

Artículo Original / Article

# Modelación energética en barrios de Valdivia: Aplicación de la Calificación Energética de Viviendas para el análisis de tipologías y su potencial de mejora

## *Energy Modeling in neighborhoods of Valdivia: Application of the Energy Rating of Houses for the Analysis of Typologies and their Improvement Potential*

Alejandra Schueftan , Universidad Austral de Chile, Chile.

Eduardo Larrucea , Universidad Austral de Chile, Chile.

Catalina Zumaeta, Instituto Forestal, Chile.

---

**CÓMO CITAR:** Schueftan, A., Larrucea, E. y Zumaeta, C. (2023). Modelación energética en barrios de Valdivia: Aplicación de la Calificación Energética de Viviendas para el análisis de tipologías y su potencial de mejora. *Revista de Urbanismo*, (49), 192-217. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2023.70633>

\*CONTACTO: [alejandra.schueftan@uach.cl](mailto:alejandra.schueftan@uach.cl)

**Resumen:** Las ciudades del centro-sur de Chile se enfrentan a graves problemas de contaminación atmosférica y pobreza energética. En este escenario, la rehabilitación masiva de viviendas permitiría diversos beneficios como la reducción de la contaminación atmosférica, la disminución de los costos de calefacción de los hogares y mejores condiciones de confort interior, lo que conllevaría a una mejora en la salud y calidad de vida de la población. Disponer de información para planificar y priorizar las áreas de la ciudad a intervenir es clave para obtener mejores resultados a corto y mediano plazo e invertir los recursos de forma eficiente. En este contexto, se propone que la modelación energética de las viviendas extrapolada a una escala urbana –tomando como ejemplo la ciudad de Valdivia– permitiría identificar los sectores que tienen mayor urgencia de ser intervenidos y mayor potencial de mejora. La metodología se basó en modelaciones energéticas híbridas a partir de metodologías tipo *bottom up* y se dividió la ciudad en 35 sectores en los que se realizó un levantamiento constructivo detallado de todos los modelos de vivienda, los que se agruparon en 74 tipologías. Posteriormente se simuló el desempeño actual de cada tipología y su potencial de mejora mediante la implementación de estrategias de reacondicionamiento en el marco del Plan de Descontaminación Atmosférica para la comuna de Valdivia. Las modelaciones se realizaron utilizando las metodologías de cálculo de la Calificación Energética de Viviendas (CEV) y los resultados muestran un importante potencial teórico de mejora, con una media del 68 % para todas ellas. Con esta información se llevó a cabo una extrapolación de los resultados de las simulaciones de viviendas a una escala de barrio, y se elaboraron mapas que tienen como objetivo visualizar el potencial de mejora que implica realizar reacondicionamientos masivos en la ciudad. Estos constituyen una herramienta para la planificación y priorización, replicable para otras ciudades con el objetivo de minimizar el consumo energético, la contaminación atmosférica y la vulnerabilidad energética de los barrios, promoviendo así procesos de transición energética sostenibles y justos.

**Palabras clave:** Calificación Energética de Viviendas, contaminación atmosférica, modelamiento energético de viviendas, planificación energética urbana, sostenibilidad energética

**Abstract:** Cities in south-central Chile face serious problems of air pollution and energy poverty. In this scenario, massive housing retrofitting would allow several benefits such as the reduction of air pollution, the reduction of household expenditure, and the improvement of indoor comfort conditions, which would lead to an improvement in the health and quality of life of the population. Availability of information to plan and prioritize the areas of the city to be intervened is key to obtain better results in the short and medium term and to invest resources efficiently. In this context, it is proposed that the energy modelling of dwellings extrapolated to an urban scale –using the city of Valdivia as a study case– would allow to identify the areas that have greater urgency to be intervened and greater potential for improvement. The methodology was based on hybrid energy modelling using bottom-up methodologies and the city was divided into 35 sectors in which a detailed constructive survey of all housing models, grouped into 74 typologies, was carried out. Subsequently, the current performance of each typology and its potential for improvement through the implementation of rehabilitation strategies within the framework of the Atmospheric Decontamination Plan for the municipality of Valdivia was simulated using the Housing Energy Rating (CEV). Results show a significant theoretical potential for improvement, with an average of 68% for all typologies. With this information, an extrapolation of the results of the housing simulations to a neighborhood scale was carried out, and maps were drawn up with the purpose of visualizing the improvement potential of massive retrofitting in the city. These constitute a tool for planning and prioritization, replicable for other cities in which the aim is to minimize energy consumption, air pollution, and energy vulnerability of neighborhoods, thus promoting sustainable and fair energy transition processes.

**Keywords:** Housing Energy Rating, environment pollution, housing energy modelling, urban energy planning, energy sustainability.

## Introducción

Actualmente a nivel global se evidencia un aumento sin precedentes del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como consecuencia de la rápida urbanización y el acelerado desarrollo económico (Carreño Campo et al., 2018; Li et al., 2017). Considerando el interés que comparten países desarrollados y en vías de desarrollo por reducir el consumo de energía y de las emisiones de GEI, el estudio de las emisiones a escala urbana es clave para desarrollar e implementar soluciones efectivas y económicamente viables (Lazo y Yancapallo, 2021; Li et al., 2017).

Tal como definen Mutani y Todeschi (2017), la sostenibilidad energética urbana debe estudiarse considerando el entorno construido, la densidad poblacional, las actividades antropogénicas, las demandas energéticas, los impactos medioambientales y los límites de la disponibilidad de espacio y de las fuentes de energía renovables. Tanto los planificadores urbanos como los tomadores de decisión juegan un papel clave, pues enfrentan importantes retos a la hora de fijar objetivos energéticos sostenibles relacionados con el sector de la edificación, como lo son la reducción el consumo de energía y de las emisiones asociadas.

Tomando en cuenta que las ciudades son las principales receptoras de las estrategias que apuntan a la sustentabilidad energética, el desarrollo de metodologías para la elaboración de estudios energéticos a escala urbana es clave para visualizar el potencial de mejora de posibles intervenciones masivas (Chávez et al., 2021). Al respecto, la modelación energética urbana es una posible solución que aprovecha la información disponible para estimar el uso energético de los edificios y apoyar la formulación de políticas adecuadas (Ali et al., 2021).

Durante los últimos años, el enfoque de la modelación energética de edificios urbanos ha sido un aporte para la identificación, el apoyo y la mejora de las iniciativas de desarrollo urbano sostenible y de las medidas de eficiencia energética en las ciudades (Abbasabadi, & Ashayeri, 2019; Johari et al., 2020). Estos modelos extraen información del análisis energético de los edificios en el contexto urbano y proponen opciones para una aplicación eficaz de las intervenciones. En este contexto, se ha desarrollado una diversidad de modelos y herramientas, que van desde modelos basados en variables físicas de los edificios a modelos híbridos más avanzados (Johari et al., 2020).

Las construcciones y zonas urbanas que se diseñan, planifican y construyen con altos estándares de eficiencia energética permiten reducir en el largo plazo el consumo energético, mejorar la calidad del aire, reducir el consumo de recursos y optimizar la calidad de vida y el gasto de los hogares, logrando mayor equidad social. En el caso de Chile, el excesivo consumo de leña para calefacción, como consecuencia de construcciones ineficientes que implican un alto gasto energético, genera altos niveles de contaminación que afectan a más de 10 millones de personas (World Health Organization [WHO], 2021). Los niveles de material particulado en las zonas urbanas de la zona centro-sur de Chile sobrepasan ampliamente todas las normas nacionales e internacionales con graves consecuencias para la salud y calidad de vida (Valdés Salgado et al., 2021; WHO, 2021).

La situación de contaminación atmosférica y pobreza energética en la zona centro-sur del país es una problemática multidimensional, que requiere un análisis detallado, que considere los aspectos sociales, ambientales y tecnológicos que la determinan (Amigo et al., 2019; Boso et al., 2019; Calvo et al., 2022). Aunque el resultado más conocido de la pobreza energética es la contaminación atmosférica, también se

presentan graves consecuencias en el ambiente intradomiciliario donde se suman a la contaminación, las bajas temperaturas al interior de la vivienda y altos niveles de humedad relativa, que a su vez aumentan el riesgo de padecer enfermedades respiratorias y generan un impacto negativo en la calidad de vida de las personas (Fuller et al., 2022; Heberle et al., 2018; WHO, 2022). Además, este riesgo se incrementa en hogares con presencia de grupos vulnerables como adultos mayores, niños o personas con enfermedades crónicas (Cincinelli, & Martellini, 2017).

Se combinan entonces los bajos ingresos, los elevados gastos en energía y la falta de eficiencia energética en las viviendas, lo cual, en el contexto de Chile, resulta en un alto consumo de leña para la calefacción, debido a su bajo precio en comparación con otros combustibles, su fácil acceso y alto poder calorífico.

Una de las causas principales de esta situación ha sido la inadecuada aislación de las viviendas, sumado a equipos de calefacción y combustibles ineficientes (Reyes et al., 2019; Schueftan, & Gonzalez, 2015; Schueftan et al., 2016), por lo que hoy se hace urgente seguir implementando y focalizando los distintos programas que apuntan al mejoramiento de la eficiencia energética de las viviendas, de los sistemas de calefacción y la calidad de los combustibles. Estas son estrategias que ya se han implementado en el contexto de los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) (Ministerio de Medio Ambiente, 2022) y que se requiere seguir impulsando para reducir los problemas ambientales y sociales antes mencionados. Se hace relevante entonces contar con información precisa para las distintas ciudades del centro-sur de Chile, que permita focalizar los programas de política pública, así como entregar información a los usuarios para impulsar otras iniciativas de mejoramiento y visualización de las dinámicas energéticas a distintas escalas.

La hipótesis de la investigación plantea que, a través del desarrollo de un modelo energético urbano de tipo híbrido, que incorpore variables constructivas y sociodemográficas de distintas tipologías de vivienda, es posible generar una extrapolación de la información a una escala de barrio para poder identificar zonas prioritarias de intervención en la ciudad. En este contexto, el objetivo de este estudio es proponer una aproximación metodológica al análisis energético de áreas urbanas de Valdivia, basado en la extrapolación del análisis del comportamiento térmico de tipologías representativas de las viviendas de la ciudad a una escala urbana. Se caracterizan estas tipologías a partir de un análisis de la materialidad, superficie, volumetría y año de construcción de las viviendas; su posterior mapeo en la ciudad permite visualizar sectores a nivel urbano en los que intervenir con políticas públicas masivas de reacondicionamiento térmico. Además, se propone que el cruce de variables como consumo de leña, potencial de mejora del desempeño energético y vulnerabilidad socioeconómica permite aportar a la definición de los sectores prioritarios para la planificación del mejoramiento de la vivienda a escala urbana.

Para esto, la metodología se basa en la elaboración de una base de datos detallada que incorpora variables constructivas de las viviendas para definir tipologías representativas presentes en la ciudad de Valdivia. A partir de la modelación de las tipologías de viviendas en su estado actual y su potencial de mejora, utilizando los parámetros de la Calificación Energética de Vivienda (CEV), es posible visualizar el comportamiento energético de las viviendas en las distintas zonas urbanas, producto de la implementación de mejoramientos térmicos a escala masiva en la ciudad.

