarios para complementar Marco Téorico o Estado del Arte., *Ingeniería de Recursos Naturales y del*

Ambiente, no. 11, pp. 33-40. ISSN 1692-9918.

INE, 2018. INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Junio / 2018. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>.

INN, 2007. *Norma Chilena NCh853-2007. Acondicionamiento térmico-Envolvente térmica de edificios-Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas* [en línea]. 2007. S.l.: s.n. ISBN 3410029613. Disponible en: www.inn.cl.

INN, 2008. *NCh 1079 - 2008 "Arquitectura y construcción - Zonificación climático habitacional para Chile y recomendaciones para el diseño arquitectónico"*. 2008. S.l.: s.n.

IPCC, 2013. Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tigno. . Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América:

IPCC, 2018. GLOBAL WARMING OF 1.5 ° C an IPCC special report on the impacts of global. *Ipcc* [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/summary-for-policy-makers/>.

IPINZA, R. y BARROS, S., 2011. El cambio climático los bosques y la silvicultura. *Instituto Forestal*. Santiago:

ISO 14040, 2006a. BS EN ISO 14040: 2006 Gestión medioambiental. Evaluación del ciclo de vida. Principios y marco: normas europeas. *Online Browsing Platform (OBP)* [en línea]. [Consulta: 8 septiembre 2020]. Disponible en: https://www.en-standard.eu/bs-en-iso-14040-2006-environmental-management-life-cycle-assessment-principles-and-framework/?gclid=CjwKCAjw19z6BRAYEiwAmo64LYMvRB8j9tbDWrM8f59GTuDQ0igPfZAxyMme4zeQhk2wP4gp9pVUsxoCIL4QAvD_BwE.

ISO 14040, 2006b. ISO 14040:2006(es), Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia. *ISO 14040:2006(es) Gestión ambiental — Análisis del ciclo de vida — Principios y marco de referencia* [en línea]. [Consulta: 8 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>.

ISO 14045, 2012. *Gestión ambiental. Evaluación de la ecoeficiencia de los sistemas de productos. Principios, requisitos y directrices. Gestión*. 2012. S.l.: s.n.

ISO 50001, 2011, 2011. ISO 50001:2011(es), Sistemas de gestión de la energía — Requisitos con orientación para su uso. *Online Browsing Platform (OBP)* [en línea]. [Consulta: 26 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:50001:ed-1:v1:es>.

ITEC, 2020. BEDEC - Bases de datos con información de productos de la construcción. *Itec.es* [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020]. Disponible en: <https://itec.es/servicios/bedec/>.

KAIRIES-ALVARADO, D., MUÑOZ-SANGUINETTI, C. y MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., 2021. Contribution of energy efficiency standards to life-cycle carbon footprint reduction in public buildings in Chile. *Energy and Buildings* [en línea], vol. 236, pp. 110797. ISSN 03787788. DOI 10.1016/j.enbuild.2021.110797. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110797>.

KAIRIES, D., 2020. *IMPACTO DE LA INCORPORACIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA DISMINUCIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO DE EDIFICIOS PÚBLICOS EN CHILE DURANTE SU ETAPA DE OCUPACIÓN*. S.l.: s.n.

LARROUYET, M.C., 2015. Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta. *Repositorio Institucional Digital de Acceso Abierto de la Universidad Nacional de Quilmes* [en línea]. S.l.: Disponible en: https://ridaa.unq.edu.ar/bitstream/handle/20.500.11807/154/TFI_2015_larrouyet_003.pdf?sequence=1.

LEAL, J., 2005. Medio Ambiente y Desarrollo: E coeficiencia: marco de análisis, indicadores y experiencias. *CEPAL*. S.l.:

LECUONA NEUMANN, A., IZQUIERDO MILLÁN, M. y RODRÍGUEZ AUMENTE, P.A., 2005. Research and environment impact of buildings. The energy. *Informes de la Construcción*, vol. 57, no. 498. ISSN 0020-0883. DOI 10.3989/ic.2005.v57.i498.477.

LEÓN-VELEZ, A. y GUILLÉN-MENA, V., 2020. Energía contenida y emisiones de CO2 en el proceso de

fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construido*, vol. 20, no. 3, pp. 611-625. ISSN 1415-8876. DOI 10.1590/s1678-86212020000300448.

LEY 19300, 1994. *Ley 19300 APRUEBA LEY SOBRE BASES GENERALES DEL MEDIO AMBIENTE*. 1994. S.l.: s.n.

LLAMAS, P.L., 2009. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEDIO AMBIENTE. *Economía y Medio Ambiente*, no. 847, pp. 75-92.

MARRERO, M., WOJTASIEWICZ, M., MARTÍNEZ-ROCAMORA, A., SOLÍS-GUZMÁN, J. y ALBARODRÍGUEZ, M.D., 2020. BIM-LCA integration for the environmental impact assessment of the urbanization process. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 10, pp. 1-24. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su12104196.

MARZOUK, M., EL-ZAYAT, M. y ABOUSHADY, A., 2017. Assessing environmental impact indicators in road construction projects in developing countries. *Sustainability (Switzerland)*, vol. 9, no. 5. ISSN 20711050. DOI 10.3390/su9050843.

MDS, M. de D.S., 2017. Informe de diagnóstico e implementación de la agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible en Chile. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://www.chileagenda2030.gob.cl/storage/docs/Diagnostico-Inicial_2.0_Agenda2030-ODS_2017.pdf.

