



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**Facultad de Arquitectura y Urbanismo**  
**Escuela de pregrado**  
**Carrera de Geografía**

# **PROPUESTA DE REDUCCIÓN DEL EFECTO ISLA DE CALOR URBANO SUPERFICIAL (ICUS) EN LA CIUDAD DE CURICÓ**

Memoria para optar al Título Profesional de Geógrafo

**DANIEL MOYA CASTILLO**

**Profesora Guía: Dra. Pamela Smith Guerra**

**SANTIAGO – CHILE**

**2020**

## Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, quienes son las personas que han estado a mi lado durante toda mi vida y son el principal motivo para cumplir mis objetivos como persona. Los amo. Quiero agradecer también a mi prima Carolina, quien estuvo constantemente apoyándome y aconsejándome durante este proceso.

A mi amigo Mauricio, por estar más de 19 años y compartir muchas historias y secretos a lo largo de nuestra amistad. A mi amiga Valentina, mi mejor amiga del colegio, gracias por estos casi 7 años de amistad, que comenzó el 30 de abril de 2014, en donde nos hemos contado muchas historias y nos hemos aconsejado mutuamente en los malos y buenos momentos. Los quiero mucho.

A mis compañerxs de curso, la generación 2015 de geografía, la mejor generación, por lejos. Y en especial a Helena, Jaime, Alfonso y Pablo por aceptarme y entregarme su confianza como amigo y persona. Por los consejos personales, agradecer especialmente a Jaime y Pablo. Y gracias por las tardes de ping pong/tenis de mesa entre 2016 y 2018. Ojalá algún día volvamos a jugar. Ah, y por supuesto al querido Rayo Vayacaño y al Borrayo por contratarme durante la temporada 2018 😊.

A lxs georatas, Paula, Fran, Claudio, Carlos y Sergio. Simplemente decir que son bacanes cabrxs, muchas gracias por los buenos momentos.

Quiero darle infinitas gracias a mi profesora guía Pamela Smith por confiar en mí y aceptarme como su memorista, por responder mis dudas, orientarme y ser una inspiración para desenvolverme en la geografía. Y también muchísimas gracias al profesor Pablo Sarricolea, cuya ayuda fue crucial para poder desarrollar esta memoria.

Por último, agradecer a algunas personas muy especiales que estuvieron presente durante este proceso. Gracias por todo.

*“You can't kill energy, energy doesn't die”*

– Lil Peep (1 de noviembre de 1996 – 15 de noviembre de 2017)

## Resumen

El crecimiento de las ciudades implica reemplazar cobertura vegetal por materiales contruidos, lo que modifica las propiedades de los suelos y su interacción con el medio ambiente. Uno de los efectos más notables del cambio de cobertura, es la presencia de las Islas de Calor Urbana Superficiales (ICUs), la cual consiste en una diferencia de temperatura entre la zona rural y la zona urbana de la ciudad, siendo en la mayoría de los casos mayor temperatura en la ciudad que en sus alrededores. Este fenómeno se intensifica, principalmente, durante el verano, puesto que la alta cantidad de radiación, la disminución de las precipitaciones, las altas temperaturas de la época, la contribución de la materialidad de construcción, entre otros aspectos, hacen que la temperatura urbana sea mucho más alta que las zonas rurales. Estudios como el de Smith y Romero (2016) demuestran que hay grandes diferencias en la intensidad de la isla de calor dentro de una misma ciudad.

En el caso de las ciudades chilenas, datos de *Google Earth Engine* grafican que existe una gran diferencia durante gran parte del año entre la zona urbana y la zona rural. El estudio de Toro (2019), que abarcó los años 2008 y 2018, demostró que la ciudad de Curicó es la segunda con la mayor intensidad de isla de calor superficial entre las ciudades medias chilenas, después de Rancagua.

Considerando lo anterior, en esta investigación se pretende conocer el comportamiento climático de la ciudad de Curicó mediante la obtención de datos históricos para determinar los años con menos precipitación promedio y con el verano más caluroso, obteniendo como resultado los años 2019 y 2020 respectivamente. Conociendo esto, el período estudiado corresponde al verano del año 2020, en el cual se analizó la temperatura superficial mediante imágenes satelitales y en visita a terreno, así como las intensidades de las islas de calor a escala de microclima dentro de la ciudad. Por último, con los datos obtenidos se elaboró una propuesta de infraestructura verde para reducir la intensidad de la isla de calor de Curicó.

Los resultados demuestran que el modelo de simulación climática *ENVI-met* puede ser de gran ayuda para la planificación urbana, ya que grafica con bastante precisión las características urbanas del área de estudio y evidencia las diferencias entre el paisaje real actual y el simulado cuando se consideran algunas modificaciones en el diseño urbano.

**Palabras claves:** Isla de Calor Urbana Superficial (ICUS) – Microclima – Planificación urbana sensible al clima – Simulación del clima.

## Índice de Contenidos

<b>Resumen</b> .....	3
<b>Capítulo N°1: Presentación</b> .....	7
1.1 Introducción .....	7
1.2 Planteamiento del problema.....	9
1.3 Área de estudio .....	13
1.4 Objetivos.....	18
<b>Capítulo N°2: Marco Teórico</b> .....	19
2.1 Urbanización en Chile y sus efectos sobre el clima.....	19
2.2 Clima urbano.....	21
2.3 Planificación urbana sensible al clima.....	25
2.4 Programas de modelación climática .....	28
<b>Capítulo N°3: Metodología</b> .....	31
3.1 Tipo de estudio.....	31
3.2 Enfoque del estudio .....	31
3.3 Objetivo específico N°1 .....	32
3.4 Objetivo específico N°2 .....	34
3.5 Objetivo específico N°3 .....	41
<b>Capítulo N°4: Resultados</b> .....	46
4.1 Antecedentes climáticos de la ciudad de Curicó.....	46
4.2 Comportamiento de la temperatura superficial de Curicó durante la época verano de 2019 – 2020 .....	51
4.3 Escenarios de reducción del efecto isla de calor en el microclima presente en la ciudad de Curicó.....	59
<b>Capítulo N°5: Discusiones y Conclusiones</b> .....	70
5.1 Discusiones .....	70
5.2 Conclusiones y recomendaciones .....	73
<b>Bibliografía</b> .....	75
<b>Anexos</b> .....	86

## Índice de Figuras

<b>Figura 1:</b> Localización de la ciudad y comuna de Curicó en la Región del Maule .....	13
<b>Figura 2:</b> Climatología e hidrografía de la comuna de Curicó .....	14
<b>Figura 3:</b> Zonificación climática de la ciudad de Curicó .....	16
<b>Figura 4:</b> Distribución de temperatura en la Isla de Calor Urbana en Madrid, España.....	23
<b>Figura 5:</b> Ubicación de la Estación General Freire en la ciudad de Curicó .....	33
<b>Figura 6:</b> Zonas sobrevoladas mediante dron.....	40
<b>Figura 7:</b> Área de estudio visualizada en el comando <i>SPACES</i> .....	41
<b>Figura 8:</b> Tipos de suelo, vegetación y edificaciones modeladas.....	42
<b>Figura 9:</b> Paisaje propuesto .....	43
<b>Figura 10:</b> Vista general del comando <i>LEONARDO</i> de <i>ENVI-met 4.4.5</i> .....	45
<b>Figura 11:</b> Temperatura media anual en Curicó, período 1966 – 2001.....	46
<b>Figura 12:</b> Temperatura media anual en Curicó, período 2012 – 2019.....	47
<b>Figura 13:</b> Promedio de temperaturas máximas de verano en Curicó, período 1959 – 2020 .....	48
<b>Figura 14:</b> Precipitación media anual en la ciudad de Curicó, período 1959-2019 .....	49
<b>Figura 15:</b> Temperatura superficial rural y urbana e islas de calor diurnas en la ciudad de Curicó, período de verano de 2020.....	51
<b>Figura 16:</b> Temperatura superficial e intensidades de las islas de calor urbana diurna en la ciudad de Curicó para el día 26 de enero de 2020.....	52
<b>Figura 17:</b> Variables explicativas del comportamiento de la isla de calor en Curicó .....	53
<b>Figura 18:</b> Ortofoto del sobrevuelo a 70 metros.....	56
<b>Figura 19:</b> Temperaturas superficiales a escala de microclima en la ciudad de Curicó.....	57
<b>Figura 21:</b> Temperatura del aire en paisaje real y simulado.....	61
<b>Figura 22:</b> Radiación directa en el paisaje real y simulado .....	63
<b>Figura 23:</b> Humedad relativa en el paisaje real simulado.....	65
<b>Figura 24:</b> Temperatura de techos y fachadas norte y poniente en paisaje real y simulado	67
<b>Figura 25:</b> Funcionamiento del programa <i>ENVI-met 4.4.5</i> .....	72

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1:</b> Superficie de áreas verdes en la ciudad de Curicó .....	11
<b>Tabla 2:</b> Valores de las 10 ciudades con los valores de Islas de Calor de Urbano Superficial (ICUS) diurnas más altas de Chile en la época de verano, período 2008 – 2018.....	12
<b>Tabla 3:</b> Tipos de infraestructura verde a escala de microclima .....	28
<b>Tabla 4:</b> Descripción básica de distintos programas de simulación climática.....	29
<b>Tabla 5:</b> Variables climáticas trabajadas .....	32
<b>Tabla 6:</b> Adaptación de las intensidades de la isla de calor para la temperatura superficial con el satélite <i>MODIS</i> .....	35
<b>Tabla 7:</b> Bandas espectrales del satélite <i>Landsat 8</i> .....	36
<b>Tabla 8:</b> Cálculo de la temperatura superficial con imágenes del satélite <i>Landsat 8</i> .....	37
<b>Tabla 9:</b> Intensidades de la isla de calor para la temperatura superficial con <i>Landsat 8</i> .....	38
<b>Tabla 10:</b> Datos de entrada para la simulación en <i>ENVIGuide</i> .....	44
<b>Tabla 11:</b> Resultados de la regresión múltiple entre las variables explicativas.....	54
<b>Tabla 12:</b> Relación entre las variables explicativas y la intensidad de la isla de calor urbana, verano de 2019 – 2020 .....	55
<b>Tabla 13:</b> Sensibilidad de la temperatura ante escenarios que modifican las variables explicativas .....	55
<b>Tabla 14:</b> Descripción de las principales características del programa ENVI-met 4.4.5 ....	71

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1:</b> Códigos para descargar una imagen desde <i>Google Earth Engine</i> .....	86
<b>Anexo 2:</b> Metadatos de la imagen del satélite <i>Landsat 8</i> .....	87
<b>Anexo 3:</b> Imagen en 3D del paisaje propuesto.....	88
<b>Anexo 4:</b> NDVI de la ciudad de Curicó, día 26 de enero de 2020 a las 14:33 hrs.....	89
<b>Anexo 5:</b> Temperatura recreada por ENVI-met en el área sobrevolada por el dron.....	90
<b>Anexo 6:</b> Temperatura de fachadas exteriores oriente y sur en el paisaje real .....	91
<b>Anexo 7:</b> Temperatura de fachadas exteriores oriente y sur en el paisaje propuesto.....	92

# Capítulo N°1: Presentación

## 1.1 Introducción

A nivel mundial, la actividad humana y las construcciones presentes en las ciudades alteran el comportamiento del clima, lo que se ve reflejado en los cambios de temperatura, la cantidad de precipitación, la presencia de nubosidad, la cantidad de contaminación, entre otros elementos; estas modificaciones se deben, principalmente, a la deforestación, la desertificación, las alteraciones al recurso hídrico y, principalmente, a las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que las ciudades son quienes más emiten este compuesto al medio ambiente (Velasco y Roth, 2010).

La gran concentración de población en ciudades genera problemas medio ambientales que, en muchos casos, son a causa de la alteración del clima; por ejemplo, en la ciudad de Santiago de Chile existe una notoria diferencia de temperatura entre las zonas con mayor presencia de vegetación y las que poseen menor vegetación, lo que afecta la localización y la intensidad de la “Isla de Calor Urbano” (ICU) (Smith & Romero, 2016). Este concepto es utilizado a menudo para explicar la distribución y diferencias de temperatura al interior de zonas urbanas y sus alrededores (Espere, 2005). La ICU es resultado del proceso de reemplazo de cubierta natural de suelo por cubierta urbana, la que está compuesta principalmente de asfalto y concreto, además de las actividades industriales y de transporte que contribuyen al calentamiento urbano (Oke, 2009). La construcción del clima urbano es un proceso constante, ya que el crecimiento de las ciudades relacionado con su formación también lo es, y mientras más reemplazo haya de cubierta natural por pavimento y edificaciones, mayor será la modificación del clima.

El estudio del clima urbano abre oportunidades para desarrollar nuevas metodologías que sean factibles para estudiar los fenómenos climáticos en espacios urbanos, ya sea en toda la ciudad o espacios más pequeños que constituyan estudios a escala de microclima. En este sentido, los modelos de simulación climática se presentan como una técnica para representar espacios urbanos en el computador y así lograr que estos modelos sean lo más parecidos a la realidad. Los modelos climáticos, en su mayoría, trabajan con datos a escala microclimática (Alchapar y Correa, 2016), lo que permite modelar diversos espacios de una misma ciudad como las plazas públicas, las cuales poseen un clima específico producto de la altura de los edificios a su alrededor, su capacidad de retención y dispersión de calor, la densidad y altura de la vegetación presente, etc. (Tumini, 2013). Al trabajar con la escala microclimática, es posible conocer el comportamiento climático de distintos espacios urbanos en una misma ciudad. Esto último puede entregar oportunidades a diversos actores públicos para que consideren el clima urbano dentro de los lineamientos de una planificación urbana equitativa en el territorio.

El software climático escogido en esta investigación es *ENVI-met 4.4.5*, un programa desarrollado por Michael Bruse (1999) en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz – Alemania, de acceso gratuito en su versión de prueba para estudiantes y licencia pagada para su versión ilimitada. El modelo funciona a escala de microclima, una resolución de 0,5 a 10 metros en el espacio y de 10 segundos en el tiempo. Para los resultados, el modelo en 3D funciona con tres parámetros: vegetación, composición de suelo y atmosféricos. Como dato de entrada es necesario solo una imagen satelital con la cual es posible trabajar el modelo, el cual entrega una gran cantidad de datos de salida para su posterior análisis.

Esta herramienta es una de las más factibles de utilizar en el estudio del microclima urbano y posee muchas ventajas en comparación con otros modelos de simulación climática (Arnfield, 2003, en Alchapar y Correa, 2016), además de estar validada por muchos autores a nivel internacional (Alchapar y Correa, 2016).

La presente memoria se inserta en el proyecto FONDECYT N° 11180990: “Construcción social del clima: Hacia la calidad y justicia climática urbana en Chile”, el cual tiene como objetivo principal analizar la calidad climática en ciudades seleccionadas de Chile, identificando sus factores explicativos a diferentes escalas espaciales, como base para proponer lineamientos de planificación sensible al clima en el marco de la justicia climática urbana, y, en el caso de esta investigación, evaluar la potencialidad de un modelo de simulación climática para simular escenarios de resiliencia climática en espacios urbanos.

La sociedad del mundo actual enfrenta un escenario adverso en tanto calidad del medio ambiente se refiere, lo que obliga a distintos actores, públicos, comunidades y privados, a participar de la creación de propuestas y planes de mitigación del cambio climático y sus efectos en la cotidianeidad. En el caso de Chile, los índices climáticos varían dependiendo de la zona del país, como por ejemplo la ciudad de Curicó, la cual se encuentra en la Región del Maule entre la Cordillera de Los Andes y la Cordillera de la Costa, dentro de un clima mediterráneo con altos valores de calor urbano superficial (Toro, 2019). Es en este sentido que esta investigación tiene como objetivo proponer estrategias de resiliencia al cambio climático en la ciudad de Curicó, a través de, en primer lugar, la selección de espacios urbanos y, en segundo lugar, a través de la elaboración de distintos diseños urbanos y el posterior modelado y evaluación del efecto sobre la temperatura superficial en estos escenarios propuestos.



## 1.2 Planteamiento del problema

Dentro del espacio terrestre, ocurren procesos físicos las 24 horas del día. Uno de estos procesos es la del comportamiento climático presente en el ambiente, comportamiento que al interactuar con espacios urbanos sufre modificaciones, creando así el clima urbano (Lombardo, 1997). Lo anterior genera cambios en el comportamiento del clima, entre los que se encuentran variaciones de temperatura, de precipitaciones, de condiciones de humedad relativa del aire, etc., lo que a su vez impacta en la calidad climática percibida por la población (Ramos, 2016).

Estos cambios en el comportamiento del clima en los últimos 200 años se enmarcan en el contexto del cambio climático global, el cual tiene como causa principal la emisión de gases de efecto invernadero y sus principales consecuencias son el aumento de la temperatura media global en 0,85°C promedio entre 1880 y 2012, el rápido retroceso de los hielos glaciares, el aumento del nivel medio del mar en 0,19 metros entre 1901 y 2010, así como el aumento de la ocurrencia y magnitud de incendios forestales (Bárcena et al, 2020).

Por otra parte, en la ciudad se observan impactos del cambio climático, que van desde el aumento en el nivel del mar que afecta a las áreas urbanas costeras, hasta una mayor frecuencia en los eventos extremos, como las olas de calor. En el escenario del aumento del nivel del mar, las ciudades costeras serán las más golpeadas, ya que eventos como huracanes, tormentas tropicales y precipitaciones serían más frecuentes, mientras que en fenómenos de olas de calor, las ciudades más afectadas son las que se localizan en los valles y con climas mediterráneos, puesto que el efecto isla de calor influye en la duración y en la frecuencia de eventos más cálidos en épocas estivales, aumentando, a su vez, la presencia de agentes contaminantes como el ozono troposférico (Fernández García, 2007).

Los impactos negativos del cambio climático sobre el medio ambiente y la sociedad se pueden ver principalmente en dos niveles espaciales dentro de la ciudad: la mesoescala y la microescala; la primera hace referencia a variaciones climáticas en todo el conjunto urbano, es decir, a escala de kilómetros dentro de la ciudad, viéndose influenciada por la presencia de estructuras naturales como ríos o topografía y por la presencia de estructuras artificiales, como parques urbanos, altura de edificios, etc.; la segunda escala considera las dinámicas climáticas ocurridas en pequeñas distancias, como por ejemplo calles y plazas (Tumini, 2013).

Producto de estos impactos negativos en el clima urbano, surge el concepto de calidad climática, el cual, según Bitan (1992), comienza a ser un tema de preocupación para planificar las ciudades en el futuro, ya que considera que la degradación del medio ambiente es uno de los aspectos que más influyen en el deterioro de la calidad climática, degradación que debe ser mitigada para tener una mejor calidad de vida urbana.

A nivel regional, en América Latina, la alta tasa de urbanización y del reemplazo de coberturas naturales por pavimento, configuran factores que causan el fenómeno de la isla de calor urbano, problema que se ve intensificado por el cambio climático en ciudades como Buenos Aires, Bogotá, Ciudad de México, Lima, São Paulo y Santiago (Krellenberg et al, 2013). En el caso específico de Santiago, Krellenberg et al (2013) señalan que la influencia de la urbanización de las islas de calor en el estrés térmico es más alta en zonas con menos recursos y más vulnerabilidad social.

Dentro de América Latina, un factor que influye en la mitigación de las ICU y de los efectos del cambio climático en las ciudades es la presencia de áreas verdes urbanas, las que, producto de la alta urbanización, se encuentran muy poco extendidas dentro de la región (Rente et al, 1997). Las áreas verdes urbanas cumplen importantes roles ecológicos sobre el medio ambiente, principalmente los árboles, los cuales tienen la capacidad de enfriar el viento y modificar su velocidad, sombrear superficies como plazas y veredas, mejorar la calidad del aire, reducir la radiación solar significativamente (Rente et al, 1997) entre otras ventajas que los convierten en grandes aliados para reducir los efectos negativos de la ICU sobre el microclima urbano.

En Chile, las áreas verdes urbanas, presentan composiciones paisajísticas con mucha influencia desde Europa, producto de la colonización vivida desde mediados del siglo XVI en adelante, influencia que se puede notar con la gran presencia de césped, especies arbóreas y arbustivas exóticas y muy poca flora nativa (Rente et al, 1997). El predominio del césped por sobre especies arbóreas y arbustivas es una de las principales causas de la presencia de altas temperaturas en espacios públicos como las plazas, puesto que, al no haber altura en la vegetación, no se produce un efecto enfriador. En el caso de la distribución de áreas verdes por habitante, el umbral mínimo definido por la OMS es de 9 mts<sup>2</sup> de superficie por habitante como mínimo (Reyes y Figueroa, 2010), sin embargo, en Chile, este indicador es de 4,55 mts<sup>2</sup> promedio de áreas verdes por habitante, por debajo del promedio recomendado por la OMS (Corporación ciudades, 2019).

En el aspecto legislativo, la presencia de áreas verdes urbanas está regulada por la modificación del año 1992 a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (ley y D.S. 458-76), la cual establece los primeros lineamientos para la arborización de las áreas verdes urbanas (Rente et al, 1997). En la actualidad, el Plan de Adaptación al Cambio Climático 2018-2022, en su línea de acción número 4, sobre los espacios públicos, plantea la necesidad de que el espacio público sea un soporte para que las ciudades enfrenten los efectos negativos del cambio climático. Entre las ideas propuestas está la de aumentar la capacidad arbórea de las áreas verdes (Ministerio del Medio Ambiente, 2018), medida que en la práctica es fundamental para reducir los efectos adversos de la ICU en la población.

En el caso de la Región del Maule (ubicada en la zona mediterránea chilena), más

específicamente en la ciudad de Curicó, según el Plan de Desarrollo Comunal de 2017 (PLADECO, 2017), se indica que existen 659.804 m<sup>2</sup> de áreas verdes (tabla 1), además de la existencia de un plan de forestación desde el año 2015, el cual contempla la plantación de 1500 árboles ornamentales al año (Ilustre Municipalidad de Curicó, 2017). Un reporte del Diario La Prensa del año 2020, indica que existen más de 853.000 m<sup>2</sup> de áreas verdes en la comuna y que durante 2019 se agregaron más de 50.000 m<sup>2</sup> de áreas verdes, así como también se aumentó la plantación de especies arbóreas en las veredas y plazas públicas de Curicó (Diario La Prensa, 2020). Considerando esta superficie de áreas verdes para el año 2017 y los datos de población del CENSO de 2017, el indicador de áreas verdes por habitante es de 6,43 mts<sup>2</sup>, valor que se encuentra por sobre el promedio nacional, pero también por debajo de lo recomendado por la OMS.

**Tabla 1:** Superficie de áreas verdes en la ciudad de Curicó

Tipo de área verde	Superficie (m2)
Plazas	66.808
Parques	76.925
Áreas verdes no especificadas	516.071
<b>Total</b>	<b>659.804</b>

Fuente: Elaboración propia en base al PLADECO de Curicó de 2017.

En la tabla anterior se aprecia que el 78% (516.071 m<sup>2</sup>) de las áreas verdes de la ciudad de Curicó corresponden a áreas no clasificadas, mientras que las áreas verdes de esparcimiento, como plazas y parques, concentran un 22% (143.733 m<sup>2</sup>).

Considerando estos aspectos anteriormente mencionados, esta investigación tiene como fin elaborar estrategias de diseños urbanos que reduzcan los efectos de la isla de calor sobre espacios al aire libre a escala microclimática dentro de la ciudad de Curicó, ciudad que posee un alto crecimiento urbano, con más de un 274% en los últimos 25 años (1993 – 2018), además de tener una isla de calor urbana superficial (ICUS) más alta durante época estival con un valor de 5,92 (tabla 2) (Toro, 2019), cálculo que fue realizado mediante la selección de imágenes del satélite Modis en los períodos de verano de los años 2008 y 2018 y trabajadas mediante el programa *Google Earth Engine*. Por otro lado, esta investigación espera entregar lineamientos sobre la planificación sensible al clima para los Instrumentos de Planificación Territorial (IPT)'s.

**Tabla 2:** Valores de las 10 ciudades con los valores de Islas de Calor de Urbano Superficial (ICUS) diurnas más altas de Chile en la época de verano, período 2008 – 2018.

Ciudades	Verano Diurna		
	Temp. Urbana	Temp. Rural	ICU
San Felipe	42,91	34,55	8,36
Rancagua	40,26	32,75	7,51
Iquique	42,45	34,96	7,49
Los Andes	41,83	34,55	7,28
Quilpué	38,42	31,88	6,54
Valdivia (Centro)	28,13	21,81	6,32
Curicó	39,65	33,73	5,92
Los Ángeles	36,2	30,34	5,86
Melipilla	39,93	34,46	5,47
Buín	38,9	33,61	5,29

La diferencia entre T° Urbana y T° Rural (ambas en °C) conforma las ICUS, la cual se encuentra destacada en amarillo para el caso de Curicó y en azul la ICU resultante.

Fuente: Toro (2019).

### 1.3 Área de estudio

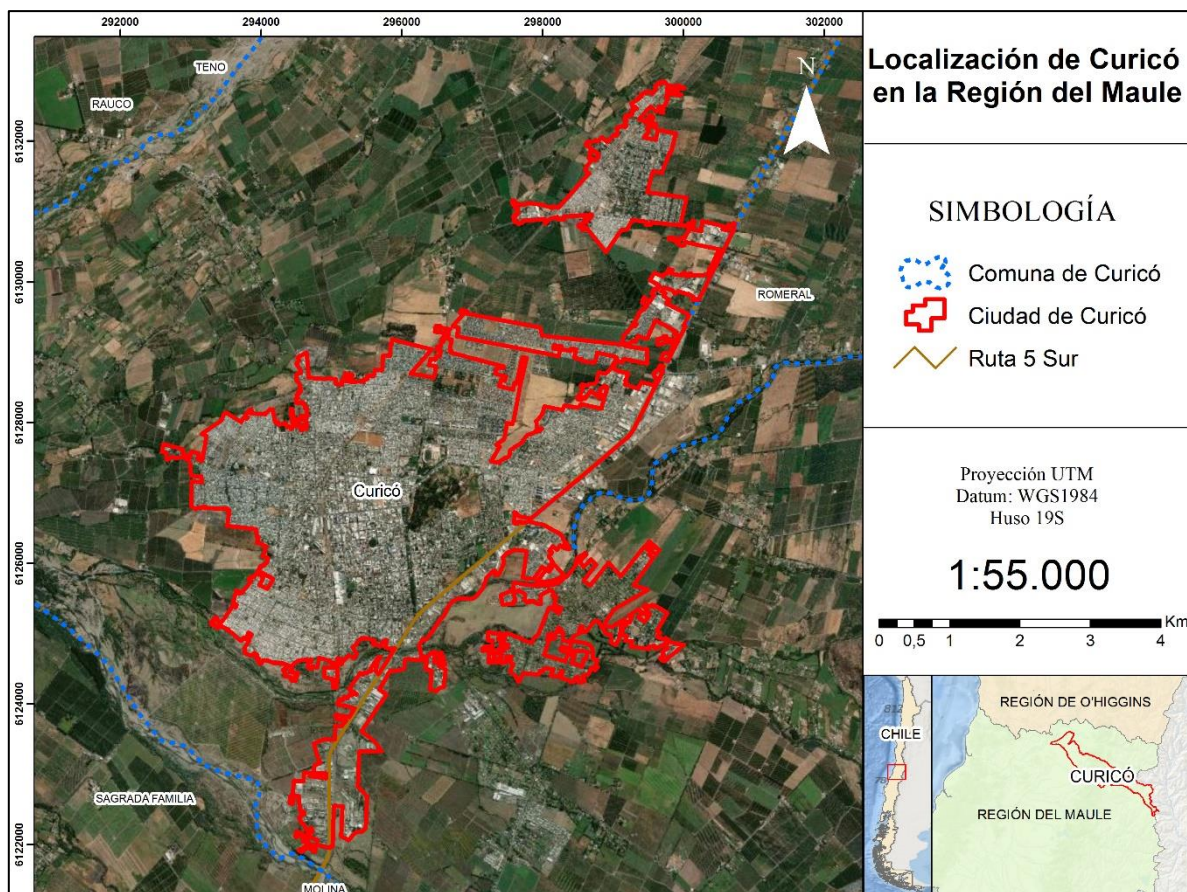
En primer lugar, se localizará geográficamente a la ciudad de Curicó dentro de la Región del Maule. En segundo lugar, se describirán las características específicas de la ciudad de Curicó, es decir, los aspectos físicos y demográficos.

#### 1.3.1 Características generales

La ciudad de Curicó se sitúa al noroeste de la comuna homónima, en la Región del Maule. La comuna de Curicó tiene una extensión total de 1333 km<sup>2</sup>, mientras que la ciudad de Curicó, la cual está restringida casi en su totalidad al poniente de la Ruta 5 tiene una extensión de 24,8 km<sup>2</sup>, lo que representa un 1,9 % del total del territorio de la comuna (Pladeco, 2017).

A continuación, la figura 1 muestra la situación geográfica y los límites de la ciudad y la comuna de Curicó.

**Figura 1:** Localización de la ciudad y comuna de Curicó en la Región del Maule.



Fuente: Elaboración propia en base a Capas IDE (2016).