Los resultados se presentan en dos partes, primero se entregan los datos sobre el análisis de tipologías y el potencial de mejora de las viviendas y luego se exponen los mapas de desempeño energético a escala urbana, permitiendo extrapolar la información desde la vivienda a la ciudad y visualizar sectores de interés en cuanto a la implementación de políticas públicas de mejoramiento térmico. Sin embargo, es

necesario seguir avanzando en el desarrollo de una metodología que permita precisar esta extrapolación, considerando variables urbanas, tales como perfiles de calle, forma urbana, asoleamiento u otros que inciden en el comportamiento energético del entorno y, por ende, en el desempeño de las viviendas.

## Marco teórico

### **Modelación energética urbana: caracterización de la relación del edificio con el entorno urbano**

La complejidad de las ciudades requiere de una rigurosa selección de parámetros para lograr un adecuado análisis que permita generar modelos accesibles y confiables, que no sean tan complejos y que tengan en cuenta los parámetros urbanos más relevantes. Además, la disponibilidad de datos es un aspecto fundamental para identificar el tipo de modelo a aplicar (Goy et al., 2020). Algunos modelos energéticos han extrapolado métodos y herramientas utilizados en la escala del edificio a la escala urbana (Rodríguez-Álvarez, 2016). En otros casos, la modelación se basa en correlaciones estadísticas y se suelen combinar datos de censos con datos de consumo para predecir variaciones en los patrones energéticos (Liu, & Sweeney, 2012), estos se denominan enfoques descendentes (*top-down*) y se utilizan ampliamente a nivel internacional para las proyecciones a largo plazo de la demanda energética.

Por otro lado, las técnicas ascendentes (*bottom-up*) se centran en la demanda energética de los edificios a un nivel detallado. Según al análisis bibliográfico realizado por Ali et al. (2021), esta metodología se puede dividir en tres categorías: 1) los modelos basados en las características físicas de los edificios; 2) aquellos basados en datos sobre el consumo energético; y 3) los de orden reducido, que permiten simplificar algunos parámetros tanto físicos como energéticos de las modelaciones. En este contexto, Chen et al. (2020) exploran la modelación de la demanda energética urbana combinando métodos ascendentes de análisis estadístico y microespaciales, y el análisis de usos finales individuales hasta su extrapolación a áreas urbanas. Por otra parte, Johari et al. (2020) proporcionan una amplia visión de la modelación de ingeniería ascendente conocida como UBEM (Urban Building Energy Modelling), subrayando la importancia de integrarlos con modelos climáticos, de movilidad urbana y patrones de ocupación.

La tendencia en la actualidad es hacia el uso de modelos híbridos en los que se utilizan datos reales para poder calibrar las modelaciones teóricas y así obtener información más precisa sobre el desempeño energético de las viviendas (Ferrando et al., 2020). En este contexto, uno de los desafíos de la metodología propuesta es el paso del análisis caso a caso, basado en el levantamiento de tipologías, simulaciones con software y encuestas a usuarios hacia una extrapolación de la información a escala de barrio y de ciudad, dando paso, a futuro, a una metodología de menor costo y más simple, en la que no sea necesario levantar datos del total de viviendas de una ciudad para obtener resultados, sino que el modelo se calibre y valide con un conjunto de datos estadísticamente significativos.

Existen varios desafíos que permitirían mejorar los modelos energéticos existentes, por ejemplo, el desarrollo de modelos simplificados que posibilitan cuantificar la distribución espacial del consumo energético a escala urbana con herramientas SIG. En esta línea, Mutani y otros (2018) proponen estimar el consumo de energía para calefacción de edificios residenciales, tras haber clasificado los edificios según sus características (tipología, uso y ubicación). Este modelo simplificado se ha validado mediante la comparación con datos reales de consumo proporcionados por la empresa distribuidora de gas natural. El trabajo de Torabi Moghadam y otros (2018), también en esta línea, estima el consumo energético de más de 2.000 viviendas en Settimo Torinese, Italia, basado en datos censales de consumo energético para calefacción. Ambos estudios

relevantes lo indispensable que es contar con datos sobre el consumo energético de las edificaciones para poder elaborar un análisis preciso y proponer estrategias energéticas basadas en las características reales de los edificios, identificando las áreas críticas que requieren una intervención prioritaria.

Por otra parte, hay variables como el clima y la forma de las ciudades, ya sean parámetros como densidad, altura de las edificaciones, perfiles de calles, arborización, etc. (Allen-Dumas et al., 2020; Arboit et al., 2022; Li et al., 2017) que permiten mejorar la estimación de la demanda energética urbana, en distintos contextos, ya a escala de manzana, barrio o ciudad.

Varios de estos trabajos han generado resultados que apuntan a desarrollar propuestas normativas que permitan optimizar la eficiencia de las edificaciones, aprovechando de la mejor forma los recursos disponibles. Algunos estudios han combinado enfoques descendentes y ascendentes para establecer una relación entre forma urbana y consumo energético de edificios, para así poder identificar y priorizar zonas de intervención críticas a escala de ciudad (Mutani et al., 2018). En la investigación de Arboit et al. (2022), por ejemplo, se incorporan herramientas de geolocalización para espacializar la información sobre la geometría urbana y el consumo energético.

En este contexto, cabe destacar la importancia de la visualización de resultados, especialmente cuando se abordan temas como el potencial ahorro energético al implementar estrategias de mejoramiento térmico, como en el caso de Viegas et al. (2020) quienes utilizan una escala de colores de fácil lectura que permite transferir la información de forma simple a distintos actores. Tal como propone Rodríguez-Álvarez (2016), los mapas y diagramas energéticos pueden utilizarse para comunicar de manera clara la información a escala urbana a un público no especializado.

El fin de estas iniciativas es facilitar la integración de las estrategias energéticas en las decisiones de planificación. Por ejemplo, al llevar a cabo políticas de reacondicionamiento de edificios se pueden identificar áreas con construcciones que presenten un alto potencial de mejora, lo que, al ser cruzado con información socioeconómica de los hogares, permitiría estimar el potencial de ahorro energético a escala urbana (Rodríguez-Álvarez, 2016).

Chávez et al. (2019) proponen analizar a nivel territorial el comportamiento energético de toda una ciudad con el objetivo de detectar el potencial de aplicación de diferentes medidas de mejora como: mejoramiento de envolventes de las edificaciones, recambio de equipos de calefacción e incorporación de sistemas energéticos, permitiendo así planificar matrices alternativas de abastecimiento energético, considerando las condiciones sociodemográficas de la población.

Siguiendo la tendencia actual en el uso de modelos de análisis urbanos híbridos, es importante continuar integrando distintas aproximaciones y bases de datos al análisis energético urbano con el fin de tener un panorama más preciso sobre el comportamiento de los edificios a nivel energético en la ciudad.

### **Contaminación atmosférica y pobreza energética en la zona centro-sur de Chile**

Las condiciones ambientales interiores de una vivienda son clave para que sus habitantes lleven una adecuada calidad de vida y para evitar problemas de salud producto de malas condiciones de habitabilidad. En este contexto, la envolvente térmica de las edificaciones es crucial, ya que permite mantener, o no, rangos de confort higrotérmico al interior de las viviendas tanto en invierno como en verano (Amigo et al., 2019)

El centro-sur de Chile presenta serios problemas de contaminación atmosférica como consecuencia del alto consumo de leña para calefacción (Schueftan et al., 2016). El Reporte de calidad del aire 2022 (WHO, 2022) muestra que 14 de las 20 comunas más contaminadas de Latinoamérica se encuentran en Chile (Quilpué, Coyhaique, Padre Las Casas, Villa Alemana, Traiguén, Llaillay, El Bosque, Providencia, La Reina, Talagante, Temuco, Santiago, Rancagua, Vitacura). Además, se indica que la contaminación atmosférica tiene un costo para el sector salud de aproximadamente 670 millones de dólares al año y es la causa de 4.000 muertes prematuras (WHO, 2021).

El uso de leña como método de calefacción se asocia a países pobres y a zonas rurales, no obstante, en el caso de Chile, que es un país de ingresos altos —con un PIB de 301 mil millones de dólares en 2022— (Banco Mundial, 2023), se observa un amplio uso de este medio de calefacción en entornos urbanos y transversalmente en todos los niveles socioeconómicos (Reyes et al., 2019). De hecho, en Chile, la principal fuente del material particulado fino (MP<sub>2,5</sub>) es la combustión de leña residencial, que en el año 2021 representaba un 94 % de las emisiones (WHO 2021). Esta cifra es preocupante si se considera que en 2018 el uso de leña alcanzó el 39 % del total nacional de uso de energía a nivel residencial y que en regiones del sur del país como las de Los Ríos, Los Lagos y Aysén sobrepasó el 90 % de penetración como fuente principal de calefacción (Corporación de Desarrollo Tecnológico [CDT], 2019), produciendo graves problemas de contaminación atmosférica (Valdés Salgado et al., 2021). El MP<sub>2,5</sub> es altamente nocivo y puede causar enfermedades como neumonía, bronquitis, asma, enfermedades cardíacas, hasta problemas cardiorrespiratorios (Howden-Chapman et al., 2009; Isaacs et al., 2010; WHO, 2006, 2021).

La suma de factores como el uso de leña con alto porcentaje de humedad y de equipos de baja eficiencia en la combustión agravan el problema de la contaminación atmosférica (Schueftan, & González, 2015). No obstante, este no solo tiene una dimensión ambiental que se manifiesta en los altos niveles de contaminación, sino que también tiene una dimensión sociotécnica que se expresa a través de la pobreza energética en la vivienda.

En Chile, a diferencia de otros países, la pobreza energética no tiene que ver con el acceso a la energía, de hecho, la red eléctrica llega a prácticamente toda la población (Ministerio de Energía, 2019), más bien se relaciona con una dependencia de la leña para calefacción, debido al alto costo que implica para los hogares el uso de otros combustibles alternativos (Reyes et al., 2019).

En países de ingresos medios y altos existen pocos estudios sobre pobreza energética y en el caso de Chile se ha investigado principalmente la problemática a escala de vivienda (Calvo et al., 2022; Schueftan et al., 2016; Urquiza et al., 2019; Urquiza et al., 2017; Villalobos et al., 2021), estos estudios abordan temáticas en torno a la contaminación atmosférica, calidad de la vivienda y aspectos sociotécnicos que determinan la pobreza energética de los hogares. A escala territorial, el trabajo de Calvo et al. (2021) analiza el concepto de vulnerabilidad energética territorial y las variables que inciden en el acceso equitativo y de calidad a la energía en Chile, en un contexto de transición energética marcado por el cambio climático y el riesgo de desastre. El trabajo de Encinas et al. (2022) aborda esta escala desde un análisis top-down que evalúa la distribución socioespacial de la pobreza energética en las áreas metropolitanas, debido a la segregación socioeconómica.