MEDIAVILLA, M., 2012. Una visión global de la crisis energética • Ecologistas en Acción. *El Ecologista* [en línea], no. 73, pp. 30-34. [Consulta: 16 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.ecologistasenaccion.org/8042/una-vision-global-de-la-crisis-energetica/>.

MERCADER MOYANO, M., CAMPOREALE, P., & CÓZAR-CÓZAR, E., 2019. Evaluación de impacto ambiental mediante la introducción de indicadores a un modelo bim de vivienda social. *Revista Hábitat Sustentable* [en línea], vol. 9, no. 2, pp. 78-93. Disponible en: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.07>.

MINISTERIO DE ENERGÍA, 2012. *LEY 20586 REGULA LA CERTIFICACIÓN DE LOS ARTEFACTOS PARA COMBUSTIÓN DE LEÑA Y OTROS PRODUCTOS DENDROENERGÉTICOS*. [en línea]. 2012. S.l.: s.n.

Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1040103>.

MINISTERIO DE ENERGÍA, 2015a. Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera. . S.l.:

MINISTERIO DE ENERGÍA, 2015b. Política de uso de la leña y sus derivados para calefacción. *Gobierno de Chile*. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://www.minenergia.cl/archivos_bajar/2016/03/politica_lena_2016_web.pdf.

MINISTERIO DE ENERGÍA, 2018. Ruta Energética 2018-2022 Liderando la modernización energética con sello ciudadano. . S.l.:

MINISTERIO DE ENERGÍA, 2020. Plan de acción de eficiencia energética 2020. [en línea]. S.l.: Disponible en: <http://www.amchamchile.cl/UserFiles/Image/Events/octubre/energia/plan-de-accion-de-eficiencia-energetica2020.pdf>.

MINVU, M. de V. y U.-, 2014. *Listado Oficial de Soluciones Constructivas para Acondicionamiento Térmico*. 2014. S.l.: s.n.

MINVU, M. de V. y U.-, 2018a. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo I Salud y bienestar*. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796.

MINVU, M. de V. y U.-, 2018b. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo III Agua*. S.l.: s.n. ISBN 9789569432460.

MINVU, M. de V. y U.-, 2018c. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo IV Materiales Y Residuos*. . S.l.:

MINVU, M. de V. y U.-, 2018d. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo V Impacto Ambiental*. S.l.: s.n. ISBN 9788578110796.

MINVU, M. de V. y U.-, 2018e. *Estándares de construcción sustentable para viviendas en Chile. Tomo II Energía*. . Santiago:

MINVU, M. de V. y U.-, 2019. *Estándares de construcción sustentable para viviendas de Chile. Tomo*

VI Entorno Inmediato. . S.l.:

MINVU, M. de V. y U., 1992. *ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIONES*. 1992. S.l.: s.n.

MINVU, M. de V. y U., 2006. Reglamentación Térmica. Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones Artículo 4.1.10. . S.l.:

MINVU, M. de V. y U., 2020. Observatorio Urbano – Ministerio de Vivienda y Urbanismo. *Estadísticas Habitacionales* [en línea]. [Consulta: 12 octubre 2020]. Disponible en: <https://www.observatoriourbano.cl/>.

MMA, 2014. Planes de Descontaminación Atmosférica. Estrategia 2014-2018. *Gobierno de Chile* [en línea], vol. Santiago., pp. 1-10. Disponible en: <http://airechile.mma.gob.cl/download/Plan-Descontaminacion-Atmosferica-2014-2018.pdf>.

MMA, 2020a. APRUEBA BASES Y ANEXOS DE POSTULACION DEL IPROGRAMA DE RECAMBIO DE ARTEFACTOS A LENA, PARA BENEFICIARIOS DEL SUBSIDIO TÉRMICO DE VIVIENDAS DEL SERVIU AÑOS 2015- 2017 DE LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS--2020 ". . S.l.:

MMA, 2020b. Estrategia climática de largo plazo de Chile: Mesa Edificación y Vivienda (Ciudades). Mitigación. . S.l.:

MMA, Ministerio del Medio Ambiente -, 2014. Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Tercera comunicación nacional. . S.l.:

MMA, M. del M.A., 2015. ESTABLECE PLAN DE DESCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA POR MP2,5, PARA LAS COMUNAS DE TEMUCO Y PADRE LAS CASAS ACTUALIZACIÓN DEL PLAN DE DESCONTAMINACIÓN POR MP10, PARA LAS MISMAS COMUNAS. *Biblioteca del Congreso Nacional*, pp. 17-20.

MMA, M. del M.A., 2011. *Decreto 12. ESTABLECE NORMA PRIMARIA DE CALIDAD AMBIENTAL PARA MATERIAL PARTICULADO FINO RESPIRABLE MP 2,5*. 2011. S.l.: s.n.

MMA, M. del M.A., 2013. *Decreto 20. ESTABLECE NORMA DE CALIDAD PRIMARIA PARA MATERIAL*

PARTICULADO RESPIRABLE MP10, EN ESPECIAL DE LOS VALORES QUE DEFINEN SITUACIONES DE EMERGENCIA Y DEROGA DECRETO N° 59, DE 1998, DEL MINISTERIO SECRETARÍA GENERAL DE LA PRESIDENCIA. 2013. S.l.: s.n.