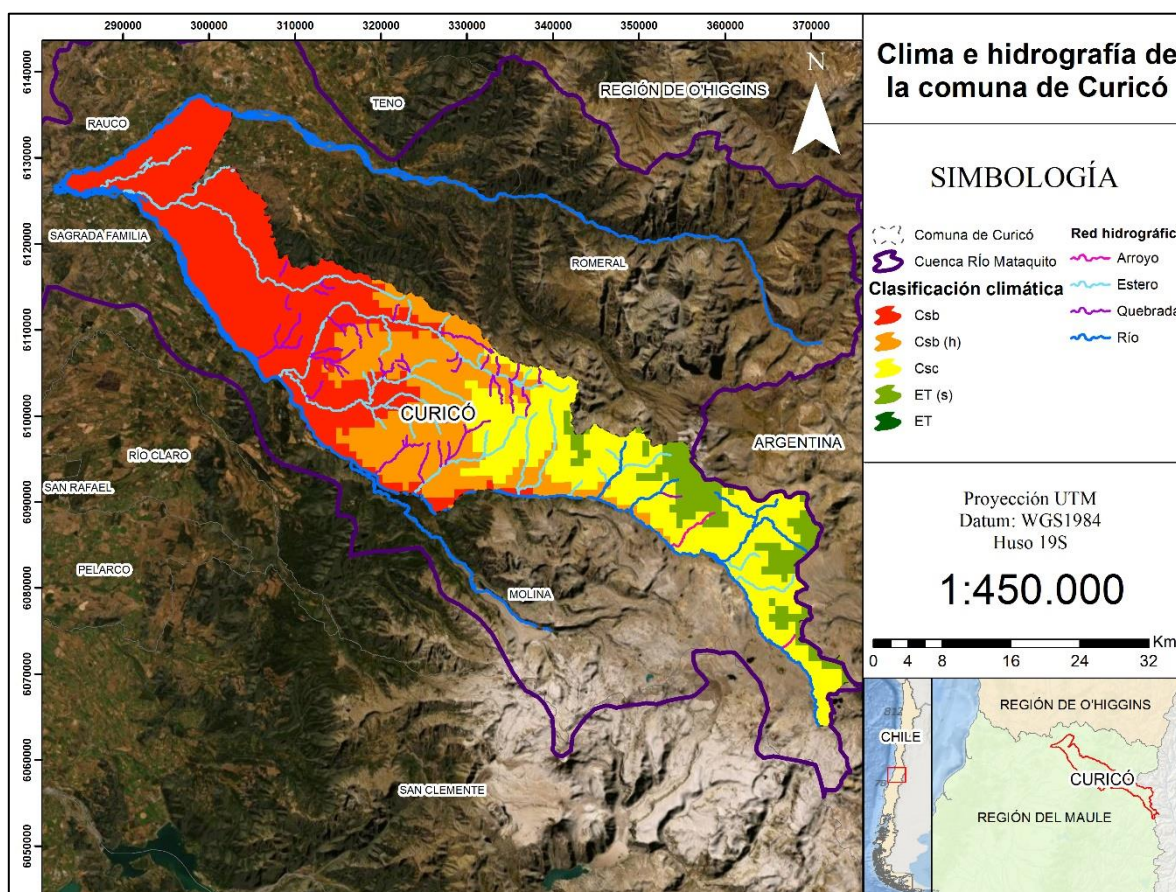
En términos generales, la figura 1 muestra que la comuna de Curicó limita al norte con la comuna de Teno, al norte y noreste con la comuna de Romeral, al noroeste con la comuna de Rauco, al este con la Provincia de Mendoza (Argentina), al suroeste con la comuna de Sagrada Familia y al sur con la comuna de Molina (Pladeco, 2017). Por otro lado, la ciudad de Curicó es la capital de la provincia homónima, la cual comprende las comunas de Curicó, Hualañé, Licantén, Molina, Rauco, Romeral, Sagrada Familia, Teno y Vichuquén.

### 1.3.2 Características físicas

- **Clima e hidrografía**

En la figura 2 se espacializan los climas presentes en la comuna de Curicó en base a la clasificación climática Köppen-Geiger, la cual fue descrita por Sarricolea et al (2016), y los datos hidrográficos según la Biblioteca del Congreso Nacional (s/f) y la Ufro (s/f).

**Figura 2:** Climatología e hidrografía de la comuna de Curicó.



Fuente: Elaboración propia en base a Sarricolea et al (2016), BCN (s/f) y Ufro (s/f).

Respecto a la figura 2, se pueden apreciar 5 tipos de climas en la comuna de Curicó:

1. **Csb (Clima mediterráneo de lluvia invernal)**: Es el clima que se presenta en el valle de la comuna de Curicó, así como en la ciudad. Presenta una temperatura media de 11°C con una precipitación media de 700 mm al año. Abarca desde los 100 hasta los 1000 m.s.n.m.
2. **Csb (h) (Clima mediterráneo frío de lluvia invernal en altura)**: Va desde los 1000 hasta los 3000 m.s.n.m., sobre el límite altitudinal de vegetación. Posee una temperatura media anual de 9°C con valores de precipitación media de 900 mm.
3. **Csc (Clima mediterráneo frío de lluvia invernal)**: Abarca desde los 650 hasta los 2500 m.s.n.m., sobre la zona cubierta por bosques y matorrales. Presenta una temperatura media anual de 6°C y una precipitación media anual de 900 mm.
4. **ET (s) (Clima de tundra de lluvia invernal)**: Se presenta entre los 1800 y 4750 m.s.n.m., con 700 mm anuales de precipitación y una temperatura media de 3°C.
5. **ET (Clima de tundra)**: Fluctúa entre los 2000 y 4300 m.s.n.m., con precipitaciones de 700 mm anuales, al igual que el clima ET (s), pero con una temperatura media anual de 3°C.

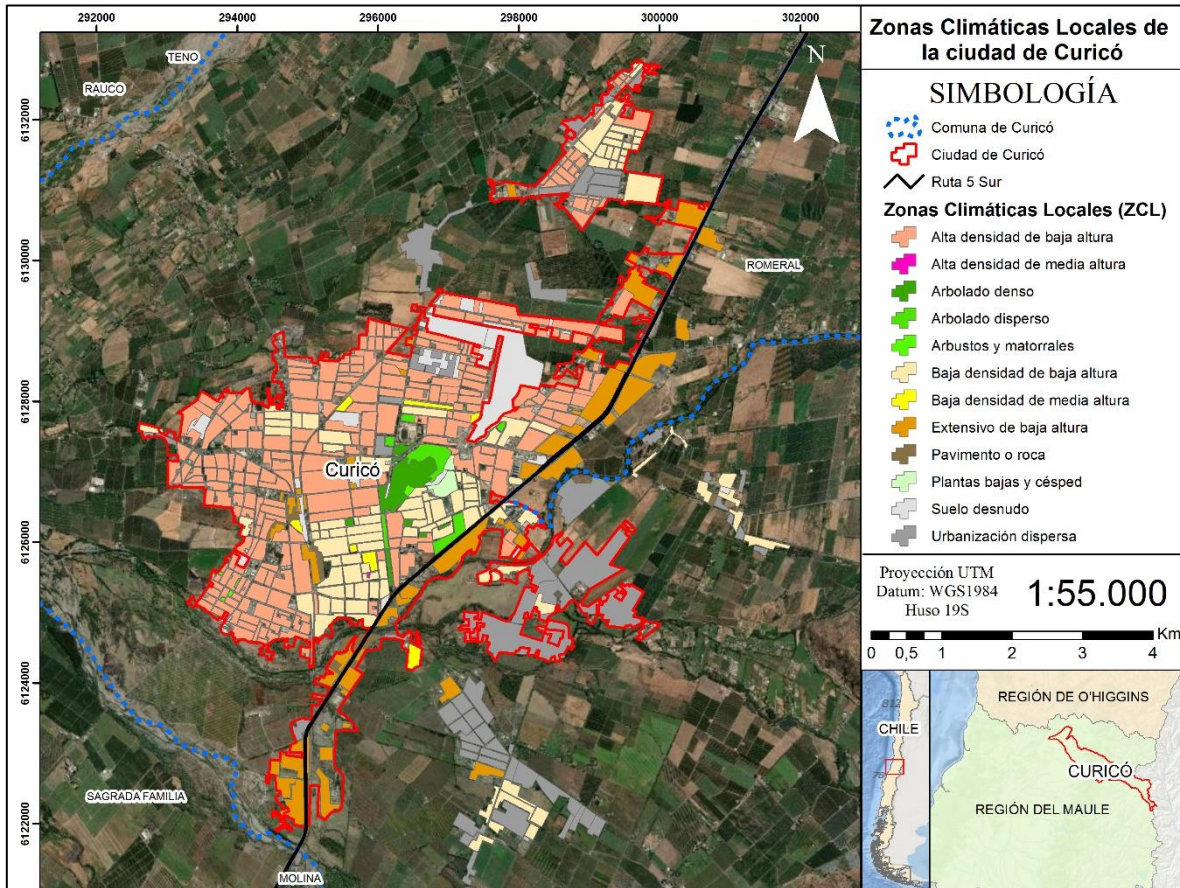
En cuanto a la hidrografía, la comuna de Curicó está inscrita completamente dentro de la cuenca del Río Mataquito, el cual se origina en la confluencia entre el Río Teno y el Río Lontué, en el límite suroeste de la comuna. Esta cuenca nace en la cordillera y se caracteriza por la presencia de esteros y quebradas en su interior, siendo además de carácter exorreico, es decir, que desemboca en el mar.

Dentro de la cuenca del Río Mataquito, se presentan dos ríos como principales afluentes: en primer lugar, el Río Teno, el cual se encuentra al norte de la comuna de Curicó y nace en la confluencia de los ríos del Nacimiento y Malo, este último naciendo en las lagunas de Teno, a más de 3000 m.s.n.m. El Río Teno drena un área de 1590 km<sup>2</sup> y posee una longitud de 102 km; en segundo lugar, se encuentra el Río Lontué, al sur de la comuna de Curicó, formándose en la confluencia entre los ríos Colorado y Patos de San Pedro. Este río abastece un área de 2510 km<sup>2</sup> y posee una longitud de 126 km (DGA, 2004). Más cerca de la zona urbana de Curicó, se encuentra el curso del Estero Guaiquillo, el cual recorre la zona industrial de la ciudad y la parte sur de los barrios Guaquillo, Aguas Negras y Santos Martínez.

- **Zonas Climáticas Locales (ZCL) de la ciudad de Curicó**

En la figura 3 se muestran las Zonas Climáticas Locales presentes en la ciudad de Curicó, en base a Oke et al (2017) y a los datos del CENSO de 2017.

**Figura 3:** Zonificación climática de la ciudad de Curicó.



Fuente: Smith (2020).

Respecto a la imagen 3, se establece que la Zona Climática Local predominante es la de alta densidad de edificaciones de baja altura, seguida de la zona de baja densidad de media altura, ambas con 8,82 km<sup>2</sup> y 4,35 km<sup>2</sup>, lo que refleja que la mayoría de las construcciones de la ciudad no superan los 3 pisos de altura y que la mayor parte del suelo está pavimentada (Stewart y Oke, 2012). En cuanto a las áreas verdes reconocidas en la zonificación, estas comprenden un área de solo 0,82 km<sup>2</sup>.



### **1.3.3 Características demográficas**

En el aspecto demográfico, la comuna de Curicó contaba en el año 2002, según el censo, con una población total de 119.585 habitantes, de los cuales 100.506 pertenecían a población urbana (84% del total), lo que representa una densidad de 4052 hab/km<sup>2</sup> dentro de la ciudad, mientras que 19.079 pertenecían a población rural (16%). Por otro lado, según el censo de 2017, la comuna de Curicó cuenta con una población total de 149.136 habitantes, lo que significa el aumento de un 18,2% de población respecto al censo anterior. En términos urbanos, la ciudad de Curicó aumentó su población a 132.569 habitantes, un 24,2% respecto a 2002, aumentando su densidad a 5345 hab/km<sup>2</sup>, mientras que la población rural disminuyó a 16.567 habitantes, un 14% menos en comparación con 2002 (INE, 2018).

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Proponer escenarios de diseño urbano sensible al clima para la mitigación del efecto isla de calor urbano estival en el microclima de la ciudad de Curicó, a partir de análisis de datos climáticos históricos registrados entre 1959 y 2020.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Describir la configuración climática histórica de la ciudad de Curicó entre los años 1959 – 2020.
- Analizar el comportamiento de la temperatura superficial de la ciudad de Curicó durante la época estival (verano) de 2019 – 2020.
- Modelar escenarios de reducción del efecto isla de calor en el microclima presente en la ciudad de Curicó.

## Capítulo N°2: Marco Teórico

### 2.1 Urbanización en Chile y sus efectos sobre el clima

El proceso de urbanización consiste, en términos generales, en la modificación de los usos y coberturas de suelo, a través de la sustitución de áreas naturales y rurales, como vegetación nativa o cultivos, por suelos urbanos con actividades industriales y residenciales y además por suelos desnudos, explicados por construcciones o especulación de tierras para la actividad inmobiliaria (Pauleit y Duhme, 2000).

Durante las últimas décadas, Chile ha experimentado un dinámico y constante aumento de su población urbana, siendo Santiago la ciudad que más habitantes concentra a nivel nacional. A nivel histórico de esta dinámica de crecimiento, De Mattos *et al* (2009) identifican dos factores que influyen en el proceso de urbanización en Chile; en primer lugar, está la localización de los recursos, la cual ha influido en la concentración de población entre los ríos Aconcagua y Biobío, en donde se emplazan ciudades como Valparaíso, Santiago, Chillán, Concepción, entre otras; el segundo factor mencionado por los autores es el modelo primario exportador, el cual permitió la aparición de diversos poblados en la zona central del país, configurando los actuales territorios urbanos existentes (Arenas e Hidalgo, 2002, en De Mattos *et al*, 2009). A nivel nacional, Santiago se convierte en un megacentro urbano, en donde su crecimiento es predominantemente vegetativo. Ya en 1998, la CEPAL adelantaba que el crecimiento urbano vivía un proceso de aceleración en Chile y en toda América Latina (CEPAL, 1998).

En el presente siglo, la urbanización en Chile al año 2015 era de un 89,5%, superando ampliamente la media de América Latina que concentra un 79,8% de su población en áreas urbanas y las proyecciones indican que para el año 2025 la población urbana en el país será de un 90,5%, superando nuevamente la media de la región, la cual se estima será de un 82,1% (ONU, 2016). De acuerdo con esto, Fuentes y Pezoa (2018) afirman que la población urbana en Chile es de un 90%, información que se puede corroborar con los datos del Censo del año 2017, además, ya para la década de 1970, los datos del Centro Interdisciplinario de Estudios Regionales (CIDU) señalaban que un 60% de la población urbana en Chile se concentraba en la denominada Macrozona Central, zona que comprendía a las regiones de Valparaíso y Metropolitana de forma integrada y como una macro región capital (CIDU, 1972).

Este acelerado aumento de la urbanización en el país produce efectos en el medio ambiente, como, por ejemplo, sobre el clima, alterando sus características y configurando un clima urbano para las ciudades. En este sentido, el Centro de Ciencia del Clima y Resiliencia (CR)2

(s/f) identifica cuatro problemas derivados del aumento de la urbanización, principalmente en la zona central y la zona sur de Chile:

1. Las urbes modifican el flujo atmosférico, perturbando de forma significativa la energía de la superficie y el equilibrio en la humedad (Hidalgo *et al*, 2008, en (CR)2).
2. Las grandes ciudades concentran porcentajes de población elevados, aumentando, necesidades como el uso del transporte, de la energía, los bienes, etc., dando espacio a emisiones de gran dimensión desde la ciudad. Estas emisiones tienen efecto el balance sobre radiación de manera directa o indirectamente sobre la región o a nivel mundial (Butler y Lawrence, 2009, en (CR)2).
3. Los efectos negativos sobre el clima de ciudades de la zona centro sur de Chile aumentarán producto de la proximidad con zonas de surgencia costera que modifican las propiedades de las nubes, los procesos biogeoquímicos en el océano y la capacidad de óxido en atmósfera.
4. Además, se prevé que la sequía en la zona central genere un desplazamiento hacia la zona sur del Chile, en cuanto a actividades agrícolas, de la población, lo que aumentará la presión sobre el suelo y el territorio en el sur del país.

El alto índice de urbanización presente en Chile Central, entre otros países de Sudamérica, fue destacado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en el año 2007 como causa de los diversos fenómenos socio naturales que afectan a la población, entre los que se mencionan la desertificación y degradación del suelo, lo que modifica el ciclo hidrológico y las características climáticas regionales. El IPCC menciona, además, que el posible crecimiento urbano de las ciudades sea debido a las consecuencias del cambio climático en zonas rurales. A raíz de esto, el informe del IPCC establece la necesidad de mitigar los efectos del cambio climático y a su vez adaptarse a estos (IPCC, 2007).

El elevado crecimiento urbano se convierte en un proceso inminente en el futuro, puesto que gran parte de la población habitará en estas zonas. Considerando este panorama, la CEPAL en el año 2016 identificó consecuencias negativas derivadas de este proceso, entre las que se encuentran el aumento de los costos de vida en las urbes producto de la escasez energética, la ausencia de recursos hídricos y la pérdida de capacidad para producir y distribuir alimentos. En este sentido, puede haber un aumento de la pobreza, creación de un ambiente precario, alto riesgo de transmisión de enfermedades y falta de funcionalidad, en mayor medida perjudicando a la infraestructura pública, al transporte y las telecomunicaciones. Por otro lado, dentro del informe del año 2016, identificando el cambio climático como escenario de riesgos urbanos, CEPAL plantea desafíos en términos de gestión de riesgo y de resiliencia en zonas urbanas para América Latina y el Caribe:

1. En el ámbito de la gestión del riesgo desde las ciudades, es menester prevenir y reducir los riesgos en la planificación territorial a escala urbana. Esto debe ser mediante la zonificación de riesgos asociadas a los distintos niveles de amenaza y susceptibilidad de las zonas y sus posibles usos, a los tipos de edificación y a la infraestructura permitida en estas áreas. Además, se debería incorporar la gestión de riesgo en la formación de toda la ciudadanía como parte integral de cada una de las etapas de la planificación urbana (gtz, 2010, en CEPAL, 2016).
2. Plantear el desafío de reconstrucción post-desastre. Una adecuada planificación de la reconstrucción debe considerar la ubicación/relocalización de viviendas e infraestructura urbana hacia suelos con menor nivel de exposición a las amenazas (zonas de inundación) o menor susceptibilidad frente a un posible evento. Además, esta reconstrucción debe considerar la vulnerabilidad de las construcciones en términos de materiales y tecnología de la construcción empleada (Visscher, 2008, en CEPAL, 2016).

Por último, se encuentra la planificación como prevención de estos riesgos, como lo es la construcción de estructuras que protejan de amenazas naturales, como reforestación para evitar escenarios de inundación y sequía.

## **2.2 Clima urbano**

En primera instancia, la ciudad se entiende como un ecosistema en donde existen comunidades humanas que transforman su hábitat a través de las actividades socio económicas en zonas urbanas y de los flujos de materia, energía e información, lo que establece a la ciudad como un sistema abierto. Por el contrario, los flujos presentes en los sistemas antrópicos, como la ciudad, se caracterizan por el consumo de recursos naturales, ya sea agua, vegetación o aire, los cuales terminan su proceso en zonas urbanas convertidos en desechos, lo que puede producir problemas a otros ecosistemas presentes en el mundo (Fariña Tojo, 2007).

Partiendo por esta base, el concepto de clima urbano es definido por Lombardo (1997) como la modificación artificial del clima producto de la alteración de los procesos aerodinámicos, térmicos e hidrográficos que ocurren en la atmósfera local a causa de la interacción de los componentes urbanos, como el suelo de concreto y los edificios, con el medio natural. Ferreli *et al* (2016) identifican factores que provocan la existencia del clima urbano, entre los que se mencionan el clima regional, el tiempo atmosférico, la topografía existente, el tamaño y morfología de la ciudad, el reemplazo de un espacio natural por uno artificial, las diferencias en la materialidad de las construcciones urbanas, la capacidad de impermeabilización de la

superficie natural, la ausencia o escasez de superficies evaporativas, la composición del aire urbano, el crecimiento de población y de superficie de la ciudad, etc. Otro aspecto característico de la influencia de las zonas urbanas sobre el clima urbano es evidenciado por Velasco y Roth (2010) quienes, en los resultados de su estudio, establecen que las emisiones y flujos de CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) son mayores en los lugares con mayor densidad de construcción y en el centro de las ciudades, emisiones que son de dos a cinco veces más grandes que las zonas residenciales en distritos suburbanos, donde el tráfico vehicular es menor y se presenta mayor cantidad de superficie cubierta por vegetación. Esto resalta las diferencias climáticas que hay entre zonas urbanas y rurales, evidenciando que las construcciones y las actividades humanas en el espacio urbano modifican las características climáticas.

El clima urbano presenta una distribución heterogénea dentro del espacio, producto de la materialidad y/o densidad de construcción, presencia o ausencia de vegetación, la distribución en el territorio y el origen de esta (nativa o exótica), etc., que está determinada, en muchas ocasiones, por la condición socio económica de los habitantes de cada zona dentro de un espacio urbano, como, por ejemplo, personas que habitan en zonas expuestas a amenazas como inundaciones, pendientes pronunciadas de cerros que pueden generar deslizamientos y otros fenómenos por gravedad e inestabilidad del suelo y zonas carentes de vegetación y de equipamiento urbano (Romero *et al.*, 2008). Estas malas condiciones de habitabilidad pueden provocar consecuencias negativas en la calidad de vida de sus habitantes, generando problemas medio ambientales y desigualdades ambientales en el territorio, e incluso problemas de salud (Romero *et al.* 2007c; Molina *et al.* 2007, en Romero *et al.*, 2008). De esta forma, se puede afirmar que se presenta una situación de injusticia ambiental en donde las condiciones socio económicas de la población determinan la desigual distribución de desventajas y beneficios ambientales y climáticos (Schlosberg, 2013).

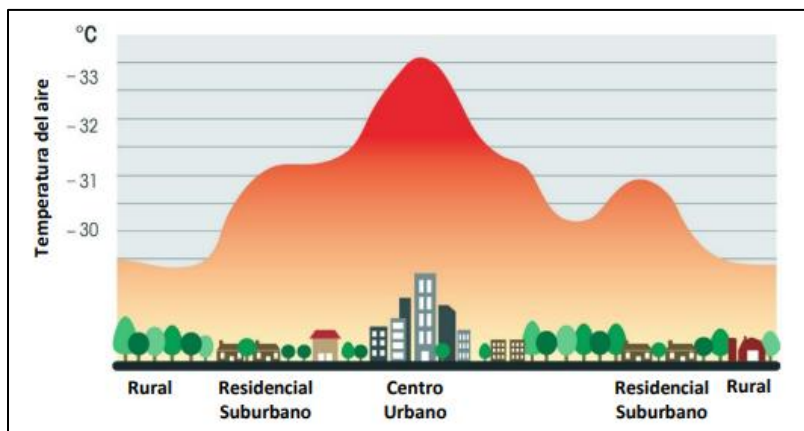
### **2.2.1 Isla de Calor Urbana (ICU)**

La diferencia de temperaturas dentro de las ciudades está determinada por factores, principalmente, de aumento construcción y de reducción de vegetación (García, 2018). Esta diferencia de temperatura constituye un caso de estudio para el mundo científico y especialmente los climatólogos, quienes han llamado a este fenómeno como Isla de Calor Urbana (ICU), la cual es el resultado del proceso de reemplazo de cubierta natural de suelo por cubierta urbana, la que se compone principalmente de asfalto y concreto, además de las actividades industriales y de transporte que contribuyen al calentamiento urbano (Oke, 2009). Este resultado se puede evidenciar a través de un observador que esté presente en la zona urbana y otro que esté en un medio rural, registrando los parámetros meteorológicos, principalmente la temperatura del aire, y comparando las diferentes condiciones climáticas

de cada espacio (Oke, 1987). Esta diferencia de temperatura puede ser constatada a través del estudio de Smith y Romero (2016) en la ciudad de Santiago, donde se evidencia una notoria diferencia de temperatura entre las zonas con mayor presencia de vegetación y las que poseen menor vegetación.

Tumini (2013) identifica dos tipos de islas de calor urbana para la ciudad de Madrid: la superficial y la atmosférica. La primera se produce cuando las superficies de suelo, techos y fachadas presentan una temperatura mayor a la del aire. La magnitud de la ICU superficial depende de la estación del año, la intensidad de la radiación solar y el tipo de suelo y revestimiento; en este sentido, Sarricolea y Martin-Vide (2014) afirman que en el caso de Santiago, la ICU superficial se presenta en zonas más densamente construidas y con predominancia de actividades industriales, además, esta ICU posee mayor tamaño en las épocas de otoño y verano en el centro de la ciudad, mientras que su tamaño es menor en las épocas de invierno y primavera y se circunscribe en la zona más densamente urbanizada hacia el oriente y hacia la zona industrial de la comuna de Quilicura. En segundo lugar, está la ICU atmosférica, donde Tumini identifica dos subtipos: 1) la ICU a nivel de suelo presente en la capa de aire, que afecta a la población y que se distribuye entre el suelo y la copa de los árboles o el límite superior de los techos y 2) la ICU de la capa en altura que inicia sobre los techos o árboles y llega hasta los 1,5 km de altura. La distribución de la temperatura presenta sus máximas en el centro urbano, la cuales van descendiendo una vez llegan a las zonas rurales aledañas a las zonas urbanas (figura 4).

**Figura 4:** Distribución de temperatura en la Isla de Calor Urbana en Madrid, España.



Fuente: Tumini (2013).

El estudio de Sarricolea y Martin-Vide del año 2014 identifica cuatro tipos de islas de calor en la ciudad de Santiago (Sarricolea y Martin-Vide, 2014):

- **Isla de calor urbana asociada a la cuña de las actividades industriales o isla urbana consolidada:** esta isla de calor se presenta en las zonas industriales de

Santiago, más precisamente en la dorsal de la Avenida Panamericana desde el norte de la comuna de Santiago hasta la comuna de Colina.

- **Isla de calor del piedmont y cuña de población de altos ingresos económicos:** se encuentra en zonas urbanizadas de la Cordillera de la Costa, en cerros isla y en la precordillera de Santiago.
- **Situaciones sin isla de calor urbana:** se da en situaciones en que los valores máximos de temperatura son menores al interior de la ciudad y mayores en las periferias, aunque aún no existe una variable climática que pueda explicar este suceso.
- **Isla de calor urbana más intensa al sur:** situación en donde hay zonas más cálidas al sur de la ciudad que en las demás zonas y, al igual que la isla de calor urbana consolidada, tiene su explicación en las industrias presentes en la Ruta Panamericana hacia el sur, conformando una dorsal térmica cálida.

### 2.2.2 Escala de microclima urbano

La escala de microclima urbano forma parte de las escalas presentes en el clima urbano, junto con la mesoescala y la escala local (Oke, 1978). El microclima urbano se refiere al estudio de espacios que van entre 1 cm y 1000 m de radio. Esta escala permite estudiar las características climáticas presentes en espacios como plazas públicas o parques y así ver su influencia en el confort térmico en la población (Cordero, 2014). El microclima urbano se distribuye por toda la ciudad, dependiendo de las características que presente cada espacio, como las diferencias entre una calle rodeada por edificios de gran altura y vegetación y otra rodeada por casas de baja altura y con poca vegetación, situación en donde se pueden evidenciar las diferencias climáticas dentro de una ciudad.

Tumini (2013) identifica cuatro efectos principales de la microescala sobre el clima urbano:

1. Aumento de la temperatura, sobre todo de las mínimas, reduciendo el efecto del enfriamiento nocturno.
2. Reducción de la amplitud térmica diaria y modificación de las horas de los máximos de T°.
3. Modificación de los vientos producto de los edificios, los flujos turbulentos y el calentamiento de la superficie por radiación.



4. Modificación de la cantidad e intensidad de las precipitaciones producto de la disminución de la evapotranspiración y de los flujos ascensionales en el aire.

### **2.3 Planificación urbana sensible al clima**

Gran parte de las desigualdades climáticas en las ciudades están relacionadas con la forma en cómo se estructura la ciudad en toda su extensión, es decir, la planificación urbana de las ciudades es la que crea estas diferencias medioambientales y climáticas, como, por ejemplo, las diferencias entre los distintos microclimas presentes en la ciudad (Eliasson & Svensson, 2002), situación que ocurre a causa de que la planificación de las ciudades se ha enfocado, a nivel histórico, en las características estético-formales, dejando de lado los efectos del clima sobre estas (Chicas, 2012). Para mitigar y disminuir las desigualdades climáticas y los riesgos que estas implican, Oke et al (2017) proponen el concepto de “Planificación urbana sensible al clima” (*Climate-Sensitive Design*), el cual abarca una intervención a la ciudad en diferentes escalas, ya sea microescala, mesoescala e incluso a escala de ciudad, considerando aspectos, tales como, generar un eficiente uso de los recursos naturales para minimizar impactos, como la emisión de gases de efecto invernadero, evitar la degradación del agua y reducir la generación de desechos, mejorar las condiciones micro climáticas en barrios y proteger la infraestructura urbana y su población de los efectos de eventos climáticos extremos, considerando la variabilidad y ocurrencia de estos en el futuro (Oke *et al*, 2017).

En relación con esto, Kaya y Mengi (2011) destacan que el enfoque principal de la planificación urbana sensible al clima pretende abordar las oportunidades y limitaciones que ofrece el clima urbano, con la finalidad de mejorar las condiciones de confort térmico para los habitantes de las ciudades. Considerando que cada ciudad a nivel mundial posee características distintas producto de factores naturales como latitud, vegetación, altitud, topografía etc., y factores antrópicos como densidad de población, altura de las construcciones, material de estas, etc., Kaya y Mengi (2011) identifican los cinco objetivos principales de la planificación urbana sensible al clima:

1. Maximizar el potencial natural de un sitio natural mediante una selección precisa de su ubicación, proporción entre ancho de las calles, así como la orientación, y altura y densidad de las de las edificaciones.
2. Obtener la mayor cantidad de energía solar, con el fin de reducir la dependencia de la iluminación artificial y de sistemas eléctricos para calefacción y refrigeración.
3. Reducir la cantidad innecesaria del flujo del viento y de la radiación solar.

4. Avanzar en técnicas de reciclaje del agua; reutilizar el recurso desde la lluvia y los desechos del agua por parte de la población.
5. Construir con materiales reciclables y renovables, además de mejorar el aislamiento térmico de las construcciones.

Además, con estos objetivos, la planificación urbana sensible al clima busca reducir la cantidad de emisiones de las ciudades, así como también entregar una mejor calidad de vida en términos sociales, económicos y respecto de la salud de sus habitantes.

### **2.3.1 Implementación de políticas en América Latina y el Caribe**

A nivel regional, Sánchez (2013) destaca que América Latina, aunque está circunscrita en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, no ha prestado mucha atención a la planificación urbana relacionada al clima, puesto que no se han establecido de pautas de difusión a la población sobre la importancia de una buena planificación urbana sensible al clima, al contrario de lo que ocurre en ciudades como Londres, Rotterdam, Nueva York y Chicago, donde sí se han aplicado estas técnicas y han tenido buenos resultados. Además, el autor reconoce problemas como el crecimiento de asentamientos informales en las afueras de las ciudades de la región que dificultan la capacidad de ordenación del territorio, enfrentando serios problemas de desarrollo humano que complican la implementación de políticas climáticas. Sánchez (2013) considera como fundamental el hecho de que las acciones que se establezcan en una buena planificación climática sean aplicadas, así como fortalecer las capacidades locales de actores urbanos a través de la participación ciudadana, puesto que los sectores más afectados por los efectos negativos del clima urbano no tienen los recursos para afrontar por sí solos este problema; el autor propone, también, crear instancias de información a la población, adoptar un marco normativo que considere el clima en la planificación urbana, garantizar los recursos para la aplicación de esta planificación y establecer un seguimiento a las políticas implementadas con respecto al clima, para así modificar o mantener las técnicas utilizadas.

