



**Evaluación del impacto de las azoteas y fachadas verdes sobre la temperatura diurna de verano en zonas residenciales compactas de alta, media y baja altura en el centro de Santiago de Chile.**

Tesis para obtener el título de Geografía y Magíster de Geografía

Bastian Ignacio Aliaga Acevedo

Profesora Guía: Pamela Smith

**SANTIAGO – CHILE**

**2024**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradecer a mi profesora guía la Dra. Pamela Smith, por la ayuda, la sabiduría y el compromiso entregado en los tiempos, en las revisiones y en el desarrollo de la presente tesis. Gracias a ella he podido descubrir nuevas áreas y formas de desarrollar mi profesión.

Agradezco de sobremodo a mi familia, a Jacqueline y Luis, mis padres, quienes me han apoyado en el largo tránsito de la vida universitaria, que, a pesar de las dificultades de estudiar fuera de mi región, nunca faltó un llamado para saber cómo ha estado el día y la semana. A mis hermanos Andrés y Kevin, que cada uno por su lado me ha dado herramientas para poder avanzar tanto en la vida como en mi carrera.

A mis amigos, Mari, Jorge, Juan Pablo y Paulo los que, entre preguntas sobre capitales del mundo, y conversaciones misceláneas, se interesaban en mis avances y en mi tema de tesis. Pero más que nada agradecer por el apoyo total en momentos de poca sanidad mental.

Finalmente agradecer a mi amor y compañera, Mariela, que ha estado durante todo el desarrollo de este trabajo de tesis, me ha apoyado tanto con su cariño como en su inteligencia y carisma, nunca dejó que me diera por vencido y es con la que día a día esperamos el fin de este proceso. Para ti con amor Mariela.

## INDICE.

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PROBLEMÁTICA.....</b>	<b>7</b>
<b>3. OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>3.1. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>10</b>
<b>4. HIPÓTESIS.....</b>	<b>11</b>
<b>5. AREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>11</b>
<b>6. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
<b>6.1. Zonas Climáticas Locales.....</b>	<b>18</b>
<b>6.2. Islas de Calor Urbano (ICU).....</b>	<b>19</b>
<b>6.3. Planificación y diseño sensible al clima.....</b>	<b>21</b>
<b>6.4. Techos verdes.....</b>	<b>23</b>
<b>6.4.1. Tipos de techos verdes.....</b>	<b>23</b>
<b>6.4.2. Implementación de las Azoteas verdes.....</b>	<b>24</b>
<b>6.5. Fachadas verdes.....</b>	<b>26</b>
<b>6.5.1. Tipos de fachadas verdes.....</b>	<b>26</b>
<b>6.5.2. Estudios con implementación de Fachadas verdes.....</b>	<b>27</b>
<b>6.6. Superficies frescas o Reflexivas.....</b>	<b>28</b>
<b>6.7. Modelación Dinámica.....</b>	<b>29</b>
<b>6.8. ENVI-met.....</b>	<b>30</b>
<b>7. MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>31</b>
<b>7.1. Espacialización de las ICU en el área de estudio.....</b>	<b>32</b>

7.2. Selección de los edificios para la implementación de azoteas y Fachadas verdes.....	34
7.3. Creación de la Modelación Dinámica.....	36
7.3.1. Escenarios de Implementación.....	39
7.4. Creación de los lineamientos para azoteas y fachadas verdes. ....	40
8. RESULTADOS.....	41
8.1. Comportamiento e intensidad de la isla de calor urbano promedio diurna de verano en la comuna de Santiago Centro.....	41
8.2. Selección de edificios con potencial para la implementación de azoteas y fachadas verdes en el área de estudio.....	46
8.3. Implementación de diferentes escenarios de azoteas y fachadas verdes generados a partir de una modelación dinámica.....	52
8.3.1. Resultados de la simulación sin la aplicación de IV: Caso N°1.	54
8.3.2. Resultados de la simulación implementando Azoteas verdes: Caso N°2. ....	58
8.3.3. Resultados de la simulación implementando Fachadas verdes: Caso N°3. ....	63
8.3.4. Resultados de la simulación implementando azoteas y fachadas verdes: Caso N°4.....	67
8.3.5. Resultados de la simulación implementando Azoteas verdes, Fachadas verdes y Pavimentos Fríos: Caso N°5. ....	69
8.4. Proponer lineamientos para la implementación de azoteas y fachadas verdes que contribuyan a disminuir la temperatura de verano en áreas urbanas de alta densidad poblacional y estructural. ....	74
9.DISCUSIÓN.....	88
10.CONCLUSION. ....	93

**11. BIBLIOGRAFIA.....97**

## RESUMEN

El aumento de la intensidad de las Islas de Calor Urbano (ICU) en ciudades densamente urbanizadas, como Santiago de Chile, representa un desafío significativo en términos de confort térmico y sostenibilidad. Esta investigación tiene como objetivo evaluar el impacto de estrategias de mitigación de la temperatura diurna de verano y las ICU en zonas residenciales compactas de alta, media y baja altura en el centro de Santiago. A través de la simulación de escenarios con el software ENVI-met, se simularon distintos escenarios para medir la efectividad de infraestructuras verdes y superficies frías.

Los resultados se analizaron en función de la reducción de la temperatura del aire seco, la temperatura radiante media y otros beneficios asociados. Se obtuvo que las azoteas y fachadas verdes, en su combinación, proporcionan una reducción de hasta 0.9 °C de la temperatura del aire seco, contribuyendo a la sostenibilidad urbana y al confort térmico en zonas afectadas por las ICU, asimismo, las superficies frías lograron una disminución de 12.89 °C en la temperatura radiante media. Esta investigación además generó lineamientos para la implementación de infraestructuras verdes en áreas urbanas de alta densidad constructiva, promoviendo soluciones climáticas adaptadas al contexto local de Santiago.

**Palabras Claves:** Islas de Calor Urbano, Infraestructuras verdes, Superficies frías, ENVI-met, Simulación.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años, el clima ha experimentado notables cambios a nivel mundial, captando la atención de los científicos, población y sectores políticos. El aumento de la temperatura media global en 1.7° C desde finales del siglo XIX, está asociada a la generación antrópica de gases de efecto invernadero (GEI), tales como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el metano (CH<sub>4</sub>) (IPCC, 2023). Este aumento de los gases en la atmósfera ha favorecido tanto la frecuencia como la intensidad de eventos meteorológicos extremos, que constituyen eventos que son raros en un lugar y en una época del año en particular (SINIA, 2021), destacándose las olas de calor, olas de frío, inundaciones, huracanes, sequías, entre otros.

El Cambio Climático (CC de ahora en adelante) se ha convertido en un factor crucial para las investigaciones sobre la resiliencia y la sostenibilidad, en especial en estudios urbanos (meso y micro climáticos). Las ciudades han tomado el rol central en investigaciones de resiliencia climática debido a su vulnerabilidad y contribución en la emisión de contaminantes. Las urbes son responsables de los mayores índices de contaminación atmosférica, del suelo y del agua debido a la alta densidad poblacional y a las actividades industriales y de transporte (Yang et al., 2020; Maldonado, s.f.; Cruz et al., 2017). Este contexto subraya la urgencia de desarrollar estrategias efectivas para mitigar los efectos del CC y promover la sostenibilidad urbana.

Este proceso de urbanización, aunque vital para el desarrollo social, también genera serios desafíos ambientales. Este tipo de actividades antropogénicas que genera, por un lado, infraestructura crítica y de beneficio para conectividad y funcionalidad de la red urbana, por otro lado, desarrolla una gran contaminación atmosférica, una impermeabilización de los suelos, una obstrucción de las corrientes de viento y una eventual disminución de las áreas verdes, suscitando

un incremento en la temperatura (atmosférica y superficial) respecto a las áreas circundantes y rurales. (Fernández, 2009). Según datos del Banco Mundial, al año 2020, 1,4% de la superficie de la tierra estaba cubierta por áreas urbanas (Banco Mundial, s.f.) pero su consumo de energía y producción de gases de efecto invernadero (GEI) superan el 60% a nivel mundial. Por ende, se espera que, bajo estrategias adecuadas, sea posible que las ciudades sean capaces de responder efectivamente a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la agenda 2030. (Cepal, 2019). Específicamente el ODS 11 tiene como finalidad generar *“ciudades y comunidades sostenibles, lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles”*, desde el año 2016, diversos países han movilizado sus actividades y legislaciones para alcanzar este objetivo, por ejemplo, la Unión Europea (EU) comenzó con la realización de diversos comunicados, pero mayormente son de carácter declarativos.

Respecto a la situación país, Chile siempre ha tratado de estar a la vanguardia del tema internacional, siendo de los primeros en firmar los tratados o convenios. El país ha tenido un desarrollo respecto a legislaciones y acciones, por ejemplo, el Decreto N°49/2016 y el Decreto N°67/2019, los que crean al Consejo Nacional para la Implementación de la Agenda 2030, asesorando al presidente y coordinando la implementación de los ODS. Respecto al ODS 11, se han desarrollado avances en urbanización y transporte, por ejemplo, se crea la Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, la incorporación de buses eléctricos y la ampliación de la red de metro (Guerrero, 2020).

En Chile la urbanización ha sido muy prolifera (Martínez, 2021), específicamente en la comuna de Santiago en el periodo de tiempo 2002-2012 ha sido una de las comunas de mayor crecimiento habitacional duplicando la cantidad de viviendas del año 2002 (Mattos et al, 2014). Este desarrollo urbano se propulsó por un considerable aumento demográfico en las ciudades, generando de esta forma

una progresiva demanda de equipamiento, residencias y servicios urbanos. Aunque lo anterior esté ligado a un bienestar social, el crecimiento y desarrollo urbano está impulsado por la dinámica del mercado del suelo priorizando ganancias sobre costos ambientales, sostenibilidad o bienestar social, generándose así segregación socioespacial e impactos ambientales negativos. (López, 2005). Según Romero (2017), el desarrollo urbano en base a un cambio en el uso y cobertura de los suelos, la materialidad de las construcciones urbanas que cambia los balances de energía, la desaparición de áreas verdes y la verticalización de la ciudad, convierte, muchas veces, a los sectores urbanos en un “Desierto Climático Cálido”.

La urbanización al modificar la superficie terrestre y alterar los patrones naturales de vegetación y suelo, crea microclimas urbanos, los cuales se diferencian de los climas rurales adyacentes a la ciudad (Romero, 2010). Dentro de las diferencias se pueden incluir temperaturas más altas, menor humedad y, por ende, mayor nivel de sequedad.

Una manifestación del microclima urbano es las “Islas de Calor Urbano” (ICU). Stewart y Oke (2012), en el estudio de *“Zonas climáticas locales para estudios de temperatura urbana”*, propusieron un sistema de clasificación del paisaje que facilita el estudio de temperatura urbana y la espacialización de ICU. Definieron las Zonas Climáticas Locales (ZCL) como *“regiones uniformes en cobertura del suelo, estructura, materiales y actividades humanas que se extienden entre unos cientos de metros hasta algunos kilómetros en escala horizontal”* (Stewart y Oke, 2012, p. 1884). Estudios que utilizan las ZCL para estudiar la espacialización de las ICU en las ciudades han tenido como resultado que la *“mayor intensidad de la ICU se dio en las ZCL B2 (compacto de media altura), B3 (compacto de baja altura), 10 (industria pesada), E (roca desnuda)”* (Rodríguez, 2020). Estas regiones comparten características como la impermeabilización del suelo, rugosidades que obstaculizan el flujo del viento y escasez de áreas verdes o

superficies vegetadas.

Resulta crucial tener en cuenta que la presencia de vegetación en las ciudades desempeña un papel fundamental en la mitigación de los efectos de las ICU, ya que proporciona sombra y contribuye a través de la evapotranspiración (Fernández, 2009).

La planificación urbana no ha abordado adecuadamente este tema, para ello se requiere un cambio de estrategia el cual haga frente a los desafíos futuros y genere ciudades resilientes. De acuerdo con la normativa vigente, la “*Ordenanza General de Urbanismo y Construcción*” (OGUC), tipifica a las áreas verdes como “Superficie de terreno destinada preferentemente al esparcimiento o circulación peatonal, conformada generalmente por especies vegetales y otros elementos complementarios” (Art. 1.1.2). Esta definición, aunque relevante para el diseño de espacios públicos, refleja una visión limitada desde el punto de vista ambiental, en lugar de poner énfasis en los beneficios ecológicos y climáticos de las áreas verdes, se prioriza su función recreativa, existiendo una falta de alineación con las necesidades actuales de sostenibilidad urbana.

El Consejo Nacional de Desarrollo Urbano (CNDU) (2014), propone un estándar de áreas verdes de 10 m<sup>2</sup>/habitante (SINIA, 2021), este indicador es aplicado a las áreas urbanas comunales y solo toma en cuenta la sumatoria entre los parques y las plazas públicas, en pocas palabras solo aquellas áreas de acceso público. Lamentablemente, 15,4% de las comunas pertenecientes al “*Sistema de Indicadores y Estándares de Desarrollo Urbano*” del país cumplen con este criterio, siendo un motivo de preocupación. Es fundamental considerar las áreas verdes como parte integral del diseño urbano, no solo para mejorar la calidad de vida de los habitantes, sino también para contrarrestar los impactos negativos del clima urbano dado que, en condiciones de baja presencia de las áreas verdes con cubiertas vegetacionales, se produce un aumento en la intensidad de las ICU.

La planificación y diseño sensibles al clima se presentan como enfoques orientados hacia el futuro, considerando el impacto a largo plazo del CC en la población (Letelier, 2020). Es importante no enfocarse únicamente en acciones a corto plazo, ya que el CC es un fenómeno de larga duración. Se destaca que la previsión y planificación son más eficaces y económicas en comparación con una reacción posterior al impacto del CC (Sánchez, 2013). Oke et al, (2017), en su obra "Urban Climates", señalan que este tipo de planificación se centra en la creación de espacios públicos confortables a través de la utilización de recursos vegetacionales, hídricos, además de estrategias de diseño y construcción que favorezcan el confort térmico. Su objetivo es reconfigurar los sectores internos de la urbanización para mejorar las condiciones térmicas y de salud a diferentes escalas, desde vecindarios (barrios) hasta la ciudad y/o región. A pesar de las ventajas de esta estrategia, Letelier (2020), citando a Conde et al. (2013), menciona que la planificación y diseño sensibles al clima aún no forman parte de las estrategias de acción actuales, a pesar de la gran cantidad de estudios científicos que demuestran los efectos de la urbanización en el clima, así como en la salud y calidad de vida de las personas. Existe una brecha entre la investigación y la implementación de estas estrategias en la planificación urbana actual.

Durante el año 2017 se presentó el Plan de Acción Nacional de Cambio climático (PANCC) a través del Ministerio de medio Ambiente, MMA, que tiene como objetivo *“hacer frente a los desafíos que plantean en el corto y mediano plazo los impactos del cambio climático en el territorio nacional, y promover la implementación de los compromisos adoptados por Chile ante la CMNUCC (La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático)”* (MMA, 2017). En la actualidad el país cuenta con la ley 21.455, la ley Marco de Cambio Climático (2022), la cual tiene como objetivo favorecer el marco institucional para hacer frente a los desafíos del CC, posibilitando nuevas miradas al momento de la planificación urbana. Según el Artículo N°43 de dicha ley, los instrumentos de

ordenamiento y planificación territorial incorporarán consideraciones ambientales del desarrollo sustentable relativas a la mitigación y adaptación del CC las que serán evaluadas mediante la Evaluación Ambiental Estratégica. Respecto a la estructura institucional para la creación de estrategias para el CC, se propuso una estructura operativa con enfoque intersectorial y territorial, con un nivel central a cargo del Consejo de Ministros para la Sustentabilidad y el MMA, a nivel regional se encuentra los Comités Regionales de Cambio Climático, donde conversan intendentes regionales, representantes del Gobierno Regional, SEREMI, Municipios, Agencias de Sustentabilidad y Cambio Climático y algún otro ente decidido por el Comité Regional de Cambio Climático. Aquí aparece la creación de los Planes de Acción Climática Local, los cuales son incluidos activamente en los Planes Reguladores Comunes, Planes de Desarrollo Comunal o son directamente creados en base a las peticiones del MMA amparado por la ley 21.455. Actualmente en la región metropolitana solo 13 comunas poseen un Plan de Acción Climática Local. Pudahuel, María Pinto, Cerro Navia, Independencia, La Reina, Maipú, Santiago, Lo Barnechea, Providencia, Quinta Normal, Renca, Recoleta y Las Condes.

Particularmente la comuna de Santiago en su respectivo Plan de Acción Climática Local tiene por misión:

*“Santiago, comuna capital sustentable e innovadora, enfocada en su adecuada gestión climática que ambiciona disminuir sus emisiones de GEI a través de la mitigación y adaptación a los efectos ineludibles del cambio climático para dotar de una mejor calidad de vida a sus vecinos y usuarios con énfasis en la educación” (Municipalidad de Santiago, 2020).*

Aquí se demuestra una clara preocupación sobre factores dañinos para la salud humana y la necesidad de generar condiciones de resiliencia y disminución de la vulnerabilidad de la ciudad y sus habitantes. Pese a eso, el enfoque que da la misión es muy específico solo al tratarse de disminución de los GEI.

## 2. PROBLEMÁTICA.

La urbanización acelerada y el CC han contribuido al aumento de la intensidad de las ICU y la amplitud espacial en las ciudades, específicamente en Santiago, concentrándose en la conurbación grandes sectores con temperaturas positivas de hasta 5,5 °C (Sarricolea, Martín-Vide, 2014), espacialmente las comunas que alcanza un máximo térmico son Santiago, Providencia, Las Condes, Ñuñoa y Vitacura, conformando el núcleo cálido asociado a la mayor densidad construida. Las ICU son áreas urbanas que experimentan temperaturas más altas en comparación con las zonas rurales circundantes, debido a la concentración de edificaciones, el uso de materiales que retienen calor y la reducción de áreas verdes. Estas condiciones empeoran con la falta de planificación urbana climáticamente sensible, lo que provoca que las ciudades sean más vulnerables al cambio climático.

Esta investigación se desarrollará en base a las Zonas Climáticas Locales, compactas de alta, media y baja altura (B1, B2 y B3 respectivamente), en la comuna de Santiago, lugar que presenta un alto desarrollo urbano en base a esta morfología, que posee escasas áreas verdes y presenta una alta presencia de transeúntes.

Para enfrentar estos desafíos, las Infraestructuras Verdes (IV) han surgido como una solución clave en la planificación urbana para mitigar los efectos del CC. Las IV incluyen estrategias como azoteas y fachadas verdes, que son reconocidas por sus múltiples beneficios ambientales y su capacidad para reducir las ICU. Las azoteas verdes consisten en techos cubiertos de vegetación, mientras que las fachadas verdes son estructuras que permiten cubrir las paredes de los edificios con plantas. Estas infraestructuras no solo reducen las temperaturas circundantes al proporcionar sombra y promover la evapotranspiración, sino que también disminuyen la contaminación del aire y mejoran la eficiencia energética

al amortiguar la variación térmica dentro de los edificios (López-Gonzales, 2020). Estudios previos tanto, descriptivos como analíticos, han demostrado que ya existe implementación de Azoteas y Fachadas verdes en Chile, concentrando casi 50.000 m<sup>2</sup> en la región metropolitana, pero en base a una idea ornamental, en vez que ecológica y ecosistémica, por lo que no se genera una correcta estrategia para la implementación de estas IV, es más las condiciones climáticas de Santiago presenta un desafío para el correcto desempeño de estas estrategias, debido a las altas temperaturas y radiación en verano y los escasos días de lluvia anuales.

Particularmente en Santiago, donde la zona central de Chile ha experimentado una mega sequía desde 2010 (Muñoz et al., 2020), la implementación de infraestructuras verdes se enfrenta a desafíos adicionales. Sin embargo, el uso de especies vegetales nativas y resistentes a la sequía puede hacer que las azoteas y fachadas verdes sean una solución viable para mejorar la eficiencia hídrica, además de contribuir a la mitigación de las ICU. Estos sistemas permiten una mejor adaptación al contexto geográfico y climático específico, lo que resulta crucial en una región que enfrenta serios problemas de disponibilidad de agua debido al cambio climático antropogénico (Muñoz et al., 2020).

En este contexto, resulta necesario explorar en qué medida la implementación de azoteas y fachadas verdes en zonas residenciales compactas de Santiago puede contribuir a mitigar las condiciones adversas generadas por las ICU. Estas infraestructuras, al ser adaptables a las características locales de la ciudad, permiten mejorar el confort térmico y reducir las temperaturas en barrios de alta, mediana y baja altura, donde la concentración de edificios y la falta de áreas verdes agravan los efectos de las ICU. Así como también se presentarán estrategias en base a infraestructuras verdes, se propone la utilización de otras estrategias tales como las superficies frías; se evaluará el uso de materiales de construcción que reflejen el calor a través del aumento del albedo, en

consideración de las dificultades que pueden presentarse debido a condiciones de escasez hídrica y accesibilidad para la implementación de las azoteas y fachadas verdes.

Para estudiar este fenómeno y evaluar el impacto de las IV en la mitigación de las ICU, se utilizará la modelación dinámica. Esta herramienta permitirá simular las interacciones entre factores como la temperatura, la humedad y la materialidad de las edificaciones, proporcionando una visión integral de cómo las IV afectan al microclima urbano. Aunque la modelación simplifica la realidad, ofrece información valiosa para la planificación urbana y el diseño de ciudades más resilientes. Por lo que se modelarán distintos escenarios que estarán espacializados en un sector de la comuna de Santiago que presente las características pertinentes respecto a factores climáticos y urbanos siendo de interés para la investigación. Buscando responder la pregunta de investigación: ¿En qué medida las azoteas y fachadas verdes influyen en la reducción de la temperatura diurna durante el verano en zonas residenciales compactas de alta, media y baja altura en el centro de Santiago de Chile, y cómo contribuyen a la mitigación de las Islas de Calor Urbano (ICU)?

### **3. OBJETIVOS.**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Evaluar el impacto de las azoteas y fachadas verdes sobre la temperatura diurna de verano en zonas residenciales compactas de alta, media y baja altura en el centro de Santiago de Chile y su potencial contribución en la mitigación de la ICU de la ciudad.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

1. Esquematizar el comportamiento e intensidad de la isla de calor urbano promedio diurna de verano en el área de estudio.
2. Seleccionar edificios con potencial para la implementación de azoteas y fachadas verdes en el área de estudio.
3. Probar la implementación de azoteas y fachadas verdes a través diferentes escenarios generados a partir de una modelación y simulación dinámica.
4. Proponer lineamientos para la implementación de azoteas y fachadas verdes que contribuyan a disminuir la temperatura de verano en áreas urbanas de alta densidad poblacional y densamente construidas.

#### **4. HIPÓTESIS.**

Las azoteas y fachadas verdes en zonas residenciales compactas de alta, media y baja altura en el centro de Santiago de Chile reducen la temperatura diurna durante el verano de manera más efectiva que las superficies frías.

Se espera que las infraestructuras verdes contribuyan a una mayor reducción de la temperatura ambiente debido a sus propiedades de aislamiento térmico y evapotranspiración, en comparación a las superficies frías que solo controlan el albedo de las superficies.

#### **5. AREA DE ESTUDIO.**

Santiago se encuentra ubicada en la región Metropolitana y corresponde a la capital de Chile y posee la jerarquía de Área Metropolitana, compuesta por 32 comunas. Esta conurbación sumaba a 6.179.183 habitantes al año 2017 según los datos obtenidos del Censo de Población y Vivienda (INE, 2017). Esta es la ciudad más importante del país que, además de albergar a la mayor cantidad de población, concentra los servicios y el comercio.

Con un acelerado crecimiento y respondiendo a políticas centralistas, la ciudad se ha desarrollado como centro económico y de infraestructura, generando una fuerte segregación socio espacial, exacerbada desde 1970 (Bauer, 2015). Ejemplo de esto es la auto segregación de los grupos de mayor nivel adquisitivo para mostrar su poder patrimonial, quienes se movieron desde el casco histórico hasta el sector oriente, en busca de mayor espacio privado y más áreas verdes, como la comuna de Ñuñoa y Providencia. En contraste, las comunas de Santiago y Puente alto tienen menos áreas verdes per cápita que la comuna de Vitacura.

Puente alto en especial presenta 18 m<sup>2</sup> menos de áreas verdes per cápita. (CNN, 2020).

La comuna de Santiago, centro de la ciudad homónima se encuentra ubicada en 33°27'00"S 70°40'00" y tiene una superficie de 23,2 km<sup>2</sup>. Limita con las comunas de Independencia, Recoleta, Providencia, Ñuñoa, San Joaquín, San Miguel, Pedro Aguirre Cerda, Quinta Normal y Estación Central. Su población urbana es de 402.847 personas y la densidad poblacional es de 17.435,1 Hab/km<sup>2</sup>, según el censo del 2017. La comuna presenta un alto flujo de gente debido a su característica residencial de altura y a la presencia de paseos turísticos y comerciales. En el estudio sobre flujo peatonal del Gobierno de Santiago, se obtuvo como resultado que existe un flujo peatonal de 79.000 personas/ día en la comuna distribuidas entre galerías calles y paseos peatonales. (Mora, 2016). En términos viales, se encuentra atravesada de sur a norte por la carretera Panamericana Sur-Norte y de oeste a este por la avenida Bernardo O'Higgins, lo que genera un alto flujo de transporte público y privado en la comuna.

En cuanto a los usos de suelo y las edificaciones, predominan las áreas residenciales y las edificaciones de altura, dispersas uniformemente sobre el territorio de la comuna. Los edificios de hormigón armado representan el 73% del total de viviendas, seguidos por las viviendas de albañilería con 17% y las de adobe, barro y otros productos artesanales representando el 8%. (edificaciones patrimoniales) (Observatorio de Santiago, 2022). La densidad de viviendas llega a las 84 viviendas por hectárea (INE,2017).