MMA, M. del M.A., 2016. Guía de calidad del aire y educación ambiental. *Ministerio del Medio Ambiente- Gobierno de Chile. S.l.:*

MMA, M. del M.A., 2019a. PROCESO ELABORACIÓN PARTICIPATIVA ESTRATEGIA CLIMÁTICA DE LARGO PLAZO PARA CHILE. . S.l.:

MMA, M. del M.A., 2019b. Quinto Reporte del Estado del Medio Ambiente. *Ministerio del Medio Ambiente- Gobierno de Chile. S.l.:*

MÜLLER, KASPAR; STURM, A., 2001. Standardized Eco-Efficiency Indicators. Report 1: concept paper. . S.l.:

MUNICIPALIDAD DE PADRE LAS CASAS, 2020. Plan de Desarrollo Comunal, PLADECO de la comuna de Padre Las Casas para los años 2020-2025. . S.l.:

MUNICIPALIDAD DE TEMUCO, 2019. PLAN LOCAL DE CAMBIO CLIMÁTICO COMUNA DE TEMUCO. . S.l.:

MUÑOZ SANGUINETTI, C., 2013. *Estudio de la energía incorporada y emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de viviendas en Chile. S.l.: s.n.*

NASA, 1998. NASA GISS: Science Briefs: Greenhouse Gases: Refining the Role of Carbon Dioxide. [en línea]. [Consulta: 12 septiembre 2020]. Disponible en: https://www.giss.nasa.gov/research/briefs/ma_01/.

NAVARRO, C., 2017. *Análisis normativo de la construcción sostenible : especial referencia a la eficiencia energética . Caso práctico : Estimación de costes de una vivienda sostenible. S.l.: Universitat Politècnica de València.*

OBSERVATORIO DE TENDENCIA FUTURO 360°, 2018. Economía verde y ecoeficiencia: paradigmas para la sostenibilidad. *Mercatec* [en línea], Disponible en:

<http://revistas.esumer.edu.co/index.php/merc/article/view/142/160>.

OMM, O.M.M., 2014. *Sobre Los Gases De Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2016*. 2014. S.l.: s.n.

OMM, O.M.M., 2019. Boletín de la omm sobre los gases de efecto invernadero. . S.l.:

OMS, O.M. de la S., 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. *Oms*. S.l.:

ONU, 1987. Protocolo de Montreal Relativo a las Substancias que Agotan la Capa de Ozono. Serie de Tratados de las Naciones Unidas vol. 1522, nº 1 - 26369. [en línea]. S.l.: Disponible en: https://treaties.un.org/doc/Publication/UNTS/Volume_1522/volume-1522-I-26369-English.pdf.

ONU, 1992. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 1992. . S.l.:

ONU, 1998. Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. . S.l.:

ONU, 2015. Acuerdo de París. *Cooperativismo & Desarrollo*. S.l.:

OPS, O.P. de la salud, 2019. Las ENT de un vistazo: Mortalidad por enfermedades no transmisibles y prevalencia de sus factores de riesgo en la Región de las Américas. *Organización Panamericana de la salud, Washington, D.C* [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/51752>.

PALMA, A., 2019. SERIE INFORME ECONÓMICO Chile frente al cambio climático. . S.l.:

PALOMO, R., 1997. Programa de Control de Emisiones Vehiculares y la contaminación atmosférica. *Economía y Sociedad*, vol. 1, no. 3, pp. 91-101.

PASTÉN, C., 2012. Chile, energía y desarrollo Chile, energy and development. *Obras y Proyectos*, vol. 11, pp. 28-39. ISSN 0718-2813. DOI 10.4067/S0718-28132012000100003.

PENELA, A., GARCÍA-NEGRO, M. y QUESADA, J., 2009. El Mc3 Una Alternativa Metodológica Para

Estimar La Huella Corporativa Del Carbono (Hcc). *Desarrollo local sostenible*, vol. 2, no. 5. ISSN 1988-5245.

PEREIRA, A.M., 2012. *EVALUACIÓN TÉCNICO - ECONÓMICA DE ALTERNATIVAS A LA CALEFACCIÓN RESIDENCIAL A LEÑA EN CIUDADES DE LA ZONA CENTRO-SUR DE CHILE*. S.l.: s.n.

PIÑEROS, D.M., ALICIA, C., MORENO, P. y ARISTIZÁBAL, A.J., 2017. Inventario de gases efecto invernadero en la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (Utadeo) Inventory of greenhouse gases at the Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (Utadeo). *Mutis* [en línea], vol. 7, no. 2, pp. 44-58. DOI 10.21789/22561498.1252. Disponible en: <https://doi.org/10.21789/22561498.1252%0Ahttps://doi.org/10.21789/22561498.1252%0Ahttps://doi.org/10.21789/22561498.1252>.

POCH, 2008. INVENTARIO NACIONAL DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO. . S.l.:

PONCE KRESS, J.R., 2017. Propuesta para el manejo ecoeficiente de leña en la agroindustria del cardamomo y su contribución al desarrollo rural. *Revista Naturaleza, Sociedad y Ambiente*, vol. 4, no. 1, pp. 1-17. ISSN 2313-786X. DOI 10.37533/cunurori.v4i1.19.

POVEDA, M., 2007. EFICIENCIA ENERGÉTICA: RECURSO NO APROVECHADO. . S.l.:

QUEZADA, R., HSIEH, T. y VALDERRAMA, J.O., 2013. Determinación de la huella del carbono mediante el método compuesto de las cuentas contables (MC3) para una empresa vitivinícola en Chile. *Informacion Tecnologica*, vol. 24, no. 4, pp. 3-14. ISSN 07168756. DOI 10.4067/S0718-07642013000400002.

