

## 25. Estudio de la envolvente en edificios de oficinas bajo la influencia del cambio climático en Santiago, Chile

Rubio-Bellido, Carlos<sup>(1,\*)</sup>, Pérez-Fargallo, Alexis<sup>(2)</sup>, Pulido-Arcas, Jesús A.<sup>(1)</sup>

(1\*) Departamento Ciencias de la Construcción. Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Chile, carubio@ubiobio.cl +34686135595

(2) Departamento Ciencias de la Construcción. Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío. Centro de Investigación en Tecnologías de la Construcción (CITEC), Chile

**Resumen** En los últimos años el cambio climático ha traído a la luz un creciente interés en su posible impacto entre las diversas actividades humanas, en las que sector de la construcción está incluido. Clima local determina las condiciones externas a las que los edificios tienen que adaptarse, teniendo una influencia directa sobre su demanda energética de calefacción y refrigeración. En este contexto, la simulación por ordenador ofrece herramientas útiles que ayudan en la evaluación de este impacto. Este estudio investiga cómo un cambio en los datos climáticos para escenarios futuros afectará la demanda energética de edificios de oficinas en la ciudad de Santiago (Chile). Los datos climáticos se han generado para los años 2020, 2050 y 2080 con el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero GEI A2 'medio' de acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático IPCC. La predicción de la demanda energética para los edificios se calcula por medio de una implementación del procedimiento de cálculo de la norma ISO-13790:2008, tomando como condiciones externas los tres escenarios antes mencionados. Finalmente, se clarifica y optimiza el efecto del cambio climático en la demanda de energía para edificios de oficinas, basado en iteraciones de su envolvente y forma. Como resultado, esta investigación aclara cómo los escenarios de clima futuro afectarán a la demanda de energía para diferentes tipos de edificios de oficinas y cómo su forma y su envolvente pueden ser optimizados para contrarrestar este efecto.

**Palabras clave** Edificios de oficinas, Cambio climático, Adaptación climática, Eficiencia energética.

## 1 Introducción

Las predicciones de escenarios climáticos futuros y su influencia en la demanda energética en edificios represen un desafío, considerando la investigación y desarrollo en el campo de la ciencia de la construcción. Diversos modelos de predicción se han generado para diferentes escenarios climáticos (IPCC 2014), siendo la mayoría de ellos cercanos a las condiciones del Reino Unido (Jentsch et al. 2008) (Mylona 2012). Sin embargo, se han extendido cada vez más a lo largo del marco internacional (Guan 2009) (Jentsch et al. 2013).

En la actualidad, IPCC, apoyado por el programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) y Organización Meteorológica Mundial (WMO) contempla varios escenarios de emisiones para el futuro (años 2020, 2050 y 2080). Dependiendo de ellos, el clima variará y en consecuencia, la demanda energética de los edificios.

Hoy en día, el sector de la construcción, según diversas fuentes, representa aproximadamente el 40% del consumo total de energía de las actividades humanas (Pérez-Lombard et al. 2008), habiéndose realizado diversos estudios para evaluar el impacto de una eventual variación del clima sobre la demanda energética de este sector económico (Sorrell 2015).

En este contexto, debido a la diversidad de climas en el mundo, cada país representa un caso diferente. Además, el marco legal y el método seguido para determinar la demanda de energía se diferencia por cada ubicación. Directamente relacionados con los fines y objetivos del presente estudio, investigaciones desarrolladas por Wang y Chen (2014) y Kalvelage et al. (2014) demostraron ser efectivas en el cálculo de la tendencia futura de la demanda energética de los edificios en diferentes climas en los Estados Unidos, teniendo en cuenta un probable cambio en sus condiciones. Otro estudio de Gangolells y Casals (2012) también pronosticó la variación tanto en demanda de refrigeración como de calefacción de varios edificios en España, con varios escenarios para el cambio climático. Hablando sobre la conveniencia de utilizar datos meteorológicos transformados para realizar las simulaciones, Jentsch et al. (2013) llegó a la conclusión de que la transformación de archivos climáticos en formato EnergyPlus/ESP-r (EPW) con previsiones del IPCC utilizando archivos HadCM3 A2 escenario es un punto de partida confiable para pronosticar variaciones en la demanda de energía. Estos autores también han hecho contribuciones significativas en los aspectos técnicos del proceso de transformación de archivos climáticos (Jentsch et al. 2008), dando una base técnica para realizar la presente investigación.