Dado que hay poco avance en el estudio de las implicancias urbanas de la pobreza energética, cobra especial relevancia contar con datos de desempeño energético a nivel de barrio y de ciudad, con el fin de focalizar adecuadamente las políticas públicas y evaluar escenarios energéticos futuros.

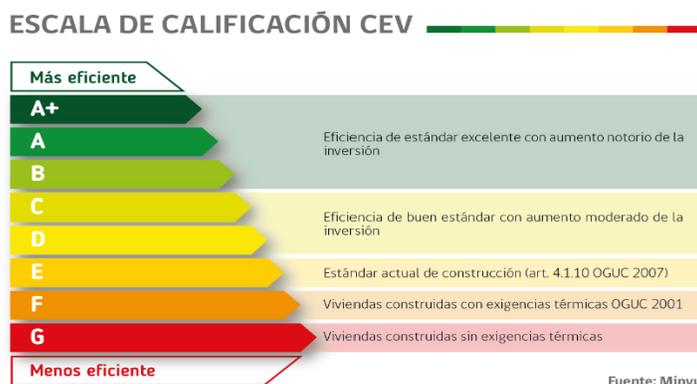
**Marco regulatorio**

En Chile se ha avanzado bastante en los últimos años en cuanto a políticas energéticas y es ampliamente reconocido que el gran desafío es mejorar la eficiencia energética de las viviendas (Amigo et al., 2018; Schueftan et al., 2016; 2019; Urquiza et al., 2019). En el caso de las viviendas nuevas se puede destacar la Reglamentación Térmica (RT) que comenzó a implementarse en el año 2000 y en una segunda etapa en el año 2007 (Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones [OGUC], 2007). La RT se complementa con los Planes de Descontaminación Atmosférica (PDA) (Ministerio de Medio Ambiente, 2022) que se han implementado en diversas ciudades del país que han sido declaradas zonas saturadas por material particulado. A nivel de vivienda, cabe destacar tres medidas que se incorporan a raíz de estos instrumentos normativos. Primero, se requiere cumplir con estándares más altos de aislación térmica en la construcción de viviendas nuevas; segundo, en el caso de viviendas existentes, se implementan distintos subsidios que buscan mejorar las condiciones de eficiencia energética de las viviendas, especialmente en aquellas con menor estándar térmico y, tercero, se llevan a cabo programas de recambio de calefactores en los que se debe entregar el equipo antiguo a leña a cambio de uno nuevo con otro combustible (Ministerio de Medio Ambiente, 2022).

Pero aún hay un gran desafío por delante, ya que más del 80 % de las viviendas fueron construidas previo a la entrada en vigor de estos requerimientos, por lo que se requiere mejorar de forma urgente el parque construido de viviendas (Amigo et al, 2018; Schueftan et al., 2016; Urquiza et al., 2019). En este contexto, implementar programas de mejoramiento a gran escala permitiría abordar los problemas de contaminación atmosférica y pobreza energética mencionados anteriormente.

Por otra parte, la Calificación Energética de Viviendas (CEV) —actualizada el año 2018— es un instrumento desarrollado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo y el Ministerio de Energía, que permite conocer de manera sencilla el desempeño energético de las viviendas. Se trata de un sistema de evaluación para viviendas nuevas y antiguas y cuya escala de evaluación (Figura 1) parte en la letra G, correspondiente a construcciones sin ninguna reglamentación térmica y llega hasta la A+ que representa las viviendas más eficientes, con un nivel de desempeño mucho mayor al exigido por la reglamentación térmica actual (artículo 4.1.10 OGUC).

**Figura 1**  
Escala de Calificación Energética de Viviendas (CEV)



Nota. Imagen obtenida de la web de Calificación energética, Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2023).

Dentro de los parámetros que evalúa se encuentran las características constructivas de la envolvente, ganancias solares de la vivienda y el tipo de ventilación de los distintos recintos (Ministerio de Vivienda y Urbanismo [Minvu], 2018). En este contexto, cabe mencionar que, si bien la CEV aún es voluntaria, con la aprobación de la Ley de Eficiencia Energética en 2021 todas las viviendas nuevas deberán contar con la calificación para poder obtener la recepción definitiva de obras por parte del municipio correspondiente (Ministerio de Energía, 2022).

## Metodología

### Caracterización caso de estudio

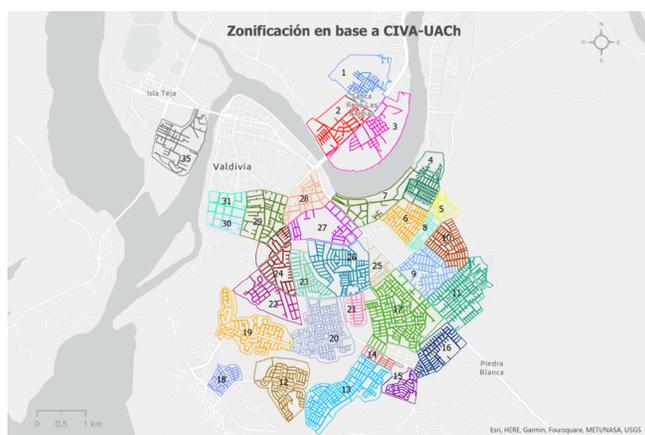
La investigación se desarrolla en la ciudad de Valdivia que se considera representativa de la realidad de las ciudades intermedias en la zona centro-sur de Chile. La comuna completa tiene una superficie de 1015,6 km<sup>2</sup>, de los cuales 146,5 km<sup>2</sup> corresponden a áreas urbanas y cuenta con una población de 154.097 habitantes, donde más de un 90 % corresponde a población urbana. Además, la ciudad presenta un alto crecimiento demográfico, que se ve reflejado en el crecimiento de las áreas urbanas y de la cantidad de viviendas (Instituto Nacional de Estadísticas [INE], 2018).

El clima de Valdivia es del tipo templado lluvioso, con una temperatura promedio de 12 °C durante el año. En el invierno la temperatura media es de 9 °C y es una de las ciudades más lluviosas de Chile, por lo que las precipitaciones son recurrentes y pueden llegar a los 2000 mm anuales, la humedad relativa en los meses invernales supera el 85 % y durante el año el promedio es de un 75 % (Castillo, 2001). Estas características determinan altas demandas de energía para calefacción, principalmente entre los meses de abril y septiembre. En cuanto a calidad de la vivienda y problemáticas asociadas a la contaminación atmosférica y pobreza energética, Valdivia presenta condiciones similares a las otras ciudades del centro-sur de Chile, por lo que la metodología aplicada y los resultados obtenidos para este caso de estudio pueden entregar información valiosa para aplicar este análisis energético a escala urbana en otras ciudades.

El presente estudio se basa en un catastro de viviendas realizado por el Centro de Información de la Vivienda Austral (CIVA-UACH 2010 y 2012), que dividió la ciudad en 35 zonas (Figura 2) y levantó 8.489 viviendas agrupándolas en tipologías según sus características constructivas. La definición de estas se realizó con base en la materialidad de las viviendas, ya sea tabiquería, hormigón o albañilería; su volumetría, uno o dos pisos, aislada, continua o pareada; su superficie y año de construcción. Esto permite tener una idea aproximada del estado constructivo y del cumplimiento de ciertos estándares térmicos, por

**Figura 2**

Zonas de análisis de las distintas tipologías arquitectónicas y constructivas de la ciudad de Valdivia.



Nota. Elaboración propia.

ejemplo, se espera que las viviendas construidas después de 2007 cumplan con la reglamentación térmica de ese año. En este levantamiento se recopiló información constructiva de las viviendas considerando: 1) materialidad muros; 2) materialidad pisos; 3) materialidad techumbre; 4) características de las puertas; 5) espesor del aislante térmico; 6) dimensiones, orientación y características de los paramentos vidriados; y 7) tipo de calefacción utilizada.

Estas viviendas se agruparon originalmente en 62 tipologías que fueron analizadas en relación con el desempeño energético actual y potencial de ahorro energético al implementar medidas de eficiencia energética. No obstante, para efectos de la presente investigación se amplió el número de tipologías, incorporando 12 más, que incluyen variaciones arquitectónicas producto de ampliaciones y modificaciones a las tipologías analizadas por CIVA-UACH y que permiten detallar de mejor forma el comportamiento energético de las viviendas.

Una vez identificadas las 74 tipologías se realizó durante el año 2019 una encuesta a más de 2000 viviendas distribuidas en toda la ciudad que tuvo como objetivo recoger patrones de uso y aspectos socioeconómicos de las familias que habitan dichas viviendas. En esta encuesta se levantó información sobre: 1) tipo de calefacción utilizado; 2) cantidad de combustible utilizado al mes y año; 3) equipo de calefacción, modelo marca; 4) horas al día en que se utiliza el equipo de calefacción; 5) ubicación y año de construcción de la vivienda; 6) valor de la vivienda; y 7) uso, ya sea residencial, comercial o mixto. Lo anterior para complementar la información constructiva de las viviendas.

#### **Modelaciones energéticas y mapeo de información**

Se realizaron modelaciones energéticas para las 74 distintas tipologías de viviendas presentes en la ciudad de Valdivia, con el propósito de determinar la demanda energética anual de calefacción de las viviendas construidas en la ciudad en distintos periodos. Con la información constructiva levantada en terreno, se determinaron los coeficientes de transmitancia térmica (valor "U") de los distintos elementos constructivos que conforman la envolvente de la vivienda (muros, piso y techumbre) (Tabla 1).

Para realizar la modelación se utilizaron tres Planillas de Balance Térmico Dinámico (PBSD) del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu, 2018). La primera corresponde a datos de arquitectura de la vivienda, (PBSD 01, datos de arquitectura), en esta se recopilan datos y características de la vivienda, tales como: ubicación, zona térmica, elementos constructivos, transmitancias de la envolvente, sistema de calefacción, sistema de agua caliente sanitaria y dimensiones de la vivienda. La segunda planilla (PBSD 02, Motor de cálculo demanda de energía) cuenta con un código computacional que resuelve el balance térmico para cada intervalo de tiempo y evalúa la temperatura interior de la vivienda con base en distintas variables. En esta se ejecutan los análisis con los datos de arquitectura ingresados en la planilla PBSD 01, los que son almacenados en la planilla PBSD 03 (datos de equipo y resultados).

Para evaluar el potencial de mejora de las viviendas se realizó una simulación de las 74 distintas tipologías suponiendo el cumplimiento del estándar PDA para la ciudad de Valdivia. Específicamente se utilizaron los siguientes criterios:

- Para los muros y techo de la vivienda se considera la aislación necesaria para alcanzar la transmitancia térmica requerida por el PDA.
- Para muros de albañilería, se considera aislación de poliestireno expandido sobre la cara interior del muro.
- Para muros de tabiquería, la aislación se instala al interior del tabique.

- Para cielos, la aislación se instala sobre la estructura de cielo falso interior.
- Para las ventanas, se considera doble vidriado hermético (DVH) con 6 mm de cámara de aire y marco de aluminio con ruptura de puente térmico.
- Para las puertas, se consideran maderas sólidas que cumplan con la transmitancia térmica requerida por el PDA.