QUISPE, C., 2016. *Análisis de la Energía Incorporada y emisiones de CO2 Aplicado a Viviendas Unifamiliares de Eficiencia Energética* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: <https://wwaie.webs.upc.edu/maema/wp-content/uploads/2016/10/Quispe-Gamboa-Claudia-Nataly.pdf>.

REHAU, 2019. Engineering progress Enhancing lives.Ventanas para toda la vida.Aberturas de PVC para obras nuevas y renovaciones. . S.l.:

- RINCÓN, E., 2011. CÁLCULO DE INDICADORES DE ECOEFICIENCIA PARA DOS EMPRESAS LADRILLERAS MEXICANAS. *Revista internacional de contaminación ambiental*, vol. 27, no. 4, pp. 333-345.
- ROCHA, L. y AZEVEDO, P.S., 2016. Ecoeficiência e gestão do design: conceitos para proposta de programa de gestão ambiental para a Universidade Federal do Maranhão - UFMA. *Design e Tecnologia*, vol. 6, no. 11, pp. 11. ISSN 2178-1974. DOI 10.23972/det2016iss11pp11-21.
- RODRÍGUEZ, L.A., REY, J.J., HERRERA, A.B., CASTRO, H., NIEDERBACHER, J., VERA, L.M., CALA, L.L. y BOLÍVAR, F., 2010. Prevalencia de síntomas respiratorios indicativos de asma y asociación con contaminación atmosférica en preescolares de Bucaramanga, Colombia. *Biomédica*, vol. 30, pp. 15-22.
- ROMÁN A., O., PRIETO, M.J. y MANCILLA, P., 2004. Contaminación atmosférica y daño cardiovascular. *Revista Medica de Chile*, vol. 132, no. 6, pp. 761-767. ISSN 00349887. DOI 10.4067/s0034-98872004000600014.
- RONDÓN TORO, E. y NAREA, M.S., 2012. Documento de proyecto Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). . S.I.:
- RUÍZ, Y.R., DOMÍNGUEZ, E.R.R., BERRIEL, S.S., HERNÁNDEZ, L.C., MARTIRENA, J.F. y SUPPEN, N., 2017. Análisis de ecoeficiencia de la producción de cementos de bajo carbono mediante la sustitución de clinker. *Revista Centro Azúcar* [en línea], vol. 44, pp. 77-88. Disponible en: <http://centroazucar.uclv.edu.cu>.
- SCHILLER, S. de y EVANS, J.M., 2005. Revista de la construcción. *Revista de la Construcción* [en línea], vol. 4, no. 1, pp. 5-12. ISSN 0717-7925. Disponible en: www.redalyc.org/pdf/1276/127619365001.pdf <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127652705003>.
- SCHONSTEINER, J. y HERVÉ, D., 2019. Informe anual sobre derechos humanos en Chile 2019. *Centro de Derechos Humanos de la Universidad Diego Portales*. Santiago de Chile:
- SENG, B., MAGNIONT, C. y LORENTE, S., 2019. Characterization of a precast hemp concrete. Part I: Physical and thermal properties. *Journal of Building Engineering* [en línea], vol. 24, no. June,

pp. 0-1. ISSN 23527102. DOI 10.1016/j.jobe.2018.07.016. Disponible en:
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.07.016>.

SICAM, I., 2015. Capítulo 1: Fuentes de Área: Combustión Residencial de Leña. Actualización del inventario de emisiones y modelación de contaminantes de Concepción Metropolitano, año base 2013. . S.l.:

SII, 2003. NUEVA TABLA DE VIDA UTIL DE LOS BIENES FISICOS DEL ACTIVO INMOVILIZADO. [en línea]. [Consulta: 18 noviembre 2020]. Disponible en:
http://www.sii.cl/pagina/valores/bienes/tabla_vida_enero.htm.

SIMAPRO, 2020. SimaPro | El software LCA líder en el mundo. *simapro.com* [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020]. Disponible en: <https://simapro.com/>.

SINCA, 2011. Guía metodológica inventario de emisiones atmosféricas: M11 Metodología SINCA 2011. Sistema Nacional de Información Ambiental, Ambiosis S.A. . S.l.:

SINIA, 2019. I-CA10 . EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO FINO (MP2,5) POR REGIÓN Y TIPO DE FUENTE. *Indicadores y Cuentas Ambientales* [en línea]. [Consulta: 23 septiembre 2020]. Disponible en: <http://sistemaintegrador.mma.gob.cl/mma-centralizador-publico/indicador/vistaIndicador.jsf?id=3960A96E-1CC3-C799-BDA6-039FCDABDF6A&subtema=3>.

TIERI, M., COMERÓN, E. y PECE, M., 2014. Indicadores utilizados para evaluar la sustentabilidad integral de los sistemas de producción de leche con énfasis en el impacto ambiental. *Publicación miscelánea ...* [en línea]. S.l.: Disponible en:
http://inta.gob.ar/documentos/indicadores-para-evaluar-la-sustentabilidad-integral-de-los-sistemas-de-produccion-de-leche-con-énfasis-en-el-impacto-ambiental/at_multi_download/file/INTA_indicadores_utilizados_para_evaluar_sustentabilidad_integral_sistemas.