Teniendo en cuenta la literatura anterior, el presente estudio, centrado en la ciudad de Santiago (Chile) presenta un contrastado estudio de caso por dos razones principales. En primer lugar, visualiza la necesidad de adaptar un procedimiento general (IPCC HadCM3 modelo de transformación climática) a las condiciones locales de Santiago, con su propio marco legal y varias especificaciones en cuanto a las técnicas constructivas. En segundo lugar, como han demostrado in-

investigaciones anteriores, los futuros escenarios de cambio climático pueden tener efectos controvertidos sobre la demanda energética de los edificios; es decir, que la demanda puede aumentar, disminuir o incluso permanecer igual en el futuro.

Este estudio se centra especialmente en los parámetros de diseño básicos que tienen influencia sobre el diseño del edificio en las primeras etapas del proyecto: tamaño, orientación, forma e información básica sobre sistemas constructivos y sistemas de acondicionamiento. Los modelos testeados se han generado usando un gran número de combinaciones de estos parámetros de diseño. Los resultados de la investigación se dividen en tres grupos principales.

-Aclarar cómo el clima cambiará según el escenario de emisiones Gases de efecto invernadero GEI A2 'medio' en la ciudad de Santiago (Chile).

-Evaluar el efecto que estos cambios en el clima puedan tener sobre la demanda de energía para edificios de oficinas en esta ciudad. Esta repercusión se evaluará en relación con diferentes tipos de formas y fachadas del edificio.

-Aclarar cuál es la más óptima combinación de estos parámetros que ofrezca la menor demanda energética posible bajo la influencia del cambio climático.

## 2 Metodología

Este estudio se basa en la simulación paramétrica de un gran número de casos que tiene como objetivo encontrar las tendencias estadísticas para un conjunto de datos de salida. Con el fin de realizar tantos cálculos como sea posible en una cantidad reducida de tiempo, el procedimiento utiliza una rutina desarrollada en MS Excel Visual Basic.

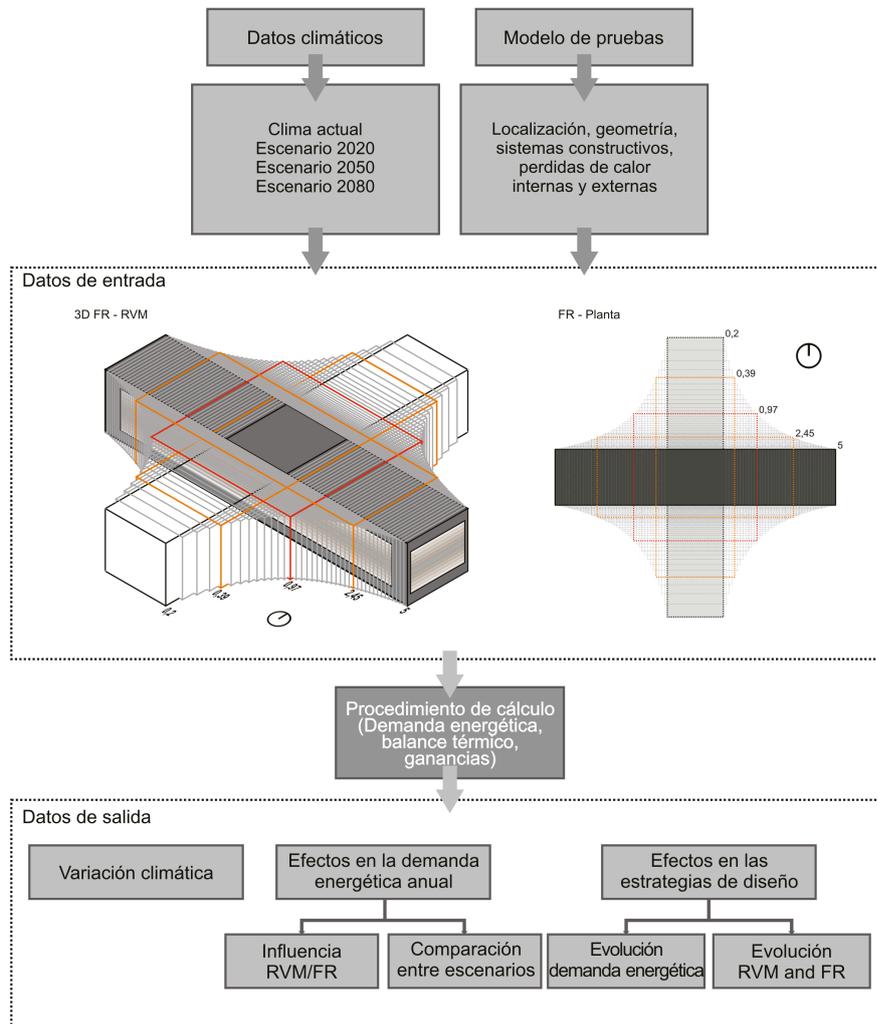
En la primera etapa, se establecen los datos de entrada para el proceso de simulación, haciendo una distinción entre dos grupos: datos del clima y lo que se llama "modelos de prueba".

