

Informe  
Proyecto  
Arclim

# Ciudades

**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



## Equipo realizador:

### Cristián Henríquez

Pontificia Universidad Católica de Chile,  
Instituto de Geografía / CEDEUS.

### Jorge Qüense

Pontificia Universidad Católica de Chile,  
Instituto de Geografía.

### Paulina Contreras

Pontificia Universidad Católica de Chile,  
Instituto de Geografía.

### Nikole Guerrero

Pontificia Universidad Católica de Chile,  
Instituto de Geografía / CIGIDEN.

### Pamela Smith

Universidad de Chile,  
Departamento de Geografía / CR2.

### Francisca González

Universidad de Chile,  
Departamento de Geografía.

Santiago, Chile - 2020.



Este informe debe citarse de la siguiente manera:

Henríquez, C.; Qüense, J.; Contreras, P.; Guerrero, N.; Smith, P. & González, F., 2020. Informe Proyecto ARClim: Ciudades. Centro de Cambio Global UC, Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y CEDEUS coordinado por Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia y Centro de Cambio Global UC para el Ministerio del Medio Ambiente a través de La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). Santiago.

## Preparado para:



ARClim es un proyecto del Ministerio del Medio Ambiente del Gobierno de Chile, financiado por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH por encargo del Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

## Coordinado por:



Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2  
ANID/FONDAP/15110009



Centro Interdisciplinario de Cambio Global UC  
de la Pontificia Universidad Católica de Chile

## Desarrollado por:



Informe  
Proyecto  
Arclim

# Ciudades

**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



# ÍNDICE DE CONTENIDOS

Pág.		Pág.	
<b>1</b>	<b>1. Resumen Ejecutivo</b>	<b>30</b>	<b>4. Resultados</b>
<b>4</b>	<b>2. Introducción</b>	30	4.1 Islas de Calor Urbana - ICU.
<b>7</b>	<b>3. Metodología</b>	32	4.1.1 Exposición.
7	3.1 Cadena de impactos urbanos: Marco general.	34	4.1.2 Vulnerabilidad.
9	3.1.1 Ciudades seleccionadas.	36	4.1.3 Amenaza.
12	3.2 Modelo de cambio de uso de suelo urbano: Exposición.	39	4.1.4 Riesgos.
12	3.2.1 Simulación urbana al 2065.	43	4.2 Disconfort Térmico Ambiental.
15	3.2.2 Validación del modelo de uso de suelo.	45	4.2.1 Exposición.
15	3.2.3 Ciudades futuras y Exposición.	47	4.2.2 Vulnerabilidad.
19	3.3 Índice de Vulnerabilidad Social (SOVI).	50	4.2.3 Amenaza.
23	3.4 Amenazas presentes y futuras.	52	4.2.4 Riesgos.
23	3.4.1 Intensidad de Islas de Calor Urbana.	56	4.3 Heladas.
24	3.4.2 Disconfort Térmico Ambiental.	57	4.3.1 Exposición.
27	3.4.3 Heladas.	57	4.3.2 Vulnerabilidad.
27	3.5 Mapa de Riesgos.	60	4.3.3 Amenaza.
		62	4.3.4 Riesgos.

Pág.

**67** 5. Conclusiones

**71** 6. Referencias

**75** 7. Anexos

75 7.1 Validación de indicadores de Amenaza.

82 7.1.1 Isla de Calor Urbana (ICU).

87 7.1.2 Discomfort Térmico Ambiental de Thom.

89 7.1.3 Heladas.



# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Pág.</b>		<b>Pág.</b>	
<b>7</b>	<b>Figura 1.</b> Relación entre índices climáticos extremos y desastres naturales asociados a eventos hidrometeorológicos.	<b>36</b>	<b>Figura 13.</b> Vulnerabilidad para ICU.
<b>9</b>	<b>Figura 2.</b> Esquema general de Riesgos climáticos para el sector ciudades.	<b>37</b>	<b>Figura 14.</b> Diferencia de temperaturas máximas promedio presente y futuro, meses de diciembre, enero y febrero.
<b>11</b>	<b>Figura 3.</b> Área de estudio.	<b>40</b>	<b>Figura 15.</b> Mapa de factores de Riesgo por Islas de Calor Urbana presente.
<b>12</b>	<b>Figura 4.</b> Resumen metodológico del Land Change Modeler para el uso urbano.	<b>41</b>	<b>Figura 16.</b> Mapa de factores de Riesgo por Islas de Calor Urbana futuro.
<b>13</b>	<b>Figura 5.</b> Ejemplo de fuerzas motrices (zona centro).	<b>42</b>	<b>Figura 17.</b> Mapa de Riesgo Islas de Calor Urbana presente, futuro y cambio neto.
<b>14</b>	<b>Figura 6.</b> Usos urbanos y áreas SNASPE para la zona centro.	<b>44</b>	<b>Figura 18.</b> Diagrama psicrométrico y zona de confort.
<b>17</b>	<b>Figura 7.</b> Proyección del uso de suelo urbano al 2065 en la zona centro.	<b>47</b>	<b>Figura 19.</b> Proporción de población vulnerable.
<b>18</b>	<b>Figura 8.</b> Gráfico de correlación entre superficie, población y proyección 2065 del Gran Santiago.	<b>48</b>	<b>Figura 20.</b> Distribución espacial variable áreas verdes (parque y plazas).
<b>22</b>	<b>Figura 9.</b> Metodología general SoVI.	<b>50</b>	<b>Figura 21.</b> Vulnerabilidad para Discomfort Térmico Ambiental.
<b>26</b>	<b>Figura 10.</b> Relación entre humedad relativa y temperatura del aire horarias en la ciudad de Antofagasta, Santiago y Coyhaique.	<b>51</b>	<b>Figura 22.</b> Discomfort Térmico Ambiental presente y futuro en el mes de enero para las 34 ciudades ordenadas de norte a sur.
<b>31</b>	<b>Figura 11.</b> Transecto tipo de una Isla de Calor Urbana.	<b>53</b>	<b>Figura 23.</b> Mapa de factores de Riesgo por Discomfort Térmico Ambiental presente.
<b>34</b>	<b>Figura 12.</b> Distribución espacial de variable hogares en campamentos.		

Pág.

- 54** **Figura 24.**  
Mapa de factores de Riesgo por Discomfort Térmico Ambiental futuro.
- 55** **Figura 25.**  
Mapa de Riesgo de Discomfort Térmico Ambiental presente, futuro y cambio neto.
- 58** **Figura 26.**  
Distribución espacial de variables específicas de SoVI heladas.
- 60** **Figura 27.**  
Vulnerabilidad para heladas.
- 61** **Figura 28.**  
Número de días de heladas presente y futuro.
- 63** **Figura 29.**  
Mapa de factores de Riesgo por helada presente.
- 64** **Figura 30.**  
Mapa de factores de Riesgo por helada futuro.
- 65** **Figura 31.**  
Mapa de Riesgo por helada presente, futuro y cambio neto.
- 77** **Figura 32.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Arica.
- 77** **Figura 33.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Antofagasta.
- 78** **Figura 34.** Estaciones meteorológicas de la ciudad de Calama.
- 78** **Figura 35.**  
Estaciones meteorológicas del Gran Santiago.
- 79** **Figura 36.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Los Andes - Calle Larga.

Pág.

- 79** **Figura 37.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Curicó.
- 80** **Figura 38.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Talca - Culenar.
- 80** **Figura 39.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Chillán.
- 81** **Figura 40.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Osorno.
- 81** **Figura 41.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Coyhaique.
- 82** **Figura 42.**  
Estaciones meteorológicas de la ciudad de Punta Arenas.
- 85** **Figura 43.**  
Valores ICU de ciudad de Antofagasta (°C).
- 85** **Figura 44.**  
Valores ICU de Viña del Mar y Valparaíso (°C).
- 86** **Figura 45.**  
Valores ICU en el Gran Santiago (°C).
- 86** **Figura 46.**  
Valores ICU de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Gran Concepción (°C).
- 87** **Figura 47.**  
Valores ICU de Chillán (°C).
- 88** **Figura 48.**  
Índice THI por ciudades.

# ÍNDICE DE TABLAS

Pág.		Pág.	
8	<b>Tabla 1.</b> Índices climáticos extremos (ICE).	33	<b>Tabla 12.</b> Exposición presente y futura de la población urbana.
9	<b>Tabla 2.</b> Esquema general de la metodología utilizada para los Riesgos en el sector ciudades.	35	<b>Tabla 13.</b> Matriz de componentes principales para SOVI de Islas de Calor Urbana.
10	<b>Tabla 3.</b> Ciudades seleccionadas.	35	<b>Tabla 14.</b> Valores de SoVI de Islas de Calor Urbana.
13	<b>Tabla 4.</b> Inputs utilizados para el modelo de cambio de uso de suelo Land Change Modeler.	37	<b>Tabla 15.</b> Superficie y población 2017 y proyectada 2065.
15	<b>Tabla 5.</b> Valores de coeficiente Kappa.	38	<b>Tabla 16.</b> Isla de Calor Urbana presente, futura y diferencia.
15	<b>Tabla 6.</b> Valores de coeficiente Kappa de la modelación.	39	<b>Tabla 17.</b> Intensidad de ICU según número de casos presente y futuro.
16	<b>Tabla 7.</b> Población para los años 1992, 2002, 2017 y proyectada al año 2065 (sobre 50.000 habitantes).	46	<b>Tabla 18.</b> Exposición de acuerdo con la población infantil y adulta mayor.
20	<b>Tabla 8.</b> Variables de construcción índice SoVI.	48	<b>Tabla 19.</b> Matriz de componentes principales para SOVI de Discomfort Térmico Ambiental.
23	<b>Tabla 9.</b> Niveles de Vulnerabilidad (SoVI).	49	<b>Tabla 20.</b> Valores de SoVI para ciudades (Discomfort Térmico Ambiental).
25	<b>Tabla 10.</b> Humidex - Índice de estrés producido por el calor.	52	<b>Tabla 21.</b> Detalle del Discomfort Térmico Ambiental presente y futuro para el mes de enero.
28	<b>Tabla 11.</b> Valores utilizados para la normalización de los factores de Riesgo.		

**Pág.**

- 58 Tabla 22.**  
Matriz de componentes principales para SoVI de heladas.
- 59 Tabla 23.**  
Valores SoVI por ciudad (H).
- 62 Tabla 24.**  
Días de heladas presente y futuro
- 76 Tabla 25.**  
Estaciones meteorológicas urbanas y rurales disponibles en las ciudades del área de estudio.
- 83 Tabla 26.**  
Validación de ICU (°C).
- 84 Tabla 27.**  
Valores según ICU instrumental, registros HOBO y estimación Oke (°C).
- 89 Tabla 28.**  
Comparación índices de confort HUMIDEX y THI.
- 89 Tabla 29.**  
Validación del indicador de heladas (número de días).



**ARCLIM**  
Atlas de Riesgo Climático  
Chile



1029





# 1

# RESUMEN EJECUTIVO

El cambio climático, a través de las Amenazas climáticas, puede afectar significativamente a las ciudades, especialmente a las edificaciones y los espacios públicos que juegan un rol clave en la naturaleza propia de la ciudad y del habitar urbano.

El objetivo del presente informe es generar coberturas digitales de Exposición, Vulnerabilidad, Amenazas y Riesgos para las principales ciudades chilenas dispuestas en el Atlas de Riesgos Climáticos (ARCLIM) de manera *online*.

La definición de las ciudades se ha basado en el criterio de seleccionar ciudades o conurbaciones mayores a 50.000 habitantes y capitales regionales de acuerdo a la clasificación de población del documento Ciudades, Pueblos y Aldeas del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2019). De esta forma, se han considerado 34 ciudades, incluyendo las ciudades de Coyhaique y la localidad de Hanga Roa en Isla de Pascua, región de Valparaíso, que tienen una población bajo este umbral.

Se han definido dos subsistemas urbanos —edificaciones y espacio público exterior— susceptibles de ser afectados por el cambio climático a través de tres cadenas de impactos determinadas por las siguientes Amenazas (A):

- **Isla de Calor Urbana (ICU):** La ICU es la principal característica del clima urbano y se define como la diferencia entre la temperatura urbana y la temperatura rural (Oke, 1987). Su existencia se explica por el diseño y materiales de construcción de la ciudad, superficies impermeables y no evapotranspirantes, tales como asfalto y concreto, que generalmente tienen una alta absorción de la radiación solar y una alta capacidad termal y de conductividad, además de una menor cobertura vegetal que disminuye la humedad y aumenta el calor (Ochoa de la Torre, 2009; Smith y Romero, 2016). La magnitud e intensidad de la ICU depende, a su vez, del tamaño de la ciudad y, por ello, del volumen de población concentrada espacialmente.



- **Disconfort Térmico Ambiental:** En los últimos años se ha observado una intensificación de los extremos climáticos, tales como el aumento de olas de calor y las temperaturas máximas que afectan a las ciudades en el período estival. Este aumento de la temperatura provoca condiciones de Disconfort Térmico tanto al interior de las edificaciones como en los espacios exteriores, como plazas, parques y espacios públicos en general, afectando especialmente a la población más vulnerable. Esta Amenaza se puede estudiar a través del indicador de Humidex.

- **Heladas:** Corresponde al número de días en un año cuando la temperatura mínima es menor a 0 °C (FDO) para cada ciudad. Los cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como las heladas, afectan de manera significativa a las sociedades humanas y, en especial, a los espacios urbanos interiores y exteriores. Dentro de los principales impactos de las heladas urbanas se destacan los efectos sobre la salud de las personas, especialmente de la población más vulnerable.

La Exposición (E) se determinó a través del número población total de cada ciudad sobre 50.000 habitantes para el año 2017. La Exposición futura se determinó en base a un modelo de simulación de uso urbano para el año 2065 con el fin de determinar la tendencia de superficie urbana y la relación de ésta con la población.

Para el Disconfort Térmico se ha considerado, como población expuesta, a la población infantil (0-5 años) y a los adultos mayores (sobre los 65 años) en valor porcentual.

La Vulnerabilidad (V) se realizó mediante el Índice de Vulnerabilidad Social o SoVI, desarrollado por Cutter, Boruff & Shirley (2003), que integra 25 variables bases más 6 variables específicas para cada cadena de impacto.

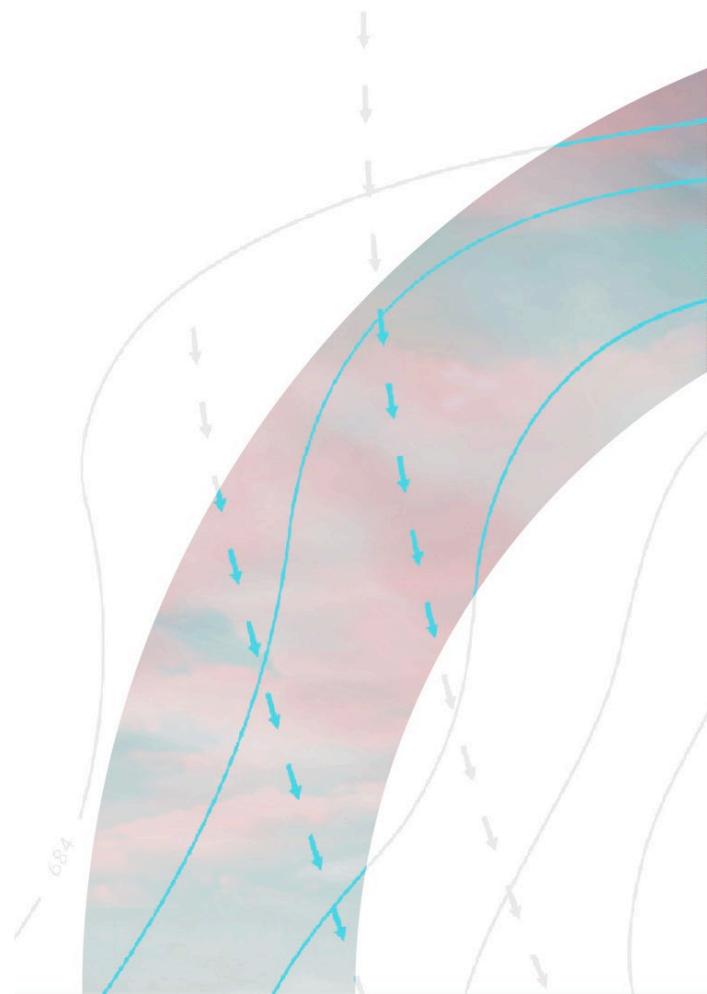
Los Riesgos (R) se han determinado sumando los tres factores normalizados, Amenaza (A), Exposición (E) y Vulnerabilidad (V) todos mapeados para el presente, futuro y cambio neto.

El mapa de Riesgo de Intensidad del Fenómeno de ICU, que integra los valores normalizados de Amenaza, Expo-

sición y Sensibilidad, muestra que las tres ciudades más riesgosas en el periodo presente son Santiago, La Serena - Coquimbo y Melipilla. A futuro, las mayores intensidades de ICU serán en las ciudades de Santiago, Melipilla y Rancagua (Machalí). Al contrario, las ciudades con menor Riesgo son Punta Arenas, Coyhaique y Hanga Roa, tanto para el periodo presente como para el futuro. Las ciudades interiores de Chile Central muestran el mayor cambio neto de ICU.

El mapa de Riesgo de Disconfort Térmico Ambiental señala que las tres ciudades más riesgosas en el periodo presente y futuro son Arica, Limache y Linares. Al contrario, las ciudades con menos Riesgo son Antofagasta, Peñaflor y Colina, tanto para el periodo presente como para el futuro. Es importante destacar que las ciudades de Concepción, Temuco y Osorno, en el presente, se encuentran en una situación de confortabilidad, pero a futuro cambian a una estado de Disconfort Térmico. Las ciudades del extremo sur no presentan este tipo de Riesgos.

El mapa de Riesgo de heladas indica que las tres ciudades más riesgosas en el periodo presente son San Felipe,



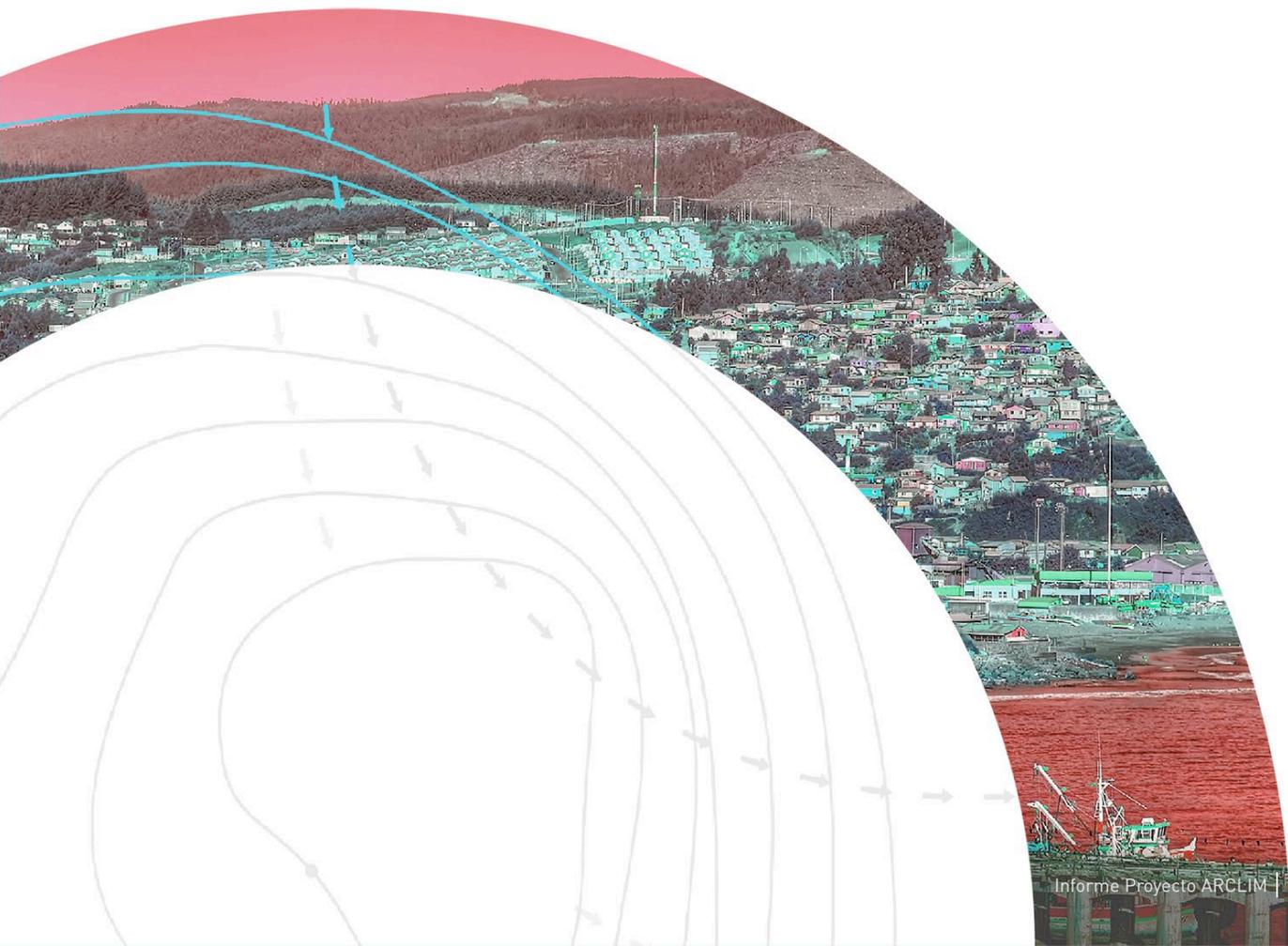
Osorno y Gran Santiago. Mientras que a futuro las ciudades con mayor Riesgo son San Felipe, Rancagua (Machalí) y Osorno. Al contrario, las ciudades con menos Riesgo son Peñaflo, Talagante y Valdivia, tanto para el periodo presente como en el futuro. Las ciudades del norte y algunas costeras no presentan este tipo de Riesgo.

A modo de conclusión, se puede afirmar que Santiago, por su gran extensión, es la ciudad con mayor impacto en intensidad de ICU, tanto presente como futuro. La validación con datos de otras fuentes reafirma esta tendencia. Las viviendas más precarias, como los campamentos, y las ciudades de valles interiores, especialmente de la zona central, serán las más afectados por la ICU. El impacto del cambio climático en espacios públicos exteriores, por Disconfort Térmico ambiental, igualmente será significativo a futuro, considerando los aumentos de temperatura por el cambio climático. Esto afectará notablemente a las ciudades con pocas áreas verdes y planteará grandes

retos para mejorar la calidad ambiental de los espacios verdes existentes. De los cambios pronosticados se puede inferir que las ciudades costeras del norte podrían sufrir cambios importantes respecto a su situación de confort actual al igual que algunas ciudades del sur.

Finalmente, el impacto del cambio climático en las heladas se podría calificar como beneficioso, en tanto se prevé una disminución en el número de días con heladas en las ciudades y con ello se esperaría una menor tasa de morbilidad y mortalidad por esta causa. Esto es especialmente significativo en ciudades con un alto porcentaje de viviendas con malas condiciones energéticas y personas en situación de calle.

Los Riesgos presentados en el Atlas de Riesgos de Ciudades permiten exponer una gran variedad de condiciones geográficas y climáticas de las ciudades analizadas, demostrando que ninguna área urbana o subsistema queda exento a los impactos del cambio climático y que, a su vez, las ciudades son claves para enfrentar los desafíos de mitigación y adaptación.





# 2

## INTRO- DUCCIÓN

El cambio climático a través de las Amenazas climáticas puede afectar significativamente a las ciudades, especialmente a las edificaciones y los espacios públicos que juegan un rol clave en la naturaleza propia de la ciudad y del habitar urbano. El objetivo del presente informe es generar coberturas digitales de Exposición, Vulnerabilidad, Amenazas y Riesgos para las principales ciudades chilenas, para integrarlas al Atlas de Riesgos Climáticos (ARCLIM) de manera *online*. Para este propósito, se han definido dos subsistemas urbanos, susceptibles a ser afectados por el cambio climático, a través de tres cadenas de impacto:

### Subsistemas:

- Edificaciones.
- Espacio público exterior.

### Cadenas de impacto:

- Isla de Calor Urbana (ICU).
- Discomfort Térmico Ambiental - Temperaturas máximas y humedad relativa.
- Heladas.

Estas cadenas de impacto se han seleccionado considerando las Amenazas climáticas más relacionadas con las

edificaciones y los espacios públicos. El impacto de Isla de Calor Urbana se refleja principalmente en las viviendas y edificaciones en las noches estivales, debido al calor que acumulan durante el día. El impacto del Discomfort Térmico tiene que ver con los efectos negativos en el uso del espacio público, como plazas y parques, cuando hay episodios de calor extremo, que afectan a la población más sensible. El impacto de heladas se manifiesta en ambos subsistemas de la ciudad —Edificaciones y Espacio Público Exterior—, pero centrado en la estación de invierno.

Las tres cadenas de impacto seleccionadas se relacionan con los Riesgos de salud y calidad de vida urbana. Adicionalmente, estas cadenas se han trabajado en coordinación con el grupo de Asentamientos Humanos, de manera de ir complementando el alcance y profundidad de cada Riesgo, especialmente los asociados al calor extremo y al déficit hídrico. De igual modo, otros impactos más extremos, como las inundaciones y marejadas, se encuentran abordados en otros grupos de trabajo del Atlas.

En el caso de las Amenazas que impactan a las ciudades, se han escogido indicadores climáticos que representen de mejor forma las particularidades de los ambientes urbanos y datos proporcionados por Meteodata y el Centro



de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), para representar la situación presente (1980-2010) y futura (2035-2065), asociadas al cambio climático.

La definición de las ciudades se basó en el criterio de seleccionar ciudades o conurbaciones mayores a 50.000 habitantes y las capitales regionales, de acuerdo a la clasificación de población del documento Ciudades, Pueblos y Aldeas del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2019). Dicho criterio fue complementado con el de Área Urbana Consolidada (AUC), término desarrollado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (INE y MINVU, 2018), de manera de identificar las áreas urbanas conurbadas, que conforman una única unidad urbana morfológica. De esta forma, las ciudades y pueblos con menor cantidad de habitantes no se abordan, pero sí a nivel comunal, dentro del grupo de Asentamientos Humanos.

Considerando las rápidas dinámicas urbanas se ha desarrollado un modelo de cambio de uso de suelo -con el mismo horizonte temporal de los modelos climáticos- para determinar la Exposición futura, a través de las superficies urbanas simuladas y también para estimar la Isla de Calor Urbana a través de la población inferida del modelo.

En el caso de la Vulnerabilidad (Sensibilidad), se ha usado como aproximación la aplicación del índice de Vulnerabilidad Social (SoVI), desarrollado en base al método elaborado por Cutter, Boruff & Shirley (2003), diseñado a partir del modelo elaborado por Cutter (1996), el cual se explica en la metodología.

Los Riesgos climáticos se centran en ver las diferencias de los impactos entre la situación presente y futura, en las ciudades seleccionadas, considerando el efecto de cambio climático.

Se ha incluido un Anexo con la validación de los indicadores de Amenaza, con datos obtenidos por otras fuentes (satelitales, instrumentales, terreno). Esta parte ha contado con la ayuda de la alumna practicante Francisca González, del Departamento de Geografía de la Universidad de Chile.

Finalmente, se incluyen las Conclusiones, destacando los principales hallazgos encontrados y desafíos futuros.



1029

H

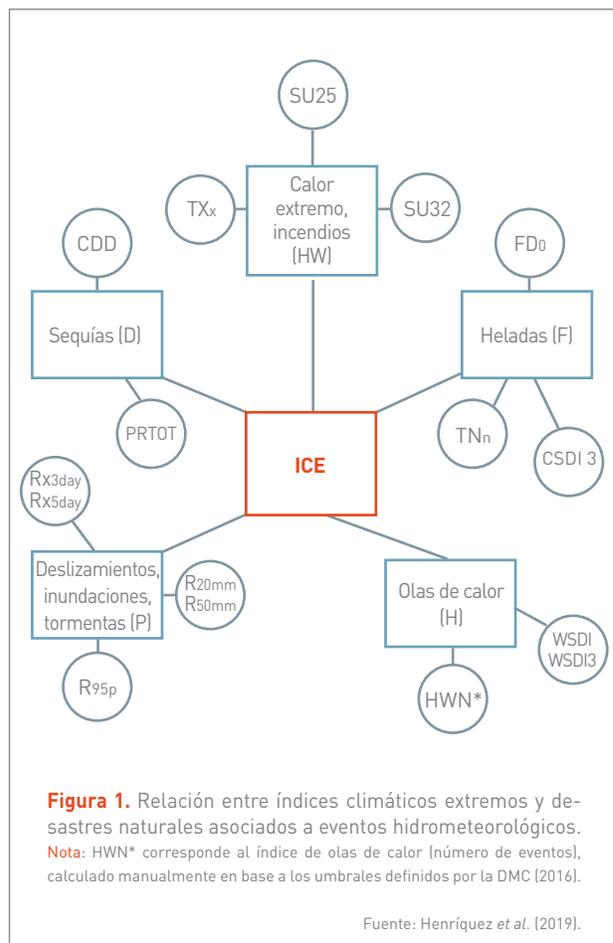
1023



# 3 METODO- LOGÍA

## 3.1 CADENA DE IMPACTOS URBANOS: MARCO GENERAL

Como referencia general, se ha usado el diagrama propuesto por Henríquez *et al.* (2019), que relaciona los índices climáticos extremos propuestos por el panel de expertos ETCCDI (*Expert Team on Climate Change Detection and Indices*) con los principales impactos/Riesgos urbanos, como lo muestran la **Figura 1** y la **Tabla 1**. Este esquema permite visualizar los principales impactos del cambio climático, ligado a desastres naturales que afectan a las ciudades: en este caso se ha seleccionado el efecto de Isla de Calor, que representa los impactos de calor extremo; Disconfort Térmico de olas de calor; y los de heladas, vinculados a las temperaturas extremas mínimas. Esta selección deja fuera importantes impactos que afectan a la ciudad, como los relacionados con las inundaciones y aluviones, pero debido a los problemas de escala y de tiempo que implica su análisis, se debieron descartar. Sin embargo, estos impactos se pueden consultar en el grupo de Hidrología, que trabaja estas cadenas a escala comunal, lo que es especialmente pertinente para las grandes ciudades, compuestas por un conjunto de comunas.





ICE	Nombre	Definición	Unidad
TX10p	<i>Cool days</i> (Días fríos)	Porcentaje de días cuando TX<10th percentil	Días
TX90p	<i>Warm days</i> (Días calientes)	Porcentaje de días cuando TX>90th percentil	Días
TN10p	<i>Cool nights</i> (Noches frías)	Porcentaje de días cuando TN<10th percentil	Días
TN90p	<i>Warm nights</i> (Noches calientes)	Porcentaje de días cuando TN>90th percentil	Días
TXx	Max Tmax	Valor mensual máximo de temperatura máxima diaria	°C
TXn	Min Tmax	Valor mensual mínimo de temperatura máxima diaria	°C
TNx	Max Tmin	Valor mensual máximo de temperatura mínima diaria	°C
TNn	Min Tmin	Valor mensual mínimo de temperatura mínima diaria	°C
DTR	<i>Diurnal temperature range</i> (rango diario de temperatura)	Diferencia media mensual entre TX y TN	°C
SU25	<i>Summer days</i> (Días de verano)	Número de días en un año cuando TX (máximo diario)>25 °C	Días
SU32	<i>Summer days</i> (Días de verano)	Número de días en un año cuando TX (máximo diario)>32 °C	Días
WSDI	<i>Warm spell duration indicator</i> (Indicador de la duración de periodos calientes)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TX>90th percentil	Días
CSDI	<i>Cold spell duration indicator</i> (indicador de la duración de periodos fríos)	Contaje anual de días con por lo menos 6 días consecutivos en que TN<10th percentil	Días
FD0	<i>Frost days</i> (Días de heladas)	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) <0 °C	Días
FD-2	<i>Frost days</i> (Días de heladas)	Número de días en un año cuando TN (mínimo diario) <-2 °C	Días
Rx1	<i>Max 1-day precipitation amount</i> (Cantidad máxima de precipitación en un día)	Máximo mensual de precipitación en 1 día	mm
Rx5	<i>Max 5-day precipitation amount</i> (Cantidad máxima de precipitación en cinco días)	Máximo mensual de precipitación en 5 días	mm
SDII	<i>Simple daily intensity index</i> (Índice simple de intensidad diaria)	Precipitación anual total dividida para el número de días húmedos (definidos por PRCP>=1.0 mm) en un año	mm/día
R95p	<i>Very wet days</i> (Días muy húmedos)	Precipitación anual total en que PRCP >95 percentil	mm
R99p	<i>Very wet days</i> (Días muy húmedos)	Precipitación anual total en que PRCP >99 percentil	mm
R10mm	<i>Number of heavy precipitation days</i> (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que PRCP>=10 mm	Días
R20mm	<i>Number of heavy precipitation days</i> (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que PRCP>=20 mm	Días
R30mm	<i>Number of heavy precipitation days</i> (Número de días con precipitación intensa)	Número de días en un año en que PRCP>=30 mm	Días
CDD	<i>Consecutive dry days</i> (Días secos consecutivos)	Número máximo de días consecutivos con PRCP <1 mm	Días
CWD	<i>Consecutive wet days</i> (Días húmedos consecutivos)	Número máximo de días consecutivos con PRCP >=1 mm	Días

**Tabla 1.** Índices climáticos extremos (ICE).

Nota: TN=temperatura mínima; TX= temperatura máxima; PRCP = precipitación.

Fuente: ETCDDI basado en IPCC (2012).

Es importante aclarar que —por el tamaño de celda de los datos meteorológicos— no es posible trabajar a niveles más detallados para el cálculo del Riesgo.

De igual manera, se ha considerado el reciente informe de “Adaptación frente a los Riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos - Informe RIOCCADAPT”, Capítulo 13, Asentamientos Urbanos y Rurales (Moreno *et al.*, 2020), para la selección de cadenas de impactos más relevantes. También se han considerado las opiniones del sector público, especialmente a través de reuniones con distintos funcionarios del Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y

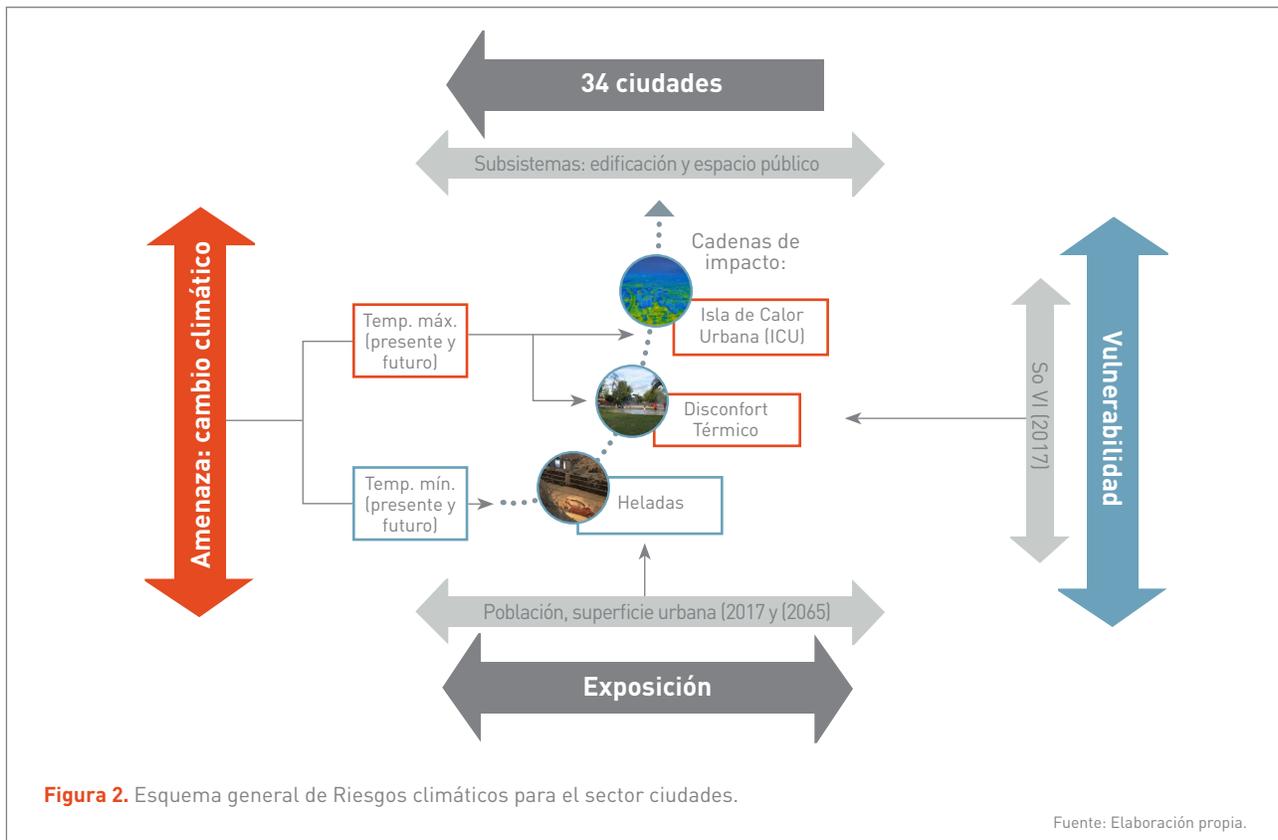
Urbanismo, Transporte, Bienes Nacionales y Salud, en el evento realizado el 14 de enero de 2020, en Casa Central de la Pontificia Universidad Católica de Chile. En dicha reunión se explicaron los impactos propuestos por el grupo de Ciudades, junto a los grupos de Asentamientos Humanos y Salud y se presentó el modelo de cambio de uso de suelo urbano para el sistema urbano nacional.

El esquema general, que resume las cadenas de impactos para los subsistemas escogidos, se presenta en la **Tabla 2** y la **Figura 2**.

Subsistema	Exposición (E)	Vulnerabilidad (V)	Amenaza (A)	Riesgo
Edificaciones	Población total 2017 y 2065	SoVI + campamentos	Isla de Calor Urbana	Mapa de Riesgo ICU (E+V+A)/3
Espacio público exterior	Población infantil y adulta mayor 2017	SoVI + áreas verdes	Confort Térmico Ambiental	Mapa de Riesgo Confort Térmico (E+V+A)/3
Edificaciones - Espacio público exterior	Población total 2017 y 2065	SoVI + condiciones de vivienda y población en situación de calle	Heladas	Mapa de Riesgo heladas (E+V+A)/3

**Tabla 2.** Esquema general de la metodología utilizada -para los Riesgos- en el sector ciudades.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.** Esquema general de Riesgos climáticos para el sector ciudades.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1 CIUDADES SELECCIONADAS

Las ciudades seleccionadas corresponden a aquellas que tienen sobre los 50.000 habitantes y a las capitales regionales. Si bien las ciudades en Chile se encuentran definidas como aquellos asentamientos sobre 5.000 habitantes (INE, 2019), se han escogido las de porte medio, sobre 50.000 habitantes, por su relevancia en la modificación del clima local e importancia en el sistema urbano. Bajo este contexto, se toman en total 34 ciudades a lo largo de

Chile (Tabla 3 y Figura 3). Como se señaló, se ha incluido la localidad de Hanga Roa en Isla de Pascua, Región de Valparaíso, que tiene una población de 7 mil habitantes aproximadamente.

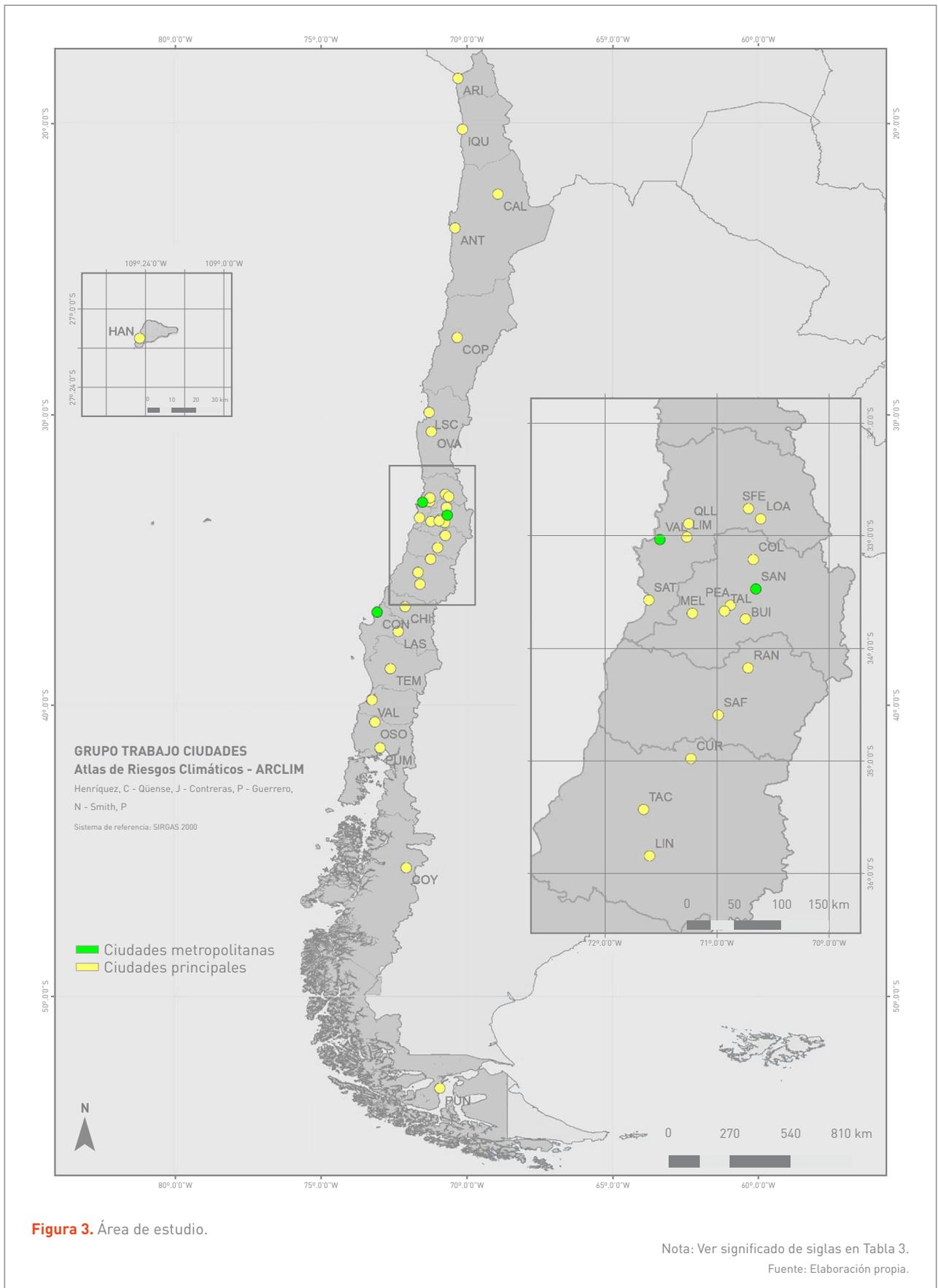
La población fue obtenida a partir del Informe de Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019, del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2019). Este documento toma como base la información del Censo de Población y de Vivienda, realizado el 19 de abril del 2017.