**Tabla 1**

Resultados de Transmitancia Térmica para elementos constructivos viviendas analizadas

	1° piso	Valor U	Aislación (mm)	2° piso	Valor U	Aislación (mm)	Valor U	Aislación (mm)	Superficie
<b>Tipología 1</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,58	50	0,31	120	121,27
<b>Tipología 2</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,58	50	0,31	120	115,17
<b>Tipología 3</b>	Tabiquería	0,68	40	Tabiquería	0,68	40	0,31	120	56,04
<b>Tipología 4</b>	Tabiquería	0,44	85	Tabiquería	0,44	85	0,91	40	92,61
<b>Tipología 5</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,6	50	0,31	120	108,8
<b>Tipología 6</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,44	85	0,31	120	144,2
<b>Tipología 7</b>	Albañilería	1,02	20	Tabiquería	0,6	50	0,31	120	90,6
<b>Tipología 8</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,68	40	0,31	120	128
<b>Tipología 9</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,53	50	0,31	120	138,2
<b>Tipología 10</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	0,61	50	0,7	50	91,6
<b>Tipología 11</b>	Tabiquería	1,97	N/A	Tabiquería	1,97	N/A	4,68	N/A	98,8
<b>Tipología 12</b>	Tabiquería	0,43	85	Tabiquería	0,43	85	0,31	120	141,4
<b>Tipología 13</b>	Tabiquería	1,36	N/A	tabiquería	1,36	N/A	0,7	50	108
<b>Tipología 14</b>	Tabiquería	0,81	25	tabiquería	0,81	25	1,14	25	65,76
<b>Tipología 15</b>	Tabiquería	0,42	90	tabiquería	0,42	90	0,84	40	124,2
<b>Tipología 16</b>	Tabiquería	0,45	85	tabiquería	0,45	85	0,33	120	85,6
<b>Tipología 17</b>	Tabiquería	1,04	20	tabiquería	0,98	20	1,26	25	54,1
<b>Tipología 18</b>	Tabiquería	0,7	40	Tabiquería	0,7	40	0,33	120	77,2
<b>Tipología 19</b>	Tabiquería	1,49	N/A	Tabiquería	1,49	N/A	3,76	N/A	53,1
<b>Tipología 20</b>	Tabiquería	2,11	N/A	Tabiquería	2,11	N/A	3,76	N/A	51,4
<b>Tipología 21</b>	Tabiquería	1	20	Tabiquería	1	20	1,4	20	75,3
<b>Tipología 22</b>	Albañilería	2,05	N/A	Tabiquería	1,8	N/A	4,72	N/A	78,4
<b>Tipología 23</b>	Albañilería	1,82	N/A	Tabiquería	0,6	50	0,33	120	75
<b>Tipología 24</b>	Tabiquería	0,54	50	Tabiquería	0,54	50	0,64	50	52
<b>Tipología 25</b>	Tabiquería	0,55	65	Tabiquería	0,55	65	0,34	120	82,5
<b>Tipología 26</b>	Tabiquería	0,57	65	Tabiquería	0,57	65	0,33	120	97,5
<b>Tipología 27</b>	Tabiquería	0,44	85	Tabiquería	0,56	65	0,59	65	122,6
<b>Tipología 28</b>	Tabiquería	0,6	50	Tabiquería	0,6	50	0,34	120	77,5
<b>Tipología 29</b>	Albañilería	1,99	N/A	Albañilería	1,99	N/A	2,46	10	105,2

**Tabla 1 (Continuación)***Resultados de Transmitancia Térmica para elementos constructivos viviendas analizadas*

	1° piso	Valor U	Aislación (mm)	2° piso	Valor U	Aislación (mm)	Valor U	Aislación (mm)	Superficie
<b>Tipología 30</b>	Albañilería	1,85	N/A	Tabiquería	1,56	N/A	0,71	50	103,4
<b>Tipología 31</b>	Albañilería	1,02	20	Tabiquería	0,61	50	0,33	120	71,7
<b>Tipología 32</b>	Albañilería	2,11	N/A	Tabiquería	0,69	40	0,71	50	59,7
<b>Tipología 33</b>	Tabiquería	0,84	25	N/A	-	N/A	2,63	N/A	50,2
<b>Tipología 34</b>	Tabiquería	1,23	N/A	Tabiquería	1,23	N/A	1,58	20	82,8
<b>Tipología 35</b>	Tabiquería	1,9	N/A	Tabiquería	1,9	N/A	3,01	N/A	59,03
<b>Tipología 36</b>	Tabiquería	0,9	25	Tabiquería	0,9	25	1,07	30	78
<b>Tipología 37</b>	Tabiquería	0,9	25	Tabiquería	0,9	25	1,32	25	46,35
<b>Tipología 38</b>	Tabiquería	0,9	20	Tabiquería	0,9	20	1,1	30	44,27
<b>Tipología 39</b>	Tabiquería	0,9	25	Tabiquería	0,9	25	4,72	N/A	40,2
<b>Tipología 40</b>	Tabiquería	1,01	20	Tabiquería	1,01	20	1,27	20	47,5
<b>Tipología 41</b>	Tabiquería	1,76	N/A	Tabiquería	1,76	N/A	3,01	N/A	44,8
<b>Tipología 42</b>	Tabiquería	1,76	N/A	Tabiquería	1,76	N/A	3,01	N/A	44,8
<b>Tipología 43</b>	Albañilería	2,05	N/A	N/A	-	N/A	0,75	50	50
<b>Tipología 44</b>	Albañilería	2,05	N/A	N/A	-	N/A	0,75	50	52,6
<b>Tipología 45</b>	Albañilería	2,11	N/A	N/A	-	N/A	0,71	50	52
<b>Tipología 46</b>	Tabiquería	1,07	20	N/A	-	N/A	1,45	20	61,07
<b>Tipología 47</b>	Tabiquería	1,07	20	Tabiquería	1,07	20	0,71	50	88,4
<b>Tipología 48</b>	Tabiquería	1,9	N/A	N/A	-	N/A	3,76	N/A	36
<b>Tipología 49</b>	Tabiquería	2,11	N/A	N/A	-	N/A	4,72	N/A	100,57
<b>Tipología 50</b>	Tabiquería	1,07	20	N/A	-	N/A	1,45	20	44,2
<b>Tipología 51</b>	Tabiquería	0,71	40	N/A	-	N/A	1,08	30	87,7
<b>Tipología 52</b>	Tabiquería	1,9	N/A	N/A	-	N/A	0,71	50	61,5
<b>Tipología 53</b>	Albañilería	2,11	N/A	N/A	-	N/A	1,24	25	52,8
<b>Tipología 54</b>	Tabiquería	0,42	90	N/A	-	N/A	0,88	40	91,5
<b>Tipología 55</b>	Tabiquería	0,77	30	N/A	-	N/A	1,14	30	84,75
<b>Tipología 56</b>	Tabiquería	0,6	50	N/A	-	N/A	0,32	120	61,52
<b>Tipología 57</b>	Tabiquería	0,44	85	N/A	-	N/A	0,29	140	75,4
<b>Tipología 58</b>	Tabiquería	0,59	50	N/A	-	N/A	0,33	120	30,35
<b>Tipología 59</b>	Tabiquería	2,11	N/A	N/A	-	N/A	3,76	N/A	40
<b>Tipología 60</b>	Tabiquería	0,6	50	N/A	-	N/A	0,3	120	77
<b>Tipología 61</b>	Tabiquería	0,85	30	N/A	-	N/A	1,14	30	61,22
<b>Tipología 62</b>	Tabiquería	0,96	25	N/A	-	N/A	1,18	25	35,3
<b>Tipología 63</b>	Tabiquería	1,8	N/A	N/A	-	N/A	4,72	N/A	61,94

**Tabla 1 (Continuación)**

Resultados de Transmitancia Térmica para elementos constructivos viviendas analizadas

	1° piso	Valor U	Aislación (mm)	2° piso	Valor U	Aislación (mm)	Valor U	Aislación (mm)	Superficie
<b>Tipología 64</b>	Tabiquería	2,38	N/A	N/A	-	N/A	1,24	25	40
<b>Tipología 65</b>	Tabiquería	2,65	N/A	N/A	-	N/A	3,92	N/A	35
<b>Tipología 66</b>	Tabiquería	0,74	30	N/A	-	N/A	0,33	120	59
<b>Tipología 67</b>	Tabiquería	1,38	10	Tabiquería	1,38	10	0,69	50	62,88
<b>Tipología 68</b>	Tabiquería	1,2	20	N/A	-	N/A	1,47	20	67
<b>Tipología 69</b>	Tabiquería	1,32	N/A	N/A	-	N/A	2,84	N/A	65
<b>Tipología 70</b>	Tabiquería	1,9	N/A	N/A	-	N/A	3,89	N/A	43
<b>Tipología 71</b>	Tabiquería	0,96	25	N/A	-	N/A	1,26	25	30,15
<b>Tipología 72</b>	Albañilería	1,47	N/A	N/A	-	N/A	1,18	25	42,62
<b>Tipología 73</b>	Tabiquería	0,65	50	N/A	-	N/A	0,33	120	28,7
<b>Tipología 74</b>	Albañilería	2,05	N/A	N/A	-	N/A	1,37	20	43,25

Nota. Elaboración propia.

La visualización de la información es clave para poder entregar datos de manera simple, tanto a los usuarios como a los tomadores de decisiones. Al respecto, utilizando sistemas de información geográfica (SIG), se digitalizaron las 35 zonas de la ciudad de Valdivia, asociando en cada una de ellas información sobre: características constructivas de las viviendas, desempeño energético actual, consumo de leña actual y potencial de la reducción en el consumo energético al aplicarse mejoras constructivas para cumplir con el estándar PDA. Posteriormente se analizaron las tipologías presentes en cada zona, obteniendo sectores que presentaban mayor homogeneidad de tipologías que otros. Debido a la dificultad que supusieron las zonas más heterogéneas, se optó por realizar un análisis enfocado en las zonas más homogéneas y con un carácter primordialmente residencial dentro de la ciudad. Luego, este análisis fue traspasado a mapas urbanos que reflejan el potencial de mejora tras aplicar estándar PDA en cada zona.

El análisis descrito se realiza con base en modelos híbridos, partiendo de una aproximación del tipo *bottom-up* que se basa en el análisis energético y constructivo a escala de edificio, de patrones de uso, encuestas y datos reales de consumo energético de edificios individuales, para luego poder extrapolar la información a escala de barrio (Li et al., 2017).