Se han agrupado los archivos que contienen los datos de clima actual en formato EPW, siendo la base para el cálculo de la demanda energética de los modelos de prueba. Estos archivos han sido "transformados" según el modelo de predicción IPCC HadCM3, de los escenarios climáticos para el 2020, 2050 y 2080.

En la segunda etapa, se definen todos los datos de entrada de los modelos de prueba, que se implementan en la rutina de simulación, siguiendo el procedimiento establecido por la norma ISO-13790:2008 (2008). Esta metodología ha sido debidamente probada y aplicada dentro del marco legal de varios de los países de miembros de la UE (EC 2012/C 115/01 2012) (EU 2010). Con el fin de adaptar el modelo a los contextos chilenos, las variables en cuanto a zona climática (INN 2008) y elementos constructivos (MOP 2011) han sido extraídos de la legislación local. Los modelos de prueba son definidos por su ubicación, la geometría (orientación, factor de forma (FR), relación ventana-muro (RVM)), sistemas constructivos (U-valor de la envolvente y la inercia térmica de la construcción), cargas de calor internas (consideradas constantes durante el régimen de uso) y cargas de ca-

lor externas (ganancia solar). La orientación, FR y RVM se estiman libres produciendo 8.200 iteraciones de los modelos de prueba. Se analiza la demanda de energía para cada uno de ellos, tanto para el momento actual y como para los escenarios previstos.

En una tercera etapa, se realiza el análisis estadístico de los resultados con el fin de encontrar la tendencia relativa a la situación presente y futura, obteniendo finalmente la combinación más óptima de las variables para cada escenario del conjunto de datos.



**Fig. 1** Metodología para la optimización de la demanda energética anual de energía bajo el impacto del cambio climático.

## ***2.1 Modelos de prueba***

Los modelos de prueba se definen como una serie de edificios prototipo, que no representan ningún estudio particular del caso, pero sí son modelos estándar, estadísticamente representativos de un gran número de edificios. Son definidos por una serie de variables, según las especificaciones de la norma ISO-13790:2008 y clasificado en 5 categorías principales: localización, geometría y envolvente, sistemas constructivos, cargas de calor internas y externas.

**Ubicación:** Todos los modelos de prueba se encuentran en la ciudad de Santiago (Chile). Las variables climáticas se han modelado en consecuencia en el respectivo archivo de EPW y su zona climática según el marco legislativo chileno.