La comuna cuenta con un total de 1.868.007.66 m<sup>2</sup> de áreas verdes divididas en parques y plazas (INE, 2018), lo que equivale a una cantidad de 4.64 m<sup>2</sup>/hab, situando a Santiago como una de las comunas con menor cantidad de áreas verdes per cápita en la región Metropolitana, siendo el estándar propuesto por el CNDU de 10 m<sup>2</sup>/hab.

Según los resultados del estudio de Sarricolea et al (2022), en la comuna de Santiago se produce una ICU superficial con una intensidad de entre 3 y 4 grados Celsius de variación positiva, además de que las mayores intensidades se producen durante los días de verano y las noches de otoño. De acuerdo con la clasificación de las ZCL propuesta por Stewart y Oke (2012), la comuna de Santiago presenta principalmente zonas compactas de gran (más de 10 pisos), media (entre 3 y 9 pisos) y baja (menor a 3 pisos) altura, condición que genera ICU más intensas debido a alta densidad urbana (Sarricolea et al, 2022), que dificulta las corrientes de aire y que, en conjunto con la materialidad de la infraestructura, genera una mantención de la temperatura en las superficies en insolación.

En particular, para esta investigación, se ha seleccionado un barrio al interior de la comuna de Santiago (Fig. 1). Dicha área se encuentra compuesta por 30 manzanas de las 1290 manzanas censales según el Censo de 2017, delimitadas por la calle Teatinos por el oriente, Compañía de Jesús al sur, por el oriente limita con Almirante Barroso y al norte con el Río Mapocho. La selección del área de estudio se realizó en base a las características urbanas que intensificaban las ICU, es decir: Materialidad, Escasez de Áreas Verdes, Zonas Climáticas Locales, Vialidad y Población. Esta zona presenta una alta concentración de edificaciones, facilitando la observación y medición de los efectos de las azoteas y fachadas verdes sobre la temperatura urbana. En conjunto a lo anterior, la variabilidad en la altura de las construcciones dentro del centro de Santiago proporciona un contexto ideal para comparar los impactos de las infraestructuras verdes en diferentes configuraciones urbanas. Finalmente, el centro de Santiago es representativo como núcleo urbano, permitiendo que los hallazgos de este estudio sean extrapolables a otras áreas urbanas con características similares. A continuación, se presentan los criterios que ayudaron a la selección del área de estudio (Fig. 2).

**Materialidad:** el área seleccionada está primordialmente cubierta por infraestructura de concreto, dividido en las fachadas de edificios, el pavimento (calles, carretera, solera, paseo.). Debido a la incorporación de parte del parque de Los Reyes, también existe una cubierta dominada por Maicillo y por pasto. (Estas áreas fueron incorporadas dentro del área de estudio para tener una presencia de áreas verdes).

**Escasez de Áreas Verdes:** el área de estudio seleccionada presenta un área verde representada por el sector del parque de Los Reyes, pese a esto entre edificaciones residenciales y de comercio, no existe áreas verdes con cubierta vegetal, refiriéndose a plazoletas como Plaza Catedral que pese a presentar especies arbóreas, no existe una cubierta vegetal, sino que está cubierta por pavimento. De la igual forma, la concentración de habitantes (Censo 2017) respecto a la cantidad de área verde dentro del área de estudio, no responde al estándar de CNDU.



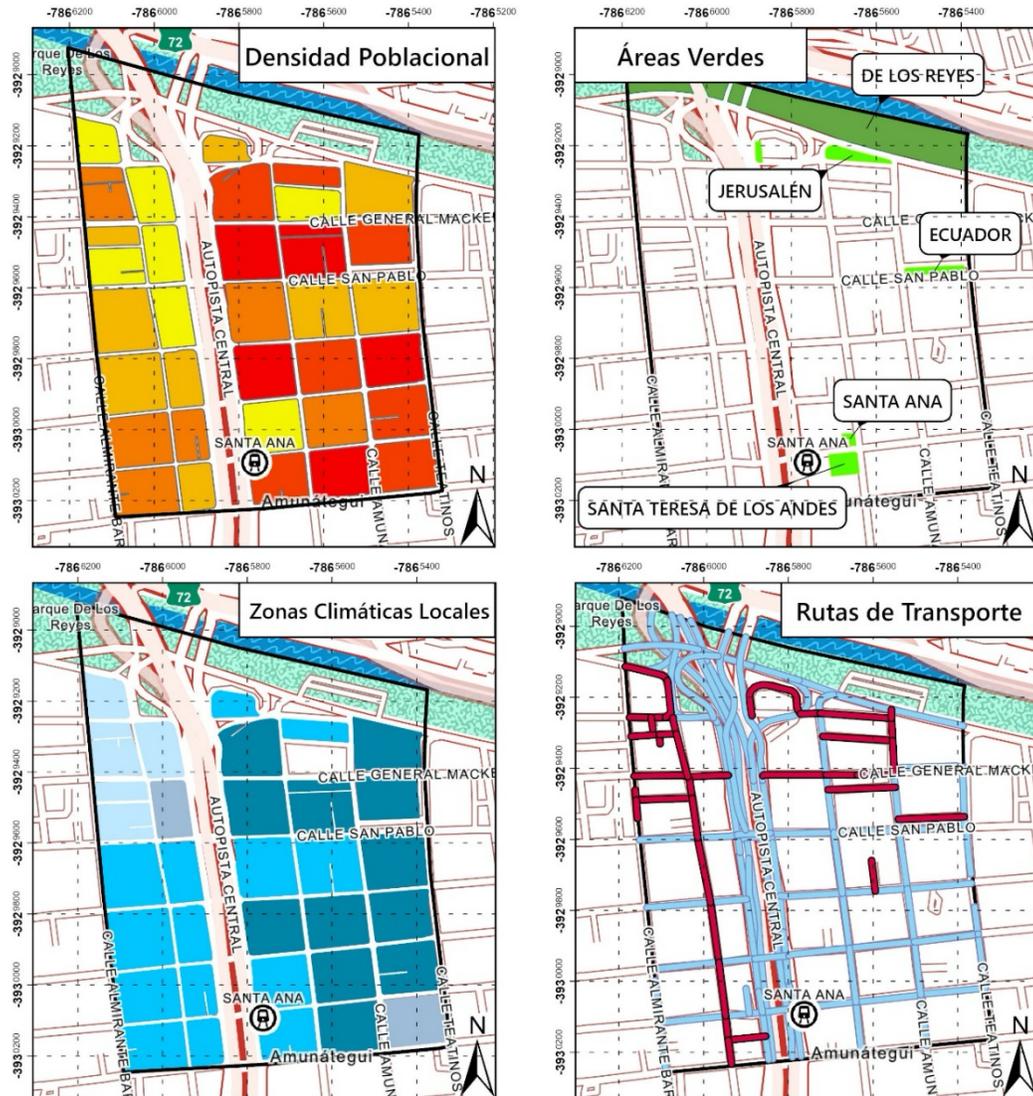
Figura 1. Mapa de Área de Estudio. Elaboración propia.

**Zonas Climáticas Locales:** el área de estudio presenta áreas las zonas residenciales compactas de alta, mediana y baja altura (B1, B2 y B3 respectivamente), propuestas en la clasificación de Stewart y Oke (2012), siendo estas las zonas de mayor sensibilidad al fenómeno de ICU.

**Vialidad:** dentro del área de estudio se encuentran importantes ejes viales los cuales son la Avenida Manuel Rodríguez, la Autopista Central, Avenida Mapocho, Avenida San Pablo y Avenida presidente Balmaceda. Presentando importantes congestiones vehiculares en determinadas horas del día (horas pico) además de la constante presencia de vehículos y transporte público a lo largo del día.

**Población:** el sector sur poniente del área de estudio es la que concentra la mayor cantidad de población, ya que se encuentran los edificios residenciales de mayor altura además de una alta densidad de infraestructura.

Al considerar estas características se propone la futura homologación de los resultados a diferentes ciudades y/o países.



**ÁREA DE ESTUDIO:  
PRESENTACIÓN DE FACTORES URBANOS**



Autor: Bastian Aliaga Acevedo      Referencias Cartográficas: 1:12.000      Datos Cartográficos: PROYECCION: UTM DATUM: WGS94 HUSO: 19S

Figura 2. Factores urbanos del área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.1. Zonas Climáticas Locales.

El concepto de zonas climáticas locales (ZCL) es actualmente un concepto fundamental para el estudio de la climatología urbana. Fue propuesto por Stewart y Oke en 2012, en su publicación “Local Climates Zones for urban temperature studies”. Las ZCL se definen como “regiones uniformes en cobertura del suelo, estructura, materiales y actividades humanas que se extienden entre unos cientos de metros hasta algunos kilómetros en escala horizontal” (Stewart & Oke, 2012). Al generarse esta clasificación del paisaje urbano es que se facilita la comparación y el análisis de las temperaturas y los climas urbanos, ICU, para el estudio de diversos fenómenos alrededor del mundo.

Para poder proporcionar un marco de referencia útil para los estudios de climatología urbana, es que las ZCL a través de la caracterización de parámetros físicos, explican distintas variables climáticas y condiciones térmicas asociadas. Existen 17 ZCL, las cuales están divididas en áreas construidas (1 al 10) y las otras restantes son suelos que no presentan coberturas construidas (A a G).

El tener un lenguaje común para realizar estudios de climatología, ha permitido que los investigadores puedan identificar las áreas específicas dentro de las ciudades que sean más o menos susceptibles a las ICU y otros tipos de fenómenos climáticos urbanos. Por ejemplo, Lindberg et al., 2018 estudia cómo la morfología de vegetación y edificios influyen en los patrones de sombra y las temperaturas medias de las áreas urbanas, para generar herramientas que apoyen el confort humano, el diseño de edificios y la planificación urbana.

Diversos investigadores han aplicado el modelo de ZCL en distintos escenarios ya que han realizado estos estudios en diferentes ciudades por lo que se presentan distintas escalas, globales regionales y locales. Por ejemplo, Colli et

al., 2020 aplicaban el modelo de ZCL en la ciudad de Mendoza, Argentina, a través del método WUDAPT. Al clasificar el paisaje urbano a través de las ZCL se advirtieron los beneficios como las limitaciones de las utilidades de los postulados de Stewart y Oke para estudiar los climas urbanos. Otras conclusiones son las facilidades que otorga el modelo ZCL para estandarizar estudios y posibilidad de replicación en otras ciudades latinoamericanas. Zheng et al., 2018 desarrollaron una clasificación de las ZCL con el fin de establecer una base de datos sobre la morfología de la ciudad y desarrollar una plataforma con información útil para la investigación multidisciplinaria y así poder tomar decisiones en la planificación urbana.

## **6.2. Islas de Calor Urbano (ICU).**

Las Islas de Calor Urbano (ICU) son características del microclima urbano, generando un delta positivo de temperatura en comparación con las zonas rurales circundantes (Oke et al., 2017). Este fenómeno se produce debido a la alteración en el balance energético natural de las superficies, consecuencia directa de los procesos de urbanización que reemplazan las coberturas permeables del suelo por materiales impermeables, como el concreto y el asfalto, que retienen y liberan calor de manera más lenta (Oke et al., 2017). Las ICU tienen un impacto significativo en la calidad de vida de los habitantes urbanos, especialmente en términos de confort térmico, salud pública y consumo energético.

El concepto de ICU puede tener presencia tanto en las superficies como en el aire atmosférico por lo que se distinguen distintos tipos de ICU. **Las ICU Subsuperficiales**, las cuales refieren a la diferencia de temperatura en los suelos de áreas urbanas y no urbanas, incluyendo los espacios construidos subterráneamente. **Las ICU de superficie**, que corresponden a aquellas que evalúan la diferencia de temperatura entre las superficies urbanas sólidas, como el pavimento y las edificaciones, en relación con la atmósfera exterior. **Las ICU**

en la **Urban Canopy Layer**, que se analizan respecto a la diferencia de temperatura entre el aire que circula entre la superficie urbana y la altura media de las edificaciones. Finalmente están las ICU en la **Urban Boundary Layer**, que se refieren a la diferencia de temperatura en la capa superior a la Urban Canopy Layer, hasta el límite donde la ciudad influye en el comportamiento atmosférico.

Para la espacialización de las ICU a través de la bibliografía existen muchos métodos tales como la generación de un LST, como en el estudio de Thomas (2022) y Sarricolea & Martín-Vide (2014). La obtención de datos de temperatura gracias a una estación meteorológica. Así también existe la utilización de regresiones lineales, para la determinación de las ICU. A través del peso estadístico de diversos factores se calcula la espacialización de las ICU además de su intensidad, gracias a datos generados en diversos geo procesos. En esta investigación se hará uso de la regresión lineal propuesta por Letelier (2020).

$$\text{Intensidad de la ICU verano} = 1.516 + (0.36 * \text{Altura de edificaciones}) + (3.2 * \text{Densidad Pob}) - (0.02 * \text{Sup. Areas Verdes}) + (0.02 * \text{Calor Ruta Tp}) + (0.09 * \text{Calor Ruta P}).$$

Esta regresión lineal ayuda a comprender cómo condiciones como la altura de las edificaciones, la falta de áreas verdes y la densidad poblacional ayuda a comprender la espacialización de las ICU. Los factores utilizados son:

- **Calor antropogénico:** Las creaciones humanas, la densidad en las que son situadas en las ciudades, la población que se mueve en las ciudades (densidad poblacional) y los mismos vehículos son generadores de calor, afectando la temperatura atmosférica de las ciudades generando ICU (Pérez, 2015)
- **Presencia de vegetación:** Estudios han demostrado que la vegetación, al influenciar en la humedad, la infiltración del agua, la regulación de la temperatura aporta a la mitigación de las ICU (Pérez, De la Barrera, 2021). Sarricolea et al., 2008; Sarricolea y Romero, 2010, confirman la variación de la temperatura del aire superficial al comparar zonas densamente

construidas y con escasa vegetación con áreas próximas a fuentes de aguas o parques urbano.

- **Altura de las Edificaciones:** Carrasco et al., 2016. Demostró que con un factor de cielo visible bajo, es consecuencia el aumento de la temperatura de la ciudad. Es decir que, al existir una zona de alta densidad de edificios y de gran altura, dificultan la correcta ventilación y favorecen la acumulación de energía, traduciéndose en mayor temperatura.

### **6.3. Planificación y diseño sensible al clima.**

El Cambio Climático (CC) está generando distintas situaciones para la población mundial, inviernos más fríos, veranos más cálidos, eventos climático-extremos. En la actualidad la única forma de enfrentarlo es a través de medidas o estrategias de mitigación de sus efectos: la disminución de la huella de carbono, la disminución del consumo de recursos, disminución en la utilización de combustibles fósiles, cesar con los cambios de usos de suelo y la deforestación, entre otras.

La planificación y diseño sensible al clima tiene una perspectiva interdisciplinaria que busca la integración de las consideraciones climáticas para el desarrollo urbano, con el fin de generar así una desarrollo resiliente y sostenible en las ciudades y el tiempo. Este tipo de enfoque busca minimizar los impactos negativos del clima urbano, a través de vegetación urbana, materiales reflectantes (superficies frías), implementación de azoteas y fachadas verdes, optimización de los diseños urbanos para aumentar la ventilación y disminuir la acumulación de calor.

Las infraestructuras urbanas se construyen pensando en la durabilidad de estas, siendo probable que los actuales edificios en creación, carreteras, etc. se enfrenten a condiciones climáticas muy diferentes a las actuales y aún más hostiles, por lo que una planificación considerando esta perspectiva es necesaria.

Oke, (2017) postula ciertos lineamientos para que las ciudades tengan las cualidades de enfrentarse al cambio climático y mantengan las condiciones de vida y bienestar, estos son;

- La ciudad es eficiente en el uso de recursos (tierra, materiales energéticos, agua, etc.) para minimizar su impacto global y regional (por ejemplo, emisión de contaminantes del aire y gases de efecto invernadero, degradación del agua, generación de residuos).
- Los vecindarios de la ciudad están diseñados para mejorar los microclimas que rodean los edificios y sus alrededores (o al menos no empeorarlos).
- Las personas y la infraestructura están protegidas de los fenómenos meteorológicos extremos al considerar la variabilidad climática actual y futura.

La planificación sensible al clima al estar en desarrollo y en teorización, es que muchas veces se basa en la utilización de modelos y herramientas de simulación para predecir los efectos de diferentes estrategias de diseño urbano para mejorar el microclima local. Herramientas como el modelo SOLWEIG (Solar and Longwave Environmental Irradiance Geometry) desarrollado por Lindberg et al. (2008), permiten evaluar cómo la morfología urbana y la vegetación influyen en los patrones de sombra y las temperaturas radiantes medias en áreas urbanas. Cortes et al., 2022 investiga distintas estrategias de mitigación para disminuir las temperaturas culpa de la ICU en la ciudad de Mandaue, Filipinas, a través del software ENVI-met. En la investigación se concluyó que las ICU en Mandaue se podrían mitigar a través de diversas estrategias asociadas al aumento de vegetación, ya que este tipo de estrategia entregará aparte de una disminución en las temperaturas, beneficios adicionales como la captación de carbono y diversos servicios ecológicos.

## 6.4. Techos verdes.

El concepto de las azoteas verdes forma parte de una clasificación más amplia de la infraestructura verde, asociada a las cubiertas verdes, siendo estas “cualquier superficie horizontal o inclinada con componente horizontal que cubra un espacio bien sea terrazas, azoteas, cubiertas planas, cubiertas inclinadas, placas en espacios interiores, semi-interiores, exteriores, entresijos o sótanos” (Albarracín, 2016).

Las azoteas verdes tienen un especial valor ambiental además de facilidades estructurales y de posicionamientos. A modo de explicación, son capaces de superponerse por sobre la infraestructura urbana ya construida en vez de generar nuevos espacios, es una suerte de reconfiguración de la ciudad.

### 6.4.1. Tipos de techos verdes.

*Cuadro 1. Tipos de azoteas verdes y sus características principales. Elaboración propia, fuente: (Jiménez. 2022) (Albarracín, 2016) (MINVU, 2021)*

<b>Tipo</b>	<b>Extensivo</b>	<b>Semi-Intensivo</b>	<b>Intensiva</b>
<b>Espesor del Sustrato (cm)</b>	4 a 15	15 a 30	< 30
<b>Peso (Kg/m<sup>2</sup>)</b>	60 - 150	60 - 200	200 - 500
<b>Tipo de vegetación</b>	Herbácea	Arbustiva	Árboles y plantas
<b>Mantenimiento</b>	Simple	Complejo	Completo
<b>Riego</b>	Poco Frecuente	Constante	Constante
<b>Demanda</b>	Alta	Media	Baja
<b>Costo(\$/m<sup>2</sup>)</b>	94050	123500	343900

En cuanto a los beneficios que se pueden obtener de estas cubiertas se encuentran: el manejo óptimo de las aguas lluvias, la regulación de la temperatura, disminución del gas carbónico, filtración del aire, aislamiento térmico sonoro, aumento de la fauna y presenta un atractivo estético y paisajista

(Albarracín, 2016). En consideración este tipo de estrategia/solución de planificación urbana posee un gran atractivo para las ciudades.

#### **6.4.2. Implementación de las Azoteas verdes.**

Mucho se ha escrito sobre cubiertas verdes, en especial, azoteas verdes. Apuche et al, (2010) en su estudio “Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes” realiza un análisis de los beneficios energéticos de los techos verdes durante tiempos estivales en México, concretamente en Hermosilla. Este estudio se realizó con una casa de 140 m<sup>2</sup> comparando la temperatura de 3 áreas de esta (living, baño y dormitorio), Se concluyó que la utilización de techos verdes respecto a los techos normales de concreto generaban una disminución de 5°C al interior del recinto, pese a que las condiciones climáticas de Hermosilla igual era necesario la utilización de aires acondicionados. La disminución del consumo energético se ve reflejado en el ahorro de la facturación.

Zarate(2021) en su estudio sobre beneficios energéticos de los techos verdes, “Evaluación de potencial de ahorro energético de techos verdes aplicados en la zona conurbada Veracruz- Boca del Río” generó un modelamiento respecto a las temperaturas externas e internas a en una vivienda situada en Veracruz-Boca del Río, México, dentro de sus resultados se aprecian que las cubiertas sin techos verdes, pueden llegar a alcanzar temperaturas de hasta 50°C debido a la materialidad y opacidad, en cambio las cubiertas verdes, no superan los 38°C, así mismo la amplitud de la temperatura luego de un día de verano y de insolación directa es mucho menos en los techos con cubierta verdes en comparación con los techos sin cubierta. Pese a eso, durante periodos de temperaturas bajas la temperatura externa de la vivienda con techos verdes era menos que la de techos sin cubierta generando una disminución de temperatura al interior. Finalmente, se concluye que los techos verdes contribuyen al ahorro energético a través de la amortiguación de la temperatura, la autora expresa la importancia de este

efecto a una escala nacional en caso de que estas infraestructuras comenzarán a ser más utilizadas.

Villanueva et al (2012) en “Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo”, generaron un modelamiento dinámico sobre mitigación de las islas de calor bajo la generación de estructuras verdes (techos verdes) y cambios de uso de suelos y reforestación urbana. Dentro de sus resultados contemplaron que en el área de estudio en que realizaron la modelación solo 37% podía ser intervenido (entre azoteas verdes y reforestación) de esto y con la modelación dinámica realizada en el futuro, específicamente al 2080, obtuvieron datos respecto a los beneficios de estas estructuras verdes, se manifestó que la presencia de azoteas verdes y frescas disminuye la temperatura de las islas de calor en 8°C, también que el aporte a las disminución de temperatura cuando la reforestación era sumada a las medidas de mitigación sólo beneficiaba en una disminución de 2 °C

Pese a los estudios realizados sobre esta nueva forma de diseñar los edificios, casas o sectores, es muy escasa la bibliografía respecto a beneficios concretos, muchos autores mencionan ahorros energéticos y ahorros económicos, pero no son altos o excesivamente notorios, de lo mismo se considera una inversión inicial y luego de manutención para los techos o estructuras verdes. Para la correcta implementación de estas tecnologías es necesario mayor cantidad de estudios y modulaciones. A nivel nacional solo se han realizado estudios de confort térmico y ahorro energético, pero no considerando más factores que el del edificio en sí. Mercado en 2016 menciona que la idea de implementar techos verdes en solamente las edificaciones y casas nuevas traerá recién beneficios al año 2050, por lo que queda necesario la implementación de esta tecnología en las estructuras ya consolidadas para hacer notar los beneficios en menos tiempo.

## 6.5. Fachadas verdes.

Las fachadas verdes, son sistemas constructivos que se basan en la incorporación de la vegetación de las paredes de los edificios, casas, etc. También conocidas como "paredes verdes" o "muros vegetales". Estas soluciones innovadoras y sostenibles han adquirido una creciente relevancia en la arquitectura contemporánea debido a su capacidad para mejorar el entorno urbano y contribuir a la mitigación de los efectos del cambio climático.

Hoy en día las fachadas son utilizadas con mayor frecuencia en el mundo de la arquitectura y de la planificación urbana debido a sus beneficios. Al actuar como filtros naturales sostenidos en los muros de las edificaciones, las fachadas verdes capturan los contaminantes y materiales particulados finos, mejorando así la calidad del aire (Seguel, 2019) (Getter y Rowe, 2006). Otro de los beneficios de este tipo de infraestructura verdes es la regulación de la temperatura, al utilizarse superpuesta a las fachadas tienen dos tipos de formas de amortiguación de la temperatura, al interior y en el exterior de los edificios (Carrera, 2011). (Martínez, 2017).

### 6.5.1. Tipos de fachadas verdes.

*Cuadro 2. Tipo de Fachadas verdes y características principales. Fuente: Elaboración propia con información: (Carrera, 2011) (Seguel, 2019).*

Tipo	Descripción	Ventajas	Desventajas	Requerimiento de Mantenimiento	Costo de Instalación
<b>Clásica</b>	Plantas trepadoras crecen sobre la pared de los edificios. Raíces en el suelo	Bajo costo de instalación y mantenimiento. Sombreamiento (permite refrigeración en el verano)	Posibilidad de daño en las paredes por las raíces. Tiempo para crecer. Efecto aislante pequeño.	Baja mantención, poda ocasional.	Bajo

<b>Tradicional de Doble Piel</b>	Plantas trepadoras utilizan una estructura que las ayuda crecer.	Mayor variedad de especies y diseño. Resistente a la corrosión.	Necesidad de estructura adicional, mantenimiento regular y mayor costo de instalación.	Mantenimiento regular para verificar estructura.	Medio
<b>Paneles Modulares</b>	Celdas o módulos que contienen sustrato y a las plantas, ambos unidos a una estructura metálica.	Flexibilidad al diseño y la instalación, sistema de riego integrado. Reductor de las temperaturas del espacio por sombra. Gestión de aguas pluviales	Necesidad de estructura metálica adicional, necesidad de reemplazo de placas y sustrato. Efecto aislante pequeño. Elevado número de años para cubrir pared.	Reemplazo periódico de plantas y sustratos.	Alto
<b>Gaviones Metálicos</b>	Contenedores de malla metálica, que sostienen a los sustratos y las plantas.	Sostén de gran volumen de sustrato y plantas. Posible utilización con plantas ya crecidas. Aislación térmica y acústica dentro del recinto.	Esfuerzo estructural mayor, instalación compleja, exposición a la corrosión. Solo un tipo de vegetación.	Inspección y refuerzo estructural.	Medio-Alto
<b>Celdas Plásticas y Metálicas</b>	Celdas de plástico o metal que contienen el sustrato y las plantas.	flexibilidad en diseño e instalación.	Dependencia de materiales plásticos y metálicos (menos sostenibilidad), reemplazo de componente, periódicamente.	Mantenimiento de los componentes plásticos y metálicos de la estructura.	Medio
<b>Sistemas de Filtros Geotextiles</b>	Material no tejido con bolsillos para plantas y sustrato.	Eficiencia.	Necesidad de sistema de riego complejo.	Monitoreo del sistema de riego y reemplazo de las plantas.	Alto
<b>Sistemas Mixtos</b>	Combinación de hidroponía con paneles modulares.	Mayor flexibilidad en riego y mantenimiento.	Complejidad de instalación y mantenimiento.	Verificación técnica continua y mantención del sistema de riego	Muy alto

### 6.5.2. Estudios con implementación de Fachadas verdes.

Jiménez, 2022. Estima que la instalación de las fachadas verdes tendría un costo promedio por m<sup>2</sup> de 180.500 pesos chilenos, pero solo considerando los costos de materiales que permitirían instalar tipos de fachadas verdes clásicas y de doble piel.