Para la definición del modelo de análisis se consideró que el caso de las ciudades de la zona centro-sur de Chile tiene varias particularidades en cuanto a los patrones de uso de energía y a la disponibilidad de información sobre ello. Por ejemplo, no existe información precisa del consumo real de leña para cada ciudad o vivienda, debido a que no se cuenta con documentos que lo respalden, como sería el caso de cuentas de electricidad o gas. Esto se debe a que la compra se hace muchas veces de manera gradual y en el mercado informal, lo que hace más difícil cuantificar el gasto mensual o anual de cada hogar (Schueftan, & González, 2015). A su vez, en muchos países existe más información sobre los sistemas de calificación energética de las viviendas, lo que permite contar con amplias bases de datos sobre el desempeño energético del parque construido, pero en el caso de Chile la CEV aún es una herramienta voluntaria con poca penetración en el mercado, por lo que no se cuenta con bases de datos masivas para las ciudades.

Por lo anterior, es difícil obtener datos globales tipo top-down para realizar los estudios de consumo energético, ya que no existen bases de datos a nivel centralizado. Debido a esto se opta por partir por un modelo de análisis tipo bottom-up, pero que permita extrapolar la información de las viviendas a escala urbana. En este contexto se llevaron a cabo los levantamientos en terreno y encuestas, que permitieron tener información constructiva y de uso específica para cada vivienda.

En síntesis, la metodología propuesta es un híbrido a partir de modelos bottom-up, ya que si bien, se parte de modelos teóricos específicos, caso a caso, con énfasis en la composición estructural del edificio y su consumo energético; también se incorporan levantamientos in situ y encuestas que permiten tener una idea más precisa del comportamiento de los habitantes de la vivienda en cuanto al uso de la calefacción (Ferrari et al., 2019), lo que resulta clave para tener una aproximación más precisa al consumo energético de la vivienda y al estado real y potencial de mejora de la misma. Además, este tipo de modelo permite analizar patrones de uso que son claves para el desarrollo de futuras metodologías.

## Resultados

### Análisis energético: situación actual y potencial de mejora

De las 74 tipologías identificadas para el catastro (Tabla 2), cuatro corresponden a departamentos, 49 a viviendas aisladas y 21 a viviendas pareadas. Del total, hay 27 viviendas de un piso, 42 de dos pisos y una de tres pisos. Los materiales principales son albañilería y tabiquería. Se calcularon las demandas energéticas para cada tipología de vivienda, detallando la Demanda de Calefacción (D. cal.), Demanda de Refrigeración (D. ref.) y Demanda Total (Total) kWh/m<sup>2</sup> por año. Además, se obtuvo la cantidad de leña necesaria para calefaccionar la vivienda (en m<sup>3</sup>-estéreo)<sup>1</sup>. Todo lo anterior se calculó para las viviendas en su estado actual y en la situación mejorada (reacondicionada térmicamente) para cumplir con los requisitos del PDA de Valdivia.

**Tabla 2**

Resultados demanda energética total en su estado actual y con estándar PDA, y calificación energética en su estado actual y con estándar PDA

	Vivienda existente			Vivienda PDA			
	dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m <sup>3</sup> )	Dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m <sup>3</sup> )	Porcentaje de ahorro
Tipología 1	14.646,0	E	10,5	7.580,3	D	5,5	43 %
Tipología 2	13.933,2	E	10,0	7.570,5	D	5,4	41 %
Tipología 3	5.238,2	D	3,8	3.654,1	C	2,6	30 %
Tipología 4	12.018,7	E	8,6	5.640,6	C	4,1	56 %
Tipología 5	14.544,4	F	10,5	7.529,6	D	5,4	44 %
Tipología 6	16.489,3	E	11,9	9.144,2	C	6,6	42 %
Tipología 7	11.540,8	E	8,3	6.966,6	C	5,0	39 %

1. Para el cálculo de leña se considera hualle o eucaliptus en estado seco (20 % humedad), con un calor bruto unitario = 1737 kWh/m<sup>3</sup>-estéreo

**Tabla 2 (Continuación)**

Resultados demanda energética total en su estado actual y con estándar PDA, y calificación energética en su estado actual y con estándar PDA

	Vivienda existente			Vivienda PDA			
	dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m <sup>3</sup> )	Dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m <sup>3</sup> )	Porcentaje de ahorro
Tipología 8	15.031,4	E	10,8	8.263,0	C	5,9	43 %
Tipología 9	18.561,9	F	13,4	9.999,6	D	7,2	39 %
Tipología 10	14.686,8	F	10,6	6.077,5	C	4,4	59 %
Tipología 11	59.207,4	G	42,6	7.725,4	D	5,6	86 %
Tipología 12	12.222,1	D	8,8	8.695,8	D	6,3	29 %
Tipología 13	15.375,4	F	11,1	6.925,0	D	5,0	52 %
Tipología 14	13.424,1	G	9,7	4.485,4	C	3,2	66 %
Tipología 15	16.186,2	F	11,6	7.586,1	D	5,5	53 %
Tipología 16	7.943,0	D	5,7	5.934,3	C	4,3	25 %
Tipología 17	10.641,0	G	7,7	3.818,6	C	2,7	65 %
Tipología 18	9.013,1	E	6,5	5.758,6	C	4,1	36 %
Tipología 19	25.833,6	G	18,6	3.799,0	C	2,7	86 %
Tipología 20	25.337,4	G	18,2	3.698,8	C	2,7	85 %
Tipología 21	16.095,2	G	11,6	5.150,7	D	3,7	66 %
Tipología 22	39.685,3	G	28,6	5.271,4	D	3,8	86 %
Tipología 23	8.967,5	E	6,5	4.862,3	C	3,5	44 %
Tipología 24	6.738,1	F	4,8	3.657,4	C	2,6	43 %
Tipología 25	7.812,0	D	5,6	5.462,1	C	3,9	31 %
Tipología 26	10.438,3	E	7,5	6.829,8	D	4,9	33 %
Tipología 27	12.469,1	E	9,0	7.309,1	C	5,3	41 %
Tipología 28	7.226,0	D	5,2	4.715,4	C	3,4	33 %
Tipología 29	27.248,0	G	19,6	6.586,1	C	4,7	73 %
Tipología 30	16.277,9	F	11,7	6.582,1	D	4,7	56 %
Tipología 31	8.132,2	E	5,9	4.791,5	C	3,4	40 %
Tipología 32	6.028,4	D	4,3	2.956,3	C	2,1	49 %
Tipología 33	16.069,8	G	11,6	3.766,1	C	2,7	77 %
Tipología 34	11.342,3	E	8,2	4.025,3	C	2,9	65 %
Tipología 35	18.877,2	G	13,6	3.417,6	C	2,5	83 %
Tipología 36	8.907,6	E	6,4	3.876,7	C	2,8	57 %
Tipología 37	6.397,1	F	4,6	2.347,5	B	1,7	57 %
Tipología 38	5.597,3	E	4,0	2.265,2	C	1,6	53 %
Tipología 39	11.026,3	G	7,9	2.151,6	B	1,5	81 %

**Tabla 2 (Continuación)**

Resultados demanda energética total en su estado actual y con estándar PDA, y calificación energética en su estado actual y con estándar PDA

	Vivienda existente			Vivienda PDA			
	dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m <sup>3</sup> )	Dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m <sup>3</sup> )	Porcentaje de ahorro
Tipología 40	6.108,5	E	4,4	2.413,8	B	1,7	61 %
Tipología 41	10.424,2	G	7,5	2.423,6	C	1,7	77 %
Tipología 42	10.424,2	G	7,5	2.423,6	C	1,7	77 %
Tipología 43	10.296,8	G	7,4	4.048,4	D	2,9	61 %
Tipología 44	10.394,5	G	7,5	4.143,1	D	3,0	61 %
Tipología 45	9.630,0	G	6,9	3.534,7	C	2,5	64 %
Tipología 46	12.215,1	G	8,8	4.333,3	D	3,1	66 %
Tipología 47	12.927,1	F	9,3	5.363,3	C	3,9	55 %
Tipología 48	18.709,2	G	13,5	3.019,6	C	2,2	85 %
Tipología 49	61.075,8	G	43,9	8.508,7	D	6,1	85 %
Tipología 50	12.683,4	G	9,1	3.889,1	C	2,8	71 %
Tipología 51	18.314,1	G	13,2	7.024,7	D	5,1	64 %
Tipología 52	12.771,0	G	9,2	4.987,9	D	3,6	59 %
Tipología 53	14.124,6	G	10,2	4.053,6	C	2,9	73 %
Tipología 54	15.811,7	G	11,4	7.066,8	D	5,1	57 %
Tipología 55	17.023,6	G	12,2	6.286,7	D	4,5	64 %
Tipología 56	7.514,1	E	5,4	5.186,2	C	3,7	31 %
Tipología 57	8.663,5	E	6,2	6.150,5	D	4,4	28 %
Tipología 58	3.950,2	E	2,8	2.901,5	C	2,1	27 %
Tipología 59	22.477,1	G	16,2	3.583,3	D	2,6	85 %
Tipología 60	9.089,7	E	6,5	6.673,1	D	4,8	27 %
Tipología 61	14.016,0	G	10,1	4.891,3	C	3,5	66 %
Tipología 62	6.101,9	F	4,4	2.504,4	C	1,8	60 %
Tipología 63	37.588,2	G	27,0	5.247,0	D	3,8	86 %
Tipología 64	7.975,6	G	5,7	2.744,3	C	2,0	66 %
Tipología 65	16.132,5	G	11,6	2.488,6	C	1,8	85 %
Tipología 66	5.711,2	D	4,1	3.897,8	C	2,8	31 %
Tipología 67	7.104,5	E	5,1	3.511,8	C	2,5	51 %
Tipología 68	16.630,4	G	12,0	5.328,7	D	3,8	69 %
Tipología 69	20.722,8	G	14,9	4.573,7	D	3,3	79 %
Tipología 70	17.952,5	G	12,9	2.978,6	C	2,1	85 %
Tipología 71	6.015,2	G	4,3	2.265,7	C	1,6	63 %

**Tabla 2 (Continuación)**

Resultados demanda energética total en su estado actual y con estándar PDA, y calificación energética en su estado actual y con estándar PDA

	Vivienda existente			Vivienda PDA			
	dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m³)	Dem. Calefa. (kWh/año)	CEV	Consumo leña (m³)	Porcentaje de ahorro
Tipología 72	8.057,4	G	5,8	3.118,6	C	2,2	61 %
Tipología 73	2.850,3	D	2,1	2.057,8	C	1,5	28 %
Tipología 74	12.455,4	G	9,0	3.513,8	C	2,5	73 %

Nota. Elaboración propia.

A modo de síntesis se presenta la Tabla 3 que muestra la demanda energética total según sistema de agrupamiento de las viviendas en su estado actual y bajo estándar PDA.

**Tabla 3**

Síntesis de demanda energética total según sistema de agrupamiento de las viviendas en su estado actual y con estándar PDA

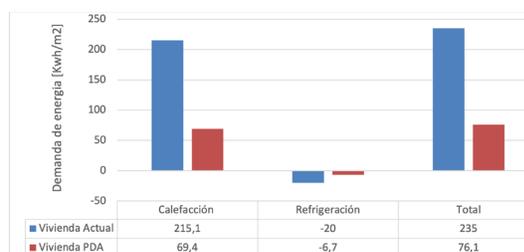
	Demanda total [kWh/m2]			
	Vivienda aislada	Vivienda pareada	Departamento	74 tipologías de vivienda
Estado actual	246,4	212	207,1	235
Estado PDA	81,3	62,7	77	76,1

Nota. Elaboración propia.