**Geometría:** Las variables en este grupo se dejan libres y son analizadas en la presente investigación. Los modelos de prueba se consideran volúmenes de paralelepípedo con planos rectangulares, perfectamente orientados hacia un eje nortesur. La superficie construida se fija en 1.500 m<sup>2</sup> y distribuida en 3 plantas de 500 m<sup>2</sup> cada una. Cada fachada varía entre 10 a 50 m de longitud (Fig. 1). El cociente entre la longitud de la fachada de este a oeste y la fachada norte y sur se denota como factor de forma (FR), que varía de 0,1 a 5. Estos parámetros definen el área total de la envolvente térmica. Por último, la relación ventana-muro (RVM) se expresa como el porcentaje de ventanas respecto a toda la zona de cerramientos exteriores, variando desde 10% a 60% cada 1%; considerando esta variable también como libre.

**Sistemas constructivos:** estos parámetros se tabulan de acuerdo a los Términos de Referencia TDRe (MOP 2011), en los que se establecen los valores límite de transmitancia térmica (U), factor solar (SF), variando ambos en relación a la RVM. La inercia térmica se ha fijado en 400 kJ/m<sup>2</sup>·K (construcción pesada), que es la tendencia común de Santiago.

**Cargas de calor internas y externas:** las ganancias internas se establecen según el régimen de uso que se considera constante durante los 9 horas de actividad de la oficina, con una carga de iluminación de 16 W/m<sup>2</sup>, una carga de ocupación de 6 W/m<sup>2</sup> y una carga de equipo de 4,5 W/m<sup>2</sup>. La tasa de infiltración se ha establecido en 0,3 l/s. Las ganancias calor externas dependen de la orientación y la forma del edificio, y los niveles de radiación solar (RS) se han extraído de los archivos EPW.

### 3 Efectos del calentamiento global sobre el clima

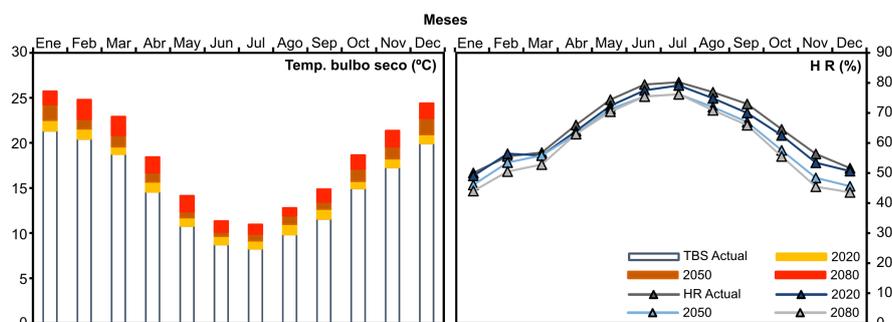


Fig. 2 Cambio pronosticado en las variables climáticas de la ciudad de Santiago

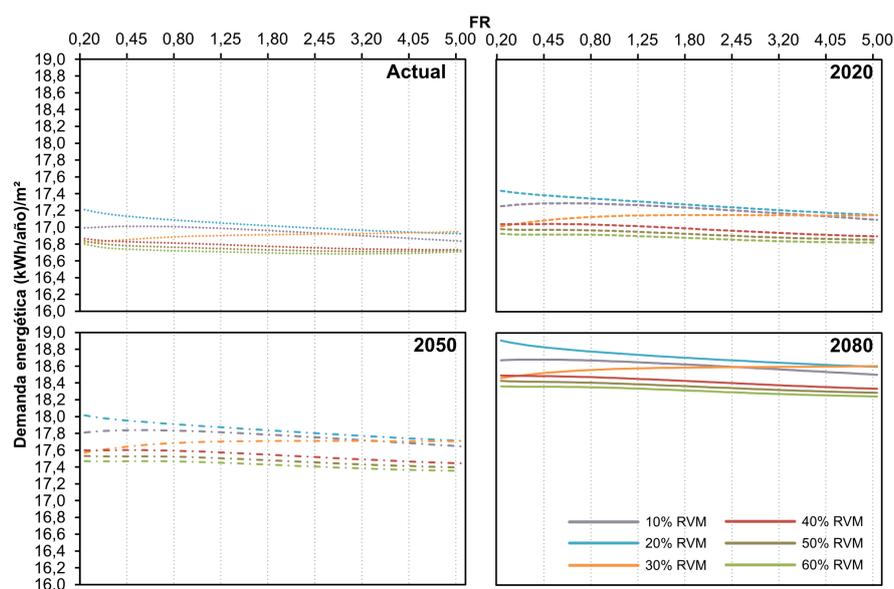
La Fig. 2 muestra el efecto previsto del cambio climático en la ciudad de Santiago, tomando como base el archivo EPW para el clima actual y siendo transformados; para los tres escenarios (2020, 2050 y 2080). Se observa un aumento notable en el promedio de temperatura de bulbo seco (TBS), con incrementos constantes de + 1 °C en el 2020, + 2,11°C en el año 2050 y + 3,67°C en el 2080. La humedad relativa (HR) sufre una disminución de -1,59% en 2020, -4,41% en el año 2050 y - 5,92% en 2080. Los niveles de radiación solar se mantienen casi constantes, con sólo un ligero aumento de +1,02 Wh/m<sup>2</sup> en el año 2020 + 3,64 Wh/m<sup>2</sup> en el año 2050 y + 9,62 Wh/m<sup>2</sup> en el 2080. Por lo tanto, el clima en Santiago se espera que sea notablemente más caliente, un poco más seco y con prácticamente la misma cantidad de radiación solar que en la actualidad.