Respecto a los estudios que se han realizado a través de la implementación de Fachadas verdes, tenemos la Tesis de Carrera, 2011, quien generó una clasificación y evaluación de los sistemas vegetales verticales. Para ello centra sus recursos en la integración de diversas tipologías y el impacto que estas tienen respecto a la eficiencia energética y confort térmico al interior de las edificaciones. Carrera (2011) concluye que las fachadas verdes en general están comprometidas por un costo inicial (materiales, instalación, riego, etc.) significativo, pero a largo plazo se desarrollan bastante beneficios tanto para el entorno, como para el edificio.

Suarez et al. (2020) realizó un estudio del impacto de las fachadas verdes Tradicionales (FVT) sobre la condición térmica de las viviendas en la Ciudad de Mendoza, Argentina, que tiene un clima de árido desértico. Se monitorearon dos viviendas durante veranos consecutivos. Se obtuvieron como resultados que las viviendas con las FVT tenían una disminución de hasta 27,4 °C en la temperatura superficial exterior de las fachadas, e interiormente edita una disminución de 6, 5°C. Confirmando de esta forma que las FVT son efectivas frente al desempeño térmico de las viviendas en climas áridos desértico, además se obtuvieron datos de que ayuda a la reducción de las ICU y en disminución de los materiales particulados finos.

#### **6.6. Superficies frescas o Reflexivas.**

Este concepto está asociado a las superficies con materiales y recubrimientos reflectantes, es decir, aquellos que pueden reflejar la radiación solar que incide sobre el material. Se utilizan en las fachadas de los edificios y en las áreas urbanas como el pavimento. (Monrou et al., 2022). Al tener una mayor reflectancia las superficies se reduce la radiación térmica infrarroja que es emitida hacia la atmósfera y el calor absorbido por los cuerpos que reciben la luz solar. Las superficies frescas pueden ser techos de azoteas o de casas, fachadas y pavimentos. Este tipo de solución se basa en la utilización de pigmentos de alta

reflectancia en el espectro del infrarrojo cercano (NIR), materiales retro reflectivos y materiales de cambio de fase (PCM). Dentro del grupo de clasificación existen los techos verdes los cuales son sistemas de tachado que tienen sistemas propios para absorber menor calor y reflejar más luz, a través de revestimientos y pinturas especiales. (Rawat et al., 2021)

Respecto a los beneficios asociados de este tipo de estrategias, existen: la disminución de las temperaturas internas de las estructuras revestidas, ahorro de la energía asociada a los aires acondicionados, disminución de la temperatura superficial expuesta a los rayos del sol, mitigación de las ICU. (Mourou et al., 2022) (Rawat et al., 2021).

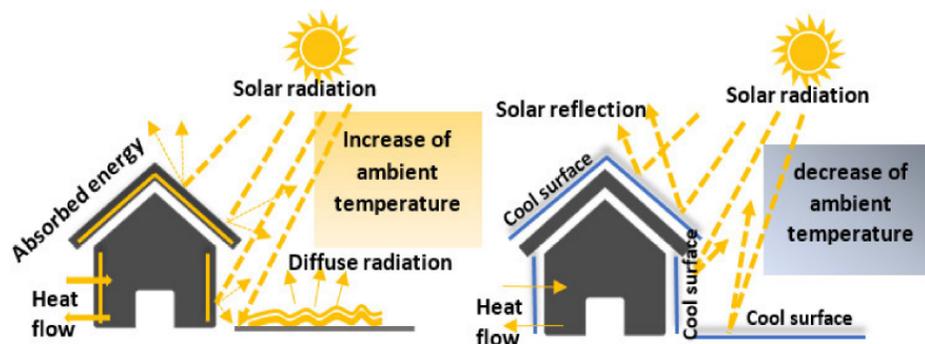


Figura 3. Representación gráfica del funcionamiento de las superficies frías. Fuente Mourou, 2022.

### 6.7. Modelación Dinámica.

La modelación dinámica es parte importante del mundo de las ciencias, especialmente de los estudios más cuantitativos. Esta herramienta ayuda a que sistemas complejos se simplifiquen y puedan ser estudiados más fácilmente, últimamente ha sido de especial interés para áreas de planificación urbana y áreas medio ambientales. Los modelamientos de la realidad no son exactos al

100%, de hecho, son una simplificación, dependiendo de lo que se quiera estudiar, pese a esto en softwares de modelación climática mientras más fiel a la realidad será más preciso el modelo (Moya, 2020).

Dada las características de la investigación y el acceso al software de modelación es que se utilizara ENVI-met, debido a su utilización a escalas micro climáticas, su fácil interfaz y la necesidad de pocos datos externos para la obtención de resultados del programa.

### **6.8. ENVI-met.**

Es un software desarrollado por Michael Bruse en el instituto de geografía de la universidad de Mainz, Alemania. Este software trabaja en 3D en escala micro climática con una resolución de 0.5 a 10 metros (Balter,2021) y tiene la opción directa de generar azoteas y fachadas verdes. Uno de los beneficios de la utilización del software es que es posible modelar las rugosidades de la ciudad además de la materialidad de los edificios y las superficies, por ejemplo, representar superficie vegetada, suelo desnudo o concreto. Entre las características de la vegetación existe la posibilidad de cambiar dependiendo del tipo de especie facilitando la selección de vegetación para las fachadas y azoteas. Finalmente, Moya (2020) menciona que muchos autores destacan la baja cantidad de datos de entrada para su funcionamiento, la interfaz simplificada para el correcto anejo del software y la baja demanda de tiempo que requiere el programa.

## 7. MARCO METODOLÓGICO.

En este apartado se expresará el modelo metodológico (Fig. 4) que se utilizó para enfrentar los objetivos. Esta investigación utilizó una metodología mixta cualitativa-cuantitativa, con énfasis cuantitativo, para determinar el impacto de la implementación de las azoteas, fachadas verdes y las superficies frías en Santiago centro, ya que se necesitó la creación de una base de datos numéricos, la modelación en 3D del área de estudio para la generar una simulación atmosférica de clima local y verificar los resultados de la implementación de las azoteas, fachadas verdes y superficies frías, finalmente se realizó una búsqueda bibliográfica y se generó una tabla de especies vegetales que puedan utilizarse en las infraestructuras verdes estudiadas.

La investigación se desarrolló bajo un carácter descriptivo y experimental. En primer lugar, se describieron las características climáticas y físicas del área de estudio para determinar la espacialidad de la ICU en el área de interés, con las que luego se evaluaron diferentes escenarios en que se implementarán las IV y las superficies frías a evaluar, así como su combinación y distribución a través del software ENVI-met.

A continuación, se expresará la metodología paso a paso para llegar a la obtención de los resultados que darán paso a la resolución de los objetivos específicos y general. Se necesito espacializar la ICU en el área de estudio para determinar donde es necesario y estratégico posicionar las IV y las superficies frías, posterior a esto se necesitó del estudio sobre las características constructivas de los edificios en función del tipo de azotea a implementar al igual que la posición de las fachadas, al igual que la aplicación de las superficies frías. Teniendo estos datos se desarrolló la modelación del escenario en el software ENVI-met al igual que la simulación de los distintos escenarios. Finalmente se procedió en la realización de los parámetros necesario para tener en cuenta la

implementación de las estrategias de mitigación en conjunto con las especies que serían beneficiosas utilizar.

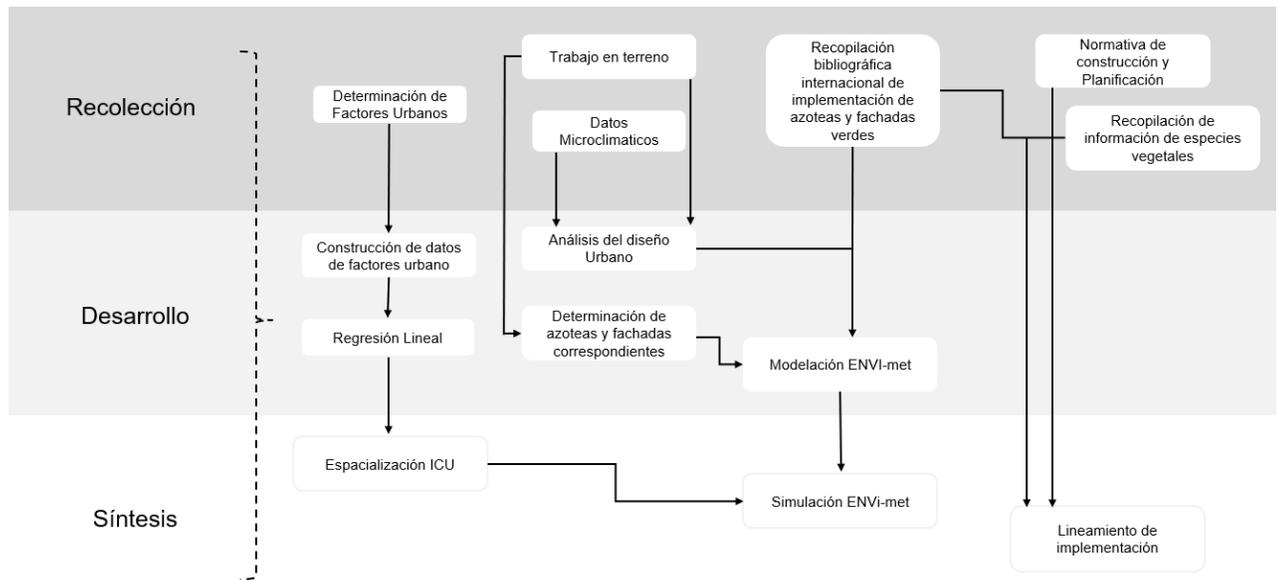


Figura 4. Esquema metodológico. Fuente: Elaboración propia.

### 7.1. Espacialización de las ICU en el área de estudio.

En primer lugar, se consideraron diversas formas de obtención de la intensidad de la ICU, tales como: la generación de un LST (por sus siglas en inglés Land Surface Temperature), imágenes satelitales y la obtención de datos de temperatura a través de trabajos en terreno. Pero, dado problemas para la obtención de datos fidedignos, tanto por resolución como por variaciones de temperatura y temporales, se recurrió a la revisiones bibliográficas para la búsqueda de estrategias pertinentes en la investigación.

Se finalizó con la utilización de una regresión lineal para explicar la intensidad de las ICU. Esta regresión lineal, propuesta por Letelier (2020), ayudó a comprender cómo condiciones como la altura de las edificaciones, la falta de áreas verdes y la densidad poblacional ayudan a comprender la espacialización de las ICU. Los factores que se utilizaron fueron: Calor de Ruta (privada y personal), Presencia de Vegetación, Altura de los Edificios y Densidad Demográfica.

Los factores urbanos necesario para el desarrollo de la formula se obtuvieron gracias a la utilización de varias herramientas y geo procesos para poder determinar de manera precisa la influencia de cada uno de los factores.

Respectos a la altura de los edificios se obtuvieron a través de la información otorgada por el SII, SHAPEFILE de los permisos de edificación entre los años 2011 y 2023, visitas en terreno del área de estudio y la utilización del software Google Earth Pro. Debido que en una misma cuadra existe distintos tipos de las edificaciones es que se generó un promedio respecto a la cantidad de edificios con su altura por cuadra. En cuanto a la densidad de población, se recurrió a la información entregada por el Censo 2017 en conjuntos con la información de hectáreas gracias al SHP de abierto de IDE.

Respecto al factor urbano de superficie de área verdes, se obtuvo la información de polígonos de las áreas verdes de Santiago a través del SHP de Áreas verdes MINVU – 2023. Luego de la obtención del archivo es que se recurrió al geoprocésamiento “Distancia Euclidiana”, el cual funciona entregando la distancia más corta entre dos puntos en un espacio bidimensional, basándose en la geometría euclidiana. En el software ArcGIS Pro este geoprocésamiento toma un conjunto de puntos de origen (en este caso polígonos) y calcula la distancia mínima de cada celda del ráster a los puntos más cercanos, generando un nuevo ráster donde el valor de cada celda representa esa distancia. Las áreas verdes presentan una influencia el territorio en el que se encuentran y el adyacente. En

conclusión, el geo proceso de distancia euclidiana permite evaluar cómo la superficie de área verde impacta y se relaciona con el resto del área de estudio.

En cuanto al calor de las rutas era necesario, al igual que en el caso de la superficie de área verde, analizar la influencia que el calor del transporte sea público o privado tiene sobre el territorio. Es por esta razón que se transformó la información vectorial de polilíneas a puntos para luego aplicarla herramienta de interpolación de tipo “Natural Neighbor”. (Letelier, 2020)

Para asociar la información de los factores urbanos a puntos, es que se recurrió al geoprocésamiento “fishnet”, es cual crea celdas y puntos; en este caso fueron creados 50 puntos. Con los puntos creados fue posible extraer la información de los factores urbanos a través de la herramienta “Extract Multiples Values to Point”, este paso se realizó para que cada punto tenga asociado los valores de los diferentes factores urbanos ya mencionados.

## **7.2. Selección de los edificios para la implementación de azoteas y Fachadas verdes.**

Para establecer una sólida evaluación de la implementación de las Azoteas y fachadas verdes, aparte de la determinación de las ICU, fue necesario determinar otro tipo de factores estructurales respecto a las edificaciones que existen dentro del área de estudio. A continuación, se detallarán los pasos específicos para la selección de los edificios en los que se implementarán las azoteas y fachadas verdes, además de los lugares donde se aplicara las Superficies Frías, para la comparación en la Modelación Dinámica con ENVI-met. Se determinó la cobertura de los suelos que se encuentran en el área de estudio, las extensiones de las azoteas y de las fachadas disponibles.

Con ayuda del software Google Earth Pro es que se realizó, en primera instancia, una fotointerpretación de las azoteas disponibles. Para este paso fue primordial el conocimiento de la espacialización de las ICU en el área de estudio.

Conociendo donde las ICU tienen mayor intensidad se estudió las azoteas y fachadas de esos sectores es específico. La fotointerpretación se originará a través la examinación de la imagen satelital, en pos de la identificación visual de patrones de construcción y características asociadas a las azoteas de los edificios. Considerando la modificación del Decreto N°47 de vivienda y urbanismo de 1992, es que a la superficie total de las azoteas se le restará un 20%, ya que este porcentaje es utilizado para “las salas de máquinas, salidas de cajas de escaleras, chimeneas, estanques, y similares elementos exteriores ubicados en la parte superior de los edificios...” (DS N°47) por lo que el resto puede ser utilizado completamente para las azoteas verdes.

Una vez digitalizadas las azoteas, se recurrió a una validación en terreno para la verificación de la información y datos recopilados a través de la fotointerpretación. El trabajo en terreno permitió obtener información adicional, como la materialidad, la orientación de las fachadas y la accesibilidad. Luego se generó una clasificación de las azoteas respecto a cantidad de metros cuadrados y orientación de los lugares disponibles.

Para el análisis de las estructuras de los edificios, se utilizó la base de datos de acceso público del Instituto Nacional de Estadísticas (INE), la cual proporciona información detallada sobre las estructuras a construir, incluyendo el sector al que pertenecen (público o privado), la cantidad de pisos, el total del terreno, la materialidad predominante y otros datos de infraestructura. Esta información permitió evaluar la aptitud de los edificios para la implementación de azoteas y fachadas verdes.

En relación con los costos de instalación y mantenimiento, se realizó una investigación bibliográfica utilizando fuentes primarias y secundarias para conocer los costos asociados a la implementación de estas infraestructuras verdes. Esta investigación permitió comparar los costos y beneficios esperados, evaluando la viabilidad económica de estas soluciones. Finalmente, se revisaron

las normativas asociadas a la implementación de azoteas verdes, recurriendo al Decreto Número 47 de Vivienda y Urbanismo de 1992, así como otros antecedentes chilenos sobre la implementación exitosa de infraestructuras verdes. Esta revisión permitió entender las condiciones y características requeridas para las azoteas y fachadas verdes, comparando las condiciones de implementación y resultados entre la realidad y la modelación.

### **7.3. Creación de la Modelación Dinámica.**

Para la obtención de la temperatura del área de estudios se buscaron datos de temperatura de veranos del año 2023 y 2024, desde el 21 de diciembre hasta el 21 de marzo, donde se recurrió a los momentos de mayor temperatura, en la época estival, llegando a la determinación del día 31 de enero del 2024. Cabe destacar que para la modelación dinámica en el software ENVI-met es necesaria la temperatura por hora de al menos 24 horas continuas, aun cuando la simulación sea menor, en el caso de esta investigación la, simulación será de 15 horas desde las 5 de la mañana hasta las 21 horas, representando las horas diurnas.

La obtención de las temperaturas para dicho día fue gracias a la información de 5 estaciones meteorológicas (Dirección General de Aeronáutica Civil, s/n):

- La estación de Lo Pinto (330118)
- Pudahuel Santiago (330021)
- Quinta Normal, Sant (330020)
- San Pablo – DASA (330114)
- Eulogio Sánchez (330019)
- La Platina (INIA) (330026)

La temperatura del área de estudio se consigue a través de una interpolación de las temperaturas de las estaciones meteorológicas anteriormente dichas, la cual

se realizó a través del software ArcGIS Pro 3.31, con la herramienta IDW (Interpolación mediante distancia inversa)

Luego de sistematizada la información de las temperaturas, también se utilizó la información de humedad relativa (HR) (la cual está en porcentaje), la información de velocidad y dirección del viento, (teniendo como unidad m/s y grados Celsius, respectivamente). La finalidad de la recolección de estos datos radica en una modelación más robusta y representativa de la realidad en el área de estudio.

En el software ENVI-met inicialmente se trabajó con la herramienta MONDE en la que se trabajó con un archivo SHAPEFILE previamente creado con los límites del área de estudio que facilito la georeferenciación de área, posteriormente utilizando el comando Openstreetmap, fue posible modelar el área de estudio pertinente a la investigación.

Luego de esto fue necesario generar a través de la herramienta SPACES un modelado en 2.5D. En este paso ya existe un determinado número de celdas en los ejes "X", "Y" y "Z", siendo de 165x146x25, donde representan 330x292x98 metros. Cuando se inició con la creación del modelado, el paso previo fue la determinación de la altura de cada edificio, lográndose a través de fotointerpretación y trabajo en terreno.

Al trabajar en el comando SPACES es posible modificar los materiales de la modelación:

- Concreto para fachadas y techos, en edificios según corresponda, así como densidades.
- Ladrillos o adobe para construcciones patrimoniales presentes en el área de estudio.
- Techumbres de Zinc.
- Diferentes pavimentos, diferenciando carretera, calles y veredas.
- Presencia de vegetación, según corresponda el tipo de especie.

A través de la sección “Display and edit Options”, se pudo definir las distintas rugosidades del área de estudio, ya que previamente estaba caracterizada la superficie debido al trabajo en terreno.

Se comenzó a “digitalizar” el área de estudio gracias a las opciones; “Vegetation”, donde se modela la altura y características de la vegetación, “Building” para modelar la infraestructura urbana en y materialidad (posteriormente esta sección sirvió para implementar las IV donde correspondiera), y “Soil and Surface” que define las características de la composición del suelo (pavimento, Maicillo, pasto). Ahora bien, es necesario pasar el modelo a 3D para realizar la simulación correspondiente. Aquí es donde es posible generar desde el modelado base la implementación de las AV y FV.

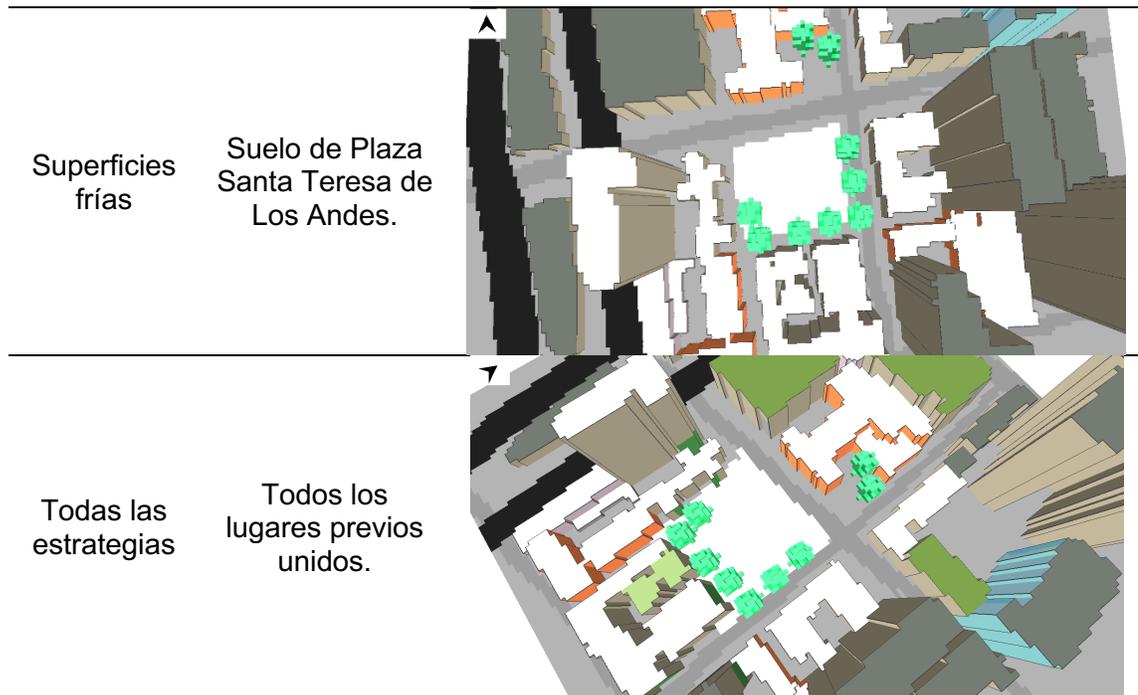
Una vez generada la simulación en 3D con las características del área de estudio, se utilizó el comando “ENVI-guide” donde se colocó las variables climáticas para el desarrollo de la modelación dinámica. Estas son; temperatura atmosférica, en grados Celsius(°C), humedad relativa, en porcentaje (%), velocidad del viento (promedio), en metros por segundo (m/s), dirección del viento en Grados cartesianos, nubosidad.

Una vez cargada las distintas variables en conjunto con el modelado en 3D es que se ejecutó el comando principal de ENVI-met, el cual realiza las simulaciones, llamado ENVI-Core, para generar resultados de la implementación propuesta. Finalmente, para la visualización de los resultados se utilizó el comando “LEONARDO” el cual entrega facilidades para la edición de las distintas variables que anteriormente fueron sumadas a la modelación, facilitando así la generación de variadas condiciones climáticas e infraestructurales. Haciendo de esta forma más digeribles los resultados.

### 7.3.1. Escenarios de Implementación.

Cuadro 3. Escenarios de implementación de las estrategias de mitigación. Fuente: Elaboración propia.

Escenario	Lugar de Implementación	Representación/ Modelación
Azoteas verdes	Azoteas con capacidad de carga, baja pendiente y accesibilidad.	
Fachadas verdes	Fachadas ciegas.	
Azoteas y Fachadas verdes	Unión de Ambas.	



#### 7.4. Creación de los lineamientos para azoteas y fachadas verdes.

Para finalizar los pasos de la metodología es que se elaboraron lineamientos para la implementación de Azoteas y Fachadas verdes en contextos estructurales densos, alta densidad urbana y escasa vegetación, con el fin de ayudar a la implementación de este tipo de infraestructuras verdes en otras ciudades. La variabilidad de las condiciones modeladas busco generar lineamientos que beneficiaran a la mitigación de las temperaturas diurnas de verano.

Los lineamientos consideraran la posición de las fachadas, la selección de los tipos de edificios para la implementación de azoteas, respecto a la altura del edificio, así como el tipo de azotea a fachada. Finalmente se propuso una batería de especies vegetales para el desarrollo de la estrategia de azoteas y fachadas, que no afecte el ecosistema interno de la ciudad y no se genere perjuicio sobre residente, como por ejemplo desarrollar la estrategia con especies con muchos cuidados y un alto consumo de agua para su manutención.

## 8. RESULTADOS.

En esta sección, los resultados obtenidos a través de los procesos y aplicaciones de los softwares, mencionados en la metodología, serán presentados como un análisis descriptivo y en orden respecto a los objetivos específicos.

### **8.1. Comportamiento e intensidad de la isla de calor urbano promedio diurna de verano en la comuna de Santiago Centro.**

Respecto a los factores urbanos presentes en el área de estudio se pudieron realizar bastantes apreciaciones sobre la influencia de estos en la especialización de las ICU.

En primer lugar, el sector centro de Santiago está caracterizado por una estructura urbana compacta y de altura, en la que se presentan 3 tipos de clasificación de ZCL creadas por Stewart y Oke (2017), estas son: B1 (compacto de altura), B2 (compacto de media altura) y B3 (compacto de baja altura). En la Fig. 5, se aprecia que estas tres tipificaciones de ZCL son las que presentan mayor porcentaje de espacialización en la comuna.