En el caso de Chile, el Ministerio de Medio Ambiente publicó, en 2018, el Plan de Adaptación al Cambio Climático 2018-2022, donde se establecen medidas a seguir por el Estado, entre las que se encuentran identificar y proteger áreas de valor ambiental relevantes para las ciudades, mejorar el sistema de transporte público de las ciudades, inversión en infraestructura como incorporar el cambio climático en la evaluación social de los proyectos de ciudad e impulsar iniciativas de infraestructura verde, fomentar la utilización eficiente del recurso hídrico en el espacio público, reducir el consumo de energía en el sector público,

reducir la demanda energética en calefacción de las viviendas, en el ámbito de la gestión del riesgo estudiar el impacto de las olas de calor sumado al efecto de islas de calor urbanas, fortalecer el desarrollo de capacidades municipales para la adaptación al cambio climático, entre otras medidas (Ministerio del Medio Ambiente, 2018).

De esta forma, al presentarse la planificación urbana sensible al clima para todos los países del mundo, y en este caso para las ciudades de Chile, es posible aplicar nuevas metodologías que ayuden al desarrollo de políticas que resuelvan estos problemas climáticos, como lo es el uso de softwares que simulen y representen la capacidad de las ciudades en torno a una planificación que considere el clima urbano.

### **2.3.2 Infraestructura verde urbana**

La considerable disminución de la vegetación en las ciudades aumenta la cantidad de radiación solar, aumentando el albedo y modificando los balances de energía y masa en la superficie (Oke, 1987). Para atender a este problema, durante los últimos años, una de las principales estrategias en el ámbito de la planificación sensible al clima para reducir los efectos de las ICUs, es la del aumento de espacios vegetados dentro de la ciudad. Esta medida se conoce como infraestructura verde urbana, la cual en sus inicios conceptuales es entendida como una red ecológica necesaria para la sustentabilidad social, económica y medioambiental de las ciudades, además de ser una oportunidad para la conservación de la naturaleza y para la urbanización “inteligente de las ciudades” (Benedict y McMahon, 2002). De esta misma forma, Vásquez (2016) establece que la infraestructura verde es una forma de acción para reconciliar el crecimiento urbano, el bienestar social y la planificación ambiental, centrándose en los beneficios de los espacios verdes como lo son la purificación del aire, el aumento de la evapotranspiración, la regulación climática, entre otros.

A escala de microclima, la infraestructura verde puede reducir la temperatura, la radiación, enfriar el aire durante el verano, aumentar los espacios de sombra, entre otros beneficios. Respecto a esto, Duarte et al (2015) demuestran que, en un escenario de arbolado en los alrededores de todos los edificios, la temperatura se reduce en 1°C en comparación de cuando solo hay concreto sin vegetación en el área, mientras que, al modelar un espacio verde voluminoso rodeado por edificios, la temperatura ambiente se reduce 5°C.

En la tabla 3 se mencionan los elementos definidos por Vásquez (2016) que pueden considerarse como infraestructura verde a escala de microclima.

**Tabla 3:** Tipos de infraestructura verde a escala de microclima.

Escala de barrio	
Calles arboladas	Techos y paredes verdes
Plazas de barrio	Jardines verdes
Espacios abiertos institucionales	Estanques y arroyos
Derechos de pasos de caminos	Peatonales y ciclo rutas
Cementerios	Pistas deportivas
Zanjas de inundación	Pequeños bosques
Áreas de juego	Quebradas
Patios de la escuela	Huertos
Terrenos abandonados/Sitios eriazos	

Fuente: Vásquez (2016).

Al mencionar estos tipos de infraestructura verde, Vásquez (2016) señala que la infraestructura verde puede convertirse en un gran aliado para enfrentar el cambio climático dentro de la planificación urbana por dos razones: primero, porque la infraestructura verde ayuda a mitigar los efectos de las altas temperaturas en espacios público a escala de barrio, de ciudad y de región, y segundo porque mientras más espacios verdes posea la ciudad, más resiliente será al enfrentar los cambios futuros en el clima.

#### **2.4 Programas de modelación climática**

En la actualidad, los programas de modelamiento climático representan una de las principales áreas de interés medio ambientales. Estos tienen como objetivo la descripción del comportamiento temporal y/o espacial de las variables de los elementos que conforman el sistema que se desea representar. De esta forma, sus técnicas permiten pronosticar la variabilidad climática a futuro a diferentes escalas (desde la escala planetaria, hasta el microclima), lo que ayuda a los gobiernos e instituciones a nivel internacional a tomar medidas para prevenir o mitigar situaciones de riesgo, provocadas por el cambio climático o fenómenos adversos en una misma ciudad producto de la distribución del clima dentro de esta (Díaz *et al*, 2017).

Otra ventaja comparativa propia de los softwares de simulación climática es que sus resultados adquieren más precisión a medida que se perfeccionan los modelos, además requieren menos inversión de tiempo y dinero con relación a los trabajos experimentales realizados en terreno.

Por otra parte, y a pesar de que existen diversos modelos y con resoluciones muy variadas, resulta un poco complejo para el investigador elegir cual modelo es el adecuado para su área

de estudio (Tumini e Higuera, 2013). En este sentido, Tumini e Higuera (2013) reconocen limitaciones en la aplicación de estos modelos:

- Los datos de entrada: hay sistemas que necesitan muchos datos de entrada, valores estadísticos u obtenidos con mediciones in situ, lo que interfiere con los grados de aproximación de la geometría urbana.
- Aplicabilidad: existen modelos climáticos que se aplican a un caso de estudio experimental definido y que luego no pueden ser aplicados a otros casos de estudio.
- Resultados de la herramienta: los resultados deben ajustarse al tema que se está estudiando. Por ejemplo, las condiciones climáticas en áreas verdes urbanas públicas no puede haber resultados de áreas verdes privadas.

Los modelos de simulación de microclimas tienen como base de su funcionamiento los procesos naturales de intercambio de masa y energía. Por otro lado, estas herramientas facilitan procesos de control y de temperatura en distintos espacios micro climáticos (Cala, 2017).

La tabla 4 presenta una descripción básica de distintos programas de simulación climática que funcionan para modelar el clima urbano. En esta revisión bibliográfica, el programa al que se pudo acceder para trabajar es *ENVI-met 4.4.5*, el cual posee una licencia gratuita de un mes y que, tal como mencionan Tumini e Higuera (2013) es un tiempo justo para trabajar con el modelo, puesto que, al trabajar con microescala, el tiempo y el espacio a cubrir en el mapa no son excesivos. Por otro lado, se presentan las características de los programas Curb Tool, UWG y CitySim, los cuales pueden trabajar en diversas escalas espaciales.

**Tabla 4:** Descripción básica de distintos programas de simulación climática.

Programa	Licencia	Características	Escala	Input y Output (extensión)
ENVI-met 4.4	Gratuita y de entrenamiento para estudiantes, pagada para investigaciones avanzadas	Modelo 3D que simula flujos entre edificios, procesos de intercambios de calor, etc; submodelos de vegetación, atmosféricos y suelo; resolución: 0,5 a 10 mts y 10 segundos en el tiempo	Microclima	Input: ASCII-Text file – Output: Main Data Files: .EDI/.EDT – Receptor files: .dat – 1D Model Files: ASCII
CitySim	Gratuita	Modelos termales y de radiación en 3D	Desde vecindarios hasta escala de ciudad	Input: XML Output: .GUI
Curb Tool	Gratuita	Modelamiento de emisión de gases en la ciudad, demanda de energía de la ciudad	Escala urbana (ciudad)	Input: Documentos Excel Output: No se especifica
UWG	Gratuita	Programa para comparar la temperatura real de la ciudad con los resultados del modelo	Escala urbana (ciudad)	Input: Clima rural por hora – Formato .epw y un documento .xml con referencias al sector urbano Output: No se especifica

Fuente: Elaboración propia en base a las páginas web de ENVI-met, CitySim, Curb Tool y UWG (2019).

### 2.4.1 ENVI-met

El software climático *ENVI-met* es un programa desarrollado por Michael Bruse (1999) en el Instituto de Geografía de la Universidad de Mainz – Alemania, el cual posee acceso gratuito en su versión de prueba para estudiantes y una licencia pagada para su versión ilimitada. El modelo trabaja a escala de microclima en zonas urbanas, con una resolución de 0,5 a 10 metros en el espacio y de 10 segundos en el tiempo, lo que permite una buena lectura de las características microclimáticas. Se pueden representar detalladamente las estructuras y materialidades urbanas complejas, es decir, edificios con diferentes formas y alturas. El modelo se puede utilizar para pronosticar procesos de cambio, entre los que se encuentran los flujos de viento, turbulencia, flujos de radiación, temperatura y humedad. Es posible seleccionar distintos tipos de especies vegetales, aunque son escasas comparado al espacio urbano que se desea representar. Las características de suelo en el software también consideran como un buen número de superficies de suelo, pero al igual que la vegetación, son escasas y no se pueden añadir más tipos. El modelo tiene la capacidad, también, de trabajar y transformar un número limitado de entradas en un gran número de datos de salida (Stocco, 2018).

El software ENVI-met es uno de los más factibles cuando de modelación de microclima urbano se trata. Además, posee muchas ventajas en comparación con otros modelos de simulación climática (Arnfield, 2003, en Alchapar y Correa, 2016), estando validada por muchos autores a nivel internacional (Alchapar y Correa, 2016), lo que se complementa con lo dicho por Tumini e Higuera (2013), quienes destacan la baja cantidad de datos de entrada que requiere el software para trabajar, la buena representación de las transferencias superficiales entre capas de vegetación y suelo, la simplicidad de su manejo y la baja demanda de tiempo que requiere el programa, por lo que se configura como una herramienta recomendable para estudiar, representar y pronosticar el microclima urbano.

## Capítulo N°3: Metodología

### 3.1 Tipo de estudio

Con la finalidad de dar respuesta a los objetivos general y específicos planteados en esta investigación, en primer lugar, se describieron las tendencias climáticas para la ciudad de Curicó desde 1959 hasta el presente, con la finalidad de saber cuánto han cambiado las temperaturas y las precipitaciones en la ciudad, relacionando estos cambios con el escenario de cambio climático global y comparando con los comportamientos climáticos vividos en otras ciudades de la zona central de Chile, durante los últimos años del siglo XXI.

En segundo lugar, el estudio es de carácter analítico y explicativo, puesto que se describieron los escenarios de temperatura superficial y de islas de calor urbano (ICUS) presentes en el verano del año 2019 – 2020 en la ciudad de Curicó. Luego, a través de regresiones lineales, se explicaron los factores urbano-geográficos que influyen en la distribución de las intensidades de la isla de calor, así como las acciones que ayudan a la reducción de este fenómeno. Por último, y de acuerdo con los resultados del objetivo 2, se propusieron escenarios que reduzcan las diferencias y los efectos de la isla de calor urbana.

### 3.2 Enfoque del estudio

El enfoque presentado por esta memoria es, en su primer y segundo objetivo, cuantitativo, ya que se describió el comportamiento climático de la ciudad de Curicó a través de gráficos y cálculos matemáticos, mientras que en su tercer objetivo es de enfoque cuantitativo-cualitativo, puesto que se describieron las características de las islas de calor urbano en Curicó a través de propuestas de simulación climática.

En primera instancia, en el objetivo específico N°1 se describieron los comportamientos de la precipitación y temperatura anual y de verano, para la ciudad de Curicó, durante el período 1959 – 2020, con el fin de relacionar explicar en conjunto las características del verano más caluroso registrado y las tendencias de precipitación más recientes, a través de revisión bibliográfica. El resultado obtenido de este análisis definió el período a estudiar.

En segunda instancia, en el objetivo N°2 se mantiene el enfoque cuantitativo, puesto que se utilizan imágenes satelitales y fórmulas para conocer y describir el comportamiento de la temperatura superficial de Curicó durante el verano de 2019 – 2020. Una vez obtenidos estos datos, se seleccionaron los siguientes factores explicativos de la isla de calor urbana, de acuerdo con Sarricolea (2008): Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), elevación topográfica, distancia a fuentes húmedas y densidad poblacional, factores que fueron trabajados en regresiones en excel para explicar la isla de calor y así dar paso a las propuestas de reducción del efecto isla de calor en el siguiente objetivo.

Por último, en el objetivo N°3 se presenta un enfoque cuantitativo, donde se modelan escenarios de infraestructura verde urbana que reduzcan la temperatura superficial, aumenten la humedad relativa del ambiente, disminuyan la cantidad radiación solar y disminuyan la temperatura exterior de los hogares, factores que, a su vez, disminuyen el efecto de isla de calor en el microclima urbano. Luego de los análisis realizados, se propone la plantación de las especies potencialmente beneficiosas en la reducción de la temperatura superficial y de la isla de calor, según las características de la vegetación urbana de la propuesta de Ley de Arbolado Urbano (2018).

### 3.3 Objetivo específico N°1: Describir la configuración climática histórica de la ciudad de Curicó entre los años 1959 – 2020

- **Antecedentes climáticos de la ciudad de Curicó**

Para obtener los antecedentes climáticos de temperatura y precipitación, se consultó la base de datos del Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup>, la cual posee datos de precipitación y temperatura de distintas estaciones meteorológicas del país. Para desarrollar este objetivo, se elaboraron 4 gráficos: 3 de temperatura y 1 de precipitación, con el fin de saber el comportamiento climático desde mediados del siglo XX hasta la actualidad. Las variables trabajadas se presentan en la tabla 5.

**Tabla 5:** Variables climáticas trabajadas.

<b>Variables de Temperatura</b>	<b>Variable de precipitación</b>
Temperatura media anual en Curicó, período 1966 – 2001	Precipitación media anual en la ciudad de Curicó, período 1959-2019
Temperatura media anual en Curicó, período 2012 – 2019	
Promedio de temperaturas máximas del verano en Curicó, período 1959 – 2020	

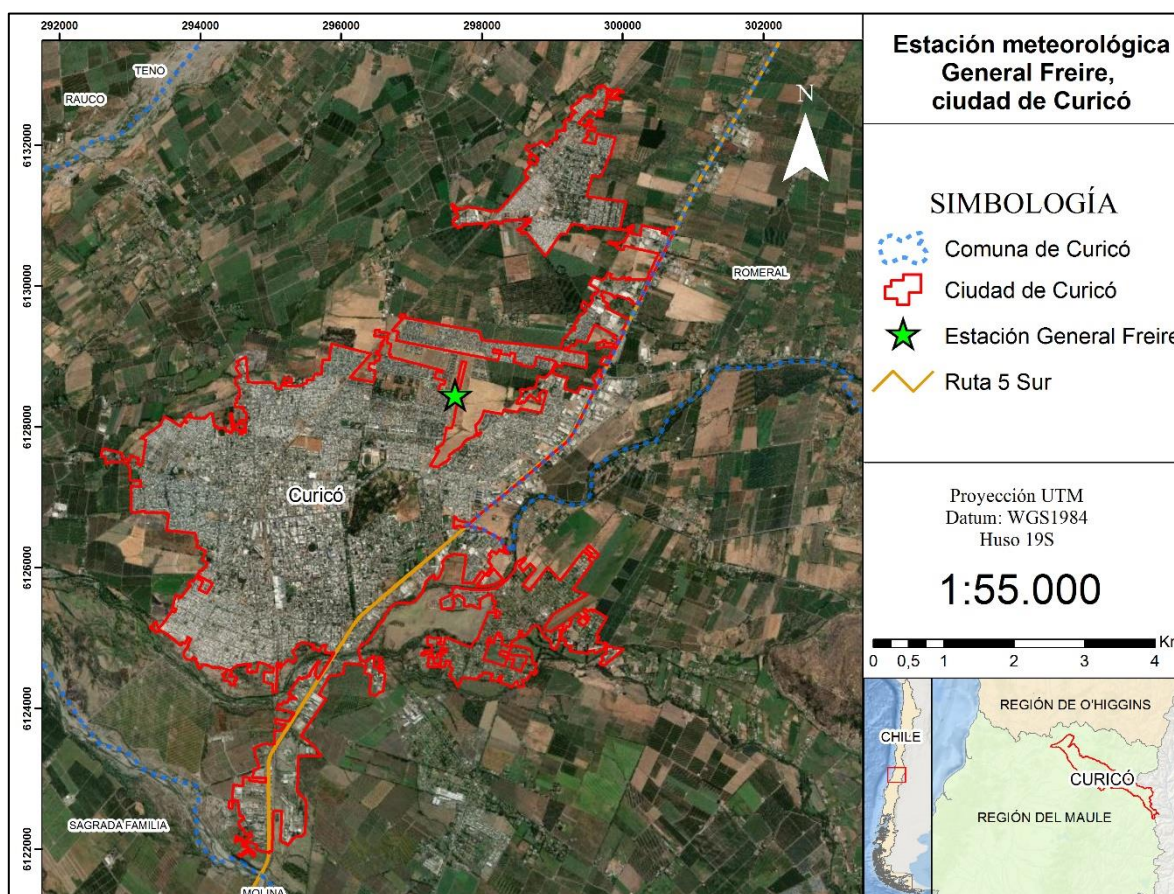
Fuente: Elaboración propia (2020).

Las variables de la tabla 5 fueron elegidas con el fin de definir el período de estudio de la presente investigación. En este caso, los resultados evidencian que existe una tendencia al alza en los promedios de las temperaturas anuales en los últimos 15 años, así como un descenso gradual en las precipitaciones y un aumento de la temperatura media del verano en los últimos 12 años, siendo 2020 el año con el promedio más alto. Por otro lado, cabe destacar que el Explorador Climático del (CR)<sup>2</sup> es una base de datos climática muy completa, pese a ello, existe una laguna de datos de temperatura media para la ciudad de Curicó entre los años 2001 y 2011.

En el caso de la presente investigación, se trabajó con los datos de la estación General Freire de la ciudad de Curicó (figura 5).



**Figura 5:** Ubicación de la Estación General Freire en la ciudad de Curicó.



Fuente: Elaboración propia en base a la información recopilada desde la Infraestructura de Datos Geoespaciales y el Laboratorio de Geografía de la Universidad de la Frontera (2020).

Se escogió la estación meteorológica General Freire ya que es la única que posee datos climáticos de distintas variables desde 1950 hasta la actualidad. Está ubicada en el Aeródromo homónimo, al norte de la zona urbana de Curicó. Por otro lado, es la única estación que se pudo geolocalizar espacialmente en el área de estudio.

A continuación, se describe el método de trabajo de los datos de las variables seleccionadas, con las cuales se construyeron las series temporales climáticas.

### **Temperaturas históricas en Curicó**

**Temperatura media anual en Curicó, período 1966 – 2001:** En primera instancia, se descargaron los datos de temperatura media en formato Excel, para el período 1966 – 2001, puesto que desde 1966 se tienen registros de temperaturas de todo el año para la estación seleccionada; por otro lado, se acotó el período de estudio hasta el año 2001 ya que de 2002 a 2011 los datos de temperatura estaban incompletos. Una vez obtenidos los datos, se elaboró

un gráfico en Excel con el objetivo de evidenciar y analizar las tendencias de temperatura media en el período seleccionado.

**Temperatura media anual en Curicó, período 2012 – 2019:** Este período es la continuación de la variable anterior. La obtención de estos datos se realizó de la misma forma que la variable anterior, con la diferencia de que se elaboró un gráfico independiente solo para este período, siendo también analizado de forma independiente.

**Promedio de temperaturas máximas del verano en Curicó, período 1959 – 2020:** Para el caso de esta variable, fue posible obtener datos desde el año 1959, lo que amplía el rango de análisis para la época de verano a las últimas 6 décadas. La recopilación de los datos consistió en seleccionar las temperaturas máximas de cada día de verano entre 1959 y 2020 (21 de diciembre a 20 de marzo). Estos datos fueron entregados en un archivo Excel, en donde se calculó el promedio de temperaturas máximas de todos los días del verano de cada año seleccionado y así tener un panorama general del período de estudio. Con estos datos se elaboró un gráfico el cual también fue analizado posteriormente, logrando determinar cuál fue el verano ‘más caluroso’ de los últimos 61 años en la ciudad de Curicó.

### **Precipitación histórica en la ciudad de Curicó**

**Precipitación media anual en la ciudad de Curicó, período 1959-2019:** En el caso de la precipitación, esta fue la única variable trabajada, ya que se buscó obtener datos sobre cuales fueron el año más lluvioso y año más seco en la ciudad de Curicó. En la web del Explorador Climático se seleccionó la variable promedio de precipitación desde el año 1959 ya que es el primer año que contiene datos totales de precipitación; por otro lado, se seleccionó el año 2019 puesto que es el último año completo registrado por la Estación General Freire. Una vez recopilados los datos, los promedios anuales fueron traspasados a un gráfico, donde se dividió el rango total en dos períodos con el fin de comparar las tendencias de precipitación en la última década con respecto a los años anteriores.

- **Tendencias climáticas en la ciudad de Curicó**

En última instancia, se realizó una revisión bibliográfica a distintos autores con el fin de explicar las razones del comportamiento climático de la ciudad de Curicó y así entender el contexto en el que se enmarcan las tendencias de temperatura y de precipitación durante el período analizado.

### **3.4 Objetivo específico N°2: Analizar el comportamiento de la temperatura superficial de la ciudad de Curicó durante la época estival (verano) de 2019 – 2020**

#### **3.4.1 Obtención de temperatura superficial promedio mediante imágenes del satélite MODIS**

Para la resolución de este paso se utilizó la plataforma *Google Earth Engine* (GEE), la cual permite trabajar catálogos históricos de imágenes satelitales (Ermida et al, 2020).

Para efectos de este trabajo, se calculó el promedio de las temperaturas superficiales diurnas diarias para la ciudad de Curicó y sus alrededores rurales, durante el período de verano de 2020 con las colecciones de imágenes satelitales *MODIS/006/MOD11A1* y *MODIS/006/MYD11A1*, ambas pertenecientes al satélite *MODIS*. Se eligió el satélite *MODIS*, ya que aun cuando posee una resolución de 1200 x 1200 km por cuadrícula, entrega datos de temperatura superficial cada 1 o 2 días, de día y de noche, lo que permite tener un panorama general del área de estudio elegida (Wan et al, 2015). En este sentido, para obtener la temperatura superficial diurna, se consideraron el período entre los días 21 de diciembre de 2019 y 20 de marzo de 2020 (verano) para la ciudad de Curicó.

En primer lugar, se creó un polígono de 4 vértices para cubrir toda la ciudad de Curicó y parte de su zona rural. Luego, se seleccionaron las colecciones Terra MODIS (*MODIS/006/MOD11A1*), el cual tiene como horario de captura de imagen a las 10:00 am, y Aqua MODIS (*MODIS/006/MYD11A1*), con un horario de captura a las 14:30 pm, definiendo para ambas la temperatura diaria mediante el filtro ‘LST\_Day\_1km’. Una vez filtradas las temperaturas diarias, se seleccionó el período de estudio mediante los comandos ‘‘2019-12-21’, ‘2020-03-20’’, lo que representa todo el período de verano de 2020. Teniendo ya las temperaturas obtenidas, se transformó la escala desde Kelvin (°K) a Celsius (°C) mediante una fórmula creada en el mismo GEE, para luego proyectar la imagen a UTM 19S, definir la mejor resolución, que en este caso fue un resample bilinear de 100 metros, y así descargarla en formato TIFF a la carpeta de Google Drive (anexo 1).

Para clasificar las intensidades de la isla de calor, se adaptó la clasificación propuesta por Fernández-García (1996), quien define las siguientes intensidades: débil (0°C – 2°C), moderada (2°C – 4°C), fuerte (4°C – 6°C) y muy fuerte (sobre 6°C). Los rangos definidos de acuerdo con los resultados obtenidos en *Google Earth Engine* aparecen en la tabla 6.

**Tabla 6:** Adaptación de las intensidades de la isla de calor para la temperatura superficial con el satélite *MODIS*.

<b>Intensidad ICUS</b>	<b>Categoría</b>
0°C - 1°C	Muy débil
1°C - 2°C	Débil
2°C - 3°C	Moderadamente débil
3°C - 4°C	Moderada
4°C - 5°C	Fuerte
5°C - 6°C	Muy fuerte

Fuente: Elaboración propia (2020).

Una vez descargada la imagen al ordenador, esta se trabajó en el software *ArcGIS* para determinar las intensidades de las islas de calor. En primer lugar, se utilizó la herramienta “*Extract by mask*” para recortar el polígono de cuatro vértices de la temperatura superficial con el polígono de la ciudad de Curicó, lo que dio como resultado un archivo ráster con los datos de temperatura superficial solo para la zona urbana de Curicó. Luego, el ráster de temperatura superficial de la ciudad de Curicó se ingresó a la herramienta “*Minus*”, en donde se restó el valor más bajo de temperatura con todo el ráster. Por último, el archivo resultante del paso anterior se ingresó a la herramienta “*Reclassify*”, en la cual se establecieron las seis categorías definidas en la tabla 6 mediante el apartado “*Classify*”.

### 3.4.2 Cálculo de temperatura superficial promedio y NDVI mediante imágenes del satélite *Landsat 8*

**Tabla 7:** Bandas espectrales del satélite *Landsat 8*.

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)  Launched February 11, 2013	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Fuente: USGS (2013).

Se eligió el satélite *Landsat 8*, principalmente, por la buena resolución que posee la mayoría de sus bandas, la cual es de 30 metros, tal como se aprecia en la tabla 7. A pesar de que es un satélite con una resolución temporal de 16 días y con una resolución espacial de 100 metros para las bandas 10 y 11 (termales), la alta calidad de su resolución espacial más la variedad de imágenes que no poseen cobertura de nubes, convierten al *Landsat 8* en un satélite adecuado para el análisis microclimático (USGS, 2013)

- **Cálculo de temperatura superficial**

A través de la página EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) del *United States Geological Survey* (USGS), de libre acceso, se buscaron las imágenes satelitales del satélite *Landsat 8* para la ciudad de Curicó.

La imagen seleccionada corresponde al día 26 de enero de 2020 a las 14:33hrs (anexo 2). Se seleccionó esta imagen satelital ya que era una de las pocas imágenes que cubría la ciudad de Curicó por completo. Por otro lado, la fecha de captura corresponde a un día en el que la

temperatura máxima fue de 34°C, sobre el promedio de 31,6°C del verano de 2020 (CR<sup>2</sup>, 2020). Una vez descargada la imagen de 11 bandas en formato ráster, se cargaron en el software *ArcGIS* las bandas 4, 5 y 10, con las cuales se calculó la temperatura superficial mediante la herramienta *Raster Calculator*, de acuerdo con Anandababu et al (2018). Los pasos para llevar a cabo el cálculo de la temperatura superficial se grafican en la tabla 8.

**Tabla 8:** Cálculo de la temperatura superficial con imágenes del satélite *Landsat 8*.

Pasos	Fórmula
Paso 1 – Cálculo de radiancia espectral	$0.000342 * \text{Banda } 10 + 0.1$
Paso 2 – Conversión de radiancia a temperatura de brillo	$(1321.0789 / \text{Ln}(774.88533 / \text{"ext\_rad10"} + 1)) - 273.15$
Paso 3 – Cálculo de NDVI	$\text{Float} * (\text{Banda } 5 - \text{Banda } 4) / \text{Float} * (\text{Banda } 5 + \text{Banda } 4)$
Paso 4 – Cálculo de proporción de vegetación (Pv)	$\text{Square} ((\text{"NDVI"} + 0.2) / (0.62 + 0.2))$
Paso 5 – Cálculo de emisividad	$0.004 * \text{"Pv"} + 0.986$
Paso 6 – Cálculo de Temperatura Superficial	$\text{"TB10"} / (1 + (10.8 * \text{"TB10"} / 14388)) * \text{Ln}(\text{"Emisiv"})$

Fuente: Elaboración propia en base a Anandababu et al (2018).

En primer lugar, en el paso 1, el valor 0,000342 corresponde a la radiancia de la banda 10, mientras que el valor 0,1 corresponde a la adición escalar propia de la banda 10. En el paso 2, los valores 1321,0789 y 774,88533 corresponden a las constantes de conversión térmica para la banda, mientras que “ext\_rad” corresponde al archivo de radiancia creado en el paso 1. Por último, el valor -273,15 es un ajuste de la temperatura al 0 absoluto en °C. En el cálculo de NDVI (paso 3), se dividió el valor de la resta de la banda 5 (infrarroja) con la banda 4 (verde) por la suma de la banda 5 con la banda 4. En el paso 4 se calculó la proporción de vegetación (Pv) presente en el área de estudio con el valor más alto y el más bajo del NDVI. Luego, en el paso 5, se multiplicó el valor “Pv” por 0,004 y luego el resultado se suma con 0,986 (ambos son valores de la emisividad de la vegetación). Por último, en el cálculo de temperatura superficial, “TB10” corresponde a la temperatura de brillo creada en el paso 2, mientras que 10.8 es la longitud de onda de la radiancia emitida. Luego de calculada la temperatura superficial, esta se clasificó según la intensidad de la isla de calor, de acuerdo con Fernández-García (1996) (tabla 9). En este sentido, la imagen de *Landsat 8* evidenció mayores diferencias de temperatura, en comparación con la imagen satelital de *Google Earth Engine*, por lo que la categoría de intensidades se clasificó para no distorsionar las categorías establecidas por Fernández-García y se agregó la categoría de intensidad extrema a las zonas que presentaron más de 12°C de temperatura de diferencia (14°C – 16°C).

**Tabla 9:** Intensidades de la isla de calor para la temperatura superficial con *Landsat 8*.

<b>Intensidad ICUS</b>	<b>Categoría</b>
0°C - 2°C	Muy débil
2°C - 4°C	Débil
4°C - 6°C	Moderadamente débil
6°C - 8°C	Moderada
8°C - 10°C	Moderadamente fuerte
10°C - 12°C	Fuerte
12°C - 14°C	Muy fuerte
14°C - 16°C	Extrema

Fuente: Elaboración propia (2020).

- **Cálculo de Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)**

Para este paso, se utilizó la metodología establecida por Price (2010). En el software *ArcGIS*, en primer lugar, se estableció una composición RGB (Red, Green, Blue), es decir se definió el color rojo para la banda 5, el color verde para la banda 4 y el color rojo para la banda 3. Luego, en la opción “*Image Analysis Options*” de la herramienta “*Image Analysis*”, se seleccionó la banda infrarroja para la banda 5 y la banda roja para la 4, para luego calcular el NDVI en el apartado homónimo de la pestaña “*Image Analysis*”. Una vez creado el NDVI, este se exportó en formato TIFF y se realizó un “*Extract by Mask*” para solo dejar el área urbana de Curicó.