ID	Nombre ciudad	Nombre región	Nombre provincia	Nombre comuna	Tipo de ciudad
SAN	Gran Santiago	Metropolitana De Santiago	Santiago, Cordillera, Chacabuco, Talagante y Maipo	Provincia de Santiago, Comunas: Puente Alto, Pirque, San José de Maipo, Lampa, San Bernardo y Padre Hurtado	Conurbación
VAL	Gran Valparaíso	De Valparaíso	Valparaíso y Marga Marga	Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quilpué y Villa Alemana	Conurbación
CON	Gran Concepción	Del Biobío	Concepción	Concepción, Talca, Penco Hualpén, Chiguayante, Coronel y San Pedro de la Paz	Conurbación
LSC	La Serena-Coquimbo	De Coquimbo	Elqui	La Serena y Coquimbo	Conurbación
ANT	Antofagasta	De Antofagasta	Antofagasta	Antofagasta	Capital Regional
IQU	Iquique-Alto Hospicio	De Tarapacá	Iquique	Iquique y Alto Hospicio	Conurbación
RAN	Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios	Del Libertador General Bernardo O'Higgins	Cachapoal	Rancagua, Machalí, Olivar y Requínoa	Conurbación
TEM	Temuco - Padre Las Casas	De La Araucanía	Cautín	Temuco y Padre Las Casas	Conurbación
TAC	Talca-Culénar	Del Maule	Talca	Talca y Maule	Conurbación
ARI	Arica	De Arica y Parinacota	Arica	Arica	Capital Regional
PUM	Puerto Montt	De Los Lagos	Llanquihue	Puerto Montt	Capital Regional
CHI	Chillán-Chillán Viejo	De Ñuble	Diguillín	Chillán	Capital Regional
CAL	Calama	De Antofagasta	El Loa	Calama	Capital Regional
COP	Copiapó	De Atacama	Copiapó	Copiapó	Capital Regional
VAD	Valdivia	De Los Ríos	Valdivia	Valdivia	Capital Regional
QLL	Quillota - La Calera - Hijuelas-La Cruz	De Valparaíso	Quillota	Quillota, La Calera, Hijuelas y La Cruz	Conurbación
OSO	Osorno	De Los Lagos	Osorno	Osorno	Capital Regional
LAS	Los Ángeles	Del Biobío	Biobío	Los Ángeles	Capital Regional
CUR	Curicó	Del Maule	Curicó	Curicó	Capital Regional
PUN	Punta Arenas	De Magallanes y Antártica de Chile	Magallanes	Punta Arenas	Capital Regional
SAT	San Anto.-Cart.- L. Cruces-Sto. Dom.	De Valparaíso	San Antonio	Cartagena y San Antonio	Conurbación
COL	Colina	Metropolitana De Santiago	Chacabuco	Colina	Capital Regional
PEA	Peñaflor	Metropolitana De Santiago	Talagante	Peñaflor	Capital Regional
OVA	Ovalle	De Coquimbo	Limarí	Ovalle	Capital Regional
LIN	Linares	Del Maule	Linares	Linares	Capital Regional
MEL	Melipilla	Metropolitana De Santiago	Melipilla	Melipilla	Capital Regional
LOA	Los Andes-Calle Larga	De Valparaíso	Los Andes	Los Andes y Calle Larga	Conurbación
BUI	Buín	Metropolitana De Santiago	Maipo	Buín	Capital Regional
SFE	San Felipe, V. Los Almendros. Sta. María	De Valparaíso	San Felipe	San Felipe	Conurbación
SAF	San Fernando	Del Lib. Gral. B. O'Higgins	Colchagua	San Fernando	Capital Regional
TAL	Talagante	Metropolitana De Santiago	Talagante	Talagante	Capital Regional
LIM	Limache - Olmué	De Valparaíso	Marga Marga	Limache y Olmué	Conurbación
COY	Coyhaique	De Aysén	Coyhaique	Coyhaique	Capital Regional
HAN	Hanga Roa	De Valparaíso	Isla de Pascua	Isla de Pascua	Capital Regional

**Tabla 3.** Ciudades seleccionadas

Fuente: Elaboración propia en base a INE (2019).





## 3.2 MODELO DE CAMBIO DE USO DE SUELO URBANO: EXPOSICIÓN

### 3.2.1 SIMULACIÓN URBANA AL 2065

El modelo de cambio de uso de suelo urbano, se realizó por dos razones: primero, para estimar la población como dato de Exposición futura en la fórmula de Riesgo (año 2065), considerando que la población y superficie urbana se correlacionan directamente. En segundo lugar, para el cálculo de Amenaza futura de la intensidad de Isla de Ca-lor Urbana, el que requiere del dato de población urbana y viento rural.

Para la modelación del uso urbano, el área de estudio (todo el país) —por razones metodológicas— fue dividida en cuatro zonas: norte (regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama y Coquimbo), centro (re-giones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, Lib. Gral. B. O'Higgins y Maule), sur (regiones del Biobío, Ñuble, Araucanía, Los Lagos y Los Ríos) y extremo sur (regiones de Aysén y Magallanes y Antártica de Chile). La Isla de

Pascua se trabajó de manera separada, para representar los impactos del cambio climático, en una localidad oceá-nica de clima subtropical. Después se agregó todo, para conformar un solo mapa. Para aplicar el modelo, además de trabajar con las 34 ciudades principales, se agregaron todas las ciudades sobre 5.000 habitantes.

Para la obtención del uso urbano del año 2065 se utilizó un modelo de predicción de cambio de uso de suelo. Esto se realizó mediante el módulo de IDRISI: *Land Change Modeler*. En la **Figura 4**, se presenta un resumen metodo-lógico de la herramienta utilizada.

Este módulo, en una primera fase, realiza un análisis de cambio de las coberturas de uso urbano entre dos años conocidos: 1992(T0) y 2017(T1). Paralelamente, se traba-jaron seis fuerzas motrices del cambio urbano (ver **Tabla 4**), que se normalizan entre 0 a 1; siendo 0 lo menos apto para urbano y 1 lo más apto. De acuerdo con el ejemplo de la zona centro, presentado en la **Figura 5**, aquellas zonas con tonalidades amarillas-verdes, son sectores que tie-nen mayor aptitudes y probabilidades de dar fuerza a que aquel tipo de suelo del año T1 transite a uno de carácter urbano posteriormente.

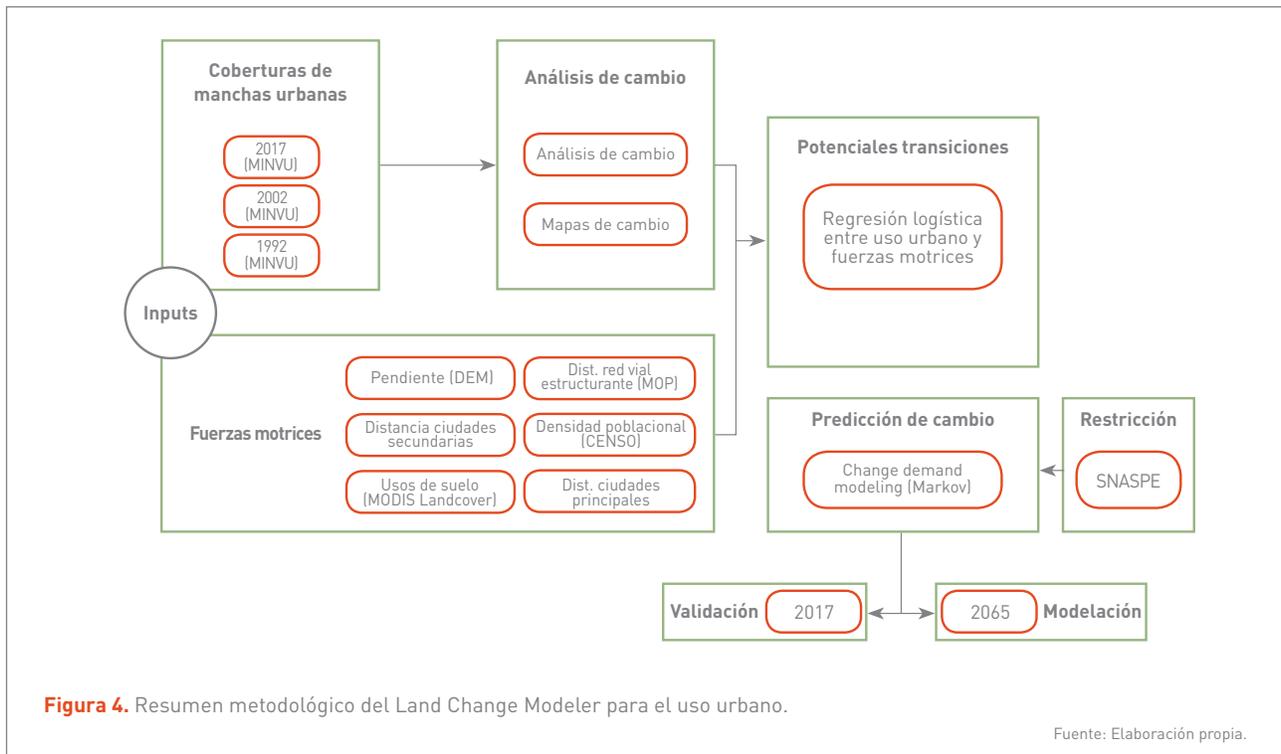


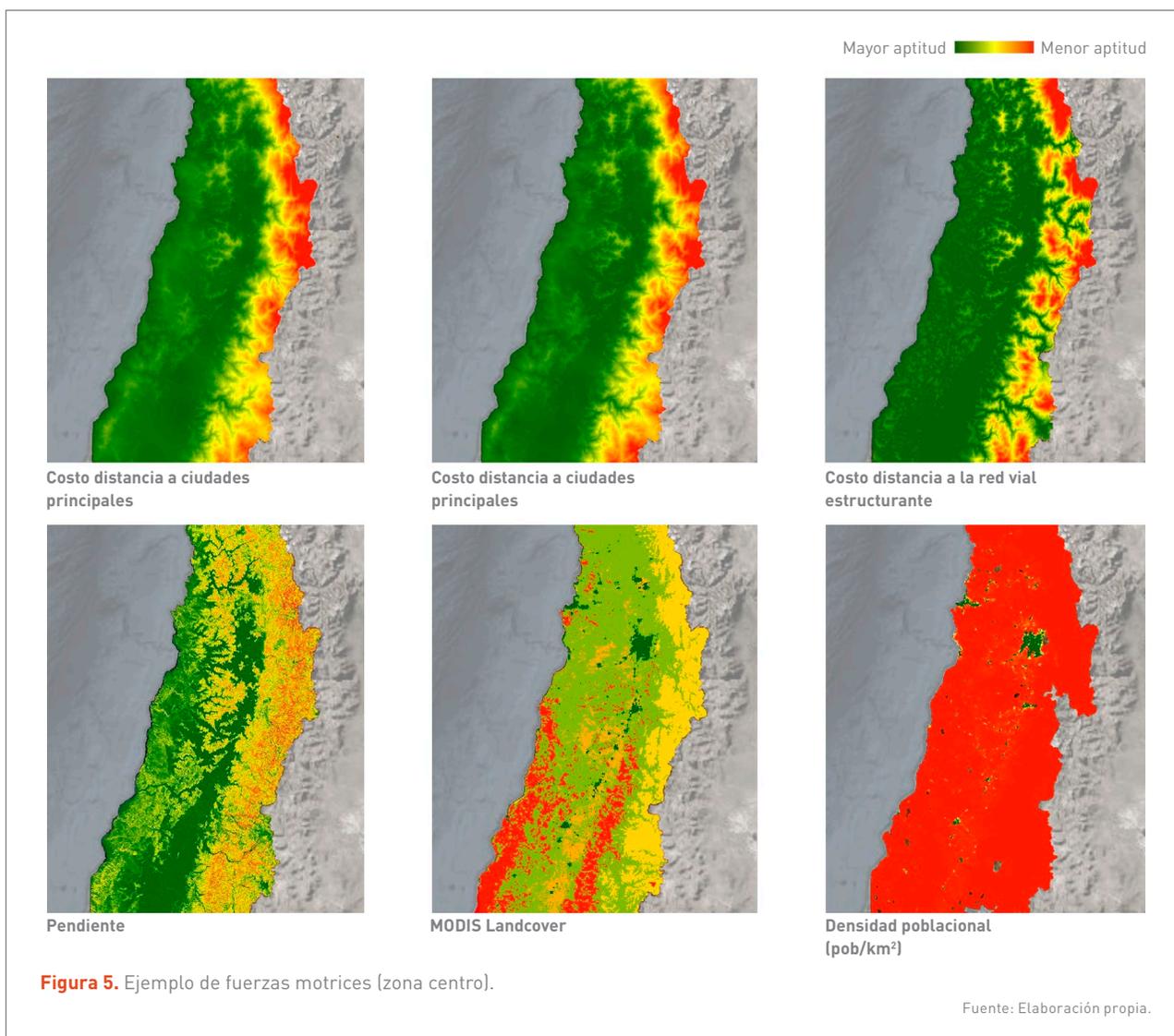
Figura 4. Resumen metodológico del Land Change Modeler para el uso urbano.

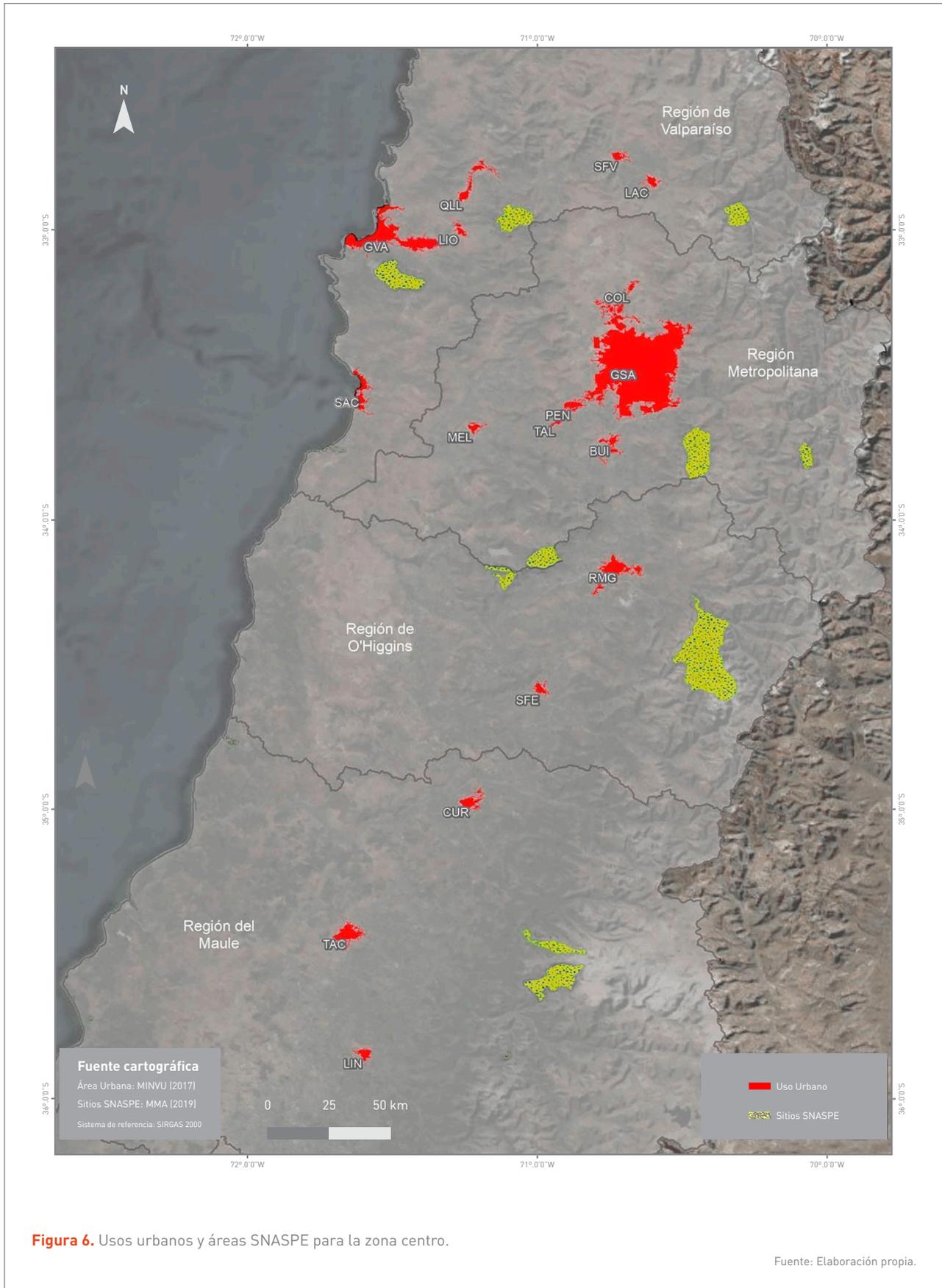
Fuente: Elaboración propia.

Nombre	Descripción	Fuente
Urbano 1992	Uso de suelo urbano del año 1992	MINVU, 1992
Urbano 2002	Uso de suelo urbano del año 2002	MINVU, 2002
Urbano 2017	Uso de suelo urbano del año 2017	MINVU, 2017
Pendiente	Pendiente, en grados	Alos Palsar, 2011
Distancia a Ciudades principales	Centroides de las 34 ciudades principales	Google Earth, 2020
Distancia a Ciudades secundarias	Centroides de todas las ciudades sobre 5.000 habitantes	Google Earth, 2020
Distancia a red vial estructurantes	Distancia a red vial estructurantes	MOP, 2018
Densidad poblacional	Densidad poblacional (población/km <sup>2</sup> )	Censo, 2017
Uso de suelo	Cobertura de suelo según imágenes MODIS Land Cover	MODIS Land Cover, 2017
Áreas SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, incluye Parques Nacionales, Reservas Nacionales y Monumentos Nacionales. También se incluyen Santuarios de la Naturaleza	MMA, 2019

**Tabla 4.** Inputs utilizados para el modelo de cambio de uso de suelo Land Change Modeler.

Fuente: Elaboración propia





La regresión logística se realiza entre el uso de suelo urbano 2017 (T1) y las fuerzas motrices, con el fin de utilizar estas últimas como variables explicativas del comportamiento de cambio de uso de suelo. De este proceso, se obtienen las potenciales transiciones para el año 2065 (T2). Las demandas se generan a partir de la predicción de cambio, mediante el método de cadenas de Markov. Dicho método es un tipo de predicción estocástica discreta, que simula la probabilidad de que ocurra algo en base a su estado anterior (Eastman, 2012). Es decir, el cambio depende únicamente de los años anteriores, en este caso, del año 1992 (T1). Esta herramienta genera tres productos: una matriz de probabilidad de transición; una matriz de áreas de transición; y una colección de imágenes, que representa la probabilidad de transición para el uso considerado.

Adicionalmente, se ha considerado como restricción los sitios SNASPE (creados mediante la Ley N°18.362/1984), debido a que su principal objetivo es lograr la conservación de aquellos ambientes naturales, terrestres o acuáticos que el Estado protege, por lo cual, no es lógico que se urbanice estos sitios (Ver **Figura 6**, para ejemplo en la zona centro).

### 3.2.2 VALIDACIÓN DEL MODELO DE USO DE SUELO

La validación es una parte esencial del proceso de simulación espacial, para reconocer la verificación del método en sí mismo, por tanto, es que se modeló desde 1998 (T0) para un año conocido, es decir, para el año 2017 (T1m).

Para la validación se utilizó el coeficiente *kappa* del módulo *Crosstab* en IDRISI. La aplicación *Crosstab* es una técnica discreta multivariada, que determina estadísticamente si una matriz de error es significativamente diferente de otra. Dicho coeficiente es una medida de la concordancia o exactitud, basado en las diferencias entre los datos de la modelación y los de la referencia (Berlanga *et al.*, 2010). Este índice va entre 0 y 1, donde el valor 0 indica que no hay correlación; y el valor 1, que existe una correlación

perfecta. Para efectos de este informe, se tomó sobre 0,8 un nivel de concordancia muy aceptable, y, por lo tanto, se acepta como válido el modelo utilizado (Ullibbarri & Fernández, 1999) (**Tabla 5**).

Valor de K	Fuerza de concordancia
<0,20	Pobre
0,21 – 0,40	Débil
0,41 – 0,60	Moderada
0,61 – 0,80	Buena
0,81 – 1	Muy buena

**Tabla 5.** Valores de coeficiente Kappa.

Fuente: Ullibbarri & Fernández (1999).

Los índices *Kappa* obtenidos del *crosstab* entre la modelación del año T0 (1998) y T1m (2018 modelado), se observan en la **Tabla 6**. Estos resultados demuestran que la validación es muy buena. Sin embargo, se debe considerar como limitante, en este proceso, la gran cantidad de celdas no urbanas que posee el área de estudio, lo que puede llevar a que este índice se sobreestime.

Zonas	Índice Kappa
Norte	0,95
Centro	0,90
Sur	0,96
Extremo Sur	0,96

**Tabla 6.** Valores de coeficiente Kappa de la modelación

Fuente: Elaboración propia.

### 3.2.3 CIUDADES FUTURAS Y EXPOSICIÓN

Para obtener la Exposición futura, se realizó una regresión lineal entre los datos de población de “ciudades, pueblos, aldeas y caseríos”, de los censos de 1992 y 2017, y la superficie real de la mancha urbana del MINVU y la obtenida mediante la modelación al año 2065 (**Tabla 7**). En la **Figura 8**, se presenta —como ejemplo el caso de la ciudad del Gran Santiago— el gráfico de la correlación para la obtención de la ecuación de la recta.

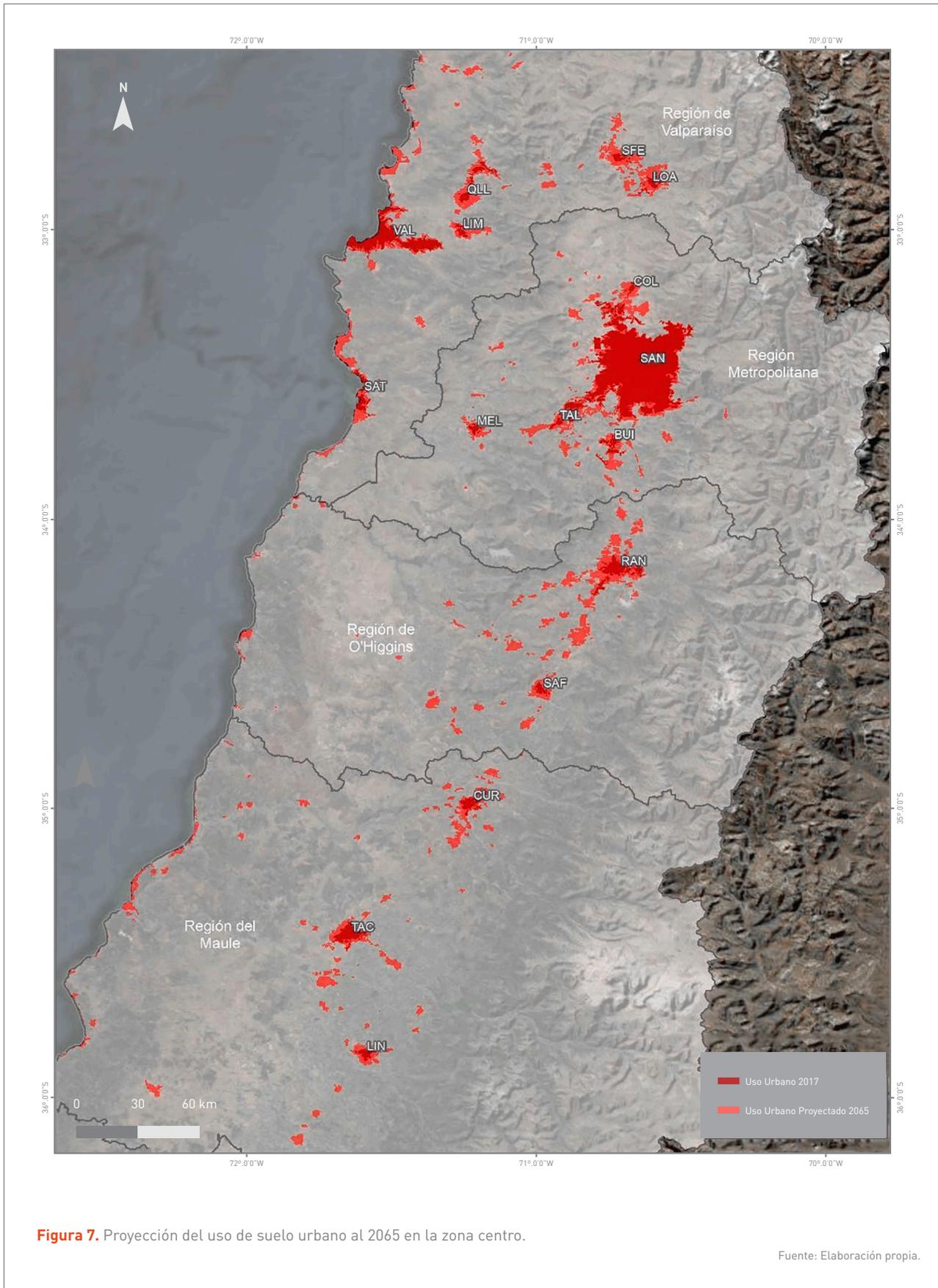


Nº	Ciudades	1992	2002	2017	2065
1	Gran Santiago	4.295.593	5.428.590	6.139.087	6.903.681
2	Placilla	6.644	10.811	39.344	1.847.789
3	Gran Valparaíso	750.713	803.683	896.528	982.832
4	Gran Concepción	610.380	666.381	719.944	801.687
5	La Serena - Coquimbo	220.172	296.253	399.450	657.577
6	Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios	204.119	239.290	290.029	512.490
7	Antofagasta	225.316	285.255	348.517	460.882
8	Talca - Culenar	159.861	189.722	236.347	386.175
9	Ventanas	5.029	5.957	8.314	375.745
10	Iquique - Alto Hospicio	150.659	214.586	293.068	357.561
11	Temuco - Padre Las Casas - Cajón	210.587	260.783	277.529	318.179
12	Colina	52.769	58.769	88.858	266.399
13	Quillota - La Calera - La Cruz - Hijuelas	113.308	128.874	149.159	260.235
14	Calama	106.970	126.135	157.575	255.683
15	Arica	161.333	175.441	202.131	231.549
16	Valdivia	112.712	122.750	150.048	224.555
17	Puerto Montt	110.139	153.118	169.736	218.104
18	Curicó	77.733	93.447	125.275	214.167
19	San Felipe	49.793	59.801	64.543	207.266
20	Copiapó	98.188	125.983	150.804	196.788
21	Chillán - Chillán Viejo	145.759	146.701	164.270	196.135
22	Melipilla	45.722	53.522	72.212	187.157
23	Osorno	114.239	132.245	147.666	164.494
24	Los Ángeles	94.716	117.972	143.023	160.066
25	San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Sto. Domingo	89.209	106.101	118.668	155.391
26	Molina	17.301	27.203	37.189	152.472
27	Los Andes - Calle Larga	48.573	60.093	69.041	149.416
28	Punta Arenas	109.110	116.005	123.403	135.661
29	Linares	59.658	65.133	73.602	134.453
30	Limache-Olmué	37.995	45.327	50.998	128.182
31	San Fernando	42.684	49.519	58.367	113.788
32	Rengo	23.896	30.891	37.721	113.554
33	Talagante	37.198	49.957	56.878	111.069
34	Quintero	16.119	18.719	26.247	104.368
35	Ovalle	53.515	66.405	75.864	100.612
36	Buín	33.059	40.091	65.607	100.163
37	Graneros	17.765	21.615	28.679	98.006
38	Coyhaique	36.376	44.850	49.667	95.751
39	Peñaflor	79.520	63.209	82.959	93.700
40	Vicuña	7.716	12.910	15.872	85.267
41	Los Álamos	5.578	13.035	15.244	84.693
42	San Javier	16.450	20.524	29.017	84.674
43	San Clemente	10.788	13.398	20.350	82.501
44	San Esteban	4.970	7.542	10.293	74.132
45	Parral	24.416	26.397	30.767	73.760
46	San Carlos	25.640	29.359	32.529	71.807
47	Alerce - La Vara	1.488	2.777	42.267	68.453
48	Arauco	11.771	16.291	17.597	61.015
49	San Vicente De Tagua Tagua	13.843	18.914	20.827	60.990
50	Cabrero	8.791	11.947	14.978	59.113
51	Lampa	6.618	12.319	37.599	55.705
52	Hospital	1.999	5.664	6.122	55.463
53	Castro	20.634	29.148	33.417	55.197
54	Angol	39.151	43.801	48.608	54.972
55	Vallenar	42.725	43.750	45.298	52.364
56	Constitución	28.748	33.914	34.022	52.196
57	Tomé	37.394	41.198	42.312	51.317
58	Santa Cruz	15.646	18.603	22.681	51.054
59	Hanga Roa	2.686	3.304	7.163	15.608

**Tabla 7.** Población para los años 1992, 2002, 2017 y proyectada al año 2065 (sobre 50.000 habitantes).

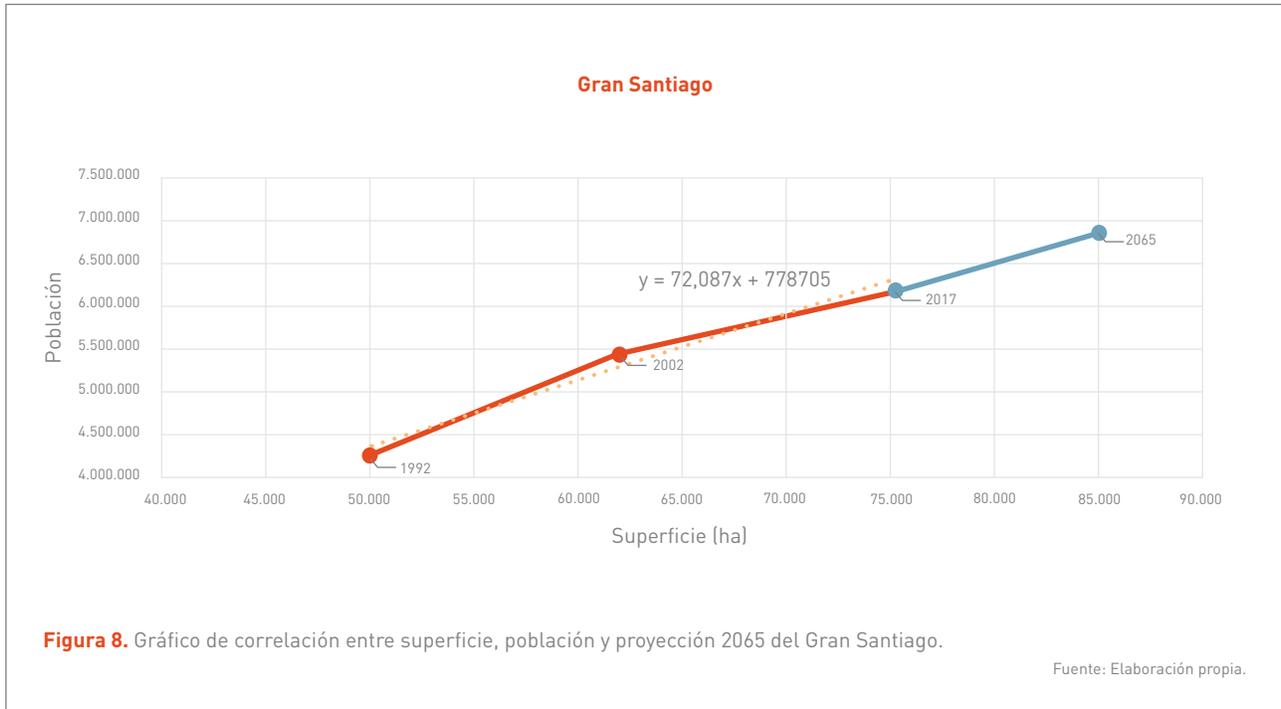
Nota: En gris se destacan las nuevas ciudades sobre 50.000 habitantes para el año 2065.

Fuente: Elaboración propia



**Figura 7.** Proyección del uso de suelo urbano al 2065 en la zona centro.

Fuente: Elaboración propia.



En la **Tabla 7**, se presenta la población proyectada para el año 2065, a través de la regresión lineal simple, considerando el dato de superficie simulada al citado año, como variable independiente. En la citada tabla se han seleccionado las ciudades que tendrían sobre 50.000 habitantes al 2065, más la localidad de Hanga Roa, que alcanzaría sobre las 15.000 personas. En este listado se observa que habría 25 nuevas ciudades sobre 50.000 habitantes respecto al 2017. La ciudad de Placilla aparece en segundo lugar, luego de Santiago, con una población cercana a los 2 millones de habitantes, debido al gran crecimiento de población entre los años 1992 y 2017, lo que resulta ser un valor sobreestimado. Un caso similar ocurre con la localidad de Ventanas, que pasaría de 5.029 habitantes a sobre 375.000 habitantes, al 2065, ya que el modelo de simulación proyecta una superficie casi 10 veces mayor a la registrada al año 2002, alcanzando las 96 hectáreas. La última ciudad sobre 50 mil habitantes, sería Santa Cruz con 51.054 habitantes.

Es importante mencionar que estas 25 ciudades —sobre 50 mil habitantes— no se consideraron en el cálculo del Riesgo futuro, ya que como es una estimación, no hay completa certeza de que vayan a superar este umbral de

población en el futuro. Además, varias pueden conformar conurbaciones con ciudades existentes, como es el caso de la ciudad de Placilla, que es parte de la comuna de Valparaíso y podría ser parte del Valparaíso Metropolitano.

Una limitante del modelo es que se trata de una aproximación general, para estimar población. Un modelo de proyección de población requiere de datos demográficos más específicos, como tasas de natalidad, mortalidad, crecimiento vegetativo, migraciones, entre otras. Por otro lado, considerando la correlación simple entre población y superficie, aparecen casos de crecimiento negativo, como en las localidades de Til Til y El Salvador que —en el período 2017-1992— perdieron entre 7.289 y 4.405 personas, respectivamente. También es importante mencionar que 6 ciudades no tenían información de superficie, para el año 1992. Finalmente, como los cálculos de Amenaza y Vulnerabilidad fueron realizados para las 34 localidades seleccionadas, no fue posible incluir estas nuevas ciudades, especialmente para el índice de Vulnerabilidad social, SoVI, indicador que se presenta a continuación, ya que para su cálculo requiere de una selección anticipada de las ciudades y zonas censales, así como de una serie de variables que determinan el valor de Vulnerabilidad.

### 3.3 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD SOCIAL (SOVI)

---

La Vulnerabilidad es un concepto que ha sido estudiado desde diversas disciplinas, como tal su forma de estudio ha dependido de cada una de ellas (Khan, 2012; Lee, 2014; Menoni, Molinari, Parker, Ballio & Tapsell, 2012). No obstante, la mayoría de las visiones concuerda en definirla como la susceptibilidad de un sistema a ser impactado por un desastre (Adger, 2006; Cutter, Boruff & Shirley, 2003; McEntire, 2005; Lee, 2014).

Es importante destacar que la definición de Vulnerabilidad del Sector Ciudades, es acorde a lo definido por el IPCC (AR5) como factor del Riesgo climático, junto a los factores de Exposición y de Amenaza. También, con el concepto de Sensibilidad o susceptibilidad planteado por GIZ (2017).

Desde la mirada del Riesgo, la Vulnerabilidad se ha analizado históricamente desde una perspectiva enfocada en las características biofísicas del territorio. Tan solo en los últimos años, se ha manifestado la importancia de estudiar la Vulnerabilidad social, frente a los desastres y Riesgos socio-naturales (Lee, 2014; Birkmann, 2007; Menoni, Molinari, Parker, Ballio, Tapsell, 2012).

La Vulnerabilidad social, en este contexto, sólo ha cobrado mayor importancia en las últimas dos décadas, cuando el desarrollo investigativo se ha orientado a la medición de las condiciones sociales y económicas, que existen previamente a la ocurrencia de un desastre y que incrementan o disminuyen la capacidad de las comunidades para prepararse, responder y recuperarse a un desastre (McEntire, 2005).

A pesar del avance en el estudio de la Vulnerabilidad social y del desarrollo de nuevas metodologías para su investigación y medición, aún se torna necesario seguir profundizando en su comprensión y evolución a lo largo del tiempo, relevando su importancia e impacto, como herramienta para tomadores de decisión, en la creación de políticas públicas efectivas para el manejo del Riesgo.

Existen distintos métodos para la evaluación de la Vulnerabilidad social (Adger, 2006; Khan, 2012). Uno de los más replicados y con mayor validación, es el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI), desarrollado por Cutter *et al.* (2003), que permite cuantificar y visualizar la distribución espacial de la Vulnerabilidad. Estudios previos han replicado esta metodología, identificando como factores principales de la Vulnerabilidad social: el género, el nivel socioeconómico, el empleo y las características sociodemográficas, entre otras (Fatemi *et al.*, 2017).

El índice de Vulnerabilidad Social (SoVI) se desarrolló siguiendo el método original, elaborado para Estados Unidos, basado en modelo teórico del lugar elaborado por Susan L. Cutter (1996). Dicho índice presenta la ventaja de cuantificar y zonificar variables, que suelen tener un uso cualitativo, a partir de la validación estadística, mediante la conformación de componentes de Vulnerabilidad, que permiten la comprensión de su origen y su desarrollo sobre el territorio.

Para la construcción del indicador SoVI, se utilizaron 31 variables para realizar el modelo, de las cuales 25 son variables base, utilizadas en los 3 impactos urbanos estudiados y 6 variables específicas, que se utilizaron en al menos uno de los impactos. Se recogieron datos a partir de dos fuentes nacionales (**Tabla 8**). La primera, el CENSO 2017 realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE) y, la segunda, la encuesta CASEN 2017, elaborada por el Ministerio de Desarrollo Social (MIDESO, 2018). Considerando estas dos bases de datos, se definió como unidad de análisis espacial la zona censal. Cabe destacar, que el presente estudio de Vulnerabilidad —a pesar de estar basado en la metodología SoVI— es una adaptación para el caso chileno, por tanto, algunas de las variables utilizadas no se encuentran definidas como tal por los autores internacionales; sin embargo, estas variables responden a las dimensiones de la Vulnerabilidad consideradas y validadas en otros estudios, que son citados.

**Tabla 8.** Variables de construcción índice SoVI.

Nº	Variable	Descripción	Fuente	Referencia
1	Porcentaje de viviendas con decil de ingreso per cápita vulnerable	Insuficiencia de ingreso disponible para adquirir alimentos y servicios básicos, teniendo menor capacidad para responder y recuperarse ante una Amenaza natural, necesitando apoyo adicional tras el desastre. Para el cálculo chileno, se consideró la población de los deciles del 1 al 6, respecto al total.	Casen 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
2	Porcentaje de población cesante	Un mayor porcentaje de población cesante, dentro de la comunidad, aumenta los niveles de Vulnerabilidad, debido a la imposibilidad de hacer frente económicamente a la Amenaza, tanto previa como posteriormente, lo que hace más lenta la recuperación.	Censo 2017	Mileti (1999).
3	Porcentaje de mujeres	Las mujeres pueden tener más dificultades de recuperación que los hombres, debido a las diferencias sociales frente al género, que se reflejan en salarios más bajos, menores años de escolaridad y responsabilidades de cuidado familiar.	Censo 2017	Cutter <i>et al.</i> , (1996).
4	Porcentaje de mujeres jefas de hogar	Las mujeres que se dedican al cuidado del hogar y labores domésticas son más vulnerables, debido a que -en el contexto de desastre- cargan con la preocupación de aquellos que dependen de ella (adultos mayores y sus hijos).	Censo 2017	Naranjo y García (2016).
5	Edad media de la población	La edad media de la población permite tener conciencia sobre el tipo de población existente. Una mayor edad media puede indicar un envejecimiento de la población, generando un aumento de la dependencia económica y social.	Censo 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
6	Porcentaje de población menor de 15 años	Un alto porcentaje de población menor a 15 años, resulta en un aumento de los niveles de Vulnerabilidad debido a la dependencia económica, educativa y social que requieren.	Censo 2017	Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich & Zêzere. (2014).
7	Porcentaje de población entre 15 y 65 años	Un alto porcentaje de población activa resulta en una mayor capacidad económica en la comunidad, al poder sostener de mejor manera a la población inactiva como niños y adultos mayores. En términos de habilidad, la población activa concentra una mayor capacidad e independencia para actuar frente a distintas Amenazas. Esta variable es inversa a la Vulnerabilidad.	Censo 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
8	Porcentaje de población mayor de 65 años	Un alto porcentaje de población mayor a 65 años, resulta en un aumento de los niveles de Vulnerabilidad debido a la dependencia económica, física y social que requieren.	Censo 2017	De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).
9	Porcentaje de población inmigrante	La población inmigrante presenta mayor Vulnerabilidad, al no poseer una identidad con el territorio y, por tanto, por no conocer las características que éste presenta, entre ellas, las distintas Amenazas. Además, los migrantes pueden no hablar el idioma y no estar familiarizados con los planes de emergencia y los trámites para obtener información de socorro o recuperación. En esta investigación se considera inmigrante a todas las personas nacidas en el extranjero, con residencia habitual en Chile hace más de 5 años.	Censo 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
10	Porcentaje de viviendas arrendadas	Un alto porcentaje de viviendas arrendadas indica una población con bajas capacidades económicas para la compra de inmuebles propios.	Casen 2017	Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
11	Porcentaje de viviendas irrecuperables (según tipo de vivienda)	El valor, calidad y densidad de la construcción residencial, afectan las pérdidas y el potencial de recuperación. Existe una categoría de viviendas irrecuperables que agrupa a mediaguas o mejora; rancho, choza o ruca; vivienda precaria de materiales reutilizados; móvil (carpa, casa rodante o similar), las que son menos resistentes a los peligros.	Censo 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
12	Porcentaje de viviendas con muros irre recuperables	Aquellos muros compuestos de materiales más frágiles (adobe, barro, lata, cartón, etc.) serán más vulnerables al efecto de la Amenaza natural.	Censo 2017	De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).
13	Porcentaje de viviendas con techo irre recuperable	Aquellos techos compuestos de materiales más frágiles (lata, cartón, plástico, etc.), serán más vulnerables al efecto de la Amenaza.	Censo 2017	De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).
14	Porcentaje de viviendas con piso irre recuperable	Aquellos pisos compuestos de materiales más frágiles (cemento sobre tierra, tierra, etc.), serán más vulnerables al efecto de la Amenaza natural.	Censo 2017	De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).