La Altura de Edificaciones, es el segundo factor urbano de mayor influencia para las ICU teniendo en cuenta la fórmula de Letelier (2020). Respecto al área de estudio, los sectores de mayor altura se encuentran entre las calles Teatinos, Av. Manuel Rodríguez, Estación Mapocho y Catedral; los edificios de altura son casi en su totalidad edificios residenciales, concentrándose la población. En comparación a esto, está el sector poniente de la Autopista Central, representado por edificaciones de media y baja altura, debido a la existencia de construcciones destinadas al bodegaje, casas y cites, manteniendo la estructura compacta.

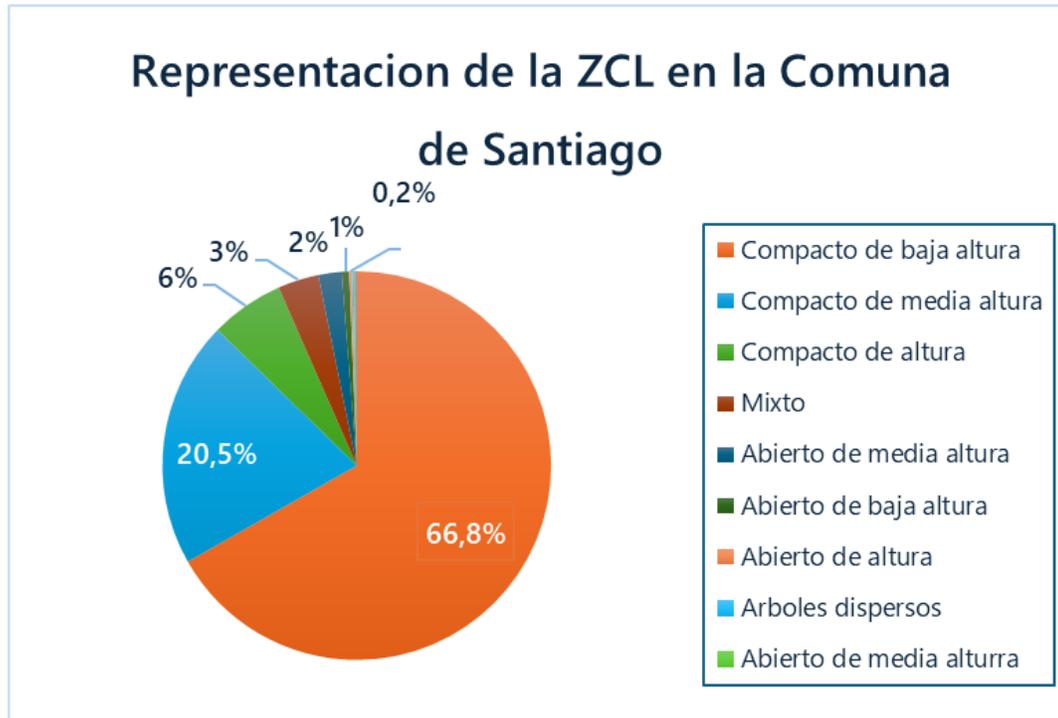


Figura 5. Representación de las ZCL respecto a las comunas censales de la comuna de Santiago.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la Densidad Demográfica la fórmula de Letelier (2020), demuestra que este factor urbano es el de mayor peso en la influencia de la ICU. Se observa una correlación directa entre la densidad poblacional y la altura de las edificaciones y la intensidad de las ICU. Considerando la concentración de la población en los edificios residenciales, la mayor densidad demográfica ocurre en el sector oriente de la Autopista Central, alrededor de la estación de metro Santa Ana, y cercano al Parque de los Reyes.

Las áreas verdes según la bibliografía es una gran estrategia para mitigar las ICU, por lo que es preocupante la escasez de m<sup>2</sup> respecto a la población en la comuna de Santiago Centro. Para el área de estudio, la presencia de áreas verdes públicas está representada por, Parque de los Reyes, la Plaza Santa Teresa de Los Andes (Fig. 6) y una pequeña plazuela en la esquina de la Calle San Pablo con Teatinos, plaza Ecuador (Fig. 7). La tipificación de las áreas verdes por el Minvu afecta en la interpretación de los estadísticos del SIEDU,

respecto a la cercanía de áreas verdes y metros cuadrados de áreas verdes per cápita, toman en cuenta la superficie de área verdes públicas, pero al no todas presentar una superficie vegetal tal como la plaza Santa Teresa de Los Andes (Fig. 6) los beneficios ecosistémicos de las coberturas vegetales no son reales.



Figura 6. Fotografía de la plaza Santa Ana. Fuente: Google, Street View. Mayo de 2023.



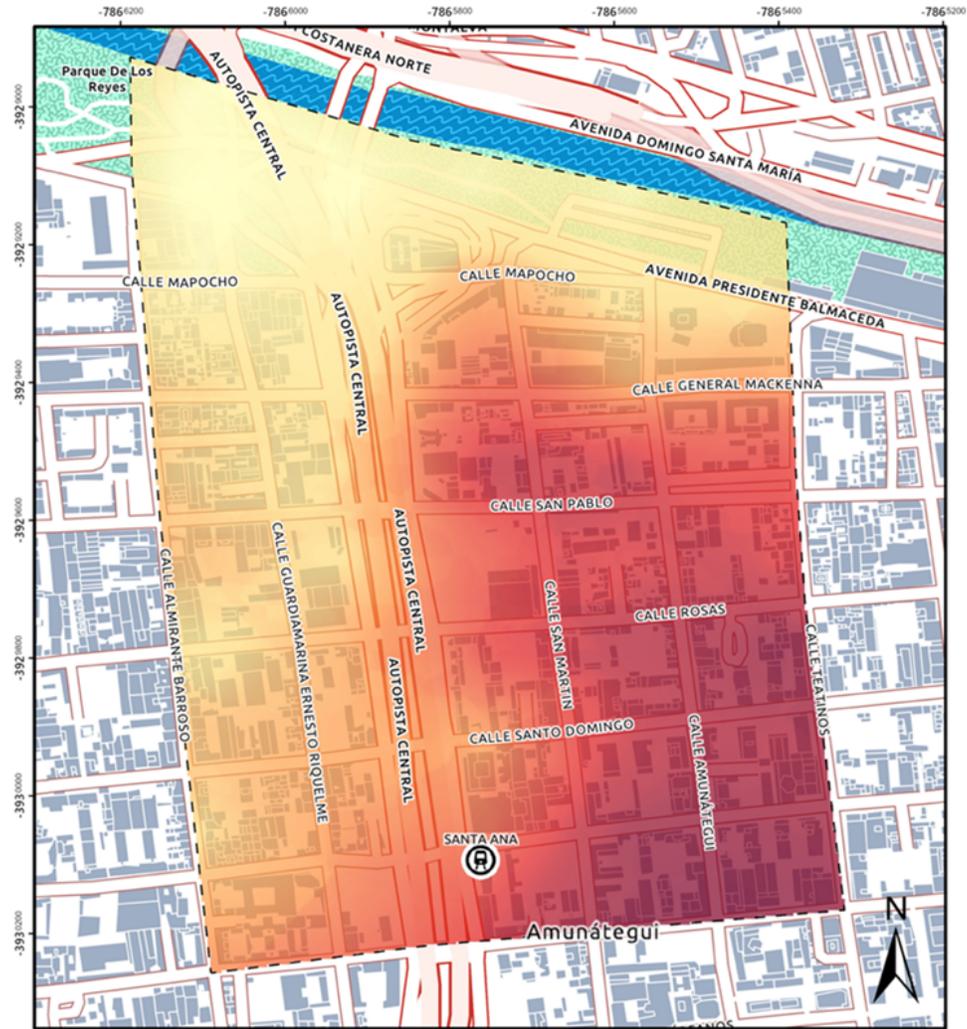
Figura 7. Fotografía de la plaza Ecuador. Fuente: Google, Street View. Mayo de 2023.

Aunque, inicialmente, se podría suponer que el calor generado tanto por el transporte vehicular público como personal tendría una influencia significativa en

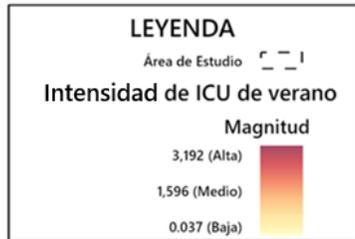
la formación de las ICU, los resultados de la regresión lineal presentan que es el factor de menor peso. Esta condición sugiere que, dentro del área de estudio, a pesar del constante flujo vehicular en el centro de Santiago durante el verano, la temperatura no se ve afectada por este factor. Pese a eso los sectores de intensificación del tráfico y calor vehicular se registraron en la Autopista Central y la Calle San Martín.

La cartografía de la intensidad de las ICU diurnas de verano (Fig. 8) muestran un foco de alta intensidad, alcanzando una temperatura de hasta 3,2°C. Este foco está localizado espacialmente en las calles Teatinos, San Martín, Amunátegui y Santo Domingo, En contraste a la zona de alta intensidad se puede apreciar que cercano al Parque de los Reyes, así como así al lado poniente de la Autopista Central, existe una baja intensidad de las ICU, asociando esto a la presencia de áreas verdes con superficies vegetales, así como a las construcciones de baja altura, pese a la compactibilidad.

En el sector suroriente del área de estudio muestra la mayor intensidad de la ICU, un sector predominante de por edificaciones de altura, un área clasificada como de B1 respecto a los postulados de ZCL, las cuadras de este sector son las que concentran la mayor cantidad de edificios superiores a los 10 pisos del área de estudios, sumado a su uso residencial es donde se presenta una alta densidad demográfica. También es el sector más alejado de un área verde. Pese a tener cercana la Plaza Santa Ana, es necesario recalcar la falta de superficie vegetal de la misma.



**INTENSIDAD DE LA ICU DE VERANO EN EL ÁREA DE ESTUDIO.**



Autor: Bastian Aliaga Acevedo  
 Referencias Cartográficas 1:6.000  
 Datos Cartográficos  
 PROYECCION: UTM  
 DATUM: WGS94  
 HUSO: 19S

**MAG**  
**EO**

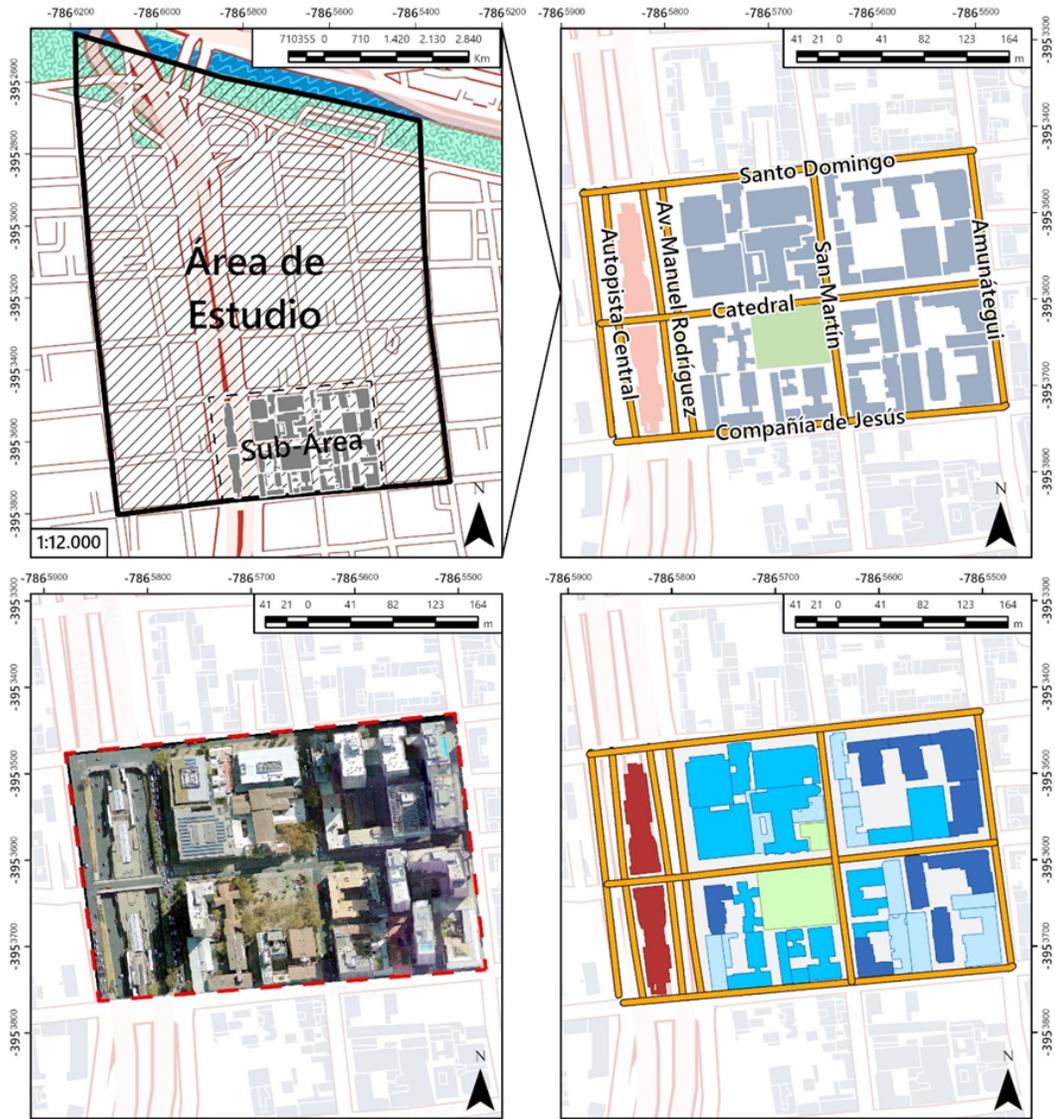
UNIVERSIDAD DE CHILE  
 FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO  
 DEPARTAMENTO DE



Figura 8. Intensidad de las ICU de verano en el Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia.

## **8.2. Selección de edificios con potencial para la implementación de azoteas y fachadas verdes en el área de estudio.**

Para la selección de los edificios con potencial para la implementación de las azoteas y fachadas verdes se consideró la creación una Sub-Área perteneciente al área de estudio original, para facilitar la simulación en cuanto a tiempo y recursos digitales. Esta Sub-Área está determinada por las calles Amunategui, Santo Domingo, Av. Manuel Rodríguez y Compañía de Jesús. La selección del área de simulación se basó en el sector de mayor accesibilidad para la implementación de las IV, de alto tránsito peatonal y cuadras que posean una un alto porcentaje de edificios de mediana y baja altura, además, es uno de los puntos de mayor intensidad de la ICU diurna de verano. Como se aprecia en la cartografía (Fig. 9), al norte y sur de las áreas verdes, plaza Santa Teresa de los Andes, se tienen dos cuadras que son clasificadas como B2 (compacto de media altura), debido a la presencia de edificios de altura media. Se consideró la incorporación de la salida del metro Santa Ana que se encuentra sobre la Autopista Central, ya que este sector presenta una cobertura de concreto y alta concurrencia de gente.



## SUB-ÁREA DE ESTUDIO: PRESENTACIÓN.

UNIVERSIDAD DE CHILE  
 FACULTAD DE ARQUITECTURA Y URBANISMO  
 DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA  
 POSTGRADO GEOGRAFÍA

<p><b>Leyenda</b></p> <p> Área de Estudio</p> <p> Sub-Área</p> <p><b>Leyenda</b></p> <p> Sub-Área</p>	<p><b>Leyenda</b></p> <p> Metro Santa Ana</p> <p> Áreas Verdes</p> <p><b>Leyenda</b></p> <p> Pisos Edificaciones 3 a 10</p> <p> 0</p> <p> 0 a 3</p> <p> &lt; a 10</p> <p> No Aplica</p>	<p><b>Leyenda</b></p> <p> Calles</p> <p> Calles</p>
---	---	---



Autor Bastian Aliaga Acevedo	Referencias Cartográficas 1:12.000/1:5.000	Datos Cartográficos PROYECCION: UTM DATUM: WGS94 HUSO: 19S
---------------------------------	---	---

Figura 9. Presentación de la subárea de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Previo al desarrollo del modelado y simulación de las azoteas y fachadas verdes en el área de estudio, se desarrolló una selección de estas a través de diversas consideraciones para llevar a cabo una simulación realista y sin afectar los espacios urbanos preestablecidos.

La selección fue en base a la normativa vigente, es decir, se utilizó de la azotea del edificio en un 100%, teniendo en consideración la modificación del artículo 2.6.3 de la OGUC, la cual previo a la modificación solo era posible utilizar el 25% de la azotea. Las características estructurales edificas, que según la Nch 3626:2020 hay que tener en cuenta tanto la pendiente, como el peso la azotea. Finalmente, la accesibilidad tanto de azoteas como de las fachadas fue basado en las características prácticas de los edificios ya que una mejor accesibilidad a la azotea ayuda a la disminución de gastos de implementación y mantención.

Respecto a las Infraestructuras Verdes implementadas, se realizó una selección tanto para la modelación de las azoteas como de las fachadas verdes. En específico con las fachadas, se utilizaron para la modelación Fachadas verdes Tradicionales de Piel Doble (FVTDP), debido al bajo costo de implementación, una mantención a largo plazo y a su fácil construcción. Este tipo de IV soporta primordialmente enredaderas. (Seguel, 2019). En cuanto a las Azoteas verdes, se realizarán las simulaciones con las Azoteas verdes Semi-intensivas, siendo la característica principal presentar especies de hasta 30cm, este tipo de AV soporta especies herbáceas y arbustivas, los costos de implementación son de bajos a medios y finalmente los pesos asociados con el sustrato en seco y húmedo son medios, ya que las especies que sostienen son pequeñas. (MINVU, 2021)

En conjunto con la selección de las IV para la simulación es que también se realizó una selección de la infraestructura urbana donde podrán ser implementadas. Para esta selección se recurrió a la bibliografía sobre estrategias de mitigación de ICU a nivel internacional. Respecto a las Azoteas verdes, se

seleccionaron edificios que tuvieran media y baja altura, debido a que, en estudios de azoteas verdes sobre confort térmico, estas IV sirvieron como amortiguador térmico respecto a la temperatura interior de los 2 pisos bajo la azotea, además se ha utilizado en muchos estudios como apoyo para la disminución en gasto energético del edificio, siendo más estudiado la variación de temperatura del aire interior que exterior. Por ende, al ser implementadas en edificaciones sobre 10 pisos los aportes socioambientales posibles de estas IV serán bajo o nulos.

Respecto a la accesibilidad, a través de una actividad en conjunto entre trabajo en terreno y fotointerpretación, se buscaron aquellos edificios que tuvieran acceso a la azotea de manera interior, facilitando así la construcción y la mantención de la infraestructura verde correspondiente.

Otro factor importante para la selección de las azoteas es la inclinación de los techos debido a motivos técnicos y funcionales. La inclinación influye en el drenaje del agua por lo que es necesario un rango pertinente que pueda facilitar el drenaje, una inclinación menor al 2%, puede generar una acumulación, afectar negativamente la salud de la vegetación, así como promover la proliferación de plantas no deseadas. Al contrario, en techos con una inclinación superior a 10°, existe un alto riesgo de deslizamiento de las capas de vegetación y los materiales estructurales. (Landscape Development and Landscaping Research Society, 2018); (MINVU, 2021)

Respecto a las Fachadas verdes (Cuadro 4), estas se implementaron solo hasta el piso 4 de las fachadas ciegas debido a la accesibilidad y la facilidad de la implementación de estas. Se seleccionaron los edificios que poseen fachadas ciegas que estén cercanas a la acera y de esta forma a los transeúntes. Debido a su forma de construcción no es necesario otro tipo factor para su selección.

*Cuadro 4. Identificación de las fachadas verdes y respectivas superficies. Fuente: Elaboración propia.*

<b>ID</b>	<b>Fachada (m2)</b>
<b>1FV</b>	95
<b>2FV</b>	112
<b>3FV</b>	40
<b>4FV</b>	100
<b>5FV</b>	32
<b>6FV</b>	32
<b>7FV</b>	32
<b>8FV</b>	260
<b>9FV</b>	100
<b>10FV</b>	200
<b>11FV</b>	100

En la cartografía (Fig. 10) se aprecia la selección de los edificios para la implementación de las azoteas verdes además de las fachadas que se utilizaron para la simulación en ENVI-met. Los edificios para la implementación de las AV (Cuadro 5) fueron el edificio de AFC Chile, ubicado en Santo Domingo 1510, el Banco Estado Sucursal de Santiago – Santa Ana, el edificio de SENADIS y Red de Protección social, estos dos últimos ubicados aledaños en la Av. Manuel Rodríguez, y los edificios residenciales ubicados aledaño a la plaza Santa Teresa de Los Andes y el edificio residencial ubicado en Catedral 1461.

*Cuadro 5. Identificación de la implementación de las azoteas verdes. Fuente: Elaboración propia.*

<b>Nombre</b>	<b>Dirección</b>	<b>Azotea (m2)</b>
<b>AFC</b>	Santo Domingo 1510	1384
<b>Banco Estado Santa Ana</b>	Santo Domingo 1578	1190
<b>SENADIS</b>	Catedral 1575	1991
<b>Edificio Residencial</b>	-	940
<b>Edificio Residencial</b>	Catedral 1461	514

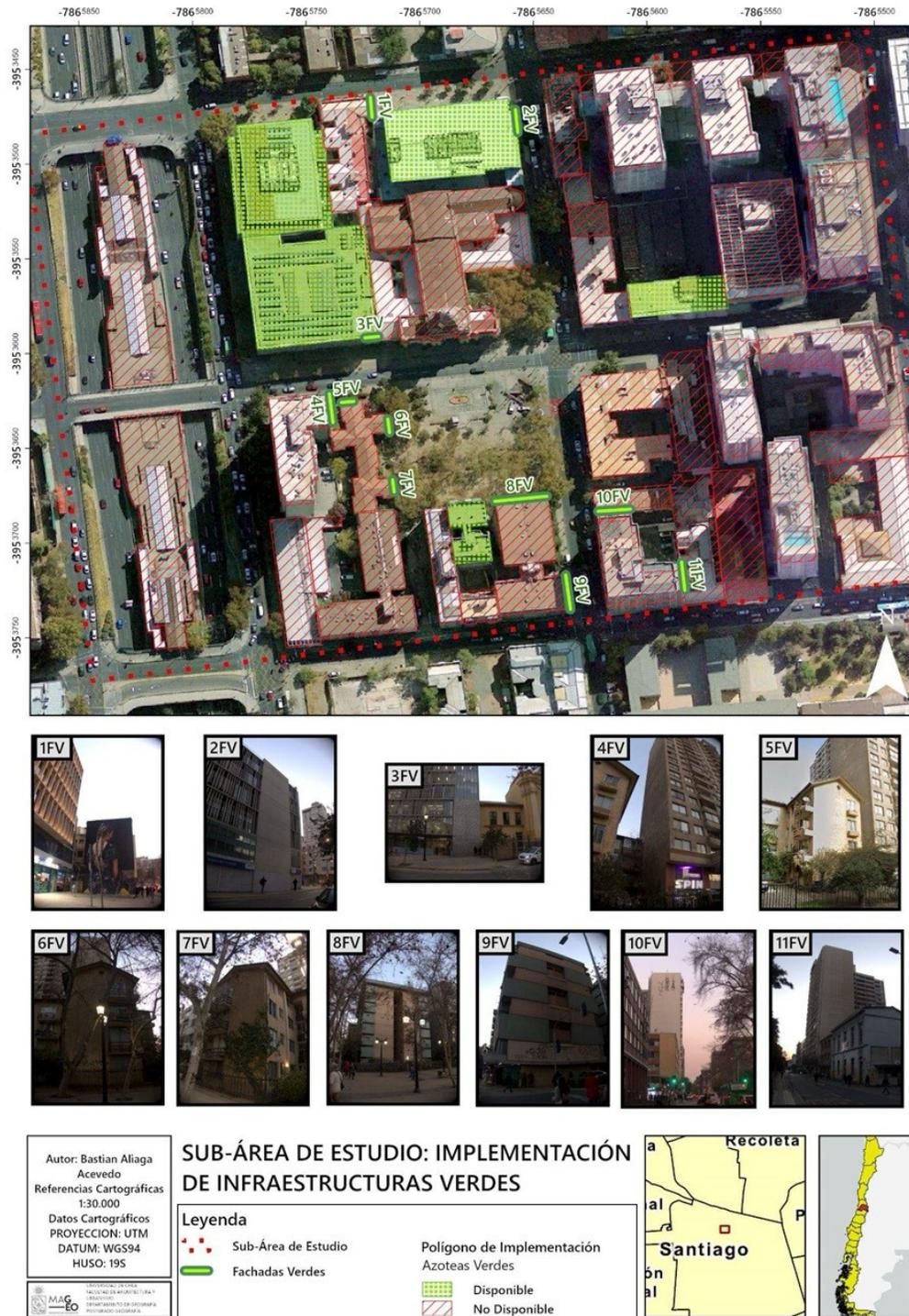


Figura 10. Subárea de estudio: implementación de las infraestructuras verdes. Fuente: Elaboración propia.

Para la implementación de las superficies frías respecto a las edificaciones, se aplicó sobre el techo, azotea o tejado de todas las construcciones posibles que se encuentren dentro de la clasificación de edificaciones de altura media (de 3 a 10 pisos) se aplicó en las fachadas ciegas se todos los edificios disponibles, finalmente se generó en la plaza Santa Teresa de Los Andes la simulación de que toda el área comprendida por el área verdes fuera pintada generando una superficie fría.