### **3.4.3 Obtención y trabajo de las variables explicativas de la intensidad de la isla de calor**

Las variables definidas para estudio fueron trabajadas en *ArcMap* del software *ArcGIS* y se basan en lo establecido por Sarricolea et al (2008), quien para explicar el fenómeno de la isla de calor en Rancagua establece la influencia de variables como densidad de población, elevación topográfica (DEM) y distancia de zonas urbanas a fuentes, más los valores del NDVI.

Para esta investigación, en primer lugar, se descargaron las manzanas de población de la ciudad de Curicó del CENSO de 2017 desde la página de Geodatos Abiertos del INE (2020). Una vez descargada la capa, se utilizó la herramienta “*Feature to Points*” para convertir los polígonos de las manzanas en puntos y luego ingresar estos puntos a la herramienta “*Kernel density*”, definiendo una resolución espacial de 30 metros y 1000 metros de radio de búsqueda, lo que equivale a una densidad de hab/km<sup>2</sup>. De esta forma se obtuvo un archivo ráster de la densidad de población.

En segundo lugar, se descargaron las curvas de nivel cada 100 metros de todo Chile desde la página del Laboratorio de Geografía de la Universidad de La Frontera (2019). Luego, en

*ArcMap* se creó un *TIN* (Red de Triángulos Irregulares) con las curvas de nivel, el cual se transformó a ráster para así crear el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) a una resolución espacial de 30 metros. Por último, se realizó un “*Extract by Mask*” de la ciudad de Curicó con el ráster creado, teniendo así el DEM para el área de estudio.

Por último, para la distancia a las fuentes húmedas, se descargó la capa, en formato de polilíneas, de la red hidrográfica de Chile disponible en la Biblioteca del Congreso Nacional (s/f). Una vez descargada la capa, esta se trabajó en *ArcMap*, en donde mediante la herramienta “*Euclidean distance*” se establecieron las distancias a las fuentes húmedas, a una resolución espacial de 30 metros y con un archivo de salida ráster.

Cabe destacar que se definió una resolución de 30 metros para todas las variables, ya que esta es la resolución espacial del satélite *Landsat 8*. De esta forma es posible ver la influencia que tiene cada factor sobre el fenómeno de las islas de calor urbano en la ciudad de Curicó.

- **Regresión lineal entre variables**

Para el análisis de cómo influyen variables urbano-geográficas en el comportamiento de la isla de calor urbana, se optó por el modelo de regresión múltiple, el cual es un método estadístico en donde la variable Y (dependiente) se explica con el comportamiento de otras variables independientes (variables X) (Aguayo y Lora, en Smith, 2011). Por otro lado, autores como Sarricolea et al (2008) y Smith (2011) han utilizado la regresión múltiple para la explicación del fenómeno de isla de calor.

En este sentido, para la realización de la regresión lineal, en *ArcMap* se transformó el ráster de temperatura superficial a puntos mediante la herramienta “*Raster to Point*”. Luego, los demás archivos ráster (NDVI, densidad de población, elevación topográfica y distancia a fuentes húmedas) fueron convertidos a puntos en la misma tabla de atributos de los puntos de temperatura superficial mediante la herramienta “*Extract multi values to point*”. Por último, la tabla de atributos generada fue exportada en formato Excel mediante la herramienta “*Table to Excel*”. Una vez lista la tabla con los puntos de temperatura superficial y de las variables explicativas, en Excel se quitaron todos los puntos que contenían el valor -9999 para que evitar errores en el análisis. Por último, mediante la herramienta “Análisis de datos” de la pestaña “Datos” se seleccionó la opción “Regresión”, en la cual se ingresaron como variable “Y” a los valores de temperatura superficial y como variable “X” a los valores de las variables explicativas.

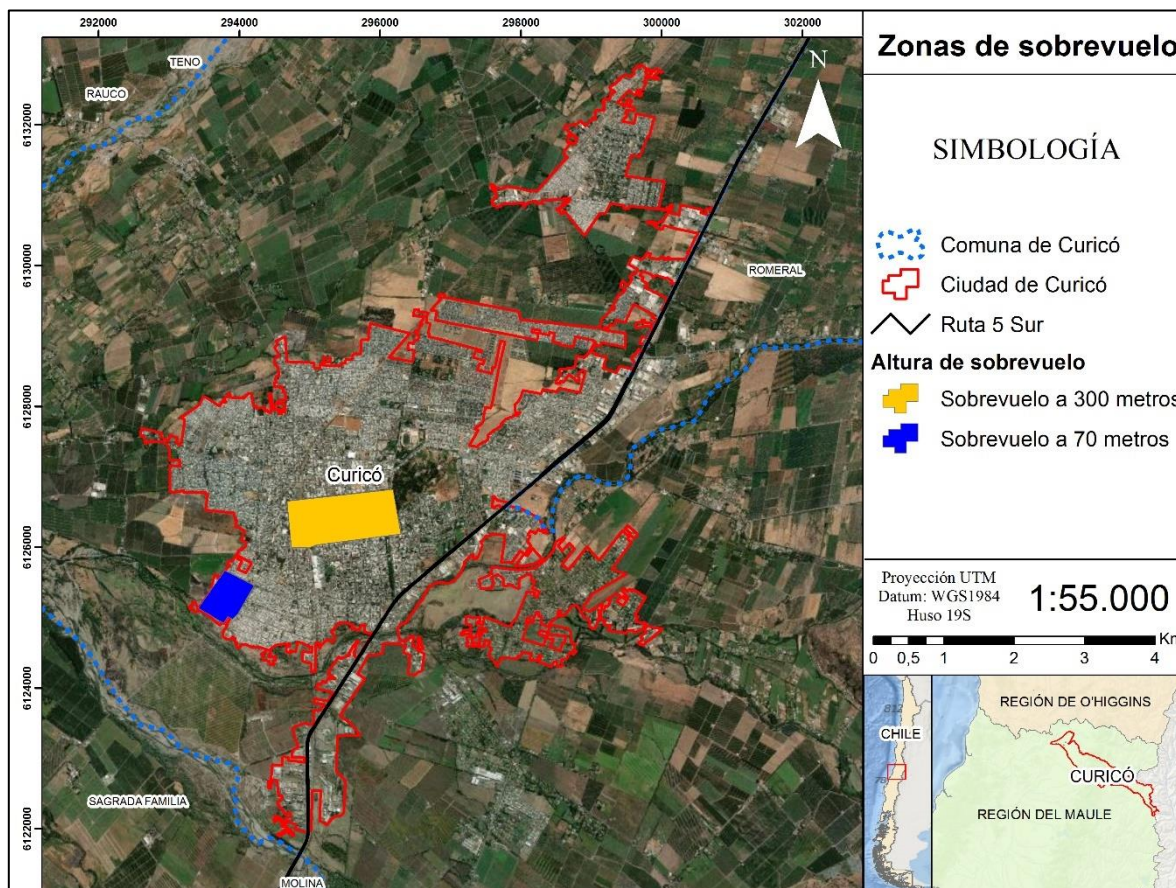
#### **3.4.4 Verificación en terreno del comportamiento de la temperatura superficial a escala de microclima en la ciudad de Curicó**

El área para analizar se seleccionó mediante una revisión espacial del área de estudio en la plataforma *Google Earth Pro*, en donde se vio una baja proporción de vegetación, la cual, tal como mencionan distintos autores (Ochoa de la Torre, 1999; Salas y Herrera, 2017), es uno



de los principales factores que, a escala de microclima, ayudan a la reducción de la intensidad de las ICUS, disminución de la radiación, aumento de la sombra, etc. Por esto, el área elegida, el Barrio Santos Martínez, se ubica en el extremo sur poniente de la ciudad de Curicó, una Zona Climática Local de alta densidad de baja altura con calles pavimentadas y poca presencia de vegetación (figura 6).

**Figura 6:** Zonas sobrevoladas mediante dron.



Fuente: Elaboración propia (2020).

La zona escogida fue sobrevolada y grabada con la cámara térmica de un dron modelo Mavic Enterprise dual 2 a las 15:58 pm del día 11 de marzo de 2020 a una altura de 70 metros. Durante el vuelo, el dron capturó 35 imágenes que luego fueron procesadas mediante el software *Agisoft* para conseguir una ortofoto del área a una resolución de 5cm x 5cm en cada píxel.

Cabe destacar que entre los días 10 y 11 de marzo de 2020 se sobrevolaron áreas de la zona centro de Curicó a una altura de 300 metros, destacando temperaturas de 22°C en las zonas más vegetadas y de 39°C en las zonas pavimentadas y algunos tejados de edificaciones.

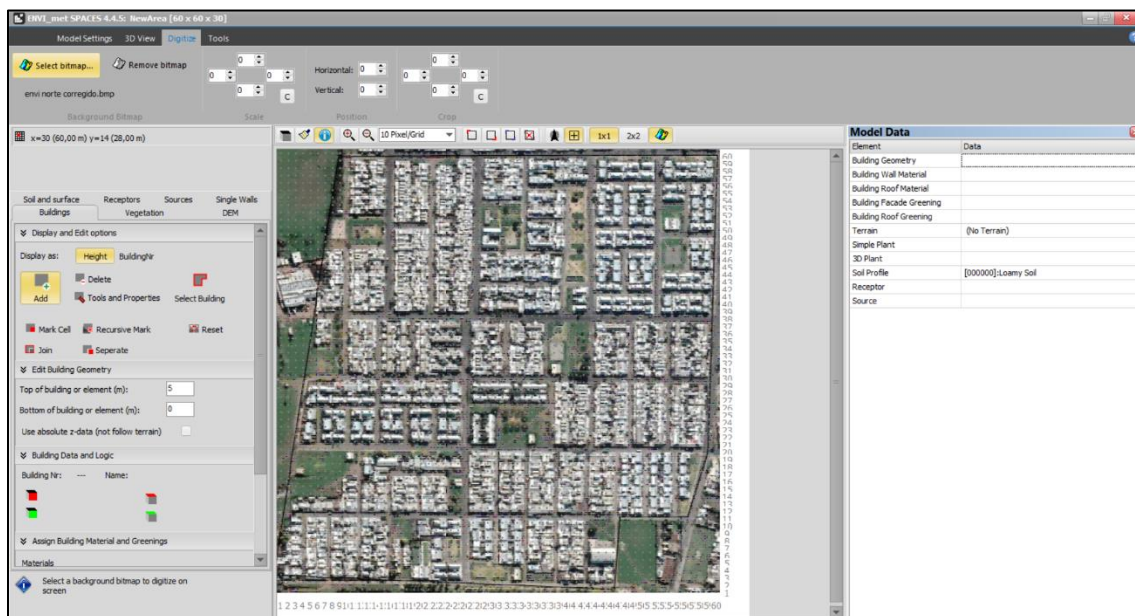


### 3.5 Objetivo específico N°3: Modelar escenarios de reducción del efecto isla de calor en el microclima presente en la ciudad de Curicó

- Modelación del paisaje real

Para la realización de este objetivo, en primer lugar, se definió el área de estudio, la cual corresponde al Barrio Santos Martínez, zona donde se realizó el vuelo de dron a 70 metros de altura, la cual se especifica en el punto 3.2. Para modelar el microclima del área escogida, se descargó una foto del área de estudio en formato .BMP (bitmap) desde Google Earth Pro. La imagen obtenida fue visualizada y trabajada a través del comando *SPACES* del software *ENVI-met 4.4.5* (figura 7).

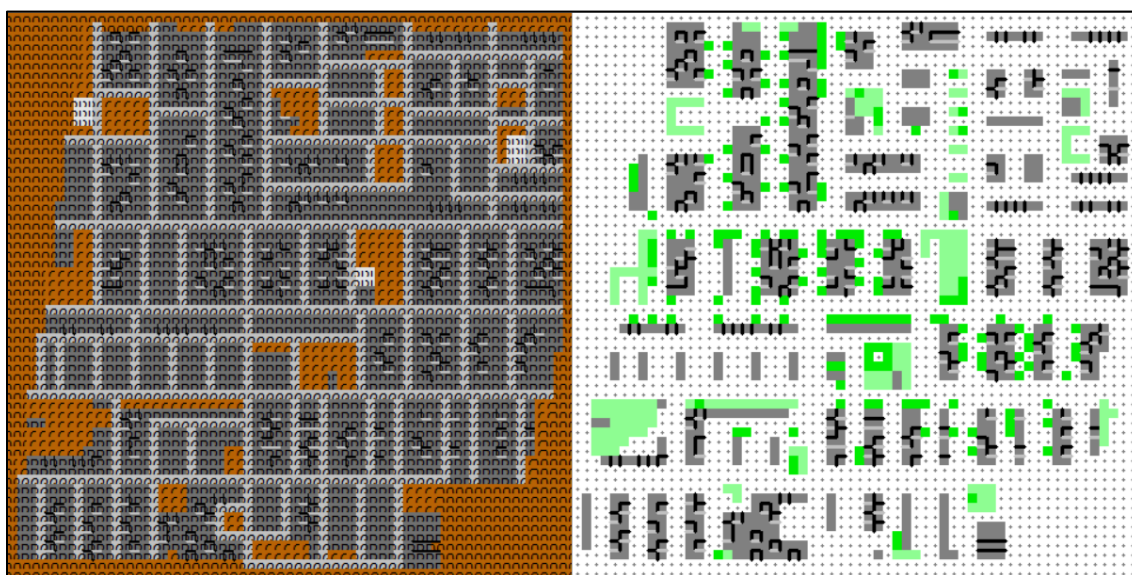
**Figura 7:** Área de estudio visualizada en el comando *SPACES*.



Fuente: Elaboración propia (2020).

Una vez ingresada la imagen al software, se georreferenció el área de estudio correspondiente a la Calle Mejillones, la cual es una vía que cruza de norte a sur el Barrio Santos Martínez de la ciudad de Curicó y se realizó una pequeña rotación al norte para facilitar el modelado del área. En la sección “*Display and edit options*”, dentro del comando *SPACES*, se definieron las características físicas del área de estudio de acuerdo a lo visto en terreno: en la opción “*Vegetation*” se ingresaron las alturas y características de vegetación presente en el área, en la opción “*Buildings*” se definieron las alturas y los materiales presentes en las construcciones y en “*Soil and Surface*” se establecieron las características de la composición de suelo, obteniendo como resultado un área modelada en una grilla de 4 metros por píxel como escala espacial, tal como se aprecia en la figura 8.

**Figura 8:** Tipos de suelo, vegetación y edificaciones modeladas.



Fuente: Elaboración propia (2020).

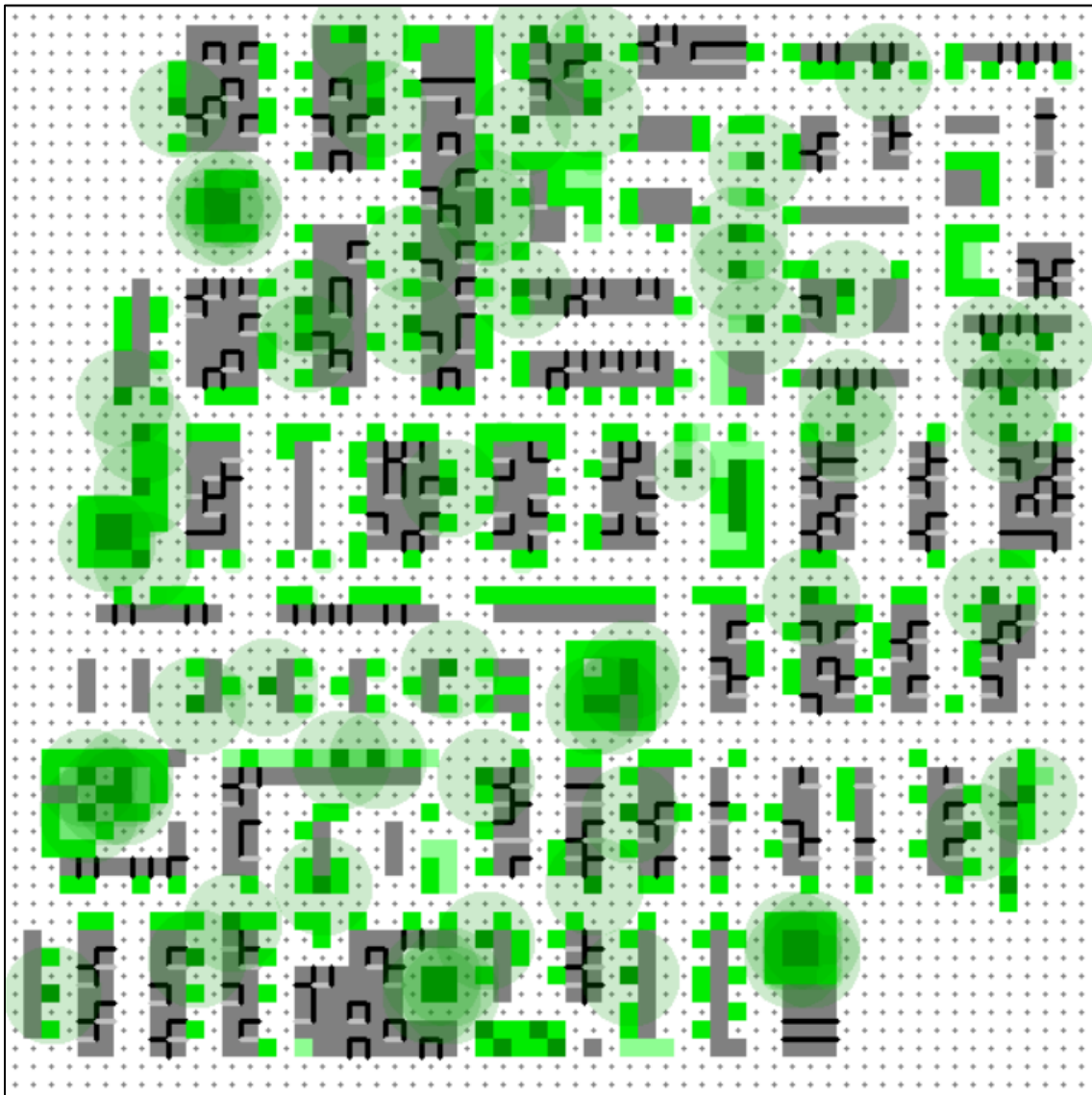
Dentro del área de estudio se establecieron tres tipos de suelo: camino de concreto en color gris claro (*PG*), suelo de concreto negro para las casas y edificaciones (*PD*), suelo naranja, franco y de tierra para las plazas públicas (*LO*) y suelo de concreto brillante/blanco para las canchas de fútbol presentes en el área (*PL*).

Para los materiales de construcción de las casas se definieron muros de concreto de insolación moderada y techos de aluminio con zinc, de acuerdo con lo visto en terreno, mientras que las alturas se establecieron entre 3 y 4 metros. En el caso de la vegetación, las especies vegetales utilizadas fueron césped de 25 cm de altura, principalmente para las plazas públicas y para los sitios eriazos vegetados, y árboles de copa densa de 2 y 4 metros en las plazas y en las veredas, distanciados por al menos 4 metros entre ellos.

- **Modelación del paisaje propuesto**

Para esta investigación se propone la plantación y aumento de vegetación urbana para la reducción del efecto isla de calor urbano, puesto que retienen más calor y conductividad térmica con respecto a los suelos y construcciones de concreto o asfalto, las cuales los liberan más fácilmente. Por otro lado, la vegetación absorbe más humedad desde la lluvia, evaporándola con más facilidad respecto de las superficies sin vegetación, además de reducir el valor del albedo y de la emisividad, lo que a su vez reduce la radiación directa y reflejada producto de su proceso de fotosíntesis. Producto de esto, la vegetación urbana, dependiendo de su extensión y su ubicación, puede incidir en el enfriamiento del entorno habitado y construido (Littlefair et al., 2000; Oke, 1988; Targhi & Dessel, 2015).

**Figura 9:** Paisaje propuesto.



Fuente: Elaboración propia (2020).

Para la simulación de la propuesta, se tomó en cuenta el catálogo de árboles urbanos de la propuesta de Ley de Arbolado Urbano (2018), en donde la mayoría de las especies recomendadas para las zonas urbanas son especies nativas de hoja perenne. Como el software *ENVI-met* no posee la opción de hojas perenne para los árboles, se reemplazó por especies arbóreas de tipo conífera (*Pinidae*), las cuales poseen hojas no caducifolias. En este sentido, en este trabajo se utilizaron especies arbóreas de copa columnar y 5 metros de altura para las veredas de avenidas grandes y de calles menores, mientras que para los sitios eriazos y las plazas públicas se dispusieron árboles de copa ancha y de 15 metros de altura máxima, tal como se presenta en la imagen en 3D de la propuesta (anexo 3).

Ambas simulaciones realizadas fueron guardadas en formato .INX, para luego analizar sus resultados en la herramienta *LEONARDO* del programa *ENVI-met*.

- **Visualización de resultados**

El modelo creado se trabajó en el comando *ENVIGuide* del programa *ENVI-met 4.4.5* en donde se creó un archivo para realizar la simulación climática, definiendo el período de estudio para ambos casos simulados (paisaje real y propuesto), correspondiente al día 11 de marzo de 2020 a las 16:00 hrs con los datos de entrada presentes en la tabla 10.

**Tabla 10:** Datos de entrada para la simulación en *ENVIGuide*.

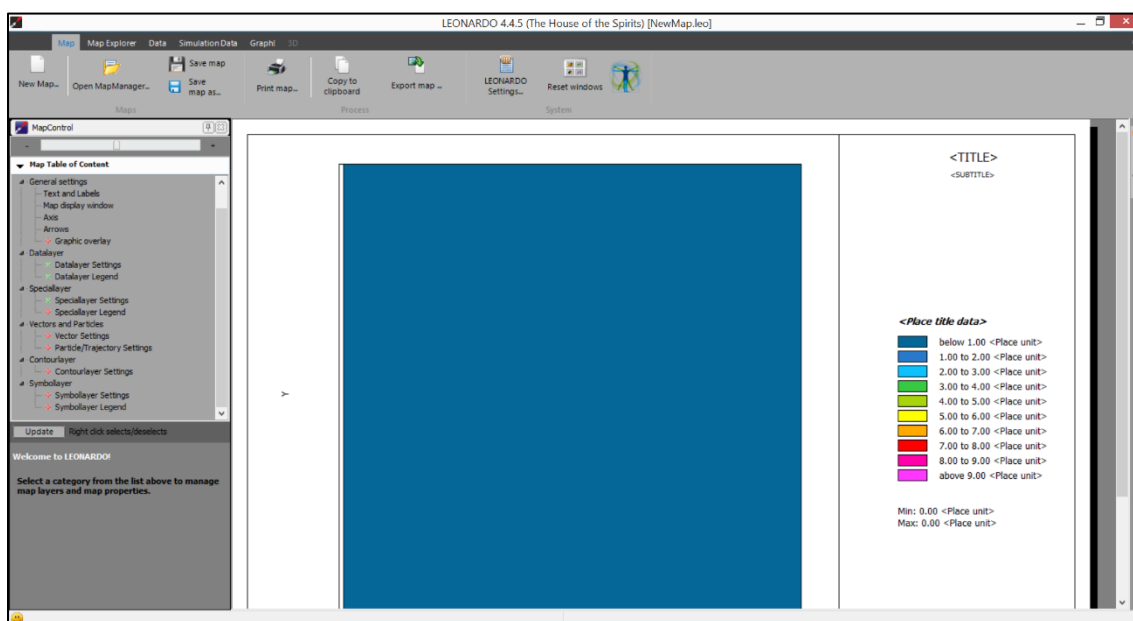
<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Temperatura atmosférica	31,6°C
Humedad específica a 2500 metros	1 g/kg
Humedad relativa (%)	25%
Velocidad del viento	3,2 m/s
Dirección del viento	215°
Longitud de rugosidad	0,010 m

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Estación Meteorológica General Freire (2020).

Una vez creado el archivo de simulación, este debe ser ejecutado en el comando principal de *ENVI-met 4.4.5*, proceso que toma alrededor de 3 horas y que tiene como resultado el modelo con las variables de humedad relativa del ambiente, radiación directa recibida, temperatura del aire y temperatura de la fachada exterior de las casas y edificaciones, variables que fueron escogidas para evaluar el efecto de la vegetación en la reducción de la isla de calor urbana

Una vez realizados estos pasos metodológicos y luego de que el comando principal de *ENVI-met 4.4.5* terminó de ejecutar por completo el modelo climático, se visualizaron los resultados en el comando *LEONARDO* (figura 10) a través de los archivos entregados por la simulación, los cuales se encuentran en formato de salida .EDX.

**Figura 10:** Vista general del comando *LEONARDO* de *ENVI-met 4.4.5*.



Fuente: Elaboración propia (2020).

A través de estos archivos se construyen los modelos que desean visualizarse, los cuales pueden ser en formato 2D y en formato 3D y con los elementos climáticos que para esta investigación son la temperatura, la cantidad de radiación directa recibida y el % de humedad relativa del ambiente, además de las temperaturas de las fachadas. El comando *LEONARDO* entrega facilidades para editar la distribución de los colores en el mapa, la dirección del viento, los rangos de Temperatura ( $T^{\circ}$ ), etc, con la finalidad de que la información entregada sea entendible a simple vista y los resultados puedan ser interpretados fácilmente.

## Capítulo N°4: Resultados

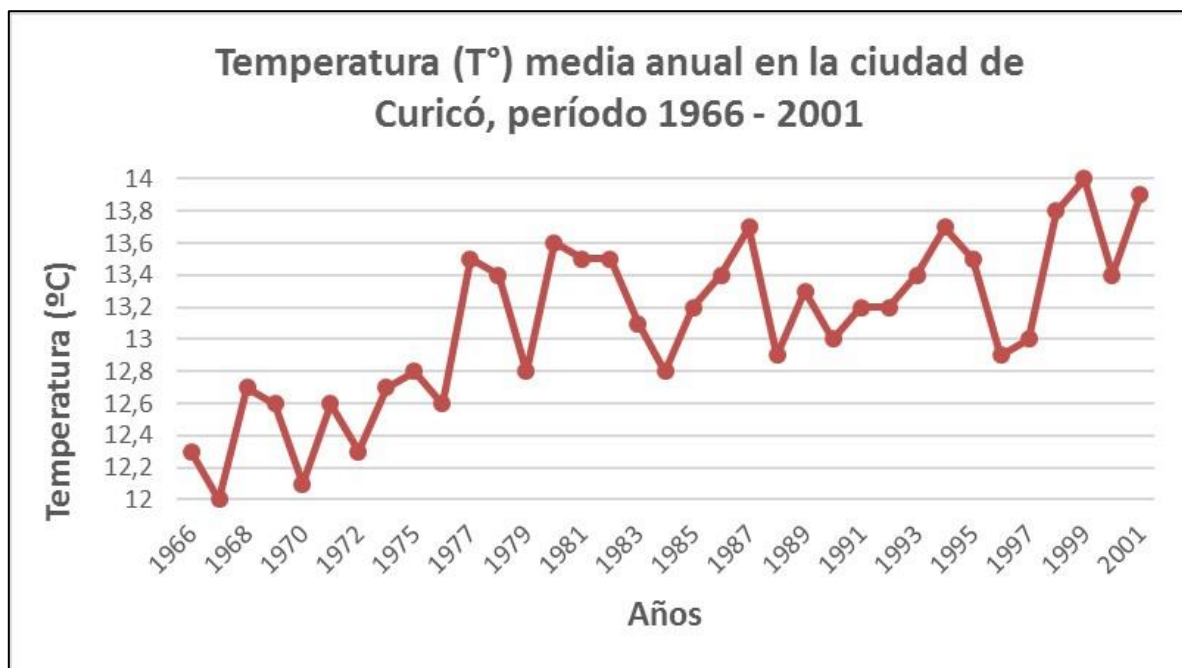
### 4.1 Antecedentes climáticos de la ciudad de Curicó

En los siguientes gráficos se muestran los promedios de temperaturas y precipitaciones en la ciudad de Curicó entre distintos períodos anuales.

- **Temperaturas históricas en la ciudad de Curicó**

En primer lugar, se grafican los promedios de las temperaturas medias anuales desde el año 1966 hasta el año 2001 (figura 11)

**Figura 11:** Temperatura media anual en Curicó, período 1966 – 2001.



Fuente: Elaboración propia (2020) en base a los datos proporcionados por la web del Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> (2020).

Se puede apreciar que entre los años 1966 y 1979, la temperatura media anual osciló dentro del rango de los 12°C y 13°C, siendo el año 1967 el año que presentó el valor más bajo de todo el período de estudio, con 12°C. Ya en 1978 se alcanzó la primera temperatura media que sobrepasó los 13°C con 13,5°C para ese año. Entre 1978 y 1997 la temperatura media se mantuvo en el rango de 13°C hasta los 13,7°C, y desde 1989 los valores no bajaron de los 13°C, mientras que para el período 1998 – 2001 no hubo valores de 13°C o menos. Dentro del período de estudio, la temperatura media más alta registrada en un año fue de 14°C para el año 1999. Por otra parte, se puede decir que entre la temperatura media más baja de 12°C



para el año 1967 y la temperatura media más alta de 14°C para el año 1999, hubo un aumento de 2°C en 32 años.

En términos de décadas, en la década de los años 60, entre 1966 y 1970, la temperatura promedio de cada año no llegó a los 13°C mientras que el promedio total de estos 4 años fue de 12,3°C. En la década de los años 70, la temperatura promedio comenzó a ascender hasta llegar a un máximo de 13,5°C en 1977 con un promedio total de 12,9°C para esta década. En la década de los años 80 continuó la tendencia sobre los 13°C alcanzando un máximo de 13,7°C en 1987, con un promedio total de 13,2°C para esta década. Por último, la década de los años 90 se mantuvo por sobre el rango de los 13°C logrando un máximo promedio para un solo año en 1999 con 14°C con un promedio total de 13,4°C, el valor más alto dentro de las décadas estudiadas del siglo XX.

En la figura 12 se continúa con el análisis de la variable de temperatura media anual y se grafica el promedio entre los años 2012 y 2019.

**Figura 12:** Temperatura media anual en Curicó, período 2012 – 2019.



Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por la web del Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> (2020).