### 4 Evolución de la demanda energética

#### 4.1 Demanda de energía anual

Tomando como base cada valor posible de FR (eje X), combinado con los valores de RVM, agrupados cada 10%, se han obtenido las curvas de demanda de energía de cada uno de los escenarios dados (Fig. 3). Considerando las curvas casi horizontales, si se fija cada uno de los escenarios temporales, la demanda energética es muy independiente de las variaciones en el FR. Realizando la lectura en vertical, para un FR dado, las variaciones en la RVM tienen un efecto notable en la demanda de energía. Para el escenario actual, la demanda oscila entre 16,6 y 17,2 kWh/m<sup>2</sup>; en el año 2020, se incrementaría llegando a un rango de 16,9 a 17,4 kWh/m<sup>2</sup>; en el año 2050, estas cifras muestran valores entre 17,4 a 18 kWh/m<sup>2</sup>; por último, el escenario 2080 se prevé la demanda de energía en el rango de 18,3

18,9 kWh/m<sup>2</sup>. Para todos los escenarios se observa que reducir cantidades de vidrio (RVM = 10%) resulta en menor demanda de energía y mayor RVM (60%) resulta demandas más altas.



#### 4.2 Demanda de calefacción y refrigeración

La demanda energética anual de calefacción y refrigeración se muestra en la Fig. 4. Para cada escenario temporal, los parámetros se han combinado para producir 8.200 variaciones de los modelos de prueba y luego, la combinación óptima de parámetros, es decir, aquella que resulta en una menor demanda de energía, ha puesto de relieve.

Con respecto a la demanda de energía para la calefacción, el gradiente de las líneas varía para cada escenario temporal. En este caso, los valores disminuirán en 2020, 2050 y 2080, y por lo que los valores optimizados disminuirán en consecuencia. En el año 2020, el mejor diseño posible resultará en una demanda de energía para calefacción de 16,6 kWh/año, en 2050 15,9 kWh/año y en 2080 14,9 kWh/año.

Los datos de la demanda de energía asociada con la refrigeración se distribuyen según una línea recta que mantiene su grado para cada escenario temporal. Los valores óptimos son 1,25 kWh/año en 2020, 1,7 kWh/año en 2050 y 2,4 kWh/año en

el 2080. La demanda energética de refrigeración aumentará en todos los casos, incluso para el modelo de prueba más optimizado.