### 8.3. Implementación de diferentes escenarios de azoteas y fachadas verdes generados a partir de una modelación dinámica.

Luego de haber perimetrado la Subárea, seleccionando las azoteas y las fachadas según los criterios establecidos y determinado los tipos de AV a implementar, así como las FV, se procedió a crear la modelación en 3D de la zona de interés. El Software ENVI-met, es capaz de modelar la realidad a través de cubos con fin de simplificarla y así simular variables micro climáticas, tales como la Temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento, movimientos de partículas contaminantes, temperatura superficial, etc. Con estas simulaciones de factores ambientales se realizaron pruebas respecto a cómo se comportaría la Sub-Área en determinado momento y bajo ciertos parámetros (Cuadro 4).

Cuadro 6. Parámetros para la simulación en ENVI-met. Fuente: Elaboración propia.

<b>Fecha de inicio y duración de la simulación</b>	<b>Fecha</b>	31-01-2024
	<b>Tiempo de Simulación</b>	15 h
<b>Condiciones meteorológicas iniciales</b>	<b>Velocidad del viento</b>	2 m/s
	<b>Dirección del Viento</b>	Sur-Suroeste
<b>Configuración del Forzado simple</b>	<b>T° Aire (°C)</b>	min (T aire 8:00) 16.46
		máx. (T aire 19:00) 36.16
	<b>RH (%)</b>	min (HR% 18:00) 16.81
		máx. (HR% 10:00) 72.60

<b>Radiación solar y nubosidad</b>	<b>Cubierta de nubes</b>	2.00
<b>Datos de Salida</b>	<b>T° Aire</b>	°C
	<b>HR</b>	%
	<b>Velocidad del Viento</b>	m/s
	<b>Temperatura Radiante Media</b>	°C

El día 31 de enero del 2024 se seleccionó por el ser el día de mayor temperatura en el periodo estival más reciente a la fecha, alcanzando una temperatura máxima de 37.3 °C según los datos recopilados del DGAC respecto a los eventos de olas de calor en Santiago.

Respecto a la cantidad de horas de la modelación se basó en la cantidad de horas diurnas de los días estivales, en específico del 31 enero del año 2024, donde amaneció a las 7:03 AM y anocheció a las 8:55 PM, pese a esto las horas de simulación fueron en total 15, ya que se empezó a simular desde las 5 de la mañana hasta las 21 horas. Para el estudio de la simulación se describieron a través de 3 periodos de hora, a las 5 de la mañana, al inicio de la simulación, a las 2 de la tarde, considerándose el medio día verdadero, y finalmente a las 7 de la tarde donde la temperatura fue más alta dentro del Sub-área.

Respecto a los datos que se buscó obtener, fueron: la temperatura del aire, la Humedad Relativa, la velocidad del Viento y la temperatura Radiante Media (MRT, Mean Radiant Temperature, por sus siglas en inglés) factores simulados que son importantes para la determinación de la intensidad de la ICU además del confort térmico exterior de las personas en zonas urbanas.

En la figura 11 se muestra la modelación de la infraestructura urbana en el software ENVI-met, se respetó la altura de las edificaciones, se crearon los edificios bajo los materiales constructivos de sus fachadas para generar la simulación fiel a la realidad, ya que los materiales de fachadas y superficie son factores que de incidencia en la intensidad de las ICU. De esta forma se colocó

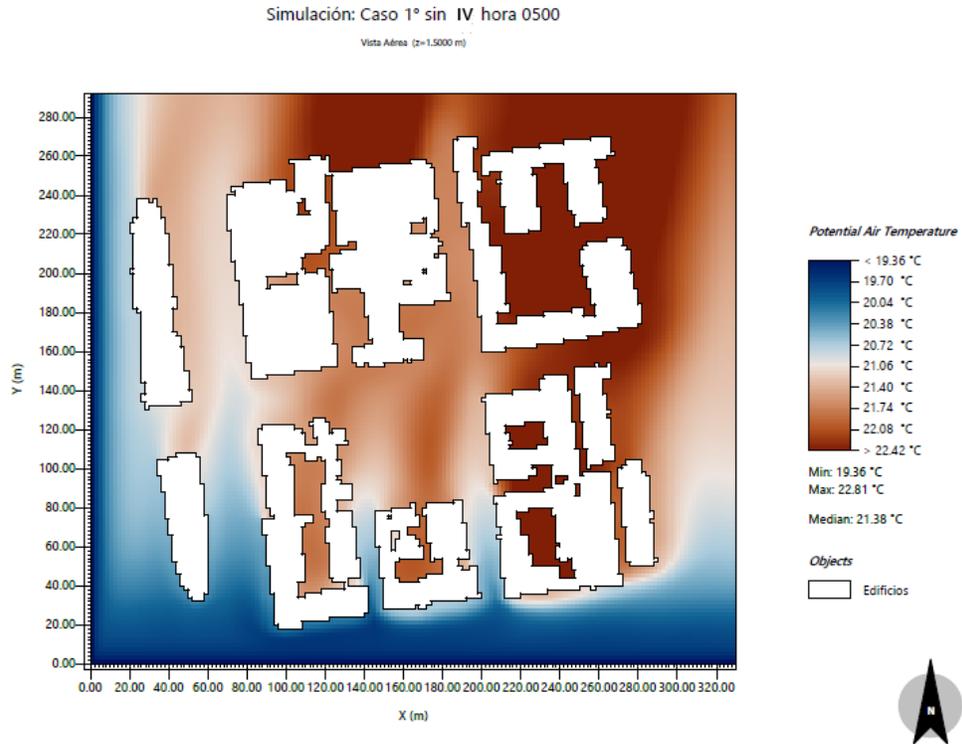
en la modelación los árboles respectivos y la materialidad de la superficie distinguiendo pavimento de carretera, calle y pasarelas.



Figura 11. Comparación imagen real con modelación de ENVI-met. Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.1. Resultados de la simulación sin la aplicación de IV: Caso N°1.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se realizó un estudio de 15 horas de simulación, de las cuales solo se muestran en la figura 12 las 5 de la mañana, las 14 horas (Fig. 13) y 19 horas (Fig. 14), el inicio de la modelación, el medio día real y la hora de mayor temperatura respectivamente. Otra información que se muestra en la figura X es la altura en que se está realizando el muestreo de la temperatura del aire, en este caso está a la altura de 1,5 m desde la superficie de la modelación.



ENVI-met 2024

Bastian Allaga Acevedo

Figura 12. Simulación del caso 1°: escenario sin IV a las 0500. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la temperatura del aire generada en las simulaciones, a las 5 de la mañana las temperaturas más altas se concentran al interior de los cañones urbanos, en especial entre los edificios de mayor altura (al noreste de la simulación de las 5 de la mañana) alcanzando temperaturas de hasta 22 °C, al mismo tiempo las zonas de menor temperatura se generan las afueras del complejo de edificios, esto ocurre por la forma en que está diseñada la modelación de los edificios. Concentrando las temperaturas más altas en los lugares donde la velocidad del viento se ve disminuida y el viento obstruido por las edificaciones.

Respecto a la simulación a las 14 horas se aprecia que ocurre una situación inversa a las 5 de la mañana. La inversión espacial de la temperatura comienza a las 12 del día respecto a los datos entregados por ENVI-met. En esta simulación las temperaturas más bajas están al interior de los cañones urbanos, donde el viento se ve obstruido por los edificios de mayor altura y la plaza Santa Teresa de Los Andes un sector que a pesar de no contar con superficie vegetal posee cierta cantidad de arbolado urbanos, siendo estos principalmente Plátano Hispánico, una especie arbórea muy utilizada en ornamentación urbana.

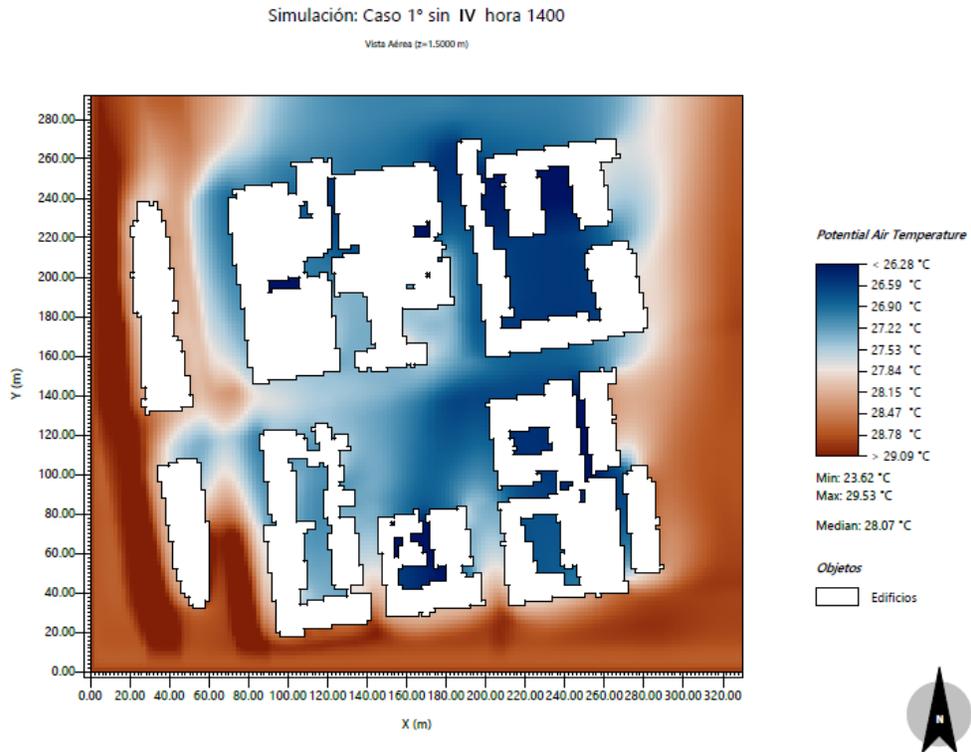


Figura 13. Simulación del caso 1°: escenario sin IV a las 1400. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la simulación de las 19 horas, la hora de mayor temperatura del día seleccionado, se mantiene la especialización de la intensidad de temperatura, es decir las temperaturas de menor intensidad están al interior del tejido urbano, y en los cañones urbanos más pronunciados, esto es explicado gracias a la falta de insolación de las superficies al interior de los cañones, dificultando el traspaso de energía y temperatura al aire. Pese a esto el rango de temperatura en las zonas transitables son de apenas 3 grados, considerando además la velocidad del viento, la MRT, factores que influyen sobre el calor sensible. Es decir, los transeúntes perciben una temperatura mayor al del aire seco circundante.

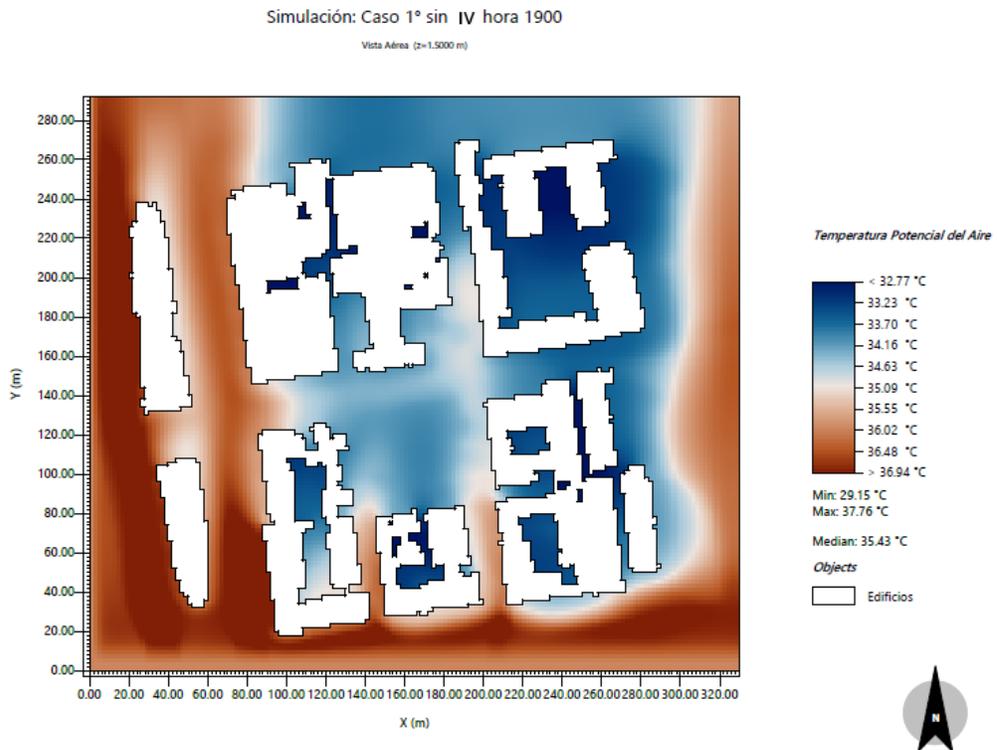


Figura 14. Simulación del caso 1°: escenario sin IV a las 1900. Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.2. Resultados de la simulación implementando Azoteas verdes: Caso N°2.

Para el caso N° 2, se realizó la simulación del Sub-Área con la implementación de las AV en los lugares previamente determinados en el objetivo 2, se utilizó cubierta para techos predeterminadas por el software ENVI-met con especie vegetales arbustivas con una altura máxima de 30 cm, para lograr representar una AV semi-intensiva en la simulación. Para comprender como las AV afectan en la temperatura del aire seco circundante es que se realizó una comparación a través de la herramienta Leonardo de ENVI-met, esta comparación se basó en la superposición de las temperaturas de la simulación sin la implementación de IV y la simulación con AV. Al igual que en el caso N°1 se seleccionaron las 5 de la mañana (Fig. 15), las 14 horas (Fig. 16) y las 19 horas (Fig. 17).

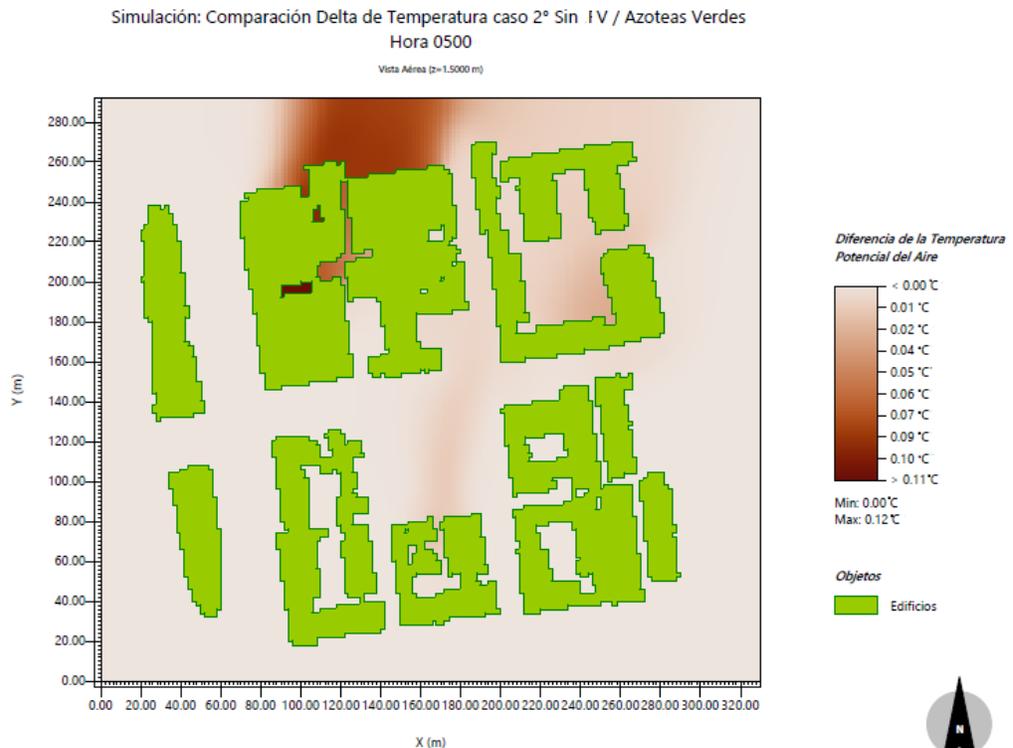


Figura 15. Simulación del caso 2°: escenario sin IV/ azoteas verdes a las 0500. Fuente: Elaboración propia.

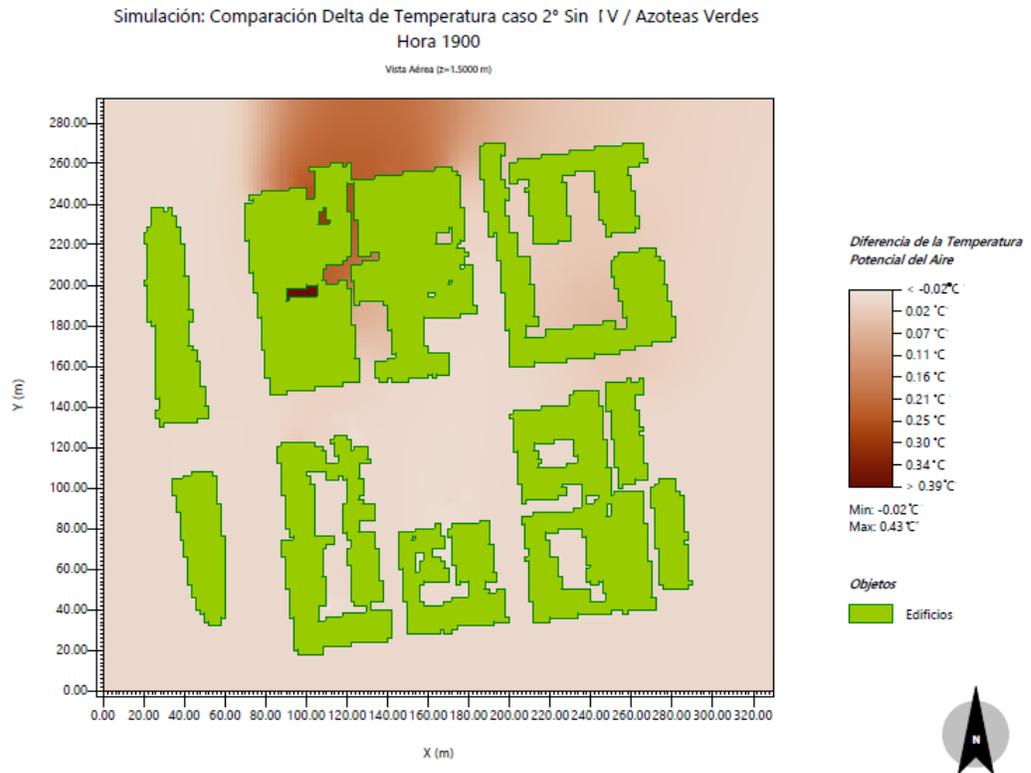
A una altura de 1,5 metros desde la superficie de la modelación es que se aprecia que la implementación de las AV en los Edificios del Banco estado, la AFC y el SENADIS en conjunto, generaron una disminución de la temperatura del aire a la altura de los transeúntes. Dicha disminución de la temperatura se observa en las tres horas seleccionadas, pero cabe destacar que a las 5 de la mañana, y a las 19 horas, las AV que fueron simuladas en los edificios residenciales y presentan una menor superficie vegetal, logran generar una leve disminución de la temperatura del aire circundante, esto es apreciado por el cambio de color al noroeste de los edificios donde se implementó las AV.



*Figura 16. Simulación del caso 2°: escenario sin IV/ azoteas verdes a las 1400. Fuente: Elaboración propia.*

Respecto a la espacialización de la disminución de la temperatura del aire, esta se predispone en dirección noroeste, debido a la influencia de la dirección del viento predominante en la comuna de Santiago según el DGAC, sur-suroeste. En todas las simulaciones es posible determinar esta influencia sobre la temperatura del aire sin importar la hora, debido a que se mantiene esta dirección al largo de toda la simulación por la realización de un forzado simple de simulación. (ENVI-met, 2024).

Respecto a la  $T^{\circ}$  del aire, se observa que la unión de las azoteas del Banco Estado de Santa Ana, la AFC y el SENADIS han generado una disminución de la  $T^{\circ}$  al nivel transeúntes, esto se logra gracias a la suma de casi 3 mil metros cuadrados de AV. Respecto a las azoteas más pequeñas en extensión, se ve una incidencia en la disminución de la  $T^{\circ}$  pero mínima, dando a entender que la extensión de la azotea es primordial para lograr una variación negativa en esta. En cuanto al delta máximo de  $T^{\circ}$  a la altura de 1,5 m sobre la superficie de modulación, figura X, es de -0,12, -0,26 y -0,43  $^{\circ}\text{C}$ , a las 5 de la mañana a las 14 horas y las 19 horas respectivamente. Se puede asegurar que la amplitud del delta de  $T^{\circ}$  ocurre con el aumento de la temperatura del aire. La mayor variación de temperatura ocurre a las 19 horas, llegando a ser de medio grados, pese a parecer una variación mínima es necesario tener en cuenta una variación tanto en la humedad relativa como en el MRT y la velocidad del viento, factores claves para el cálculo de calor sensible y las estimaciones del confort térmico.



ENVI-met 2024

Bastian Allaga Acevedo

Figura 17. Simulación del caso 2°: escenario sin IV/ azoteas verdes a las 1900. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, hay que destacar una característica interesante que ocurre respecto a las AV y la altura es que se realiza el mapeo. A medida que se aumenta la altura es mayor el delta negativo de  $T^{\circ}$ , es decir, que al acercarse a la azotea mayor es la disminución de la temperatura del aire circundante, es una similitud con las presencias de áreas verdes en las ciudades, ya que presenta una relación inversa respecto a los beneficios de las de las Áreas Verdes y a la distancia de esta.

Respecto a la figura 18, muestra un corte a los 89 m del eje X y representa una vista de los ejes Y/Z, aquí se observa como varía la temperatura alrededor de la

AV en cuanto a la altitud, también que el punto de mayor delta es justo sobre la azotea, alcanzando una variación de  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  y que al alejarse de la AV en altura comienza a disminuir el rango de variación. Por lo que se realizó un nuevo mapeo de vista aérea sobre la subárea, pero ahora la altura es de 22,5 m respecto a la superficie de modelación (Fig. 18).

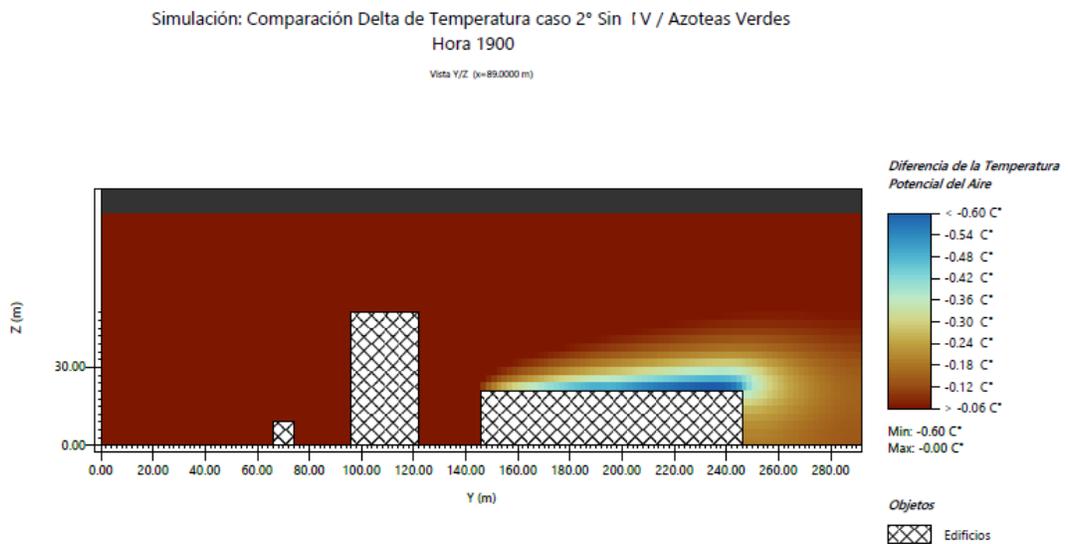
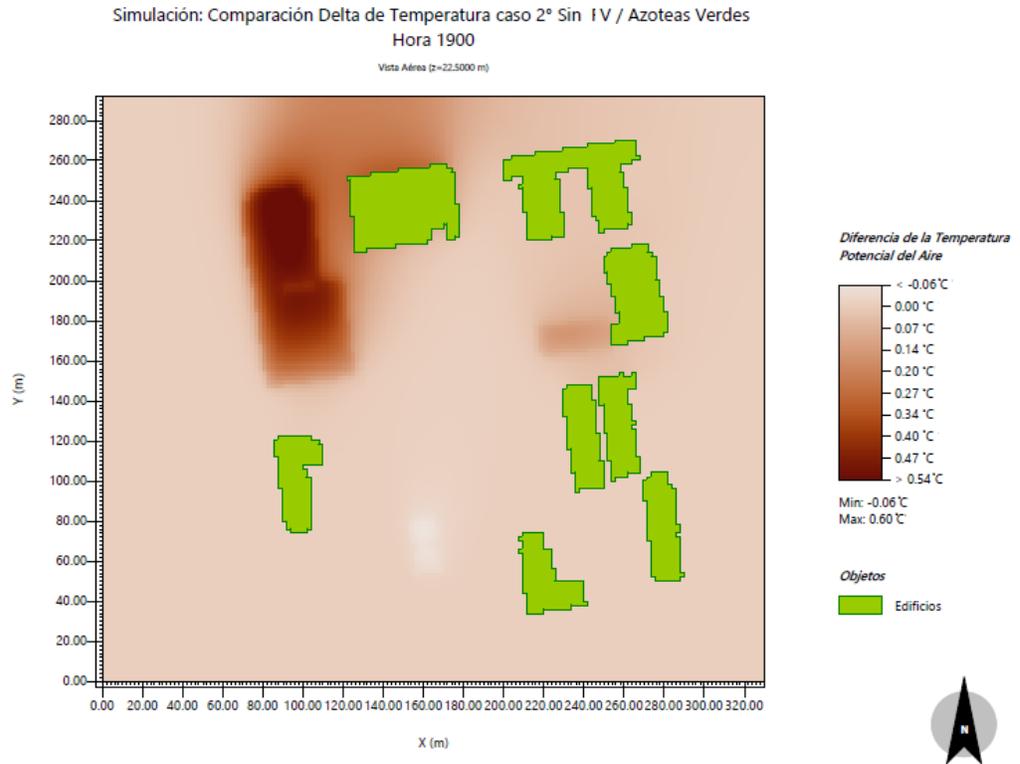


Figura 18. Simulación del caso 1°: escenario sin IV/ azoteas verdes a las 1900. Perfil ejes y/z (x=89 m). Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la simulación el mayor rango de amplitud está en las 19 horas, horario de mayor temperatura, llegando a un máximo de  $-0,4$  grados a 1,5 m y a la altura de 22,5 m altura (nivel superior a la azotea del Banco Estado de Santa Ana y SENADIS) la variación máxima de temperatura llega a los  $-0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Como se aprecia en la figura 18, la menor temperatura se especializó sobre la AV y

mantiene la forma de la azotea. Esto se da por la presencia de la vegetación y la transferencia de temperatura y energía generada por la evapotranspiración.