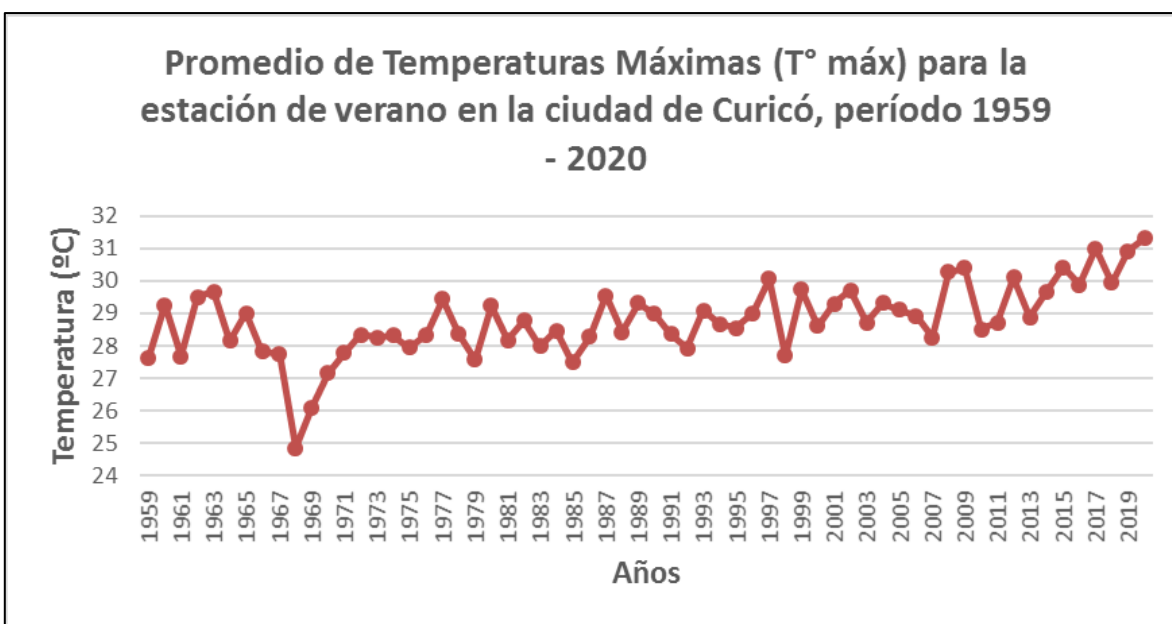
Entre los años 2012 y 2019 se mantuvo la tendencia de los últimos 4 años del gráfico anterior: no hay temperaturas medias por debajo del rango de 13°C, e incluso se mantienen por sobre los 13,6°C entre 2012 y 2013, siendo este el valor más bajo, con una clara tendencia al aumento que se ve reflejada desde el año 2014, el cual es el último año que posee una temperatura promedio por debajo de los 14°C, con un valor total de 13,8°C para ese año.

Desde 2015 hasta 2019, la temperatura promedio se mantuvo por sobre los 14°C, siendo 2016 el año con la temperatura promedio más alta de todo el período estudiado, incluyendo los años 1966 – 2001, alcanzando los 14,6°C de promedio.

Considerando los datos de temperatura media analizados para ambos períodos, se puede deducir que los años empiezan a ser más calurosos a fines de la década de los 90 y que, teniendo en cuenta la no disponibilidad de datos de temperatura de invierno para los años 2002 a 2011, el siglo XXI concentra los años más calurosos de la historia en Curicó, siendo la década de 2010 (período 2012 – 2019) la más calurosa con 14,1°C de promedio, con el récord de 2016 como el año más caluroso de la historia.

En la figura 13 se muestran los datos de las temperaturas más altas para el verano en un período más amplio que va desde 1959 a 2020.

**Figura 13:** Promedio de temperaturas máximas de verano en Curicó, período 1959 – 2020.



Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por la web del Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> (2020).

Del gráfico se desprende que desde 1959 hasta 1996, la temperatura promedio máxima para el verano se mantuvo por debajo de los 30°C, siendo el verano de 1997 el primer año en que alcanzó ese umbral y el verano de 1968 fue el menos cálido de todo el período de estudio con un promedio de 24,9°C de máxima. El verano del año 2008 superó por primera vez la marca de los 30°C con 30,3°C de promedio, tendencia que se repitió al año siguiente, 2009.

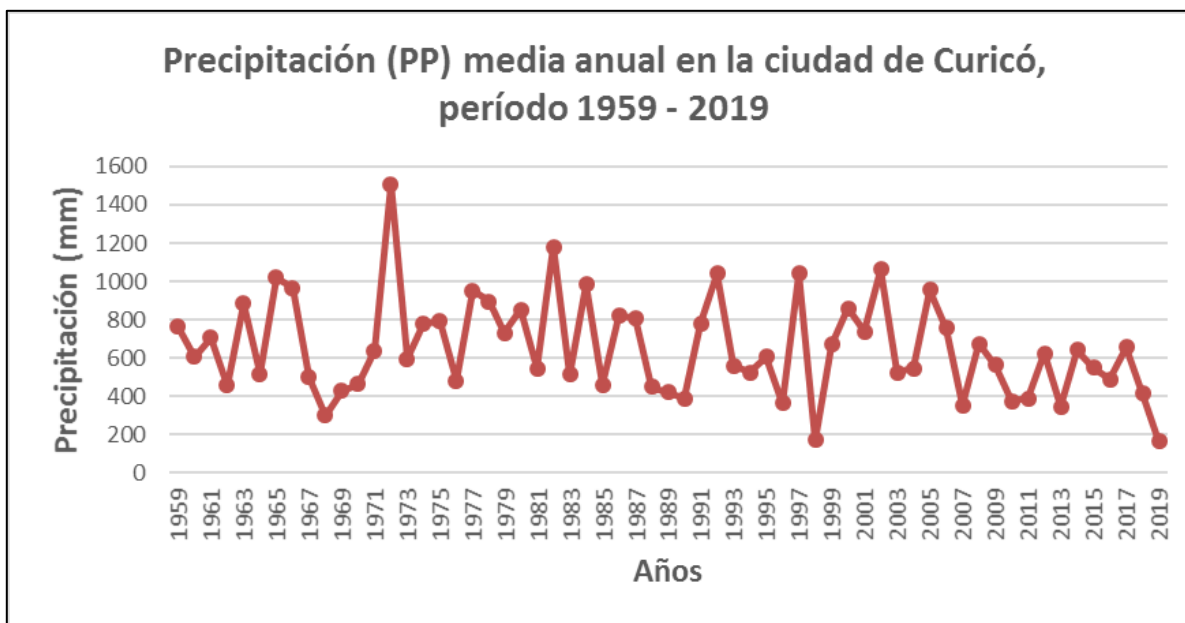
Desde el año 2014 la temperatura máxima promedio del verano no bajó de los 29,7°C, siendo 2020 el verano en que se observa el valor más alto del período estudiado, puesto que se



alcanzaron 31°C de promedio, récord que fue nuevamente superado, esta vez por el año 2020, el cual alcanzó los 31,3°C grados de temperatura máxima en verano. En consecuencia, el verano del año 2020 es el verano más caluroso de los últimos 61 años en Curicó.

- **Precipitación histórica en la ciudad de Curicó**

**Figura 14:** Precipitación media anual en la ciudad de Curicó, período 1959-2019.



Fuente: Elaboración propia en base a los datos proporcionados por la web del Explorador Climático del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)<sup>2</sup> (2020).

En términos generales, el promedio de precipitación durante todo el período es de 653,1mm caídos, pero si se considera el análisis hasta el año 2006, último año en que se superó el promedio de 700mm de precipitación, el promedio alcanza un máximo de 700mm. Considerando esto, se calculó un promedio de precipitación para el período de 2007 – 2019, lo que resultó en un total de 479,7mm caídos, lo que significa una diferencia de 220,4mm con respecto al total del período anterior. De esta manera, se deduce que en los últimos 13 años la cantidad de precipitación en la ciudad de Curicó va disminuyendo constantemente cada año.

En términos específicos, dentro del período 1959 – 2019, los años que experimentaron las mayores cantidades precipitación, por sobre los 1000mm caídos, fueron 1965, 1972, 1982, 1997 y 2002, siendo 1972 el récord histórico de precipitación con 1506,9mm caídos, lo que totaliza un superávit de 807mm, mientras que la menor cantidad de precipitación es del año 1968 con solo 300mm, lo que equivale a un déficit de 400mm.

En el período 2007 – 2019, la cantidad de precipitación disminuyó drásticamente respecto al período 1959 – 2006. Dentro de este período, el año que registró la mayor precipitación media fue 2008 con 673,9 mm, mientras que el año con menos precipitación fue 2019 con solo 161mm de agua caída.

Teniendo en cuenta todos los datos analizados, es posible que el año ‘más seco’ de los últimos años 61 en Curicó fue 2019.

#### **4.1.1 Tendencias climáticas en la ciudad de Curicó**

En base a los resultados obtenidos desde los gráficos analizados, es posible notar una clara tendencia a un mayor calentamiento en los meses de verano y a una fuerte disminución de la precipitación desde principios del presente siglo. En este sentido, en su Reporte Climatológico Anual de 2019, la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) da cuenta de que la ciudad de Curicó es la que presentó la mayor anomalía de precipitación anual dentro de la zona central, mientras que la Región del Maule fue una de las más afectadas por eventos de sequía extrema (DMC, 2019). Este fenómeno se repitió en otras ciudades de la zona central, como por ejemplo Santiago y Valparaíso, ciudades que registraron en 2019 su año menos lluvioso en al menos 50 años al igual que Curicó (Montes, 2019). En consecuencia, el verano del año 2020 es el verano más caluroso de los últimos 61 años en Curicó, situación que se observó también en otras ciudades mediterráneas como Santiago (Montes, 2020).

Dentro de las proyecciones climáticas, Garreaud (2011), visualiza un aumento en al menos 5°C en la temperatura promedio del verano, así como una reducción de las precipitaciones en un 60-70% para la zona desde la Región del Maule y la Región de Los Lagos. Falvey y Garreaud (2009) sugieren que una posible causa de estas tendencias climatológicas vistas en el Chile Central es el aumento de los gases de efecto invernadero a causa de la degradación del bosque nativo (Marquet et al, 2019), el cual provocaría un aumento en los vientos del sur y por ende un enfriamiento litoral, haciendo que las temperaturas aumenten en 1°C sobre la costa hasta 3°C en el valle central.

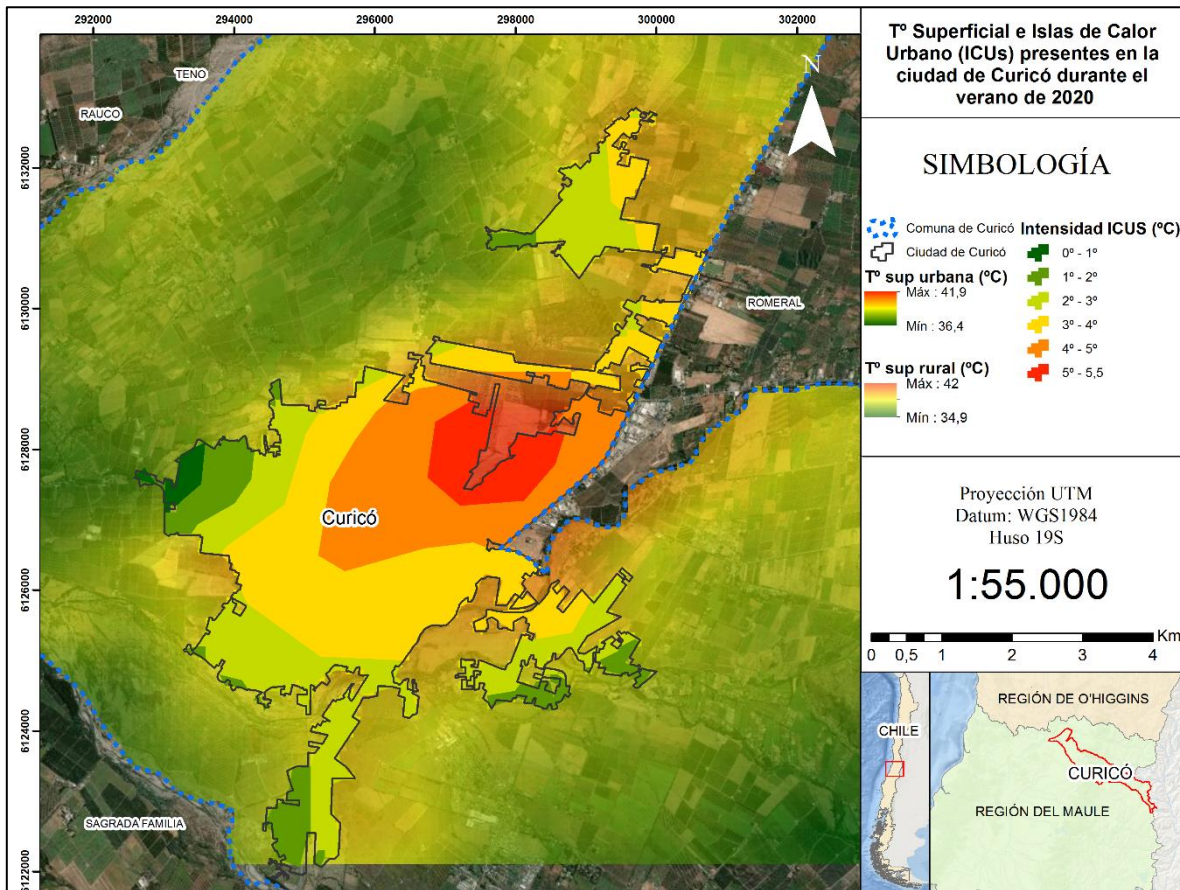
El CR2 de la Universidad de Chile, en su informe a la Nación del año 2015, señala que la principal causa de disminución en las precipitaciones, durante los últimos años, es la Megasequía que está presente desde 2010 en Chile. Esta anomalía climatológica tiene como su principal origen el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales, a su vez, son la principal causa del cambio climático (CR2, 2015). Esta situación explica también la presencia de veranos más calurosos, es decir, también tienen como origen el aumento de emisiones de GEI (Montes, 2020).

## 4.2 Comportamiento de la temperatura superficial de Curicó durante la época verano de 2019 – 2020

### 4.2.1 Temperatura superficial promedio mediante imágenes del satélite MODIS

La figura 15 muestra la distribución de la temperatura superficial diurna (a las 14:30 pm) en la ciudad de Curicó durante el verano de 2020, así como las islas de calor presentes.

**Figura 15:** Temperatura superficial rural y urbana e islas de calor diurnas en la ciudad de Curicó, período de verano de 2020.



Fuente: Elaboración propia (2020).

En la imagen se evidencia que, de acuerdo con la escala de 1000 metros del satélite MODIS, los valores de temperatura superficial diurna de verano se mantienen sobre los 36°C para todo el período estudiado, mientras que, en la zona rural, la temperatura mínima es de 34,9°C (hacia los terrenos agrícolas) y la máxima es de 42°C (hacia el norte de la ciudad).

En cuanto a las intensidades de las islas de calor, estas se presentan de forma muy débil (0°C – 1°C) y débil (1°C – 2°C) en las zonas poniente y oriente de la ciudad, zonas caracterizadas por terrenos agrícolas; se manifiesta moderadamente débil (2°C – 3°C) en los espacios

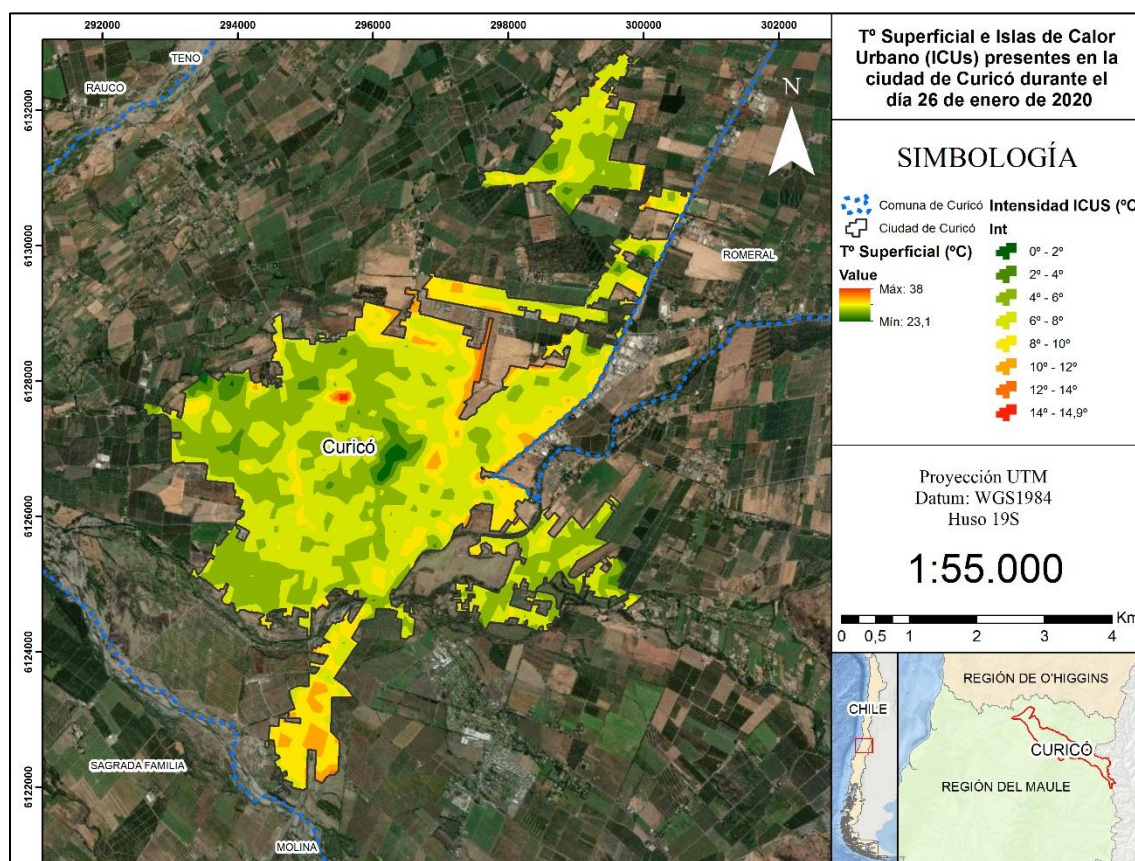
urbanizados de las zonas sur, poniente y oriente de la ciudad, de forma moderada ( $3^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$ ) en el centro y norponiente, mientras que las intensidades fuerte ( $4^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}$ ) y más fuerte ( $5^{\circ}\text{C} - 5,5^{\circ}\text{C}$ ) se dan en las zonas centro norte y norte de la ciudad, detrás del Cerro Condell y en terrenos aledaños a la estación meteorológica General Freire.

El análisis de la imagen demuestra que la resolución de 1000 metros del satélite MODIS no considera detalles de la superficie a escala de microclima, como por ejemplo la cantidad de áreas verdes, la densidad y altura de construcción, etc., pero, a su vez, es la base más completa de temperatura superficial diaria a través de imágenes satelitales.

#### 4.2.2 Temperatura superficial promedio mediante imágenes del satélite Landsat 8

La figura 16 muestra la temperatura superficial e islas de calor registradas a las 14:33 hrs.

**Figura 16:** Temperatura superficial e intensidades de las islas de calor urbana diurna en la ciudad de Curicó para el día 26 de enero de 2020.



Fuente: Elaboración propia (2020).

La figura anterior muestra que la temperatura superficial oscila entre los  $23,1^{\circ}\text{C}$  y los  $38^{\circ}\text{C}$ . En cuanto a la intensidad de la isla de calor, esta se presenta de forma muy débil ( $0^{\circ}\text{C} - 2^{\circ}\text{C}$ )

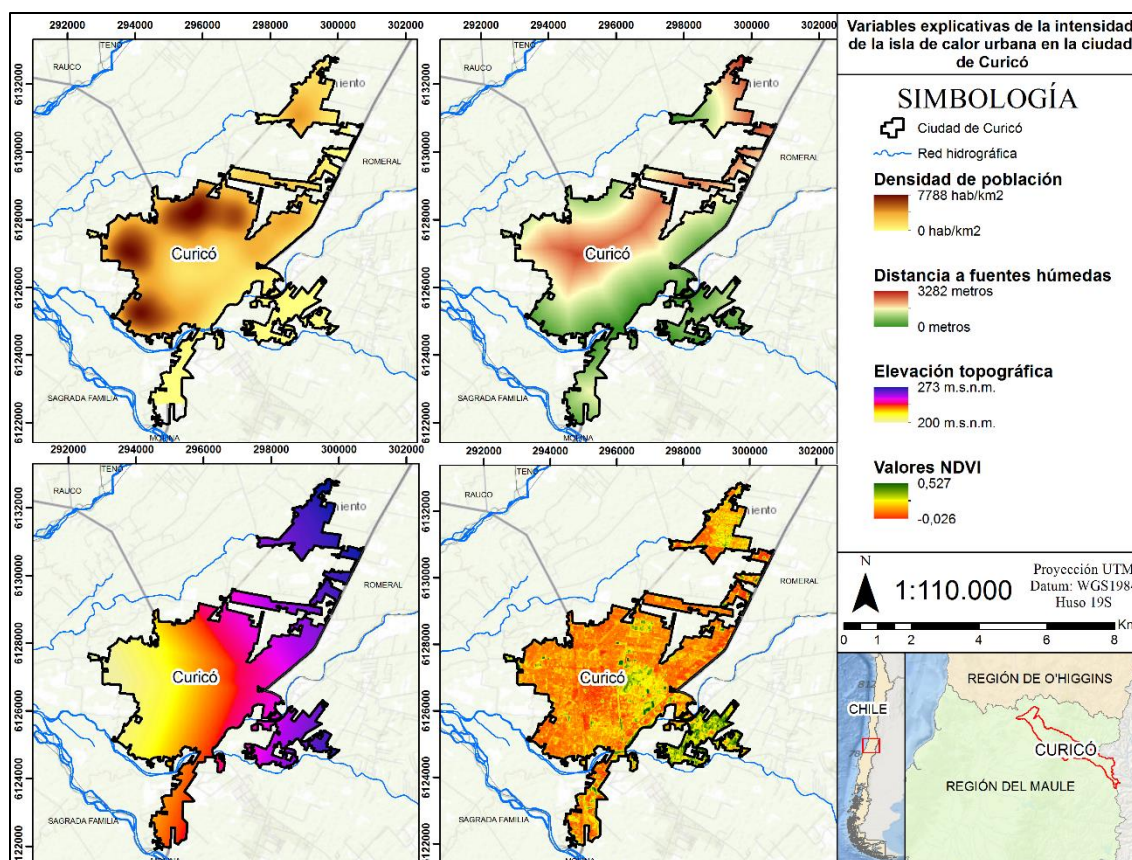


y débil ( $2^{\circ}\text{C} - 4^{\circ}\text{C}$ ) en el cerro Condell y sus alrededores, incluyendo zonas de la alameda central de la ciudad de Curicó, así como en la plaza de armas de la ciudad. En las intensidades moderadamente débil ( $4^{\circ}\text{C} - 6^{\circ}\text{C}$ ) y moderada ( $6^{\circ}\text{C} - 8^{\circ}\text{C}$ ) predominan los usos de suelo urbanos mixtos, es decir, residencial y comercial, mientras que la intensidad moderadamente fuerte ( $8^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}$ ) predomina en usos de suelo industrial. Por último, las intensidades más altas de la isla de calor urbana se presentan de manera fuerte ( $10^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C}$ ) y muy fuerte ( $12^{\circ}\text{C} - 14^{\circ}\text{C}$ ) en los suelos desnudos y sus calles adyacentes, además de la presencia de un suelo desnudo ubicado en la zona norte de Curicó, el cual presenta una intensidad de isla de calor extrema ( $14^{\circ}\text{C} - 14,9^{\circ}\text{C}$ ), la más alta para el día 26 de enero de 2020 en la ciudad.

#### 4.2.2.1 Variables explicativas para el comportamiento de la isla de calor urbana en la ciudad de Curicó durante el período de verano de 2020

En la figura 17 se presentan las variables de densidad de población (zona superior izquierda del mapa), distancia a fuentes húmedas (esquina superior derecha), elevación topográfica (zona inferior izquierda) y NDVI (zona inferior derecha).

**Figura 17:** Variables explicativas del comportamiento de la isla de calor en Curicó.



Fuente: Elaboración propia (2020).

De acuerdo con la figura 17, la variable de densidad de población evidencia zonas que poseen más de 7000 hab/km<sup>2</sup>, superando el promedio de 5345 hab/km<sup>2</sup> de la ciudad. Estas mayores densidades se presentan en zonas periféricas de la ciudad, específicamente al poniente, el extremo suroeste y la zona norte, zonas que poseen una alta densidad de población habitando en edificaciones de baja altura, la que, en su mayoría, no superan los 3 pisos.

La variable de distancia a las fuentes húmedas considera como cauces principales al Río Lontué, al sur de la ciudad de Curicó, al estero Guaiquillo al poniente y sur de la ciudad y a un estero sin nombre ubicado al extremo norte de Curicó. En cuanto a las distancias, estas son menores en las zonas sur y norte de la ciudad, entre 0 y 1600 mts, mientras que las mayores distancias se concentran en las zonas centro y centro norte, de 1600 hasta 3282 mts.

En cuanto a la topografía, la altitud asciende de forma gradual desde el poniente hasta el oriente y nororiental de la ciudad, con valores que van desde los 200 hasta los 273 m.s.n.m.

Por último, el valor del NDVI en la ciudad se extiende entre los valores -0,026 y 0,527. Los mayores valores coinciden con las principales áreas verdes, las cuales corresponden al Cerro Condell, la Plaza de Armas y la alameda principal, así como en la zona poniente de la ciudad, en donde predominan terrenos agrícolas (anexo 4). Por otro lado, se aprecia que en la mayor parte de la ciudad de Curicó predominan bajos niveles de NDVI (entre 0 y bajo 0), situación corroborada en terreno, en donde solo se apreciaron áreas verdes con poca vegetación, como por ejemplo plazas, las cuales poseían césped y algunos árboles dispersos en su composición.

- **Modelos de regresión lineal múltiple entre variables para explicar las intensidades de la isla de calor urbana**

La tabla 11 muestra los resultados de la regresión entre las variables explicativas de la ICU, seleccionadas de acuerdo con los resultados de Sarricolea et al (2008) y Cuadrat et al (2005) en ciudades mediterráneas. En este paso, en el escenario de verano 1 se realizó la regresión solo de la variable de distancia a fuentes húmedas con las temperaturas obtenidas; en el verano 2 se trabajó con las distancias a las fuentes húmedas más las variables de densidad, en el verano 3 se analizaron las dos variables anteriormente mencionadas más la elevación topográfica, y, por último, en el verano 4 se incluyó el NDVI a las 3 variables anteriores.

**Tabla 11:** Resultados de la regresión múltiple entre las variables explicativas.

Escenario	R Múltiple	R <sup>2</sup> Múltiple	R <sup>2</sup> Múltiple ajustado	Error típico St.
Verano 1	0,528	0,278	0,278	0,819
Verano 2	0,663	0,44	0,44	0,723
Verano 3	0,694	0,482	0,482	0,697
Verano 4	0,772	0,597	0,597	0,616

Fuente: Elaboración propia (2020).

Los resultados de la regresión múltiple demuestran que la mayor distancia de zonas urbanas a fuentes húmedas es el factor más relevante para explicar las intensidades de la isla de calor superficial durante el verano en la ciudad de Curicó, ya que por sí solo explica un 28%. En segundo lugar, se encuentra la densidad de población, la cual explica un 16,2% del fenómeno y luego el NDVI con un 11,5%. Por último, la variable que menos influye es la de la elevación topográfica, ya que solo representa solo un 0,42% de la intensidad de la isla de calor.

A continuación, la tabla 12 muestra las influencias de cada una de las variables en el comportamiento de las temperaturas.

**Tabla 12:** Relación entre las variables explicativas y la intensidad de la isla de calor urbana, verano de 2019 – 2020.

<b>Variables</b>	<b>Coefficientes</b>
Constante (°C)	34,1
NDVI	-5,746
Elevación topográfica	-0,0004011
Distancia a fuentes húmedas	0,0005751
Densidad de población	0,0856

Fuente: Elaboración propia (2020).

Los resultados confirman que a menor presencia de vegetación (NDVI), la temperatura superficial aumenta, situación que se repite al disminuir la elevación topográfica. Por otro lado, se aprecia que mientras haya mayor distancia entre zonas urbanas y fuentes húmedas y aumente la densidad, mayor será la temperatura superficial y por ende la isla de calor se presentará con más intensidad.

Considerando la influencia de cada variable, en la tabla 13 se propone modificar las condiciones de estas variables para así conocer su incidencia sobre la temperatura superficial la variación de esta.

**Tabla 13:** Sensibilidad de la temperatura ante escenarios que modifican las variables explicativas.

<b>Variables Explicativas</b>	<b>Cambios en la Temperatura (°C)</b>
Aumento del NDVI en 0,5	-0,29
Aumento de la elevación topográfica en 50 metros	-0,02
Aumento de la distancia a fuentes húmedas en 500 metros	+0,28
Aumento de la densidad de población en 5000 hab/km <sup>2</sup>	+0,43

Fuente: Elaboración propia (2020).

Respecto a los cambios en la temperatura, el aumento de la densidad de población en 5000 hab/km<sup>2</sup> es el factor que provoca la mayor variación de la temperatura, puesto que esta aumenta en 0,43°C, así como el aumento de la distancia de zonas urbanas a fuentes húmedas en 500 metros, lo que se traduce en una variación de 0,28°C a la temperatura superficial. Por otro lado, los factores que reducen la temperatura superficial son el aumento de la elevación topográfica en 50 metros, la cual disminuye la temperatura en 0,02°C, y el aumento del NDVI en 0,5, factor que disminuye la temperatura en al menos -0,29°C, convirtiéndose este último en la variable que más peso posee sobre la reducción de la temperatura.

Teniendo estos datos en cuenta, más la visita a terreno de los días 10 y 11 de marzo de 2020, es posible conocer de forma más detallada el comportamiento del microclima de la ciudad de Curicó, así como la influencia de los componentes urbano-geográficos (variables explicativas) sobre la temperatura superficial.

#### **4.2.3 Verificación en terreno del comportamiento de la temperatura superficial a escala de microclima en la ciudad de Curicó**

La figura 18 es la ortofoto realizada mediante el programa *Agisoft* a través de la unión de las fotos capturadas por el dron a una altura de 70 metros.