Se puede observar que las viviendas en estado actual tienen en promedio una demanda total de energía de 235 kWh/m2 y bajo los estándares PDA tendrían en promedio una demanda de 76,1 kWh/m2, es decir, se estima aproximadamente un 68 % menos de demanda de energía en las viviendas bajo estándar PDA (Figura 3). Por otra parte, al analizar la demanda total de energía (kWh/m2) promedio de las viviendas en estado actual según el nivel de aislación térmica que presentan los hogares, se observa que las viviendas sin aislación tienen en promedio una demanda energética 70 % superior a las que cumplen con la Normativa Térmica de 2007 y hasta 85 % mayor que aquellas que cumplen con estándar PDA. Estos resultados muestran el impacto que ha tenido la aplicación de las distintas etapas de las normativas térmicas que están directamente relacionadas con los años de construcción de las viviendas y, por lo tanto, con el crecimiento y desarrollo de las distintas áreas de la ciudad.

**Figura 3**

Demandas de energía promedio de las viviendas actuales y las viviendas cumpliendo requerimientos del PDA de Valdivia (kWh/m2 por año)



Nota. Elaboración propia.

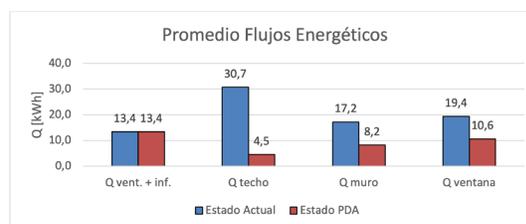
A su vez, al realizar la comparación de la leña consumida en ambos estados de las viviendas, el consumo promedio disminuiría casi 7 m<sup>3</sup>-estéreo (de 10,3 m<sup>3</sup>-estéreo a 3,5 m<sup>3</sup>-estéreo), lo que corresponde a un monto que puede fluctuar entre los 182.000 y 374.850 pesos por hogar (Corporación Nacional Forestal [Conaf], 2023). Los resultados evidencian el potencial del mejoramiento térmico de viviendas para reducir el consumo de leña y, por lo tanto, la contaminación atmosférica en los barrios estudiados. Además, la aplicación de estas estrategias reduciría los gastos de los hogares y la situación de pobreza energética en la que se encuentran un porcentaje importante de ellos.

Por otra parte, el análisis de desempeño energético de las viviendas busca identificar a través de qué elemento se gana o se pierde energía, para lo que se evaluaron los flujos energéticos (Q) acumulados mensuales para un día representativo del mes de julio, correspondiente al mes más frío del año. Según los resultados obtenidos, las viviendas en estado actual pierden energía principalmente por techumbres, ventanas, muros y ventilación e infiltraciones —en ese orden—, obteniendo leves ganancias por radiación solar.

Al evaluar las mismas viviendas, simulando un acondicionamiento térmico que cumpla con estándar del PDA, se observó que las pérdidas de energía por ventilación e infiltraciones se mantienen similares, que la techumbre es el elemento que presenta mayor mejoría disminuyendo las pérdidas de energía en un 85 %, mientras que las mejoras en muros y ventanas disminuyen las pérdidas de energía en torno a un 50 % cada uno (Figura 4). Esto revela la importancia de priorizar la aislación de techumbre, seguido de mejoras en muros y ventanas y el potencial de planificar intervenciones por etapas para los distintos sectores de la ciudad.

**Figura 4**

Comparación de los flujos energéticos entre la vivienda actual y vivienda cumpliendo requerimientos del PDA



Nota. \* Q ven.+ inf.: corresponde a la suma de los flujos correspondientes a ventilación e infiltración. Elaboración propia.

También se determinaron las horas de desconfort (HD), que permiten conocer el tiempo en que la vivienda se encuentra naturalmente fuera de la banda de confort, ya sea por estar bajo el rango de confort HD (-) o sobre este HD (+). Al realizar la comparación entre el consumo en calefacción, iluminación y agua caliente sanitaria, medido en kWh/año, de la vivienda en su estado actual y en la simulación bajo estándar PDA, se puede concluir que las viviendas en estado actual presentan en promedio 186,1 HD (-), equivalentes a 236 días al año. En este período de tiempo las viviendas se encuentran sin un sistema de climatización y a una temperatura bajo el límite inferior de la banda de confort. Además, estas presentan 23,5 HD (+), equivalentes a 30 días en los cuales la temperatura se encuentra sobre el límite superior de la banda de desconfort. Por su parte, las viviendas simuladas bajo estándar PDA presentan en promedio 155,8 HD (-), equivalentes a 197 días bajo la banda de confort, es decir, habrían 40 días menos de frío respecto del estado actual.

El consumo por concepto de calefacción, iluminación y agua caliente sanitaria bordea los 33.000 kWh/año en las viviendas en su estado actual, mientras que aquellas mejoradas al estándar del PDA tienen un consumo de alrededor de 14.000 kWh/año en promedio. De lo anterior se puede concluir que si las viviendas ubicadas en la ciudad de Valdivia adoptaran las exigencias del PDA mejorarían notablemente su desempeño energético, siendo los siguientes puntos las principales mejoras: la demanda total de las viviendas

disminuiría en promedio un 68 %, el consumo de leña lo haría en un 66 %, los flujos energéticos por la techumbre se reducirían en un 85 %, por muros un 52 % y por ventanas un 46 %, las HD (-) bajarían un 16 % y el consumo de calefacción, iluminación y agua caliente sanitaria disminuiría en un 57 %.

Los resultados presentados muestran que el reacondicionamiento térmico de viviendas, al reducir niveles de contaminación, gasto de los hogares a la vez que mejorar las condiciones de confort permite abordar la pobreza energética de manera integral, no solo generando beneficios ambientales, sino también sociales y económicos. En este sentido, cobra especial relevancia identificar las oportunidades de aplicación de estas estrategias en un contexto urbano con características particulares.

**Análisis espacial y aspectos urbanos**

Con los datos obtenidos se realiza un análisis a escala de barrio con base en la zonificación propuesta, centrándose en las zonas preponderantemente residenciales y homogéneas en cuanto a sus tipologías. Tal como se evidencia en los siguientes mapas, se puede observar que existen sectores de especial interés para aplicar programas de mejoramiento a escala de barrio. Por ejemplo, en la Figura 5 se identifican las zonas donde existe una concentración de tipologías de vivienda con menor desempeño energético.

**Figura 5**

*Distribución de tipologías de vivienda con menor desempeño energético*

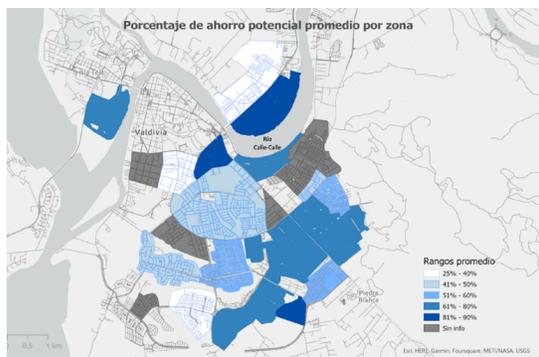


Nota. Elaboración propia.

Específicamente se identifican 10 tipologías de viviendas distribuidas en ocho zonas de la ciudad. Dichas zonas coinciden con sectores donde existe un mayor potencial de ahorro energético al aplicar criterios de acondicionamiento térmico que lleven a las viviendas al estándar del PDA de Valdivia (Figura 6).

**Figura 6**

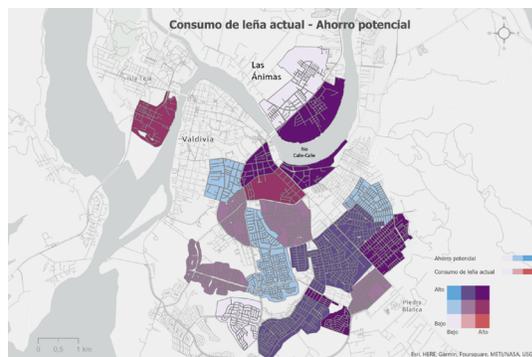
Mapa de potencial de ahorro energético al aplicar criterios del PDA de Valdivia a las 74 tipologías de vivienda identificadas



Nota. Elaboración propia.

**Figura 7**

Mapa de consumo actual de leña y potencial ahorro al implementar mejoras para cumplir con los requerimientos del PDA



Nota. Elaboración propia.

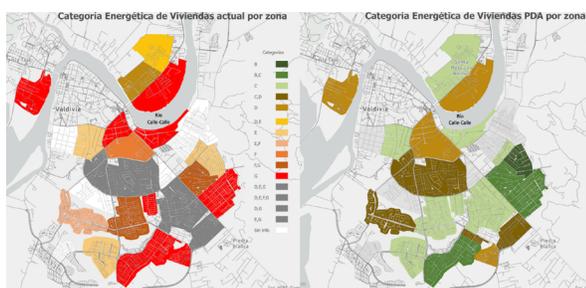
De los resultados obtenidos se desprende que el factor de forma es el parámetro morfológico que refleja mejor el comportamiento energético de las viviendas y que varía según la orientación de la construcción, por lo tanto, surge la oportunidad de implementar estrategias que permitan complementar volumetrías compactas con estrategias de diseño solar pasivo, lo que podría lograrse en distintas densidades urbanas.

En los mapas realizados se puede evidenciar que los sectores residenciales a priorizar se encuentran principalmente en el sector al norte del río Calle-Calle, y en la zona sur de la ciudad. Además, la Figura 7 permite identificar zonas específicas donde se cruzan un alto consumo actual de leña con un alto potencial de mejora en el desempeño energético, dando como resultado una propuesta de mapa de vulnerabilidad de la ciudad donde se destacan las zonas que constituyen puntos de interés tanto para implementar programas de política pública, como para impulsar otras iniciativas para avanzar en el mejoramiento térmico de las viviendas. Cabe destacar que se trata de un indicador de vulnerabilidad preliminar, que podría complejizarse incorporando otras variables que permitan identificar con mayor robustez los sectores a priorizar, por ejemplo, incluir datos del comportamiento térmico de los hogares, datos sociodemográficos e información más detallada sobre el estado constructivo actual de las viviendas.

Por otra parte, aplicar la metodología de análisis de CEV constituye una herramienta que permite visualizar y comunicar de forma simple el desempeño actual y potencial de mejora en los distintos sectores de la ciudad y comprender ciertas dinámicas energéticas a escala urbana. Al espacializar el análisis de desempeño según la Calificación Energética de Viviendas (CEV), tanto en la situación actual como en la opción reacondicionada según PDA, se pueden identificar sectores en los que se presentan los mayores

**Figura 8**

Mapa de Calificación Energética de Viviendas (CEV). Comparativo entre situación actual y opción mejorada (según PDA de Valdivia) por zona de estudio



Nota. Elaboración propia.

potenciales de mejoras en cuanto a la calificación que se obtiene. Para este cálculo, se tomaron valores promedio por zonas y no se consideraron aquellas donde se obtienen más de dos letras CEV (Figura 8).