ENVI-met 2024

Bastian Allaga Acevedo

Figura 18. Simulación del caso 2°: escenario sin IV/ azoteas verdes a las 1900. (z=22.5 m) Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.3. Resultados de la simulación implementando Fachadas verdes: Caso N°3.

La simulación N° 3 se basó en solo la implementación de las fachadas verdes en las 11 locaciones predispuestas en el objetivo N° 2. Al igual que en el caso N° 2 de simulación se realizó una comparación de las T° del aire, entre la simulación sin IV y la simulación con FV implementadas.

Respecto a la espacialización del delta de  $T^\circ$ , existió una disminución en todas las horas de simulación, pero no todas las implementaciones tuvieron una misma incidencia respecto a la disminución de la  $T^\circ$  y su forma de afectar al aire circundante, por ejemplo, las fachadas FV1 y FV2 no presentan la misma incidencia de cambio de  $T^\circ$  del aire como lo las colocadas cercanas a la plaza Santa Teresa de Los Andes, siendo estas las que lograron mayor delta en las simulaciones.

Respecto al delta de  $T^\circ$ , la implementación de FV presentó la misma variación durante todas las horas de la simulación por lo que se presenta a las 1900 horas (Fig 19) llegando a ser el máximo  $-0,11^\circ\text{C}$ , respecto a la simulación sin IV. Esto se debe a que las FV a diferencia de las AV están presenta a la altura de 1,5 m sobre la superficie de la modelación todo el tiempo por lo que sus beneficios atmosféricos, se mantienen a lo largo de la altura, lo que hace que sus beneficios sean mayores, no es su altura, sino más bien su extensión lateral. Otra característica por destacar al paso horario y que se observar de las cartografías, es que, a las 19 horas, el área de incidencia de la FV puesta al sur de la plaza Santa Teresa de Los Andes tiene un aumento en el área de incidencia respecto al delta de  $T^\circ$ .



Figura 19. Simulación del caso 3°: escenario sin IV/ fachadas verdes a las 1900. Fuente: Elaboración propia.

El mayor delta de  $T^{\circ}$  del aire es de  $-0,15$  grados centígrados presentándose a las 5 de la mañana (Fig. 20) y presenta una leve varianza al correr las horas. Estando dentro del rango de 2 - 5 m de la FV es posible beneficiarse de esta disminución de  $T^{\circ}$ . Al igual que las AV que al alejarse de estas disminuyen los beneficios térmicos, pero en diferencia de altura, al alejarse de las FV en horizontalidad también se disminuyen sus beneficios térmicos.

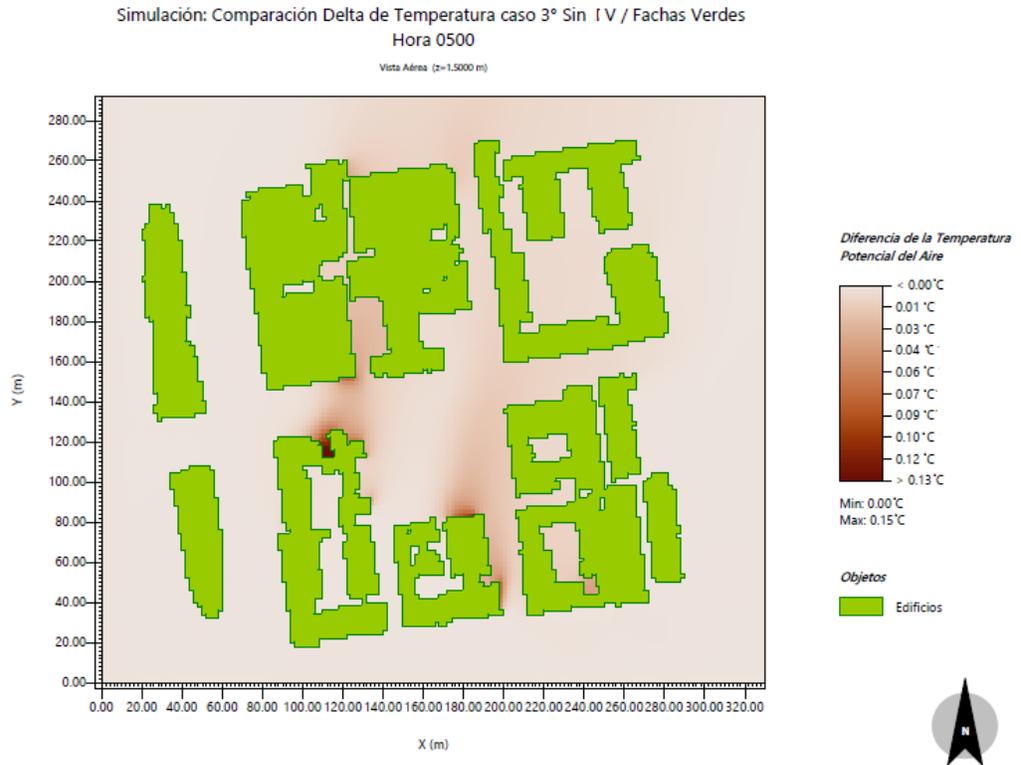


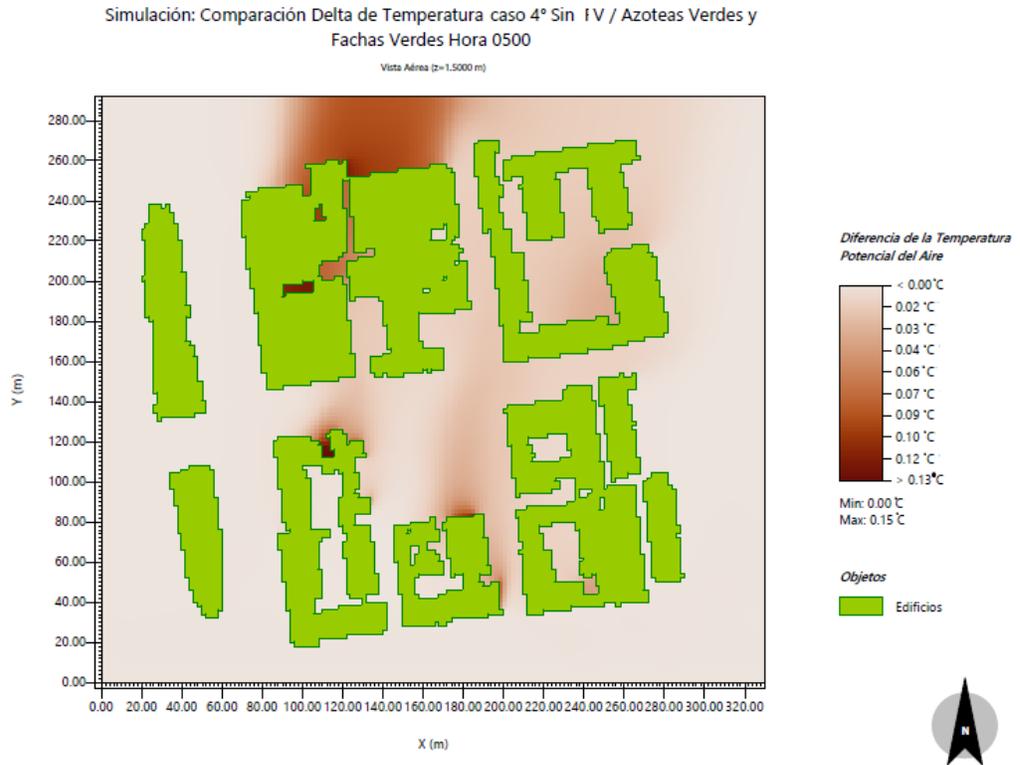
Figura 20. Simulación del caso 3°: escenario sin IV/ fachadas verdes a las 0500. Fuente: Elaboración propia.

Por último, el delta de  $T^\circ$  es del orden de los  $0.1^\circ\text{C}$  situación que se debe entender desde la aplicación específica de esta simulación, es decir, comprender los factores atmosféricos, lugares de implementación de las FV, así como su extensión en el eje horizontal, por último, recalcar que también existen factores que en conjunto ayudan a determinar el calor sensible. Tales como lo en la HR y la MRT los que con esta estrategia de IV afectan directamente sobre los transeúntes.

#### **8.3.4. Resultados de la simulación implementando azoteas y fachadas verdes: Caso N°4.**

Respecto a la implementación del conjunto de IV del cual se está realizando el estudio al igual que en los casos anteriores también se realizó una comparativa entre las  $T^{\circ}$  del aire con el caso sin IV y el caso N°4 con las AV en conjunto con las FV.

Al observar las cartografías es posible determinar que las FV solo tienen una mayor incidencia sobre la  $T^{\circ}$  del aire circundante a las 5 de la mañana (Fig. 21), pero esto es solo parte de la representación gráfica otorgada por el software ENVI-met, ya que el rango de variación de la temperatura a las 5 de la mañana es el menor respecto a las otras visualizaciones, por lo que es más notorio su incidencia. Como fue mencionado durante el caso N°3 las fachadas generan un delta similar en todas las simulaciones horarias, en cambio las AV aumentan el rango de delta a medida que avanza el día y aumenta la temperatura, logrando que la visualización del cambio de temperatura de las FV sea imperceptible, es más dado que el rango de las 19 horas (Fig. 22) es el más grande, las FV parecen tener ningún aporte a los beneficios de en el delta de  $T^{\circ}$ .



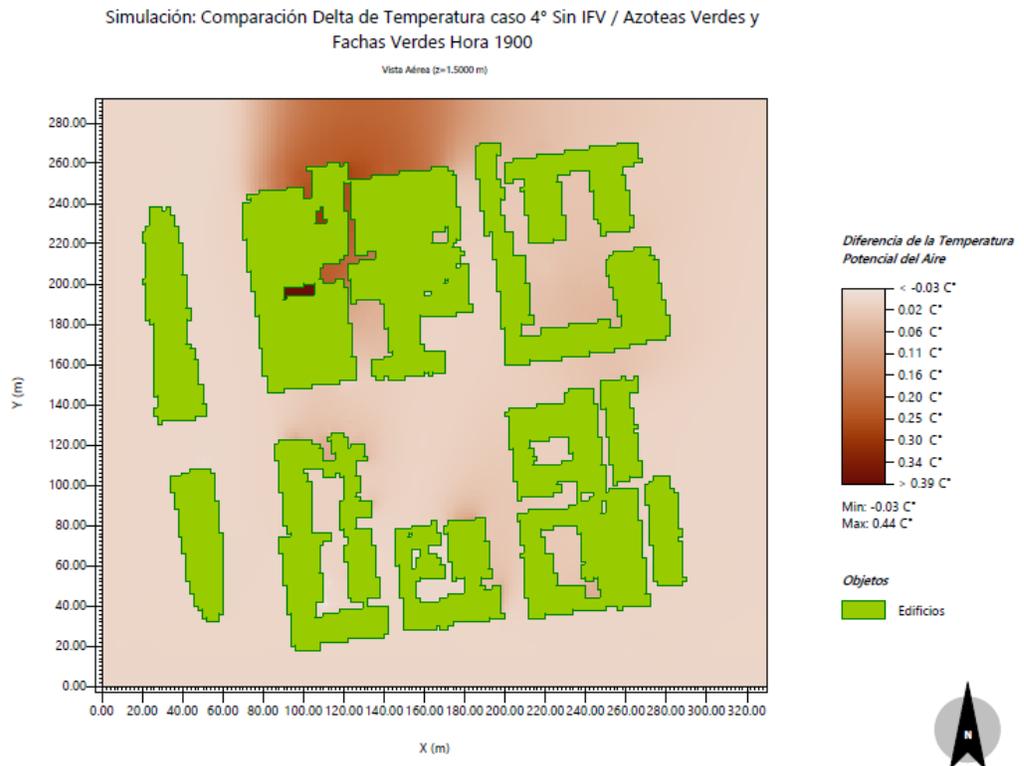
ENVI-met 2024

Bastian Allaga Acevedo

Figura 21. Simulación del caso 4°: escenario sin IV/ fachadas verdes a las 0500. Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la suma de las IV para esta simulación, la unión de las dos estrategias se suma para bajar las temperaturas del aire que esta circundante a estas, pero es despreciable visualmente en este experimento no así a través de los datos. En primer lugar, el delta de  $T^{\circ}$  otorgado por la implementación de FV es el orden de los  $-0.1^{\circ}\text{C}$ , logrando un cambio leve en la  $T^{\circ}$  pero no así despreciable. Es más, se puede observar la suma entre los rangos de  $T^{\circ}$  del caso N° 2 y el caso N° 3, para determinar el máximo delta.

El mayor apoyo generado por la implementación de ambas estrategias es más perceptible a las 5 de la mañana, condiciendo con los resultados del caso N° 3 donde la implementación de FV tenía mayor incidencia a esta hora, pero aun así es del orden de los centesimales.



ENVI met 2024

Bastian Allaga Acevedo

Figura 22. Simulación del caso 4°: escenario sin IV/ fachadas verdes a las 1900. Fuente: Elaboración propia.

### 8.3.5. Resultados de la simulación implementando Azoteas verdes, Fachadas verdes y Pavimentos Fríos: Caso N°5.

Respecto a la implementación del conjunto de IV con las superficies frías el cual en este caso fue sobre el pavimento (por lo que ahora se denominara pavimentos fríos) de la plaza Santa Teresa de los Andes, para que exista un efecto directo

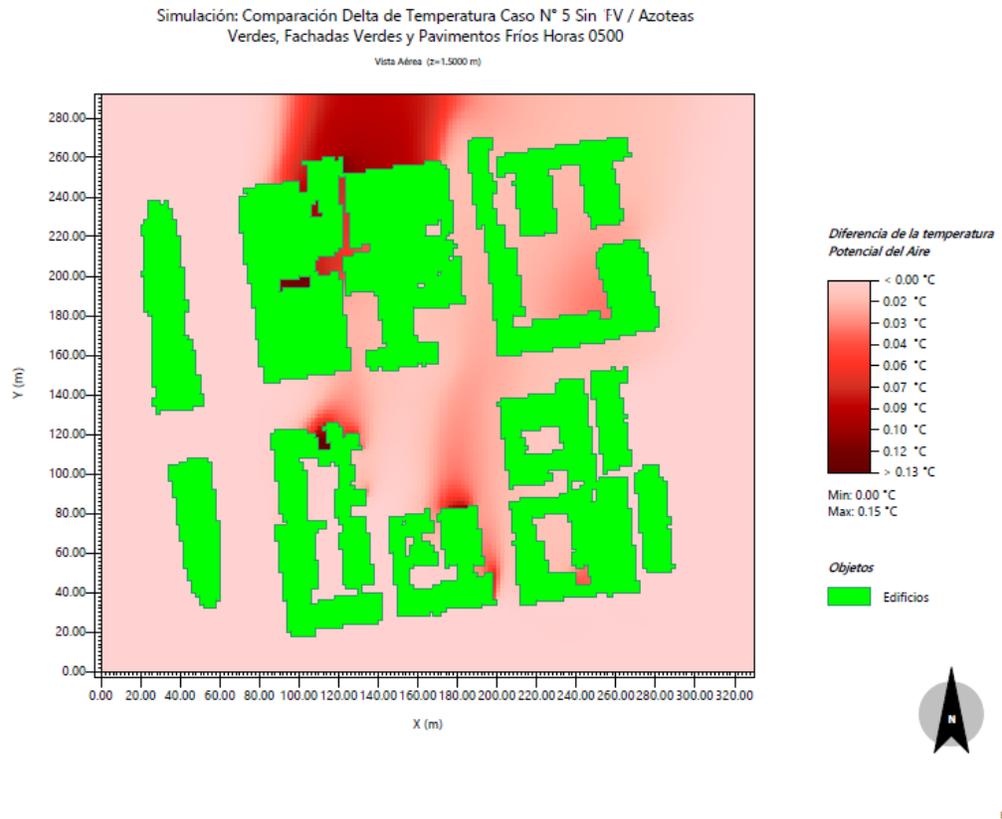
sobre los transeúntes y estos puedan beneficiarse directamente. Al igual que en los casos anteriores también se realizó una comparativa entre las  $T^\circ$  del aire con el caso sin IV y el caso N°5 con las AV en conjunto con las FV y los pavimentos fríos. Además, se realizó una comparación entre el MRT de la superficie de la plaza Santa Teresa de los Andes con los pavimentos fríos y sin ellos.

En la figura 23 se aprecia la comparación de la temperatura del aire entre el escenario sin estrategias de mitigación y su implementación, a las 0500 horas. Es posible apreciar que a esta hora donde aún no amanece, el efecto físico de las superficies frías no comienza por lo que no se aprecia ninguna disminución de  $T^\circ$  sobre la plaza, es más solo es apreciable la disminución de  $T^\circ$  que otorgan las IV.

Teniendo en cuenta que es necesaria la presencia del sol para que las superficies frías produzcan su efecto es que se visualizó el caso 5° a las 1900 horas (Fig. 24) en donde se aprecia una gran disminución de  $T^\circ$  sobre el pavimento frío llegando a un máximo de 0.9 de delta negativo. Situación bastante significativa respecto a la implementación de IV.

Un caso bastante particular y que puede compararse con las azoteas verdes en el caso 2° a los 22.5 m (Fig. 18) es que ambas estrategias contemplan una disminución directamente sobre donde son implementadas, es decir, el mayor delta negativo de temperatura termina en el límite superficial de la estrategia implementada, es pocas palabras viendo la figura 24 es posible determinar donde fue aplicado el pavimento frío y donde no.

Respecto a la comparación con la variante de MRT es que se puede apreciar casi las mismas situaciones de las diferencias de la temperatura del aire, se mantienen los límites de sus beneficios térmicos ligados a los límites superficiales de su implementación.



*Figura 23. Simulación del caso 5°: escenario sin IV/ azoteas verdes, fachadas verdes y superficies frías. a las 0500. Fuente: Elaboración propia.*

Respecto a la Figura 25, que muestra el caso 5° a las 0500 horas se aprecia levemente una variación del MRT que prácticamente dibuja el borde de donde fueron implementado el pavimento frío. La disminución de la  $T^{\circ}$  se mantiene en el orden de las centésimas de grados, siendo casi imperceptible, considerando lo ligado del MRT con el confort térmico.

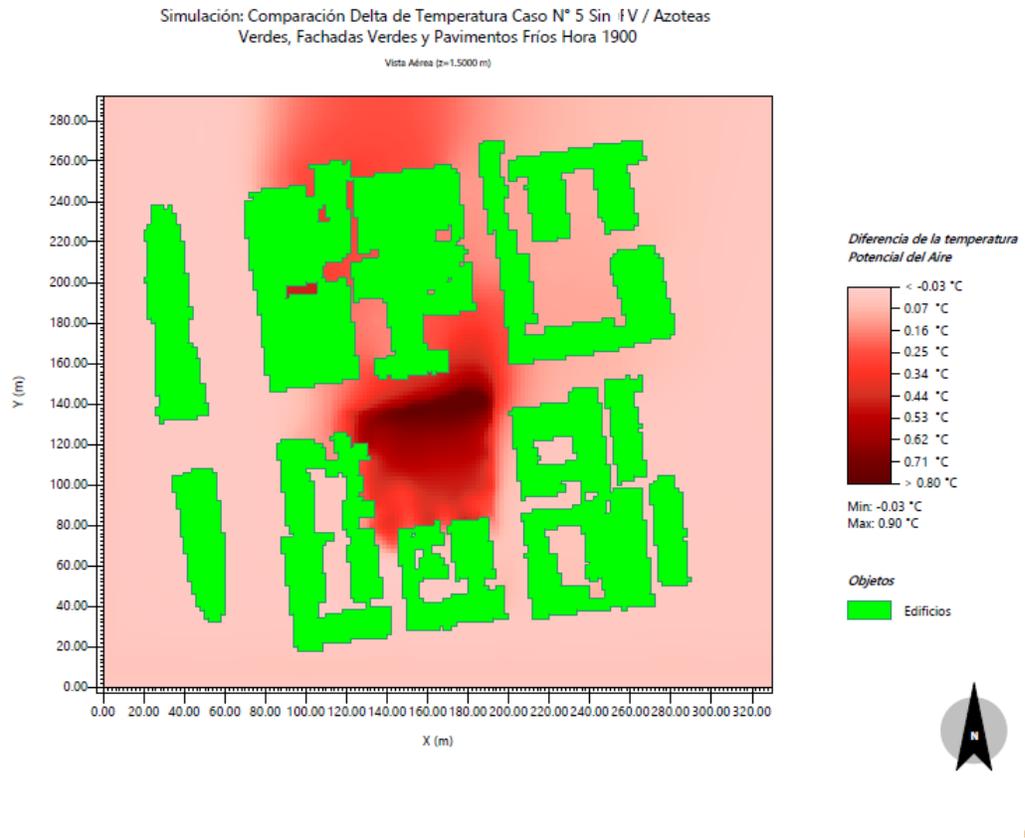


Figura 24. Simulación del caso 5°: escenario sin IV/azoteas verdes, fachadas verdes y superficies frías. a las 1900. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 26 muestra la comparación de MRT para el Caso 5° a las 1900, los visualizado es un delta negativo de temperatura de 12.36 °C, siendo este resultado el mayor visualizado a lo largo de todos los escenarios propuestos. Con esto es posible determinar una mejora del confort termico sobre la plaza Santa Teresa de los Andes.

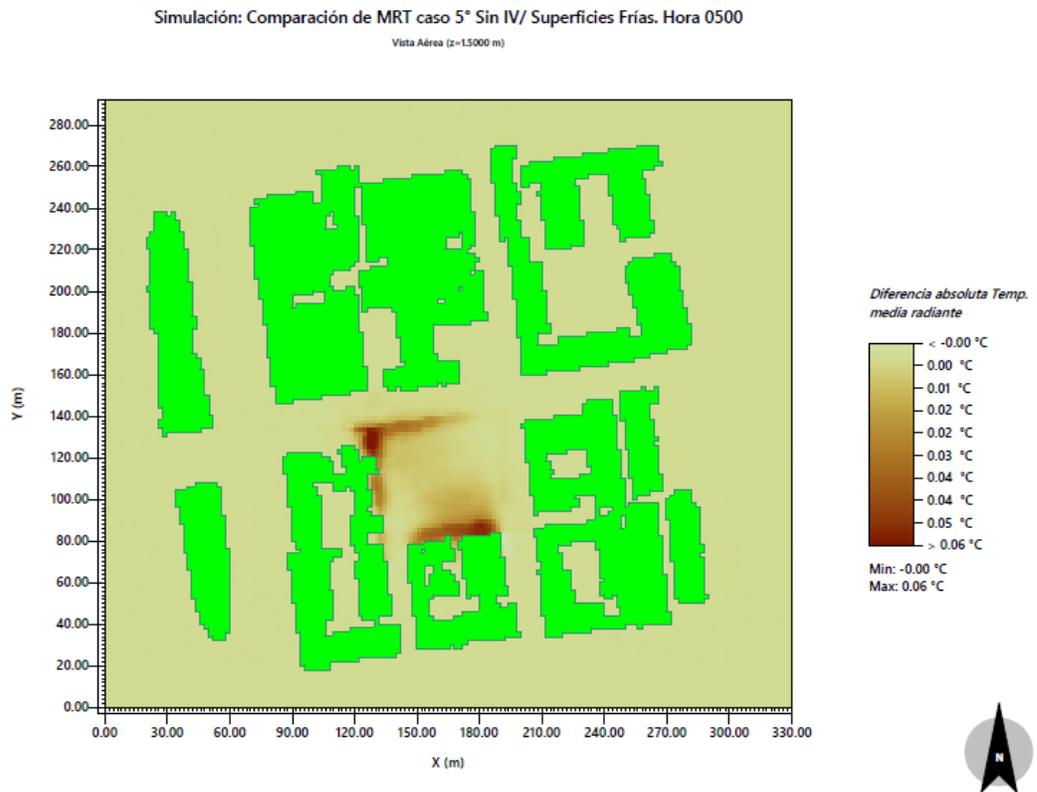


Figura 25. Simulación del caso 5°: escenario sin IV/ azoteas verdes, fachadas verdes y superficies frías. a las 0500. Comparación de MRT. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente cabe destacar que las estrategias de mitigación al menos entre las IV y las superficies frías no se complementan en la mitigación de las altas temperaturas del aire seco, es decir, no se suma la disminución otorgada por las IV con la de las superficies frías.