**Figura 18:** Ortofoto del sobrevuelo a 70 metros.



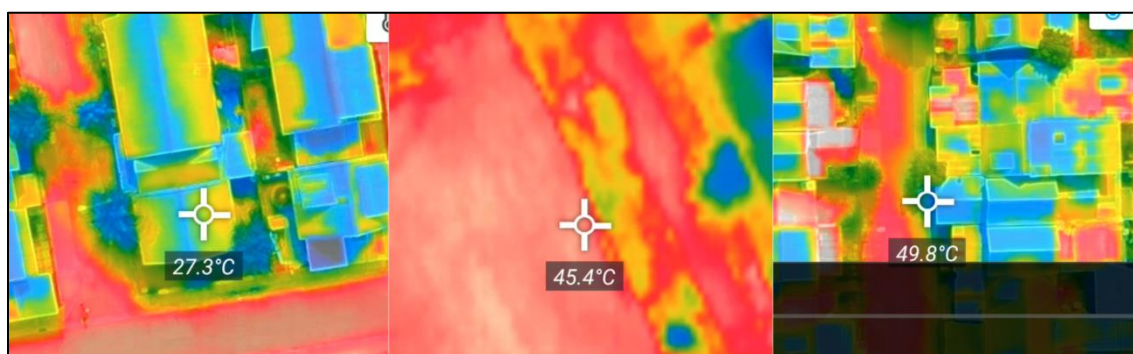
Fuente: Elaboración propia (2020).



Tal como se mencionó en la metodología, la imagen corresponde a la zona sur poniente de la ciudad de Curicó. En términos de vegetación, se aprecia una baja proporción de vegetación de altura (3 – 5 metros aprox) dispersa en las veredas y en bandejones que poseen césped ubicados al interior de plazas públicas, bandejones que, además, se encuentran restringidos en los costados y esquinas de estas plazas, dejando sitios desnudos al centro de estas. En cuanto a las edificaciones, estas son de predominio residencial que no superan los 2 pisos y su materialidad es de concreto con algunas ampliaciones de madera en algunas de las casas, mientras que la mayoría de los techos están hechos de zinc y, en algunos casos, de esternit. Por otro lado, todas las calles del área se encuentran pavimentadas.

La figura 19 muestra las temperaturas superficiales detectadas mediante la cámara térmica en el vuelo de dron, a las 15:58 hrs del día 11 de marzo de 2020 y a una altura de 70 metros.

**Figura 19:** Temperaturas superficiales a escala de microclima en la ciudad de Curicó.



Fuente: Elaboración propia (2020).

El vuelo realizado con el dron grafica que, a escala de microclima, la temperatura superficial sobrepasa en algunas áreas los 40°C, alcanzando lugares donde se presentan temperaturas máximas de 49,8°C, principalmente en lugares desprovistos de sombra y de vegetación, como lo son las calles, canchas de cemento y zonas de plazas que no poseen vegetación. Por otro lado, las temperaturas más bajas se presentaron en los techos de los hogares, las zonas cubiertas por la sombra de los árboles y los bandejones de césped de las plazas, con rangos de temperatura entre 27°C y 36°C; en el caso de los techos, la mayoría del material construido es de zinc, pero, al ser una superficie predominantemente blanca, se evidenciaron temperaturas bajo los 36°C. En cuanto a las intensidades de la isla de calor urbana, las imágenes del vuelo del dron muestran que existen diferencias de hasta 22,5°C entre lugares vegetados y zonas de superficies blancas con las zonas desprovistas de vegetación y de cubierta de concreto.

Mediante la visita a terreno fue posible corroborar el análisis de temperatura superficial realizado con la imagen del satélite *Landsat 8*, en donde se evidenció que la temperatura más alta (38°C) correspondía a dos grandes sitios eriazos con nula presencia de vegetación,

situación que se repitió en la visita a terreno, donde la temperatura de la vegetación y los espacios cobijados por su sombra no sobrepasó los 36°C, mientras que en los espacios pavimentados o de tierra la temperatura sobrepasó, en algunos casos, los 45°C. Esto demuestra que la presencia de vegetación es uno de los factores urbano-geográfico que más evidencia las diferencias de temperatura a distintas escalas o, como es el caso del presente estudio, a escala de microclima, tal como se demostró en el análisis de sensibilidad de temperaturas en el punto 4.2.2.1.

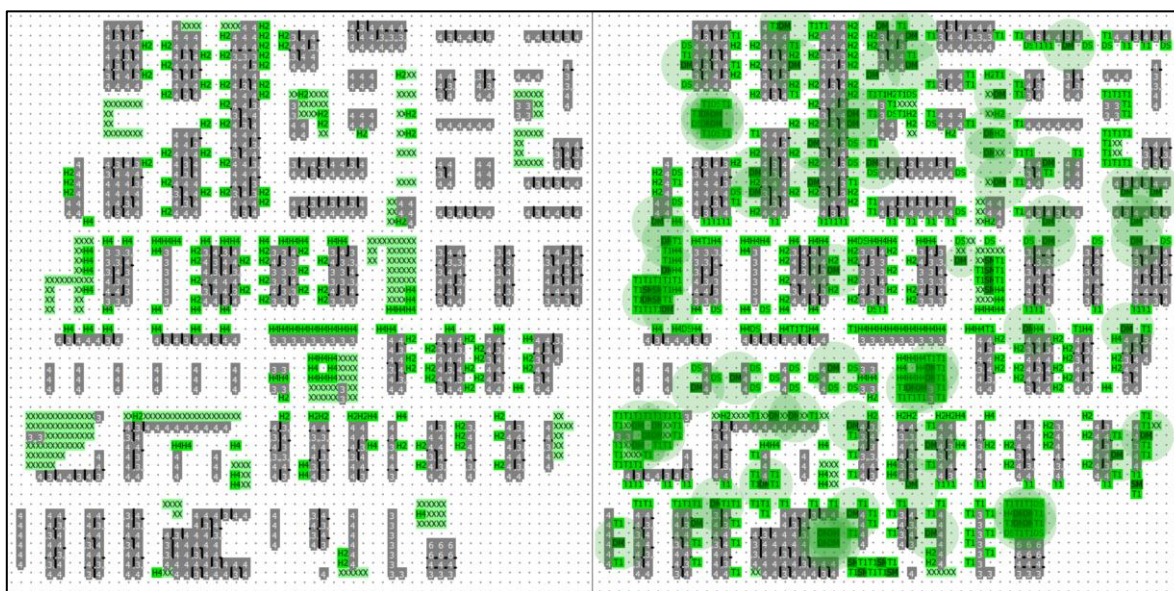
De acuerdo con los resultados obtenidos, Sailor (2006) propone intervenciones urbanas que apunten a la reducción de la temperatura, principalmente por el método del aumento de la evapotranspiración la cual se logra con el aumento de la vegetación en las ciudades. En este sentido, el autor menciona propuestas como muros vegetados, techos vegetados como jardines y la plantación de árboles de altura para aumentar la sombra en el espacio público. Junto con estas propuestas, Duarte et al (2015) mencionan otras estrategias para reducir la temperatura del aire, como el aumento de los parques urbanos y de avenidas vegetadas, como, por ejemplo, la Alameda principal de Curicó.

### 4.3 Escenarios de reducción del efecto isla de calor en el microclima presente en la ciudad de Curicó

#### 4.3.1 Comparación características físicas actuales y propuestas del área de estudio

La figura 20 evidencia, principalmente, el cambio vegetacional en el escenario actual con el modelo propuesto.

**Figura 20:** Vegetación actual y vegetación propuesta



Fuente: Elaboración propia (2020).

La imagen del lado izquierdo grafica lo reconocido mediante la visita a terreno y las imágenes satelitales de *Google Earth*, donde se identificó vegetación de tipo gramínea (césped) en las plazas públicas y sitios eriazos, así como vegetación arbórea de alturas de 2 a 5 metros en los pasajes y las avenidas principales en el área de estudio. Por otra parte, la imagen del lado derecho representa la propuesta de vegetación realizada mediante *ENVI-met*, en donde se propuso la plantación de especies arbóreas de 3 a 5 metros de altura para los pasajes y de 10 a 15 metros de altura para las calles principales y las plazas públicas y sitios eriazos. En la propuesta se destaca el halo presente en los árboles, el cual representa la cobertura de follaje de las especies que posee el programa, pero, a su vez, es lo que se puede ver en la realidad con las especies propuestas de acuerdo con la propuesta de Ley de Arbolado Urbano (2018).

#### 4.3.2 Comparación variables climáticas reales y simuladas

En las siguientes figuras se comparan las características climáticas reales del área de estudio con las características climáticas entregadas por la simulación para reducir el efecto isla de calor mediante el software *ENVI-met*.

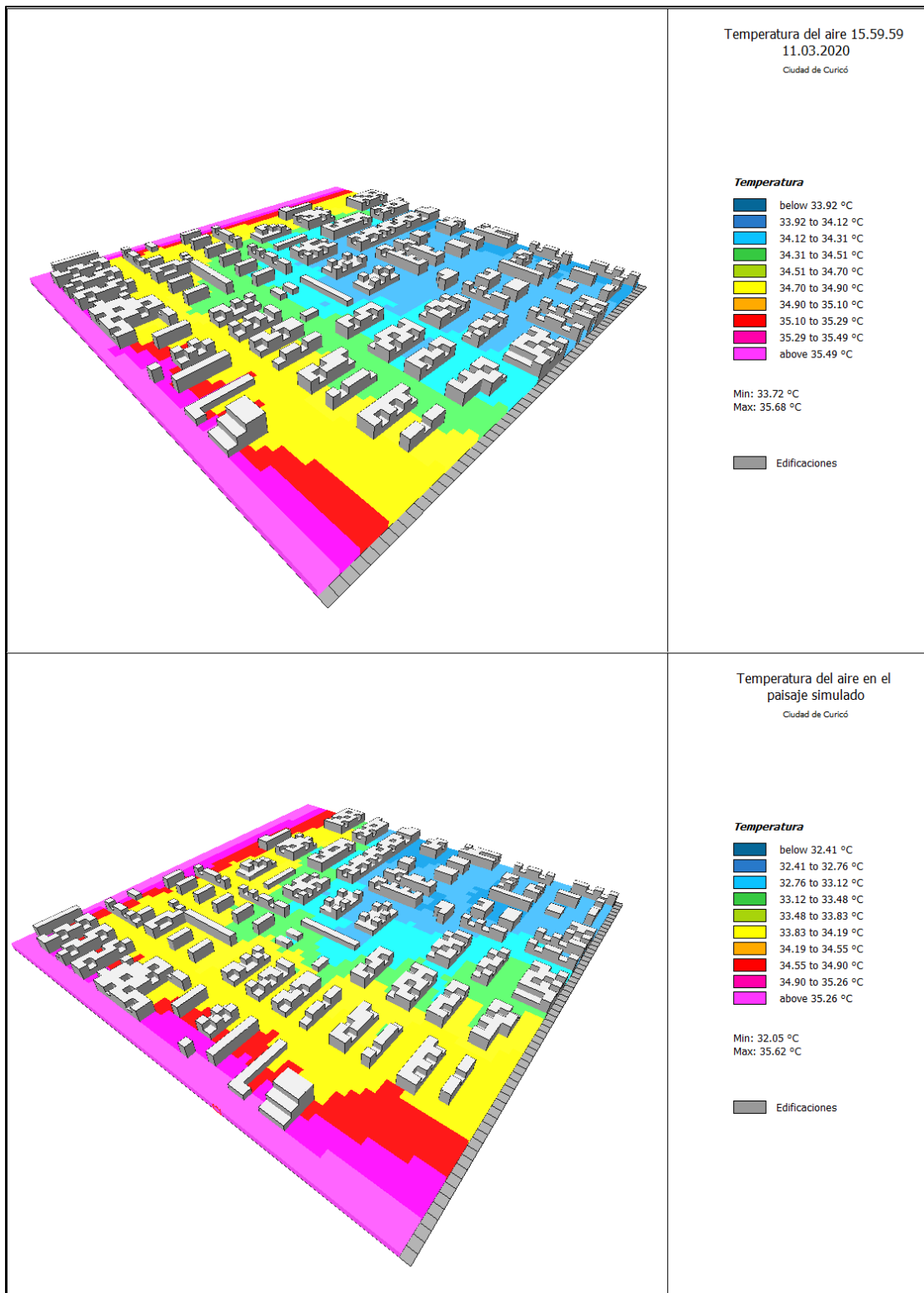
- **Comparación variable temperatura del aire**

En la figura 21 se aprecia que la temperatura del aire durante el día 11 de marzo de 2020 a las 16:00 hrs se mantiene sobre los 33°C, más específicamente entre 33,72°C y 35,67°C, ambos por sobre el promedio de la temperatura del día estudiado, la cual fue de 31,6°C. A pesar de ser temperaturas altas, la distribución de estas es de forma descendente en dirección sur a norte; esto se explica por la mayor presencia de espacios vegetados como plazas públicas y vegetación arbórea en las veredas de la parte norte de la zona analizada. Por otro lado, la homogeneidad en las alturas de las edificaciones permite que no haya diferencias tan pronunciadas de temperatura en el área de estudio (Deng et al, 2016).

En relación con las temperaturas obtenidas por el vuelo del dron, se aprecia que, de acuerdo con la simulación del paisaje real en el software, las escalas de análisis presentan diferencias en el análisis detallado de la zona, puesto que el dron detecta temperaturas a una escala de 5 cm y el software a una escala de 4 metros. A pesar de esto, el trabajo con *ENVI-met* no presenta diferencias tan grandes con lo observado en terreno, ya que las temperaturas de la zona específica de vuelo promedian los 33.8°C – 34.1°C, además de confirmar que los techos presentan menor temperatura que las calles y los sitios desprovistos de sombra (anexo 5).

De acuerdo con los resultados del paisaje simulado, la temperatura máxima se reduce de 35,49°C a 35,26°C, es decir, 0,23°C de diferencia, mientras que la temperatura mínima baja de 33,72°C a 32,05°C, lo que se traduce en una disminución en 1,67°C. Por otro lado, los valores medios de temperatura también reducen; por ejemplo, la temperatura desde el este al norte del área de estudio presenta reducciones en su temperatura máxima de 0,71°C (34,9°C a 34,19°C). Los resultados se complementan con lo expresado por Duarte et al (2015), quien demuestra que la presencia de vegetación en altura en veredas o en plazas centrales de zonas microclimáticas puede reducir la temperatura del aire por sobre los 0,5°C.

**Figura 21:** Temperatura del aire en paisaje real y simulado.



Fuente: Elaboración propia (2020).

- **Comparación variable radiación directa**

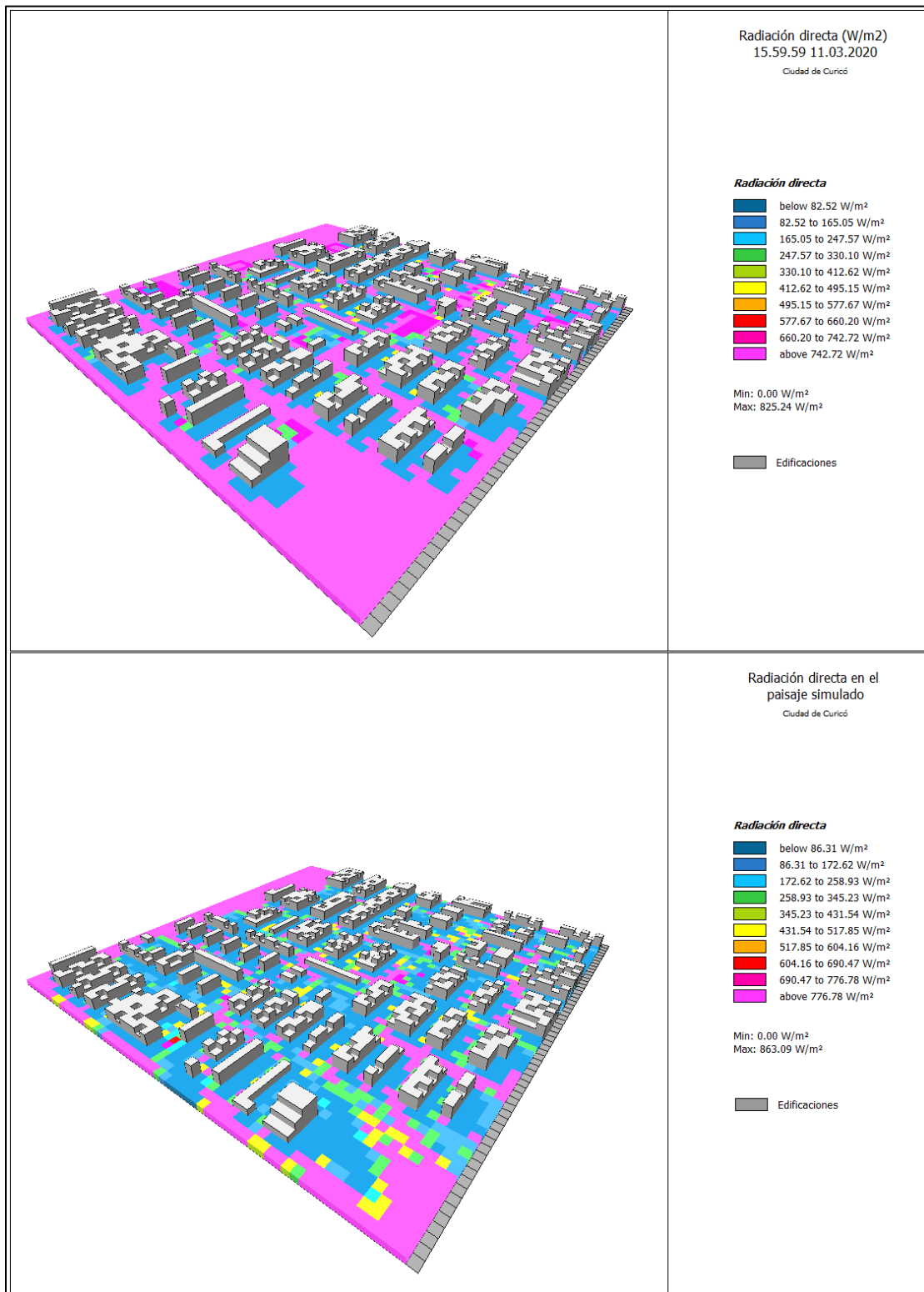
De la figura 22 se puede apreciar que la menor cantidad de radiación directa, que oscila en valores entre  $82.52 \text{ W/m}^2$  a  $247.57 \text{ W/m}^2$ , se presenta principalmente a la sombra de las edificaciones, al igual que vegetación arbórea de 2 a 4 metros de altura, aunque esta última absorbe menos radiación y produce una sombra de menor tamaño que las casas, por lo que los rangos de radiación directa van desde los  $247.57 \text{ W/m}^2$  hasta los  $330.10 \text{ W/m}^2$ . Por último, los valores máximos de radiación, entre  $577.67 \text{ W/m}^2$  y  $825.24 \text{ W/m}^2$ , se dan en las zonas desprovistas totalmente de sombra como las vías de las calles y lugares centrales de plazas.

A nivel macroclimático, los altos valores de radiación en las áreas donde no existe sombra se explican por la ausencia de nubosidad en verano, la que en invierno es mayor e impide, en gran medida, que los rayos solares lleguen a la superficie, además de que la inclinación de los rayos solares en invierno es mucho mayor que la inclinación del verano, provocando menos calentamiento en la superficie en la época de invierno puesto que los rayos ocupan una porción mayor en la atmósfera (Universitat de Barcelona, s/f),

En comparación con el modelado del paisaje real, en el paisaje simulado, la presencia de vegetación por sobre los 15 metros de altura tiene un impacto significativo en la radiación directa recibida en el área de estudio, puesto que lugares como las calles y los techos de aluminio de las casas reciben mayor cantidad de sombra con la vegetación arbórea, lo que disminuye los valores de radiación entre los  $86.31 \text{ W/m}^2$  y  $258.93 \text{ W/m}^2$  en gran parte del área de estudio, así como los valores del albedo emitido por las calles y plazas descubiertas de vegetación.

La reducción de la radiación solar directa recibida gracias a la vegetación se puede aplicar a distintas áreas de estudio, puesto que, Guillén-Mena y Orellana (2016) demuestran que la presencia de vegetación densa y de altura, aumenta la cantidad de sombra presente en la superficie y disminuye los espacios que puedan ser afectados por la radiación solar, ya que la vegetación absorbe un % de esta energía para su proceso de fotosíntesis.

**Figura 22: Radiación directa en el paisaje real y simulado.**



Fuente: Elaboración propia (2020).



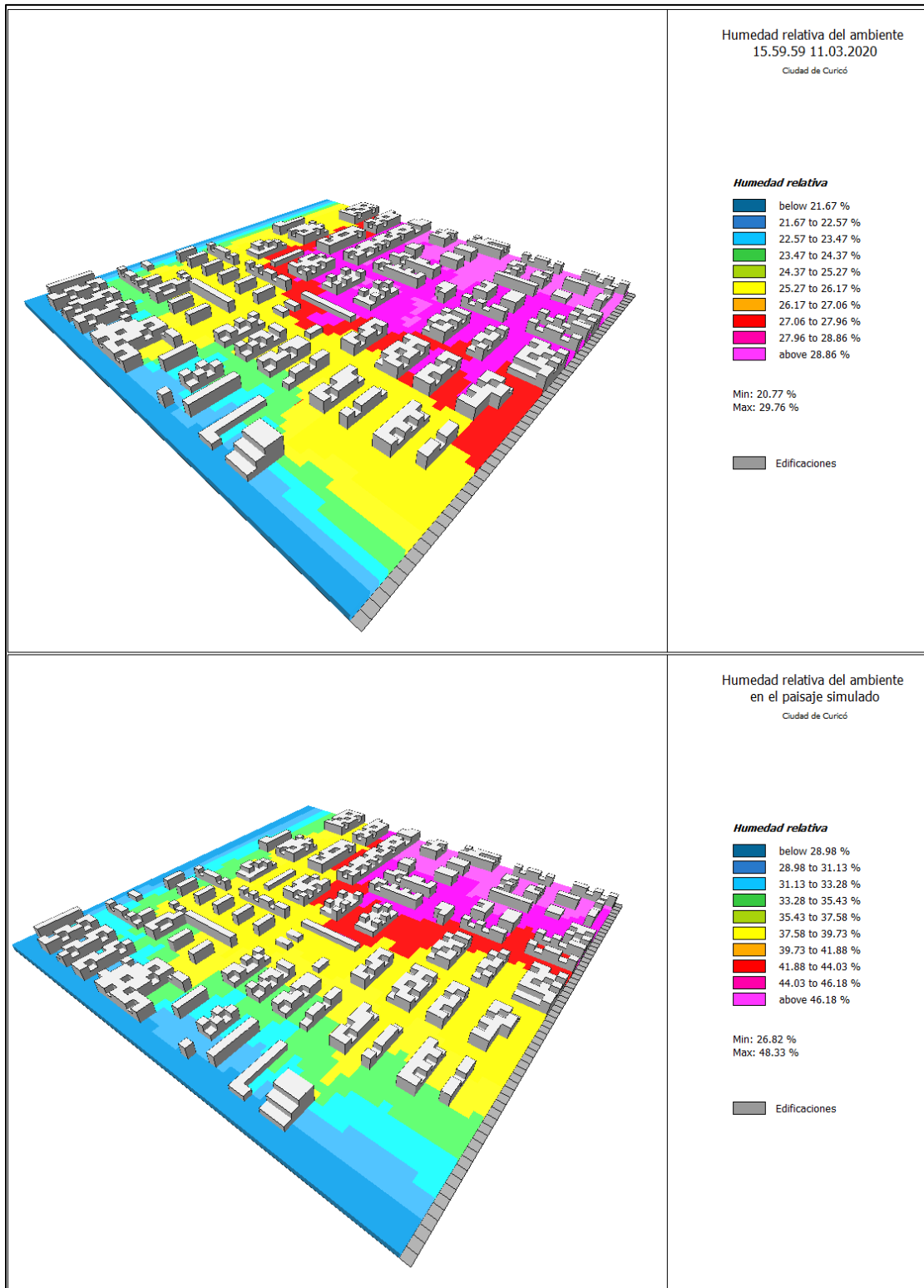
- **Comparación variable humedad relativa del ambiente**

De la figura 23 se puede concluir que, en términos generales, la humedad promedio del ambiente de la ciudad de Curicó es de un 47% para el mes de marzo (Weather Atlas, 2020). En el caso real simulado en el software, la humedad relativa se distribuye al igual que la temperatura, es decir, aumenta a medida que va hacia el norte, con rangos entre 20,78% y 29,76%, lo que significa la mitad del promedio de humedad para marzo, pero también es un promedio razonable para el área de estudio, puesto que la vegetación existente no es un factor relevante para el aumento de la humedad relativa. Por otro lado, la ciudad, al estar emplazada en una zona mediterránea, posee valores más bajos de nubosidad y de precipitación en comparación con ciudades costeras, lo que hace razonable tener promedios entre 30% y 40% de humedad (Taulé, 2016).

El resultado de la simulación con especies arbóreas entre 5 y 15 metros de altura muestra que la humedad relativa del ambiente aumenta considerablemente con respecto a la simulación del paisaje real. En este sentido, los valores van desde un 26,83% a 48,33% de humedad, es decir, el valor mínimo aumentó en un 6,05%, mientras que el valor máximo en un 18,57%. En comparación con el paisaje real, la presencia de más vegetación arbórea de altura aumentó la humedad relativa en más de un 31% para toda el área de estudio. Esta influencia de la vegetación sobre la humedad relativa la corrobora Verón (2010) en su estudio sobre una plaza pública de Buenos Aires, en el que encuentra diferencias de hasta un 30% más de humedad relativa en zonas con vegetación densa en contraste con zonas con poca o nula vegetación.



**Figura 23:** Humedad relativa en el paisaje real y simulado.



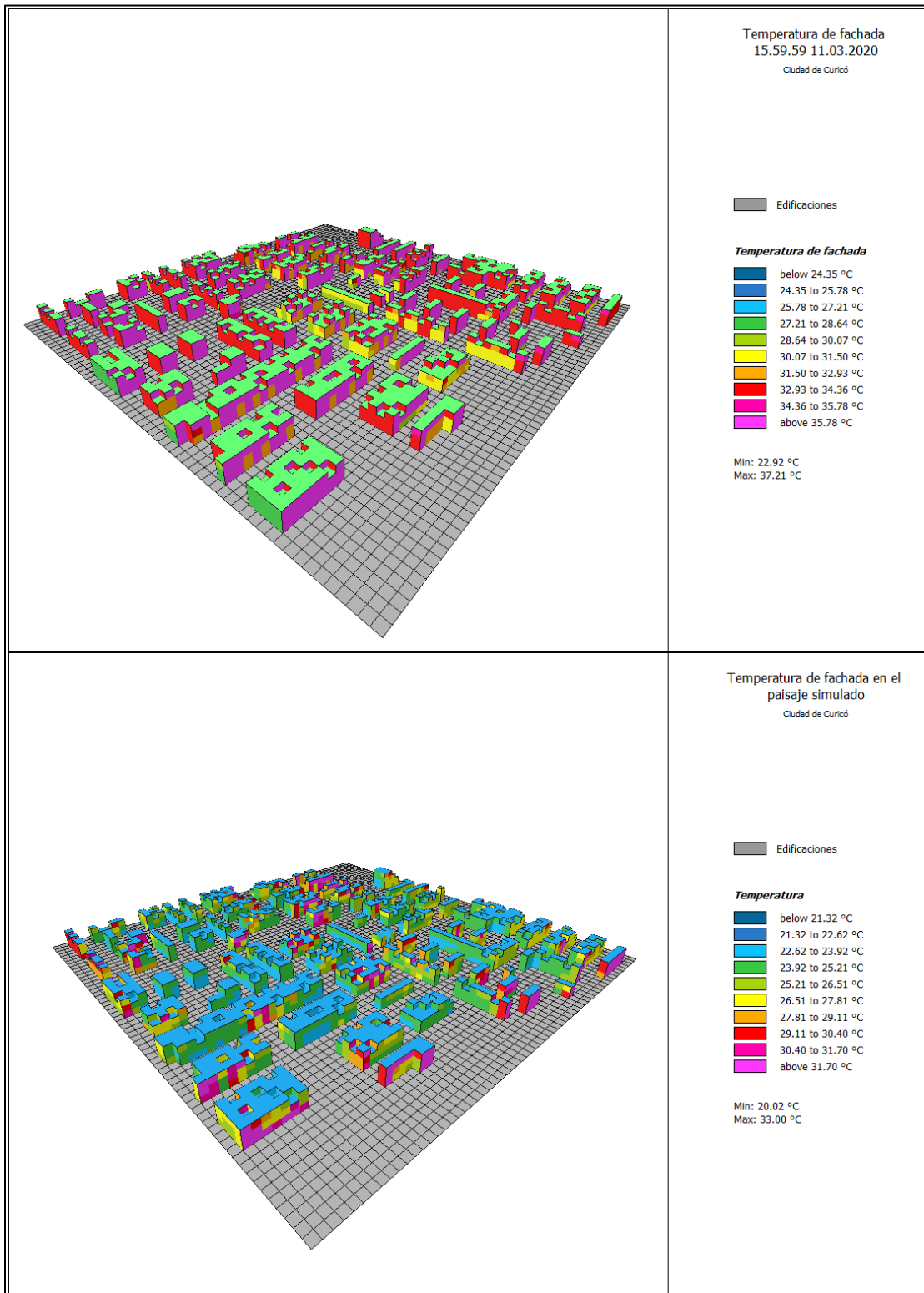
Fuente: Elaboración propia (2020).

- **Comparación temperatura de fachada exterior**

En la figura 24, la representación de la temperatura de la fachada exterior en el paisaje real, a las 16:00 horas, muestra que la temperatura más alta se presenta en la fachada oeste de las casas, con valores que superan los 34,36°C, lo que resalta la influencia de la orientación del sol sobre el paisaje. Temperaturas sobre 30,07°C y 34,36°C se dan en la orientación norte de los hogares, mientras que la fachada oriente de los hogares presenta entre 30,07°C y 31,5°C. Por último, la temperatura más baja se presenta en la fachada sur y en los techos de las casas, con valores entre 27,21°C y 30,07°C, lo que confirma lo visto en terreno, en donde se pudo apreciar que el material de los techos (aluminio y zinc) no es un elemento que influya en el aumento las temperaturas y las diferencias entre estas (anexo 6).

Luego de la simulación realizada, la influencia de la vegetación reduce temperatura de la fachada oeste de 34,36°C a 30,40°C, es decir, existe una diferencia de hasta 3,96°C entre el paisaje real y el paisaje propuesto. En el caso de las fachadas norte, oriente, sur y de los techos la temperatura disminuye de los 34,36°C, 31,5°C y 30,07°C respectivamente, hasta los 22,62°C, lo que significa que la fachada norte presenta una diferencia de 11,74°C, la fachada oriente reduce en 8,88°C y la fachada sur en conjunto con los techos disminuyen en 7,45°C (anexo 7).