15	Porcentae de viviendas sin red agua potable	La disponibilidad de agua apta en cantidad y calidad para el consumo humano, es fundamental para responder a las emergencias. Aquellas áreas que no poseen red con conexión de agua potable, pueden requerir ayuda adicional en la etapa de respuesta y recuperación, limitando, entre otros, la atención a enfermos; el consumo humano; condiciones de higiene y actividades comerciales.	Censo 2017	Organización Panamericana de la salud (2006) De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).
16	Porcentae de viviendas sin red de alcantarillado	Porcentajes altos de viviendas sin alcantarillado, dan cuenta de una población con bajo status económico, lo que puede indicar bajas capacidades para hacer frente a una Amenaza.	Casen 2017	Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
17	Porcentae de población mayor de 25 años sin educación básica	Una escolaridad máxima hasta niveles básicos/primarios, se presenta como una situación de alta Vulnerabilidad, debido a las bajas capacidades para recibir y comprender -de manera adecuada- información relevante sobre las Amenazas locales y las diversas acciones que se debieran esperar ante éstas. Se considera la edad de 25 años como un límite cuando la población debiese tener superado este nivel educativo.	Censo 2017	Heinz Center for Science, Economics and the Environment (2000). Cutter, Boruff & Shirley (2003)
18	Porcentae de población analfabeta mayor de 15 años	Una población con altos niveles de analfabetismo en población adulta, sugiere un alto nivel de Vulnerabilidad, ante la incapacidad y dificultad de responder de manera rápida y consciente a las indicaciones de una evacuación, por ejemplo.	Casen 2017	Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
19	Porcentae de población jubilada	Un alto porcentaje de población jubilada supone una gran proporción de adultos mayores, quienes poseen grandes limitaciones para responder a las Amenazas. En contexto de desastre, requieren ayuda social y económica adicional para su recuperación, exacerbando su condición de Vulnerabilidad.	Censo 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
20	Porcentae de población estudiante	La población estudiante se percibe como activa inhabilitada para trabajar, por tanto, un mayor porcentaje de ésta indica un aumento de la Vulnerabilidad en la comunidad, ya que tiene más dependencia económica y social.	Censo 2017	Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
21	Índice de hacinamiento	El índice de hacinamiento permite determinar la cantidad de personas por vivienda y su relación con el número de dormitorios. De esta manera, los altos niveles de hacinamiento indican una población con bajo status económico, que no puede acceder a una vivienda con mayor número de dormitorios o a una vivienda propia y depende de otro hogar dentro de la vivienda.	Censo 2017	Cutter, Boruff & Shirley (2003). De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).
22	Porcentae de población con ocupación en el sector primario y secundario	La economía primaria y secundaria suele ser la más afectada frente a las crisis mundiales y suelen percibir los efectos de las caídas de los precios y, por ende, es más dependiente de los países o zonas que compren. Por tanto, una comunidad con gran dependencia al sector primario versus al secundario y terciario, que brindan mayor independencia económica, la hace más vulnerable a las Amenazas.	Casen 2017	Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
23	Porcentae de población con discapacidad	Pertencen al grupo de población con necesidades especiales, que se puede ver afectado desproporcionadamente durante los desastres, a raíz de su invisibilidad en las comunidades. Las personas con discapacidad física y mental poseen limitaciones de movilidad, para responder y recuperarse de los impactos de la Amenaza.	Casen 2017	Cutter et al., (2003). Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
24	Etnia	La literatura suele indicar a las poblaciones étnicas como vulnerables debido a las disparidades, económicas y sociales, existentes aún en la actualidad.	Censo 2017	Cutter <i>et al.</i> , (2003).
25	Porcentae de población en situación de pobreza multidimensional	La variable se refiere a la población que vive una pobreza no solo económica, sino que en la educación, salud, seguridad, comunidad, y nivel de vida en general.	Casen 2017	Cutter <i>et al.</i> , (2003).
26	Porcentaje de parques y plazas (áreas verdes)	Una mayor superficie de áreas verdes permite un mejor nivel de confort térmico y da mayor capacidad a la población de hacer frente a Amenazas meteorológicas, como temperaturas máximas extremas.	MINVU y SIEDU	Kaźmierczak, & Cavan, (2011).
27	Porcentaje de viviendas que no cuentan con sistema de calefacción	La población que no cuenta con sistemas de calefacción, tiene menos capacidades para hacer frente -en términos económicos y de salud- a las Amenazas meteorológicas, como temperaturas mínimas extremas.	Casen, 2017	Cutter <i>et al.</i> , (2003).



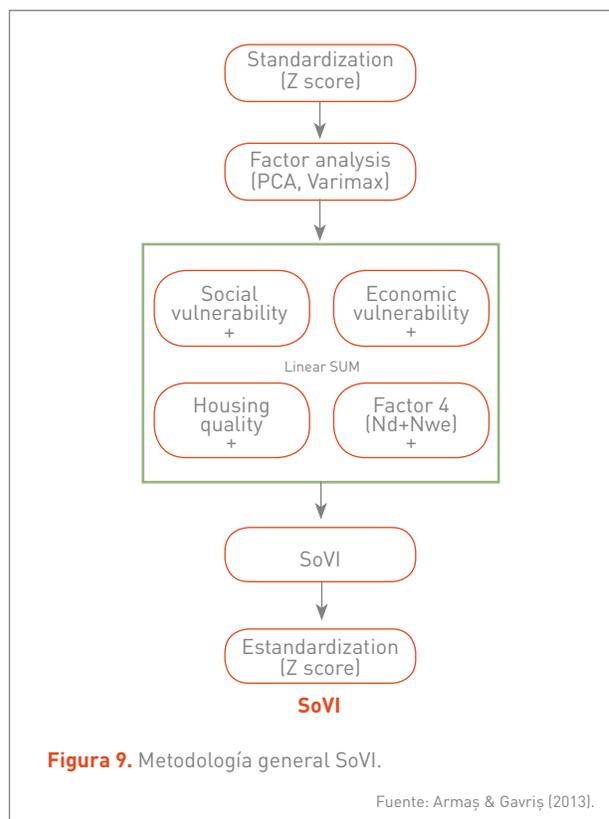
28	Porcentaje de viviendas que no cuentan con sistema de agua caliente	La población que no cuenta con agua caliente en su vivienda, posee menos capacidades para hacer frente -en términos económicos y de salud- a las Amenazas meteorológicas, como temperaturas mínimas extremas.	Casen 2017	Cutter <i>et al.</i> , (2003).
29	Porcentaje de viviendas sin certificación térmica	Las viviendas sin certificación térmica son aquellas construidas previo al año 2007 y, por tanto, no cuentan con las condiciones óptimas de construcción en muros, techo y pisos, para hacer frente a condiciones climáticas. Es importante aclarar que esta norma se refiere a la aislación en las viviendas, pero no para producir una inercia térmica, que correspondería a la pérdida pasiva del cambio de temperaturas. En efecto, las viviendas de adobe, que no están bajo esta norma térmica, tienen mejor inercia térmica, que las nuevas viviendas construidas de sólo hormigón.	Observatorio Urbano MINVU	Cutter <i>et al.</i> , (2003). Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere. (2014).
30	Porcentaje de población en situación de calle	La población en situación de calle se encuentra en una condición de Vulnerabilidad extrema, en distintas dimensiones: social, económica, cultural, educativa, entre otras.	Ministerio de Desarrollo Social, 2020	Cutter, Boruff & Shirley (2003).
31	Número de viviendas en campamento	Un aumento de viviendas en campamentos significa un incremento en la Vulnerabilidad económica y social de la población, por las precarias condiciones de habitabilidad.	MINVU / TECHO	Cutter, Boruff & Shirley (2003). De Loyola Hummell, Cutter & Emrich (2016).

**Tabla 8.** Variables de construcción índice SoVI.

Fuente: Adaptado de Martínez, Cienfuegos, Inzunza, Urrutia & Guerrero (2020), Cutter, Boruff & Shirley (2003).

En cuanto al trabajo metodológico SoVI (**Figura 9**), contempla dos pasos importantes, previos al desarrollo del Análisis de Componentes Principales (PCA). El primero, sugiere la preparación de los datos. Para esto, las variables se transforman a valores porcentuales o de media, con el propósito de hacer comparables las zonas, a pesar de las diferencias en términos de población. En segundo lugar, las variables deben ser estandarizadas en valores Z (Zscore) con media 0 y desviación estándar 1, con el fin de obtener datos en una misma escala. Por ende, SoVI es un modelo relativo al ser medido en desviaciones estándar que dependen de los valores de la media. En consecuencia, el SoVI es representativo sólo para el área analizada y de una manera comparativa entre las unidades analizadas, por ende, cualquier cambio en el área de estudio requiere una nueva realización del modelo.

En cuanto a la conformación de los componentes o factores de la Vulnerabilidad, estos se obtuvieron a través del Análisis de Componentes Principales (PCA), mediante el uso del *software* estadístico SPSS. Se utilizó el criterio de



**Figura 9.** Metodología general SoVI.

Fuente: Armaş & Gavriş (2013).

Eigenvalue > 1, para que el modelo considerará como componentes aquellos que abarcaran más de una variable; a su vez, se utilizó una rotación Varimax, que permite un ajuste más estricto de los componentes, favoreciendo una mejor comprensión del usuario para su interpretación.

De esta manera, el valor final de SoVI se obtuvo de la sumatoria lineal de los componentes obtenidos para cada unidad de análisis. Mientras que, para la obtención de los valores por ciudad, se obtuvo el promedio de cada componente para cada ciudad; y luego se realizó la sumatoria lineal.

Finalmente, para la representación espacial de la Vulnerabilidad social se utilizó el *software* ArcGIS desktop, en el que se clasificó la variable SoVI, en rangos de desviación estándar asociados a una escala de 5 niveles de Vulnerabilidad, para la que los valores más bajos están asociadas a una baja Vulnerabilidad y viceversa para los altos. La **Tabla 9**, muestra las Variables de construcción índice SoVI. El modelo aplicado, está basado en el método realizado en Portugal e Italia (Frigerio & De Amicis, 2016; Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere, 2014).

Nivel de Vulnerabilidad	Rango de desviación estándar ( $\sigma$ )
Muy baja	< - 1,5
Baja	<b>-1,5 &gt; -0,5</b>
Media	-0,5 > 0,5
Alta	0,5 > 1,5
Muy alta	> 1,5

**Tabla 9.** Niveles de Vulnerabilidad (SoVI).

Fuente: Frigerio & De Amicis, 2016; Guillard-Gonçalves, Cutter, Emrich, & Zêzere (2014).

## 3.4 AMENAZAS PRESENTES Y FUTURAS

### 3.4.1 INTENSIDAD DE ISLAS DE CALOR URBANA

Para evaluar el impacto de la intensidad de Isla de Calor Urbana (ICU), se utiliza una fórmula que relaciona su intensidad máxima, con la cantidad población urbana y la velocidad del viento (Oke, 1987). El método supone que el tamaño de la ciudad puede ser sustituido por la relación logarítmica de la población (P). En el caso "ideal" de vientos tranquilos y cielos despejados, la máxima ICU está muy correlacionada con el log P de varias localidades norteamericanas y europeas. Oke ha observado que incluso pequeños pueblos (población de 1.000 habitantes), tienen una Isla de Calor, donde los centros comerciales y pequeños grupos de edificios son más cálidos que sus alrededores. Por el otro extremo, se ha observado que la máxima ICU es de 12°C, entre la temperatura de la ciudad y el entorno.

De esta forma, se ha optado por usar este método, debido a que no hay registros empíricos ni estimaciones comparables para todas las ciudades y, además, permite estimar la proyección futura. La ecuación formulada por Oke, es la siguiente:

$$\Delta T_{u-r} = \frac{P^{0,27}}{4 * (\bar{u})^{0,56}}$$

Donde,

- $\Delta T_{u-r}$  es la diferencia máxima de temperatura entre el campo y ciudad en grados Celsius,
- P es la población urbana, y
- $\bar{u}$  es la velocidad del viento en m/s a una altura de 10 metros en un área no urbana.

Esta fórmula fue ideada para el atardecer con cielos despejados. Obviamente, con fuertes vientos urbano/rurales la diferencia termal disminuye (Oke, 1987).



La población urbana se obtiene de los registros censales, en este caso del Censo de Población y Vivienda, realizado por el Instituto Nacional de Estadística (INE). Para el caso de la superficie proyectada al 2065, se utilizó el método descrito en el punto 3.2.3 de la metodología, año coincidente con los escenarios climáticos del Atlas. Mientras que la velocidad del viento, se obtuvo de los registros meteorológicos para los escenarios presentes y futuros de Meteodata, para los meses de diciembre, enero y febrero. El punto no urbano y urbano se han seleccionado mediante los siguientes criterios (propuestos por el proyecto Fondecyt Iniciación N° 11180990, 2018-2021):

- a. El punto urbano corresponde a la zona más cálida, de acuerdo con la temperatura de emisión superficial nocturna, promedio de verano, calculada sobre las imágenes satelitales Modis nocturna (0:00 hrs) disponibles para la citada estación, entre los años 2008 y 2018.
- b. El punto rural se determina considerando el punto urbano definido, y se encuentre:
  - En la misma zona climática de Koppen (Sarricolea et al, 2017)
  - Distancia de cursos y cuerpos de agua equivalente
  - Distancia a la costa equivalente (ciudades costeras)
  - Diferencia no mayor a 200 metros en altitud
  - Cumplir con el contexto rural que rodea a la ciudad
  - Que el punto de estudio no se encuentre en un fondo de quebrada o humedal
  - Que se mantenga en área rural según escenario de modelación 2065
  - Ciudades conurbadas pueden tener el mismo punto

Para el caso de la ICU futura, se consideró el efecto de cambio climático sumando al valor estimado de la ICU al año 2065, también, el cambio de la variable temperatura máxima diaria promedio —para la serie presente y el escenario futuro— para cada ciudad, en los meses de diciembre, enero y febrero, proporcionada por Meteodata. Para ello se usó la siguiente fórmula:

$$\Delta TCC_{u-r} = \frac{P^{0,27}}{4 * (\bar{u})^{0,56}} + \Delta TXX$$

Donde,

- $\Delta TCC_{u-r}$  es la diferencia máxima de temperatura entre el campo y ciudad en grados Celsius, incluyendo el efecto de cambio climático
- P es la población urbana
- $\bar{u}$  es la velocidad del viento en m/s a una altura de 10 metros en un área no urbana
- $\Delta TXX$  es la diferencia de temperatura máxima diaria promedio, futura, menos la temperatura máxima diaria promedio presente en grados Celsius. Representa el efecto de cambio climático.

### 3.4.2 DISCONFORT TÉRMICO AMBIENTAL

Existen distintos indicadores para el cálculo del confort térmico ambiental, basados en datos instrumentales y algunos incorporan información de los individuos, como datos del nivel de arropamiento, relacionado con la vestimenta o la actividad metabólica. Entre los primeros, la mayoría se basa en datos de temperatura y humedad relativa del aire y, en una menor proporción, incorporan velocidad del viento y radiación solar. En este caso, se ha seleccionado un índice de confort térmico ambiental, que incorpora datos de temperatura del aire y humedad relativa del aire, ampliamente utilizado para la medición en espacios abiertos.

El índice de calor Humidex (WSE, 2009), formulado por el Servicio Meteorológico del Ambiente de Canadá, representa el confort térmico ambiental proporcionado por los espacios abiertos, que podría afectar el efecto de calentamiento que perciben las personas, debido a la falta de evaporación de la humedad corporal, dando una señal de agobio o bochorno. El índice se utiliza en verano.

El Humidex se define como:

$$HUMIDEX = T + \frac{5}{9} * (e - 10)$$

Donde,

- $e$  es la presión de vapor ( $6,112 * 10^{(7,5 * T / (T + 237,7))} * (H/100)$ )
- $T$  es la temperatura del aire (° C)
- $H$  la humedad (%).

El calor produce un grado de estrés personal, que puede variar en función de la edad y las condiciones físicas, es

tado de salud, actividad, etc. de cada individuo. Los rangos de peligro, escalas de Humidex y posibles síntomas, se detallan en la **Tabla 10**.

Siguiendo la propuesta de Ruiz y Correa (2009), el índice se clasificó en siete categorías.

Humidex	Estado	Posibles síntomas
20 - 29	Confortable	Ligera incomodidad. Posible fatiga en exposiciones prolongadas o en actividades físicas.
30 - 39	Algún disconfort	Incomodidad creciente. Posible golpe de calor o agotamiento producido al realizar actividad física o por la simple Exposición a aire libre.
40 -45	Gran disconfort	Golpe de calor probable en una Exposición continuada o en actividades físicas. Evitar esfuerzos. Buscar una zona más fresca.
> 45	Peligro	Golpe de calor inminente en Exposición continuada.

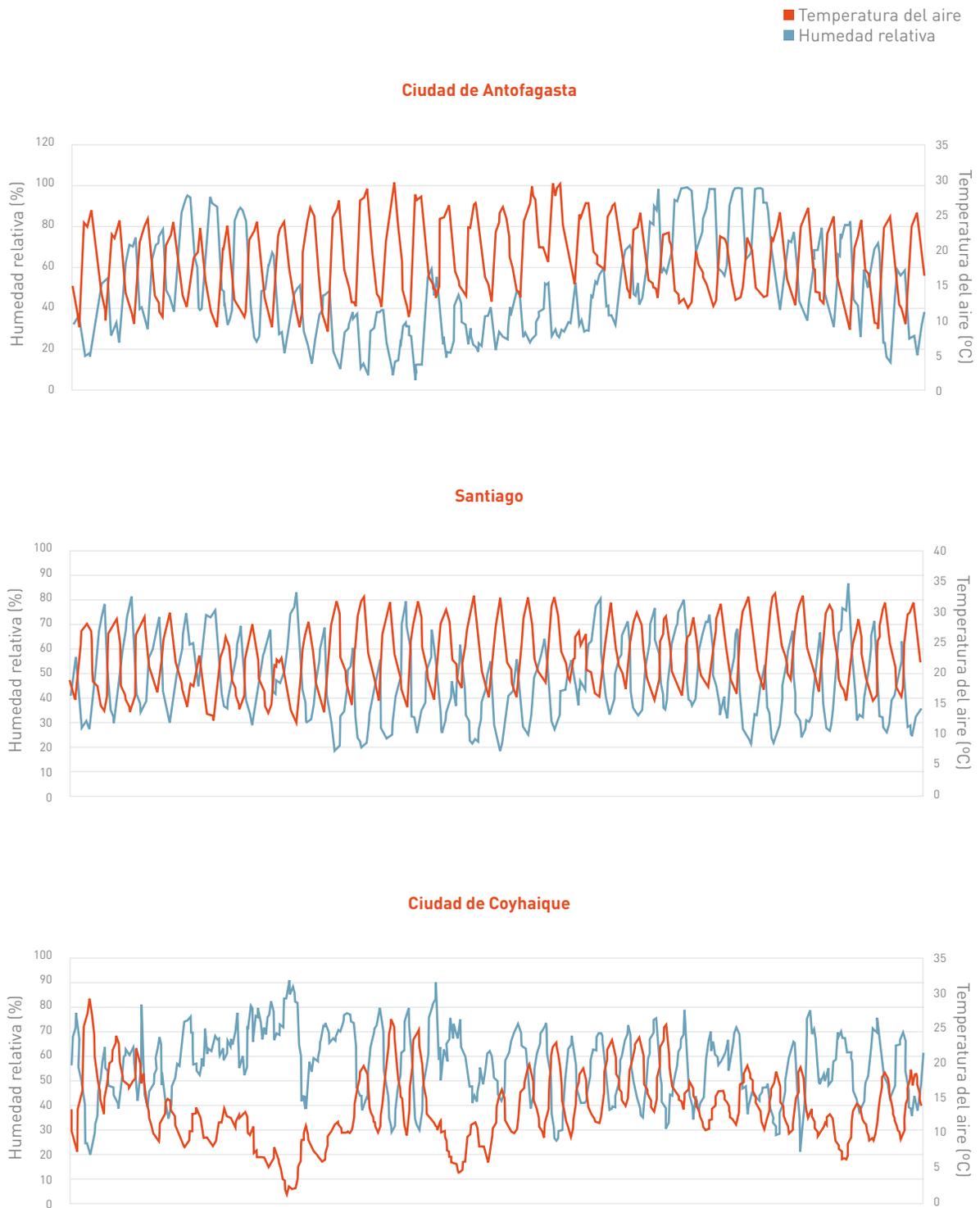
**Tabla 10.** Humidex - Índice de estrés producido por el calor.

Fuente: Modificado de Luján Bustos y Piccolo (2011) en García (2019).

El índice fue calculado con datos de un punto representativo de cada ciudad, que corresponde al centro de mayor temperatura de la superficie urbana, obtenido a partir del promedio de las imágenes MODIS nocturna (0:00 hrs en Chile) de verano, disponibles entre los años 2008 y 2018 (reescalada a 200 metros de resolución espacial).

Respecto de los datos propiamente tales, se llevó a cabo el cálculo del confort térmico ambiental, para los datos promedio de verano, y del mes más cálido (enero), consi-

derando -en ambos casos- la condición máxima definida a partir del dato de temperatura máxima diaria, que se relaciona con el dato de humedad relativa mínima diaria, debido a la relación inversa entre de ambos parámetros, donde al subir el valor de uno, el valor del otro disminuye y viceversa, como se observa en la **Figura 10** que incluye los datos de enero 2020, de las ciudades de Antofagasta, Santiago y Coyhaique, como ejemplo. Para la espacialización y el cálculo del valor de Riesgo, se consideraron los datos del mes de enero, tanto en el escenario actual y el futuro.



**Figura 10.** Relación entre humedad relativa y temperatura del aire horarias en la ciudad de Antofagasta, Santiago y Coyhaique.

Fuente: Sistema de información de calidad del aire (SINCA).

### 3.4.3 HELADAS

Para evaluar el frío extremo de la ciudad, se reconocen cuatro tipos de índices climáticos (Alexander *et al.*, 2006):

- **Índices basados en percentiles de temperatura:** muestrean los deciles más fríos para temperatura máxima y mínima, como ocurrencia de días fríos (TN10p) o noches frías (TX10p), respectivamente.
- **Índices absolutos:** representan valores máximos o mínimos dentro de un período, como, por ejemplo, temperatura mínima diaria promedio anual (TNN).
- **Índices de umbral:** se definen como el número de días en que la temperatura se encuentra por encima o por debajo de un umbral fijo, como, por ejemplo, el total anual de días con heladas (FD) o de días de hielo (ID) (Frich *et al.*, 2002; Kiktev *et al.*, 2003).
- **Índices de duración:** definen períodos de exceso de frío, como, por ejemplo, el indicador de duración de la ola de frío (CSDI).

Para evaluar el frío extremo en las ciudades chilenas, se usó el Índice de Umbral FD0. Este se define como el promedio de la suma total al año, de los días donde se registra descenso térmico igual o inferior a 0°C [Cuarto Reporte del Estado del Medioambiente], denominados días con heladas (FD0).

Los cambios en estos índices pueden tener profundos impactos en la ciudad, tanto en el subsistema construido (Edificaciones), como en los espacios públicos exteriores. La ocurrencia de heladas se relaciona con efectos sobre la salud y bienestar de la población.

En este documento se considera el promedio de las heladas de invierno (junio-julio-agosto), ya que es el período del año en que más comúnmente se concentran, aun cuando puedan reconocerse heladas tempranas (otoño) y tardías (primavera).

Los datos utilizados fueron calculados por Meteodata y corresponden a un punto representativo de cada ciudad, para el presente y el escenario futuro, que coincide con el punto urbano definido para la ICU, de acuerdo con el método descrito en la sección 3.4.1 (a) del presente informe.

### 3.5 MAPA DE RIESGOS

Los Riesgos de islas de calor, Disconfort Térmico y heladas, se han determinado sumando los tres factores de Exposición, Vulnerabilidad y Amenaza, normalizados en una escala de 0-1, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$R_i = \frac{(E + V + A)}{3}$$

Donde,

- $R_i$ : índice de Riesgo climático
- $E$ : indicador normalizado de Exposición
- $V$ : indicador normalizado de Vulnerabilidad
- $A$ : indicador normalizado de Amenaza

Para la normalización de los factores, se ha usado la siguiente fórmula:

$$R_{sup} = \frac{P_{max} - P_{med}}{X_{max} - \underline{x}}$$

$$R_{inf} = \frac{P_{max} - P_{med}}{\underline{x} - X_{min}}$$

$$P_i = \{X_i \geq \underline{x} \rightarrow P_{med} + (X_i - \underline{x}) x R_{sup} X_i < \underline{x} \rightarrow P_{min} + (X_i - X_{min}) x R_{inf}$$

Donde,

- $R_{sup}$ : razón de puntaje que se asigna a cada unidad de  $X$  sobre el promedio
- $R_{inf}$ : razón de puntaje que se asigna a cada unidad de  $X$  bajo el promedio
- $P_i$ : puntaje a calcular (función condicional de asignación de puntaje)
- $X_i$ : valor de la observación  $i$  de la variable: Promedio de la variable original
- $P_{med}$ : valor del puntaje asignado al promedio
- $P_{min}$ : valor del puntaje asignado al valor mínimo de la variable
- $P_{max}$ : valor del puntaje asignado al valor máximo de la variable
- $X_{min}$ : valor mínimo de la variable
- $X_{max}$ : valor máximo de la variable



Para el proceso de normalización, se usaron —como parámetros de transformación— las medias, mínimas y máximas, de cada factor, de acuerdo con la distribución de los datos de cada uno, tanto presentes como futuros, considerando todas las ciudades en estudio. La **Tabla 11** muestra los parámetros de referencia, para la normalización de cada factor.

Una vez normalizados, los factores se clasificaron en cinco categorías de Riesgo: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto, los que se representaron mediante cartografía puntual. Para los rangos, se usó el criterio estadístico de quiebre natural, para representar de la mejor forma la distribución de los datos. El cambio neto entre Riesgo presente y futuro se realizó mediante resta entre estos dos periodos. De esta

forma, se pueden visualizar tres categorías de cambio: bajo, medio y alto, más una categoría no aplica, para las ciudades donde no hay valor de Amenaza, por ejemplo, aquellas que se encuentran en situación de confort térmico presente y futuro. Para el caso del impacto de Heladas, se clasificó como: positivo, negativo y no aplica para las ciudades que no registran temperaturas bajo 0 °C.

El escenario presente se entiende como el período entre 1980 al 2010 y el escenario futuro, desde el 2035 al año 2065.

En términos cartográficos y de bases de datos espacial, se trabajó con el SIG ArcGIS 10.8. Los datos espaciales fueron almacenados en una *geodatabase*.

<b>a) Isla de Calor Urbana (ICU)</b>						
Parámetros	Exposición presente (Pob)	Exposición futura (Pob)	Vulnerabilidad presente (SoVI)	Vulnerabilidad futura (SoVI)	Amenaza ICU presente (°C)	Amenaza ICU futuro (°C)
P <sub>MED</sub>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
P <sub>MIN</sub>	0	0	0	0	0	0
P <sub>MAX</sub>	1	1	1	1	1	1
X	407.580,47	407.580,47	1,62	1,62	3,73	3,73
X <sub>MIN</sub>	7.163,00	7.163,00	-0,88	-0,88	0,64	2,05
X <sub>MAX</sub>	6.903.681,00	6.903.681,00	4,46	4,46	10,89	10,89
R <sub>SUP</sub>	0,00	0,00	0,18	0,18	0,07	0,07
R <sub>INF</sub>	0,00	0,00	0,20	0,20	0,16	0,30
Fuente: Elaboración propia						
<b>b) Disconfort Térmico Ambiental</b>						
Parámetros	Exposición presente (Pob)	Exposición futura (Pob)	Vulnerabilidad presente (SoVI)	Vulnerabilidad futura (SoVI)	Amenaza Humidex presente	Amenaza Humidex futuro
P <sub>MED</sub>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
P <sub>MIN</sub>	0	0	0	0	0	0
P <sub>MAX</sub>	1	1	1	1	1	1
X	17,53	17,53	1,22	1,22	31,75	31,75
X <sub>MIN</sub>	13,36	13,36	-2,33	-2,33	17,87	15,12
X <sub>MAX</sub>	21,06	21,06	5,15	5,15	38,54	38,54
R <sub>SUP</sub>	0,14	0,14	0,13	0,13	0,07	0,07
R <sub>INF</sub>	0,12	0,12	0,14	0,14	0,04	0,03
Fuente: Elaboración propia						
<b>c) Heladas</b>						
Parámetros	Exposición presente (Pob)	Exposición futura (Pob)	Vulnerabilidad presente (SoVI)	Vulnerabilidad futura (SoVI)	Amenaza helada presente (FDO)	Amenaza helada futuro (FDO)
P <sub>MED</sub>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
P <sub>MIN</sub>	0	0	0	0	0	0
P <sub>MAX</sub>	1	1	1	1	1	1
X	407.580,47	407.580,47	0,73	0,73	8,60	8,60
X <sub>MIN</sub>	7.163,00	7.163,00	-2,28	-2,28	0,00	0,00
X <sub>MAX</sub>	6.903.681,00	6.903.681,00	4,16	4,16	73,18	73,18
R <sub>SUP</sub>	0,00	0,00	0,15	0,15	0,01	0,01
R <sub>INF</sub>	0,00	0,00	0,17	0,17	0,06	0,06
Fuente: Elaboración propia						

**Tabla 11.** Valores utilizados para la normalización de los factores de Riesgo.





# 4

# RESUL- TADOS

## 4.1 ISLAS DE CALOR URBANA – ICU

---

La urbanización tiene un importante impacto sobre el clima local y, a la vez, éste sobre la ciudad. Debido a la construcción de edificios, caminos y otras superficies impermeables y no evapotranspirantes, tales como el metal, asfalto y concreto, las áreas urbanas tienen, generalmente, una alta absorción de la radiación solar y una alta capacidad termal y de conductividad. Así, el calor es almacenado durante el día y emitido en la noche. Por consiguiente, las áreas urbanas tienden a experimentar temperaturas relativamente más altas que las áreas rurales circundantes (**Figura 11**). Esta diferencia termal, en conjunto con el tráfico vehicular y la actividad industrial, contribuye al desarrollo del fenómeno de islas de calor urbana (ICU). Las diferencias de temperatura entre las áreas rurales y urbanas son usualmente moderadas, con promedios menores a 1 °C, pero -ocasionalmente- la temperatura se eleva varios grados, cuando las condiciones urbanas, topográficas y meteorológicas son favorables para el desarrollo de la ICU (Gartland, 2008; Oke, 1987). Otros estudios sugieren que el microclima urbano es muy

variable en todas las ciudades, con diferencias de hasta 10 °C, entre los lugares más fríos y más cálidos al mismo tiempo, y que estas temperaturas del aire dependen, principalmente, de las características del paisaje subyacente (Shandas *et al.*, 2019). Tales diferencias a menudo no son perceptibles en el día, pero se evidencian rápidamente dos o tres horas después de la puesta de sol y, especialmente, en la estación primaveral y estival. La magnitud y tamaño de las islas de calor, humedad y ventilación dependen del tamaño de la ciudad y, por ello, del volumen de población concentrada espacialmente (Henríquez, 2019; Henríquez & Romero, 2019; Martín-Vide, 2017).

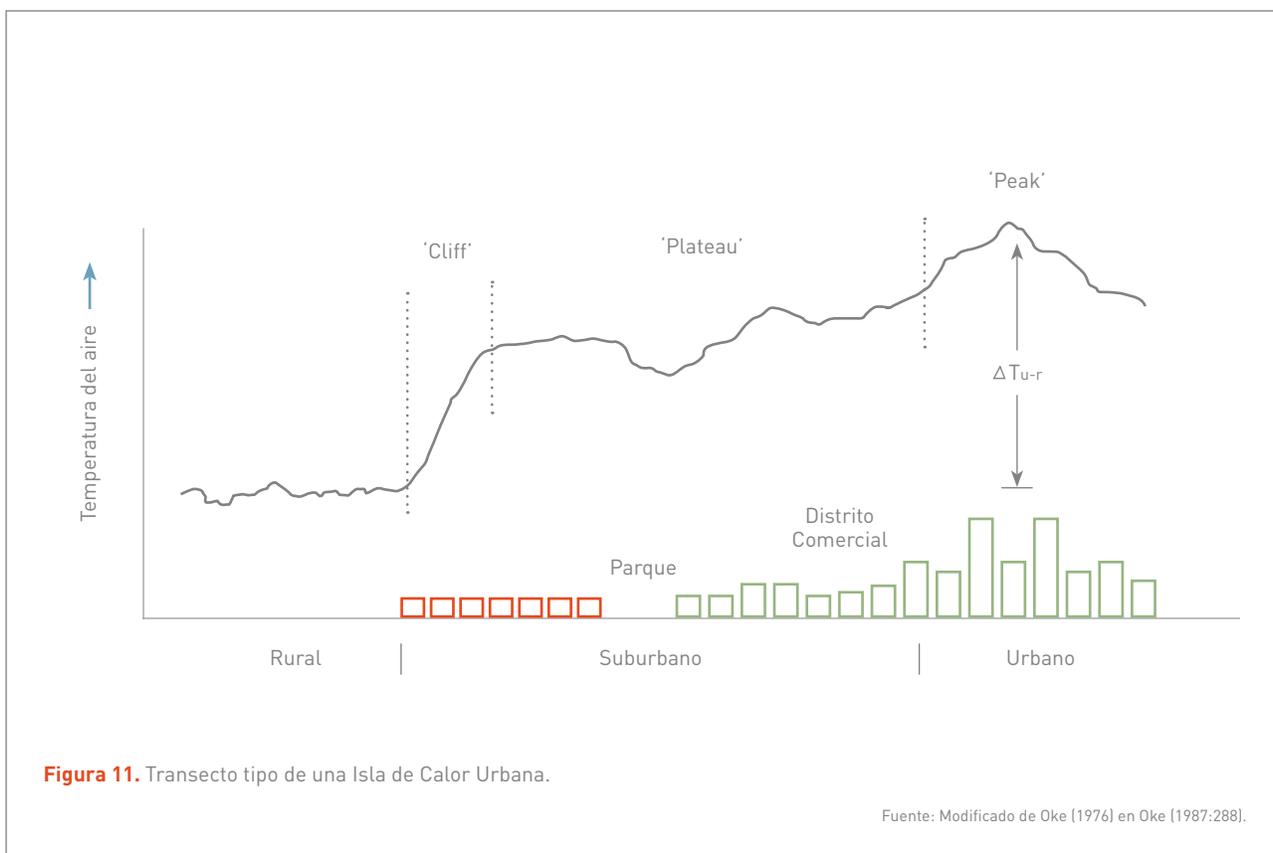
Las consecuencias asociadas a la ICU son de diversa índole; como el florecimiento temprano de la vegetación urbana; la formación de ozono troposférico; el aumento de días con polución atmosférica (Sukopp, 1998) y la alteración del confort bioclimático. Además, las quemadas agrícolas que circundan la ciudad, producen humo y material particulado en suspensión, que son atraídos por la presencia de la ICU, por su relación con centros de baja presión, asociados a un mayor calor (Romero *et al.* 2003). También son atraídas las emisiones de monóxido de carbono (CO) y otras del parque

automotor; especialmente de la locomoción colectiva, por los focos de mayor temperatura en la ciudad. Del mismo modo, la emisión de gases contaminantes de las industrias intra y extraurbanas, junto con la existencia de calles sin pavimentar y la congestión vehicular en horas punta, contribuyen a la contaminación del aire, especialmente en áreas donde la intensidad de la Isla de Calor Urbana es más significativa (Henríquez, 2014).

En esta cadena impacto, es importante destacar la estrecha relación entre la ICU y la cantidad de áreas verdes, especialmente la presencia de árboles que -por el proceso de evapotranspiración, sombra y retención de humedad- inciden en la disminución de las temperaturas (Ochoa de la Torre, 2009; Smith y Andrade, 2013; Smith y Romero, 2016). También hay una relación de la ICU y la eficiencia energética de edificios y el malestar residencial asociado al calor. Para combatir este fenómeno, se usan sistemas de enfriamiento del aire (aire acondicionado), el que se puede considerar como una medida de mala adaptación al cambio climático; sin embargo, la mayor parte de las

viviendas no disponen de estos sistemas, especialmente aquellas precarias y en barrios sin áreas verdes, como son los campamentos. Los efectos indirectos de ésta se sienten fundamentalmente en la población infantil y anciana, a través de una mayor sensación de malestar, disminución de la calidad de vida e incluso enfermedades respiratorias, en los meses estivales, cuando se producen los episodios de ICU más intensos.

Romero *et al.* (2003) han reportado la existencia de varias islas de calor urbanas en Santiago y otras ciudades medias chilenas, configurando una estructura de archipiélagos de calor urbanos (ACU), los que facilitan la convergencia de plumas de contaminación hacia los sectores más cálidos, normalmente el centro de la ciudad u otros con alta concentración de actividades. Dichos estudios, basados en el análisis de imágenes satelitales, señalan con nitidez la relevancia del número, magnitud y forma de los archipiélagos de calor urbanos, en la configuración térmica de la ciudad, los que dependen de varios factores, tales como: el uso de suelo, diseño de calles y edificios, altura de edificios, los





materiales superficiales y, especialmente, la distribución de parques y áreas verdes (islas de frío urbanas).

Del mismo modo, se han observado efectos positivos de la Isla de Calor Urbana y archipiélago de calor urbano en invierno, en términos de confort bioclimático, especialmente los días de más bajas temperaturas. Sin embargo, en verano -durante los días más calurosos- sus efectos son claramente perjudiciales (Whitford *et al.*, 2001). Este impacto se centra en los meses de mayor calor y cómo aumentará con el cambio climático, considerando la variación de las tem-

peraturas máximas diarias. Las islas de calor en sí mismas no son productos del cambio climático, pero pueden verse aumentadas considerablemente por éste.

#### 4.1.1 EXPOSICIÓN

A continuación, se presenta el listado de ciudades analizadas, según región, comuna y población total, para los censos de 1992, 2002 y 2017, valores correspondientes a la Exposición frente a la Isla de Calor Urbana.

**Tabla 12.** Exposición presente y futura de la población urbana.

Nombre Ciudad (Id)	Nombre Comuna	Total Población 1992	Total Población 2002	Total Población 2017	Total Población 2065
Gran Santiago (SAN)	Provincia de Santiago, Puente Alto, Pirque, San José de Maipo, Lampa, San Bernardo y Padre Hurtado	4.295.593	5.428.590	6.139.087	6.903.681
Gran Valparaíso (VAL)	Valparaíso, Viña del Mar, Concón, Quilpué y Villa Alemana	750.713	803.683	896.528	982.832
Gran Concepción (CON)	Concepción, Talcah. Penco, Hualpén, Chiguayante, Coronel y San Pedro de la Paz	610.380	666.381	719.944	801.687
La Serena-Coquimbo (LSC)	La Serena y Coquimbo	220.172	296.253	399.450	657.577
Antofagasta (ANT)	Antofagasta	225.316	285.255	348.517	460.882
Iquique-Alto Hospicio (IQU)	Iquique y Alto Hospicio	150.659	214.586	293.068	357.561
Rancagua - Machali - Gultro - Los Lirios (RAN)	Rancagua, Machalí, Olivar y Requínoa	204.119	239.290	290.029	512.490
Temuco-P. Las Casas (TEM)	Temuco y Padre Las Casas	210.587	260.783	277.529	318.179
Talca-Culenar (TAC)	Talca y Maule	159.861	189.722	236.347	386.175
Arica (ARI)	Arica	161.333	175.441	202.131	231.549
Puerto Montt (PUM)	Puerto Montt	110.139	153.118	169.736	218.104
Chillán (CHI)	Chillán	145.759	146.701	164.270	196.135
Calama (CAL)	Calama	106.970	126.135	157.575	255.683
Copiapó (COP)	Copiapó	98.188	125.983	150.804	196.788



Valdivia (VAD)	Valdivia	112.712	122.750	150.048	224.555
Quil.-La Calera- Hij.-La Cruz (QLL)	Quillota, La Calera, Hijuelas y La Cruz	113.308	128.874	149.159	260.235
Osorno (OSO)	Osorno	114.239	132.245	147.666	164.494
Los Ángeles (LAS)	Los Ángeles	94.716	117.972	143.023	160.066
Curicó (CUR)	Curicó	77.733	93.447	125.275	214.167
Punta Arenas (PUN)	Punta Arenas	109.110	116.005	123.403	135.661
San Ant.-Cart.- L. Cruces-Sto. Dom. (SAT)	Cartagena y San Antonio	89.209	106.101	118.668	155.391
Colina (COL)	COLINA	52.769	58.769	88.858	266.399
Peñaflor (PEN)	PEÑAFLOR	79.520	63.209	82.959	93.700
Ovalle (OVA)	Ovalle	53.515	66.405	75.864	100.612
Linares (LIN)	Linares	59.658	65.133	73.602	134.453
Melipilla (MEL)	Melipilla	45.722	53.522	72.212	187.157
Los Andes-Calle Larga (LOA)	Los Andes y Calle Larga	48.573	60.093	69.041	149.416
Buín (BUI)	Buín	33.059	40.091	65.607	100.163
San Felipe, V. Los Almend., Sta. María (SFE)	San Felipe	49.793	59.801	64.543	207.266
San Fernando (SAF)	San Fernando	42.684	49.519	58.367	113.788
Talagante (TAL)	Talagante	37.198	49.957	56.878	111.069
Limache – Olmué (LIM)	Limache y Olmué	37.995	45.327	50.998	128.182
Coyhaique (COY)	Coyhaique	36.376	44.850	49.667	95.751
Hanga Roa (HAN)	Isla de Pascua	2.686	3.304	7.163	15.608

Fuente: Modificado de Luján Bustos y Piccolo (2011) en García (2019).

Se observa que la ciudad con mayor Exposición ante la ICU, es la gran metrópoli de Santiago, con una población mayor a 6 millones de personas. Luego, siguen las conurbaciones de Gran Valparaíso y Gran Concepción, con una población mayor a los 700.000 habitantes. El resto de las ciudades corresponde a lo que se entiende como ciudades intermedias, con población superior a 50 mil habitantes, excepto Coyhaique, que tiene una cifra levemente menor, pero corresponde a un capital regional y la localidad de

Hanga Roa, en Isla de Pascua, con una población sobre los 7 mil habitantes.