UBILLA, C. y YOHANNESSEN, K., 2017. Contaminación Atmosférica Efectos En La Salud Respiratoria En El Niño. *Revista Médica Clínica Las Condes* [en línea], vol. 28, no. 1, pp. 111-118. ISSN 07168640. DOI 10.1016/j.rmcl.2016.12.003. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>.

UCHILE, 2019. El estado del medio ambiente en Chile. *CENTRO DE ANÁLISIS DE POLÍTICAS PÚBLICAS INSTITUTO DE ASUNTOS PÚBLICOS UNIVERSIDAD DE CHILE*. S.l.:

UE, 2020. Estrategias energéticas anteriores | Energía. *Estrategias energéticas previas* [en línea]. [Consulta: 17 septiembre 2020]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/previous-energy-strategies?redir=1#the-2050-energy-roadmap-2011->.

UNCTAD, 2004. *A manual for preparers and users of Eco-efficiency Indicators*. S.l.: s.n. ISBN 9211126207.

UNE-EN, 2012. UNE-EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción. Evaluació... [en línea]. [Consulta: 8 septiembre 2020]. Disponible en: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0049397>.

UNIÓN EUROPEA, 2009. Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC). Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea. Producción de Polímeros. Documento BREF. . S.l.:

UNIVERSIDAD DE CHILE, 2019. Evaluación Programa de Recambio de Calefactores a Leña del Ministerio del Medio Ambiente. [en línea]. S.l.: Disponible en: http://www.dipres.gob.cl/597/articles-187242_informe_final.pdf.

VALLEJOS-ROMERO, A. y OÑATE ÑANCUCHEO, M., 2013. Comunicación de riesgos ecologicos: El caso de la contaminación atmosférica en dos ciudades intermedias del sur de Chile. En: Uso de leña húmeda como principal problema, *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 29, no. 1, pp. 59-75. ISSN 01884999.

VELASQUEZ DE CASTRO GONZALES, F., 2005. Cambio Climatico y Protocolo de Kyoto, ciencias y estrategias. Compromiso para España. *Revista Española de Salud Pública* [en línea], vol. 79, no. 2, pp. 191-201. Disponible en: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200007.

VIEGAS, G.M., WALSH, C. y BARROS, M.V., 2016. Evaluación cualicuantitativa de aislaciones térmicas

alternativas para viviendas. El caso de la agricultura familiar. *Revista INVI*, vol. 31, no. 86, pp. 89-117. ISSN 07188358. DOI 10.4067/invi.v0i0.1005.

VINNICHENKO, V., RYAZANOV, A. y KROT, O., 2018. Construction binders and environmental indicators of their production. *MATEC Web of Conferences*, vol. 230, pp. 1-5. ISSN 2261236X. DOI 10.1051/matecconf/201823003020.

WBCSD, 2004. Protocolo de Gases Efecto Invernadero. . S.I.:

ZABALZA; ARANDA; SCARPELLINI, 2012. Manual explicativo del Análisis de Ciclo de Vida aplicado al sector de la edificación Programa de Cooperación Territorial SUDOE Interreg IV B Proyecto EnerBuiLCA Life Cycle Assessment for Energy Efficiency in Buildings. . S.I.:

ZABALZA, I., 2012. Proyecto «EnerBuiLCA»: Desarrollo de una base de datos y una herramienta de análisis de ciclo de vida de edificios adaptada a la región sudoeste de Europa. *Conama 2012* [en línea]. S.I.: Disponible en: <http://www.conama2012.conama.org/conama10/download/files/conama11/CT2010/1896699924.pdf>.

ZUÑIGA, A., 2015. *Crecimiento económico y sustentabilidad ambiental en Chile. Un análisis en torno al concepto de desacoplamiento económico-ambiental* [en línea]. S.I.: s.n. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144402>.

Anexos

Anexo A. Cálculo de Energía Contenida y Huella de Carbono de las envolventes seleccionadas con la OGUC – Caso 1.

CÓDIGO ÁBACO	DESCRIPCIÓN	UNI	RDTO.	ENERGÍA CONTENIDA (MJ)	EMISIONES GEI (kgCO2e)
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE TECHUMBRE		m2			
MTCCW0005	Bolsa 0,25kg tornillo techo zincado #10 21/2" golilla y sello/50uni	uni	0,002	0,000	0,000
-	Poliestireno expandido 20 kg/m3_espesor 125mm	m2	1,000	221,500	8,225
MTQQA0009	Plancha zincalum acanalada onda toledana/0,40mmx0,851x2,0m/gris	uni	0,723	101,080	10,726
TOTAL				322,580	18,951
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 1° PISO		m2			
MTAAA0011	Arena fina de relleno bajo tamiz #200	m3	0,040	1,493	0,133
MTHHC0011	Saco 25kg cemento especial	uni	0,350	29,003	2,780
MTHHM0005	Mortero 64 kg/cem/m2	m3	0,020	0,554	0,051
-	Poliestireno expandido 15 kg/m3_espesor 10mm	m2	1,000	13,290	0,494
MTLLL0011	Ladrillo 29x14x7,1cm tipo titán ref/hueco	uni	36,000	272,465	17,298
MTRRY0003	Plancha yeso cartón 10mmx1,20x2,40m borde rebajado	uni	0,350	9,891	0,791
TOTAL				326,695	21,546
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 2° PISO		m2			
MTCCQ0150	Metalcom montante (60x38x0,5mm x 3m)	m	1,000	3,623	0,259
MTCCQ0152	Perfil tabique metalcon 3m C61x20x0,5mm/1,16kg x unidad	uni	0,850	2,139	0,153
MTCCT0069	Caja 100uni autoperforante 8x1/2" cabeza de lenteja	uni	0,120	1,437	0,134
MTCCT0480	Caja 100uni clavo disparo 3,7x25 galvanizado	uni	0,040	0,001	0,000
MTCCT3161	Caja 50uni tornillo autoperforante 6x1"	uni	0,560	0,016	0,001
MTIIA0005	Rollo 24kg lana mineral 0,5x1,2m/50mm/revestidas 2 caras/12m2 x rollo	m2	1,000	22,409	2,405
-	Plancha fibrocemento 1000kg/m³_espesor 8mm	m2	1,000	83,200	8,720
MTRRY0026	Plancha yeso cartón R/H 15mmx1,20x2,40m	uni	0,347	3,619	0,290
TOTAL				116,445	11,963

SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE VENTANA		m2			
MTVVV0020	Ventana termopanel PVC Blanco/100x100cm	m2	1,000	14.006,619	984,039
TOTAL				14.006,619	984,039
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PUERTAS		m2			
MTCCT2797	Set 2uni tarugo clavo 8x12x54	uni	3,750	0,002	0,000
MTVVA0117	Set 7,53kg marco puerta 40x90mmx5,4m pino finger	uni	0,625	620,110	62,679
MTVVB0005	Set 1uni bisagra #22-L 31/2"x31/2"/negro/puertas-portones	uni	1,875	1,127	0,086
-	Puerta MDF/HR 4mm_relleno poliestireno expandido 20kg/m3_2000x800x45mm	m2	1,000	119,340	5,625
TOTAL				740,579	68,390
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PISO EN CONTACTO CON EL TERRENO		m2			
MTFFP0048	Saco 25kg adhesivo cerámico polvo	uni	0,250	19,993	1,546
MTFFP0313	Saco 5kg fragüe almond	uni	0,050	0,800	0,062
MTHHH0015	Hormigón G-015-40-06 niv.conf. 90%	m3	0,490	187.192,393	17.006,535
MTUUC0617	Caja 31,3kg cerámica piso 45x45cm rústica mate 7,5mm/2,03m2	uni	0,100	7,471	0,650
TOTAL				187.220,657	17.008,793

Anexo B. Cálculo de Energía Contenida y Huella de Carbono de las envolventes seleccionadas con el PDA de Temuco y Padre las Casas – Caso 2.

CÓDIGO ÁBACO	DESCRIPCIÓN	UNI	RDTO.	ENERGÍA CONTENIDA (MJ)	EMISIONES GEI (kgCO ₂ e)
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE TECHUMBRE		m2			
MTCCW0005	Bolsa 0,25kg tornillo techo zincado #10 21/2" golilla y sello/50uni	uni	0,002	0,000	0,000
-	Poliestireno expandido de 20kg/m³_espesor 150 mm	m2	1,000	265,800	9,870
MTQQA0009	Plancha zincalum acanalada onda toledana/0,40mmx0,851x2,0m/gris	uni	0,723	101,080	10,726
TOTAL				366,880	20,596
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 1° PISO		m2			
MTAAA0011	Arena fina de relleno bajo tamiz #200	m3	0,040	1,493	0,133
MTHHC0011	Saco 25kg cemento especial	uni	0,350	29,003	2,780
MTHHM0005	Mortero 64 kg/cem/m ²	m3	0,020	0,554	0,051
-	Poliestireno expandido 15 kg/m³_espesor 80mm	m2	1,000	106,320	3,948
MTLLL0011	Ladrillo 29x14x7,1cm tipo titán ref/hueco	uni	36,000	272,465	17,298
MTRRY0003	Plancha yeso cartón 10mmx1,20x2,40m borde rebajado	uni	0,350	9,891	0,791
TOTAL				419,725	25,000
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 2° PISO		m2			
MTCCQ0150	Metalcom montante (60x38x0,5mm x 3m)	m	1,000	3,623	0,259
MTCCQ0152	Perfil tabique metalcon 3m C61x20x0,5mm/1,16kg x unidad	uni	0,850	2,139	0,153
MTCCT0069	Caja 100uni autoperforante 8x1/2" cabeza de lenteja	uni	0,120	1,437	0,134
MTCCT0480	Caja 100uni clavo disparo 3,7x25 galvanizado	uni	0,040	0,001	0,000
MTCCT3161	Caja 50uni tornillo autoperforante 6x1"	uni	0,560	0,016	0,001
-	Rollo lana mineral 40kg/m³_espesor 60mm	m2	1,000	39,840	3,072
-	Plancha fibrocemento 1000kg/m³_espesor 10mm	m2	1,000	104,000	10,900
-	Poliestireno expandido 15 kg/m³_espesor 30mm	m2	1,000	39,870	1,481
MTRRY0026	Plancha yeso cartón R/H 15mmx1,20x2,40m	uni	0,347	3,619	0,290