**Figura 24:** Temperatura de techos y fachadas norte y poniente en paisaje real y simulado.



Fuente: Elaboración propia (2020).

#### 4.3.2. Especies propuestas para el arbolado urbano en Curicó

A continuación, se proponen las especies más aptas para ser plantadas, de acuerdo a los datos recopilados por la propuesta de la Ley de Arbolado Urbano (2018):

1. **Boldo (*Peumus boldus*):** Árbol endémico del bosque esclerófilo de la zona central de Chile. Posee hoja perenne, frondoso follaje, una copa de forma esférica, un tronco que puede alcanzar 1 metro de diámetro y con una altura máxima de 20 metros. En términos climáticos, tolera de buena forma la radiación solar y la sequía. A nivel urbano, es posible plantarlo en las plazas públicas del área de estudio.
2. **Peumo (*Cryptocarya alba*):** Árbol endémico del bosque esclerófilo de la zona central de Chile. Posee hoja perenne, follaje denso, una copa de forma esférica, un tronco que puede alcanzar 1 metro de diámetro y alturas que pueden variar entre 15 y 25 metros. En términos climáticos, tolera de buena forma las condiciones semiáridas y los veranos secos. A nivel urbano, el peumo es un gran captador de material particulado, por lo que puede plantarse en veredas de las avenidas principales y en áreas verdes y/o plazas públicas de Curicó.
3. **Pimiento (*Schinus molle*):** Árbol nativo de Chile entre las regiones de Arica y Parinacota y Metropolitana. Posee hoja perenne, ramas delgadas con forma de péndulo, una gran copa de forma esférica y densa, un tronco entre 0,5 m y 1 metro de diámetro y con alturas máximas de 25 metros, aunque en zonas urbanas la altura puede variar de 8 a 15 metros. En términos climáticos, es altamente tolerante a la sequía y crece en suelos áridos o salinos, aunque no tolera de buena forma las heladas. Debido a su bajo requerimiento de agua, es posible plantarlo en plazas públicas de las ciudades mediterráneas y de la zona central de Chile.
4. **Quillay (*Quillaja saponaria*):** Árbol endémico del bosque esclerófilo de Chile. Posee hoja perenne, copa esférica, tronco de 1 metro de diámetro y alturas que pueden alcanzar los 15 metros. En términos climáticos, se adapta a climas secos de las provincias de la zona centro sur y resiste heladas y nieve. A nivel urbano, el material particulado de altos flujos vehiculares puede afectar su morfología, por lo que se debe plantar, principalmente, en sitios eriazos, plazas públicas, etc. Necesita mayor riego durante los veranos de sus primeros años.
5. **Maitén (*Maytenus boaria*):** Árbol endémico del bosque esclerófilo de Chile. Posee hoja perenne, una gran copa frondosa, un tronco de 0,8 metros de diámetro y alcanza altura máxima de 20 metros. A nivel urbano, puede ser plantado en plazas y veredas de avenidas grandes. Requiere buena cantidad de riego ya que necesita de humedad para evitar la infección con pulgones.

6. **Corcolén (*Azara dentata*):** Árbol endémico de Chile entre las regiones Metropolitana y de Los Ríos. Posee hoja perenne, copa ovoidal irregular, de hojas alternas, con un tronco de 30 cm y con alturas entre 2,5 y 4 metros. Es posible plantarlo en jardines, veredas y espacios públicos. Se recomienda poda en sus primeros años de formación para evitar el exceso de ramificación en su base.
  
7. **Corcolén blanco (*Azara celastrina*):** Árbol endémico de Chile entre las regiones de Coquimbo y del Bío-Bío. Posee hojas alternas perennes, un tronco de 15 cm y una altura máxima de 5 metros. Al igual que el corcolén, es posible plantarlo en jardines, veredas y espacios públicos.

## Capítulo N°5: Discusiones y Conclusiones

### 5.1 Discusiones

#### 5.1.1 Sobre la obtención y el trabajo de los datos climáticos

La disponibilidad de datos climáticos históricos de diferentes estaciones meteorológicas en la página del Explorador Climático del (CR)<sup>2</sup>, permite analizar los factores que influyen en el comportamiento de los datos registrados. Las estaciones meteorológicas, a pesar de ser una buena base de información climática a nivel de ciudad, no entregan información a escala de microclima; por este motivo, en la ciudad de Curicó, en el mes de diciembre de 2019, se instalaron dispositivos *IButtons* en 9 puntos de la ciudad, con el fin de recopilar información de temperatura y de humedad relativa durante las 24 horas del día a escala de microclima y durante todo un año, cubriendo las 4 estaciones. Lamentablemente, la mayoría de los dispositivos sufrieron desconfiguraciones, perdiendo información climática de los meses de enero y febrero, por lo que se tuvo que desechar la opción de trabajar con estos dispositivos y, en su lugar, se optó por trabajar con imágenes satelitales desde *Google Earth Engine* para cubrir todo el período de verano, desde diciembre a marzo, en toda la ciudad, mientras que para una mejor resolución espacial se seleccionó la imagen del satélite *Landsat 8* con mejor calidad disponible en el explorador del USGS, imagen con la que se determinó el NDVI, la temperatura superficial y las intensidades de la isla de calor urbana a las 14:33 hrs.

La elección de una imagen satelital para el análisis de la temperatura superficial permitió conocer más en detalle cómo se distribuyen las intensidades de la isla de calor y, también, permitió relacionar los factores urbano-geográficos que influyen en este fenómeno. Por otro lado, tal como se hizo en esta investigación, se recomienda corroborar en terreno la información analizada virtualmente, ya que es posible tener una visión más acabada del comportamiento de las islas de calor urbano.

#### 5.1.2 Sobre el funcionamiento del programa *ENVI-met 4.4.5*

- **Limitaciones y capacidades**

En el proceso del trabajo con el programa *ENVI-met 4.4.5* se presentan limitaciones que hacen que lo trabajado por el modelo tenga diferencias con los datos presentes en la realidad climática siendo, en este caso, la edición de las características estructurales del área de estudio, las cuales pueden carecer de precisión una vez se ejecute el modelo. Estas limitaciones son la imposibilidad de agregar nuevas características de suelo a las ya presentes en el programa; las alturas de las construcciones solo llegan hasta los 40 metros, lo que impide trabajar con microclimas en donde se presenten construcciones de mayor altura; la disponibilidad limitada de vegetación, un aspecto que fue rescatado por González-Viveros (2011), lo que crea dificultades para tener un perfil de vegetación real en el área de estudio, haciendo que se trabaje con vegetación diferente a la real, diferentes alturas y densidades. En el caso de los análisis nocturnos, Chow et al. (2011) afirman que *ENVI-met* posee errores

como sobreestimar la temperatura del aire por las noches. Samaali et al. (2007) atribuye los errores a que el software fue desarrollado en latitudes medias, por lo que las ciudades o zonas que se estudien y no pertenezcan a estas latitudes pueden presentar errores en la entrega de resultados.

A pesar de poseer diversas limitaciones, el programa *ENVI-met* es una buena herramienta al momento de modelar el microclima urbano, puesto que, según los resultados de la presente memoria, el software tiene la capacidad de representar muy bien el área de estudio real, lo que se ve reflejado en los modelos 3D entregados. Además, es un software validado a nivel internacional en materia de análisis del microclima a escala urbana (Song y Park, 2015).

- **Características básicas del programa**

A continuación, en la tabla 14 se describen las características del software reconocidas a lo largo de la investigación.

**Tabla 14:** Descripción de las principales características del programa ENVI-met 4.4.5.

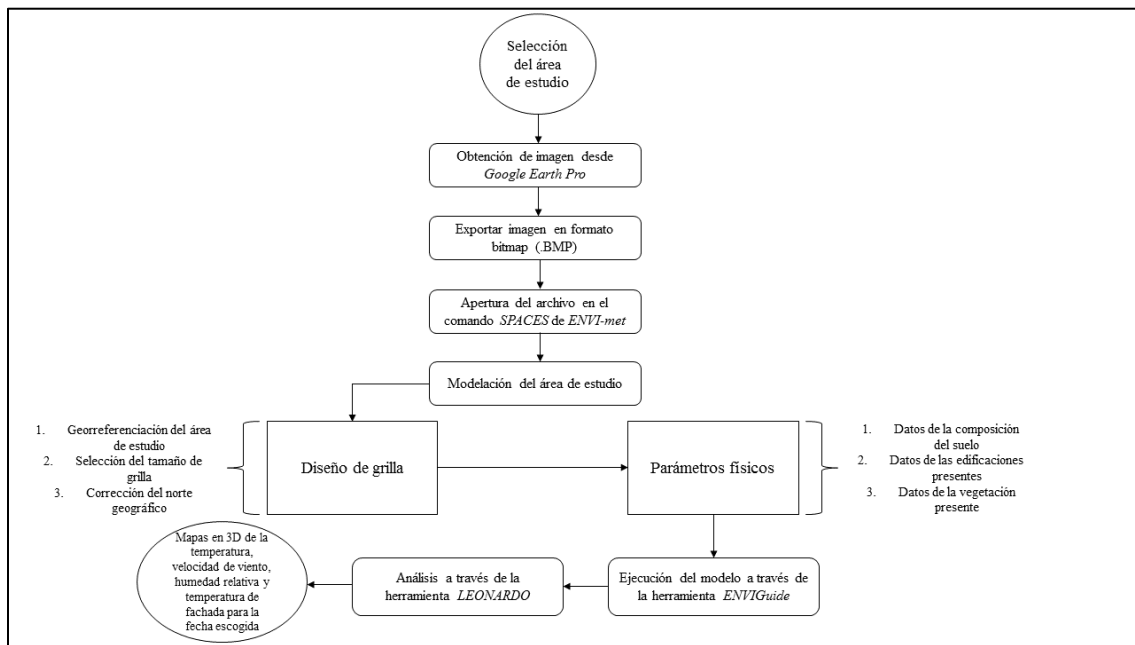
Parámetros	Características ENVI-met 4.4.5
Escala de análisis	Microclima
Espacios de trabajo	SPACES: espacio donde se carga y edita el archivo en formato bitmap. ENVIGuide: comando donde se trabaja el archivo .INX creado en SPACES. ENVI-met: Espacio general del software donde se ejecuta el modelo creado anteriormente en ENVIGuide. LEONARDO: espacio donde se crean mapas con los resultados en formato .EDX una vez ejecutado el modelo.
Archivos de entrada	Archivos en formato bitmap exportados desde <i>Google Earth Pro</i>
Archivos de salida	Archivos en formato .EDX que pueden ser trabajados para luego ser convertidos en modelos 2D y 3D.
Variables climáticas trabajables	El programa puede analizar radiación, T° de la superficie. T° del suelo, % de humedad relativa, velocidad del viento, entre otras.
Modelación del espacio real	A pesar de sus limitaciones, permite modelar edificios, calles, vegetación y otras construcciones, pero, no siempre tendrán la misma forma que en la realidad.
Requisitos para su instalación	El programa posee una licencia de entrenamiento de un mes y una licencia pagada para su uso permanente. En el caso de esta investigación se trabajó con la licencia de estudiante
Aplicación a otras áreas de estudio	Se puede aplicar a todas las áreas de estudio posible, aunque el modelo no represente al 100% la realidad de cada área de estudio.
Grado de dificultad del programa	El programa posee un grado medio de dificultad. La página oficial de ENVI-met ( <a href="https://www.envi-met.com/learn/">https://www.envi-met.com/learn/</a> ) dispone de una serie de videos tutoriales en inglés, por lo que quien no domine el idioma puede tener dificultades en su utilización. Por último, el programa posee partes en inglés y en alemán, que en un principio es difícil de trabajar, pero utilizando el software de forma constante el trabajo se facilita.

Fuente: Elaboración propia (2019).

- **Funcionamiento general del programa**

En el caso de la creación de un modelo en formato 3D en *SketchUp*, el software entrega la posibilidad de trabajar seleccionando un área de estudio en la opción de *Open Map Street (OMS)* en el comando *Monde*, pero es un poco difícil de editar puesto que su escala puede ser mayor al área de estudio determinada por el investigador, perdiendo un poco de precisión en el trabajo y posterior análisis de los resultados del modelo. Es por esta razón que la opción de exportar un archivo en formato bitmap es más factible, puesto que se restringe solo al área de estudio elegida. Por otro lado, en el diseño de la grilla el software presenta, en algunas ocasiones, un problema, que es la desviación del norte geográfico, lo que también influye en los resultados finales del modelo (figura 25).

**Figura 25:** Funcionamiento del programa *ENVI-met 4.4.5*.



Fuente: Elaboración propia (2019).



## 5.2 Conclusiones y recomendaciones

Los datos históricos desde 1959 a 2020, muestran que la temperatura en Curicó ha ido en un ascenso constante durante los últimos años del siglo XXI, tanto para el verano como para el promedio anual, siendo 2016 el año con la temperatura anual promedio más alta, con 14,6°C promedio, considerando la ausencia de datos de temperatura entre los años 2002 y 2011, y el verano de 2020 el más caluroso registrado con 31,6°C promedio. Por el lado de las precipitaciones, estas tienden a disminuir durante el mismo período, siendo 2019 el año con menos precipitación promedio con solo 161 mm de agua caída, además de mantenerse bajos los 1000 mm de precipitación desde el año 2003. Este fenómeno muestra una tendencia que se repite en la zona central de Chile, puesto que esta zona de Chile está expuesta a la megasequía desde el año 2010, fenómeno que tiene explicación, principalmente, en el cambio de cobertura de suelo vegetal y nativa por monocultivos y suelo construido, lo cual constituye una de las principales causas del aumento de los gases de efecto invernadero y, por ende, intensificar los efectos del cambio climático en climas sensibles como el bosque esclerófilo mediterráneo de la zona centro sur de Chile (Marquet et al, 2019).

Dentro de los efectos del cambio climático está la intensificación del fenómeno de isla de calor urbana superficial (ICUS), fenómeno que en la ciudad de Curicó está altamente relacionado con la cobertura de suelo presente, ya que, a través del análisis de imagen satelital a escala espacial de 30 metros, se comprobó que las temperaturas más altas se concentraban en espacios con suelo desnudo o en las cercanías de estos, registrando temperaturas entre los 33°C y los 38°C, a diferencia de las zonas habitadas, en donde se registraron temperaturas entre los 27°C y los 31°C, pero las temperaturas más bajas se registraron en la Plaza de Armas de Curicó, en el Cerro Condell y en la Alameda principal, con temperaturas que fluctuaron entre los 23,1°C y los 27°C. Estas intensidades de las islas de calor fueron explicadas con los factores geográficos que más influyen en su comportamiento, lo que dio como resultado que las distancias urbanas a cuerpos de agua son el factor más relevante en las diferencias de temperatura en la ciudad, seguido de la densidad poblacional, el NDVI y la elevación topográfica. Por otro lado, la acción más influyente sobre la reducción de la temperatura es el aumento de NDVI, en donde la temperatura desciende en 0,29°C, lo que expresa resultados similares a lo presentado por Sarricolea et al (2008) en la isla de calor nocturna de verano en Rancagua.

Estos resultados fueron revisados en terreno a nivel de microclima, a través de un vuelo de dron a 70 metros de altura. El vuelo de dron evidenció las diferencias de temperatura a escala de microclima, puesto que las zonas cubiertas con vegetación arbórea presentaban diferencias de hasta 15°C con el pavimento a tan solo 3 metros de distancia. Esto demuestra que la escala espacial de análisis refleja las grandes variaciones en el microclima urbano.

La propuesta de los escenarios de reducción del efecto isla de calor se realizó en base a los resultados del objetivo N°2, donde se demostró que el aumento de la vegetación influye en

la baja de temperatura. Por otro lado, esta propuesta es la más viable de realizar, ya que los demás factores urbano-geográficos son muy difíciles de modificar. En este sentido, estas acciones de mitigación o reducción de la isla de calor urbana pueden extenderse a escala de ciudad. Por otro lado, la representación de variables como la vegetación convierten al programa *ENVI-met 4.4.5* en una herramienta efectiva y seria en temas de planificación urbana, ya que permite conocer las desigualdades climáticas en el espacio urbano y sus resultados serían de mucha ayuda para tomar medidas que ayuden a establecer un buen confort térmico en las ciudades y así disminuir los aspectos negativos de las desigualdades climáticas en la población urbana.

Cada intervención que se haga a nivel urbano requerirá una buena administración por parte de las autoridades comunales. En el caso de la vegetación urbana, actualmente, la Ley de Bosques (D.S. N° 4.363, artículo 12) señala que las municipalidades deben plantar vegetación arbórea o arbustiva en forma lineal o grupal en las zonas urbanas. Por otra parte, el artículo 25 de la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades N° 18.695, define que la unidad de Aseo y Ornato municipal es la encargada del aseo, extracción de basura, conservación y administración de bienes de usos público como áreas verdes, vías públicas, parques y plazas (Martínez, 2005).

En el caso de la ciudad de Curicó, el PLADECO (2017) señala que la plantación de árboles y el mantenimiento de áreas verdes contabiliza un gasto de alrededor de \$830.000.000 de pesos al año para la Municipalidad de Curicó. Para el caso de esta propuesta, sería muy beneficioso que distintos actores comunales, tanto públicos como privados, se hagan parte de un proyecto de infraestructura verde urbana.

Por último, cabe destacar que, en caso de llevar este tipo de intervención a la práctica, se deben considerar las características urbanas de la zona, como por ejemplo la ubicación de los postes de alumbrado público y la altura y orientación del cableado eléctrico, con el fin de distribuir de forma organizada y ordenada la vegetación en las veredas de pasajes y avenidas principales.

## Bibliografía

- **Alchapar, N. y Correa, E. 2015.** Reflectancia solar de las envolventes opacas de la ciudad y su efecto sobre las temperaturas urbanas. Revista Informes de la Construcción Vol. 67 N° 540, e112. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid, España. Recuperado de: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4457/5172>
- **Anandababu, D., Purushothaman, B. M., y Suresh Babu, S. (2018).** Estimation of Land Surface Temperature using LANDSAT 8 Data. International Journal of Advance Research, 4(2), 177–186. Recuperado de: <https://www.ijariit.com/manuscripts/v4i2/V4I2-1195.pdf>
- **Bárcena, A., J. L. Samaniego, W. Peres y J. E. Alatorre. 2020.** La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?, Libros de la CEPAL, N° 160 (LC/ PUB.2019/23-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Recuperado de: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711_es.pdf)
- **Benedict, M. & McMahon, E. *Green Infrastructure*. Washington: Island Press, 2002.** Recuperado de: <http://www.sprawlwatch.org/greeninfrastructure.pdf>
- **Bitan, A. (1992).** The high climatic quality city of the future. Atmospheric Environment 26(3), 313 – 329.
- **Centro Interdisciplinario de Estudios Regionales (CIDU).** Síntesis del estudio región central de Chile: Perspectivas de desarrollo. Santiago de Chile, U.C.-CIDU, 1972.
- **CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (1998):** Ciudades Intermedias en América Latina y el Caribe: propuesta para la gestión urbana". Compiladores: Ricardo Jordán y Daniela Simioni.
- **Cepal-Minurvi-UN (Comisión Económica para América Latina y el Caribe- Foro de Ministros y Autoridades Máximas de la Vivienda y el Urbanismo de América Latina y el Caribe-Naciones Unidas) (2016),** América Latina y el Caribe.

Desafíos, dilemas y compromisos de una agenda urbana común, Cepal, Santiago de Chile, Chile. Recuperado de: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40656/1/S1600986\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40656/1/S1600986_es.pdf)

- **Chatzinikolaou, E., C. Chalkias, and E. Dimopoulou (2018).** "Urban microclimate improvement using envi-met climate model." International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences 42, no. 4: 69-76. Recuperado de: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLII-4/69/2018/isprs-archives-XLII-4-69-2018.pdf>
- **Chicas, J. (2012).** Morfología y clima urbanos: estudio de microclimas urbanos en Santiago de Chile, mediante la aplicación del concepto de cañón urbano e índices de confort térmico. Tesis presentada al Instituto de Estudios Urbanos y Territoriales de la Pontificia Universidad Católica de Chile para optar al grado académico de Magister en Desarrollo Urbano. [Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. Recuperado de: http://estudiosurbanos.uc.cl/images/tesis/2012/MDU\\_JChicas.pdf](http://estudiosurbanos.uc.cl/images/tesis/2012/MDU_JChicas.pdf)
- **Chow, W. T., Pope, R. L., Martin, C. A., Brazel, A. J. (2011).** Observing and modeling the nocturnal park cool island of an arid city: horizontal and vertical impacts. Theor Appl Climatol; 103:197-211.
- **CitySim Software – LESO-PB – EPFL** (<https://www.epfl.ch/labs/leso/transfer/software/citysim/>)
- **Cordero, A. X. (2014).** Microclima y confort térmico urbano: análisis sobre la influencia de la morfología del cañón urbano caso de estudio en los barrios el Raval y Gracia, Barcelona. Recuperado de: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23637/XimenaCordero\\_TFM.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23637/XimenaCordero_TFM.pdf)
- **Cuadrat, J., Vicente-Serrano, S., & Saz, M. (2005).** Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): La isla de calor y sus factores condicionantes. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, (40). En Línea: <https://www.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/viewFile/2019/1932>
- **Curicó ha crecido en los últimos años en más de cien mil metros cuadrados de áreas verdes (2020).** Diario La Prensa. Recuperado de: <https://new.diariolaprensa.cl/index.php/2020/01/17/curico-ha-crecido-en-los-ultimos-anos-en-mas-de-cien-mil-metros-cuadrados-de-areas-verdes/>

- **De Mattos, C.; Hidalgo, R. y Arenas, F. (2009).** Chile: del país urbano al país metropolitano. Pontificia Universidad Católica de Chile. Recuperado de: [http://geografia.uc.cl/images/serie\\_GEOlibros/del\\_pais\\_urbano/arenas\\_hidalgo\\_Del\\_pais\\_urbano\\_al\\_pais\\_metropolitano.pdf](http://geografia.uc.cl/images/serie_GEOlibros/del_pais_urbano/arenas_hidalgo_Del_pais_urbano_al_pais_metropolitano.pdf)
- **Deng, J.Y.; Wong, N.H.; Zheng, X.** The Study of the Effects of Building Arrangement on Microclimate and Energy Demand of CBD in Nanjing, China. *Procedia Eng.* 2016, 169, 44–54. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816332088>
- **DGA. (2004).** Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. (Cade-Idepe, Ed.) Recuperado de: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/12/Mataquito.pdf>
- **Díaz, D.; Bojacá, C.; Gil, R.; Gutiérrez, F. de P.; Burgos, J.; Riascos, J.; Villalobos, G. & Cala F. (2017).** Modelación y simulación de sistemas naturales. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano. Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas. Bogotá, Colombia. Recuperado de: [https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/publication/field\\_attached\\_file/modelado\\_y\\_simulacion\\_pag.pdf](https://www.utadeo.edu.co/sites/tadeo/files/node/publication/field_attached_file/modelado_y_simulacion_pag.pdf)
- **Duarte, D. H. S., Shinzato, P., Gusson, C. dos S., & Alves, C. A. (2015).** The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. *Urban Climate*, 14, 224-239. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>
- **Eliasson, I. and Svensson, M.K. (2002)** “Diurnal air temperatures in built-up areas in relation to urban planning”, *Landscape and Urban Planning*, 61, pp.37-54. Recuperado de: [https://www.academia.edu/19274879/Diurnal\\_air\\_temperatures\\_in\\_built-up\\_areas\\_in\\_relation\\_to\\_urban\\_planning?auto=download](https://www.academia.edu/19274879/Diurnal_air_temperatures_in_built-up_areas_in_relation_to_urban_planning?auto=download)
- **ENVI-met** – Decode urban nature with ENVI-met software (<https://www.envi-met.com/>)
- **S. L. Ermida, P. Soares, V. Mantas, F.-M. Göttsche, and I. F. Trigo,** "Google Earth Engine Open-Source Code for Land Surface Temperature Estimation from the Landsat Series," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 9, p. 1471, 2020.

- **Explorador Climático CR2. (2020).** Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Recuperado de: <http://explorador.cr2.cl/>
- **Falvey, M., & Garreaud, R. (2009).** Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research*, 114.
- **Fariña Tojo, J. (2007).** La Ciudad y El Medio Natural. Akal ed., 3rd ed. Madrid: Akal.
- **Fernández García, F. (2007).** Impactos del cambio climático en las áreas urbanas y rurales. Boletín de la Institución Libre de Enseñanza. 2007, n. 66-67. Recuperado de: <https://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/Impactos-CC-urbanas-rurales.pdf>
- **Fernández García, F. (1996).** Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación.
- **Ferrelli F, Bustos ML, Piccolo MC (2016):** La expansión urbana y sus impactos sobre el clima y la sociedad de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina. Estudios Geográficos (en prensa). Recuperado de: <http://estudiosgeograficos.revistas.csic.es/index.php/estudiosgeograficos/article/viewFile/492/492>
- **Fuentes, L. y Pezoa, M (2018).** Nuevas geografías urbanas en Santiago de Chile 1992 - 2012. Entre la explosión y la implosión de lo metropolitano. Revista de Geografía Norte Grande. Recuperado de: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-34022018000200131](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34022018000200131)
- **García, L. (2018).** Islas de calor, un fenómeno de las ciudades. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Ciudad de México. Recuperado de: <http://ciencia.unam.mx/leer/779/islas-de-calor-un-fenomeno-de-las-ciudades>
- **Garreaud, R (2011).** Cambio Climático: Bases Físicas e Impactos en Chile. *Revista Tierra Adentro*, 2011, N° 93, p.13-19
- **González Viveros, P. J. (2011).** Evaluación microclimática por cambio de uso de

suelo en la Ciudad de México utilizando el modelo ENVI-met (Tesis de Licenciatura). Facultad de Instrumentación Electrónica y de Ciencias Atmosféricas, Universidad de Veracruz, Xalapa-Equez., Veracruz, México.

- **Guillén-Mena, V. y Orellana, D. (2016).** La influencia de la vegetación arbórea urbana para disminuir el nivel de polución y alcanzar el confort climático. Revista de la Facultad de Ciencias Químicas • ISSN:1390 - 1869 • N° Ed. Especial. Recuperado de: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/quimica/article/view/1625>
- **Ilustre Municipalidad de Curicó. (2017).** PLADECO - Actualización Plan de Desarrollo Comunal Curicó. 2017 - 2024
- **Infraestructura de Datos Geospaciales de Chile.** Ministerio de Bienes Nacionales (<http://www.ide.cl/>)
- **Instituto Nacional de Estadísticas – Chile (2018).** Resultados CENSO 2017. Recuperado de: <http://resultados.censo2017.cl/>
- **IPCC (2007).** Climate change 2007 – Mitigation. ONU. Recuperado de: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4\\_wg3\\_full\\_report-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg3_full_report-1.pdf)
- **Kaya, N. & Mengi, O. (2011).** How Sensitive We Build to Climate? Design for Comfortable Urban Environment, 47th ISOCARP Congress 2011. Recuperado de: [http://www.isocarp.net/Data/case\\_studies/1952.pdf](http://www.isocarp.net/Data/case_studies/1952.pdf)
- **Krellenberg, K.; Jordán, R.; Rehner, J.; Schwarz, A.; Infante, B.; Barth, K.; Pérez, A. (Editores). 2013.** Clima Adaptación Santiago (CAS) - Adaptación al cambio climático en megaciudades de América Latina. Red Regional de Aprendizaje, Comisión Económica para América Latina. Recuperado de: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/4056-clima-adaptacion-santiago-cas-adaptacion-al-cambio-climatico-megaciudades-america>
- **La expansión urbana en el centro y sur de Chile (s/f).** Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Recuperado de: <http://www.cr2.cl/acerca-del-cr2/macro-zonas-de-estudio/expansion-urbana-en-el-centro-y-sur-de-chile/>
- **La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro – Informe a la Nación (2015).** Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. Recuperado de: <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2015/11/informe-megasequia-cr21.pdf>

- **Laboratorio de Geografía.** Universidad de La Frontera. Recuperado de: [http://labgeo.ufro.cl/fichas/chile\\_geo/ficha\\_cl\\_geo.html](http://labgeo.ufro.cl/fichas/chile_geo/ficha_cl_geo.html)
- **Landsat 8 band designations (2013).** United States Geological Survey (USGS). Recuperado de: <https://www.usgs.gov/media/images/landsat-8-band-designations>
- **Littlefair, P., Santamouris, M., Alvarez, S., Dupagne, A., Hall, D., Teller, J., ... Papanikolaou, N. (2000).** Environmental site layout planning: solar access, microclimate and passive cooling in urban areas. Building Research Establishment Ltd (Vol. 380). Londres. Recuperado de: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128:3\(220\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:3(220)).
- **Lombardo, M. A. (1997):** “Estudios interdisciplinarios, metodologías e técnicas de análisis do clima urbano”, en VI Encuentro de Geógrafos de América Latina, Buenos Aires, Argentina, p. 298.
- **Mapas Vectoriales – Mapoteca (s/f).** Biblioteca del Congreso Nacional (BCN). Santiago, Chile. Recuperado de: [https://www.bcn.cl/siit/mapas\\_vectoriales](https://www.bcn.cl/siit/mapas_vectoriales)
- **Martínez Rojas, M. (2005).** Bases para el manejo del arbolado urbano de las principales vías de acceso a la comuna de Maipú, Región Metropolitana Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105072>
- **Marquet, P. A., A. Lara, A. Altamirano, A. Alaniz, C. Álvarez, M. Castillo, M. Galleguillos, A. Grez, Á. Gutiérrez, J. Hoyos-Santillán, D. Manushevich, R. M. Garay, A. Miranda, E. Ostria, F. Peña-Cortéz, J. Pérez-Quezada, A. Sepúlveda, J. Simonetti y C. Smith (2019).** «Cambio de uso del suelo en Chile: Oportunidades de mitigación ante la emergencia climática». En P. A. Marquet et al. (editores), Biodiversidad y cambio climático en Chile: Evidencia científica para la toma de decisiones. Informe de la mesa de Biodiversidad. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- **Montes, C. (2020).** Santiago registra el verano más cálido de los últimos 70 años: temperatura máxima promedio superó los 31°C. La Tercera. Recuperado de: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/santiago-registra-el-verano-mas-calido-de-ultimos-70-anos-temperatura-maxima-promedio-supero-los-31c/ERJHXKTXW5GJVNALKPW45IIPCQ/>