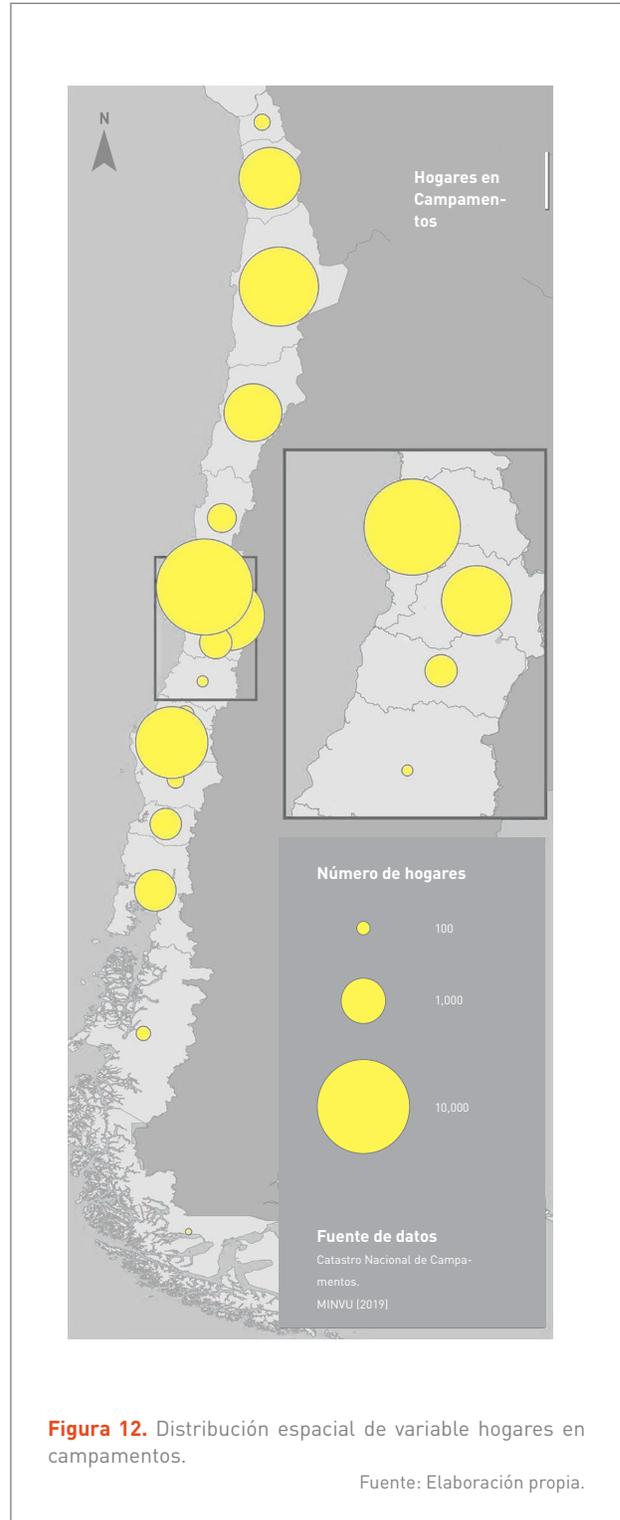
Para la Exposición futura, los valores de Exposición siguen la misma tendencia de los valores presentes, destacando las ciudades de Iquique, Rancagua, Talca y Temuco con población proyectada por sobre los 300 mil habitantes (**Tabla 12**).

## 4.1.2 VULNERABILIDAD

Para el cálculo de la Vulnerabilidad social frente a la Amenaza de islas de calor urbanas (ICU) se trabajó con el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI), explicado en el punto 3.3. La construcción de SoVI para la ICU, se realizó a partir de las 25 variables base más la variable “Número de viviendas en campamentos” (Fila N°31, ver **Tabla 8**). Se utilizó esta variable debido a que los campamentos están conformados por viviendas irregulares, que no cuentan con una buena materialidad, que les permita aislar las altas y bajas temperaturas y, tampoco, con sistemas de ventilación o acondicionamiento, por tanto, este tipo de viviendas son las que se encuentran más vulnerables a sufrir debido a las altas temperaturas, generadas por las islas de calor urbano en el verano.

Esta variable fue obtenida a partir de los datos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), el que define como campamento a aquellos asentamientos precarios de ocho o más hogares, que habitan en posesión irregular un terreno, con carencia de al menos uno de los tres servicios básicos (electricidad, agua potable y sistema de alcantarillado), y cuyas viviendas conforman una unidad socio territorial definida (MINVU, 2019). Para su inclusión dentro del modelo, se hizo una exploración previa de los datos, donde se obtuvo la distribución geográfica que se observa en la **Tabla 14**.

A partir de esto, se determinó que la Región de Valparaíso cuenta con el mayor número de campamentos, concentrando el 22% del total nacional (181 campamentos), siendo también la región que reúne el mayor número de hogares, en estos sitios, con el 24% del nivel nacional (11.228 hogares). Por su parte, la Región del Biobío con 131 campamentos, sigue a Valparaíso, alcanzando el 16% del total nacional; mientras que, Antofagasta con 7.641 hogares en campamentos, se encuentra en el segundo lugar nacional concentrando un 16% del país. Por el contrario, la Región de Magallanes registra tan solo 1 campamento, alcanzando solo el 0,12% del total nacional y, también, el menor número de hogares en campamento del país, con 53 hogares correspondiente al 0,11% del total nacional.



A partir del SoVI para Islas de Calor, se obtuvieron 7 factores que explican el 70,8% de la Vulnerabilidad social de las ciudades analizadas (**Tabla 13**). Mientras que se obtuvieron los siguientes niveles de Vulnerabilidad para cada ciudad (**Tabla 14**).



Factores	Carga (%)	Nombre componentes SoVI ICU
Factor 1	15,1%	Pobreza multidimensional
Factor 2	14,9%	Concentración de población dependiente
Factor 3	11,3%	Grupos vulnerables (migrantes, jefas de hogar, cesantes)
Factor 4	9,5%	Calidad de vivienda y campamentos
Factor 5	7,4%	Calidad de vivienda y acceso a servicios básicos
Factor 6	6,6%	Nivel de educación y hacinamiento
Factor 7	5,8%	Acceso a vivienda propia con servicios básicos
<b>Varianza total de componentes</b>	<b>70,8%</b>	

**Tabla 13.** Matriz de componentes principales para SOVI de Islas de Calor Urbana.

Fuente: Elaboración propia.

Ciudad	SOVI ICU	Z SOVI ICU	Nivel de Vulnerabilidad	Ciudad	SOVI ICU	Z SOVI ICU	Nivel de Vulnerabilidad
Antofagasta	-0,88	-1,95	Muy baja	Curicó	1,89	0,21	Media
Gran Santiago	-0,87	-1,94	Muy baja	Osorno	1,90	0,21	Media
Gran Valparaíso	-0,44	-1,61	Muy baja	Buín	1,94	0,24	Media
Gran Concepción	-0,36	-1,54	Muy baja	Peñaflor	2,00	0,29	Media
Punta Arenas	0,04	-1,23	Baja	Hanga Roa	2,26	0,49	Media
Temuco -Padre Las Casas	0,24	-1,08	Baja	Puerto Montt	2,27	0,50	Alta
Valdivia	0,55	-0,84	Baja	San Felipe, V. Los Almend., Sta. María	2,31	0,54	Alta
Chillán - Chillán Viejo	0,74	-0,69	Baja	San Fernando	2,52	0,70	Alta
Iquique - Alto Hospicio	0,78	-0,66	Baja	Colina	2,55	0,72	Alta
Talca - Culenar	0,88	-0,58	Baja	Ovalle	2,63	0,78	Alta
Copiapó	0,93	-0,54	Baja	Limache - Olmué	2,88	0,98	Alta
Coyhaique	1,06	-0,44	Media	Linares	2,88	0,98	Alta
Calama	1,21	-0,32	Media	Los Ángeles	2,93	1,02	Alta
La Serena - Coquimbo	1,44	-0,15	Media	Talagante	3,16	1,20	Alta
Quil.- La Calera- Hij.- La Cruz	1,45	-0,14	Media	San Ant.- Cart.- L. Cruces-Sto. Dom	3,19	1,22	Alta
Arica	1,58	-0,03	Media	Los Andes- Calle Larga	3,38	1,37	Alta
Rancagua	1,70	0,06	Media	Melipilla	4,46	2,21	Muy Alta

**Tabla 14.** Valores de SoVI de Islas de Calor Urbana.

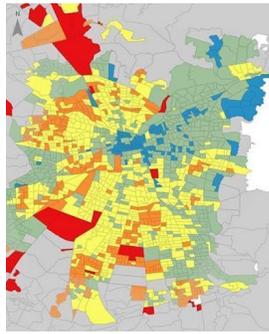
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados, se obtuvieron datos a nivel de zona censal y también para las ciudades estudiadas, los que se zonificaron siguiendo la clasificación expuesta en la **Tabla 9**, logrando los resultados expuestos en la **Figura 13**.

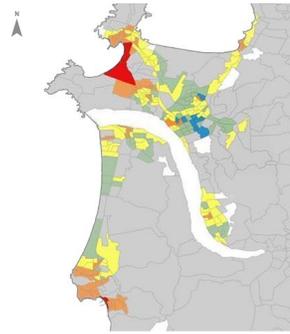
A partir de los resultados expuestos, se determinó que Melipilla es la ciudad con mayor Vulnerabilidad frente a Islas de Calor Urbano, con un valor de 2,21. Mientras que la ciudad menos vulnerable fue Antofagasta, con un valor de -1,95.



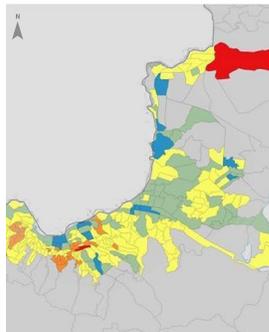
### Vulnerabilidad Social para Islas de Calor Urbano



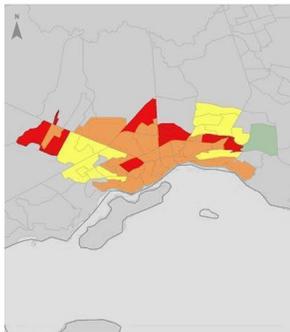
Gran Santiago



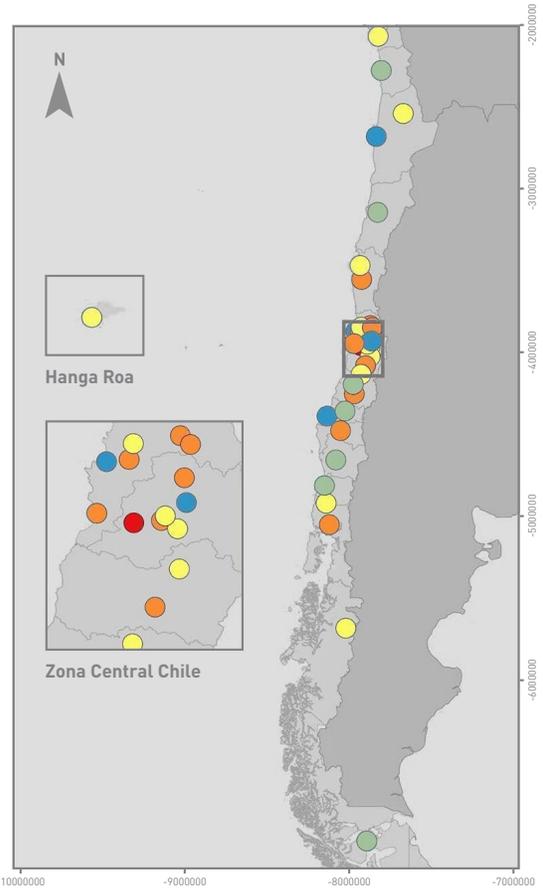
Gran Concepción



Gran Valparaíso



Puerto Montt



Hanga Roa

Zona Central Chile

#### Índice de Vulnerabilidad Social



#### Fuente

CASEN 2017: MINVU  
CENSO 2017: SIEDUU

#### Datos Cartográficos

Chile Continental: WGS84 H19S  
Chile Insular: WGS84 H12S

Figura 13. Vulnerabilidad para ICU.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.1.3 AMENAZA

La intensidad de la ICU promedio, mediante el método de Oke para el período presente, es de 2,9 °C. La ciudad de Santiago presenta la mayor ICU, con un valor estimado de 9,2 °C; mientras que Hanga Roa registra el menor valor, con 0,6 °C, donde prácticamente no se evidencia el fenómeno. Para el futuro, se estima que el valor promedio de la ICU será de 4,6 °C. Este cálculo considera la población 2065, estimada a partir de la superficie simulada con el modelo

Terrset (Tabla 15) y el aporte de la diferencia entre las temperaturas máximas promedio de verano presentes y futuros, como incremento asociado al cambio climático (Figura 14).

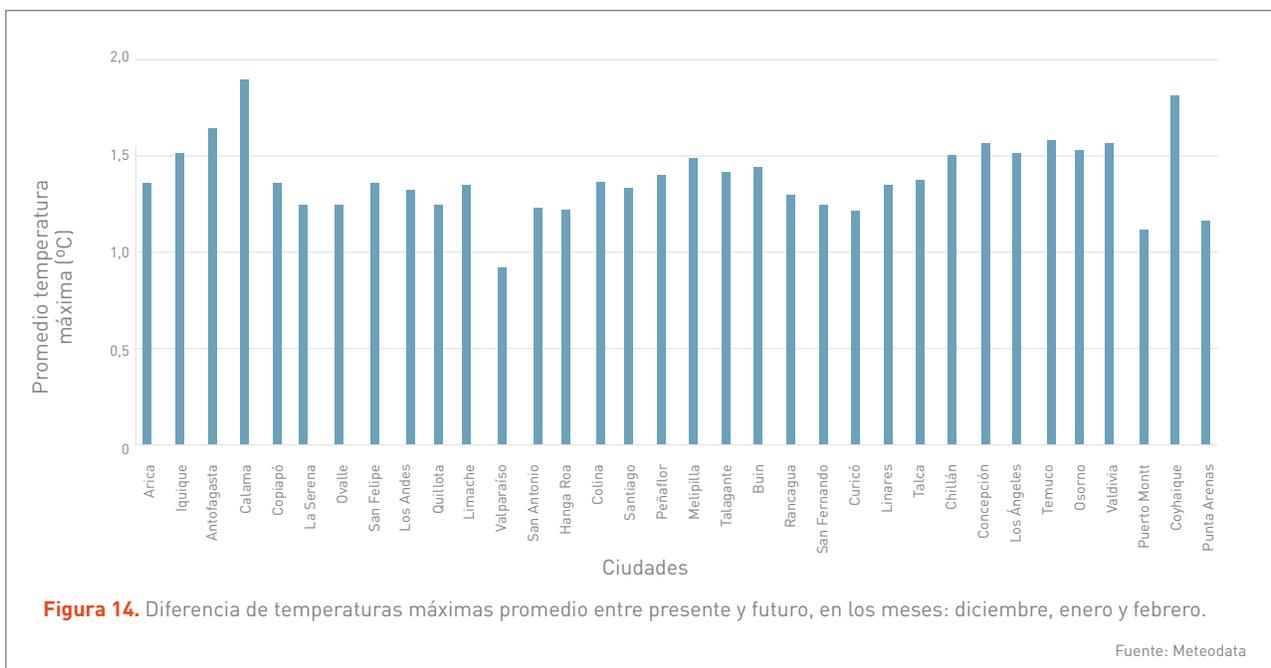
En Santiago, se proyecta la ICU más intensa (10,8 °C) para el año 2065; luego le siguen el Gran Concepción, La Serena - Coquimbo y Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios, con valores en torno a los 5,5 °C. Las ICU más bajas corresponderían a Hanga Roa y Punta Arenas, con valores entre 2 y 3 °C, respectivamente (Tabla 16).



Ciudades	Superficie 2017 (ha)	Población 2017	Superficie 2065 (ha)	Población 2065
Arica	2.906,5	202.131	3.893,6	231.549
Iquique	3.325,5	293.068	4.332,5	357.561
Antofagasta	3.636,7	348.517	4.889,8	460.882
Calama	2.408,1	157.575	5.148,8	255.683
Copiapó	2.328,9	150.804	3.452,0	196.788
La Serena	6.927,9	399.450	13.686,6	657.577
Ovalle	946,4	75.864	1.425,3	100.612
San Felipe	1.070,7	64.543	6.637,8	207.266
Los Andes	1.331,7	69.041	4.299,0	149.416
Quillota	2.770,1	149.159	8.080,6	260.235
Limache	935,3	50.998	3.278,3	128.182
Valparaíso	14.615,8	896.528	1.9939,1	982.832
San Antonio	3.855,3	118.668	5.995,4	155.391
Hanga Roa	442	7.163	648,7	15.608
Colina	787,4	88.858	3.339,2	266.399
Santiago	7.5494,4	6.139.087	8.4966,7	6.903.681
Peñaflor	1.953,1	82.959	3.563,1	93.700
Melipilla	1.002,4	72.212	3.199,5	187.157
Talagante	798,2	37.721	3.835,7	113.554
Buín	2.043,3	65.607	3.797,1	100.163
Rancagua	5.392,2	290.029	1.4337,8	512.490
San Fernando	1.147,6	58.367	3.560,7	113.788
Curicó	2.592,0	125.275	6.062,5	214.167
Linares	1.305,2	73.602	3.986,4	134.453
Talca	4.064,7	236.347	8.487,1	386.175
Chillán	3.118,4	164.270	5.642,5	196.135
Concepción	14.210,5	719.944	2.1161,6	801.687
Los Ángeles	2.637,3	143.023	3.188,0	160.066
Temuco	4.449,3	277.529	5.660,3	318.179
Osorno	2.608,7	147.666	3.194,6	164.494
Valdivia	2.552,3	150.048	4.762,3	224.555
Puerto Montt	3.193,5	169.736	4.635,9	218.104
Coyhaique	931,1	49.667	2.241,7	95.751
Punta Arenas	2.608,5	123.403	3.625,4	13.5661

**Tabla 15.** Superficie y población 2017 y proyectada 2065.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 14.** Diferencia de temperaturas máximas promedio entre presente y futuro, en los meses: diciembre, enero y febrero.

Fuente: Meteodata



Ciudades	ICU presente (°C)	ICU futuro (°C)	Delta (°C)
Arica	3,43	4,92	1,50
Iquique	3,14	4,84	1,71
Antofagasta	3,64	5,58	1,94
Calama	2,41	4,66	2,25
Copiapó	2,56	4,12	1,56
La Serena	3,88	5,69	1,82
Ovalle	2,54	3,99	1,45
San Felipe	2,99	5,43	2,44
Los Andes	3,04	5,05	2,00
Quillota	3,64	5,47	1,83
Limache	2,32	4,35	2,03
Valparaíso	3,12	4,19	1,06
San Antonio	2,54	4,02	1,47
Hanga Roa	0,64	2,05	1,40
Colina	2,92	5,29	2,37
Santiago	9,27	10,89	1,62
Peñaflor	2,85	4,35	1,50
Melipilla	2,55	4,81	2,26
Talagante	2,29	4,17	1,88
Buín	2,23	3,95	1,72
Rancagua	3,66	5,57	1,91
San Fernando	2,24	3,86	1,62
Curicó	2,39	3,99	1,59
Linares	2,00	3,72	1,73
Talca	2,80	4,59	1,79
Chillán	2,21	3,85	1,64
Concepción	4,10	5,82	1,72
Los Angeles	2,01	3,61	1,61
Temuco	3,15	4,95	1,80
Osorno	2,30	3,93	1,63
Valdivia	2,45	4,35	1,90
Puerto Montt	2,54	3,90	1,36
Coyhaique	1,55	3,67	2,12
Punta Arenas	1,81	3,03	1,21

**Tabla 16.** Isla de Calor Urbana presente, futura y diferencia.

Fuente: Elaboración propia.

En todas las ciudades se proyecta un aumento de la ICU, destacando San Felipe, Colina, Melipilla y Calama, con un aumento esperado por sobre 2,25 °C. Por el contrario, Punta Arenas y Valparaíso muestran el menor crecimiento de las ICU (**Tabla 16**).

De acuerdo con la clasificación de Álvarez (1998) para determinar la intensidad de ICU, es posible observar que el número de casos de ICU fuerte, aumenta de 1 en el presente a 3 en el futuro y las ICU moderada, de 2 a 26 casos. Mientras que la ICU débil disminuye de 28 a 5 casos (**Tabla 17**).

Temperatura		Presente	Futuro
Intensidad	Intervalo (°C)	Nº casos	Nº casos
Débil	2 – 3,8	28	5
Moderada	3,8 – 5,6	2	26
Fuerte	5,6 – 7,4	1	3

**Tabla 17.** Intensidad de ICU según número de casos presente y futuro.

Fuente: Elaboración propia, basado en clasificación Álvarez (1998).

#### 4.1.4 RIESGOS

Al combinar los tres factores de Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad se obtiene los mapas de Riesgos por intensidad de Isla de Calor Urbana (**Figura 15** y **Figura 16**). Estos mapas muestran que las tres ciudades más riesgosas, en el periodo presente son: Santiago, La Serena-Coquimbo y Melipilla. A futuro, las mayores intensidades de ICU serán en las ciudades de Santiago, Melipilla y Rancagua- Machalí. Al contrario, las ciudades con menor Riesgo son: Punta Arenas, Coyhaique y Hanga Roa, tanto

para el periodo presente como en el futuro. Las ciudades interiores de Chile Central muestran el mayor cambio neto de ICU.

El impacto del cambio climático en el efecto de intensidad de Isla de Calor Urbana, se podría calificar como negativo, en tanto se proyecta un incremento en las temperaturas acentuado por dicho cambio, aumento de la población y una Vulnerabilidad constante, que implica que el nivel de Riesgo en todas las ciudades analizadas sea ascendente. Este impacto se aplica para la totalidad de las 34 ciudades.



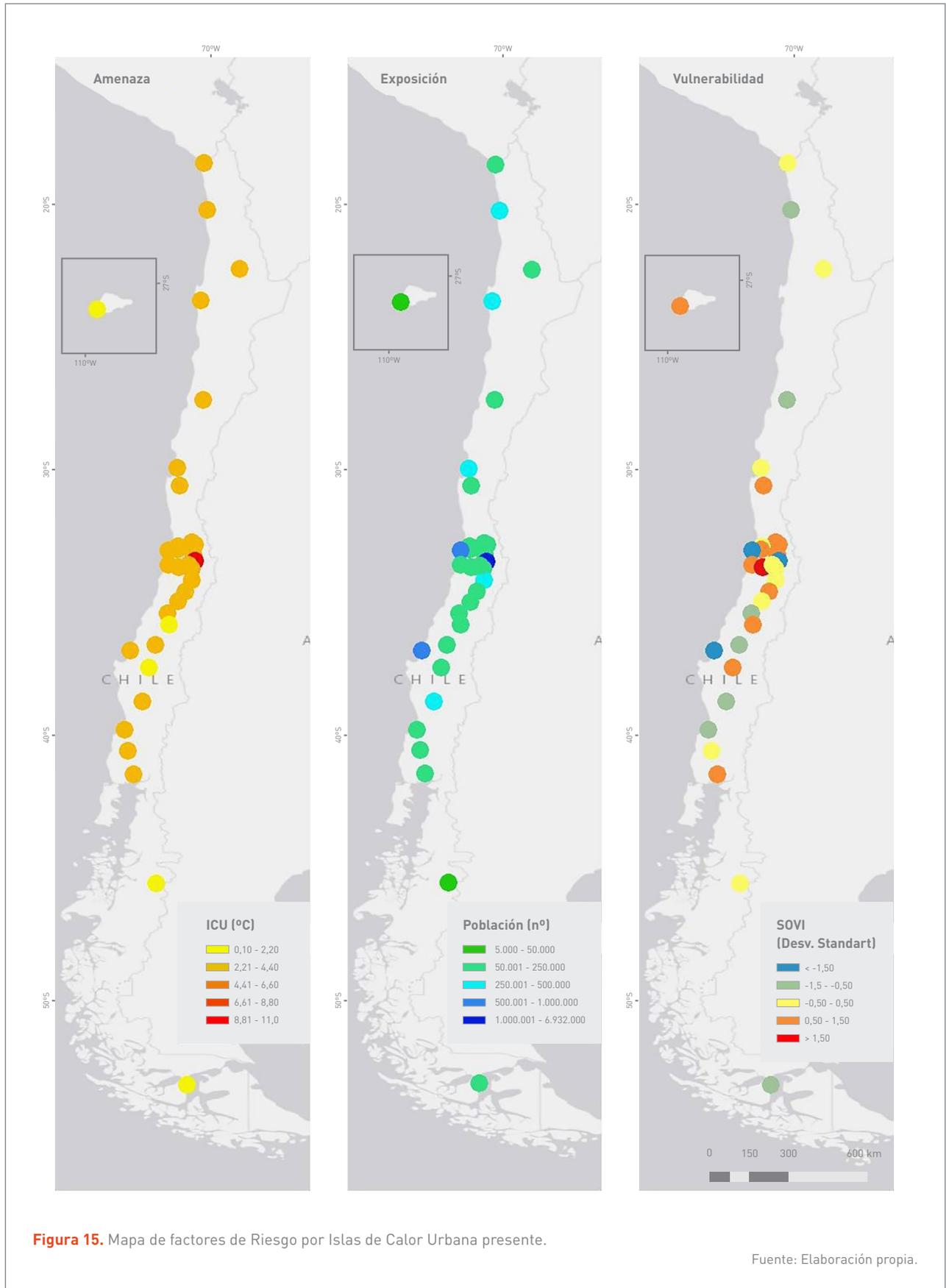


Figura 15. Mapa de factores de Riesgo por Islas de Calor Urbana presente.

Fuente: Elaboración propia.

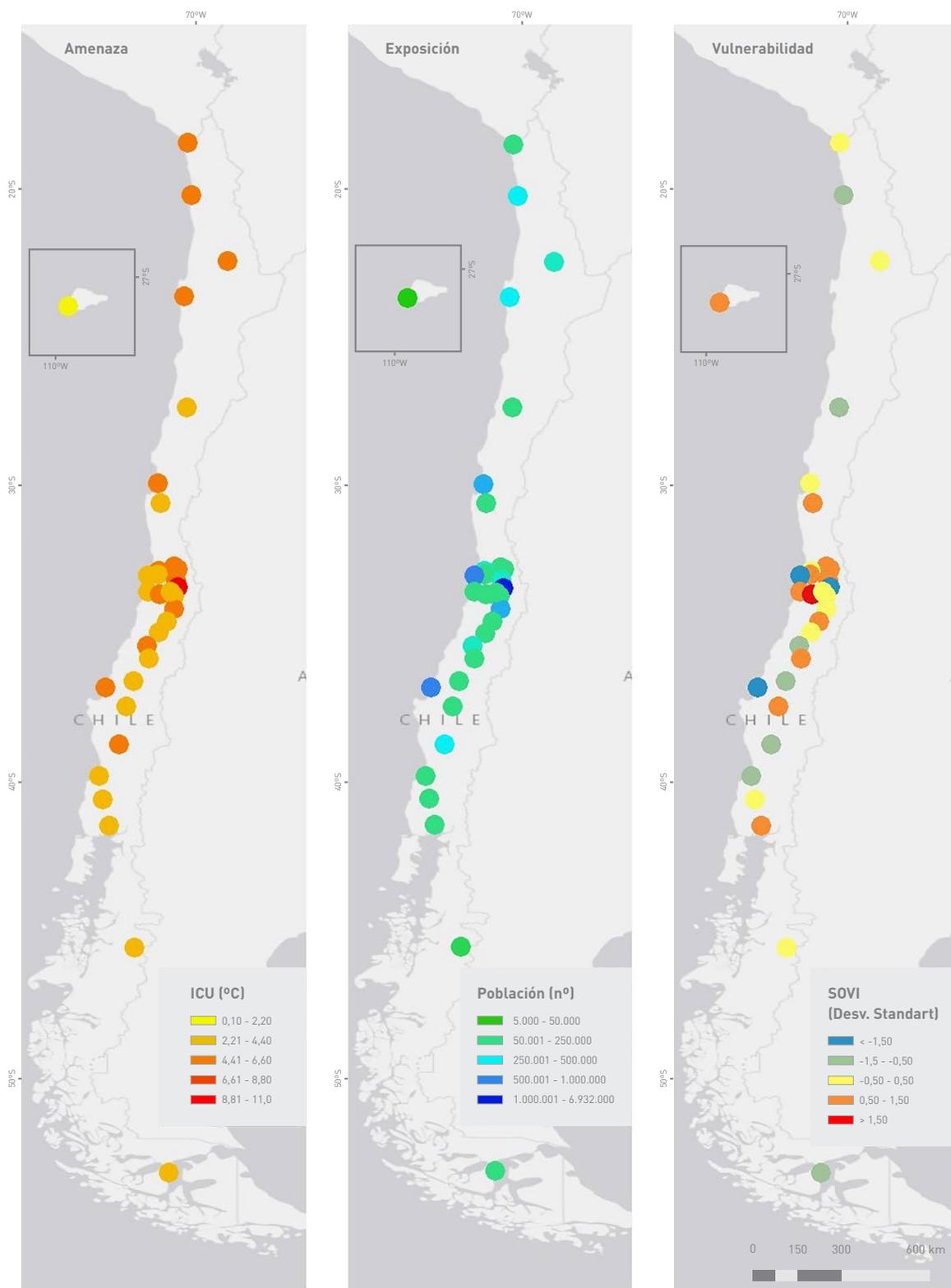


Figura 16. Mapa de factores de Riesgo por Islas de Calor Urbana futuro.

Fuente: Elaboración propia.

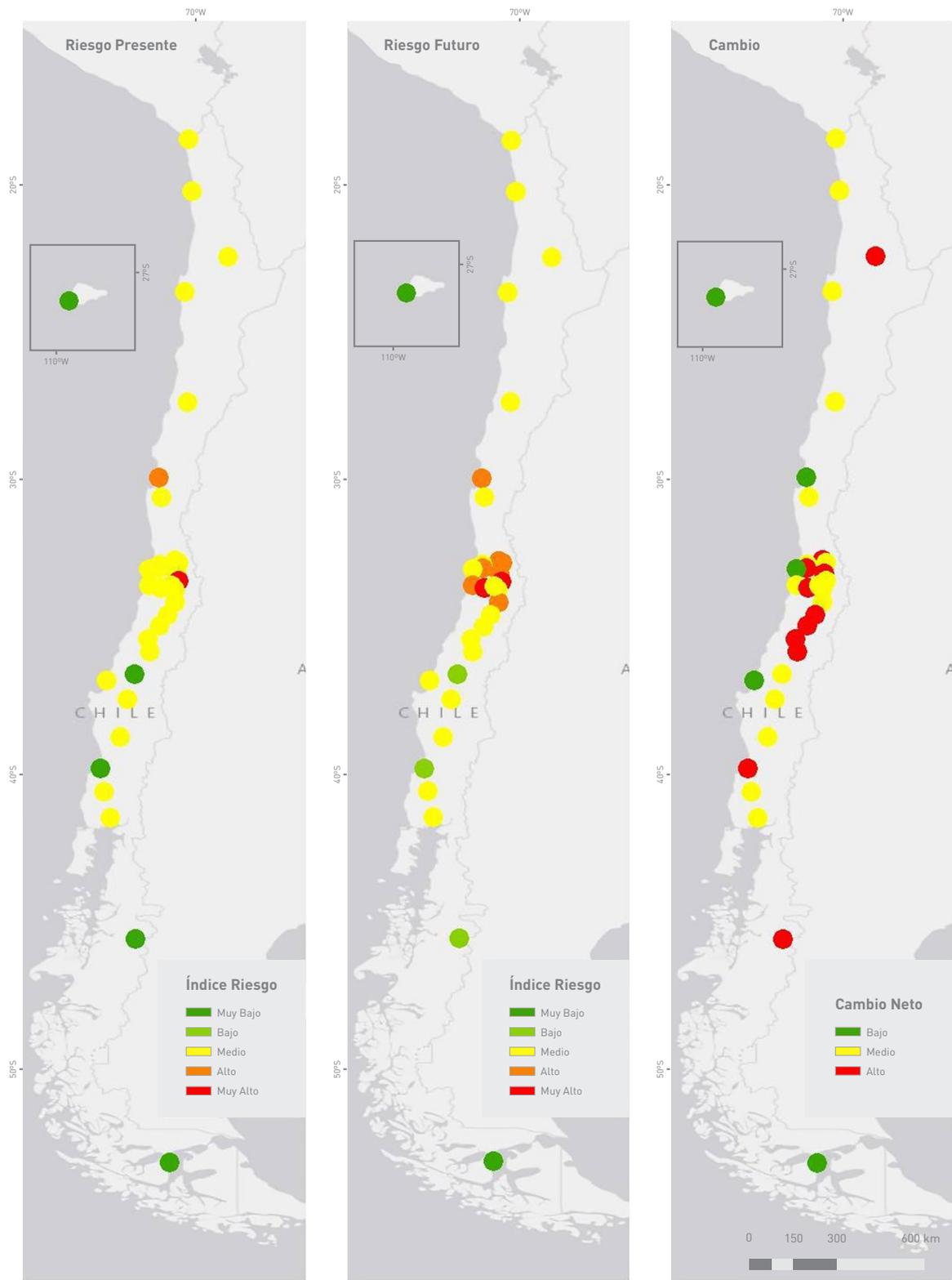


Figura 17. Mapa de Riesgo Islas de Calor Urbana presente, futuro y cambio neto.

Fuente: Elaboración propia.

## 4.2 DISCONFORT TÉRMICO AMBIENTAL

---

El clima urbano, junto con el impacto del cambio climático, tienen efectos sobre la salud de la población, en especial sobre el Discomfort Térmico, y la demanda energética para climatización, entre otros. En los últimos años, se ha observado una intensificación de los extremos climáticos, tales como el aumento de olas de calor y temperaturas máximas, que afectan a las ciudades en el período estival. Este aumento de la temperatura provoca condiciones de discomfort, tanto al interior de las edificaciones, como en los espacios exteriores, como plazas, parques y espacios públicos en general.

El concepto de confort térmico admite varias definiciones, pero en todas se halla presente el concepto de equilibrio energético entre el cuerpo humano y su entorno. El ser humano es una especie homeotérmica y, por ello, necesita mantener ciertas partes vitales a temperatura aproximadamente constante. Con el objeto de mantener una temperatura corporal de 37 °C, el cuerpo humano puede recibir o transferir calor a su entorno, a través de un balance dinámico entre el calor producido por éste (como resultado del nivel metabólico) y el intercambio de calor con el ambiente a través de convección (Cv), conducción (Cd), radiación (r), evaporación sin sudor a nivel de la piel (Hp) y por vías respiratorias (Hv). De allí la importancia de estimar el confort térmico ambiental, para distintas ciudades chilenas que representan diversos climas y condiciones urbanas.

El estudio del confort térmico ha sido abordado, mayoritariamente, para recintos cerrados como oficinas, escuelas y hogares. El confort térmico al interior de las edificaciones se encuentra controlado por sistemas de acondicionamiento climático, sean activos, o pasivos, incorporando el uso de estrategias de diseño, que funcionan de manera natural, aprovechando sombras, colores, entre otros elementos arquitectónicos. Sin embargo, son los espacios exteriores los que poseen una mayor variabilidad climática, ya que no presentan los mecanismos de control de los espacios interiores, que permitan conseguir condiciones

climáticas confortables. Además, son los más susceptibles a las variaciones que impondrá el cambio climático. Los sistemas pasivos son centrales en el mejoramiento del confort de espacios de exteriores, que se refiere al aprovechamiento o protección de la radiación solar, a través del diseño de la infraestructura, como pérgolas, vegetación, entre otras, sin requerir sistemas electromecánicos o de combustión para el enfriamiento y calefacción (Guerra, 2008). Las circunstancias ambientales y, en particular, las condiciones climáticas impuestas a las personas que utilizan los espacios abiertos, pueden afectar su experiencia, determinando el uso, permanencia y apropiación que los usuarios hacen de este espacio (Perico-Agudelo, 2009; Nikopoulou & Lykoudis, 2007; Guzmán y Ochoa de la Torre, 2014; Zeng & Dong, 2015).

Los estudios de confort térmico exterior en la mayoría de los casos están asociados a estudios instrumentales. Desde los primeros trabajos que abordan el bienestar climático, que datan de finales del siglo XIX, han surgido numerosos índices para evaluar las condiciones de confort térmico ambiental y, en algunos casos, las sensaciones térmicas de la persona ante determinadas condiciones climáticas (Fernández García, 2001). Entre los más comúnmente utilizados —en los estudios de microclima urbano de exterior— se encuentran el *Index of Thermal Stress* (ITS); el *Physiologically equivalent temperature* (PET); el modelo Rayman de Matzarakis (Cueva et al., 2006); el índice Temperatura / humedad (THI) (Thom, 1959); el Humidex (WSE, 2009); el índice de Vinje (PE), que agrega, además, al viento; el índice de sensación térmica (TS) y el método COMFA (Ruiz & Correa, 2009).

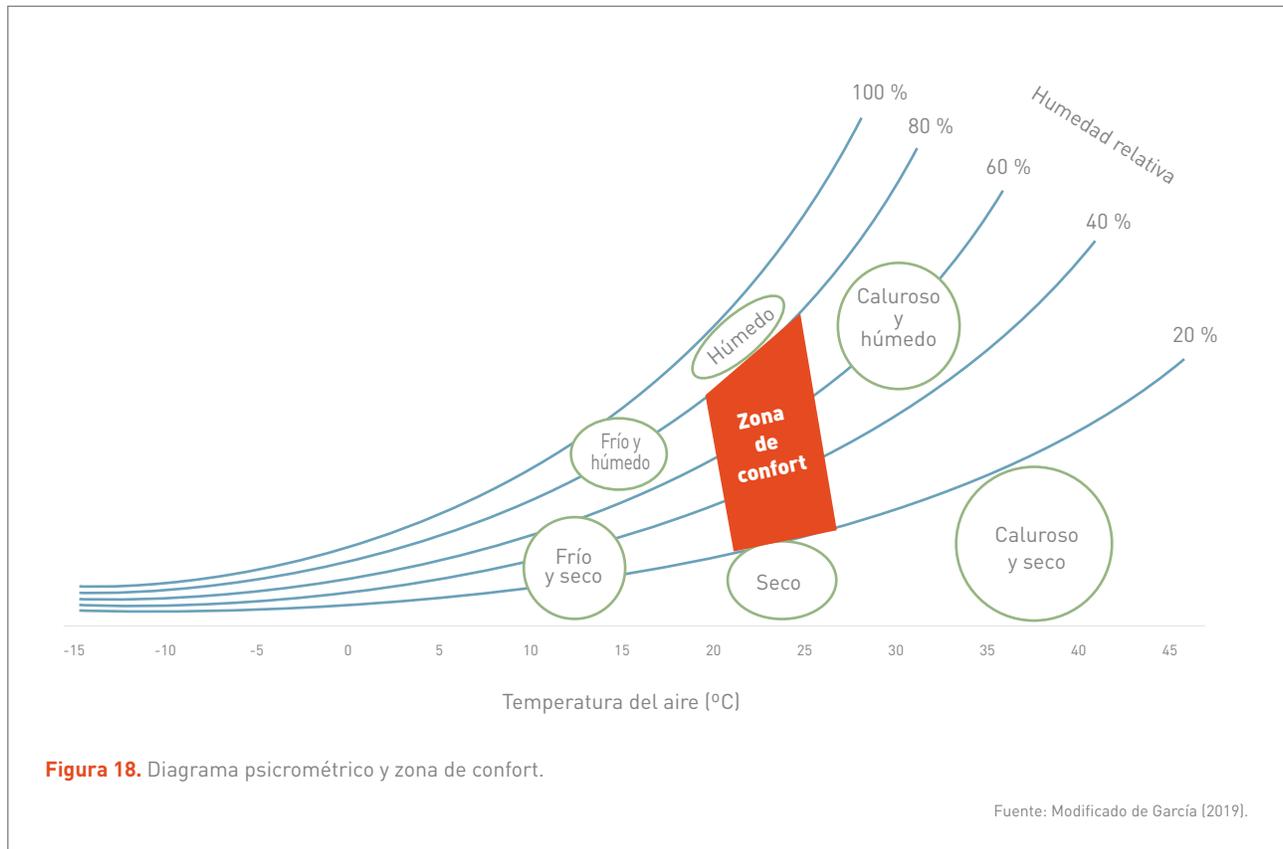
La temperatura y la humedad relativa del aire actúan como parámetros básicos en el confort/discomfort climático, pues su combinación determina la existencia o no de estrés ambiental en el cuerpo humano y la necesidad de una mayor o menor adaptación corporal, a través de la vestimenta o la actividad metabólica, especialmente en verano.

Por otro lado, el viento y la radiación son variables modificadoras del confort: el primero aumenta el discomfort por frío y la segunda es capaz de aliviar la pérdida de confort, corrigiendo o aliviando, mediante el incremento de tem-



peratura, respectivamente. De esta forma, se han definido diferentes intervalos del bienestar térmico (considerando un individuo promedio, en reposo y con vestimenta ligera). Olgay (1963) define la zona de confort entre 21° C y 27 °C, y 20% y 80% de humedad relativa del aire (**Figura 18**). La temperatura de la piel aumenta con la humedad ambiente superior al 70%, en especial cuando la temperatura es

elevada (Landsberg, 1981; Pérez Cueva, 1994; Lin y Matzarakis, 2008). No obstante, los umbrales de humedad, independientemente de la temperatura, deben estar entre 25 y 85% (Croiset, 1976), ya que con bajos valores higrométricos se irrita la garganta y, con alta humedad, se dificulta la respiración (Ochoa de la Torre *et al*, 2009).



Se pueden reconocer tres tipos de zonas térmicas, relativas a los índices de confort térmico:

**a) Zona de confort:** es la condición climática satisfactoria, no se necesitan cambios.

**b) Zona de tolerancia:** es la condición climática no placentera o confortable, pero fisiológicamente tolerable para el cuerpo humano. Es posible llevar a una zona de confort, por medio de algunos cambios físicos, en los microclimas exteriores, o cambiando las condiciones bajo control humano.

**c) Zona de peligro:** es la condición climática en que el cuerpo humano llega a niveles de estrés térmico fisiológico por calor o frío, cuyos efectos dependen del tiempo de Exposición (Thabaz, 2011).

El confort térmico o bioclimático es de fundamental importancia para mejorar la calidad de vida de los habitantes urbanos y, también, por sus repercusiones sobre su salud, ya que el estrés térmico incrementa las consultas médicas o la mortalidad de los grupos más vulnerables (niños, ancianos, enfermos crónicos, entre otros), cuando se superan los 36 °C y, en especial, en situaciones de olas

de calor, tal como lo señalan Díaz *et al.* (2015), Tejedor *et al.* (2016), García (2019), entre otros.

En este sentido, la vegetación arbórea urbana es un importante factor, que mejora el confort térmico humano, junto con reducir el ruido y la circulación de partículas y contaminantes atmosféricos, modificar el almacenamiento e intercambio calórico entre diversas superficies urbanas, de modo que atenuar la manifestación de la Isla de Calor Urbana, entre otros beneficios ambientales (Nowak *et al.*, 1997; Whitford *et al.*, 2001). Por otro lado, se reconoce su rol en la salud mental de los habitantes urbanos, por sus aportes al equilibrio psíquico de las personas (relajación, tranquilidad, descanso) y a sus sentidos (aromas agradables, colores, formas, sonidos), mejorando la estética y disfrute del paisaje urbano (Capelli de Steffens *et al.*, 2005). La presencia de los árboles genera -entonces- un espacio más confortable para el peatón, lo que induce a las personas a caminar, correr, distenderse o recrearse en ellos, al tornarse las calles y veredas en áreas más agradables, por la sombra en verano y los contrastes de forma y color, en otras estaciones del año, acercando la naturaleza al medio urbano (Uribarrena, 2004).