TOTAL				194,546	16,290
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE VENTANA			m2		
MTVVV0020	Ventana termopanel PVC Blanco/100x100cm	m2	1,00	14.006,619	984,039
TOTAL				14.006,619	984,039
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PUERTAS			m2		
MTCCT2797	Set 2uni tarugo clavo 8x12x54	uni	3,750	0,002	0,000
MTVVA0117	Set 7,53kg marco puerta 40x90mmx5,4m pino finger	uni	0,625	620,110	62,679
MTVVB0005	Set 1uni bisagra #22-L 31/2"x31/2"/negro/puertas-portones	uni	1,875	1,127	0,086
-	Puerta MDF/HR 4mm_relleno poliestireno expandido 20kg/m3_2000x800x45mm	m2	1,000	119,340	5,625
TOTAL				740,579	68,390
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PISO EN CONTACTO CON EL TERRENO			m2		
MTFFP0048	Saco 25kg adhesivo cerámico polvo	uni	0,25	19,993	1,546
MTFFP0313	Saco 5kg fragüe almond	uni	0,05	0,800	0,062
MTHHH0015	Hormigón G-015-40-06 niv.conf. 90%	m3	0,49	187.192,393	17.006,535
MTUUC0617	Caja 31,3kg cerámica piso 45x45cm rústica mate 7,5mm/2,03m2	uni	0,100	7,471	0,650
TOTAL				187.220,657	17.008,793

Anexo C. Análisis de costos unitarios de las envolventes seleccionadas en la OGUC – Caso

1.

CÓDIGO ÁBACO	DESCRIPCIÓN	UNI	RDTO.	COSTO UNITARIO	TOTAL	PROVEEDOR
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE TECHUMBRE		m2				
MTCCW0005	Bolsa 0,25kg tornillo techo zincado #10 21/2" golilla y sello/50uni	uni	0,002	\$7.820	\$12	Sodimac Temuco
-	Poliestireno expandido 20 kg/m3_espesor 125mm	m2	1,000	\$8.925	\$8.925	Cotización ETSA
MTQQA0009	Plancha zincalum acanalada onda toledana/0,40mmx0,851x2,0m/gris	uni	0,723	\$7.730	\$5.589	Sodimac Temuco
TOTAL					\$14.526	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 1° PISO		m2				
MTAAA0011	Arena fina de relleno bajo tamiz #200	m3	0,040	\$6.760	\$270	Construmart Temuco
MTHHC0011	Saco 25kg cemento especial	uni	0,350	\$3.210	\$1.124	Sodimac Temuco
MTHHM0005	Mortero 64 kg/cem/m2	m3	0,020	\$36.660	\$733	Notrasnoches Referencial (RM)
-	Poliestireno expandido 15 kg/m3_espesor 10mm	m2	1,000	\$536	\$536	Cotización ETSA
MTLLL0011	Ladrillo 29x14x7,1cm tipo titán ref/hueco	uni	36,000	\$295	\$10.620	Sodimac Temuco
MTRRY0003	Plancha yeso cartón 10mmx1,20x2,40m borde rebajado	uni	0,350	\$4.620	\$1.617	Sodimac Temuco
TOTAL					\$14.900	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 2° PISO		m2				
MTCCQ0150	Metalcom montante (60x38x0,5mm x 3m)	m	1,000	\$1.990	\$1.990	Sodimac Temuco
MTCCQ0152	Perfil tabique metalcon 3m C61x20x0,5mm/1,16kg x unidad	uni	0,850	\$1.390	\$1.182	Sodimac Temuco
MTCCT0069	Caja 100uni autoperforante 8x1/2" cabeza de lenteja	uni	0,120	\$2.598	\$312	Sodimac Temuco
MTCCT0480	Caja 100uni clavo disparo 3,7x25 galvanizado	uni	0,040	\$6.700	\$268	Sodimac Temuco
MTCCT3161	Caja 50uni tornillo autoperforante 6x1"	uni	0,560	\$2.990	\$1.674	Sodimac Temuco
MTIIA0005	Rollo 24kg lana mineral 0,5x1,2m/50mm/revestidas 2 caras/12m2 x rollo	m2	1,000	\$3.842	\$3.842	Prodalam Temuco
-	Plancha fibrocemento 1000kg/m³_espesor 8mm	m2	1,000	\$6.243	\$6.243	Sodimac Temuco

MTRRY0026	Plancha yeso cartón R/H 15mmx1,20x2,40m	uni	0,347	\$7.450	\$2.587	Sodimac Temuco
TOTAL					\$18.097	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE VENTANA		m2				
MTVVV0020	Ventana termopanel PVC Blanco/100x100cm	m2	1,000	\$131.938	\$131.938	Sodimac Temuco
TOTAL					\$131.938	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PUERTAS		m2				
MTCCT2797	Set 2uni tarugo clavo 8x12x54	uni	3,750	\$1.390	\$5.213	Sodimac Temuco
MTVVA0117	Set 7,53kg marco puerta 40x90mmx5,4m pino finger	uni	0,625	\$17.488	\$10.930	Sodimac Temuco
MTVVB0005	Set 1uni bisagra #22-L 31/2"x31/2"/negro/puertas- portones	uni	1,875	\$2.460	\$4.613	Sodimac Temuco
-	Puerta MDF/HR 4mm_relleno poliestireno expandido 20kg/m3_2000x800x45mm	m2	1,000	\$60.481	\$60.481	Tabla MINVU PPPF 2020
TOTAL					\$81.236	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PISO EN CONTACTO CON EL TERRENO		m2				
MTFFP0048	Saco 25kg adhesivo cerámico polvo	uni	0,250	2.490	\$623	Sodimac Temuco
MTFFP0313	Saco 5kg fragüe almond	uni	0,050	5.328	\$266	Sodimac Temuco
MTHHH0015	Hormigón G-015-40-06 niv.conf. 90%	m3	0,490	50.328	\$24.661	Notrasnoches Referencial (RM)
MTUUC0617	Caja 31,3kg cerámica piso 45x45cm rústica mate 7,5mm/2,03m2	uni	0,100	11.145	\$1.115	Construmart Temuco
TOTAL					\$26.664	

Anexo D. Análisis de costos unitarios de las envolventes seleccionadas con PDA - Caso 2.