Aunque los resultados de las modelaciones energéticas extrapoladas a escala urbana no permiten captar todo el detalle de las variaciones de la forma física de los edificios ni el comportamiento de sus ocupantes en toda su complejidad, el modelo híbrido utilizado que combina la modelación teórica con datos de las encuestas aplicadas en las zonas de estudio permite calibrar los parámetros que presentan una mayor incertidumbre y validar los resultados de la simulación con datos medidos en terreno.

## Discusión

El análisis de desempeño energético a escala urbana y escala de barrio tiene el potencial de ser una herramienta para apoyar las decisiones de planificación urbana, así como favorecer procesos de transición energética y la implementación de estrategias de resiliencia climática y sustentabilidad a escala urbana (Ferrando et al., 2020; Li et al., 2020; Mutani et al., 2020). Por otra parte, permite conocer con mayor precisión la distribución del consumo energético en la ciudad y las principales variables que influyen en este para generar políticas que aporten a mejorar la habitabilidad y sustentabilidad de las ciudades (Mutani, & Todeschi, 2017). Esta información es clave tanto para la focalización y el seguimiento de las políticas públicas, como también para promover otro tipo de iniciativas comunitarias o privadas que permitan avanzar con mayor rapidez en el reacondicionamiento del parque construido de viviendas e implementar programas prioritarios a gran escala (Ferrando et al., 2020; Ji et al., 2022; Martins et al., 2019).

El trabajo realizado en Valdivia permite identificar los desafíos para avanzar en la modelación energética a escala urbana en Chile y las oportunidades para utilizar esta información en la promoción de procesos de mejoramiento térmico de viviendas, tanto a escala de barrio, como de ciudad. Al respecto, se identifican diversos desafíos, por una parte, se requiere avanzar en modelos que permitan captar adecuadamente la variación de los datos en el tiempo, de manera de actualizar los modelos sin tener que realizar procesos complejos de levantamiento de datos (Ali et al., 2021). Esto es especialmente relevante ya que las viviendas tienen constantes intervenciones y variaciones en sus tipologías constructivas producto de la autoconstrucción y ampliaciones informales que hacen complejo el seguimiento de estos fenómenos.

Por la misma razón, es importante, para futuras investigaciones considerar una toma de datos más amplia, como lo propuesto por Chévez et al. (2019), que tiene en cuenta variables sociodemográficas, de morfología urbana, constructiva y de consumo energético para realizar las evaluaciones energéticas. En este contexto, a futuro se propone obtener información sobre los patrones de uso de la energía en las viviendas mediante encuestas y datos reales de temperatura que permitan alimentar y calibrar las simulaciones con el fin de reducir el margen de error de estas y comprender de mejor manera el comportamiento térmico de las tipologías.

Además, es clave trabajar en la integración de la modelación energética urbana con otros tipos de modelos, por ejemplo, modelos climáticos, de sistemas energéticos, de confort exterior, de movilidad, etc. (Johari et al., 2020) que permitan predecir y tomar decisiones a mediano y largo plazo (Vartholomaios, 2017). También es importante tomar en cuenta factores morfológicos del entorno de las edificaciones y los efectos que posibles modificaciones puedan tener en el desempeño a escala de edificio y a escala urbana (Frayssinet et al., 2018).

En este contexto, la presente investigación realiza un análisis de tipologías específicas de vivienda, para luego hacer una extrapolación a la escala urbana, destacando a nivel de ciudad cuáles serían los potenciales

ahorros energéticos en caso de hacer mejoras en las tipologías de viviendas con mayor consumo energético y mayor potencial de mejora. Esta información es decisiva al aportar insumos que permiten estimar de mejor manera el estado actual del parque construido y su potencial de mejora, utilizando variables más específicas que los datos censales que pueden ser obtenidos de manera centralizada.

Siguiendo esta metodología híbrida, en estudios futuros, la información obtenida para las viviendas de las distintas zonas de Valdivia podrá ser extrapolada a otras que no vayan a ser analizadas en detalle, pero que cumplan con características tipológicas y perfiles de uso de energía similares. Además, se podría estudiar la aplicación de los datos de estas tipologías de viviendas en otras ciudades con características climáticas similares a las del caso de estudio.

## Conclusiones

En Valdivia, al igual que en gran parte del territorio nacional las viviendas tienen un deficiente desempeño energético, principalmente debido al bajo o incluso nulo nivel de aislamiento térmico. La ciudad presenta un clima frío con bajas temperaturas la mayor parte del año, por lo cual la calefacción de las viviendas se vuelve primordial, pero su precariedad térmica hace perder enormes cantidades de energía, obligando a un excesivo consumo de leña para satisfacer una necesidad básica de habitabilidad.

En esta investigación se simuló mejoras en las características térmicas de las viviendas hasta alcanzar los estándares de exigencia del Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) de la comuna de Valdivia, con el propósito de determinar y comparar las diferencias que presentan, evaluando las ventajas y particularidades de cumplir el nuevo requerimiento y la distribución espacial de estas características en la ciudad, con el fin de comprender de mejor forma las dinámicas energéticas a escala urbana.

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se puede afirmar que las demandas de energía promedio que presentaron las viviendas analizadas en su estado actual, alcanzan los 235 kWh/m<sup>2</sup> por año. Si estas viviendas adoptan las exigencias mínimas del PDA tendrían una demanda de energía de 76,1 kWh/m<sup>2</sup> por año, lo que significaría un 68 % de ahorro en demanda energética. Además, la leña consumida en promedio por las viviendas pasaría de ser de 10,3 m<sup>3</sup>-estéreos a 3,5 m<sup>3</sup>- estéreos. Esto supone un 66 % de ahorro en leña, lo que se traduce en beneficios sociales y económicos al reducir el gasto de los hogares en calefacción, mejorar las condiciones de confort al interior de las viviendas y reducir los niveles de contaminación tanto intradomiciliarios como a nivel de barrios y de ciudad.

Por otra parte, los elementos constructivos por donde más pierden energía las viviendas son las techumbres, seguidas por los muros y las ventanas. Al adaptarlas a los requerimientos del PDA, las pérdidas de energía se reducen en un 85 %, 52 % y un 46 % respectivamente. Si analizamos estos dos indicadores es bastante evidente que el acondicionamiento térmico se puede ir realizando de forma gradual, priorizando ciertas intervenciones.

El trabajo realizado en Valdivia aborda partes del flujo de trabajo de la modelación energética a escala urbana que no han sido estudiadas en el caso chileno, como la definición de las tipologías de vivienda y sus modificaciones, la construcción de bases de datos detalladas a escala de vivienda, la visualización de resultados a escala de barrios y de ciudad y la extrapolación de información desde la escala de la vivienda a la escala urbana.

La espacialización de los datos, junto con la extrapolación a la ciudad de la información de los modelos de vivienda identificados en Valdivia, permiten validar la hipótesis de investigación, relevando que sectores como los ubicados al norte del río Calle-Calle, en el acceso norte de la ciudad, y el sur de la ciudad son las zonas prioritarias para intervenir, ya que presentan el mayor porcentaje de consumo de leña y el peor desempeño energético dentro de la ciudad, lo que las vuelve zonas de alta vulnerabilidad energética a nivel urbano. También permite identificar las tipologías de vivienda con el mejor y peor desempeño, lo que a futuro podría traducirse en recomendaciones específicas para la planificación de ciertas zonas de la ciudad. Actualmente las políticas públicas de reacondicionamiento térmico no consideran una focalización en ciertas zonas de la ciudad de acuerdo con variables de vulnerabilidad urbana, así como la planificación urbana tampoco toma en cuenta aspectos energéticos.

## Financiamiento

Trabajo realizado en el contexto del proyecto FONDEF IT21I0031 Modelo para reducir la incertidumbre asociada a las mejoras de eficiencia energética a nivel residencial.

## Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

## Declaración de autoría

**Alejandra Schueftan:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Supervisión, Validación Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

**Eduardo Larrucea:** Conceptualización, Investigación, Análisis formal, Metodología, Supervisión.

**Catalina Zumaeta:** Visualización, Redacción-borrador original, Redacción-revisión y edición.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la colaboración de Óscar Barrera, ingeniero constructor de la Universidad Austral de Chile, en la realización de modelaciones de desempeño energético y la asistencia de Mariana Andrade, magíster en Arquitectura Sustentable y Energía de la Pontificia Universidad Católica de Chile en las revisiones al texto.

## Referencias bibliográficas

Abbasabadi, N., & Ashayeri, M. (2019). Urban energy use modeling methods and tools: A review and an outlook. *Building and Environment*, 161(106270), 106270. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106270>

Ali, U., Shamsi, M. H., Hoare, C., Mangina, E., & O'Donnell, J. (2021). Review of urban building energy modeling (UBEM) approaches, methods and tools using qualitative and quantitative analysis. *Energy and Buildings*, 246(111073), 111073. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111073>

Allen-Dumas, M. R., Rose, A. N., Joshua R. New, Omitaomu, O. A., Yuan, J., Branstetter, M. L., Sylvester, L. M., Seals, M. B., Carvalhaes, T. M., Adams, M. B., Bhandari, M. S., Shrestha, S. S., Sanyal, J., Berres, A. S., Kolosna, C. P., Fu, K. S., & Kahl, A. C. (2020). Impacts of the morphology of new neighborhoods on microclimate and building energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 133(110030), 110030. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110030>