Por lo expuesto, esta cadena de impacto se centra en determinar el impacto del confort térmico ambiental en el bienestar de las personas, especialmente en los espacios

públicos exteriores, fijando la atención en los Riesgos en la salud, que pueden ocurrir frente a eventos de temperaturas extremas durante el día en verano, ya sea por actividades recreativas, prácticas deportivas, actividades turístico-recreativas, o simplemente circulación por temas laborales, educacionales o caminatas al aire libre.

## 4.2.1 EXPOSICIÓN

Para evaluar la población expuesta a las condiciones de confort o Disconfort Térmico Ambiental, en esta cadena de impacto, se consideran los dos grupos etarios más sensibles, de acuerdo con lo definido por la Organización Mundial de la Salud: la población infantil, entre 0 y 5 años, y la adulta mayor, personas de más de 65 años. En particular, se calcula el porcentaje que la suma de la población de ambos grupos representa en cada ciudad. Los datos fueron obtenidos a partir de la información levantada por el Censo de Población y de Vivienda, realizado el 19 de abril del 2017, considerando la población urbana comunal. Al igual que en el impacto anterior, se trabajó en las 34 ciudades chilenas que poseen más de 50.000 habitantes, más las capitales regionales que no cumplen con dicha cantidad de población (Coyhaique) y la ciudad de Hanga Roa, con el objeto de representar el territorio insular chileno (**Tabla 18**).





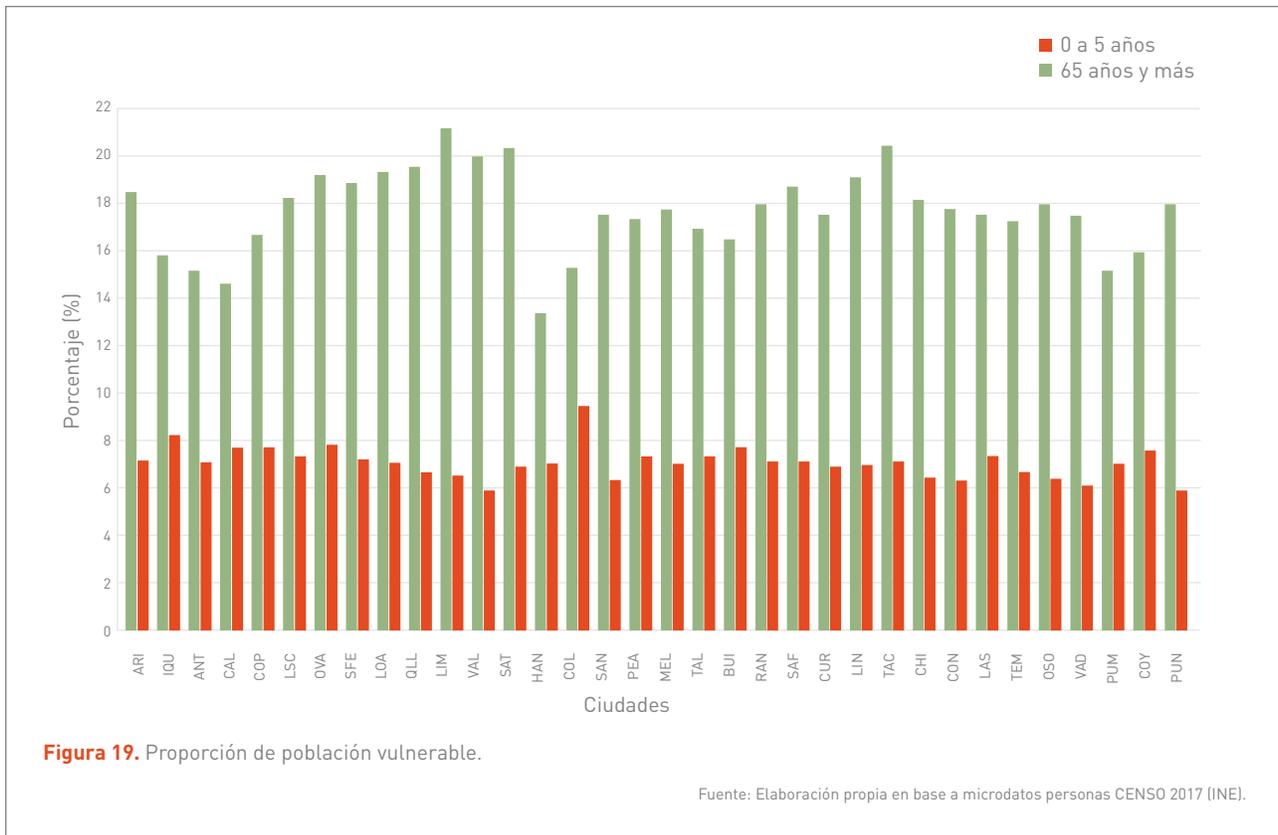
Ciudad	0 a 5 años	65 años y más	% Exposición
Arica (ARI)	14.668	22.953	18,3
Iquique-Alto Hospicio (IQU)	24.198	22.100	15,7
Antofagasta (ANT)	25.167	28.431	15,1
Calama (CAL)	12.214	10.806	14,5
Copiapó (COP)	11.737	13.270	16,6
La Serena-Coquimbo (LSC)	30.445	44.764	18,1
Ovalle (OVA)	6.821	9.871	19,1
San Felipe, V. Los Almend. Sta. María (SFE)	5.728	9.161	18,8
Los Andes-Calle Larga (LOA)	5.054	8.714	19,2
Quil.-La Calera- Hij.-La Cruz (QLL)	10.662	20.081	19,4
Limache - Olmué (LIM)	3.403	7.430	21,1
Gran Valparaíso (VAL)	55.601	131.986	19,9
San Antonio-Cart.- L. Cruces-Sto. Dom. (SAT)	7.833	15.197	20,3
Hanga Roa (HAN)	521	457	13,4
Colina (COL)	11.171	6.738	15,2
Gran Santiago (SAN)	404.239	687.523	17,4
Peñaflor (PEA)	6.100	8.201	17,2
Melipilla (MEL)	6.041	8.918	17,7
Talagante (TAL)	4.330	5.631	16,8
Buín (BUI)	6.379	7.202	16,4
Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios (RAN)	22.068	33.452	17,8
San Fernando (SAF)	4.529	7.318	18,6
Curicó (CUR)	9.170	14.006	17,5
Linares (LIN)	5.407	9.360	19,0
Talca-Culénar (TAC)	14.908	27.901	18,3
Chillán (CHI)	12.596	22.831	18,1
Gran Concepción (CON)	53.150	94.892	17,7
Los Ángeles (LAS)	11.077	15.249	17,4
Temuco-P. Las Casas (TEM)	20.694	32.171	17,1
Osorno (OSO)	9.488	17.030	17,9
Valdivia (VAD)	9.512	17.526	17,5
Puerto Montt (PUM)	15.475	17.695	15,1
Coyhaique (COY)	3.780	4.136	15,8
Punta Arenas (PUM)	7.434	15.109	17,9

**Tabla 18.** Exposición de acuerdo con la población infantil y adulta mayor.

Fuente: Microdatos Persona Censo 2017 (INE).

En las ciudades estudiadas, la proporción de población expuesta varía entre 13 y 21% del total. En el extremo inferior, encontramos a las ciudades de Hanga Roa y Calama con 13,3 y 14,5%, respectivamente. Por el contrario, los mayores porcentajes se encuentran en las Conurbaciones de Limache - Olmué y San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Santo Domingo, con 21,1 y 20,2%, respectivamente.

A su vez, el porcentaje que representa la población infantil respecto de la adulta es bastante heterogéneo. En general, el porcentaje de población adulta mayor es más alto, con una diferencia que puede ser de solo un punto porcentual, hasta significar el doble de la población infantil. Solo en cuatro ciudades, la población infantil es mayor, de norte a sur: la Conurbación de Iquique - Alto Hospicio, Calama, Colina y, en el territorio Insular, Hanga Roa.



#### 4.2.2 VULNERABILIDAD

Considerando las definiciones del concepto, en este impacto se evalúa la Vulnerabilidad a través del índice de Vulnerabilidad Social (SoVI) desarrollado por Cutter et al. (2003). En particular, se incluyeron las 25 variables base más la variable N°26 "Porcentaje de parques y plazas, áreas verdes" (Tabla 8), que está dirigida al impacto que se busca evaluar, obteniendo un total de 26 variables para el ítem.

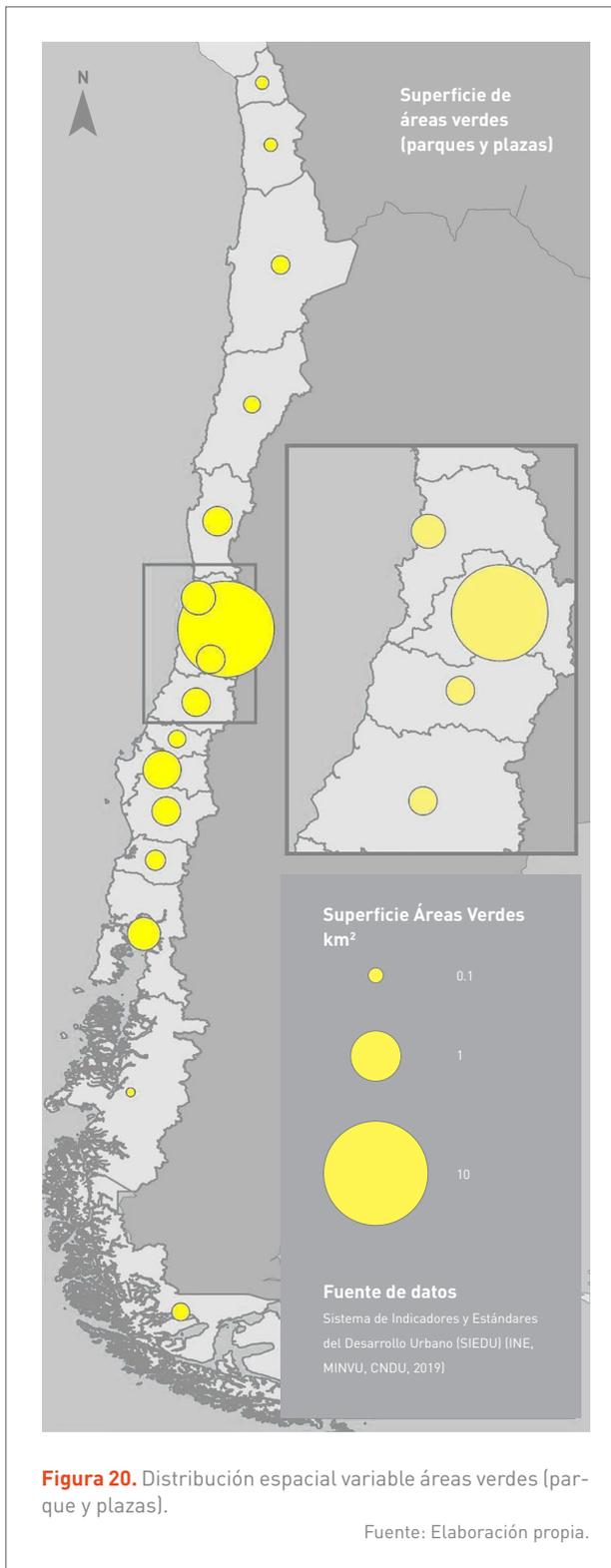
La variable específica fue seleccionada por su relación significativa con las condiciones de Discomfort Térmico, en el espacio público urbano exterior. Dentro del contexto de la Vulnerabilidad social, la variable permite identificar el impacto que sufren aquellas comunidades que presentan menor superficie de áreas verdes. La información para la construcción de la variable, se obtuvo del indicador de áreas verdes del Sistema de Indicadores y Estándares del Desarrollo Urbano (SIEDU) (INE, MINVU, CNDU, 2019), considerando las áreas correspondientes a Parques urbanos y Plazas, manteniendo la misma unidad de análisis "ZONA/ LOCALIDAD" del resto de las variables censales.

Para la obtención del índice SoVI para Discomfort Térmico Ambiental, se llevaron a cabo los mismos pasos metodológicos detallados en el apartado 3.3. Los resultados se clasificaron en cinco categorías de Vulnerabilidad: Muy Baja, Baja, Media, Alta y Muy alta, según los rangos propuestos en la **Tabla 8**.

Como una manera de tener una mejor comprensión de la variable "Superficie de áreas verdes", dentro del modelo de Vulnerabilidad social, se realizó una exploración previa de los datos, para obtener un plano general de su espacialización sobre el territorio (Figura 20). Se observó que las regiones que presentan una mayor superficie de áreas verdes, son la Región Metropolitana, con un 50% del total nacional (38,8 km<sup>2</sup>) y la Región del Biobío, con un 6% (6,1 km<sup>2</sup>); mientras que la Región de Aysén y la Región de Tarapacá concentran menos del 1% de la superficie total de áreas verdes del país (0,3 y 0,7 km<sup>2</sup>, respectivamente). En cuanto al número de parques y plazas, la tendencia se mantuvo, la Región Metropolitana destacó con el 45% de áreas verdes del total nacional (10.936 áreas), seguido de la Región del Biobío, con un 8% correspondiente a 2.150



áreas; mientras que, las regiones de Aysén y Tarapacá contaron con la menor proporción, cercana al 1% (150 y 260 áreas, respectivamente).



En cuanto a los resultados obtenidos de SoVI para el impacto de Discomfort Térmico Ambiental, destaca la identificación de siete componentes de la Vulnerabilidad con una varianza explicada de 70,39% (**Tabla 19**), los que presentan gran similitud a la Cadena de Impacto de Isla de Calor Urbano. En este sentido, destacan entre los componentes principales, “Concentración de población dependiente”, con 14,95% de varianza; seguido de “Pobreza multidimensional”, con 13,31% y “Grupos Vulnerables”, con 11,12%. Cabe precisar, que -dentro del modelo- la variable específica incorporada para el ítem, se identifica en el factor número siete, con una varianza explicada de 4,97%, lo que demuestra su validez e importancia dentro del modelo.

Factores	Carga	SoVI Discomfort Térmico Ambiental
Factor 1	14,95%	Concentración de población dependiente
Factor 2	13,31%	Pobreza multidimensional
Factor 3	11,09%	Grupos vulnerables
Factor 4	10,12%	Calidad de vivienda y acceso a red de agua
Factor 5	9,91%	Migrantes y jefas de hogar, Hacinamiento
Factor 6	6,02%	Acceso a vivienda propia y servicios básicos
Factor 7	4,97%	Presencia de áreas verdes
<b>Varianza total</b>	<b>70,39%</b>	

**Tabla 19.** Matriz de componentes principales para SOVI de Discomfort Térmico Ambiental.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvieron -también del modelo- los valores de Vulnerabilidad social para Discomfort Térmico Ambiental de las ciudades evaluadas, lo cual se presenta en la **Tabla 20**. En cuanto a la zonificación de la Vulnerabilidad, se obtuvieron los resultados observados en la **Figura 21**. Cabe destacar que, si bien se calculó el índice para la totalidad de ciudades, no todas fueron consideradas para la medición del Riesgo, ya que no existe Amenaza por Discomfort Térmico para todas las ciudades.



Ciudad	SOVI DTA	Z SOVI DTA	Nivel de Vulnerabilidad	Ciudad	SOVI DTA	Z SOVI DTA	Nivel de Vulnerabilidad
Peñaflor	-2.33	-2.21	Muy Bajo	San Anto.-Cart.- L. Cruces-Sto. Dom..	1.35	0.08	Medio
Antofagasta	-1.30	-1.57	Muy Bajo	Quillota - La Calera - Hijuelas- La Cruz	1.37	0.09	Medio
Gran Santiago	-1.16	-1.48	Bajo	Punta Arenas	1.47*	0.16*	Medio
Calama	-0.95	-1.35	Bajo	Coyhaique	1.69*	0.29*	Medio
Colina	-0.58*	-1.12*	Bajo	Gran Valparaíso	1.77	0.34	Medio
Talagante	-0.33	-0.96	Bajo	Temuco- Padre Las Casas	1.81*	0.37*	Medio
La Serena- Coquimbo	-0.25	-0.92	Bajo	Copiapó	2.00	0.48	Medio
Los Ángeles	-0.17	-0.86	Bajo	San Fernando	2.06	0.52	Alto
Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios	-0.10	-0.82	Bajo	Valdivia	2.09*	0.54*	Alto
Gran Concepción	0.09	-0.70	Bajo	Melipilla	2.35	0.70	Alto
Talca-Culénar	0.78	-0.28	Medio	Los Andes- Calle Larga	2.38	0.72	Alto
Limache- Olmué	0.80	-0.26	Medio	Linares	2.66	0.90	Alto
Iquique- Alto Hospicio	0.82	-0.25	Medio	Arica	2.99	1.10	Alto
Ovalle	0.89	-0.21	Medio	San Felipe, V. Los Almendros. Sta. María	3.07	1.15	Alto
Curicó	1.11	-0.07	Medio	Puerto Montt	3.47*	1.40*	Alto
Chillán-Chillán Viejo	1.22	0.00	Medio	Osorno	4.04*	1.75*	Muy Alto
Buín	1.30	0.05	Medio	Hanga Roa	5.15	2.44	Muy Alto

**Tabla 20.** Valores de SoVI para ciudades (Disconfort Térmico Ambiental).

\* Ciudades que no fueron consideradas para el cálculo del Riesgo.

Fuente: Elaboración propia.

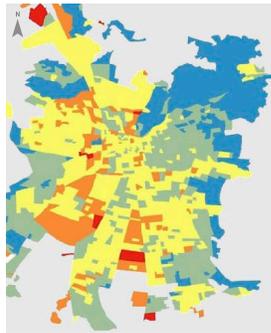
A partir de los resultados, se aprecia la Vulnerabilidad para la totalidad de ciudades modeladas y la zonificación de cuatro ciudades representativas en la **Figura 21**. En específico, se puede apreciar que la ciudad de Hanga Roa se encuentra en Vulnerabilidad “Muy Alta”; al igual que la ciudad de Osorno y otras 8 ciudades, con un valor de Vulnerabilidad “Alta”. En cuanto a Vulnerabilidad “Media”, se observan 14 ciudades con este valor; 8 ciudades con un valor “Bajo”, mientras que 2 obtuvieron nivel “Muy Bajo” de Vulnerabilidad social (Antofagasta y Peñaflor). La ciudad identificada con el mayor nivel de Vulnerabilidad es Hanga Roa, con un valor de 2,44 Std. Desv; mientras que la

con menor Vulnerabilidad, fue la ciudad de Peñaflor, con un valor de -2,21 Std. Desv.

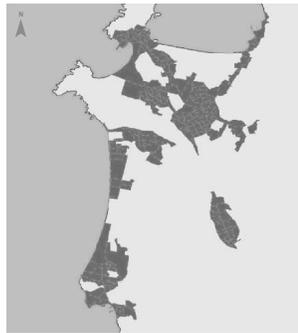
En síntesis, la población en Chile presenta una Vulnerabilidad social para Disconfort Térmico Ambiental, que se acrecienta hacia el sur del país, siendo incrementada por las diversas características sociales, económicas y educativas, que se identificaron entre sus componentes (**Tabla 8**). Sin embargo, la incorporación de “áreas verdes” permite orientar la visión clásica de Vulnerabilidad hacia la medición del confort térmico, lo cual se valida con la identificación del factor N°7 de la matriz de Vulnerabilidad.



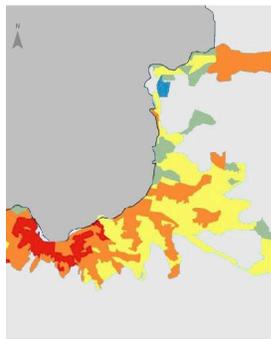
### Vulnerabilidad Social para Discomfort Térmico



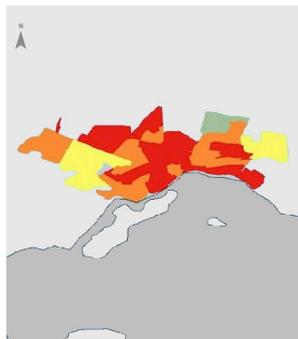
Gran Santiago



Gran Concepción



Gran Valparaíso



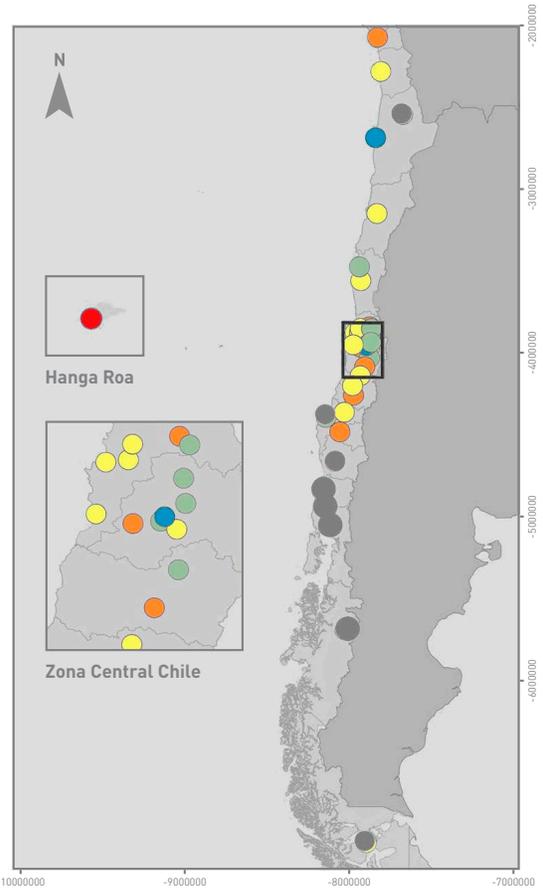
Puerto Montt

#### Índice de Vulnerabilidad Social



#### Fuente

CASEN 2017: MINVU  
CENSO 2017: SIEDUU



#### Datos Cartográficos

Chile Continental: WGS84 H19S  
Chile Insular: WGS84 H12S

Figura 21. Vulnerabilidad para Discomfort Térmico Ambiental.

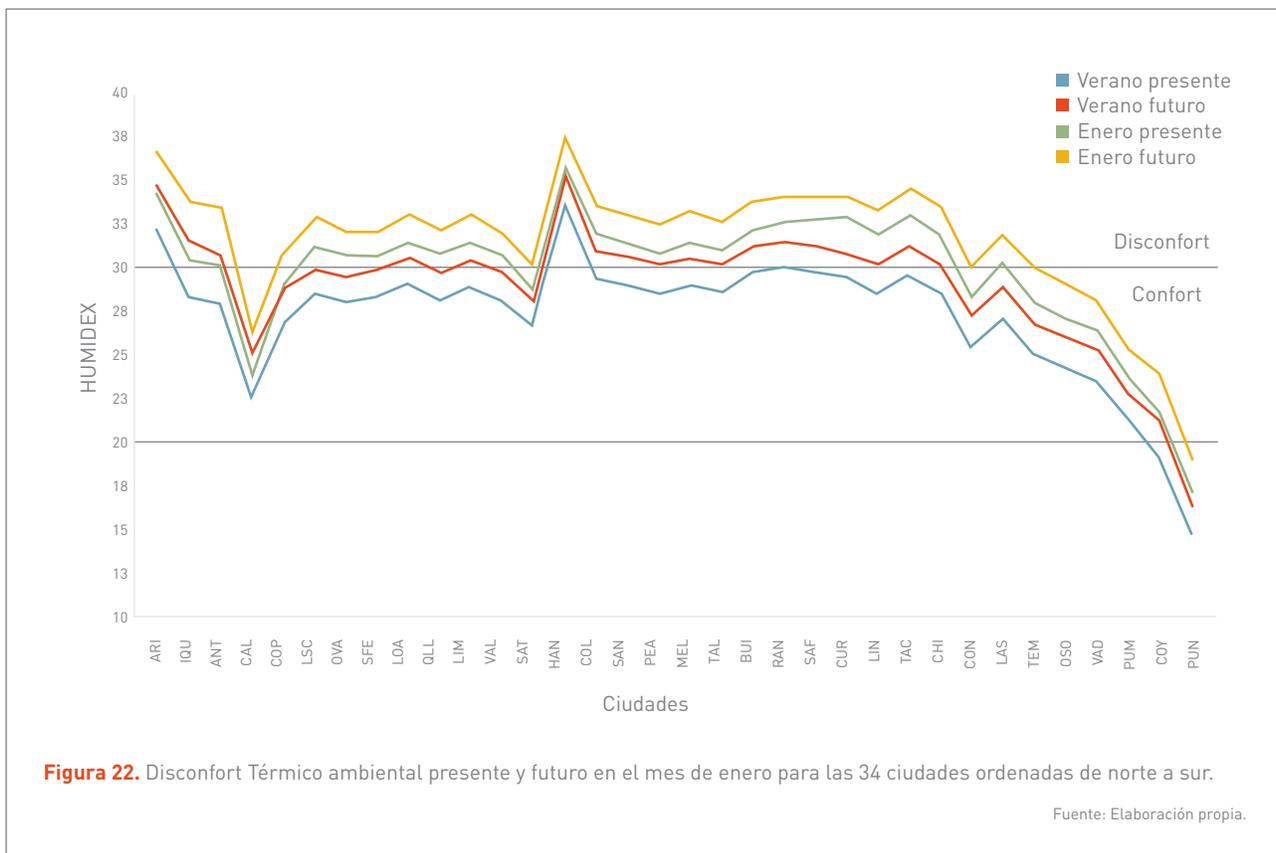
Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3 AMENAZA

El promedio del índice de Humidex, para las 34 las ciudades estudiadas, para el periodo presente, es de 26,2, registrando un aumento de su valor en 1,9 puntos para el futuro, alcanzando un valor de 28,1. Ambos valores se consideran dentro de la zona de confort térmico, de acuerdo con la clasificación del índice, lo que se expresa en que sólo cuatro ciudades se encuentren en Discomfort Térmico, entre ellas Hanga Roa, que en todos los escenarios representa el mayor valor, lo que podría explicarse

porque en la Isla de Pascua los valores de humedad relativa se mantienen altos (Figura 22), debido a su clima tropical marginal.

Por otra parte, cuando el índice es calculado para la condición máxima de verano (considerando la temperatura máxima y humedad mínima) en el mes más cálido (enero), casi todas las ciudades presentan Discomfort Térmico, solo con algunas excepciones, principalmente en las ciudades del sur y extremo austral, que mantendrían situaciones de confort térmico. Esta situación se mantiene en cinco ciudades,



al considerar el escenario futuro. Estas son, de norte a sur: Calama, Valdivia, Puerto Montt, Coyhaique y Punta Arenas.

Las ciudades costeras, en general, registran valores más bajos del índice que aquellas ubicadas a latitud similar, pero en el interior. Esto se observa al comparar los datos entre el Gran Valparaíso, Gran Santiago, Gran Concepción y Chillán, por ejemplo. Las conurbaciones se encuentran representadas con un único valor para el cálculo del Riesgo, sin embargo y como se observa en la **Tabla 21**, es posible encontrar diferencias que pueden implicar que algunas ciudades presenten confort y otras discomfort,

siendo aún más significativo cuando existen conurbaciones, como el Gran Valparaíso, integradas por ciudades costeras (Valparaíso, Viña del Mar y Concón) y ciudades interiores (Quilpué y Villa Alemana).

Por último, si bien se presentan situaciones de Discomfort Térmico en casi todo el territorio, y que se observa un aumento del índice, incrementando la Amenaza por Discomfort Térmico en el marco del escenario de cambio climático proyectado, los datos de Humidex se mantiene en rangos moderados, lo que puede relacionarse con la relación  $T^{\circ}\text{máx}-\text{Hum}\% \text{mín}$ .



Cod. Ciudad	Centros urbanos	Condición promedio (T° y H% media)			Condición máxima (T° máxima y H% mínima)		
		Presente	Futuro	Diferencia	Presente	Futuro	Diferencia
ARI	Arica	32,8	35,6	2,8	35,4	37,7	2,4
IQU	Iquique	29,6	32,8	3,2	31,5	34,7	3,3
ANT	Antofagasta	29,7	32,7	2,9	31,2	34,5	3,3
CAL	Calama	17,4	20,2	2,9	24,7	27,3	2,6
COP	Copiapó	26,1	27,9	1,8	30,0	31,8	1,8
LSC	La Serena - Coquimbo	29,2	31,0	1,8	32,2	33,9	1,7
OVA	Ovalle	27,3	29,0	1,6	31,7	33,1	1,4
SFE	San Felipe	25,9	27,8	1,8	31,7	33,2	1,5
LOA	Los Andes	26,9	28,7	1,7	32,5	34,0	1,5
QLL	Quillota - La Calera	27,3	29,0	1,7	31,8	33,2	1,4
LIO	Limache - Olmué	27,5	29,3	1,8	32,4	33,9	1,5
GVA	Gran Valparaíso	27,3	29,0	1,6	31,7	33,0	1,4
SAC	San Antonio - Santo Domingo - Cartagena	25,6	27,3	1,7	29,6	31,1	1,5
HAN	Hanga Roa	35,2	37,2	2,0	36,8	38,5	1,7
COL	Colina	27,7	29,6	1,8	33,1	34,6	1,5
GSA	Gran Santiago	27,9	29,6	1,7	32,5	34,1	1,5
PEA	Peñaflor	26,6	28,5	1,9	31,9	33,6	1,6
MEL	Melipilla	27,5	29,4	1,9	32,4	34,1	1,7
TAL	Talagante	26,7	28,6	1,9	32,1	33,7	1,7
BUI	Buín	27,6	29,5	1,9	33,2	34,8	1,6
RMG	Rancagua - Machalí	28,3	30,1	1,7	33,7	35,1	1,5
SAF	San Fernando	28,7	30,3	1,6	33,8	35,1	1,4
CUR	Curicó	28,7	30,1	1,5	33,9	35,2	1,3
LIN	Linares	27,8	29,5	1,7	32,9	34,3	1,4
TAC	Talca	29,1	30,9	1,7	34,1	35,6	1,5
CHI	Chillán	27,8	29,7	1,9	33,0	34,5	1,6
GCO	Gran Concepción	24,9	27,0	2,0	29,3	31,1	1,7
LAS	Los Ángeles	26,4	28,4	2,0	31,2	33,0	1,8
TEM	Temuco	23,5	25,8	2,3	29,0	31,0	2,0
OSO	Osorno	22,9	25,3	2,3	28,1	30,0	2,0
VAL	Valdivia	23,0	25,2	2,2	27,3	29,2	1,9
PUM	Puerto Montt	20,7	22,6	1,8	24,8	26,4	1,6
COY	Coyhaique	17,9	20,2	2,2	22,5	24,6	2,1
PUM	Punta Arenas	13,5	15,4	1,9	17,9	19,6	1,8
<b>Promedio</b>		26,2	28,1	1,9	30,6	32,3	1,7

**Tabla 21.** Detalle del Disconfort Térmico Ambiental presente y futuro para el mes de enero.

Confort térmico ambiental	Disconfort Térmico Ambiental	Valores de disconfort por frío
---------------------------	------------------------------	--------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4 RIESGOS

El mapa de Riesgo de Disconfort Térmico Ambiental integra los valores normalizados de Amenaza, Exposición y Sensibilidad (**Figura 23** y **Figura 24**). Este mapa muestra que las tres ciudades más riesgosas -en el periodo presente y futuro- son: Arica, Limache y Linares. Al contrario, las ciudades con menos Riesgo son: Antofagasta, Peñaflor y Colina, tanto para el periodo presente como en el futuro. Es importante destacar que las ciudades de Concepción, Temuco y Osorno, en el presente, se encuentran en una situación de confor-

tabilidad, pero a futuro cambian a un estado de Disconfort Térmico. El impacto del cambio climático por Disconfort Térmico Ambiental, se podría calificar como negativo, en tanto se prevé un aumento en el nivel de Riesgo para las 29 ciudades, que presentan registros de disconfort.

Como muchas ciudades del sur del país no tienen situación de disconfort por calor, debido a las temperaturas templadas y bajas, por tal motivo éstas se han excluido del mapa de Riesgo de Disconfort Térmico Ambiental. Estas ciudades corresponden a: Calama, Valdivia, Puerto Montt, Coyhaique y Punta Arenas.

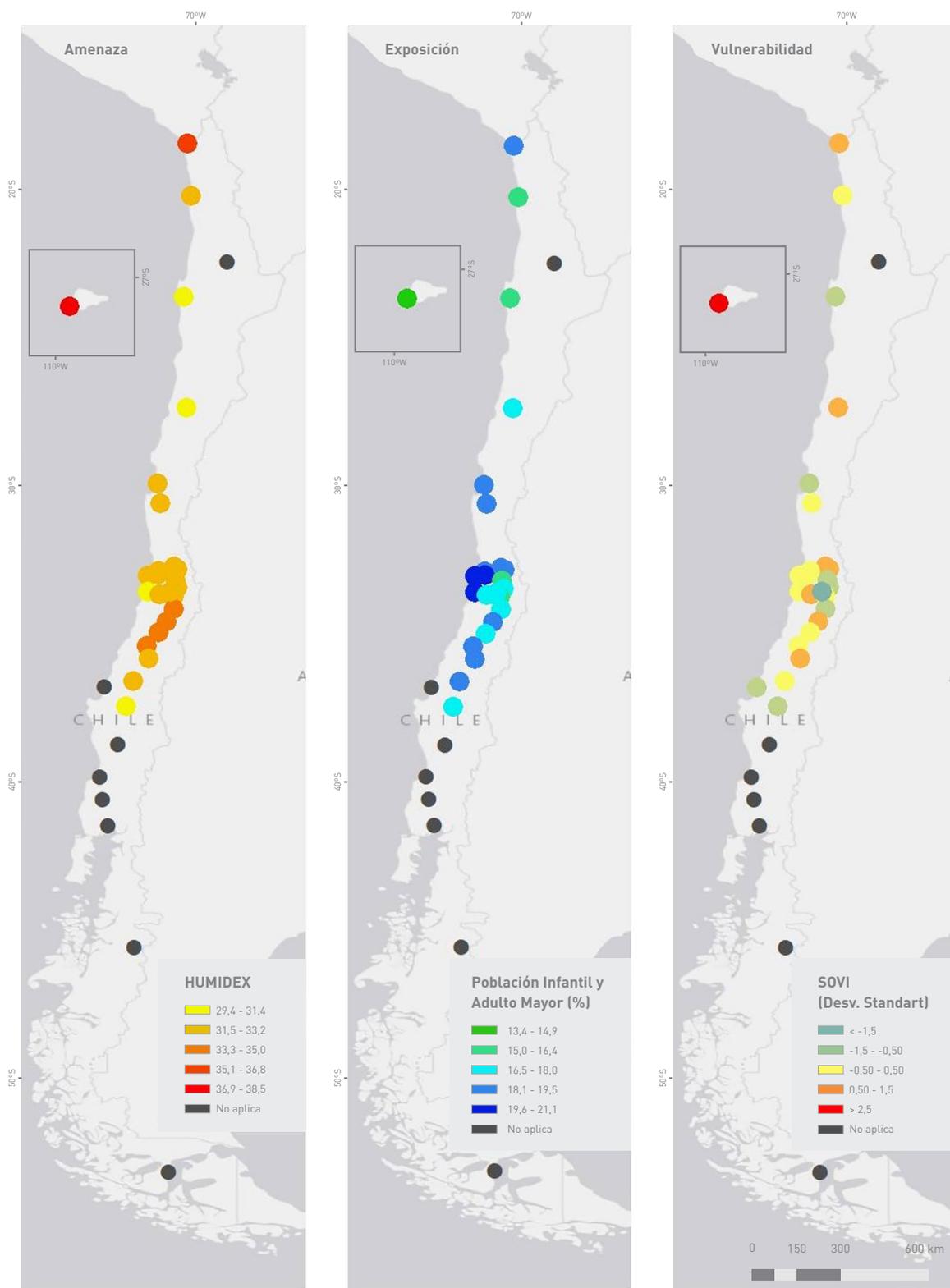


Figura 23. Mapa de factores de Riesgo por Discomfort Térmico Ambiental presente.

Fuente: Elaboración propia.

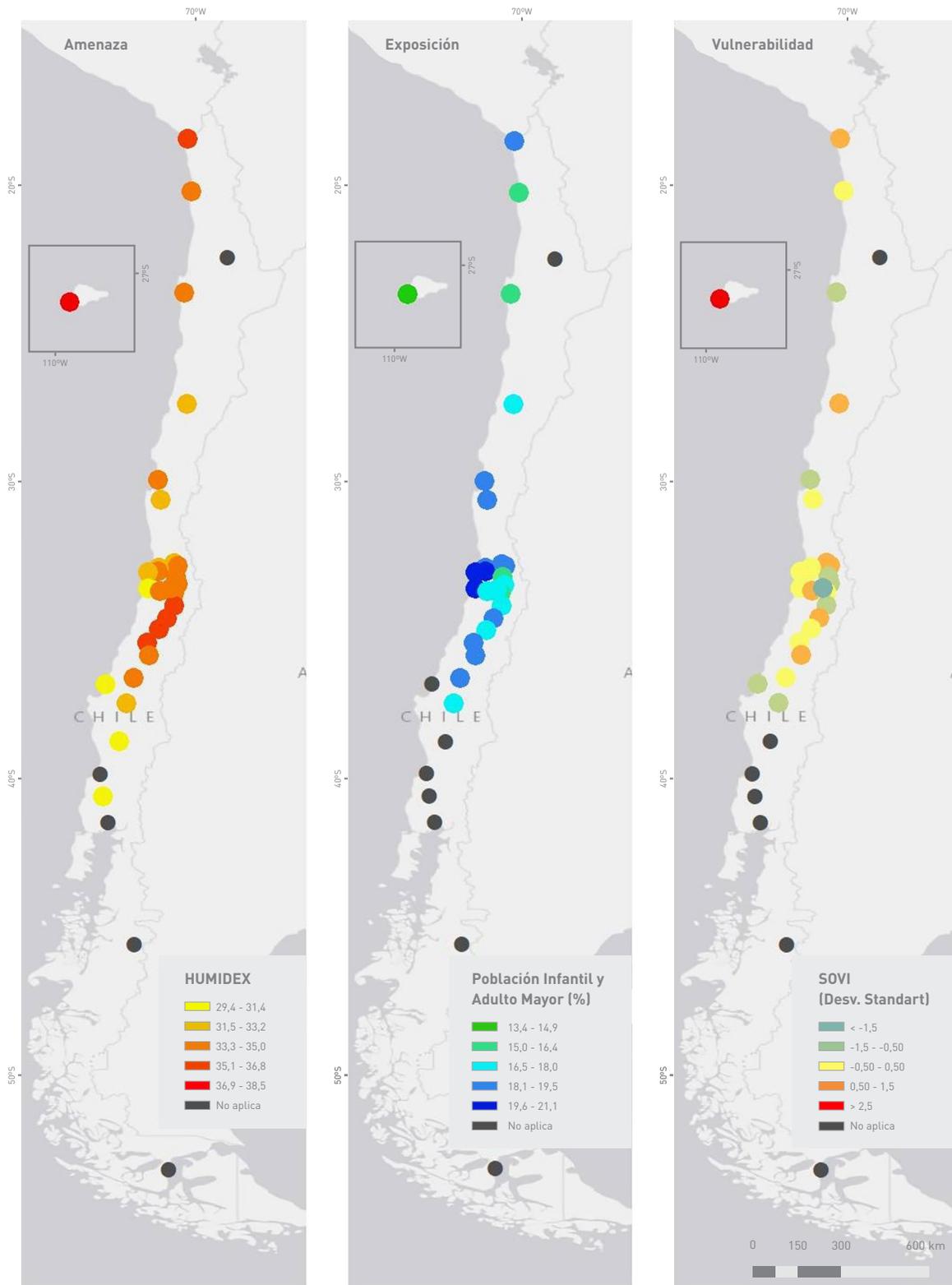


Figura 24. Mapa de factores de Riesgo por Discomfort Térmico Ambiental futuro.

Fuente: Elaboración propia.

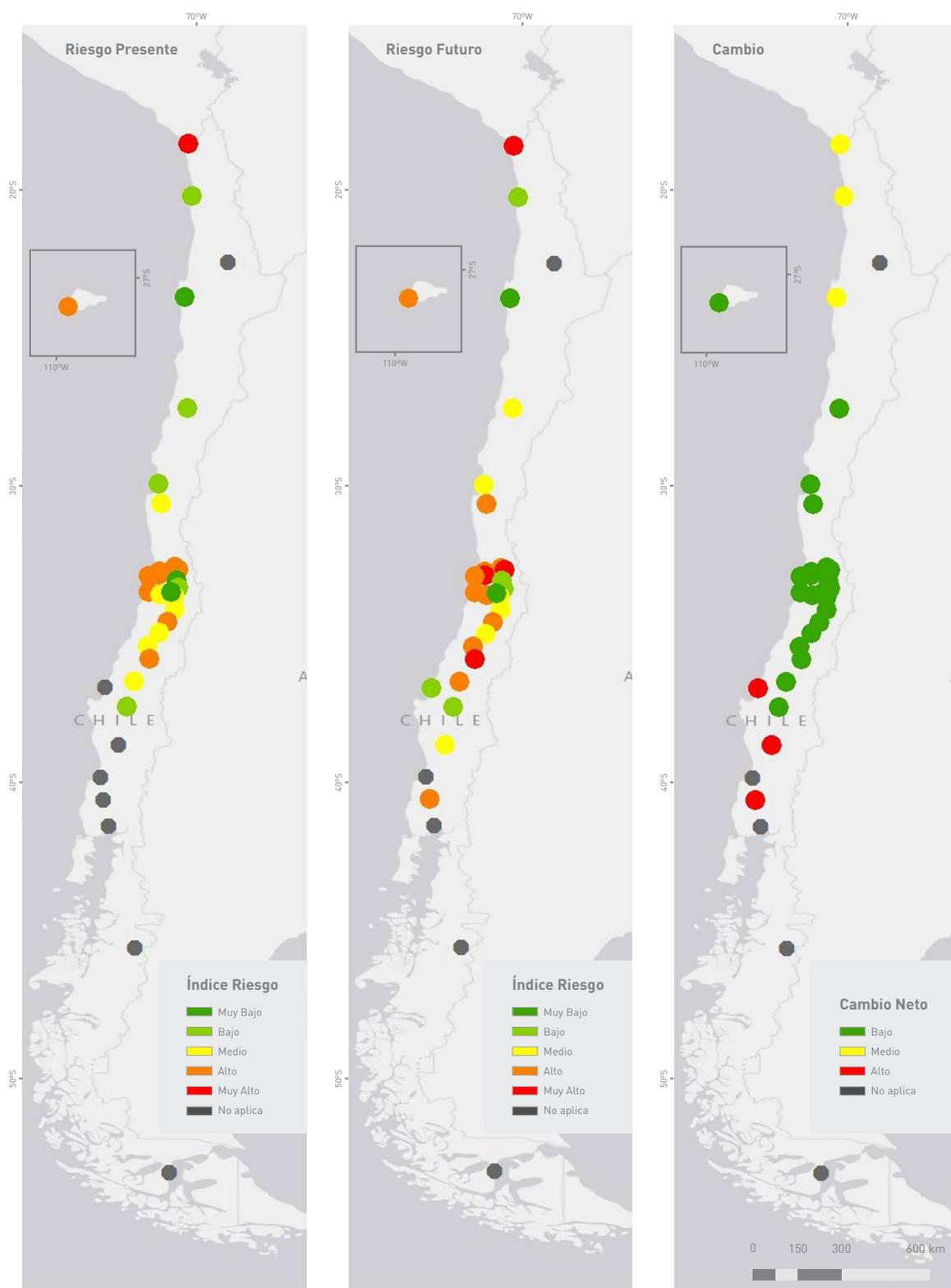


Figura 25. Mapa de Riesgo de Disconfort Térmico Ambiental presente, futuro y cambio neto.