CÓDIGO ÁBACO	DESCRIPCIÓN	UNI	RDTO.	COSTO UNITARIO	TOTAL	PROVEEDOR
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE TECHUMBRE		m2				
MTCCW0005	Bolsa 0,25kg tornillo techo zincado #10 21/2" golilla y sello/50uni	uni	0,002	\$7.820	\$12	Sodimac Temuco
-	Poliestireno expandido de 20kg/m3_ espesor 150 mm	m2	1,000	\$10.710	\$10.710	Cotización ETSA
MTQQA0009	Plancha zincalum acanalada onda toledana/0,40mmx0,851x2,0m/gris	uni	0,723	\$7.730	\$5.589	Sodimac Temuco
TOTAL					\$16.311	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 1° PISO		m2				
MTAAA0011	Arena fina de relleno bajo tamiz #200	m3	0,040	\$6.760	\$270	Construmart Temuco
MTHHC0011	Saco 25kg cemento especial	uni	0,350	\$3.210	\$1.124	Sodimac Temuco
MTHHM0005	Mortero 64 kg/cem/m2	m3	0,020	\$36.660	\$733	Notrasnoches Referencial (RM)
-	Poliestireno expandido 15 kg/m3_ espesor 80mm	m2	1,000	\$4.284	\$4.284	Cotización ETSA
MTLLL0011	Ladrillo 29x14x7,1cm tipo titán ref/hueco	uni	36,000	\$295	\$10.620	Sodimac Temuco
MTRRY0003	Plancha yeso cartón 10mmx1,20x2,40m borde rebajado	uni	0,350	\$4.620	\$1.617	Sodimac Temuco
TOTAL					\$18.648	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE MURO 2° PISO		m2				
MTCCQ0150	Metalcom montante (60x38x0,5mm x 3m)	m	1,000	\$1.990	\$1.990	Sodimac Temuco
MTCCQ0152	Perfil tabique metalcon 3m C61x20x0,5mm/1,16kg x unidad	uni	0,850	\$1.390	\$1.182	Sodimac Temuco
MTCCT0069	Caja 100uni autoperforante 8x1/2" cabeza de lenteja	uni	0,120	\$2.598	\$312	Sodimac Temuco
MTCCT0480	Caja 100uni clavo disparo 3,7x25 galvanizado	uni	0,040	\$6.700	\$268	Sodimac Temuco
MTCCT3161	Caja 50uni tornillo autoperforante 6x1"	uni	0,560	\$2.990	\$1.674	Sodimac Temuco
-	Rollo lana mineral 40kg/m³_ espesor 60mm	m2	1,000	\$4.628	\$4.628	Prodalam Temuco
-	Plancha fibrocemento 1000kg/m³_ espesor 10mm	m2	1,000	\$7.552	\$7.552	Global GTC
-	Poliestireno expandido 15 kg/m3_ espesor 30mm	m2	1,000	\$1.260	\$1.260	Cotización ETSA

MTRRY0026	Plancha yeso cartón R/H 15mmx1,20x2,40m	uni	0,347	\$7.450	\$2.587	Sodimac Temuco
TOTAL					\$21.452	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE VENTANA		m2				
MTVVV0020	Ventana termopanel PVC Blanco/100x100cm	m2	1,00	\$131.938	\$131.938	Sodimac Temuco
TOTAL					\$131.938	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PUERTAS		uni				
MTCCT2797	Set 2uni tarugo clavo 8x12x54	uni	3,750	\$1.390	\$5.213	Sodimac Temuco
MTVVA0117	Set 7,53kg marco puerta 40x90mmx5,4m pino finger	uni	0,625	\$17.488	\$10.930	Sodimac Temuco
MTVVB0005	Set 1uni bisagra #22-L 31/2"x31/2"/negro/puertas- portones	uni	1,875	\$2.460	\$4.613	Sodimac Temuco
-	Puerta MDF/HR 4mm_relleno poliestireno expandido 20kg/m3_2000x800x45mm	m2	1,000	\$60.481	\$60.481	Tabla MINVU PPPF 2020
TOTAL					\$81.236	
SOLUCIÓN ENVOLVENTE DE PISO EN CONTACTO CON EL TERRENO		m2				
MTFFP0048	Saco 25kg adhesivo cerámico polvo	uni	0,25	2.490	\$623	Sodimac Temuco
MTFFP0313	Saco 5kg fragüe almond	uni	0,05	5.328	\$266	Sodimac Temuco
MTHHH0015	Hormigón G-015-40-06 niv.conf. 90%	m3	0,49	50.328	\$24.661	Notrasnoches Referencial (RM)
MTUUC0617	Caja 31,3kg cerámica piso 45x45cm rústica mate 7,5mm/2,03m2	uni	0,100	11.145	\$1.115	Construmart Temuco
TOTAL					\$26.664	