- Amigo, C., Araya, P., Billi, M., Calvo, R., Oyarzún, T. y Urquiza, A. (2018). *Políticas públicas y pobreza energética en Chile: ¿Una relación fragmentada?* (Documento de trabajo). Red de Pobreza Energética.
- Amigo, C., Calvo, R., Cortés, A. y Urquiza, A. (2019). *Pobreza energética: El acceso desigual a la energía de calidad como barrera para el desarrollo en Chile*. Universidad de Chile [https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/policypaper\\_redpe20191128.pdf](https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/01/policypaper_redpe20191128.pdf)
- Arboit, M. E., Maglione, D. S. y Otero, D. (2022). Determinación de variables edilicias presentes en morfologías del Área Metropolitana de Mendoza para la eficiencia energética. *Revista de urbanismo*, (47), 136-160. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2022.65608>
- Banco Mundial. (2023). *Los datos relativos a Chile, Ingreso alto* [Conjunto de datos]. World Bank Open Data. <https://datos.bancomundial.org/?locations=CL-XD>
- Boso, À., Oltra, C., & Hofflinger, Á. (2019). Participation in a programme for assisted replacement of wood-burning stoves in Chile: The role of sociodemographic factors, evaluation of air quality and risk perception. *Energy Policy*, 129, 1220-1226. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.038>
- Calvo, R., Álamos, N., Huneus, N., & O’Ryan, R. (2022). Energy poverty effects on policy-based PM2.5 emissions mitigation in southern and central Chile. *Energy Policy*, 161(112762), 112762. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112762>
- Calvo, R., Amigo, C., Billi, M., Fleischmann, M., Urquiza, A., Álamos, N., & Navea, J. (2021). Territorial Energy Vulnerability assessment to enhance just energy transition of cities. *Frontiers in sustainable cities*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.635976>
- Carreño Campo, C., Alfonso, P. y William, H. (2018). Relación entre los procesos de urbanización, el comercio internacional y su incidencia en la sostenibilidad urbana. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 11(2018), 1-29.
- Castillo, C. (2001). *Estadística Climatología Tomo II*. Dirección Meteorológica de Chile, Climatología y Meteorología Aplicada.
- Chen, H.-C., Han, Q., & de Vries, B. (2020). Urban morphology indicator analyzes for urban energy modeling. *Sustainable Cities and Society*, 52(101863), 101863. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101863>
- Chávez, P. J., Martini, I., & Discoli, C. (2019). Methodology developed for the construction of an urban-energy diagnosis aimed to assess alternative scenarios: An intra-urban approach to foster cities’ sustainability. *Applied Energy*, 237, 751-778. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.037>
- Chávez, P., Martini, I. y Discoli, C. (2021). *Construcción de escenarios urbano energéticos “tendenciales” en ciudades intermedias. La ciudad de La Plata como caso de estudio-Buenos Aires, Argentina (2015-2040)*. <http://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur44/Lurralde-44-2021-Chevez.pdf>
- Cincinelli, A., & Martellini, T. (2017). Indoor Air Quality and health. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11), 1286. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111286>
- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2019). *Usos de energía de los Hogares Chile 2018*. [https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe\\_final\\_caracterizacion\\_residencial\\_2018.pdf](https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf)
- Corporación Nacional Forestal (CONAF). (2023). *Caracterización de Acopios Leña 2022*. [https://www.conaf.cl/wpcontent/files\\_mf/1682003508Caracterizaci%C3%B3nAcopiosdeLe%C3%B1a2022CONAF.pdf](https://www.conaf.cl/wpcontent/files_mf/1682003508Caracterizaci%C3%B3nAcopiosdeLe%C3%B1a2022CONAF.pdf)

- Encinas, F., Truffello, R., Aguirre-Nuñez, C., Puig, I., Vergara-Perucich, F., Freed, C., & Rodríguez, B. (2022). Mapping energy poverty: How much impact do socioeconomic, urban and climatic variables have at a territorial scale? *Land*, 11(9), 1449. <https://doi.org/10.3390/land11091449>
- Ferrando, M., Causone, F., Hong, T., & Chen, Y. (2020). Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state-of-the-art review of bottom-up physics-based approaches. *Sustainable Cities and Society*, 62, 102408. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102408>
- Ferrari, S., Zagarella, F., Caputo, P., & Bonomolo, M. (2019). Assessment of tools for urban energy planning. *Energy*, 176, 544-551. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.054>
- Frayssinet, L., Merlier, L., Kuznik, F., Hubert, J.-L., Milliez, M., & Roux, J.-J. (2018). Modeling the heating and cooling energy demand of urban buildings at city scale. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 2318-2327. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.040>
- Fuller, R., Landrigan, P., Balakrishnan, K., Bathan, G., Bose-O'Reilly, S., Brauer, M., Caravanos, J., Chiles, T., Cohen, A., Corra, L., Cropper, M., Ferraro, G., Hanna, J., Hanrahan, D., Hu, H., Hunter, D., Janata, G., ... Yan, C. (2022). Pollution and health: a progress update. *The Lancet*. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00090-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00090-0)
- Goy, S., Maréchal, F., & Finn, D. (2020). Data for urban scale building energy modelling: Assessing impacts and overcoming availability challenges. *Energies*, 13(16), 4244. <https://doi.org/10.3390/en13164244>
- Heberle, S. M., da Costa, G. M., Barros, N., & Rosa, M. S. G. (2018). The effects of atmospheric pollution in respiratory health. En *Handbook of Environmental Materials Management* (pp. 1-16). Springer International Publishing.
- Howden-Chapman, P., Viggers, H., Chapman, R., O'Dea, D., Free, S., & O'Sullivan, K. (2009). Warm homes: Drivers of the demand for heating in the residential sector in New Zealand. *Energy Policy*, 37(9), 3387-3399. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.12.023>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2018). *Síntesis de resultados Censo 2017*. <http://www.censo2017.cl/descargas/home/sintesis-de-resultados-censo2017.pdf>
- Isaacs, N., Saville-Smith, K., Camilleri, M., & Burrough, L. (2010). Energy in New Zealand houses: comfort, physics and consumption. *Building research and information*, 38(5), 470-480. <https://doi.org/10.1080/09613218.2010.494383>
- Ji, Q., Bi, Y., Makvandi, M., Deng, Q., Zhou, X., & Li, C. (2022). Modelling building stock energy consumption at the urban level from an empirical study. *Buildings*, 12(3), 385. <https://doi.org/10.3390/buildings12030385>
- Johari, F., Peronato, G., Sadeghian, P., Zhao, X., & Widén, J. (2020). Urban building energy modeling: State of the art and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 109902. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109902>
- Lazo Arteaga, M. C. y Yancapallo Cruz, S. S. (2021). *Evolución de los métodos de inventario de las emisiones de gases de efecto invernadero en las ciudades: Revisión sistemática*. Universidad César Vallejo.
- Ley N.º 21.305 de 2019. Sobre eficiencia energética. 8 de febrero de 2021. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>

- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., & Zhang, X. (2017). Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy*, 141, 2445-2457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>
- Li, X., Ying, Y., Xu, X., Wang, Y., Hussain, S. A., Hong, T., & Wang, W. (2020). Identifying key determinants for building energy analysis from urban building datasets. *Building and Environment*, 181, 107114. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107114>
- Liu, X., & Sweeney, J. (2012). Modelling the impact of urban form on household energy demand and related CO2 emissions in the Greater Dublin Region. *Energy Policy*, 46, 359-369. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.070>
- Martins, T. A. de L., Faraut, S., & Adolphe, L. (2019). Influence of context-sensitive urban and architectural design factors on the energy demand of buildings in Toulouse, France. *Energy and Buildings*, 190, 262-278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.019>
- Ministerio de Energía. (2022). *Plan Nacional de Eficiencia Energética*. <https://energia.gob.cl/ley-y-plan-de-eficiencia-energetica>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2018). *Manual de Procedimientos Calificación Energética de Viviendas en Chile*. <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/3481>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo. (2023). *Conoce la CEV*. <https://www.calificacionenergetica.cl/que-significa-la-letra-de-la-calificacion-energetica/>
- Ministerio de Medio Ambiente. (2022). *PPDA – Planes de prevención y/o descontaminación atmosférica*. <https://ppda.mma.gob.cl/>
- Mutani, G., Carozza, M., Todeschi, V., & Rolando, A. (18-19 de noviembre 2020). *Urban-Scale Energy Models: relationship between urban form and energy performance* [Sesión de conferencia]. IEEE 3rd International Conference and Workshop in Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE), 000185-000190. Budapest, Hungría. <https://doi.org/10.1109/CANDO-EPE51100.2020.9337760>
- Mutani, G., Fontanive, M., & Arboit, M. (2018). Energy-use modelling for residential buildings in the metropolitan area of Gran Mendoza (AR). *Tecnica Italiana*, 61+1(2), 74-82. <https://doi.org/10.18280/ti-ijes.620204>
- Mutani, G., & Todeschi, V. (2017). Space heating models at urban scale for buildings in the city of Turin (Italy). *Energy procedia*, 122, 841-846. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.445>
- Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones. (2007). *Reglamentación Térmica*. [https://www.cne.cl/archivos\\_bajar/ordenanza.pdf](https://www.cne.cl/archivos_bajar/ordenanza.pdf)
- Reyes, R., Schueftan, A., Ruiz, C., & González, A. D. (2019). Controlling air pollution in a context of high energy poverty levels in southern Chile: Clean air but colder houses? *Energy Policy*, 124, 301-311. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.022>
- Rodríguez-Álvarez, J. (2016). Urban Energy Index for Buildings (UEIB): A new method to evaluate the effect of urban form on buildings' energy demand. *Landscape and Urban Planning*, 148, 170-187. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.001>

- Schueftan, A., & González, A. D. (2015). Proposals to enhance thermal efficiency programs and air pollution control in south-central Chile. *Energy Policy*, 79, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.01.008>
- Schueftan, A., Sommerhoff, J., & González, A. D. (2016). Firewood demand and energy policy in south-central Chile. *Energy for sustainable development: the journal of the International Energy Initiative*, 33, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2016.04.004>
- Torabi Moghadam, S., Toniolo, J., Mutani, G., & Lombardi, P. (2018). A GIS-statistical approach for assessing built environment energy use at urban scale. *Sustainable Cities and Society*, 37, 70-84. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.002>
- Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Calvo, R., Labraña, J., Oyarzún, T., & Valencia, F. (2019). Quality as a hidden dimension of energy poverty in middle-development countries. Literature review and case study from Chile. *Energy and Buildings*, 204, 109463. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109463>
- Urquiza, A., Amigo, C., Leal, T. y Billi, M. (2017). Pobreza energética en Chile: ¿un problema invisible? Análisis de fuentes secundarias disponibles de alcance nacional. <https://pobrezaenergetica.cl/wp-content/uploads/2017/09/Informe-RedPE-septiembre-2017-a.pdf>
- Valdés Salgado, M., Smith, P., Opazo, M. A., & Huneus, N. (2021). Long-term exposure to fine and coarse particulate matter and COVID-19 incidence and mortality rate in Chile during 2020. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7409. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147409>
- Vartholomaios, A. (2017). A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city. *Sustainable cities and society*, 28, 135-145. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.09.006>
- Viegas, G. M., Barbero, D. A., Chévez, P. J., Martini, I., & Discoli, C. A. (2020). Reciclado masivo de la envolvente urbano-edilicia basado en procesamiento digital de imágenes, La Plata, Argentina. *Revista de Urbanismo*, (43), 151. <https://doi.org/10.5354/0717-5051.2020.57522>
- Villalobos, C., Chávez, C., & Uribe, A. (2021). Energy poverty measures and the identification of the energy poor: A comparison between the utilitarian and capability-based approaches in Chile. *Energy Policy*, 152, 112146. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112146>
- World Health Organization. (2006). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide : global update 2005 : summary of risk assessment*. Autor. <http://apps.who.int/iris/handle/10665/69477>
- World Health Organization. (22 de septiembre de 2021). *Global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Who.int; World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- World Health Organization. (2022). *Household air pollution*. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health?gclid=CjwKCAiA6byqBhAWEiwAnGCA4NIKledhcjI39XKMch-jMwe\\_ATz9HvfnQBkUqH6CbfaSol0spjXOdEhoCAmQQAvD\\_BwE](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health?gclid=CjwKCAiA6byqBhAWEiwAnGCA4NIKledhcjI39XKMch-jMwe_ATz9HvfnQBkUqH6CbfaSol0spjXOdEhoCAmQQAvD_BwE)