Fuente: Elaboración propia.



## 4.3 HELADAS

---

Los cambios en los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como las heladas, afectan de manera significativa a las sociedades humanas y, en especial, a los espacios urbanos interiores y exteriores. Las temperaturas por debajo de 0 °C, a menudo llamados “días de heladas”, son indicativo de uno de estos extremos con múltiples impactos. En los informes del IPCC, se ha establecido que es “muy probable” que habría una disminución de los días de heladas, definidos como las temperaturas mínimas nocturnas, que caen por debajo de 0 °C [Meehl, Tebaldi y Nychka, 2004].

Dentro de los principales impactos de las heladas urbanas, se destacan los efectos sobre la salud de las personas, especialmente de la población más vulnerable. Los grupos más sensibles son la población infantil y adulta mayor y, también, los adultos con problemas respiratorios. Los episodios de frío extremo, junto a una mala calidad del aire en invierno, son condiciones propicias para una mayor propagación de enfermedades respiratorias y, en casos más extremos, de una mortalidad por hipotermia. Esto último es especialmente relevante en las personas en situación de calle, que se encuentran mucho más expuestas o de quienes habitan en viviendas con malas condiciones de aislación térmica.

En Chile, por su variedad climática, existen muchos eventos asociados a temperaturas extremas. De acuerdo a un estudio de la Dirección Meteorológica de Chile de los percentiles 95 y 99 y de 1 y 5 de temperatura, para el periodo 1970-2000, se observa que: Arica destaca por un peak en los eventos extremos de temperatura, para el percentil 95 y 99, en los años 1982 y 1997; Iquique muestra una mayor ocurrencia de eventos fríos, en los últimos años; Antofagasta presenta un período de mayor ocurrencia de eventos fríos, desde principios hasta mediados de los 70, luego se observan episodios cálidos en los años 1982-1993 y 1997; Copiapó destaca por una disminución de los episodios extremos; Tobaraba presentó un período de ocurrencia de eventos fríos, entre 1975 a 1981, posteriormente se observó un aumento en episodios de eventos extremos cálidos;

Pudahuel mostró un incremento de los eventos fríos, entre los años 1974 a 1976; en Los Cerrillos, se observa una disminución de los eventos fríos, hacia fines del período, y un aumento de los eventos cálidos en la misma época; situación similar es posible apreciar en Curicó, Chillán y Concepción; en Temuco, Valdivia y Osorno, se observa una disminución de los eventos extremos fríos y un paulatino aumento de los eventos extremos cálidos; en Ancud, Chaitén, Quellón, Futaleufú y Puerto Aysén, es posible apreciar una disminución en la ocurrencia de eventos de extremos fríos; Chile Chico presenta una tendencia a la disminución de los eventos extremos fríos. Coyhaique, Balmaceda, Cochrane y Punta Arenas muestran un incremento en la ocurrencia de eventos extremos cálidos, en los últimos años (DMC, 2006).

Un informe más reciente de la DMC (2020) indica que los índices asociados a las temperaturas mínimas, en el año 2019, estuvieron más cálidos de lo normal en la zona norte y se mantienen las tendencias positivas, en las extremas de la temperatura mínima, independiente si es estación costera o del interior. Algo similar ocurre con la isoterma de 0° C, donde se observa un aumento en altitud de ésta, tanto en la zona norte como en la zona central; en el sur, los cambios no son tan evidentes. En efecto, se menciona que en Puerto Montt ha aumentado el número de heladas: se observaron un total de 37 días con heladas, superando en 13 días el promedio anual.

Una de las heladas más importantes se produjo en junio del 2002, cuando las temperaturas registraron -19,2°C en la zona sur-austral, dejando 2 muertos en la región de Valparaíso y más de 50.000 afectados en todo el país. La Oficina Regional de Emergencias (OREMI) activó el estado de alerta y coordinación de la red de apoyo de las Fuerzas Armadas con los servicios públicos. La nieve acumulada en las calles dificultó el tránsito peatonal y vehicular; produjo cortes en el alumbrado público y rompimiento de las cañerías domiciliarias, por la presión del agua congelada. Los principales pasos fronterizos quedaron intransitables (LA RED, 2015).

Actualmente, existe el Plan Código Azul, que reúne a distintos actores públicos y privados, para instalar servicios

de emergencia adicionales, para las personas en situación de calle, durante los días de mayor severidad climática.

### 4.3.1 EXPOSICIÓN

La Exposición de la población frente a este Riesgo, corresponde a la misma descrita en el punto 4.1.1, para el impacto de intensidad de Isla de Calor Urbana. Esto es, población total urbana para las 34 ciudades para los años 2017 y 2065.

### 4.3.2 VULNERABILIDAD

Para la construcción del Índice de Vulnerabilidad Social frente a la Amenaza de heladas, se utilizó la metodología explicada en el punto 3.3. De esta manera se utilizaron las 25 variables base más 5 variables específicas para la Amenaza de heladas, que se definen a continuación: “Número de viviendas en campamento”(N°31), “Porcentaje de población en situación de calle”(N°30), “Porcentaje de viviendas sin certificación térmica”(N°29), “Porcentaje de viviendas que no cuentan con sistema de agua caliente”(N°28) y “Porcentaje de viviendas que no cuentan con sistema de calefacción”(N°27) (**Tabla 8**), las que se obtuvieron desde el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU, 2020), la encuesta CASEN 2017 (MIDESO, 2018) y el registro de población en situación de calle (MIDESO, 2020).

Estas variables fueron seleccionadas puesto que permiten reconocer aquellas condiciones, que aumentan la Vulnerabilidad en la población o en sus condiciones de habitabilidad frente a la Amenaza de heladas urbanas. Las personas que viven en campamentos no cuentan con viviendas, que cumplan con los estándares mínimos para aislar las bajas temperaturas, lo mismo en el caso de las viviendas construidas previo a 2007, ya que no cumplen con la norma térmica actual, que regula la materialidad y construcción de los pisos, techos y muros. En cuanto a las viviendas que no cuentan con sistema de calefacción o sistema de agua caliente, éstas fueron consideradas, puesto que la población que las habita no cuenta con ningún medio que les permita calefaccionar su hogar, frente

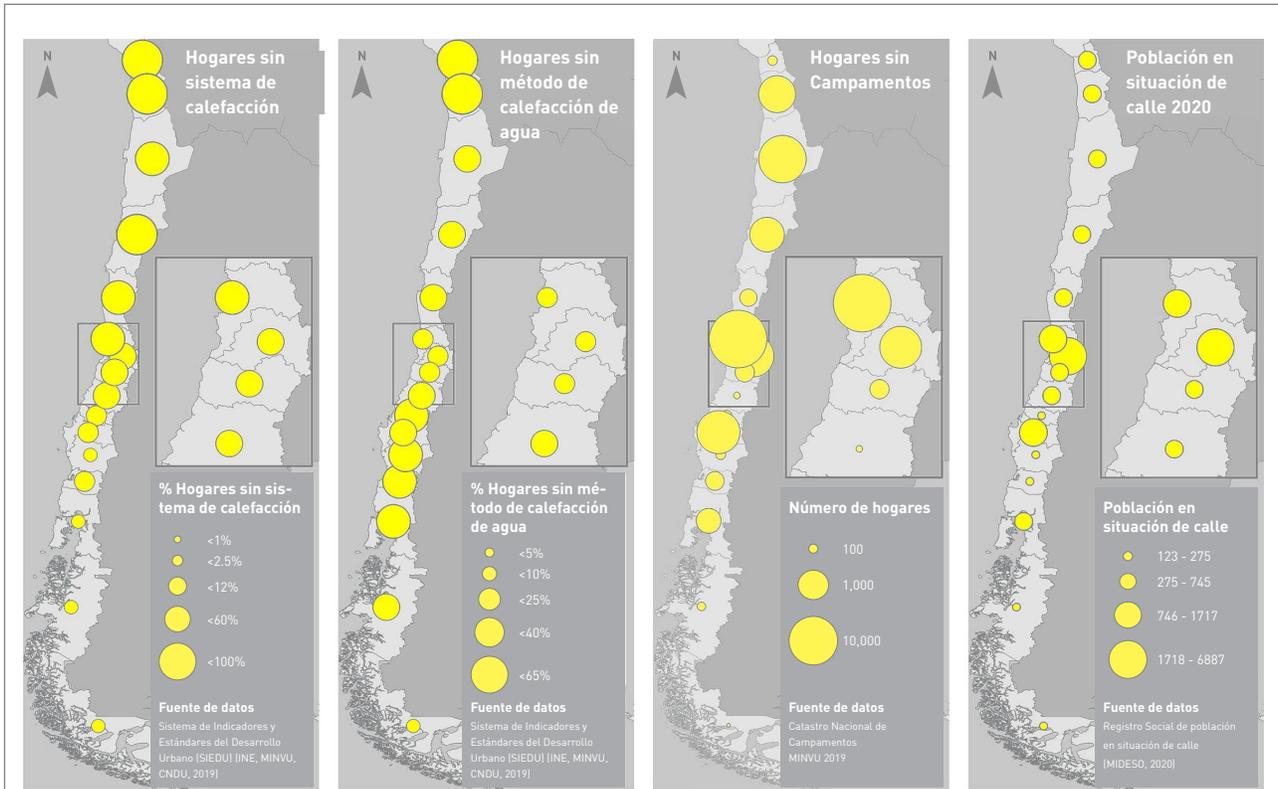
a las heladas y el no contar con agua caliente en el hogar, puede aumentar la probabilidad de adquirir diversas enfermedades respiratorias.

Finalmente, se contabiliza a la población en situación de calle, que incluye a quienes viven la mayor parte del tiempo en espacios públicos de la ciudad y que se encuentran en una condición muy vulnerable, tanto económica como social, cultural, comunitaria y educacionalmente. En este sentido, frente a la Amenaza de heladas urbanas, estas personas no cuentan con un lugar de resguardo frente a las bajas temperaturas, ni cuentan con una red de protección, por tanto, son totalmente vulnerables a este Riesgo climático.

Estos datos fueron obtenidos del Registro Social de Personas en Situación de Calle, desarrollado por el Ministerio de Desarrollo Social. Dicho registro permite identificarlas con nombre, RUN y lugar donde habitualmente habita, permitiendo conectarlas con la Red de Protección Social. A partir de esto, se pudo reconocer que la Región Metropolitana es la que acumula mayor cantidad de población en situación de calle, con 6.887 casos, seguida por la Región de Valparaíso, con 1.71; mientras que, en una mejor situación, se encuentran la Región de Magallanes, con 123 personas, en esta situación, y la Región de los Ríos con 131 personas.

A continuación, se expone la distribución geográfica de las variables específicas, para las ciudades en análisis (**Figura 26**).

En cuanto a los resultados del modelo, se obtuvo la matriz de correlaciones que se presenta en la **Tabla 22**. Se determinaron 9 factores de Vulnerabilidad, correspondiente al 74,2% de la varianza explicada, donde la pobreza multidimensional fue el factor indicado como el mayor predictor de Vulnerabilidad frente a la Amenaza de heladas. Le sigue la concentración de población dependiente, esto es, niños y adultos mayores son las personas más expuestas frente a esta Amenaza. La calidad de la vivienda y el acceso a servicios básicos, también se presentan como un factor importante.



**Figura 26.** Distribución espacial de variables específicas de SoVI heladas.

Fuente: Elaboración propia.

Además, es posible observar el rol de los sistemas de calefacción, como un indicador de Vulnerabilidad, al que se suman el hacinamiento y la población en situación de calle, las viviendas sin norma térmica y, con la menor proporción de varianza, los campamentos.

Si bien los valores de Vulnerabilidad alcanzados por las ciudades (**Tabla 23**) de Arica, Copiapó, Iquique y San Felipe son los más altos, sólo esta última se encuentra realmente en una “Muy “Alta” Vulnerabilidad por Disconfort Térmico .

Una mirada general de la **Figura 27**, permite observar que 5 ciudades en categoría de “Alta” Vulnerabilidad; 14 en nivel “Medio” y 2 en “Muy Baja” Vulnerabilidad.

Factores	Carga [%]	Nombre componentes SoVI
Factor 1	14,1%	Pobreza multidimensional
Factor 2	12,7%	Concentración de población dependiente
Factor 3	8,4%	Calidad de vivienda y acceso a servicios básicos
Factor 4	7,9%	Viviendas sin sistema de calefacción
Factor 5	7,2%	Escolaridad y cesantía
Factor 6	6,9%	Grupos vulnerables
Factor 7	6,2%	Hacinamiento y población en situación de calle
Factor 8	6,0%	Viviendas sin norma térmica y arrendadas
Factor 9	4,3%	Campamentos
<b>Varianza total</b>	<b>74,2%</b>	

**Tabla 22.** Matriz de componentes principales para SoVI de heladas.

Fuente: Elaboración propia.



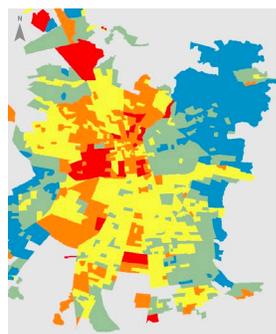
Ciudad	SOVI H	Z SOVI H	Nivel de Vulnerabilidad	Ciudad	SOVI H	Z SOVI H	Nivel de Vulnerabilidad
Peñaflor	-2,28	-2,00807	Muy Bajo	Antofagasta	0,56	-0,11126	Medio
Talagante	-1,60	-1,55144	Muy Bajo	Ovalle	0,72	-0,00303	Medio
Punta Arenas	-0,98	-1,14238	Bajo	La Serena - Coquimbo	0,82	0,06449	Medio
Temuco - Padre Las Casas	-0,89	-1,08053	Bajo	Los Andes - Calle Larga	1,09	0,24357	Medio
Gran Santiago	-0,87	-1,06818	Bajo	Chillán - Chillán Viejo	1,11	0,25464	Medio
Gran Concepción	-0,55	-0,85376	Bajo	Curicó	1,17	0,29692	Medio
Calama	-0,47	-0,80206	Bajo	Quil.-La Calera- Hij.- La Cruz	1,40	0,44996	Medio
San Fernando	-0,42	-0,76509	Bajo	Gran Valparaíso	1,43	0,46974	Medio
Valdivia	-0,36	-0,72839	Bajo	Melipilla	1,49	0,50709	Alto
Los Ángeles	-0,22	-0,63525	Bajo	Limache	1,75	0,68037	Alto
Talca -Culénar	-0,11	-0,56179	Bajo	Osorno	1,76	0,69212	Alto
Coyhaique	0,09	-0,42759	Medio	San Ant.-Cart.- L. Cruces-Sto. Dom.	1,87	0,76518	Alto
Rancagua	0,09	-0,42685	Medio	Linares	1,93	0,80008	Alto
Colina	0,13	-0,39648	Medio	San Felipe, V. Los Almend., Sta. María	3,02	1,52983	Muy Alto
Hanga Roa	0,33	-0,26269	Medio	Iquique - Alto Hospicio	3,58	1,90438	Muy Alto
Buín	0,48	-0,16577	Medio	Copiapó	4,02	2,19608	Muy Alto
Puerto Montt	0,50	-0,15113	Medio	Arica	4,16	2,28731	Muy Alto

**Tabla 23.** Valores SoVI por ciudad (H).

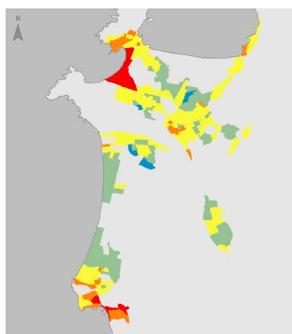
Fuente: Elaboración propia.



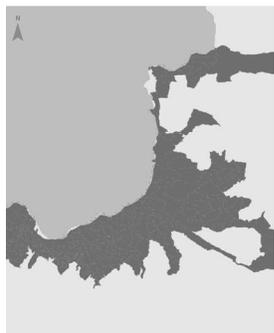
### Vulnerabilidad Social para heladas Urbanas



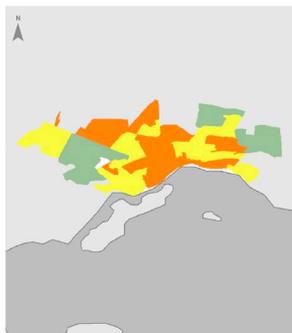
Gran Santiago



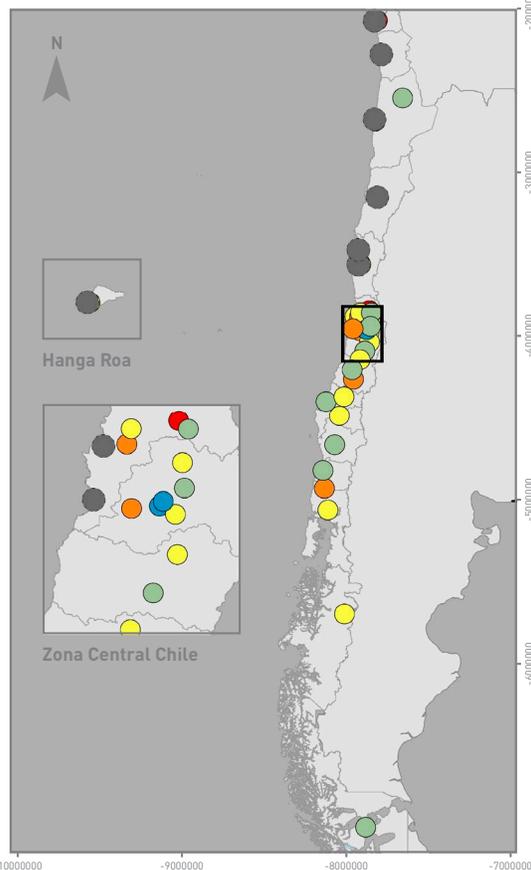
Gran Concepción



Gran Valparaíso



Puerto Montt



Hanga Roa

Zona Central Chile

#### Índice de Vulnerabilidad Social



#### Fuente

CASEN 2017: MINVU  
CENSO 2017: SIEDUU

#### Datos Cartográficos

Chile Continental: WGS84 H19S  
Chile Insular: WGS84 H12S

Figura 27. Vulnerabilidad para heladas.

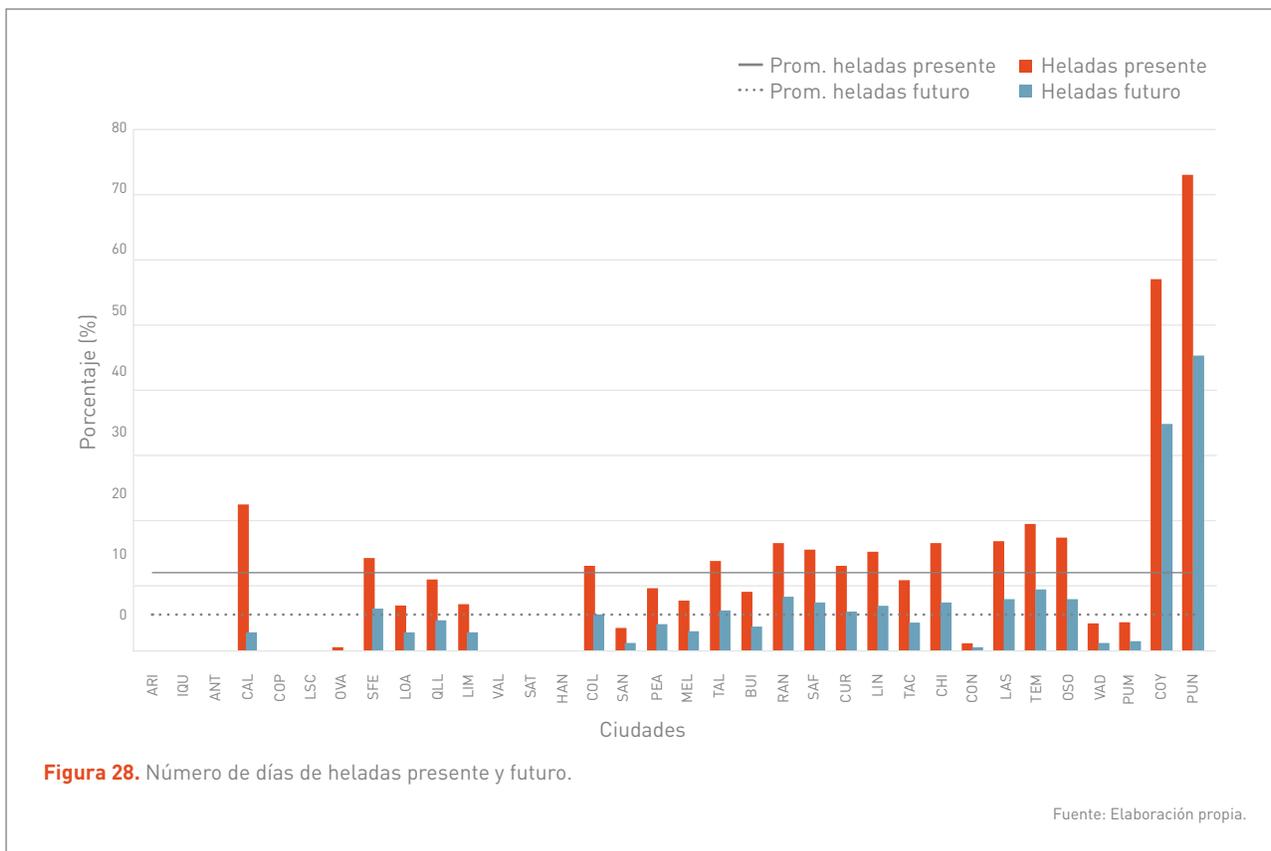
Fuente: Elaboración propia.

### 4.3.3 AMENAZA

En general, se observa que el promedio del número de días con heladas en los inviernos, en el presente, es de 11,6, y a futuro (2065) se observa una disminución a 5,6 días, lo que equivale a una disminución promedio de 6 días menos en dicha estación del año, cuando la temperatura mínima es igual o inferior a 0°C. Este valor considera solo a las ciudades que registran heladas, ya que como se observa en la **Figura 28**, existe un número importante de ciuda-

des, que no registran heladas durante el año, las que se ubican en la zona norte del país, con la excepción del Gran Concepción, ubicada en la zona centro sur, en la costa.

Así mismo, en el gráfico es posible observar que las ciudades de la zona austral concentran el número más alto de días con heladas invernales, alcanzando en el presente 56 y 73 días, en Coyhaique y Punta Arenas, respectivamente. El tercer lugar en la mayoría de los casos —entre las ciudades estudiadas en la mayoría de los casos— lo ocupa



la ciudad de Calama, que, si bien se encuentra en la zona norte, presenta un comportamiento climático distinto, debido a la altitud en la que está emplazada.

En el presente, a nivel general, se observa que el promedio con heladas en invierno es de 11,6 días, y en el futuro será de 5,6, lo que equivale a una disminución promedio de 6 días menos en que la temperatura mínima será igual o inferior a 0 °C. Este valor considera solo a las ciudades que registran heladas, ya que existe un número importante de ciudades que no las presentan durante el año, las que se ubican principalmente en la zona norte del país (Arica, Iquique - Alto Hospicio, Antofagasta, Copiapó, La Serena - Coquimbo y Ovalle) y las ciudades costeras de Gran Valparaíso, conurbación San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Santo Domingo y Hanga Roa.

Es posible observar que las ciudades de la zona austral concentran el número más alto de días con heladas invernales: Coyhaique y Punta Arenas, presentan 56 y 73 días con heladas al presente, respectivamente. El tercer lugar lo ocupa la ciudad de Calama, que, si bien se encuentra en la zona norte, presenta un comportamiento climático distinto, debido su clima de altura. Se prevé que las heladas pasarán de 22,3 días a 2,8 días en el futuro.

Todas las ciudades registran una disminución en el número de días con heladas promedio, en invierno, destacando Temuco, Osorno y Los Ángeles, con casi 9 días menos de heladas en el futuro, lo que se puede interpretar como un impacto positivo del cambio climático.



Ciudad	Presente	Futuro	Dif.
Arica	0	0	-
Iquique - Alto Hospicio	0	0	-
Antofagasta	0	0	-
Calama	22,3	2,8	-19,5
Copiapó	0	0	-
La Serena - Coquimbo	0	0	-
Ovalle	0	0	-
San Felipe	13,8	6,1	-7,7
Los Andes - Calle Larga	6,7	2,5	-4,3
Quillota - La Calera - La Cruz - Hijuelas	10,8	4,5	-6,3
Limache - Olmué	7,3	2,7	-4,5
Gran Valparaíso	0	0	-
San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Santo Domingo	0	0	-
Hanga Roa	0	0	-
Colina	12,9	5,7	-7,2
Santiago	3,3	1,1	-2,3
Peñaflor	9,5	4,0	-5,6
Melipilla	7,6	2,9	-4,8
Talagante	13,5	6,0	-7,5
Buín	8,7	3,7	-5,1
Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios	16,5	8,3	-8,3
San Fernando	15,1	7,5	-7,6
Curicó	12,8	5,9	-6,9
Linares	14,8	6,8	-8,0
Talca - Culeñar	10,7	4,2	-6,5
Chillán - Chillán Viejo	16,4	7,4	-9,0
Gran Concepción	0,9	0,2	-0,8
Los Ángeles	16,6	7,9	-8,7
Temuco	19,2	9,3	-9,9
Osorno	17,3	7,8	-9,5
Valdivia	4,0	1,1	-2,9
Puerto Montt	4,2	1,3	-2,9
Coyhaique	56,8	35,1	-21,7
Punta Arenas	73,2	45,6	-27,6
<b>Promedio</b>	<b>11,6</b>	<b>5,6</b>	<b>-6,0</b>

**Tabla 24.** Días de heladas presente y futuro.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.4 RIESGOS

El mapa de Riesgo de heladas integra los valores normalizados de Amenaza, Exposición y Sensibilidad. Dicho mapa muestra que las tres ciudades más riesgosas, en el periodo presente, son San Felipe, Osorno y Gran Santiago (**Figura 29**). Mientras que, a futuro las con mayor Riesgo, serán: San Felipe, Rancagua - Machalí y Osorno (**Figura 30**). Al contrario, las ciudades con menos Riesgo son: Peñaflor, Talagante y Valdivia, tanto para el periodo presente como en el futuro.

El impacto del cambio climático en las heladas, se podría calificar como positivo, en tanto se pronostica una disminución en el número de días con temperaturas bajo 0 °C, en las 25 ciudades con registros de heladas. Sin embargo, al integrar los factores de Amenaza, Exposición y Vulnerabilidad, 23 disminuyen su Riesgo (cambio positivo) y solo dos lo aumentan (cambio negativo), pero de manera muy marginal (Peñaflor y San Felipe).

Como se señaló, muchas ciudades costeras, especialmente las del norte del país, no tienen registro de heladas, por tal motivo éstas se han excluido del mapa de Riesgo de heladas.

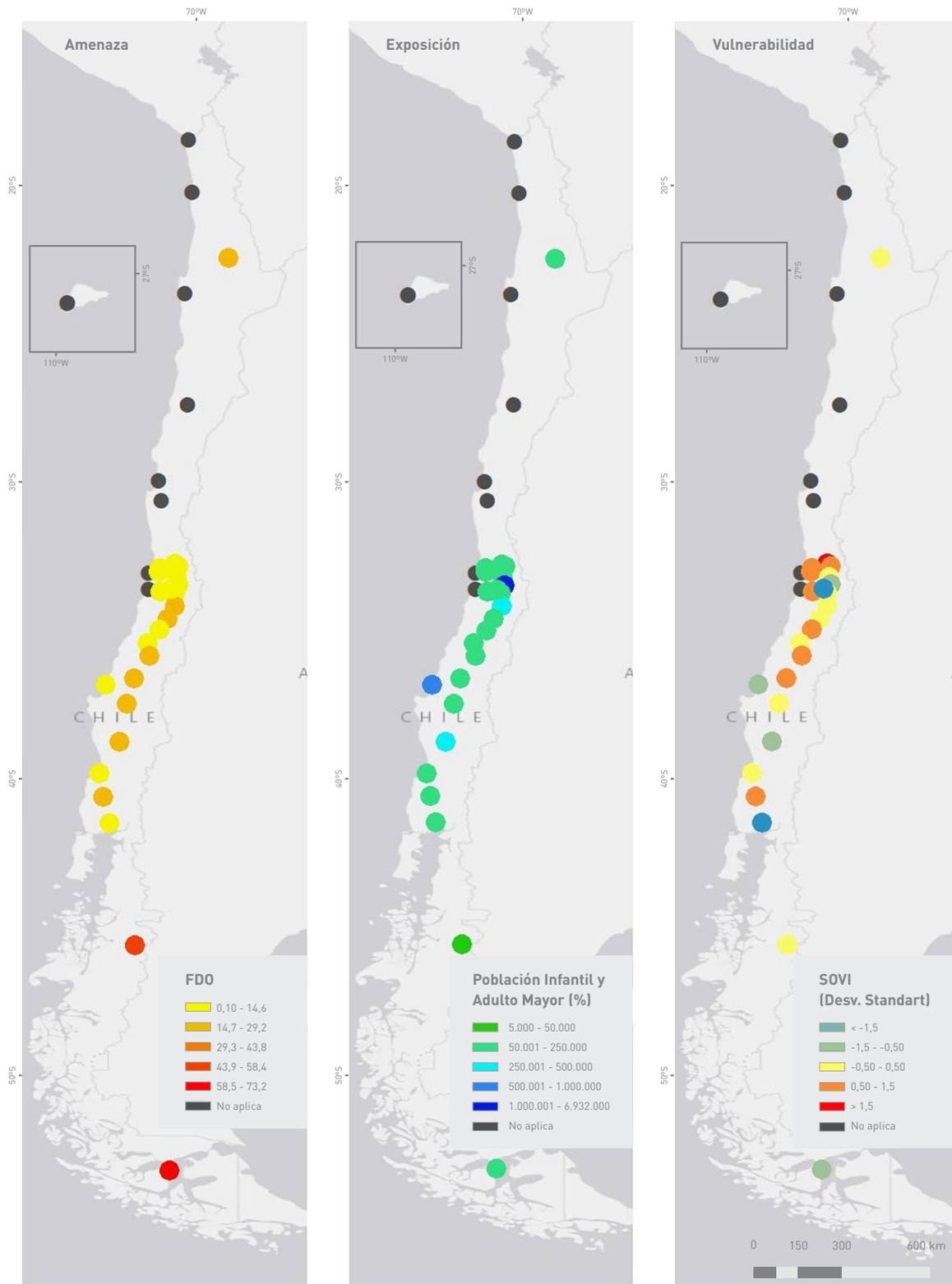
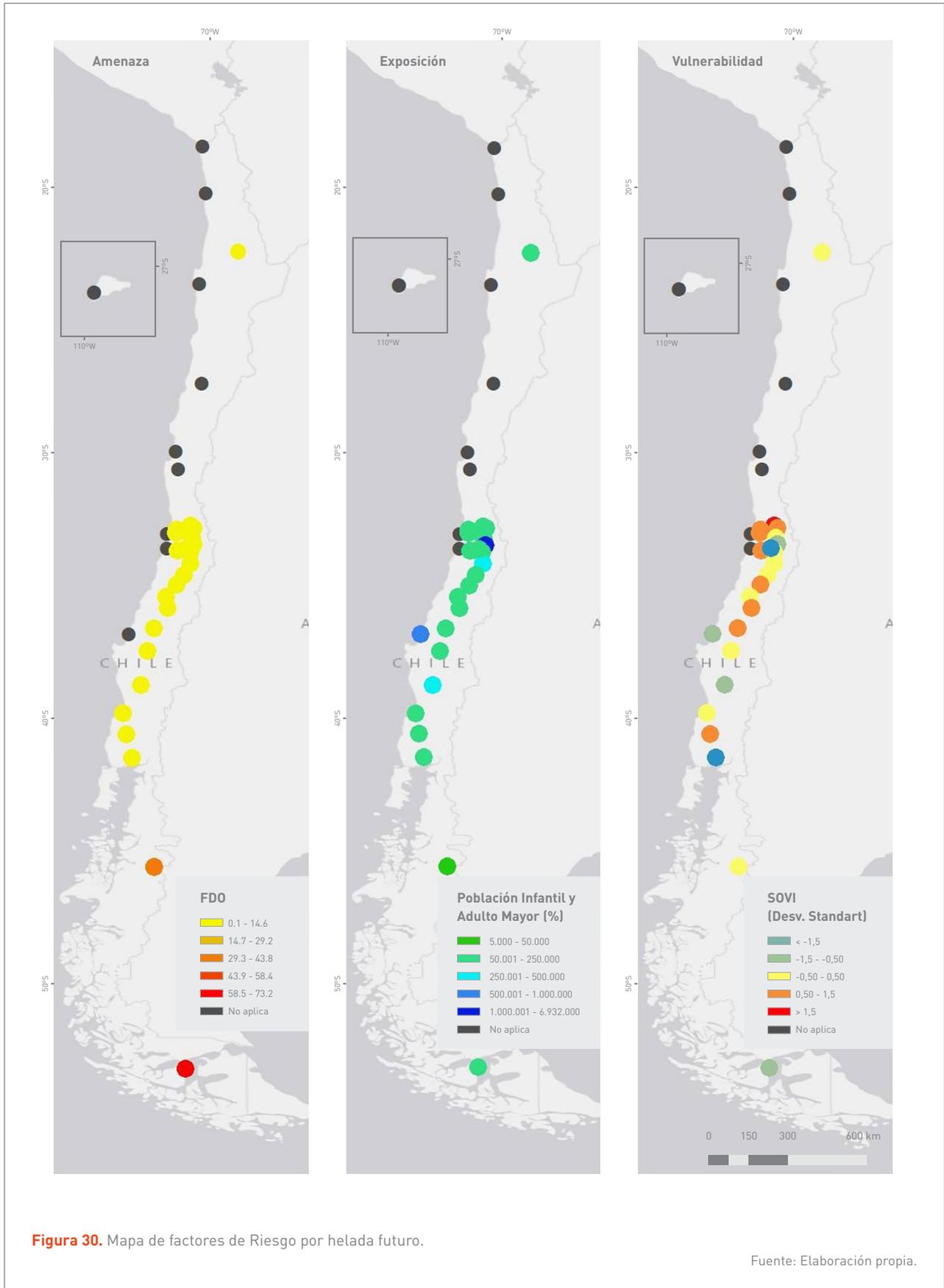


Figura 29. Mapa de factores de Riesgo por helada presente.

Fuente: Elaboración propia.



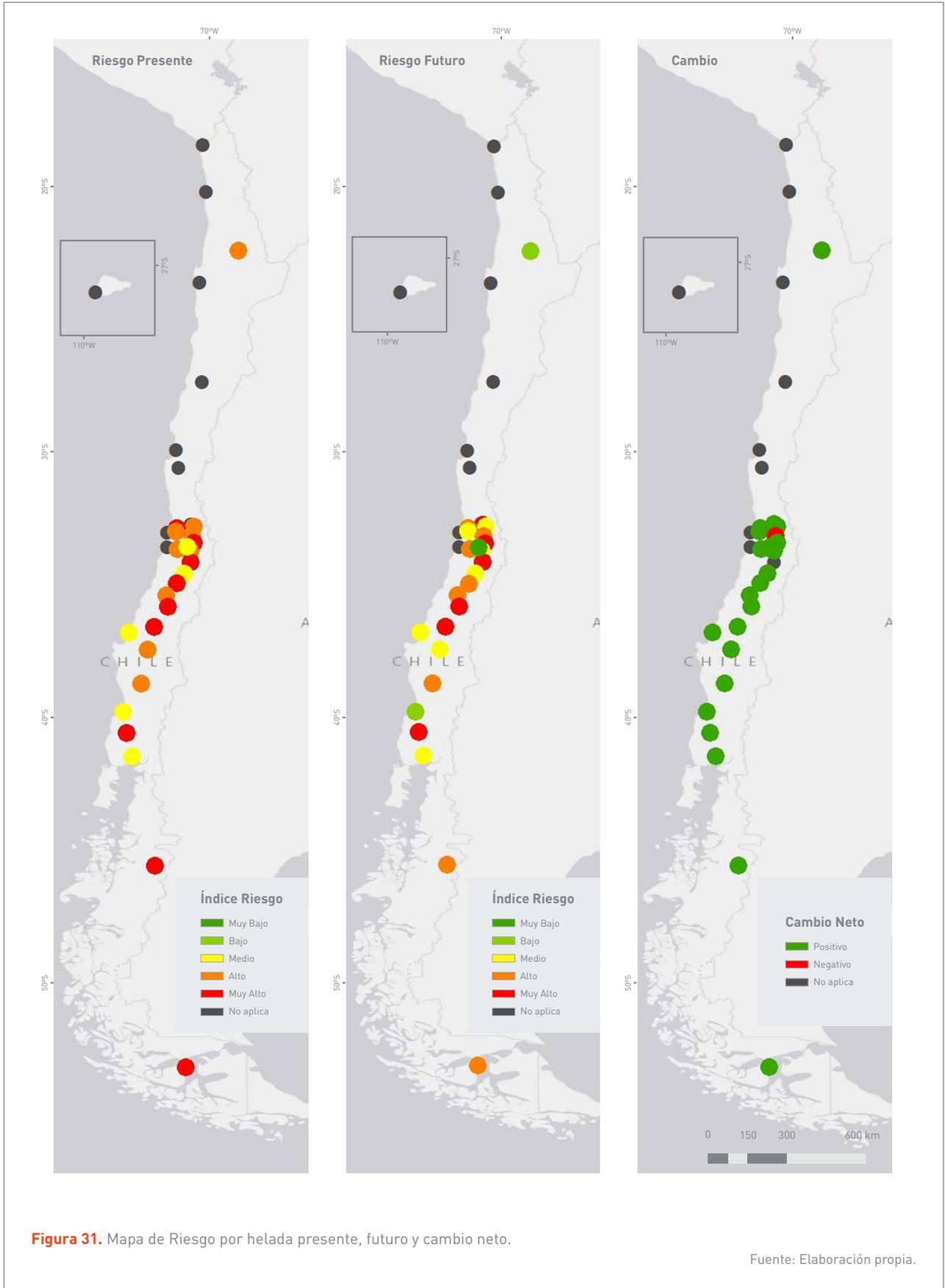
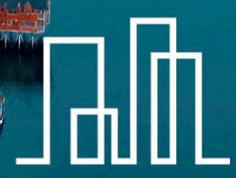


Figura 31. Mapa de Riesgo por helada presente, futuro y cambio neto.

Fuente: Elaboración propia.



# 5

## CONCLU- SIONES

Los resultados obtenidos permiten representar adecuadamente los Riesgos climáticos, que afectarán a las principales ciudades chilenas, especialmente en el ámbito del subsistema edificaciones y del uso del espacio público exterior, en función del cambio climático estimado. Si bien, pueden no ser los impactos más extremos del clima que las afectan, son representativos de las problemáticas particulares de las grandes ciudades y ciudades medias, como es el uso residencial y del espacio público cotidiano.

El modelo de cambio de uso de suelo aplicado, pronostica un aumento de 98.565 nuevas ha urbanas, que equivaldría a 3.301.079 nuevos habitantes urbanos al 2065, en las 34 ciudades analizadas, lo que representa un aumento de un 27% de la Exposición frente a las Amenazas del cambio climático. El modelo plantea un crecimiento sostenido de las manchas urbanas y consolidación de conglomerados urbanos. Como limitante del modelo de estimación de población aplicado, se puede mencionar que -por razones metodológicas- no se pudieron incluir las 25 nuevas ciudades sobre 50 mil habitantes, proyectadas para el 2065.

En relación con el impacto por aumento de intensidad de ICU, se puede afirmar que Santiago, por su gran exten-

sión, es la ciudad con mayor impacto tanto presente como futuro. La validación con datos de otras fuentes reafirma tal tendencia. Este fenómeno también se repite en las grandes ciudades y las de porte medio y plantea grandes desafíos para aminorarlo, a través de medidas que no sean perjudiciales para el cambio climático, como son, el uso de combustible fósil, para efectos de refrigeración intradomiliaria. Sin duda, las viviendas más precarias, así como los campamentos, serán las más afectados por la ICU. Se puede concluir que las ciudades de valles interiores, serán las más impactadas, especialmente de la zona central.

El impacto del cambio climático en espacios públicos exteriores, por Discomfort Térmico Ambiental, igualmente será significativo a futuro, considerando los aumentos de temperatura y también por la humedad atmosférica. Esto afectará notablemente a las ciudades con pocas áreas verdes y planteará grandes retos para mejorar la calidad ambiental de los espacios verdes existentes. De los cambios pronosticados, se puede inferir que casi todas las ciudades costeras del norte y del valle central hasta Osorno podrían sufrir cambios negativos, respecto a su situación de confort actual.



Finalmente, el impacto del cambio climático en las heladas, se podría calificar como beneficioso, en tanto se prevé una disminución en el número de días con heladas en las ciudades y, con ello, se esperaría una menor tasa de morbilidad y mortalidad debido a esta causa. Esto es especialmente significativo en ciudades con un alto porcentaje de viviendas con malas condiciones energéticas y para las personas en situación de calle. Algunas ciudades al interior de la zona central serían las más afectadas, no obstante, no son las que registran las temperaturas más frías a nivel nacional. Se puede concluir, quizás como una de las únicas cadenas de impacto del Atlas, que se prevé un impacto positivo para las ciudades por el cambio climático, especialmente para la población más vulnerable, que sufre por los episodios de heladas, aunque urgentemente se deben mejorar las condiciones de vivienda y de la población que vive en situación de pobreza.

En relación con el índice SoVI aplicado, se puede concluir su gran capacidad para representar las condiciones de Sensibilidad de los sistemas urbanos, para las distintas Amenazas evaluadas. En general, los componentes, que marcan la Vulnerabilidad de las ciudades chilenas, son la "Pobreza multidimensional", la "Concentración de población dependiente" y la "Calidad de las viviendas". Sin embargo, se logró determinar que las variables específicas para cada Amenaza, también juegan un rol y que deben ser consideradas para la disminución de la Vulnerabilidad. Ejemplo de esto es la "Población en situación de calle", totalmente vulnerable frente a la Amenaza de heladas, lo que se manifiesta al presentar el 6,2% de la varianza explicada del modelo de Vulnerabilidad frente a esta Amenaza.

Si bien el contexto de las 34 ciudades como ubicación en la cuenca hidrográfica, posición costera, geomorfología, entre otros factores geográficos, son muy importantes para entender los impactos analizados, por el tiempo, escala y alcance de este estudio, no fue posible profundizar en los aspectos particulares de cada ciudad a una escala más detallada.