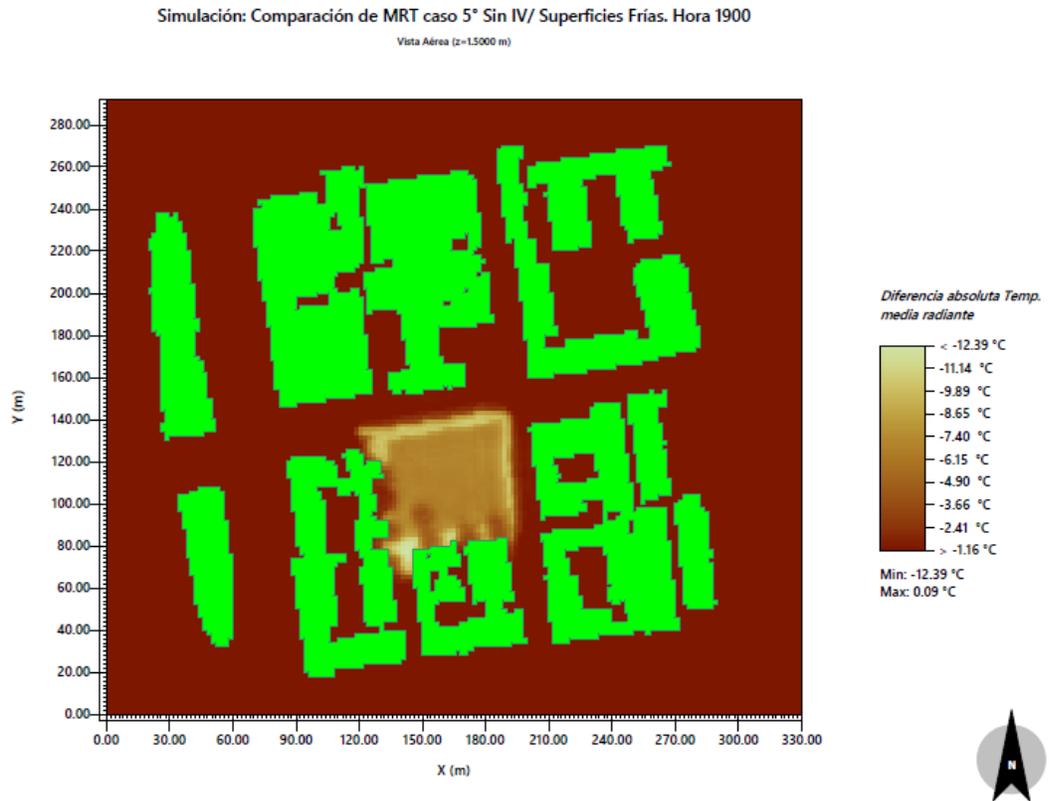


Figura 26. Simulación del caso 5°: escenario sin IV/ azoteas verdes, fachadas verdes y superficies frías. a las 1900. Comparación de MRT. Fuente: Elaboración propia.

#### 8.4. Proponer lineamientos para la implementación de azoteas y fachadas verdes que contribuyan a disminuir la temperatura de verano en áreas urbanas de alta densidad poblacional y estructural.

Para el desarrollo de los lineamientos a considerar para la implementación de las fachadas y azoteas verdes se generaron dos propuestas. Una centrada en los aspectos técnicos y estructurales para la implementación de las infraestructuras

verdes evaluadas y otra respecto a las especies vegetales a utilizarse en base a los estudios y pruebas ya realizadas en el país.

Las propuestas estructurales para la implementación de las azoteas verdes según los resultados y la bibliografía estudiada esta resumida en el cuadro a continuación (Cuadro 7).

*Cuadro 7. Propuestas para la implementación de las azoteas y fachadas verdes. Elaboración propia.*

Propuesta	Característica	Apoyo Experiencial / Bibliográfico	Efecto sobre la ICU	Como Aplicarse
<b>Tipo de Azotea Verdes</b>	Utilización de azoteas Extensivas y Semi-Intensivas en edificios ya construidos, por su Costos medios-bajos y el bajo peso por m2	En la región Metropolitana, existen al menos 18 experiencias de Azoteas verdes, en casi totalidad Extensivas y Semi-Intensivas. Aplicadas en Hospitales, Malls y Universidades	Mitiga la ICU a través de la creación de nuevas áreas verdes en zonas con cubiertas de concreto.	Se propone la implementación de este tipo de azoteas en edificios de baja o mediana altura, para que los beneficios térmicos puedan ser aprovechados por transeúntes.
<b>Extensión de la Azotea</b>	Utilizar el mayor porcentaje de la azotea	Desde el 2019 se puede utilizar toda la superficie de la azotea debido al cambio de leyes, considerar el Nch3626:2020(Instituto Nacional de Normalización, 2020) para la implementación de las IFV expuestas	Mitiga la ICU a través de la creación de nuevas áreas verdes en zonas con cubiertas de concreto.	Dada la rectificación de la ley es posible utilizar el 100% de la azotea para la implementación de las Azoteas verdes, fuera de la superficie creada para otros usos, de recreación o accesibilidad.
<b>Pendiente</b>	Utilizar azoteas planas o una pendiente máxima de 8,5°	Guidelines for the Planning Construction and Maintenance of Green Roofing, 2018. MINVU, 2021	Aporte indirecto a la mitigación de la ICU debido a que considera el soporte de las IFV	Se propone la selección de azoteas que tengan inclinaciones menores a 8,5°, edificios viejos y nuevos. Además, se propone una modificación de las normativas de construcción beneficiando la creación de azoteas accesibles y planas.

<b>Clima</b>	Considerar la zona climática	Guidelines for the Planning Construction and Maintenance of Green Roofing, 2018. MINVU, 2021	Tener en cuenta la climatología local de la ciudad para desarrollar la implementación de las IFV	Se deben considerar las condiciones climáticas para la selección de las especies vegetales que se implementaran en las Azoteas verdes. Insolación, temperatura, velocidad del viento. Estas características afectan tanto a las especies vegetales tanto como al soporte de la AV, respecto al sustrato.
<b>Riego</b>	Considerar riego por goteo o AV Hidropónicas*	Castro, 2017 Moreno, 2017 guidelines for the planning construction and maintenance of green roofing, 2018.	El tipo de especie vegetal, tienen mayor o menor evapotranspiración debido a la resistencia estomática, ligada al riego.	Considerar el tipo de vegetación para la implementación de la Azotea verdes, es necesario para tener él cuenta el riego y así su resistencia a la sequía.
<b>Políticas Publicas</b>	Creación de políticas publicas	Guidelines for the Planning Construction and Maintenance of Green Roofing, 2018. MINVU,2021. Nch3626:2020 (Instituto Nacional de Normalización, 2020)	No mitiga de forma directa el ICU	Generación de políticas públicas que fomenten las implementaciones de AV.

Se propone implementar azoteas semi-intensivas y extensivas, de especies arbustivas y herbáceas respectivamente, en los edificios de baja y media altura ya existentes.

La propuesta de este tipo de AV es en base a la implementación en la estructura urbana ya creada, es decir aprovechar los espacios de los edificios no utilizados y que forman parte del paisaje urbano. Considerando los resultados de la sistematización es que se consideró aplicar las IV en los edificios más bajos para que los beneficios ambientales y los aportes a la mitigación de las ICU fuera beneficioso para los transeúntes. En conjunto con lo anterior se excluye la implementación en edificios sobre los 10 pisos debido a que resultados sobre la temperatura externade los edificios no es de alta influencia con edificios altos los beneficios para la población es mínima. Además, la propuesta de este tipo de AV extensiva y semi-intensivas en edificios viejos se basa en la capacidad de carga de estos, ya que los pesos van de 50 a 350 kg/m<sup>2</sup>.

**Utilizar la mayor cantidad de m disponibles de las azoteas.** El decreto n47, de vivienda y urbanismo, de 1992, que previamente decía “Las salas de máquinas, salidas de cajas de escaleras, chimeneas, estanques, y similares elementos exteriores ubicados en la parte superior de los edificios podrán sobrepasar la altura de edificación máxima permitida, siempre que dichos elementos se encuentren contemplados en el proyecto aprobado, cumplan con las rasantes correspondientes y no ocupen más del 25% de la superficie de la azotea del último piso del edificio...” en el año 2018 se modifica en pos de la creación de AV dando la opción de que en el porcentaje restante de superficie sea utilizado para terrazas, vegetación, jardineras y elementos ornamentales. Con esta posibilidad se propone utilizar toda la azotea disponible para la implementación de estas AV.

**Rango de pendiente.** actualmente en la zona centro de Santiago de Chile, las azoteas de los edificios están divididas entre azoteas transitables o planas,

azoteas con techos inclinados para aguas lluvia y en techos con dos o más agua(inclinaciones). Respecto al casco histórico de la zona norte de Santiago existen edificios ornamentales de techos con 2 a 4 aguas debido al tipo de arquitectura que poseen, la implementación de un techo verde aquí sería tanto improbable por ley como por estrategia constructiva, los próximos tipos de azoteas son aquellos edificios de media altura, muchos poseen accesibilidad a las azoteas con las salidas de cajas de escaleras pero poseen un techo con inclinación pronunciada como es el edificio Javiera Carrera ubicado en San Martín. Como ya fue mencionado anteriormente la inclinación del techo afecta sobre la implementación de la azotea debido al desplazamiento del sustrato por gravedad además de la generación para estrategias para el drenaje, situación que encarecería la instalación de la azotea.

***Corresponder con el clima local.*** Tener consideración con las características climatológicas de la ciudad para generar estrategias propias de AV en la ciudad en la que se desean implementar, es decir, considerando factores de temperatura, insolación, velocidad del viento, humedad relativa y precipitaciones, será posible elegir de forma acertada los tipos de vegetación, ya que, serían resilientes a los factores climáticos.

***Ser consciente con el riego.*** Las especificaciones del riego están ligadas a las especies vegetales que sean utilizadas en las AV, a las condiciones climáticas y a la capacidad de retención del sustrato. Es por esto por lo que el sistema de riego debe estar para lograr la resistencia a las sequías, y completar la necesidad hídrica de las especies. La sequía que ha vivido la región metropolitana los últimos años además de la proyección del balance hídrico al año 2030-2060 (Crocco, 2021) ha dejado claro que oferta hídrica va en disminución por lo que es necesaria la creación de estrategias que puedan soportar las AV con su riego, tales como riego a goteo, para las AV semi-intensivas que tienen especies vegetales más grandes y con mayores necesidades hídricas, además tener

sensores de humedad en conjunto con controles de riego para que se pueda automatizar el riego cuando el sustrato este en déficit.

También es posible la utilización de aguas grises para el riego de las azoteas y fachadas verdes, debido a que las especies que se proponen no son cultivos vegetales ni especies de consumo humano, aun así, es necesario tener consideraciones específicas. El Artículo 31° del Reglamento de Aguas Grises, tipifica dos tipos de riego que favorece esta investigación: *Riego Áreas Recreativas y de Servicios*: incluye el riego de áreas verdes con libre acceso al público como, por ejemplo, parques, áreas verdes de establecimientos educacionales, cementerios parque, campos deportivos, entre otras. *Riego Ornamental*: incluye el riego de áreas verdes y jardines ornamentales con fines exclusivamente estéticos y de decoración, sin acceso al público. Pese a que es posible este tipo de riego a estas IV existen también limitaciones como la prohibición del acceso a personas, el tipo de riego, es decir, se prohíbe el riego por aspersores o difusores, situación que afecte las condiciones de creación de las azoteas en su grado de mantención y construcción llevando a aumento de costos, pero disminución de estos a largo plazo.

***Normatividad y creación políticas públicas y fomento de las AV.*** Como ya fue mencionado en el año 2018 se planteó una reformulación de las ideas constructivas respecto a las azoteas, en donde se pasó de una utilización de solo 25% de la azotea hasta un 100% de esta para la implementación de AV, "El resto de la superficie de la azotea del último piso del... podrá ser destinada a terrazas, piscinas, vegetación, jardineras y elementos ornamentales, en tanto no sobrepasen la mitad de la altura de las barandas o paramentos perimetrales, como a albergar la instalación de paneles solares, los que no podrán sobrepasar los 2 m de altura desde el nivel de la azotea." Este cambio en la ley beneficia completamente a la creación de las Azoteas verdes, además restringe las especies que podrían implementarse en las azoteas de tipo intensivas, ya que

soporta especies arbóreas. Es más, en el año 2020 por parte del Instituto Nacional de Normalización se emitió el NCH3626 “Techos verdes: Terminología, clasificación y requisitos” donde se presentan las características del diseño: tipo de especie selección, condiciones estructurales, mantención, planificación, entre otras características. Esta normativa la implementación de las azoteas verdes, esta normativa está basada en ASTM E2777 y el Guideline for the planning, construction and maintenance of green roof.

Pese a la producción de las normativas para la creación e implementación de las AV existe una clara falta de políticas públicas que fomenten la creación de estas, la “Propuesta de Política Pública para Techos y Muros Vegetativos en Chile”, menciona que existen estrategias que han sido implementadas con éxito en 113 municipalidades en 19 países distinto con éxito, por lo que es posible adaptarse a la realidad chilena. Las propuestas de políticas públicas generadas por las Universidad Católica, se centra en 3 pilares, “ahorro de energía para los edificios, resiliencia frente al cambio climático, mejora de la calidad del aire urbano.”

Reducción de impuestos:

- Impuesto de Propiedades: Implementar reducciones en el impuesto de propiedades para aquellos edificios que instalen techos vegetativos, como se ha hecho en la Ciudad de México y Nueva York. Esto podría motivar a más propietarios en Chile a invertir en techos verdes.
- Tarifa de Aguas Pluviales: Ofrecer reducciones en las tarifas de aguas pluviales para edificaciones que incorporen infraestructura verde, aliviando así la carga sobre los sistemas de drenaje urbanos y promoviendo la retención de agua de lluvia.
- Otras Reducciones de Impuestos: Extender beneficios fiscales para incluir reducciones en otros impuestos municipales relacionados con servicios como iluminación y limpieza, incentivando así la adopción generalizada de techos verdes.

**Financiamiento:** Subsidios y apoyos financieros pueden ser cruciales para facilitar la instalación de techos verdes en edificaciones. En Europa, tales subsidios han probado ser un fuerte incentivo. Por ejemplo, el área mínima de AV en Países Bajos varía entre los 6 m<sup>2</sup> en Groninga, Hengelo y Leeuwarden hasta 30 m<sup>2</sup> en Nimega. En Chile se puede proponer un porcentaje de apoyo económico por m<sup>2</sup> de construcción de AV en edificios viejos y un apoyo financiero total para la construcción de AV en edificios nuevos, siendo responsabilidad del edificio la mantención y riego.

**Permisos de Construcción:** Flexibilizar las normas urbanísticas para permitir que edificaciones con AV y muros vegetativos excedan los límites de construcción normales, como se ha visto en Brasil, en Porto Alegre, se toma las IV como medida compensatoria respecto a las superficies impermeabilizadas, en cuanto a Estados Unidos, por cada metro cuadrado de ampliación del Edificio o construcción se debe generar un metro cuadrado de AV. Esto podría ser un atractivo considerable para desarrolladores inmobiliarios en ciudades chilenas.

**Obligaciones por Ley:** Establecer mandatos legales que requieran la instalación de AV en todos los nuevos edificios comerciales y residenciales de cierto tamaño, similar a las regulaciones de Brasil, específicamente en Guarulhos, en donde los edificios de más de 3 pisos deben incluir AV en la construcción, además aquellas construcciones que tengan un área mayor a los 400m<sup>2</sup>, debes incluir techos vegetativos.

Una vez ya seleccionado los edificios para la implementación de las IV, es decir, AV y FV, así como las estrategias para mitigar las ICU como las superficies frías, se propone una batería de especies vegetales que seas soportadas por estas IV. En la actualidad hay 33 edificaciones con estas estas estrategias para mitigar las ICU que son implementadas en la región metropolitana (Vera et al, 2023), de estas solo 18 presentan plantas herbáceas y arbustivas, es decir las demás

soportan especies vegetales sobre los 30cm hasta los 2 metros de altura. (Azoteas verdes intensivas).

Las especies vegetales más utilizadas para estos propósitos se presentan en las siguientes tablas. (Cuadro 8 y Cuadro 9)

*Cuadro 8. Especies más usadas en las azoteas verdes en la región metropolitana. Fuente: Vera et al, 2023.*

Nombre Científico	Nombre Común	Nivel Req. Hídrico	Res. Heladas	Exp. Sol
<i>Pennisetum villosum</i>	Cola de pluma	Bajo	Sí	Sol
<i>Lampranthus spectabilis</i>	Rayito de sol	Bajo	Sí	Sol
<i>Sedum acre</i> variedad sp	Sedum de otoño	Bajo	Sí	Sol
<i>Agapanthus praecox</i>	Agapanto	Medio	Sí	Semi-sol
<i>Pittosporum tobira</i> , var. <i>nana</i>	Pitosporo	Medio	Sí	Sol
<i>Festuca glauca</i>	Festuca Ovina	Bajo	Sí	Sol
<i>Sedum acre</i>	Uña de Gato	Bajo	Sí	Sol
<i>Sedum spurium</i>	Sedum rojo	Medio bajo	Sí	Sol
<i>Pennisetum setaceum</i>	Cola de zorro	Bajo	Sí	Sol
<i>Lavandula angustifolia</i>	Lavanda	Bajo	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Aptenia cordifolia</i>	Aptenia	Medio bajo	Sí	Sol
<i>Liquidambar styraciflua</i>	Liquidambar	Alto	Sí	Sol
<i>Hypericum calycinum</i>	Hiperico	Medio bajo	No	Sol y semi-sombra
<i>Sedum album</i>	Sedum	Bajo	Sí	Sol
<i>Sedum palmeri</i>	Sedum	Bajo	Sí	Sol
<i>Sedum spurium purpureum</i>	Sedum	Bajo	Sí	Sol
<i>Carex buchananii</i>	Carex	Bajo	Sí	Sol
<i>Verbena hybrida</i>	Verbena	Medio	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Romero rastrero	Medio bajo	Sí	Sol
<i>Festuca arundinacea</i>	Festuca alta	Bajo	Sí	Sol

Cuadro 9. Especies más usadas en las fachadas verde en la región metropolitana. Fuente: Vera et al, 2023.

Nombre Científico	Nombre Común	Nivel Req. Hídrico	Res. Heladas	Exp. Sol
<i>Hedera helix</i>	Hiedra	Medio	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Aptenia cordifolia</i>	Aptenia	Medio bajo	Sí	Sol
<i>Hedera helix pedata</i>	Hiedra pata de gallina	Alto	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Soleirolia soleirolii</i>	Lágrimas de ángel	Medio alto	No	Semi-sombra
<i>Nephrolepis exaltata</i>	Helecho espada	Alto	Sí	Sombra
<i>Rosmarinus officinalis</i>	Romero rastrero	Medio	Sí	Sol
<i>Davallia mariesii</i>	Helecho pata de conejo	Medio	Sí	Sol
<i>Sedum acre</i>	Sedum	Medio bajo	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Vinca minor</i>	Vinca	Medio	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Carex buechananii</i>	Carex	Bajo	Sí	Sol
<i>Ajuga reptans</i>	Ajuga	Alto	Sí	Semi-sombra
<i>Tradescantia fluminensis</i>	Amor de hombre	Alto	Sí	Sol y semi-sombra
<i>Asparagus densiflorus</i>	Esparraguera	Bajo	Sí	Semi-sombra
<i>Heuchera sanguinea</i>	Heuchera	Alto	No	Sol y semi-sombra
<i>Cissus rhombifolia</i>	Parra de interior	Medio	No	Semi-sombra
<i>Sedum palmeri</i>	Sedum	Medio	Sí	Sol
<i>Erigeron karvinskianus</i>	Vitadinia	Medio	Sí	Sol
<i>Sedum praealtum</i>	Sedum	Bajo	Sí	Sol

Estas plantas según es mencionado en “Techos y muros vegetativos en Chile. Propuesta de política pública basada en I+D para la implementación de techos y muros vegetativos en Chile”, (Vera et al, 2023) son especies seleccionadas por su belleza ornamental, velocidad de crecimiento y facilidad de obtención. Situación que dista por mucho de ser sostenible en el tiempo, ya que al

desconocerse cómo estas especies actúan respecto al clima de la zona se ven deterioradas a los meses de plantación.

Respecto a la información otorgada por Vera et al (2023) aparece como concepto importante para la selección de las especies vegetales la resistencia estomática. Este concepto es una característica fundamental para la selección de las especies vegetales que se buscan implementar tanto en las AV como en las FV, debido a su impacto en la regulación del intercambio gaseoso y la transpiración de las plantas, factores relacionados al intercambio energético con el medio, pudiendo disminuir de esta forma la  $T^{\circ}$  del aire seco y aumentar la humedad relativa. Además, esta característica de las plantas está relacionada por lo mismo con la fotosíntesis y la conservación del agua, situación que permite que estas tengan adaptabilidad al estrés hídrico y a las altas temperaturas que en la actualidad están siendo normales en las ciudades. (Vera, 2023)

Existen las plantas de alta resistencia estomática y de baja. Las primeras son las que conservan mejor el agua, siendo esencial en climas áridos o en situaciones de escasez hídrica (situación en que el recurso hídrico es limitado), las plantas tienen las estomas más restringidas, disminuyendo la pérdida de agua en la transpiración. En cambio, las plantas de baja resistencia estomática son lo contrario, es decir, tiene menos restringidos las estomas haciendo que pierdan mayor agua en la transpiración, pero necesitan más agua de riego.

En proyectos como el FONDECYT 1150675 y 1181610, se ha evaluado el potencial de diferentes especies para enfriar el ambiente urbano. Especies con alta capacidad de transpiración, como *Selliera radicans*, han demostrado ser efectivas en la reducción de temperaturas debido a su alto índice de área foliar y baja resistencia estomática mínima. Estos estudios subrayan la importancia de elegir especies vegetales con características estomáticas adecuadas para maximizar los beneficios de las azoteas verdes en la mitigación del efecto de isla de calor urbano y la mejora del microclima urbano.

Pese a su alta capacidad de transpiración, es necesario, un alto riego para que se mantenga saludable la planta, por lo que colocar este tipo de especie en condiciones de escasez hídrica es más un problema que solución, reiterando la necesidad de tener especies correspondientes respecto a la realidad de la ciudad y la región. A continuación, se adjunta una lista de especies vegetales (Cuadro 10) que podrían utilizarse en la región metropolitana, específicamente en Santiago en la implementación de IV.

Cuadro 10. Especies propuestas para la implementación de las azoteas y fachadas verdes. Fuente: Elaboración propia, Pumahuída, 2024

Nombre Científico	Nombre común	Tipo de Planta	Establecimiento	Requerimiento Hidrico	Resistencia a las Heladas	Soporte de Insolación	Tipo de IF
<i>Baccharis linearis</i>	Romerillo, romero	Arbusto	Nativo	Bajo	Sí	Sol	Azoteas
<i>Baccharis paniculata</i>	Chilca, culpío	Arbusto	Endémica	Bajo	S/I	Sol	Azoteas
<i>Baccharis pingraea</i>	Chilquilla, radin	Hierba perenne	Nativa (zona Norte - centro)	Medio-Alto	Sí	Sol	Azoteas
<i>Bahia ambrosioides</i>	Chamicilla, Manzanilla blanca	Subarbusto (perennifolio)	Endémica	Bajo	Sí	Sol	Azoteas
<i>Chaetanthera albiflora</i>	Chinita	Hierba anual	Endémica	Bajo	No	Sol	Azoteas
<i>Chaetanthera limbata</i>	Chinita	Hierba anual	Nativa (zona Norte)	Bajo	No	Sol	Azoteas
<i>Chuquiraga ulicina</i>	Hierba blanca, hierba de la yesca.	Arbusto	Endémica	Medio	No	Sol	Azoteas
<i>Encelia canescens</i>	Coronilla del fraile, incienso	Subarbusto (perennifolio)	Nativa (zona Norte)	Bajo	No	Sol	Azoteas
<i>Eccremocarpus scaber</i>	Chupachupa	Trepadora	Nativa	Baja-Media	S/I	Sol	Fachadas
<i>Tweedia birostrata</i>	Sahumerio, Voquicillo	Trepadora	Nativa	Bajo	S/I	Sol-Semi sombra	Fachadas
<i>Ercilla spicata</i>	Siete huiras	Trepadora	Nativa	Bajo-Media	Si	Sol-Semisombra	Fachadas
<i>Eryngium paniculatum</i>	Chupalla	Herbácea	Nativa	Bajo	S/I	Sol	Azoteas
<i>Phyla nodiflora var. Reptans</i>	Tiqui Tiqui	Herbácea	Nativa	Bajo	S/I	Sol	Azoteas
<i>Haplopappus schumannii</i>	Haplopappus schumannii	Arbustiva	Endemica	Bajo	Si	Sol	Azoteas

## 9.DISCUSIÓN.

Considerando los resultados que fueron obtenidos a través de la resolución de los objetivos específicos, se logró establecer ciertas características importantes las cuales se destacaran a continuación a modo de análisis.

Para contextualizar la necesidad de este estudio, hay que hablar de la problemática actual en la climatología urbana. Las Islas de Calor Urbano, ICU. A medida que las ciudades crecen y el cambio climático exacerba los eventos de calor extremo, entender y mitigar la ICU se convierte en una prioridad global. Este estudio descriptivo-exploratorio basado en la simulación de IV en la zona centro de la comuna de Santiago, la cual esta densamente construida, es un lugar idóneo para que exista una zona de alta temperatura, del aire y de la superficie. La falta de flujo del aire, las superficies opacas y de concreto, la falta de áreas verdes, la congestión vehicular, la densidad demográfica, entre otros factores son intensificadores de las ICU. Los resultados de Santiago pueden servir de referencia para otras ciudades con desafíos similares, destacando la importancia de soluciones basadas en la naturaleza para combatir los efectos del cambio climático urbano.