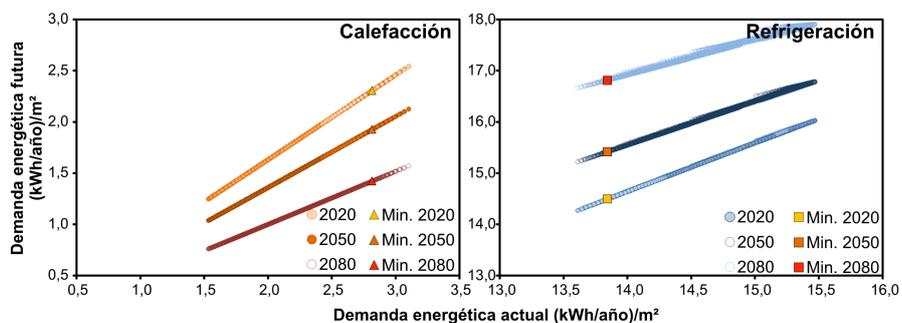


Fig. 4 Demanda energética de calefacción y refrigeración

## 5. Parámetros optimizados

Con el objetivo de clarificar y resumir todos los datos, la Fig. 5 representa la evolución de los modelos de prueba optimizados en la actualidad, el 2020, 2050 y 2080.

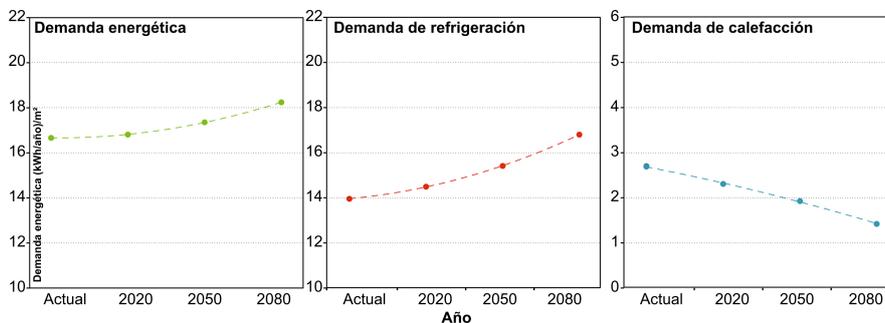


Fig. 5 RVM, FR, calefacción, refrigeración y calefacción anual y la demanda de energía de enfriamiento

La rutina de cálculo extrae la combinación de parámetros que dan la menor demanda de refrigeración y calefacción para la actualidad y se compara este valor con sus correspondientes para 2020, 2050 y 2080. Optimizando la forma del edificio, la energía necesaria para enfriar puede ser reducida a 13,8 kWh/año por m2 (eje horizontal superior). Este valor se incrementará a 14,5 en el año 2020, 15,4 en el año 2050 y 16,9 en el 2080 (eje vertical derecho). En cuanto a calefacción, la demanda más baja posible en la actualidad se establece en 2,7 kWh/año por m2 (eje horizontal inferior). Una disminución constante en este valor optimizado se

espera que en 2020 (2,4 kWh/año por m<sup>2</sup>), 2050 (1,9 kWh/año por m<sup>2</sup>) y 2080 (1,4 kWh/año por m<sup>2</sup>). Mediante la combinación de ambos se puede obtener la demanda total de energía necesaria para acondicionar el edificio. Actualmente esta demanda se fija en 16,5 kWh/m<sup>2</sup> año, que se mantiene casi constante en el año 2020 (16,9) y se incrementa a 17,3 en el año 2050 y 18,3 en el 2080.

## 6 Conclusiones

Este estudio ha aclarado cómo el cambio climático afectará la demanda de energía para edificios de oficinas ubicados en la ciudad de Santiago. Los principales avances científicos proporcionados por la presente investigación son los siguientes:

Clima en la ciudad de Santiago será más caliente y seco en los próximos años y manteniéndose prácticamente igual los valores de radiación solar. Se han producido nuevos archivos EPW, tomando como base el archivo actual y transformándose con el escenario del IPCC HadCM3, produciendo un nuevo conjunto de archivos EPW que será útil para la predicción de la demanda energética de los edificios en un futuro cercano.

Tomando como base el procedimiento de cálculo de ISO-13790:2008 y la guía técnica de la construcción chilena TDRe una rutina de simulación ha sido compilada y debidamente probada para 8.200 modelos de prueba de edificios de oficinas. Los diseñadores pueden hacer uso de esta herramienta en las etapas tempranas de diseño para probar la influencia de FR y RVM en la demanda final de energía de sus edificios.