- **Montes, C. (2019).** Santiago vive el año más seco en 50 años y Valparaíso acumula el peor déficit de lluvias en el último siglo. La Tercera. Recuperado de: <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/santiago-vive-el-ano-mas-seco-en-50-anos/920713/>
- **Ochoa de la Torre, J. M. (1999).** La vegetación como instrumento para el control microclimático. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Recuperado de: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93436/03JMot03de12.pdf>
- **Oke, T.R.** Boundary layer climates. York: Methuen and Co LTD.1978.
- **Oke, T. R. (1987).** Boundary Layer Climates, chapter 8, pages 262–303. Routledge, 2nd edition.
- **Oke, T. R.** Boundary layer climates: Second edition. 2. New York, NY: Routledge. ISBN: 978-0-415-04319-9, (2009).
- **Oke, T. R. (1988).** Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings, 11(1-3), 103- 113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- **Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt JA (2017).** Urban Climates. Cambridge University Press. Recuperado de: [https://www.aerisfuturo.pl/wp-content/uploads/2018/09/Urban\\_Climates-1.pdf](https://www.aerisfuturo.pl/wp-content/uploads/2018/09/Urban_Climates-1.pdf)
- **ONU (2016).** World Cities Report 2016. Recuperado de: [http://wcr.unhabitat.org/main-report/#section\\_eleven](http://wcr.unhabitat.org/main-report/#section_eleven)
- **Pauleit S, Duhme F (2000).** GIS assessment of Munich’s urban forest structure for urban planning. J Arboriculture 26(3):133–141.
- **Plan de Adaptación al Cambio Climático Para Ciudades 2018 – 2022 (2018).** Ministerio del Medio Ambiente (MMA). Recuperado de: [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/06/Plan-CC-para-Ciudades\\_ aprobado-CMS-ene2018-1.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/06/Plan-CC-para-Ciudades_ aprobado-CMS-ene2018-1.pdf)
- **Price, P. (2010).** Image analysis with ArcGIS 10. TerraView. Recuperado de: [https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/labs/IGETT\\_Exercises/ArcGIS%20Image%20Analysis%20workflow.pdf](https://ibis.geog.ubc.ca/courses/geob373/labs/IGETT_Exercises/ArcGIS%20Image%20Analysis%20workflow.pdf)

- **Ramos, I. (2016).** Percepción sobre el cambio climático y sus principales impactos en los habitantes del Valle del Aconcagua. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Planificación Ambiental. Facultad de Ciencias Naturales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. Recuperado de: <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Ramos%20Issa.pdf>
- **Red Nacional Pro-Ley de Arbolado Urbano (2018).** Recuperado de: <http://leydearboladourbano.com/>
- **Rente, J., Krishnamurthy, L., & Juhani, J. (1997).** Áreas verdes urbanas en América Latina: una introducción. En L. Krishnamurthy, & J. Rente-Nascimento (Eds.), Áreas Verdes Urbanas en Latinoamérica y el Caribe (pp. 1-13). Chapingo, México: Universidad Autónoma de Chapingo. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/254421264\\_Areas\\_verdes\\_urbanas\\_en\\_Latinoamerica\\_y\\_el\\_Caribe](https://www.researchgate.net/publication/254421264_Areas_verdes_urbanas_en_Latinoamerica_y_el_Caribe)
- **Reporte Climático – Año 2019 (2019).** Dirección Meteorológica de Chile. Recuperado de: <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/reporteClimatologico/2019>
- **Reyes P. S., y Figueroa A. I. M. (2010).** Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile. EURE (Santiago), 36 (109), Páginas: 89-110. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/eure/v36n109/art04.pdf>
- **Romero, H., Molina, M., Vásquez, A. y Smith, P.** El clima urbano del Puerto de Valparaíso: construcción social del espacio en ciudades costeras. Revista da Facultad de Letras da Universidad do Porto-Geografía. 2(2); pp. 107-126, 2008. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/117772/1%20-%20Artigo-Romero%20et%20al.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- **Sailor, D. J. (2006).** Mitigation of Urban Heat Islands: Recent progress and future prospects. Portland State University. Recuperado de: <https://www.coolrooftoolkit.org/wp-content/uploads/2012/04/Mitigation-of-Urban-Heat-Islands.pdf>
- **Salas, M. y Herrera, L. (2017).** La vegetación como sistema de control para las islas de calor urbano en Ciudad Juárez Chihuahua. Revista Habitat Sustentable. ISSN 07190700. V. 7. No. 1. Págs. 14-23. Recuperado de:

<http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2737/2310>

- **Samaali, M., Dominique, C., Bruse, M., Oliosio, A. & Ocelli, R. (2007).** Analysis of a 3D boundary layer model at local scale: Validation on soybean surface radiative measurements. *Atmospheric Research*, 85(2), 183-198. DOI: 10.1016/j.atmosres.2006.12.005
- **Sánchez Rodríguez, R. (2013).** "Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina." Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC), United Nations. Edited by Roberto Sánchez Rodríguez. Accessed September 18, 2018. Recuperado de: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36622/1/S2013813\\_es.pdf](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36622/1/S2013813_es.pdf)
- **Sarricolea, P., Aliste, E., Castro, P., & Escobedo, C. (2008).** Análisis de la máxima intensidad de la isla de calor urbana nocturna de la ciudad de Rancagua (Chile) y sus factores explicativos. *Revista de Climatología*, 8, 71-84. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/26576059\\_Analisis\\_de\\_la\\_maxima\\_intensidad\\_de\\_la\\_isla\\_de\\_calor\\_urbana\\_nocturna\\_de\\_la\\_ciudad\\_de\\_Rancagua\\_Chile\\_y\\_sus\\_factores\\_explicativos](https://www.researchgate.net/publication/26576059_Analisis_de_la_maxima_intensidad_de_la_isla_de_calor_urbana_nocturna_de_la_ciudad_de_Rancagua_Chile_y_sus_factores_explicativos)
- **Sarricolea, P., Herrera-Ossandon, M., & Meseguer-Ruiz, O. (2016).** Climatic regionalisation of continental Chile. *Journal of Maps*. [doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592](https://doi.org/10.1080/17445647.2016.1259592)
- **Sarricolea Espinoza, Pablo, & Martín-Vide, Javier. (2014).** El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de geografía Norte Grande*, (57), 123-141. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000100009>
- **Schlosberg D.** Theorising environmental justice: the expanding sphere of a discourse. *Environ Polit* 2013, 22:37–55.
- **SII. (2019).** Gestión y estadísticas: Estadísticas de Empresa. Obtenido de Servicio de Impuestos Internos. Recuperado de: [http://www.sii.cl/sobre\\_el\\_sii/estadisticas\\_de\\_empresas.html](http://www.sii.cl/sobre_el_sii/estadisticas_de_empresas.html)
- **Smith, P. (2020).** La construcción del clima urbano: hacia la calidad y justicia climática en las ciudades chilenas. FONDECYT de Iniciación: N°11180990.

- **Smith, P. (2011).** Distribución termal intraurbana en Santiago de Chile: Aporte a la gestión ambiental de la ciudad a partir de la construcción de un modelo que permita generar un mapa térmico de verano. Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. Recuperado de: <http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Smith%20Pamela.pdf>
- **Smith, Pamela, & Romero, Hugo. (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/S0718-34022016000100004>
- **Song, B., Park, K. (2015).** Contribution of Greening and High-Albedo Coatings to Improvements in the Thermal Environment in Complex Urban Areas. Hindawi Publishing Corporation, *Advances in Meteorology*, Article ID 792172, 14 <http://dx.doi.org/10.1155/2015/792172>
- **Stewart, I., & Oke, T. (2012).** Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin American Meteorological Society*, 1879 - 1900.
- **Stocco, S.; Cantón, A.; Correa, E.** Alternativas de diseño para mejorar el desempeño ambiental de plazas urbanas de Mendoza (Argentina). Evaluación mediante simulación con ENVI-met 3.1. *Informes de la Construcción*, [S.l.], v. 70, n. 550, p. e253, june 2018. ISSN 1988-3234. Recuperado de: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/5906/6996>
- **Targhi, M. Z., & Dessel, S. Van. (2015).** Potential contribution of urban developments to outdoor thermal comfort conditions: The influence of urban geometry and form in Worcester, Massachusetts, USA, 118, 1153-1161. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.457>
- **Taule, G. (2016).** La humedad relativa mensual en diferentes climas. Levante – El mercantil valenciano. Recuperado de: <https://www.levante-emv.com/opinion/2016/10/16/humedad-relativa-mensual-diferentes-climas-12332980.html>
- **The CURB Tool: Climate Action for Urban Sustainability (2016).** Banco Mundial. Recuperado de:

<https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/the-curb-tool-climate-action-for-urban-sustainability>

- **Tumini, I. (2013).** El microclima urbano en los espacios abiertos: estudio de casos en Madrid. Arquitectura. Recuperado de: [http://oa.upm.es/14893/1/IRINA\\_TUMINI.pdf](http://oa.upm.es/14893/1/IRINA_TUMINI.pdf)
- **Tumini, I., Higuera-García, E. (2013).** STRENGTHS AND WEAKNESSES OF URBAN MICROCLIMATE SIMULATION TOOLS . DYNA Energía y Sostenibilidad, 2(1). [17 p.]. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.6036/ES6921>
- **UWG: Download | Urban microclimate** (<https://urbanmicroclimate.scripts.mit.edu/uwg.php>)
- **Vásquez, A. (2016).** Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. Revista de Geografía Norte Grande 63, pp. 63-86.
- **Velasco, E. and Roth, M.:** Cities as net sources of CO<sub>2</sub>: Review of atmospheric CO<sub>2</sub> exchange in urban environments measured by eddy covariance technique, Geography Compass, 4, 1238–1259, 2010. Recuperado de: <http://profile.nus.edu.sg/fass/geomr/velasco%20roth%20gc10.pdf>
- **Verón, E. 2010.** “Estimación de la Isla de Calor en Santa Teresita, Partido de la Costa., provincia de Buenos Aires, Argentina”. Revista geográfica de América Central N° 45. San José de Costa Rica, pp. 129-148. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/4517/451744669007.pdf>
- **Wan, Z., Hook, S., y Hulley, G. (2015).** MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. Recuperado de: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11a1v006/>
- **Weather Atlas (2020).** Marzo previsión meteorológica y clima Curicó, Chile. Recuperado de: [https://www.weather-atlas.com/es/chile/curico-el-tiempo-en-marzo#humidity\\_relative](https://www.weather-atlas.com/es/chile/curico-el-tiempo-en-marzo#humidity_relative)

## Anexos

### Anexo 1: Códigos para descargar una imagen desde *Google Earth Engine*.

```
Temperatura superficial *
Imports (1 entry)
var Curico: Polygon, 4 vertices
1 //Satélites MODIS a trabajar
2 var TerraModis = ee.ImageCollection('MODIS/006/MOD11A1').select('LST_Day_1km');
3 var AquaModis = ee.ImageCollection('MODIS/006/MYD11A1').select('LST_Day_1km');
4 var merged = ee.ImageCollection(TerraModis.merge(AquaModis));
5
6 //Periodo de estudio
7 var Filtro = merged.filterDate('2019-12-21','2020-03-20');
8 var LSTpromedio = Filtro.mean();
9 print(LSTpromedio);
10
11 //Conversión de Kelvin (K°) a (C°) y creación de paleta de colores
12 var Conversion_Promedio = LSTpromedio.expression('(LST*0.02)-273.15',{LST':LSTpromedio.select('LST_Day_1km')});
13 var Color = ['#f35105','#f37505','#a50026','#d73027','#f46d43','#fdae61','#fee090','#ffffbf','#e0f3f8','#abd9e9','#74add1','#4575b4','#313695'];
14 var Viz = {min:-30, max:50,palette: Color.reverse()};
15
16 //Proyectar imagen
17 var UTMHUS019S = ' \
18 PROJCS["WGS_1984_UTM_Zone_19S", \
19 GEOGCS["GCS_WGS_1984", \
20 DATUM["D_WGS_1984", \
21 SPHEROID["WGS_1984", \
22 PRIMEM["Greenwich",0], \
23 UNIT["Degree",0.0174532925199433]], \
24 PROJECTION["Transverse_Mercator"], \
25 PARAMETER["False_Easting",500000.0], \
26 PARAMETER["False_Northing",1000000.0], \
27 PARAMETER["Central_Meridian",-69.0], \
28 UNIT["Meter",1], \
29 AUTHORITY["EPSG","32719"]];
30
31 var Proyeccion_UTM19S = ee.Projection(UTMHUS019S);
32 var Imagen_UTM19S = Conversion_Promedio.reproject({
33 crs: Proyeccion_UTM19S,
34 scale: 1000
35 });
36 var LST_Noche = Imagen_UTM19S.select('LST_Day_1km');
37 print('CRS:', Proyeccion_UTM19S);
38
39 //Resampliar a 400 m
40 var Imagen_400m = Imagen_UTM19S.resample('bilinear').reproject({
41 crs: Proyeccion_UTM19S,
42 scale: 400
43 });
44
45 //Resampliar a 100 m
46 var Imagen_100m = Imagen_400m.resample('bilinear').reproject({
47 crs: Proyeccion_UTM19S,
48 scale: 100
49 });
50
51 //Exportar imagen a Drive
52 var Geometria = ee.FeatureCollection(Curico);
53
54 Export.image.toDrive({
55 image: Imagen_100m, //Escala de la imagen a descargar
56 description: 'Comuna', //Nombre de la imagen
57 folder: '2020C', //Nombre de la carpeta de Google Drive en donde estará el archivo
58 scale: 100, //Resolución final de la imagen
59 region: Curico, //Polígono creado al principio, el cual es el área de estudio
60 maxPixels:10e9
61 });
```

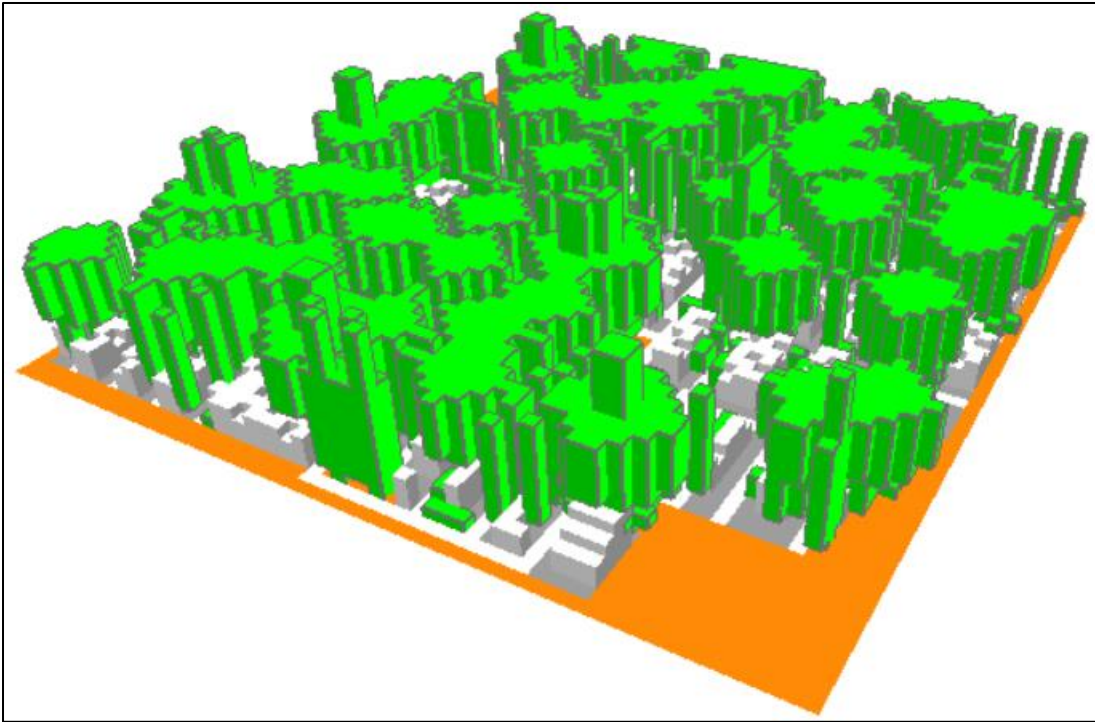
Fuente: Elaboración propia (2020).

**Anexo 2:** Metadatos de la imagen del satélite *Landsat 8*.

<b>Data Set Attribute</b>	<b>Attribute Value</b>
Landsat Product Identifier	LC08_L1TP_233084_20200126_20200210_01_T1
Landsat Scene Identifier	LC82330842020026LGN00
Acquisition Date	2020/01/26
Collection Category	T1
Collection Number	1
WRS Path	233
WRS Row	084
Target WRS Path	233
Target WRS Row	084
Nadir/Off Nadir	NADIR
Roll Angle	-0.001
Date L-1 Generated	2020/02/10
Start Time	2020:026:14:33:55.8626890
Stop Time	2020:026:14:34:27.6326880
Station Identifier	LGN
Day/Night Indicator	DAY

Fuente: USGS (2020).

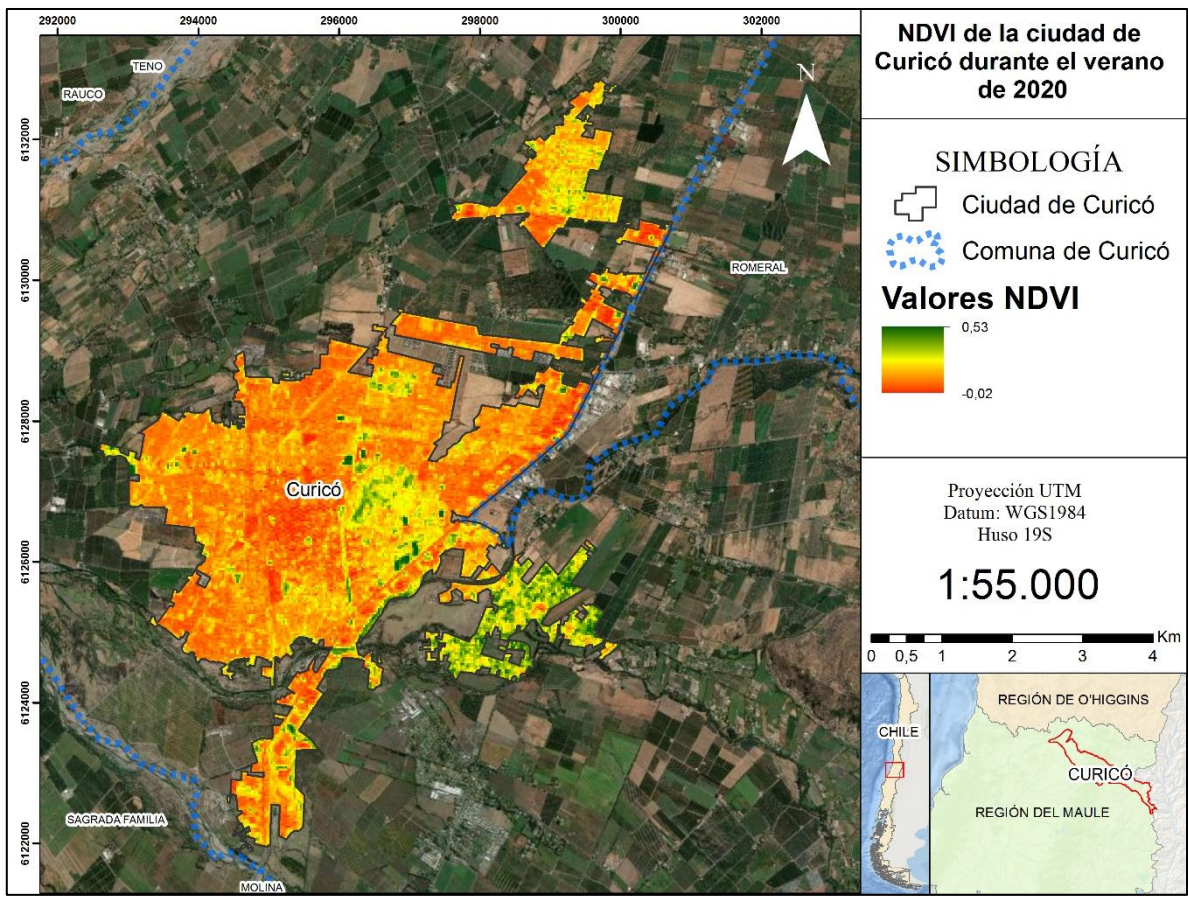
**Anexo 3:** Imagen en 3D del paisaje propuesto.



Fuente: Elaboración propia (2020).

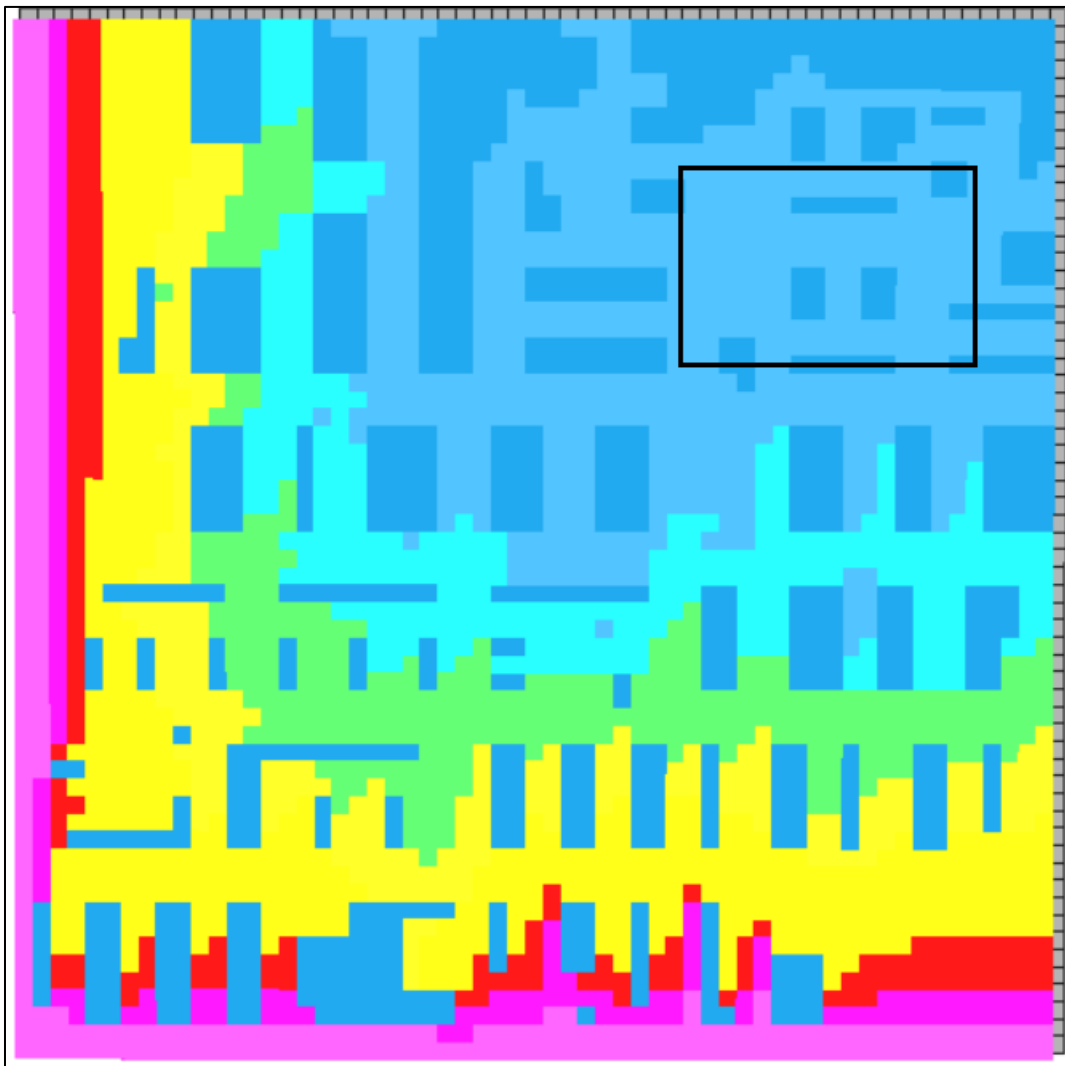


**Anexo 4:** NDVI de la ciudad de Curicó, día 26 de enero de 2020 a las 14:33 hrs.



Fuente: Elaboración propia (2020).

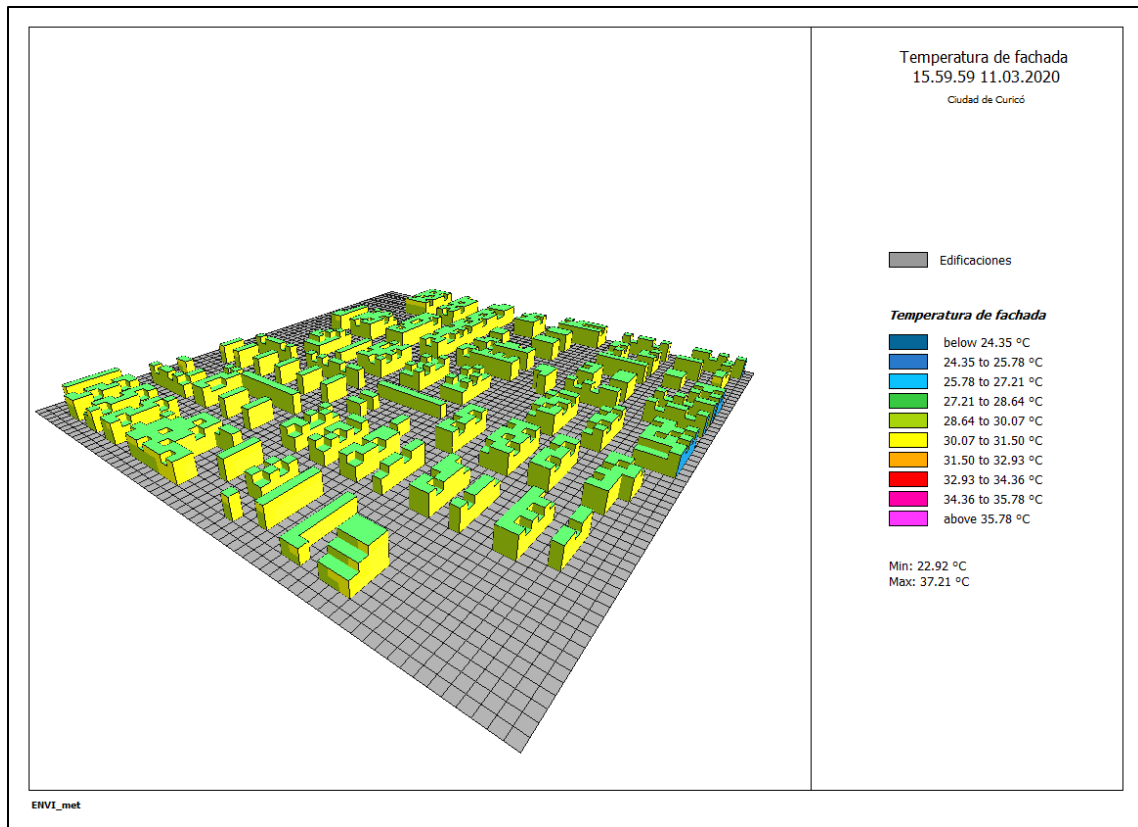
**Anexo 5:** Temperatura recreada por ENVI-met en el área sobrevolada por el dron.



La zona específica está demarcada con un polígono negro.

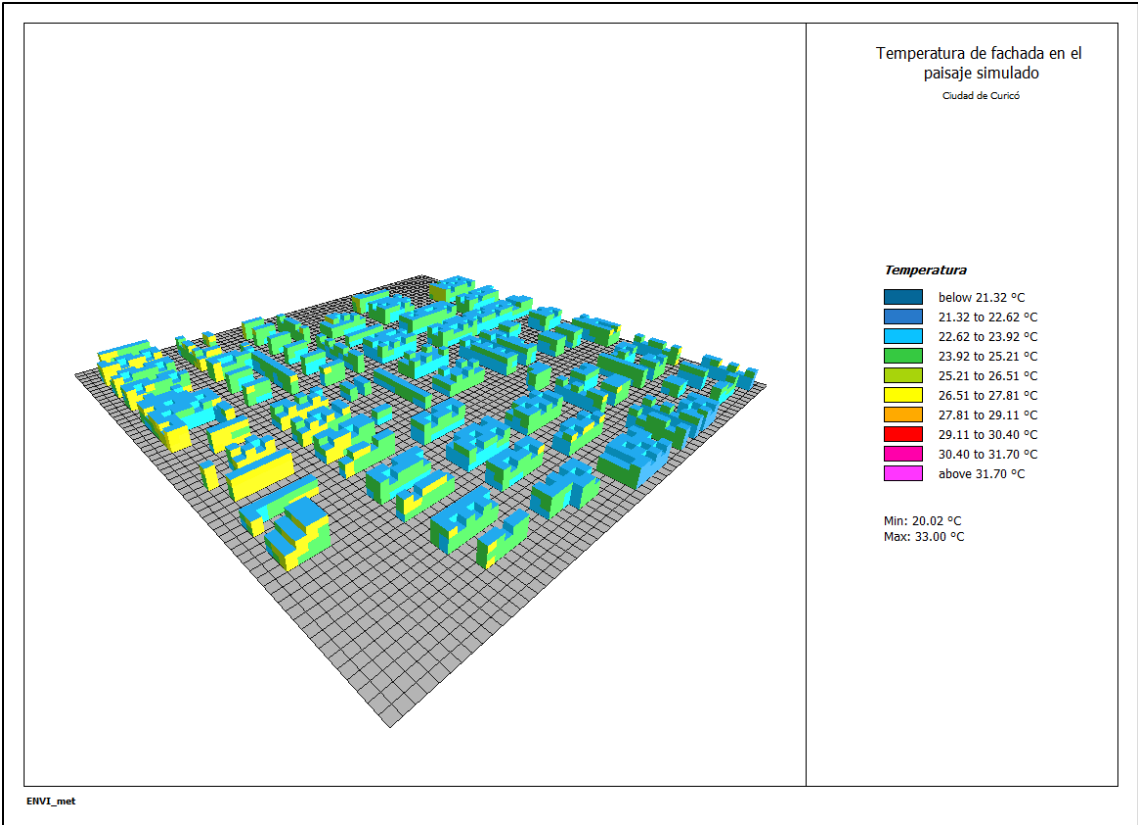
Fuente: Elaboración propia (2020).

## Anexo 6: Temperatura de fachadas exteriores oriente y sur en el paisaje real.



Fuente: Elaboración propia (2020).

**Anexo 7:** Temperatura de fachadas exteriores oriente y sur en el paisaje propuesto.



Fuente: Elaboración propia (2020).