Como recomendación futura, se pueden incluir nuevas variables de Vulnerabilidad, que permitan ahondar en las

características de las Amenazas consideradas, así como también, variables de adaptación y resiliencia. Este último aspecto es desarrollado por el Grupo de Trabajo de Asentamientos Humanos.

De todos modos, para la escala urbana es importante considerar los siguientes criterios, para disminuir los Riesgos y aumentar la adaptación y con ello lograr una mayor resiliencia urbana:

- > **Gobernanza:** proponer nuevos mecanismos de colaboración y alianzas público-privada-sociedad civil que logren robustecer la participación ciudadana, los liderazgos locales, la democracia y la coordinación interestamental. Un ejemplo puede ser la conformación de Comités Ambientales Comunales y Comité Ambiental Municipales dentro de marco del SCAM. Al mismo tiempo es fundamental incluir al sector privado para proponer y gestionar medidas de adaptación urbana, así como a las Organizaciones no Gubernamentales (ONG) que realizan un importante trabajo en estas materias. Es urgente pensar en un modelo de metagobernanza para la gestión climática de nuestras ciudades, donde los distintos circuitos del funcionamiento de la ciudad (energía, transporte, alimentos, residuos y recursos) no dialogan con los sectores que los manejan ni tampoco con los sistemas de planificación.
- > **Normativos:** aprobar y aplicar la ley de cambio climático y discutir modificaciones sustantivas a la ley General de Urbanismo y Construcciones y ley Orgánica Constitucional de Municipalidades que permitan adoptar regulaciones urbanas específicas y geográficamente diferenciadas. Resulta fundamental mejorar los estándares de los planes reguladores y los alcances de los estudios de factibilidad sanitaria frente a los impactos del cambio climático, así como considerar aspectos de diseño y regulación de cañones urbanos que permitan disminuir el efecto de Isla de Calor Urbana y mejorar las condiciones de los espacios públicos. Del mismo modo, es importante promulgar ordenanzas locales que incluyan iniciativas de adaptación local.

- > **Institucionales:** fortalecer la gestión ambiental local e iniciativas como el sistema SCAM, en especial el nivel de Gobernanza Ambiental - Climática Comunal (ex Acreditación de Vocación Ambiental Comunal). A nivel de gestión local es importante tener un encargado de gestión ambiental y de cambio climático.
- > **Financieros:** buscar fondos y recursos económicos que permitan implementar medidas y proyectos sostenibles. Es importante buscar instancias de postulación a fuentes de financiamiento nacionales o internacionales para implementar medidas de adaptación.
- > **Tecnológicos:** fomentar la innovación para conseguir ciudades más eficientes y resilientes. Por ejemplo, diseño de espacios públicos, optimización del agua para riego de áreas verdes, uso de energías renovables, entre otras.
- > **Aumentar la conciencia y ética ambiental en la toma de decisiones en todos los niveles:** acá es fundamental las iniciativas de educación ambiental tanto formal como no formal.
- > **Culturales:** propiciar un cambio de paradigma en todos los niveles de la sociedad que permita implementar medidas de mitigación y adaptación.
- > **Sociales:** reducir la pobreza, mejorar la calidad de vida y la educación ambiental. Por ejemplo, se puede monitorear indicadores integrados como el índice de desarrollo humano a escala intraurbana.
- > **Científicos:** conectar la actividad científica con el mundo público. Por ejemplo, evaluar cantidad de ciudades que integran el conocimiento científico en sus medidas de gestión urbana.
- > **Instrumentos de planificación territorial:** evaluar zonas Amenazadas (y Riesgos) que permitan afrontar las Amenazadas climáticas en los Planes Reguladores. En esta línea es fundamental hacer un seguimiento a los planes reguladores evaluados con el sistema de Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), especialmente

en lo que se refiere a las oportunidades y Riesgos que implica el cambio climático.

- > **Participación ciudadana:** potenciar las redes y número de personas pertenecientes a organizaciones sociales para asegurar el éxito en medidas de adaptación urbana. Una sociedad más organizada y comunicada permite enfrentar de mejor forma situaciones extremas y de Riesgos. Es fundamental que la sociedad civil tenga mayor injerencia en las políticas de adaptación local.
- > **Políticos:** avanzar en la aprobación de la política nacional de ordenamiento territorial (PNOT) y actualizar la política nacional de desarrollo sustentable del año 1998 y su respectiva agenda ambiental urbana. También es importante evaluar los avances de la política nacional de desarrollo urbano (PNDU), así como impulsar la aprobación de los planes regionales de ordenamiento territorial (PROT) y planes locales de adaptación urbana. Finalmente, se considera muy importante que los gobiernos locales (Alcaldes y Concejales) den continuidad a las políticas, planes, programas y proyectos de adaptación urbana, independiente de la orientación política.

Finalmente, los Riesgos mapeados -en este Atlas de Riesgos de Ciudades- permiten representar una gran variedad de condiciones geográficas y climáticas de las ciudades analizadas, demostrando que ningún área urbana y subsistema quedan exentos de los impactos del cambio climático y que, a su vez, las ciudades son claves para enfrentar los desafíos de mitigación y adaptación.



1029



# 6

## REFERENCIAS

- Alexander, L. V., et al. (2006). *Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation*. J. Geophys. Res., 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- Álvarez, R. (1998). La Isla de Calor en Valladolid. En F. Fernández, E. Galán y Cañada, R. (Eds.), *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Madrid, Editorial Parteluz: 231-239.
- Berlanga, C. García, R. López, J. & Ruiz, A. (2010). "Patrones de cambio de coberturas y usos del suelo en la región costa norte de Nayarit (1973-2010)". *Investigación Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 72, pp. 7-22.
- Capelli de Steffens, A.; Piccolo, M. y Campo de Ferrera, A. (2005). *Clima urbano de Bahía Blanca*, Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.
- Croiset, M. (1976). *Humedad y temperatura en los edificios: condensaciones y confort térmico de verano y de invierno*. Barcelona, editores técnicos asociados.
- Cueva, A.; Lopera, F.; & Tornero, J. (2006). *Ciudad y confort ambiental: estado de la cuestión y aportaciones recientes*. Cuadernos de Geografía 80, 147-182.
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. (2003). *Social Vulnerability to Environmental Hazards*. *Social Science Quarterly (Wiley-Blackwell)*, 84(2), 242-261. Retrieved from <http://10.0.4.87/1540-6237.8402002>.
- De Loyola Hummell, B. M., Cutter, S. L., & Emrich, C. T. (2016). *Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil*. *International Journal of Disaster Risk Science*, 7(2), 111-122. <https://doi.org/10.1007/s13753-016-0090-9>.
- Díaz, J.; Carmona, R.; Mirón, I.; Ortiz, C. y Linares, C. (2015). *Comparison of the effects of extreme temperatures on daily mortality in Madrid (Spain), by age group: the need for a cold wave prevention plan*. *Environmental Research* 143, 186 – 191.
- DMC. (2006). *Eventos meteorológicos severos ocurridos en Chile continental: Descripción y patrones sinópticos tipos asociados*.



- Santiago de Chile: Dirección Meteorológica de Chile, Climatología y Meteorología Aplicada.
- DMC. (2020). *Reporte Anual de la Evolución del Clima en Chile. 2019. Santiago de Chile*: Dirección Meteorológica de Chile, Oficina de Cambio Climático de la Sección de Climatología.
- Eastman, J. R. 2012. *IDRISI Selva GIS and image processing software version 17.0*. Clark Labs. Worcester, MA USA. 321 p.
- Fernández García, F. (2001). *Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y su aplicación al área de Madrid*. *Proyectos y métodos actuales en Climatología* 4, 41–66.
- Frigerio, I., & De Amicis, M. (2016). *Mapping social vulnerability to natural hazards in Italy: A suitable tool for risk mitigation strategies*. *Environmental Science & Policy*, 63, 187–196. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSCL.2016.06.001>.
- García, M. (2019). *Thermal Differences, Comfort/Discomfort and Humidex Summer Climate in Mar del Plata, Argentina*. En: Henríquez, C. y Romero H. (eds.), *Urban Climates in Latin America*. Cham, Switzerland: Springer, 83-110.
- GIZ (2017). *Management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Guerra, J. (2008). *Diseño sustentable y calidad bioclimática del espacio público en zonas áridas*. *Revista Arquitectura del Sur* 34, 30 – 43.
- Guillard-Gonçalves, C., Cutter, S. L., Emrich, C. T., & Zêzere, J. L. (2014). *Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal*. *Journal of Risk Research*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/13669877.2014.910689>.
- Guzmán, F. & Ochoa de la Torre, J. (2014). *Confort térmico en los espacios públicos urbanos. Clima cálido y frío semi-seco*. *Revista Hábitat Sustentable* 4(2), 52-63.
- Henríquez, C. (2014). *Modelando el crecimiento de ciudades medias. Hacia un desarrollo urbano sustentable*. Ediciones UC, Colección Textos Universitarios.
- Henríquez, C. (2019). *Impactos y Adaptación en Ciudades*. In J. C. Castilla, F. J. Meza, S. Vicuña, P. Marquet, & J.-P. Montero (Eds.), *Cambio Climático en Chile : ciencia, mitigación y adaptación* (pp. 141–157).
- Henríquez, C. & Romero, H. (2019). *Urban climates in Latin America*. In *Urban Climates in Latin America*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 409 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4>.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2017). *Microdatos del Censo de Población y Vivienda 2017*.
- Instituto Nacional de Estadística (INE). (2019). *Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos 2019*.
- INE, & MINVU. (2018). *Metodología para medir el crecimiento urbano de las ciudades de Chile*. Santiago de Chile: Comisión de Estudios Habitacionales y Urbanos del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- IPCC (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX)*. In C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker, D. Qin, D. J. Dokken et al. (Eds.). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Kaźmierczak, A., & Cavan, G. (2011). *Surface water flooding risk to urban communities: Analysis of vulnerability, hazard and exposure*. *Landscape and Urban Planning*, 103(2), 185–197. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.07.008>
- LA RED (2015). *DesInventar. Sistemas de inventarios y análisis de desastres*. Recuperado de [http://online.desinventar.org/desinventar/#CHL-1257983285-chile\\_inventario\\_historico\\_de\\_desastres](http://online.desinventar.org/desinventar/#CHL-1257983285-chile_inventario_historico_de_desastres).
- Lansberg, H.E. 1981. *The urban climate*. New York: Academic Press.
- Lin, T. y Matzarakis, A. (2008). *Tourism climate and thermal comfort in Sun Moon Lake, Taiwan*. *International Journal of Biometeorology* 52, 281- 290.



- Martín-Vide, J. (2016). *Cambio Climático y modificación local del clima en Barcelona*. En D. Corbella (Ed). Láigua u léspai públic. Análisi dels efectes del canvi climatic. Pp 21-32. Barcelona. España. Ediciones de la Universitat de Barcelona.
- Martínez, C., Cienfuegos, R., Inzunza, S., Urrutia, A., & Guerrero, N. (2020). *Worst-case tsunami scenario in Cartagena Bay, central Chile: Challenges for coastal risk management*. *Ocean & Coastal Management*, 185, 105060. <https://doi.org/10.1016/J.OCECOAMAN.2019.105060>
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2018). MINVU ArcGIS: *Catastro de Parques Urbanos 2017-2018*. Recuperado de <https://minvu.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=7ba92d7ce3404f6aa8a0df86cca2bb0e>.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2019). MINVU: *Catastro Nacional de Campamentos MINVU 2019*. Recuperado <https://storymaps.arcgis.com/stories/dfe1fe1afd334ec-790f879e736a5af5e>
- Moreno, J. M., Laguna-Defior, C., Barros, V., Buendía, E. C., Marengo, J. A., & Spring Oswald, Ú. (2020). *Adaptación frente a los Riesgos del cambio climático en los países iberoamericanos – Informe RIOCCADAPT*. Madrid, España: McGraw-Hill.
- Nikolopoulou, M., Lykoudis, S. & Kikira, M. (2004). *Thermal Comfort in outdoor spaces: studies in Greece*. Centre for Renewable Energy Source [C.R.E.S].
- Nowak, D.; Dwyer, J. y Childs, G. (1997). *Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano*. En: L. Krishnamurthy y J. Rente Nascimento (Eds.), *Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe*, 17-38, México, Banco Interamericano de Desarrollo.
- Ochoa de la Torre, J. (2009). *Ciudad vegetación e impacto climático. El confort en los espacios urbanos*. Erasmus ediciones, Barcelona, 184 p.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates. Earth-Science Reviews* (Vol. 27). [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(90\)90005-G](https://doi.org/10.1016/0012-8252(90)90005-G).
- Olgay, V. (1963). *Arquitectura y Clima: Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*, Editorial Gustavo Gili: Barcelona.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2003). *Cambio climático y salud humana: Riesgos y respuestas: Resumen*. Ginebra, Suiza: Organización Mundial de la Salud.
- Pérez-Cueva, A. J. (1994). *Atlas climática de la Comunitat Valenciana (1961-1990)*. Generalitat Valenciana, Valencia, España: Conselleria d'Obres Públiques, Urbanisme i Transport (COPUT).
- Perico-Agudelo, D. (2009). *El espacio público de la ciudad. Una aproximación desde el estudio de sus características microclimáticas*. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo* 2(4), 278 – 301.
- Romero, H., Órdenes, F. y Vásquez, A. (2003). *Ordenamiento territorial y desarrollo sustentable a escala regional, ciudad de Santiago y ciudades intermedias en Chile*. En E. Figueroa y Simonetti, J. (Eds.), *Globalización y Biodiversidad: Oportunidades y desafíos para la sociedad chilena*. Santiago, Programa Interdisciplinario de Estudios en Biodiversidad (PIEB), Universidad de Chile: 167-224.
- Ruiz, M. & Correa, E. (2009). *Confort térmico en espacios abiertos. Comparación de modelos y su aplicabilidad en ciudades de zonas áridas*. *Revista AVERMA. Avances en Energías Renovables y Medioambiente*, 01-71.
- Smith, P & Romero, H (2016). *Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile*. *Revista de Geografía Norte Grande* (63), 45-62. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-3402201600010004>.
- Tate, E., Cutter, S. L., & Berry, M. (2010). *Integrated Multihazard Mapping*. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 37(4), 646–663. <https://doi.org/10.1068/b35157>.
- Tejedor, E.; Cuadrat, J.M.; Saz, M.; Serrano-Notivoli, R.; López, N. y Aladrén, M. (2016). *Islas de calor y confort térmico en Zaragoza durante la ola de calor de julio de 2015*. En X Congreso Internacional AEC: Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación del Territorio 141-151.



Thabaz, M. (2011). *Psychrometric Chart as basis for Outdoor Thermal Analysis*. International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning 21(2), 95 – 109.

Thom, E. (1959). *The discomfort index*. Weatherwise 12, 57–60.

Ullibarri, L. & Fernández, P. (1999). “*Medidas de concordancia: el índice de Kappa*”. Cad Aten Primaria, 6, pp. 169-171.

Uribarrena, S. (2004). *Funciones y beneficios del árbol urbano*. Valencia Naturalmente. España. 22 – 24.

Zeng, Y. & Dong, L. (2015). *Thermal human biometeorological conditions and subjective thermal sensation in pedestrian streets in Chengdu, China*. Int J Biometeorol 59, 99–108.

# 7

# ANEXOS

## 7.1 VALIDACIÓN DE INDICADORES DE AMENAZA

Para validar los resultados de Amenaza obtenidos, se llevó a cabo el cálculo de los mismos indicadores considerados en cada una de las cadenas y otros similares, pero utilizando otras fuentes de datos y métodos.

No todas las ciudades cuentan con los registros meteorológicos adecuados, que permitan calcular los indicadores para el mismo período que consideró Meteodata, para el período presente, esto es, la normal climatológica entre 1980 y 2010. Para todas las cadenas de impacto, se necesitan registros meteorológicos urbanos y, además, para la Isla de Calor Urbana se agregan los registros rurales, para poder calcular su intensidad.

Por lo anterior, se revisaron las estaciones meteorológicas disponibles al interior y en el área rural de las ciudades consideradas. Para el área rural, se definió un buffer de 20 kilómetros, desde el límite urbano actual. Se revisaron las estaciones administradas por las siguientes instituciones:

- > Dirección Meteorológica de Chile (DMC)
- > Sistema Nacional de Calidad del Aire (SINCA)
- > Red Agroclimática Nacional (Agromet)

Luego de identificar todas las estaciones meteorológicas urbanas y rurales disponibles (**Tabla 25**), se descartó la conurbación conformada por las ciudades de Iquique y Alto Hospicio, ya que la estación Diego Aracena (DMC) se encuentra fuera del *buffer* definido y Hanga Roa, que solo posee una estación urbana.

A partir de lo anterior, se seleccionaron algunas ciudades, para el cálculo de todas las cadenas de impacto, representativas de la diversidad climática en Chile.

- Arica (estaciones Defensa Civil Arica - urbana y Chacalluta Aerop. - rural, 32)
- Antofagasta (estaciones Universidad Católica del Norte - urbana y Cerro Moreno Aerop. - rural, 33)
- Calama (estaciones Centro - urbana y El Loa - rural, **Figura 34**)
- Santiago (estaciones Quinta Normal - urbana y Lo Herrera- rural, **Figura 35**)

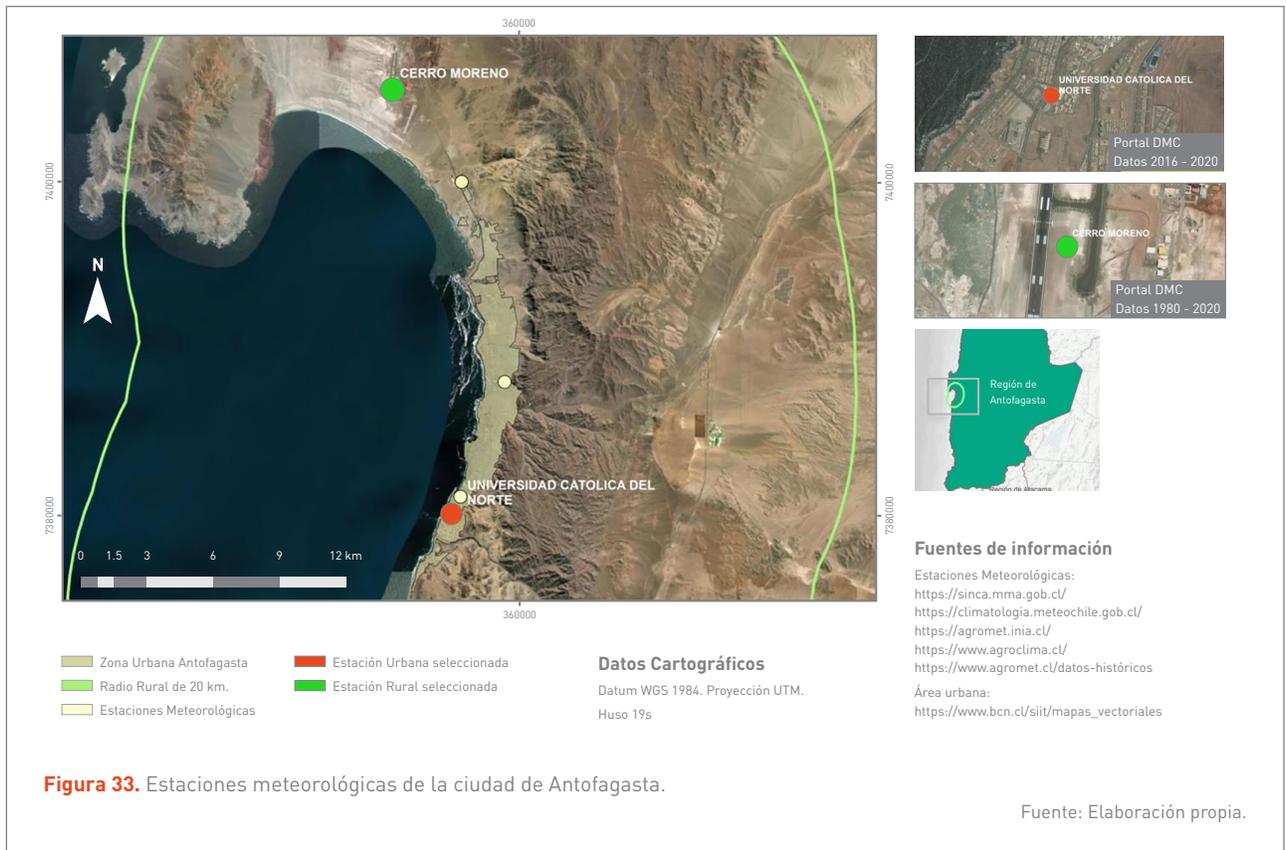


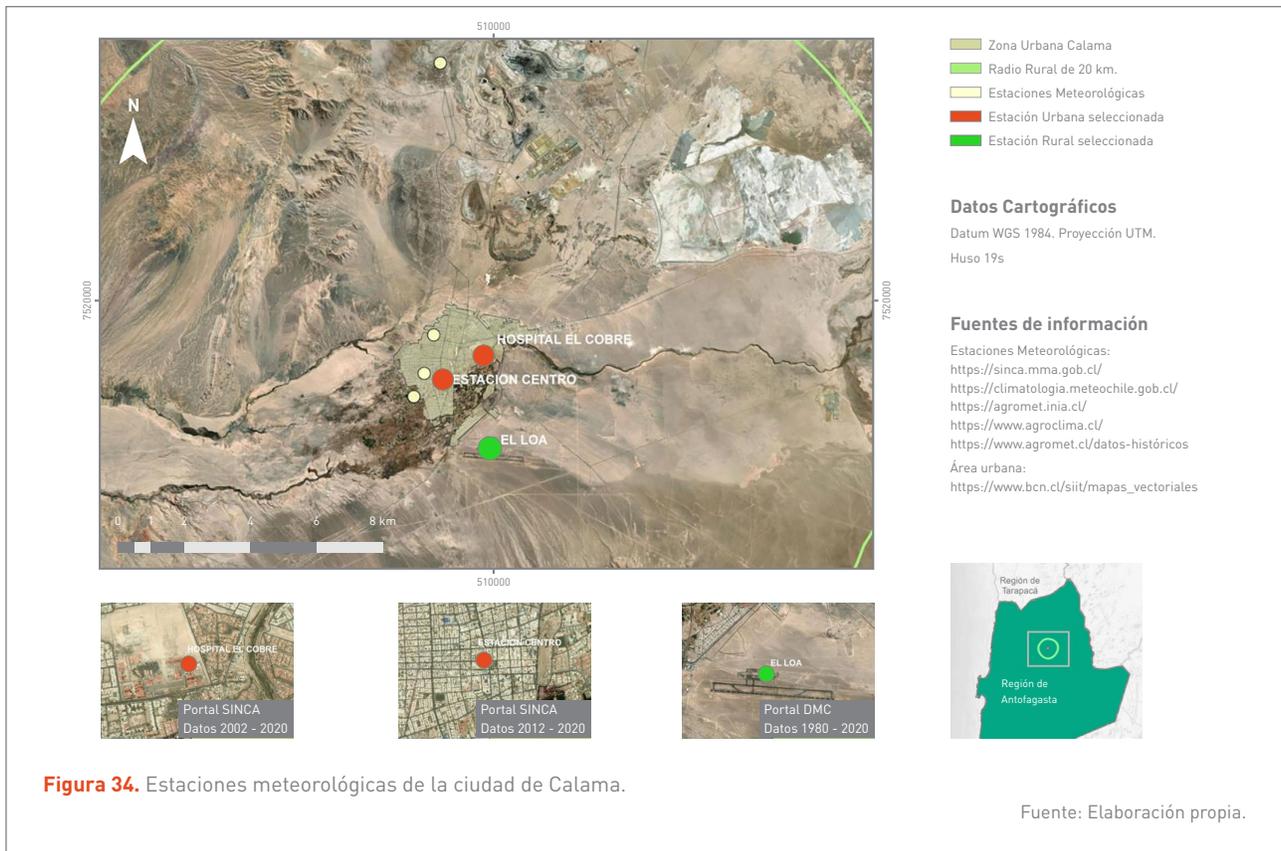
- Los Andes (estaciones Los Andes - urbana y San Esteban - rural, **Figura 36**)
- Curicó (estaciones General Freire- urbana y Teno - rural, **Figura 37**)
- Talca (estaciones La Florida - urbana y Maule - rural, **Figura 38**)
- Chillán (estaciones Purén - urbana y Gral. Bdo. O´Higgins - rural, 39)
- Osorno (estaciones Osorno - urbana y Osorno - rural, **Figura 40**)
- Coyhaique (estaciones Coyhaique - urbana y Teniente Vidal - rural, **Figura 41**)
- Punta Arenas (estaciones Escuela Alberto Hurtado - urbana y Punta Arenas rural - rural, **Figura 42**)

Ciudad	Cod ciudad	N° Est. Urbanas	N° Est. Rurales	N° Est. Urbanas con datos 1980-2010	N° Est. Rurales con datos 1980-2010	N° Est. Urbanas con datos 2010-2020	N° Est. Rurales con datos 2010-2020
Arica	ARI	3	11	0	2	2	11
Iquique-Alto Hospicio	IQU	3	0	1	0	2	0
Antofagasta	ANT	1	2	0	1	1	2
Calama	CAL	4	4	1	2	4	3
Copiapó	COP	3	5	1	0	3	5
La Serena -Coquimbo	LAS	1	10	0	2	1	10
Ovalle	OVA	0	10	0	0	0	10
San Felipe	SFE	7	10	1	0	7	10
Los Andes	LOA	7	12	1	0	7	12
Quillota-La Calera	QLL	2	18	0	1	2	18
Limache-Olmué	LIM	3	13	1	0	2	13
Gran Valparaíso	VAL	7	14	5	3	6	12
San Antonio -Sto. Dgo.	SAT	1	6	1	0	1	6
Hanga Roa	HAN	1	0	1	0	1	0
Colina	COL	3	11	2	0	3	11
Gran Santiago	SAN	25	48	16	0	24	48
Melipilla	MEL	1	13	1	0	1	13
Talagante	TAL	5	25	2	0	5	25
Buín-Paine	BUI	9	25	4	2	8	25
Rancagua-Machalí	RAN	6	27	1	5	6	26
San Fernando	SAF	3	19	1	1	3	19
Curicó	CUR	2	19	1	0	2	19
Linares	LIN	1	15	0	0	1	15
Talca	TAC	3	16	0	0	3	16
Chillán	CHI	2	11	1	1	2	11
Concepción	CON	7	15	3	1	7	15
Los Ángeles	LAS	2	11	0	1	2	11
Temuco	TEM	5	16	3	1	5	15
Valdivia	VAL	3	9	1	1	3	9
Osorno	OSO	2	6	1	1	2	6
Puerto Montt	PUM	2	3	0	1	2	3
Coyhaique	COY	2	6	1	1	2	6
Punta Arenas	PUN	3	3	1	0	3	3

**Tabla 25.** Detalle del Disconfort Térmico Ambiental presente y futuro para el mes de enero.

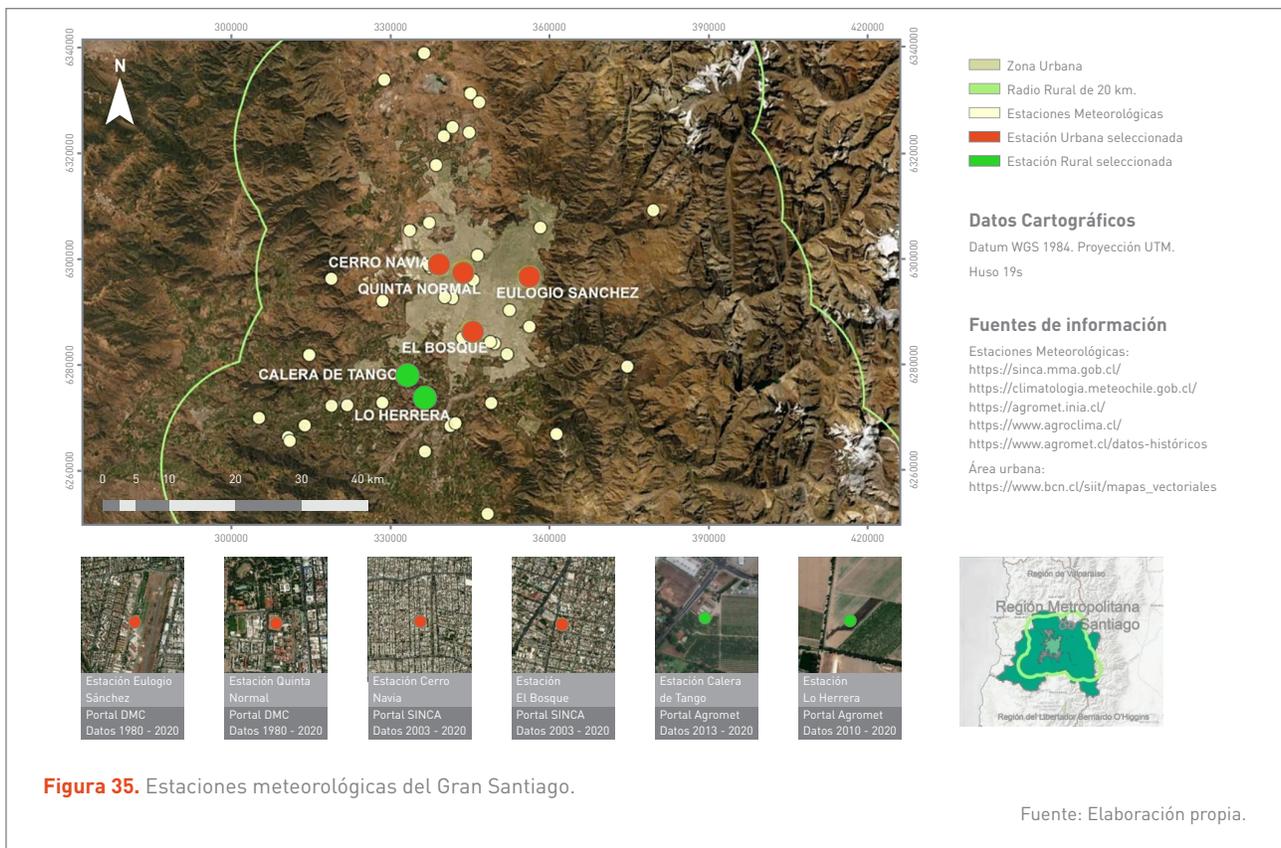
Fuente: Elaboración propia en base a la información disponible en DMG, SINCA y AGROMET.





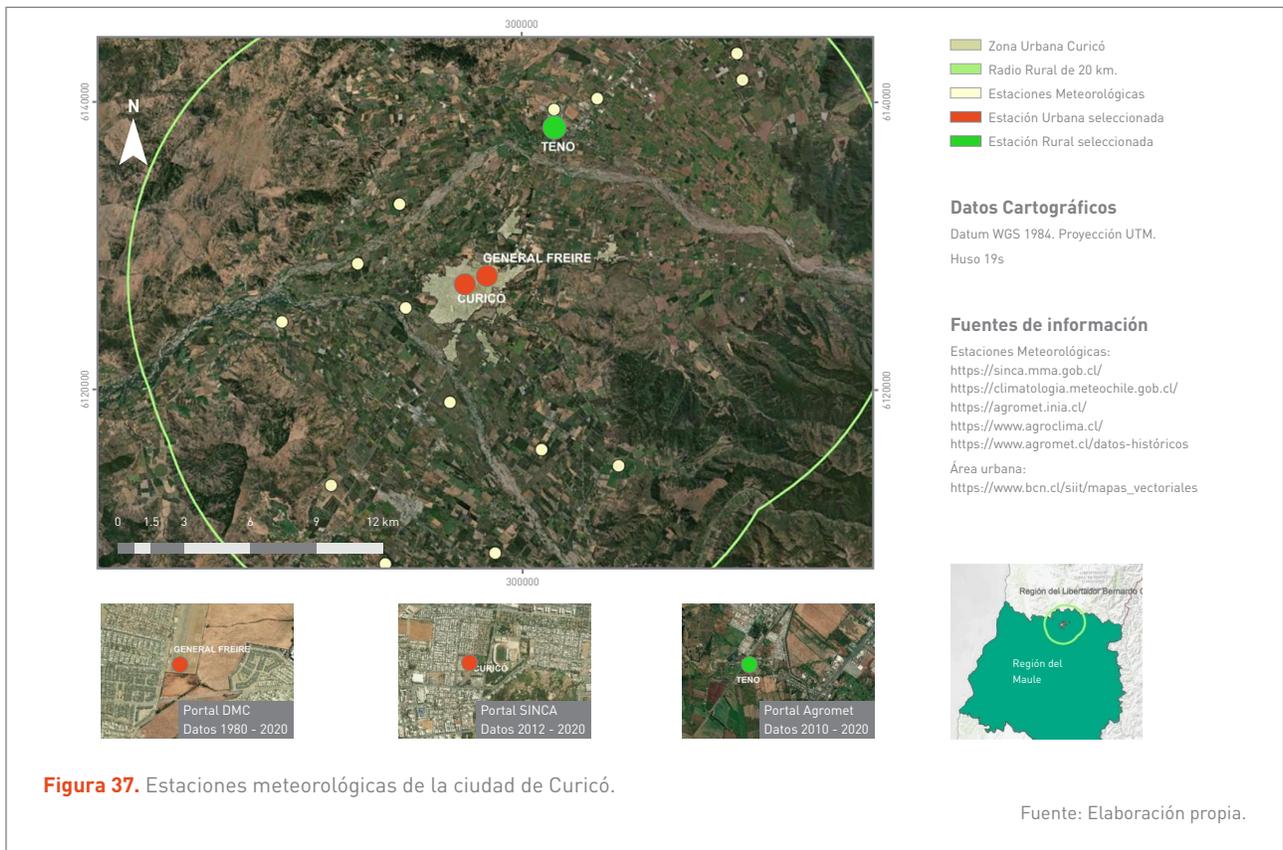
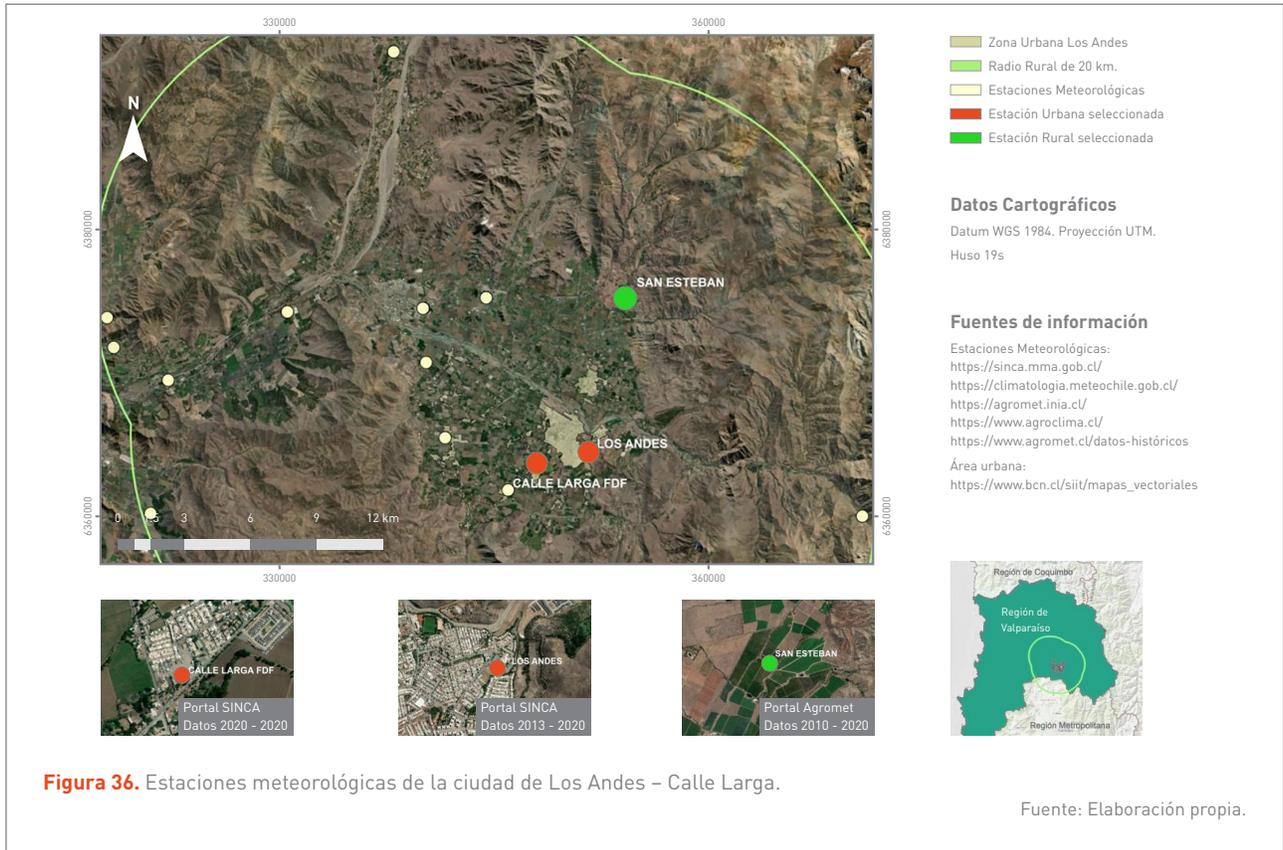
**Figura 34.** Estaciones meteorológicas de la ciudad de Calama.

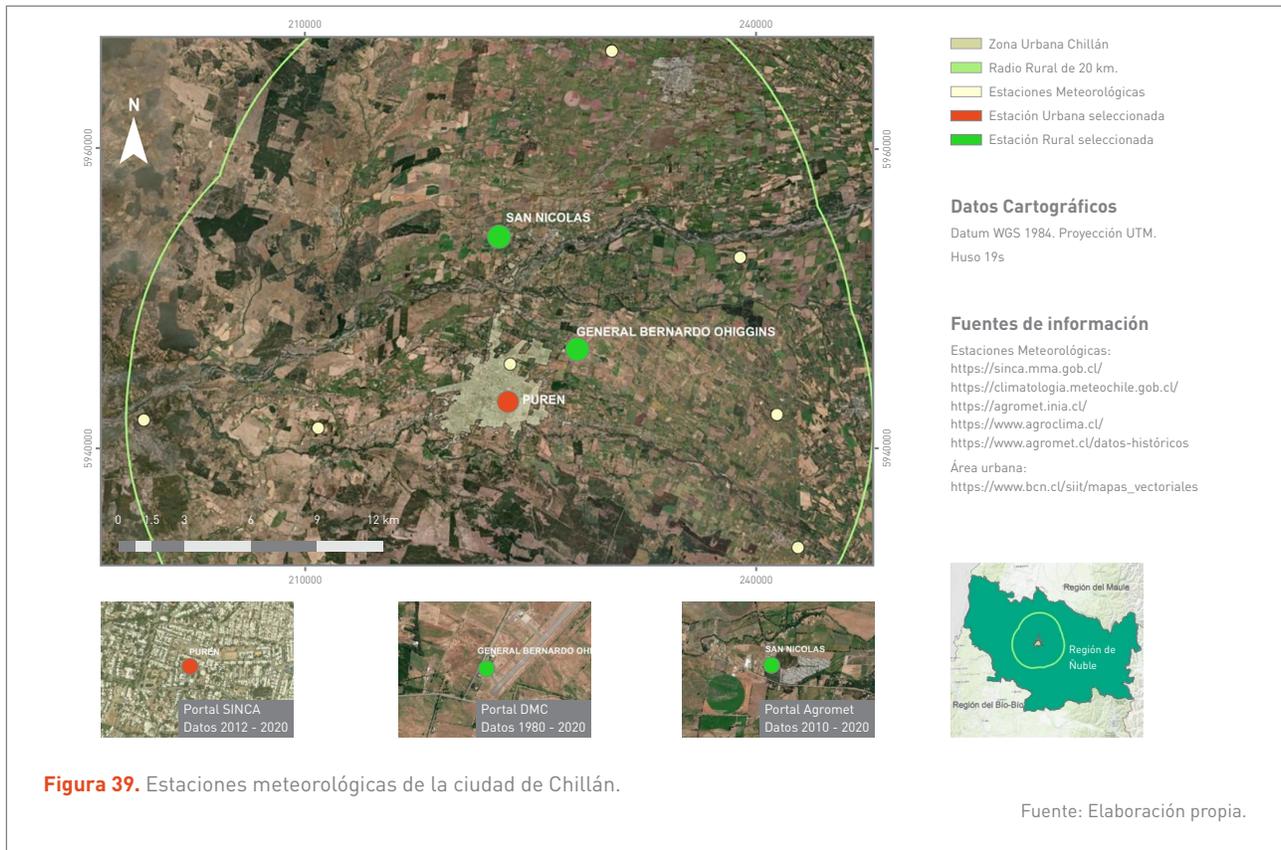
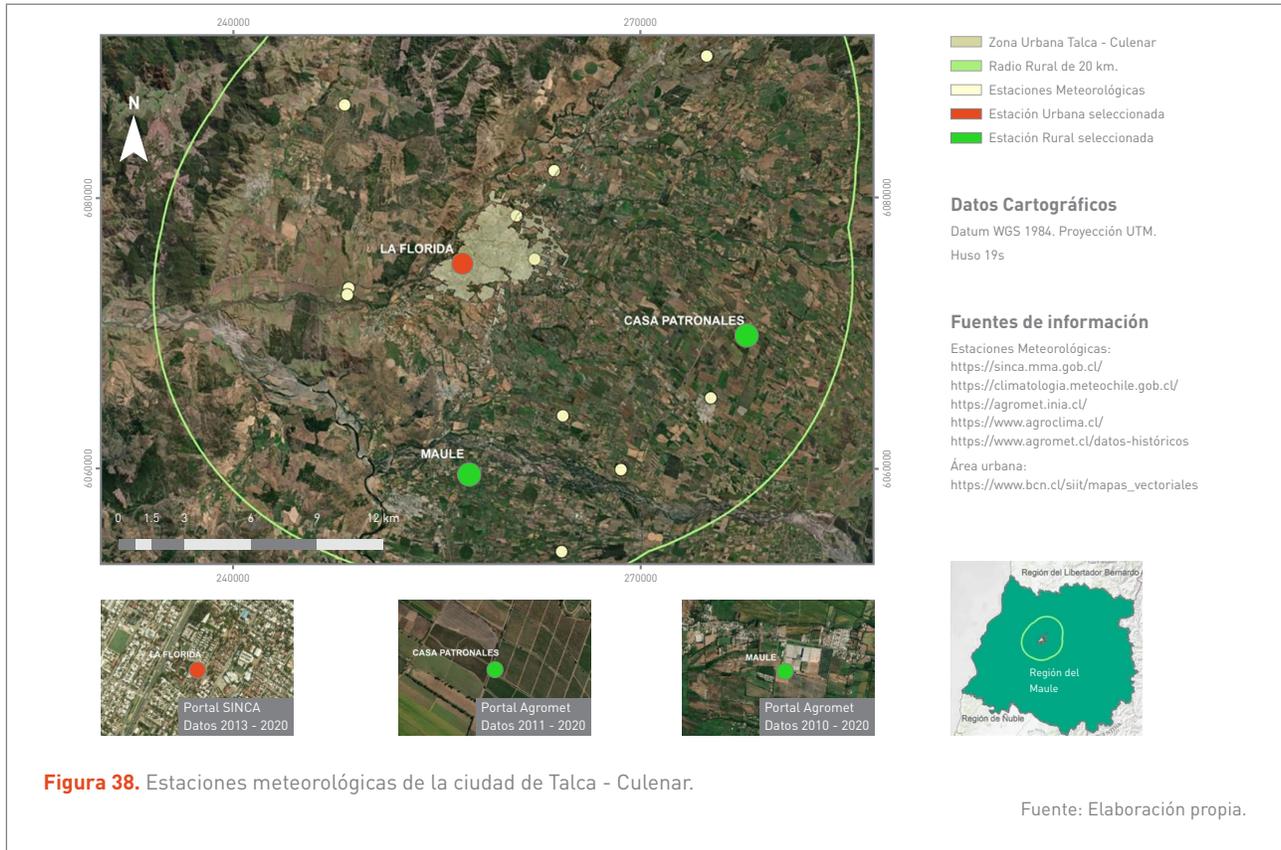
Fuente: Elaboración propia.