Al tratar de contrarrestar los efectos del cambio climático sobre la demanda final de energía de los edificios, la modificación del FR tiene muy poco efecto, lo que significa que la forma del edificio no es un factor decisivo en este contexto. Por el contrario, la RVM juega un papel importante, asociando la menor RVM la que menor demanda energética arroja.

Con la perspectiva de un clima más caluroso, incluso para el mejor modelo optimizado de edificios de oficinas en Santiago, con la mejor combinación de FR y RVM, la demanda energética de refrigeración inevitablemente aumentará, mientras que disminuirá la demanda de calefacción. Sin embargo, aumentará la demanda total de energía, lo que significa que en un contexto de cambio climático, el diseño formal del edificio (forma, orientación y porcentaje de vidrio) no será suficiente para contrarrestar este efecto, a pesar de puede ser de ayuda.

Los resultados de este estudio sugieren que la investigación adicional debe hacerse con respecto a otros parámetros del edificio que se incluyeron en este estudio, tales como el tipo y la eficiencia de los sistemas de acondicionamiento para calefacción y refrigeración o la transmitancia térmica y la inercia térmica de la envolvente del edificio.

## 7 Citas y Referencias

- EC 2012/C 115/01 (2012) Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology f', Official Journal of the European Union, p. 28. doi: 10.3000/1977091X.C\_2012.115.eng.
- EU (2010) Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union, pp. 13–35. doi: 10.3000/17252555.L\_2010.153.eng.
- Gangoellis, M. and Casals, M. (2012) Resilience to increasing temperatures: residential building stock adaptation through codes and standards, *Building Research & Information*, 40(June), pp. 1–20. doi: 10.1080/09613218.2012.698069.
- Guan, L. (2009) Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings, *Building and Environment*, 44(4), pp. 793–800. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.05.021.
- INN (2008) NCh 1079. Of 2008 Arquitectura y Construcción- Zonificación climático habitacional para Chile.
- IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ipcc.
- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S. and James, P. A. B. (2008) Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files, *Energy and Buildings*, 40(12), pp. 2148–2168. doi: 10.1016/j.enbuild.2008.06.005.
- Jentsch, M. F., James, P. A. B., Bourikas, L. and Bahaj, A. S. (2013) Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates, *Renewable Energy*, 55, pp. 514–524. doi: 10.1016/j.renene.2012.12.049.
- Kalvelage, K., Passe, U., Rabideau, S. and Takle, E. S. (2014) 'hanging climate: The effects on energy demand and human comfort' *Energy and Buildings*, 76, pp. 373–380. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.009.
- MOP (2011) TDR: Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios, Términos de Referencia Estandarizados con Parámetros de Eficiencia Energética y Confort Ambiental, para Licitaciones de Diseño y Obra de la Dirección de Arquitectura, Según Zonas Geográficas del País y Según Tipología de Edificios. Santiago, Chile. Available at: <http://arquitectura.mop.cl/eficienciaenergetica/Paginas/default.aspx>.
- Mylona, A. (2012) 'he use of UKCP09 to produce weather files for building simulation' *Building Services Engineering Research & Technology*, 33(1), pp. 51–62. doi: 10.1177/0143624411428951.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. and Pout, C. (2008) 'review on buildings energy consumption information' *Energy and Buildings*, 40(3), pp. 394–398. doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- Sorrell, S. (2015) 'educing energy demand: A review of issues, challenges and approaches, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, pp. 74–82. doi: 10.1016/j.rser.2015.03.002.
- Standard EN-ISO 13790, Energy Performance of Buildings, Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling' (2008).
- Wang, H. and Chen, Q. (2014) 'Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States', *Energy and Buildings*, 82, pp. 428–436. doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.034.

## **Agradecimientos**

**Agradecimientos** Los autores agradecen al proyecto 150203/EF "Grupo de investigación en formación. Grupo de Arquitectura y Construcción Sustentable" de la Universidad del Bío-Bío por el apoyo en esta investigación.