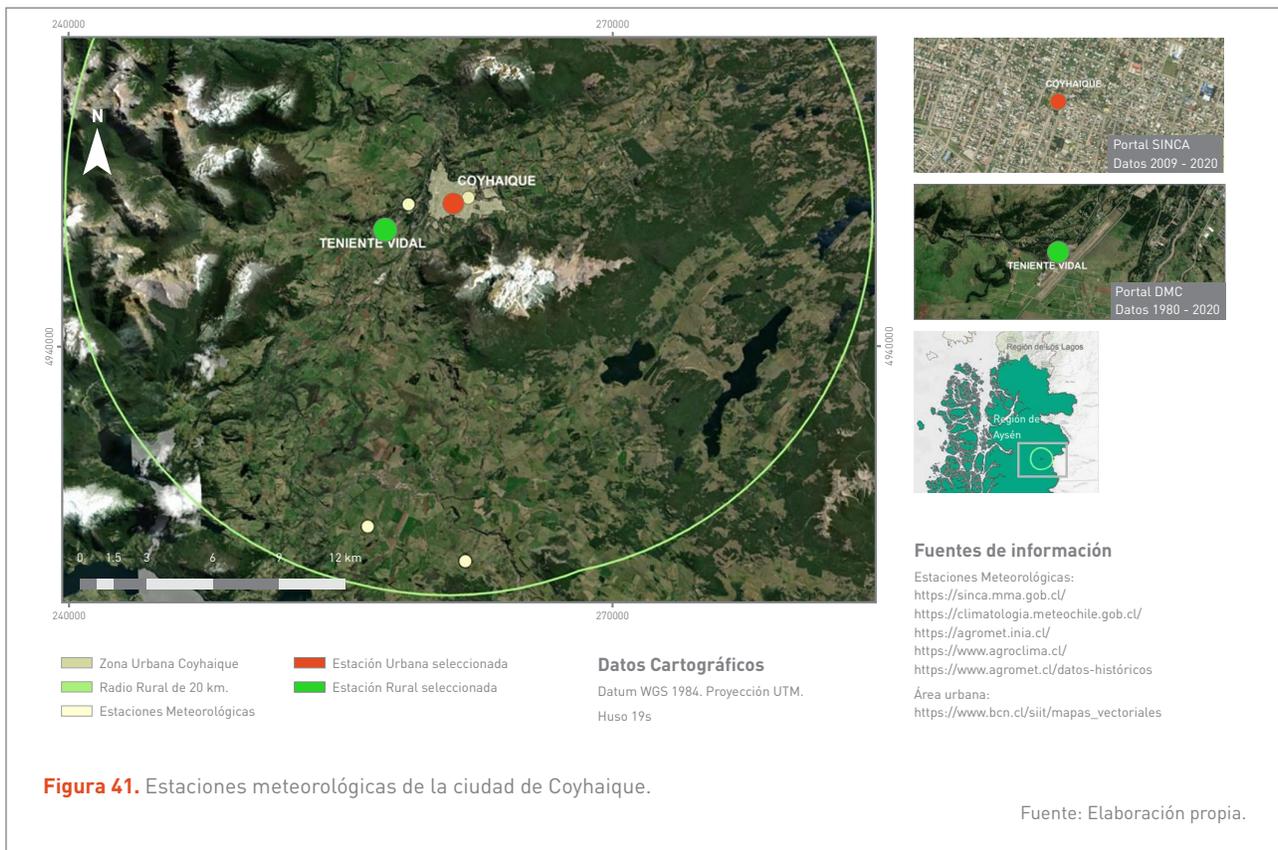
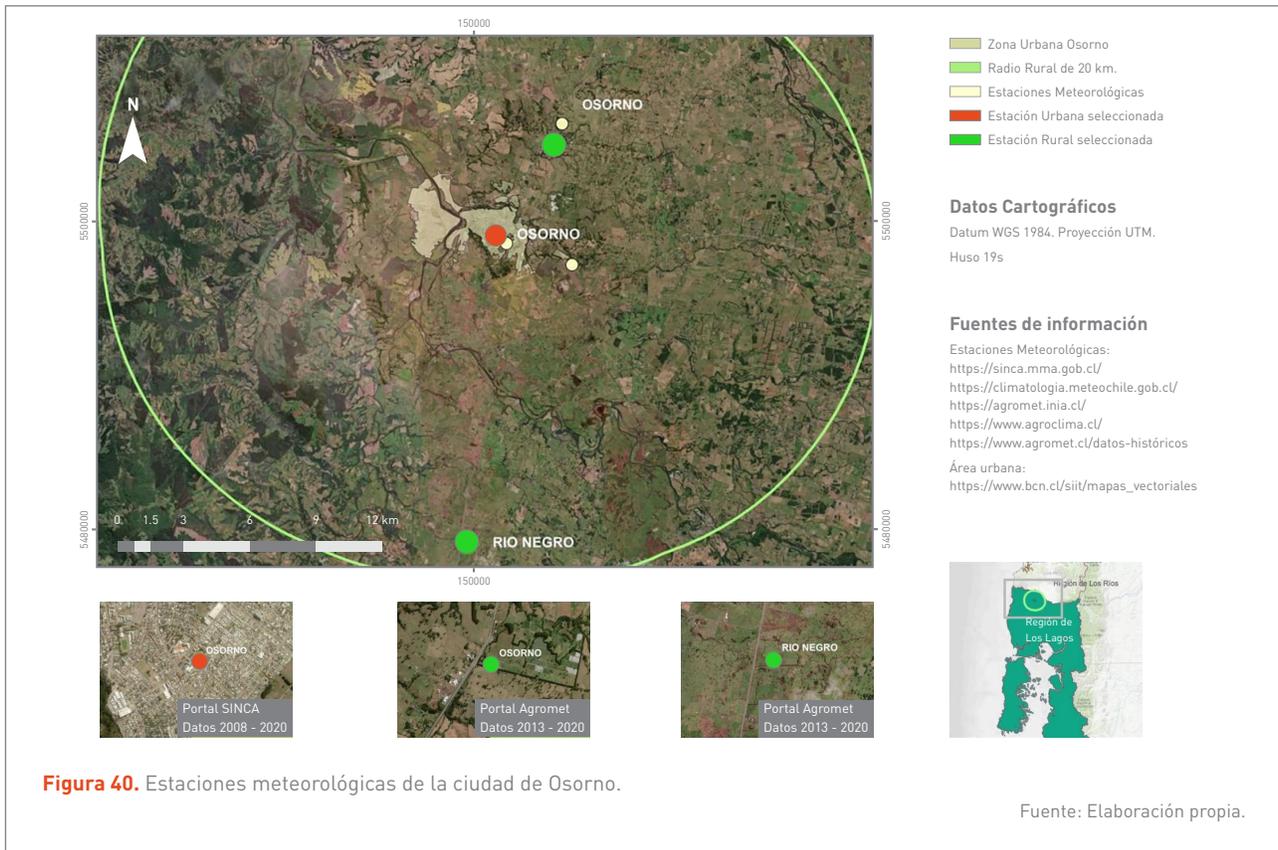


**Figura 35.** Estaciones meteorológicas del Gran Santiago.

Fuente: Elaboración propia.









### 7.1.1 ISLA DE CALOR URBANA (ICU)

Para la cadena de impacto asociada a la Isla de Calor Urbana, se consideró la fórmula propuesta por Oke, presentada anteriormente, que estudia el tamaño de población y el viento, en el área rural próxima a la ciudad.

Para su evaluación, se realizó, en primer lugar, el cálculo de la ICU con los datos de Meteodata. Se consideró la temperatura máxima de las celdas rural y urbana. De acuerdo con los resultados, en la mayoría de las ciudades, la diferencia entre la temperatura urbana y rural no supera 1°C. Los mayores valores se encuentran en las áreas metropolitanas de Valparaíso y Concepción, que, a su vez, son las que presentan menores diferencias con los resultados obtenidos con la fórmula de Oke, 1°C aproximadamente; en consecuencia de que la diferencia promedio, entre la ICU calculada con meteodata y la ICU obtenida con la fórmula de Oke, alcanza 2,6°C. Con los datos de meteodata, para la mayoría de las ciudades, el valor de la ICU aumenta en el

futuro, sin embargo, dicho aumento es inferior a un punto decimal y, por lo tanto, no alcanza a ser representado.

Una de las dificultades que posee la utilización de estos datos, se refiere al tamaño del píxel utilizado (5 km). En la mayoría de las ciudades estudiadas, los píxeles que contienen los puntos rurales y urbanos, abarcan tanto superficie urbana y cómo rural, influyendo sobre los datos de temperatura, como se puede observar en la **Tabla 26**.

Entre los resultados, llaman la atención aquellas ciudades que poseen ICU negativa, lo que podría explicarse por las características del área rural de dichas ciudades, donde la temperatura máxima puede ser más cálida durante el día. Esto se puede deber a que, como se señaló, la ICU se manifiesta dos horas después de la puesta de sol, situación que no se representa adecuadamente en las temperaturas máximas y mínimas de la base de datos.

En la Tabla se presentan los datos de la Isla de Calor Superficial (ICUs) diurna y nocturna calculada en el marco



del proyecto Fondecyt de Iniciación 11180990, que permite tener información climática desde una aproximación metodológica distinta. Para su cálculo se consideran los mismos valores urbanos y rurales, definidos para obtener

los datos de Meteodata. Se encuentran similitudes, sobre todo al comparar la ICUs nocturna con los valores obtenidos con la fórmula de Oke para el presente, en este caso la diferencia promedio obtenida es de 1,2°C.

CIUDAD	Píxel		ICU Meteodata*		ICUs superficial**		ICU Oke		Diferencias	
	% urbano interior	% urbano exterior	Presente	Futura	Nocturna	Diurna	Presente	Futuro	Oke - Meteodata	Oke - ICUs
Arica	46,8	0,0	1,2	1,2	1,5	-0,6	3,4	4,9	-2,2	-2,0
Iquique - Alto Hospicio	42,3	0,0	0,9	0,9	2,2	7,5	3,1	4,8	-2,2	-1,0
Antofagasta	39,4	0,0	-1,4	-1,4	2,8	-2,1	3,6	5,6	-5,0	-0,9
Calama	47,1	1,1	0,4	0,4	3,1	-2,1	2,4	4,7	-2,1	0,7
Copiapó	57,4	0,0	-0,8	-0,9	-1,1	-0,3	2,6	4,1	-3,4	-3,7
La Serena - Coquimbo	45,5	0,0	0,0	-0,1	1,7	-2,1	3,9	5,7	-3,9	-2,2
Ovalle	5,3	0,0	0,7	0,7	1,7	2,2	2,5	4,0	-1,8	-0,9
San Felipe	16,2	0,0	-0,4	-0,5	3,2	8,4	3,0	5,4	-3,4	0,2
Los Andes - Calle Larga	23,9	0,0	0,1	0,1	2,6	7,3	3,0	5,0	-2,9	-0,5
Quillota - La Calera - La Cruz - Hijuelas	18,9	0,1	0,3	0,2	2,2	5,2	3,6	5,5	-3,4	-1,4
Limache	19,1	4,0	-0,3	-0,4	1,8	3,2	2,3	4,3	-2,7	-0,5
Gran Valparaíso	34,8	0,0	2,1	2,4	1,8	3,1	3,1	4,2	-1,0	-1,3
San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Santo Domingo	42,2	0,0	0,0	-0,1	2,7	2,8	2,5	4,0	-2,5	0,1
Colina	15,4	0,0	0,0	0,0	1,7	-1,2	2,9	5,3	-2,9	-1,2
Gran Santiago	100,0	0,0	-0,8	-0,8			9,3	10,9	-10,1	-9,3
Peñaflor	47,3	5,5	-0,5	-0,6			2,8	4,4	-3,4	-2,8
Melipilla	30,5	0,0	0,1	0,1	1,4	5,5	2,5	4,8	-2,5	-1,1
Talagante	23,9	0,0	0,0	0,0	1,8	5,2	2,3	4,2	-2,3	-0,5
Buín	32,2	0,0	0,2	0,3	2,2	5,3	2,2	3,9	-2,0	-0,1
Rancagua - Machalí - Gultro - Los Lirios	78,2	0,0	1,1	1,1	2,5	7,5	3,7	5,6	-2,5	-1,1
San Fernando	34,5	0,0	1,2	1,2	1,5	4,8	2,2	3,9	-1,0	-0,8
Curicó	61,1	0,5	0,8	0,8	2,2	5,9	2,4	4,0	-1,6	-0,2
Linares	21,3	0,0	0,0	0,0	1,6	3,6	2,0	3,7	-2,0	-0,4
Talca - Culenar	63,0	3,0	0,8	0,9	2,4	5,2	2,8	4,6	-2,0	-0,4
Chillán - Chillán Viejo	51,2	0,0	0,1	0,2	1,4	3,7	2,2	3,9	-2,1	-0,8
Gran Concepción	50,7	1,5	3,0	3,1			4,1	5,8	-1,1	-4,1
Los Ángeles	50,0	5,0	0,2	0,2	1,2	5,9	2,0	3,6	-1,8	-0,8
Temuco - Padre Las Casas	47,2	6,2	0,1	0,2	2,3	2,9	3,1	4,9	-3,0	-0,9
Valdivia	68,6	0,0	1,2	1,4	2,8	4,3	2,5	4,4	-1,2	0,3
Osorno	53,0	0,8	0,5	0,6	2,5	3,5	2,3	3,9	-1,8	0,2
Puerto Montt	46,1	0,0	0,5	0,6	0,6	3,5	2,5	3,9	-2,0	-1,9
Coyhaique	28,5	0,0	0,1	0,2	1,7	1,6	1,6	3,7	-1,4	0,2
Punta Arenas	30,1	0,0	0,3	0,3	1,2	1,5	1,8	3,0	-1,5	-0,6

**Tabla 26.** Validación de ICU (°C).

Nota:

\* Las columnas píxel indican el porcentaje de superficie urbana contenida en cada píxel (de 5 km) utilizados por Meteodata en el que se encuentran los puntos urbanos (Porcentaje urbano interior) y rurales (Porcentaje urbano exterior) definidos como representativos.

\*\* ICU Meteodata corresponde al cálculo de la Isla de Calor Urbana a partir de los datos de temperatura máxima promedio de verano proporcionadas por Meteodata.

\*\*\* ICU superficial corresponde a la Isla de Calor Urbana Superficial calculada a partir del promedio de temperatura superficial diurna y nocturna promedio 2008-2018, obtenido sobre imágenes satelitales MODIS.

Las columnas en gris corresponden a la ICU presente y futura calculada en este estudio a partir de la fórmula de Oke (1987).

Fuente: Elaboración propia en base a información obtenida de Meteodata, instrumental (estaciones meteorológicas SINCA, DMC y AGROMET) y resultados Fondecyt iniciación 11180990.



El ajuste con la ICU de Oke aumenta -si se observan los resultados de la ICU promedio de verano, calculada para las 10 ciudades escogidas- sobre todo para la ICU instrumental nocturna, como se observaba con los resultados anteriores. En este caso, se agregan, además, los datos de la Isla de Calor Urbana diurna y nocturna, calculadas

con registradores Hobo, instalados en algunas ciudades chilenas por los Proyectos Fondecyt 1100657 y 1130305, que miden la temperatura del aire cada una hora. Con estos datos, la diferencia se reduce significativamente, generando -por lo mismo- un mayor ajuste con los resultados encontrados a partir de la fórmula de Oke.

CIUDAD	ICU instrumental*		ICU HOB0*		ICU Oke	Diferencia	
	Diurna	Nocturna	Diurna	Nocturna	Presente	Instrumental - Oke	HOB0- Oke
Arica	-0,4	-0,3			3,4	3,7	
Antofagasta	-0,2	1,0	3,9	3,9	3,6	2,6	-0,3
Calama	0,5	1,6			2,4	0,8	
Los Andes - Calle Larga	1,8	3,6			3,0	-0,6	
Gran Valparaíso			4,6	3,9	3,1	-	-0,8
Gran Santiago	5,1	3,0	4,4	6,8	9,3	6,3	2,5
Curicó	1,0	3,4			2,4	-1,0	
Talca - Culenar	1,9	3,3			2,8	-0,5	
Chillán - Chillán Viejo	1,9	1,4	4,5	2,5	2,2	0,8	-0,3
Gran Concepción			4,5	5,8	4,1	-	-0,4
Osorno	-0,5	1,0			2,3	1,3	
Coyhaique	0,9	0,5			1,6	1,1	
Punta Arenas	0,0	0,5			1,8	1,3	

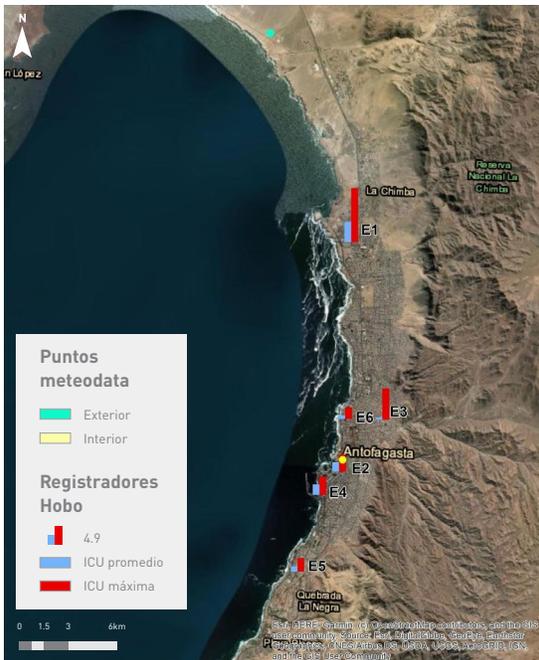
**Tabla 27.** Valores según ICU instrumental, registros HOB0 y estimación Oke (°C).

Nota: \* Proyectos Fondecyt 1100657 y 1130305.

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras siguientes, se muestran los valores de la ICU promedio y máxima nocturna espacializados, considerando la localización de cada instrumento. Esto permite dar cuenta de importantes variaciones internas en la ciudad [Figura 43: Valores ICU de ciudad de Antofagasta (°C), Figura 44: Valores ICU de Viña del Mar y Valparaíso (°C), Figura 45: Valores ICU en el Gran Santiago (°C), Figura 46: Valores ICU de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Gran Concepción (°C) y Figura 47: Valores ICU de Chillán (°C)]. Los valores asociados a cada punto se encuentran,

además, en las tablas que acompañan los mapas, dando cuenta también de la variación diaria de la ICU en un mismo punto, reafirmando que la mayor intensidad se encuentra en la noche. Si bien es cierto, los valores promedio de la ICU varían entre 0,5 y 5-6°C, dependiendo de la ciudad y el punto dentro de ésta, cuando se analizan los valores máximos, encontramos diferencias urbano-rurales entre 5 y 10°C e incluso superiores a los 10°C, como se observa en las áreas metropolitanas de Concepción y Santiago.



### ICU Promedio

Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	3.88	0.56	1.86	2.01	3.53
E2	1.78	0.92	1.76	2.00	1.66
E3	0.39	2.51	3.87	3.82	0.46
E4	1.97	-0.15	0.91	1.40	1.96
E5	0.99	-0.85	-0.35	-0.01	0.87
E6	0.71	-0.04	0.45	0.50	0.63
Promedio	1.62	-0.49	1.42	1.62	1.52

### ICU Máxima

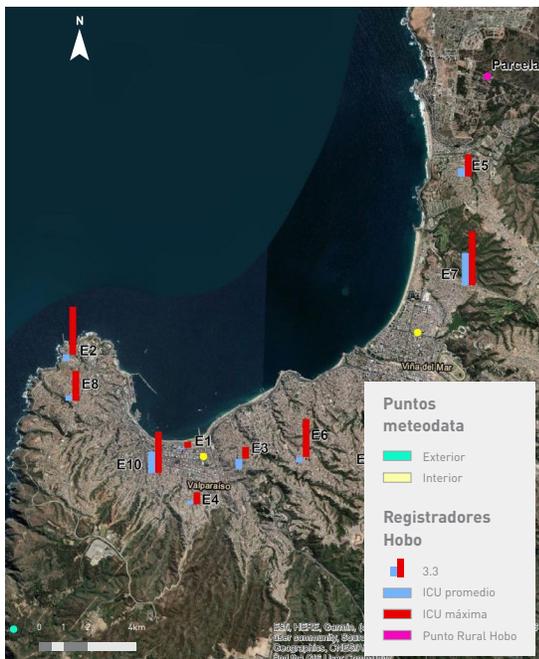
Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	9.76	5.68	6.91	6.82	9.98
E2	3.14	2.52	4.33	5.29	3.14
E3	5.63	8.95	9.24	9.34	5.73
E4	3.24	3.11	2.78	3.37	3.43
E5	2.38	1.45	1.65	2.13	2.47
E6	2.28	2.61	2.14	1.93	1.81
Promedio	4.40	4.05	4.51	4.81	4.43

Para el mapa se consideró la ICU nocturna promedio y máxima por estación - para la estación de verano (DEF)

**Figura 43.** Valores ICU de ciudad de Antofagasta (°C).

\*Nota. ICU calculada considerando como estación rural al registrador instalado en el Aeropuerto Cerro Moreno, que coincide con la ubicación del punto exterior meteorodata.

Fuente: Elaboración propia.



### ICU Promedio

Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	2.56	3.04	3.45	3.52	2.73
E2	-0.71	-1.68	-1.88	-1.87	-0.93
E3	-1.22	-1.32	-1.36	-1.35	-1.25
E4	0.37	0.43	0.51	0.52	0.42
E5	0.99	1.24	1.51	1.57	1.08
E6	-0.60	-0.88	-0.92	-0.94	-0.70
E7	3.93	4.24	4.59	4.66	4.06
E8	0.51	-0.06	0.90	1.31	0.81
E9	2.82	2.64	3.30	3.58	3.00
E10	-0.18	-0.64	-0.32	-0.10	-0.16
Promedio	0.85	-0.70	0.98	1.09	0.90

### ICU Máxima

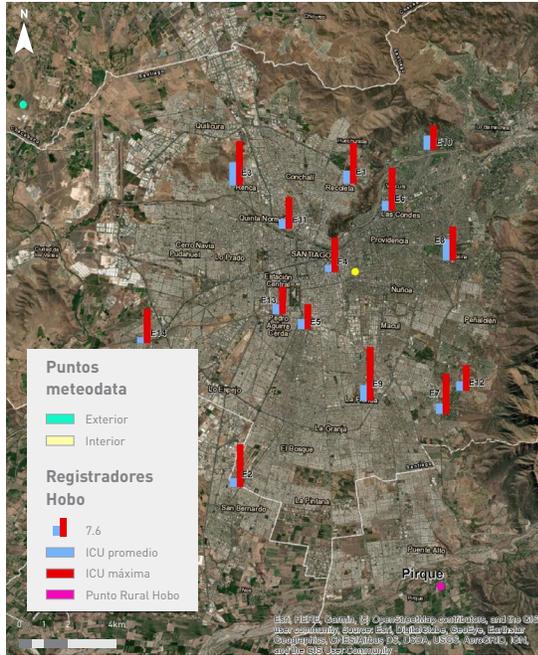
Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	4.96	7.84	7.29	6.82	5.12
E2	6.09	2.45	5.04	5.81	5.52
E3	1.43	1.59	1.57	1.47	1.44
E4	1.44	2.03	1.89	1.77	1.44
E5	2.63	4.62	4.67	5.15	2.74
E6	5.18	3.81	9.94	6.22	4.14
E7	6.54	9.42	8.87	8.40	6.70
E8	3.52	6.53	5.33	5.24	3.73
E9	4.96	7.84	7.28	6.82	5.12
E10	0.70	1.43	1.28	1.18	0.74
Promedio	3.75	4.76	5.32	4.89	3.67

Para el mapa se consideró la ICU nocturna promedio y máxima por estación - para la estación de verano (DEF)

**Figura 44.** Valores ICU de Viña del Mar y Valparaíso (°C).

\*Nota. ICU calculada considerando como estación rural al registrador instalado en una parcela de agrado en la comuna de Concón.

Fuente: Elaboración propia.



### ICU Promedio

Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	3.55	2.05	3.03	3.42	3.88
E2	2.35	1.07	1.74	2.12	2.50
E3	6.36	2.31	3.41	4.42	6.75
E4	2.01	0.73	1.24	1.48	2.11
E5	2.87	2.60	3.17	2.51	2.74
E6	2.64	0.68	1.63	2.08	2.78
E7	2.93	1.28	2.10	2.52	3.09
E8	5.95	2.29	3.02	3.70	6.09
E9	4.43	1.79	2.32	2.89	4.63
E10	3.99	0.25	0.88	0.84	4.05
E11	2.32	1.09	2.50	2.80	3.16
E12	2.47	1.09	2.06	2.26	2.71
E13	2.73	1.55	2.38	2.11	2.74
E14	1.44	1.09	1.96	1.80	2.04
Promedio	3.29	1.42	2.25	2.50	3.52

### ICU Máxima

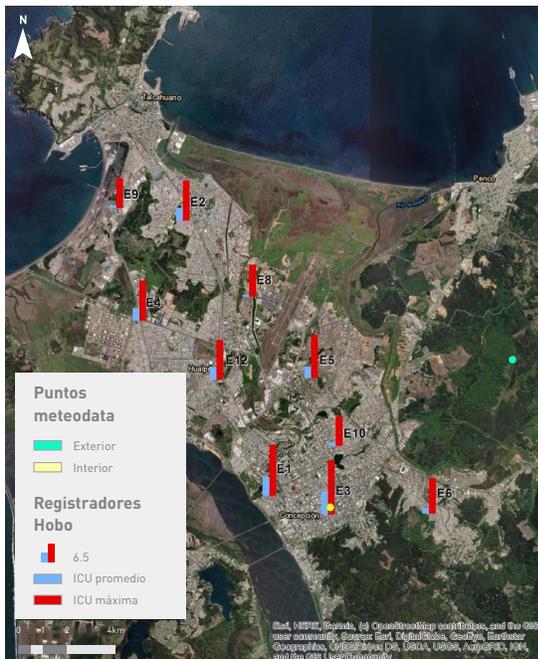
Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	11.26	12.47	13.95	13.55	11.82
E2	11.60	13.52	14.12	13.65	12.64
E3	12.04	13.70	14.53	14.22	12.92
E4	9.33	11.18	12.19	11.46	10.15
E5	7.25	6.01	6.07	6.48	6.77
E6	11.49	13.30	13.97	14.10	12.65
E7	11.04	13.14	14.10	13.19	11.75
E8	10.11	11.76	12.01	12.55	8.99
E9	19.86	11.21	12.11	11.79	10.63
E10	6.97	1.76	3.48	4.14	6.77
E11	0.06	6.97	9.65	10.64	8.72
E12	6.92	6.30	7.38	8.83	7.57
E13	7.15	7.07	6.10	6.74	8.28
E14	8.49	7.27	5.91	7.77	10.94
Promedio	10.18	9.69	10.40	10.65	10.04

Para el mapa se consideró la ICU nocturna promedio y máxima por estación - para la estación de verano (DEF)

**Figura 45.** Valores ICU en el Gran Santiago (°C).

\*Nota. ICU calculada considerando como estación rural al registrador instalado en una parcela de agrado en la comuna de Pirque.

Fuente: Elaboración propia.



### ICU Promedio

Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	4.89	4.23	3.91	3.78	4.29
E2	3.50	2.23	1.60	1.44	2.72
E3	5.86	4.88	4.46	4.35	5.18
E4	3.37	2.02	1.37	1.21	2.58
E5	3.11	1.82	1.24	1.08	2.34
E6	1.63	0.23	-0.44	-0.61	0.83
E8	0.95	-0.61	-1.44	-1.59	0.12
E9	1.11	-0.52	-1.37	-1.56	0.24
E10	1.37	-0.13	-0.86	-1.04	0.54
E12	3.46	1.92	1.15	0.97	2.61
Promedio	2.92	1.61	0.96	0.80	2.15

### ICU Máxima

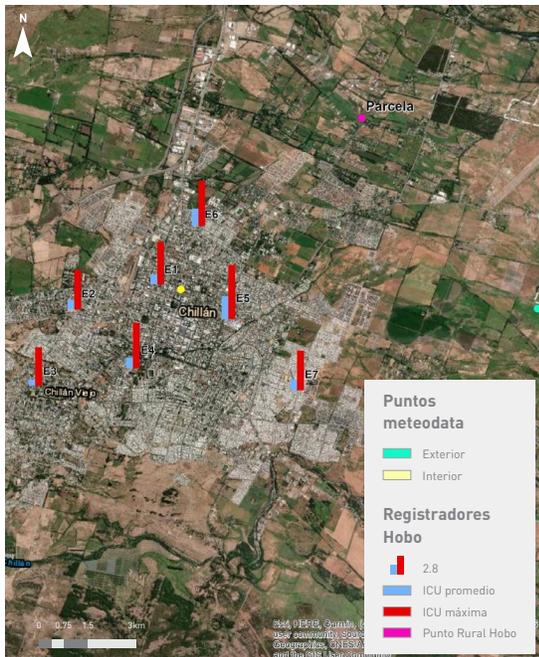
Estación	12:00 am	12:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	10:00 pm
E1	12.81	12.70	14.39	15.14	11.82
E2	10.15	10.20	10.71	11.92	9.09
E3	13.47	13.39	14.79	15.52	12.46
E4	10.08	10.14	10.60	11.27	9.03
E5	10.79	10.78	11.74	12.25	9.76
E6	9.01	9.04	9.68	10.20	7.97
E8	6.33	6.29	6.03	8.30	9.16
E9	7.61	7.71	7.83	8.36	6.53
E10	7.70	7.81	7.84	8.92	6.62
E12	9.98	10.09	10.19	10.71	8.91
Promedio	9.79	9.81	10.38	11.26	9.13

Para el mapa se consideró la ICU nocturna promedio y máxima por estación - para la estación de verano (DEF)

**Figura 46.** Valores ICU de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Gran Concepción (°C).

\*Nota. ICU calculada considerando como estación rural al registrador instalado en el Aeropuerto Carriel Sur, DMC.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 47.** Valores ICU de Chillán (°C).

\*Nota. ICU calculada considerando como estación rural al registrador instalado en una parcela de agrado al norte de la ciudad.

Fuente: Elaboración propia.

#### ICU Promedio

Estación	0.00	0.50	0.63	0.67	0.92
E1	1.13	2.32	1.32	0.72	0.88
E2	1.10	2.19	1.81	1.62	0.89
E3	0.61	2.30	4.18	4.49	0.65
E4	1.15	1.22	1.21	1.10	0.98
E5	2.46	3.42	3.66	3.26	2.25
E6	1.93	2.46	3.06	2.52	1.75
E7	1.14	2.38	1.74	1.20	1.12
Promedio	1.36	2.33	2.42	2.13	1.22

#### ICU Máxima

Estación	0.00	0.50	0.63	0.67	0.92
E1	4.86	5.86	4.45	4.25	4.02
E2	4.48	5.45	5.44	6.41	3.64
E3	4.09	5.10	7.52	7.86	3.88
E4	4.95	4.20	4.78	4.62	4.49
E5	6.38	9.19	9.58	6.44	4.88
E6	4.76	4.80	7.90	5.99	4.60
E7	4.00	9.06	4.91	3.95	4.18
Promedio	4.79	6.24	6.37	5.65	4.24

Para el mapa se consideró la ICU nocturna promedio y máxima por estación - para la estación de verano (DEF)

## 7.1.2 DISCONFORT TÉRMICO AMBIENTAL DE THOM

En primer lugar, y considerando los valores de Meteorological data, se calculó un índice adicional de Discomfort Térmico Ambiental, el índice Temperatura / Humedad - THI (Thom, 1956) que, al igual que el índice Humidex, integra humedad relativa y temperatura del aire, a través de la siguiente ecuación:

$$THI = T_{air} - (0,55 - 0,0055HR) * (T_{air} - 15,4)$$

Donde,

- T<sub>air</sub> es temperatura del aire (en °C)
- HR es humedad relativa del aire (%)

De acuerdo con este índice, el confort térmico se ubica entre los valores 15 y 20 y, sobre este valor, se considera Discomfort Térmico por calor.

Al comparar el resultado de los índices, para la mayoría de las ciudades, los valores de ambos se asocian con Discomfort Térmico. Las ciudades con temperaturas promedio y máximas más bajas presentan diferencias, las ciudades de la zona sur austral, de Osorno al sur, y la ciudad de Calama presentan diferencias, ya que -de acuerdo con el indicador de Humidex- se encuentran en situación de confort, mientras que -de acuerdo con los resultados de THI- presentan Discomfort Térmico. Esto podría asociarse al peso que la humedad tiene en el primer indicador, puesto que, en Chile, las temperaturas máximas del período estival coinciden con la humedad mínima diaria registrada. Las diferencias anteriores se dan en un número reducido de ciudades, al considerar los valores promedios de verano futuros.

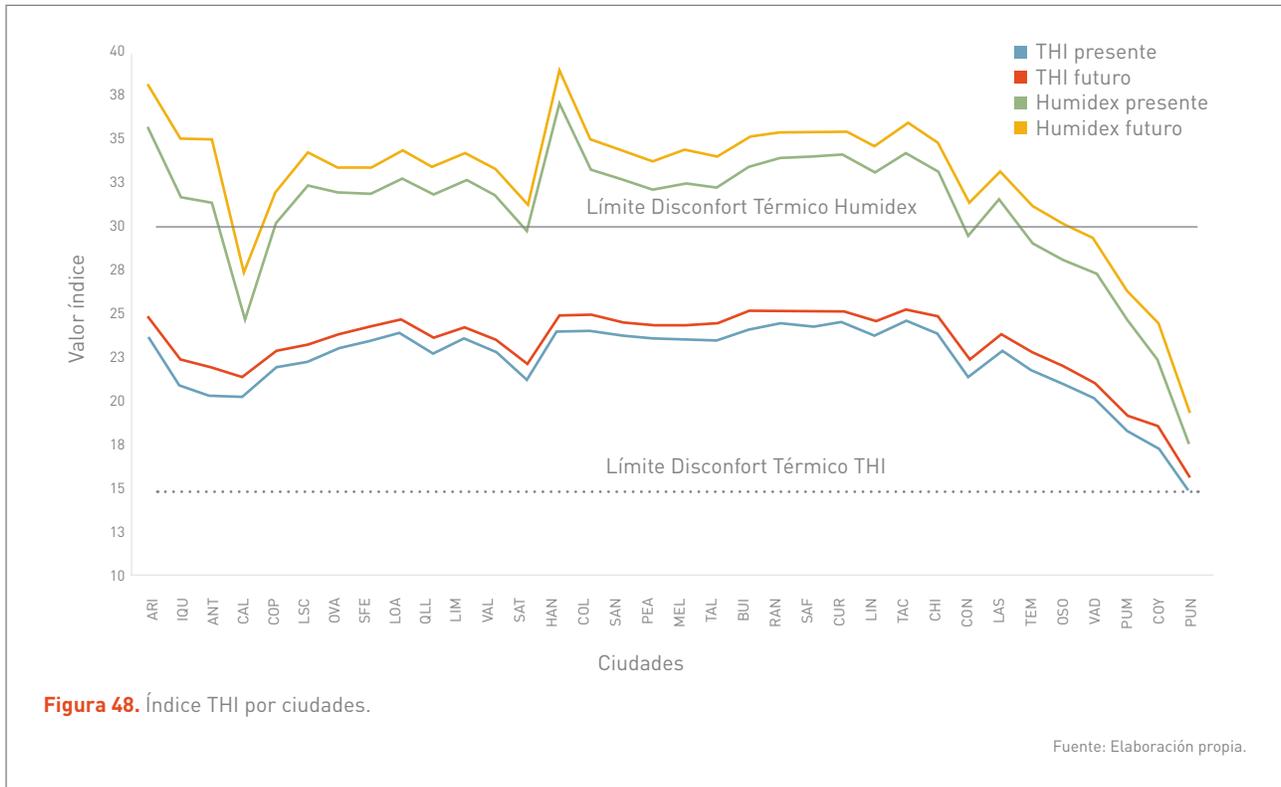


Figura 48. Índice THI por ciudades.

Fuente: Elaboración propia.

En la **Tabla 28**, se muestran las diferencias del cálculo de los índices de confort Humidex y Thom, calculados con datos proporcionados por Meteodata y a partir de los valores de temperatura y humedad relativa del aire, registrados por estaciones meteorológicas urbanas oficiales disponibles. Se consideraron los datos promedio de las 15 horas, para el mes de enero, ya que a las 15:00 se alcanza

el *peak* de temperatura. La mayor diferencia se observa para la ciudad de Arica, sin embargo, en ambos casos, la condición es de confort térmico. El único caso en el que la diferencia representa un cambio en la condición, es en la ciudad de Punta Arenas, para la cual el valor de THI calculado instrumentalmente se encuentra fuera del límite inferior de la zona de confort.

CIUDAD	HUMIDEX			THI		
	Meteodata	Instrumental	Diferencia	Meteodata	Instrumental	Diferencia
Arica	35,4	33,0	2,3	23,9	22,3	1,6
Antofagasta	31,2	31,4	-0,3	20,6	21,3	-0,7
Calama	24,7	24,9	-0,1	20,6	20,5	0,2
Los Andes - Calle Larga	32,5	35,0	-2,5	24,1	25,0	-0,9
Gran Santiago	32,5	33,3	-0,8	23,8	23,8	0
Curicó	33,9	33,8	0	24,6	24,2	0,4
Talca - Culenar	34,1	34,1	0	24,6	24,5	0,1
Chillán - Chillán Viejo	33,0	32,8	0,2	24,1	24,0	0,1
Osorno	28,1	27,2	0,8	21,2	20,2	1,0
Coyhaique	22,5	21,3	1,2	17,7	17,2	0,4
Punta Arenas	17,9	14,3	3,5	15,1	13,4	1,7

Tabla 28. Comparación índices de confort HUMIDEX y THI..

Confort térmico ambiental	Disconfort Térmico Ambiental	Valores de disconfort por frío
---------------------------	------------------------------	--------------------------------

Fuente: Elaboración propia en base a información de estaciones meteorológicas y Meteodata.



### 7.1.3 HELADAS

Para esta cadena de impacto, se utilizaron los datos de temperatura mínima diaria de las estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile, puestas a disposición por el Centro de Ciencia y el Clima (CR)<sup>2</sup>. De las estaciones disponibles, se dejaron fuera aquellas que no contaran con al menos 10 años de datos. Las ciudades sin información para validar las heladas son, de norte a sur: Ovalle, San Felipe, Los Andes, Limache, Gran Valparaíso, Colina, Peñaflor, Talagante, Buin, Rancagua, San Fernando, Linares y Osorno.

El número de heladas promedio proporcionadas por la base de datos de Meteodata, en general, coincide con aquellas que se obtienen con los datos de estaciones meteorológicas, sobre todo en aquellas ciudades que poseen temperaturas mínimas promedio de invierno mayores a 12°C. Las mayores diferencias se encuentran en las ciudades con temperatura promedio igual o menor a 0°C, como Calama, Punta Arenas y Coyhaique.

Ciudad	Nombre estación	Inst.	Inicio obs.	Fin obs.	Prom. Min	Heladas informe	Heladas estaciones meteo.	Dif.
Arica	Chacalluta Arica Aerop.	DMC	1/1/66	3/10/2018	14,6	0	0	0
Iquique - Alto Hospicio	Diego Aracena Aerop.	DMC	1/1/50	3/10/2018	13,9	0	0	0
Antofagasta	Cerro Moreno Aerop.	DMC	1/1/50	3/10/2018	12,0	0	0	0
Calama	El Loa Calama Aerop.	DMC	1/1/67	3/10/2018	-0,1	22,2	56,0	-33,8
Copiapó	Copiapó	DGA	4/1/84	3/7/2018	6,5	0	0,7	-0,7
La Serena - Coquimbo	La Florida La Serena Aerop.	DMC	4/10/50	3/10/2018	8,1	0	0	0
Quillota - La Calera - La Cruz - Hijuelas	Quillota	DGA	11/2/77	12/31/2016	5,0	10,8	7,1	3,7
San Antonio - Cartagena - Las Cruces - Santo Domingo	Santo Domingo Aerod.	DMC	8/1/66	3/10/2018	5,7	0	4,8	-4,8
Hanga Roa	Mataveri Aerop.	DMC	6/14/54	3/9/2018	15,8	0	0	0
Gran Santiago	Quinta Normal	DMC	1/1/50	3/10/2018	4,9	3,3	9,0	-5,7
Melipilla	Melipilla	DGA	6/3/71	9/6/2013	5,6	7,6	5,1	2,5
Curicó	General Freire Aerod.	DMC	1/1/50	3/10/2018	4,2	12,8	17,0	-4,3
Talca - Culenar	Talca U.C.	DGA	3/1/82	3/7/2018	4,3	10,7	16,6	-5,9
Chillán - Chillán Viejo	Bernardo O'Higgins Aerod.	DMC	1/1/50	3/10/2018	4,3	16,4	18,4	-2,0
Gran Concepción	Carriel Sur Aerop.	DMC	1/1/50	3/10/2018	6,0	0,9	5,7	-4,81
Los Ángeles	María Dolores Aerod.	DMC	1/1/52	3/10/2018	4,0	16,6	7,3	9,3
Temuco - Padre Las Casas - Cajón	Maquehue Temuco Aerop.	DMC	1/2/50	3/10/2018	4,0	19,2	23,5	-4,3
Valdivia	Valdivia [U. Austral]	DGA	1/1/2000	6/30/2014	5,1	4,0	6,6	-2,6
Puerto Montt	El Tepual Aerop.	DMC	2/1/50	3/10/2018	3,8	4,2	22,6	-18,4
Coyhaique	Escuela Agrícola	DGA	1/1/81	3/7/2018	0,1	56,8	40,3	16,5
Punta Arenas	Punta Arenas	DMC	1/1/58	3/10/2018	-0,3	73,2	52,6	20,6

**Tabla 29.** Detalle del Disconfort Térmico Ambiental presente y futuro para el mes de enero.

Fuente: Elaboración propia.