Los resultados obtenidos gracias a la utilización del ENVI-met y su posterior análisis han dado respuestas significativas entre la configuración urbana y la intensidad de la ICU tanto en el modelo de prueba Caso N° 1 como en la simulación de las IV implementadas. De acuerdo con la literatura de la temática (Oke, 1982; Arnfield, 2003), se observó que las zonas con una mayor densidad de construcciones además de baja presencia de áreas verdes y superficies de concreto, tales como la clasificación B1 (compacto de altura), B2 (compacto de media altura) y B3 (compacto de baja altura), concentran la temperatura, detienen el flujo de aire e intensifican la Temperatura Radiante Media. A través de este

contraejemplo se condice la necesidad de la presencia de áreas verdes y superficies vegetales en las ciudades, para regular el microclima urbano.

Además, pese a que el estudio no es capaz de simular la densidad urbana o del flujo vehicular, se hace necesario simular áreas de las ciudades que tenga una alta afluencia peatonal con fin de preparar lugares que mejoren el confort térmico humano en momento de olas de calor o ICU teniendo presente que el avance del cambio climático atenúa este tipo de situaciones.

Siguiendo esta misma línea de idea, en la regresión lineal propuesta por Letelier, 2020 la densidad poblacional está directamente relacionada con la intensidad de la ICU, siendo un factor directamente proporcional y el de mayor peso en la fórmula. Pese a esto, lo que reflejan hallazgos internacionales, no es el factor que condiciona la presencia de ICU de manera propia. Es más, los hallazgos en el estudio sobre la ciudad de San Juan, Argentina revelaron que la densidad volumétrica edilicia y el factor de ocupación del suelo son mayormente significativos para la especialización de las ICU (Álvarez et al, 2011). Estudios posteriores como el de Fuentes, 2015, "*Climatología Urbana por modificación antropogénica. alteración del balance de energía natural*" reveló que las ICU están especializadas en especialmente en zonas de alta densidad demográfica, pero este factor no es per se, más bien la alta densidad demográfica obliga a la ciudad a generar una alta densidad edilicia, cambiando coberturas de suelo y aumentando el gasto energético.

La investigación reafirma y destaca la importancia de las áreas verdes en la mitigación de la ICU. Las zonas con presencia significativa de vegetación, como el Parque de los Reyes a diferencia de la Plaza Santa Ana, mostraron temperaturas más bajas en comparación con áreas urbanas densamente construidas, o áreas verdes de esparcimiento, es decir sin cubierta vegetal. El estudio realizado por Melo, 2024, revela que, en el tiempo comprendido entre 2015-2023, en la ciudad de Juliaca, Puno, sufrió una significativa disminución de

áreas verdes, llegando a perder 49.43 hectáreas, generando un notable aumento en las temperaturas superficiales y en la intensidad de ICU. Estos hallazgos demuestran el impacto negativo de la densificación urbana y demográfica sobre el clima urbano, indicando la necesidad urgente de estrategias de reforestación y una mejor planificación urbana para mitigar estos efectos. Esta experiencia es congruente con la literatura que documenta cómo la vegetación no solo proporciona sombra, sino que también facilita la evapotranspiración, un proceso natural que ayuda a enfriar el aire circundante (Bowler et al., 2010; Gunawardena et al., 2017).

Por lo anterior al caracterizar la comuna de Santiago centro y más específicamente en el área de estudio, se destaca la preocupante escasez de áreas verdes per cápita, 4,56 m<sup>2</sup> (INE, 2028). Culpa también es de las tipificaciones de lo que es un área verde, favoreciendo así la constructividad más que la sostenibilidad y el bienestar humano. Esto sugiere una necesidad crítica de reevaluar y mejorar las estrategias de planificación y mantenimiento de espacios verdes urbanos. Es más, considerar un cambio de ley y normatividad, además de políticas públicas de incentivo para el desarrollo de estrategias de planificación urbana sensibles al clima.

Respecto a la contribución por parte de esta investigación, el experimento da a conocer como la implementación de IV tiene un potencial respecto a la mitigación de las ICU. Los resultados siendo favorables no logran amplio delta T° del aire, pero pese a esto, entregaron información importante para planear de mejor manera su instalación respecto a los edificios, su posición en áreas urbanizadas y los aportes tanto individual como colectiva. Los resultados de las simulaciones indican que la implementación de AV manifiesta una reducción de la T° del aire a nivel de los transeúntes, mayor que la implementación de las FV, de casi medio grado, siempre y cuando tengan una amplia extensión superficial de al menos 1000 m<sup>2</sup>, como fue en el edificio de la AFC, el Banco Estado de Santa Ana y el

SENADIS. Respecto a las FV al presentar una mayor extensión vertical, mantienen su potencial de mitigación sin importar la altura, pero debido a su poca extensión horizontal, el área que modifica la temperatura es mucho menor que las AV. Pese a lo anterior, ambos resultados son alentadores dado el contexto de aumento de temperaturas globales y eventos de calor extremo más frecuentes además de la creación de ciudades resilientes.

Con experiencias internacionales, se han desarrollado iguales descubrimientos, pero en situaciones climáticas diferentes, por ejemplo, en “Modeling a Tropical Urban Context with Green Walls and Green Roofs as an Urban Heat Island Adaptation Strategy” de Heralth et al, 2018, donde se evaluó el impacto de las IV, en la ciudad de Colombo, Sri Lanka, ciudad que tiene un clima ecuatorial (af) según las clasificación de Koppen, la implementación de las AV y FV tienen una disminución de la  $T^{\circ}$  de hasta 2,04 °C. Otro ejemplo que presenta esta misma clasificación de clima es el estudio de Cortés et al, 2022. En la ciudad de Mandaue, Filipinas, en este caso los resultados fueron menos intensos, llegando a un máximo de 0,4 °C en la disminución de la temperatura del aire. Cortes et al, concluyen que es necesario realizar la implementación de las IV teniendo en cuenta las características propias de la ciudad para lograr maximizar la mitigación, finalmente aconseja la implementación combinada de las estrategias para lograr la mayor reducción de  $T^{\circ}$ .

Pese a no ser parte de los experimentos de esta investigación, cabe destacar los beneficios de la implementación de las IV al interior de los edificios. Internacionalmente estudios sobre el confort térmico interior han demostrado que la estrategia de utilizar AV y FV han disminuido la  $T^{\circ}$  interior de los edificios, situación que ayudó a la disminución del consumo energético para climatización, considerando uno de los beneficios indirecto de las IV.

Los resultados de los estudios realizados en diversas ciudades, tales como Colombo, Mandaue y esta misma investigación en Santiago, destacan la

necesidad crítica de integrar consideraciones climáticas y ambientales en la planificación y políticas urbanas. La falta de políticas públicas en el país en pos de la creación de IV de cualquier tipo y en específico sobre AV y FV, aunque exista la Nch36:26 y el cambio de ley en el 2019, aún no presentan desarrollo. Como se mencionaba en los resultados, es necesaria la creación de políticas públicas que beneficien a los privados que implementan estas estrategias, con incentivos fiscales, subsidios y normativas de construcción, así mismo con las experiencias extranjeras, considerar este tipo de incentivos en ciudades que presenten condiciones climáticas donde exista un aporte de mitigación de las IV, es decir aplicar estas estrategias en ciudades, con climas templados, secos y cálidos.

La implementación de estas infraestructuras debe ser vista no solo como una respuesta a los desafíos actuales del cambio climático, sino también como una inversión en el futuro de las ciudades. En este sentido, es fundamental que las políticas urbanas no solo se centren en la mitigación de los efectos negativos, sino que también promuevan un desarrollo sostenible que tenga en cuenta la resiliencia a largo plazo. Construyendo una ciudad en base a planeaciones estratégicas sobre resiliencia climática, es más importante mencionar la planificación urbana resiliente al clima, teniendo en cuenta las necesidades de las ciudades y sus carencias para la creación de estrategias verdes urbanas.

Respecto a las especies vegetales a utilizar es de tener muy en cuenta las carencias y necesidades de la ciudad a implementar estas estrategias, en los resultados se habló de la resistencia estomática, característica de todas las plantas y necesaria para su desarrollo vital y para su implementación, ya que se hace importante determinar el riego que necesita, por lo que colocar plantas de baja resistencia estomática, que a pesar de tener mayor evapotranspiración significa un aumento del riego, en ciudades con problemas de sequía genera más daño que beneficio. Con lo anterior recalcar la necesidad de hacer planes

individualizados por ciudad, pero también multidimensionales, no es solo implementar AV y FV es un plan de sostenibilidad y resiliencia climática.

## **10.CONCLUSION.**

El CC, se caracteriza por el aumento de la temperatura global, desarrollando a su vez un aumento en la frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos alrededor del mundo, situación que afecta a las ciudades del mundo. Contradictoriamente las ciudades son parte primordial de las causas del CC, por cambio en los usos de suelo, la generación de altos niveles de GEI, concentración de la población, aumento del consumo de recursos y energía y pavimentación de la superficie natural y generación de la infraestructura urbana.

Esta investigación se centró en evaluar el impacto de las azoteas y fachadas verdes sobre la temperatura diurna de verano en zonas residenciales compactas del centro de Santiago de Chile, con el objetivo de mitigar los efectos de las ICU y mejorar la calidad de vida urbana.

La estructura de la investigación se desarrolló en base a cuatro objetivos específicos para responder el objetivo general. El objetivo específico uno busca determinar la espacialidad de la ICU dentro del área de estudio. Para lograrlo se comprendió que, aunque la temperatura de las ciudades sea mayor que en las áreas rurales, existen combinaciones de factores que generan un mayor delta positivo respecto a la temperatura del aire o la superficie. Para la presente investigación se utilizó la combinación de Letelier (2020), donde los factores son altura de las edificaciones, concentración demográfica, distancia a las áreas verdes, y calor del transporte públicos y privado. Existen otros estudios para la determinación espacial de la ICU, como lo es a través de imágenes satelitales como lo hizo Sarricolea y Vide, 2014, pero es del tipo de ICU superficial, es decir,

el calor acumulado por la superficie. Ya que en la presente investigación se buscaba mitigar la temperatura del aire, se recurrió a estudios que tuvieran tales resultados.

Los resultados de la especialización demostraron que las zonas más alejadas de las áreas verdes, en donde las superficies cubiertas por pavimento y la altura de los edificios sea mayor, las temperaturas se concentraran con mayor intensidad teniendo un delta positivo respecto a las temperaturas rurales. Por lo que, en este objetivo específico, comprender cómo afectan ciertos factores podría ayudar a tener lugares específicos para implementar distintas estrategias de mitigación, tanto preventivas (considerando la planeación urbana sensible al clima) como correctivas en espacios urbanos densos sin posibilidad de generar áreas verdes.

Respecto al objetivo específico dos, su importancia en la investigación radica en las formas de selección de los edificios para la implementación. Pese a que la selección no se basa más que en las características estructurales de los edificios, es de destacar la necesidad de tener un plan para la implementación, basado en estudios previos nacionales o internacionales, las leyes de construcción o a Nch36:26 la cual está basada en normativas extranjeras. Con lo anterior dar hincapié a la utilización estratégica de experiencias para soluciones actuales o futuras.

Respecto al objetivo número tres, mediante la modelación y simulación con ENVI-met se demostró que la implementación de azoteas y fachadas verdes tiene un efecto reductor de la temperatura del aire, pese a no generar un gran delta de temperatura. Este hallazgo es consistente con estudios previos que han demostrado la eficacia de las azoteas y fachadas verdes en la mitigación de las ICU, especialmente en contextos urbanos densos donde las superficies construidas predominan sobre las naturales.

Aunque las condiciones de temperatura no se ven tan afectadas, es posible mejorar esta situación con un trabajo estratégico respecto a las especies

vegetales a utilizar, teniendo en cuentas las resistencias estomáticas, la necesidad de riego, las condiciones del sustrato y manejar las extensiones de las azoteas y fachadas verdes. Respectos a la estructura comprender la altura de las azoteas como factor sobre la temperatura sensible por los transeúntes, considerar también las posiciones de las fachadas verdes, para generar beneficios para los transeúntes.

Aunque se refuerzan los beneficios las IV como una estrategia multifuncional que puede abordar simultáneamente varios problemas urbanos relacionados con el CC y la sostenibilidad, es importante reconocer las limitaciones de este estudio. En primer lugar, la modelación dinámica simplifica la realidad tanto en la infraestructura como en su disposición espacial. En conjunto con la simulación, que solo fue utilizado un forzado simple, teniendo en cuenta una velocidad y dirección constante del viento. Además, se utilizó la temperatura obtenida de una interpolación con SIG limitando la precisión de los resultados, pero obteniendo aun así resultados robustos. Además, este estudio se centró en un área específica del centro de Santiago, lo que limita la generalización de los hallazgos a otras zonas urbanas con diferentes características geográficas y climáticas.

En comparación con investigaciones previas, los resultados de este estudio son coherentes con la literatura existente sobre IV y su efecto en la mitigación de las ICU, pese a no lograr la amplitud obtenida en estudios internacionales. Estudios realizados en otras ciudades con climas similares, como Buenos Aires y Ciudad de México, han demostrado que las azoteas y fachadas verdes pueden reducir significativamente las temperaturas superficiales y mejorar la calidad del aire. Sin embargo, este estudio aporta nuevas perspectivas al evaluar la eficacia de estas infraestructuras en un contexto urbano específico como el de Santiago, donde la densidad y altura de las edificaciones varían considerablemente dentro de la misma área.

En cuanto a los resultados, de igual forma se hace necesario para el futuro nuevas investigaciones con datos de temperatura, velocidad del viento, dirección nubosidad presión atmosférica, que sean obtenidos dentro del área de estudio para obtener datos precisos. Así mismo evaluar e investigar distintas especies vegetales, en lo posible nativas que sean útiles para las AV y FV, considerando sus necesidades hídricas, resistencia estomática y soporte a heladas e insolación. Respecto al objetivo número cuatro se presentó una lista de especies a utilizar además de parámetros de construcción y selección de edificios para la implementación con el fin de facilitar el desarrollo de estrategias. Lista limitada a los conocimientos entregados y obtenidos a través de investigaciones alternas de origen nacional.

Futuras investigaciones podrían enfocarse en la evaluación a largo plazo del desempeño de las azoteas y fachadas verdes, considerando factores como el envejecimiento de las plantas, la acumulación de contaminantes en el sustrato y la sostenibilidad económica de estas infraestructuras.

En Resumen, la investigación realizada sobre el impacto de las azoteas y fachadas verdes en Santiago de Chile aporta conocimientos valiosos que pueden guiar la planificación urbana sensible al clima hacia un modelo más sostenible y adaptado a las condiciones cambiantes del clima. Aunque aún quedan desafíos por superar, los resultados obtenidos indican que las infraestructuras verdes tienen el potencial de transformar las ciudades en lugares más habitables, saludables y ambientalmente responsables. Es imperativo que tanto los responsables de la política pública como los actores privados tomen estos hallazgos en consideración para asegurar un futuro urbano más sostenible para todos.

## 11. BIBLIOGRAFIA.

Albarracín, W. (2016). Las cubiertas verdes y su implicación en las estructuras, desde el punto de vista del diseño, lo económico y la sostenibilidad ambiental. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/14149>.

Álvarez, A. A., Kurbán, A., Papparelli, A., & Cúnsulo, M. (2011). Espacialización del calor antropogénico en una ciudad árida como componente de la Isla de Calor Urbana. Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño – Universidad Nacional de San Juan.

Aquilué Junyent, I., & Ruiz Sánchez, J. (2021). Ciudad, complejidad y cambio: fundamentos para el análisis de la incertidumbre en sistemas urbanos. *Revista INVI*, 36(101). Recuperado a partir de <https://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/63471>

Alpuche, M. Moreno, H. Ochoa, J. Marincic, I. Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes. disponible en: <https://docplayer.es/18457367-Analisis-termico-de-viviendas-economicas-en-mexico-utilizando-techos-verdes.html>

Bauer Vera, H. (2015). Gobierno Metropolitano en Santiago de Chile: consecuencias de la ausencia de institucionalidad urbana y propuestas de gobiernos para las ciudades de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/133102>

Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

Canales Gálvez, M. (2014). Efectos del uso de techos y fachadas vegetales en el comportamiento térmico de edificios. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/130298>

Carvajal, A., & Pabón, J. D. (2014). Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la Región Andina Colombiana. *Sociedad & naturaleza*, 26(1), 95-112. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140107>

Carrera Acosta, Alvaro (2011). Sistemas vegetales verticales: estudio de los efectos de la integración arquitectónica de sistemas vegetales verticales y propuestas de uso como técnica pasiva de ahorro de energía en el clima continental mediterráneo. Tesis (Master)

Castro Moreno, A. C. (2017). La ingeniería concurrente en el diseño, construcción e implementación de sistemas hidropónicos en tejados y terrazas verdes para la seguridad alimentaria en Villanueva Casanare. Universitaria Agustiniiana, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Industrial. [https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/bitstream/handle/123456789/97/Castro Moreno-AuraCristina-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/bitstream/handle/123456789/97/Castro%20Moreno-AuraCristina-2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Cepal, N. (2019, 7 enero). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40155>

Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011 está disponible en versión original (inglés) en <http://www.unhabitat.org/grhs/2011>

Córdova Sáez, Karenia. (2011). Impactos de las islas térmicas o islas de calor urbano, en el ambiente y la salud humana: Análisis estacional comparativo: Caracas, octubre- 2009, marzo- 2010. *Terra*, 27(42), 95-122. Recuperado en 04 de agosto de 2022, de.

Cortes, A., Rejuso, A. J., Santos, J. A., & Blanco, A. (2022). Evaluating mitigation strategies for urban heat island in Mandaue City using ENVI-met. *Journal of Urban Management*, 11(1), 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.01.002>

Crocco, J. J. (2021). *Mega sequía: Diagnóstico, impactos y propuestas*. Edición Digital N° 559, Centro de Estudios Públicos. <https://cepchile.cl>

Cruz, M., Alcántara, A. G., Sánchez, A., & Maurice, M. J. E. (2017). Pérdida de humedales y vegetación por urbanización en la cuenca del río Grijalva, México. *Investigaciones geográficas*. <https://doi.org/10.14198/ingeo2017.68.09>

Decreto Supremo N° 47. Vivienda y urbanismo, 1992

ENVI-met – Decode urban nature with ENVI-met software (<https://www.ENVI-met.com/>)

Explorador Climático CR2. (2020). Centro de Ciencias del Clima y la Resiliencia, Universidad de Chile. Santiago, Chile. Recuperado de: <http://explorador.cr2.cl/>

Fernández García, Felipe. Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas (Esp)*, núm. 49, 2009, pp. 173-180 Universidad de Alicante Alicante, España.

Fuentes Pérez, Carlos Alberto. 2015. Climatología Urbana por modificación antropogénica. alteración del balance de energía natural. *Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, vol. IX, núm. 11, septiembre, 2015, pp. 73-91. Universidad Autónoma de Nuevo León. Nuevo León, México.

Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276-1285.

Giannotti, Emanuel, Vásquez, Alexis, Galdámez, Elizabeth, Velásquez, Paola, & Devoto, Carolina. (2021). Planificación de infraestructura verde para la emergencia climática: aprendizajes desde el proyecto "Stgo+", Santiago de Chile. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 30(2), 359-375. Epub August 27, 2021. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n2.88749>

Guerrero Rojas, C. (2020). El objetivo de desarrollo sostenible N° 11: ciudades sostenibles. Unión Europea, China y Chile. Una mirada comparada. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/179635>

González-Reyes, Álvaro. (2016). Ocurrencia de eventos de sequías en la ciudad de Santiago de Chile desde mediados del siglo XIX. Revista de geografía Norte Grande, (64), 21-32. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022016000200003>

Gunawardena, K. R., Wells, M. J., & Kershaw, T. (2017). Utilising green and blue space to mitigate urban heat island intensity. Science of the Total Environment, 584-585, 1040-1055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.158>

Informe a la nación: La mega sequía 2010 - 2015. Una lección para el futuro (2015). Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/136717>

Hough, M. (1998). Naturaleza y Ciudad. Barcelona: Gustavo Gili.

Hernández, J. (2007). La situación del arbolado urbano en Santiago. Ambiente Forestal 3, 14-16.

IPCC, 2023: Resumen para responsables políticos. En: Cambio Climático 2023: Informe de síntesis. Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Sexto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, H. Lee y J. Romero (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 36 páginas.

Jiménez Ruiz, Paola Francisca, 2022. Análisis técnico y ambiental de la utilización de envolvente vegetal en edificios. Memoria de Título presentada para optar al título de Ingeniero Civil. <https://repositorio.udec.cl/handle/11594/11053>

López, E. Impacto del crecimiento del Gran Santiago en el deterioro funcional de sus espacios peri céntricos. Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1 de agosto de 2005, vol. IX, núm. 194 (47). <<http://www.ub.es/geocrit/sn/sn-194-47.htm>> [ISSN: 1138-9788]

López-González, B; Camacho, A; Martínez-Rodríguez, M; Marcelino-Aranda, M. (2020). Techos verdes: una estrategia sustentable. Tecnología en Marcha. Vol. 33-3. Julio-Setiembre 2020. Disponible en: 10.18845/tm.v33i3.4389.Pág 68-79.

Instituto Nacional de Estadísticas – Chile (2018). Resultados CENSO 2017. Recuperado de: <http://resultados.censo2017.cl/>

Instituto Nacional de Estadística - Permisos de edificación. (s. f.). Default. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/edificacion-y-construccion/permisos-de-edificacion>

Mansilla Quiñones, P., Imilán Ojeda, W., Tapia Barría, V. y Jirón Martínez, P. (2020-08). La creación de Alto Hospicio: el rol de la vivienda social en la producción de ciudades intermedias. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177662>

Martinez, J. (2014). Estudio de la isla de calor de la ciudad de Alicante. Investigaciones Geográficas, 62. En línea: [https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/40931/3/Investigaciones\\_Geograficas\\_62\\_06.pdf](https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/40931/3/Investigaciones_Geograficas_62_06.pdf)

Maldonado, J. M. (s. f.). Ciudades y contaminación ambiental. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-49932009000200009](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932009000200009)

Martinez Suñer, Sergio. 2017. Estudio y aplicación de las fachadas verdes para mejorar la eficiencia energética en edificación: Caso práctico de estudio barrio Cremor, Castellón. <http://hdl.handle.net/10234/173926>

Martínez González, N. (2021). Evolución de las islas de calor urbanas en el período 2002-2020 y su relación con las zonas climáticas locales de las comunas de Concepción, Talcahuano y Hualpén, Región del Biobío, Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/180787>

Mourou, C.; Zamorano, M.; Ruiz, D.P.; Martín-Morales, M. CoolSurface Strategies with an Emphasis on the Materials Dimension: A Review. *Appl. Sci.* 2022, 12, 1893. <https://doi.org/10.3390/app12041893>

Landscape Development and Landscaping Research Society. (2018). Green roof guidelines: Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofs. FLL.

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press.

Pérez, J., y De la Barrera, F. (2021). Rol de la vegetación en el control del microclima urbano y en la adaptación a los efectos del cambio climático en un barrio de San Pedro de la Paz, Chile. *URBE. Arquitectura, Ciudad y Territorio*, (13), 36-53. DOI:10.29393/UR13-3RVJP20003

Puliafito, Salvador Enrique; Bochaca, Fabián Rolando; Allende, David Gabriel; Fernández, Rafael Pedro; Áreas verdes y confort térmico a microescala en ambientes áridos: un estudio de caso en Mendoza, Argentina; *Investigación científica; Ciencias de la Atmósfera y del Clima*; 3; 3; 7-2013; 372-384

Romero, Hugo, Irrarrázaval, Felipe, Opazo, Dustyn, Salgado, Marcela, & Smith, Pamela. (2010). Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile. *EURE (Santiago)*, 36(109), 35-62. <https://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612010000300002>

Romero Aravena, H. y Molina, M. (2008). Relación espacial entre tipos de usos y coberturas de suelos e islas de calor en Santiago de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117775>

Romero Aravena, H. (2011-06). Segregación Socioambiental en espacios intraurbanos de la ciudad de Santiago de Chile. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/118100>

Romero, H. (2021). Islas, ondas de calor y concentración de contaminación atmosférica como indicadores de segregación. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/publication/349767644\\_Islas\\_ondas\\_de\\_calor\\_y\\_concentracion\\_de\\_contaminacion\\_atmosferica\\_como\\_indicadores\\_de\\_segregacion\\_socio-ambiental\\_Ejemplo\\_de\\_Santiago\\_de\\_Chile](https://www.researchgate.net/publication/349767644_Islas_ondas_de_calor_y_concentracion_de_contaminacion_atmosferica_como_indicadores_de_segregacion_socio-ambiental_Ejemplo_de_Santiago_de_Chile)

Romero, Hugo, Salgado, Marcela, & Smith, Pamela. (2010). Cambios climáticos y climas urbanos: Relaciones entre zonas termales y condiciones socioeconómicas de la población de Santiago de Chile. *Revista INVI*, 25(70), 151-179. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582010000300005>

Rui, L., Buccolieri, R., Gao, Z., Gatto, E., & Ding, W., Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Building Simulation*, 12(2), 183–194, 2019.

Sánchez Rodríguez, R. (2013). El cambio climático y las áreas urbanas de América Latina: a manera de introducción. Cepal. Disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36622/S2013813\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36622/S2013813_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

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. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000100009>

Sarricolea Espinoza, P. y Romero Aravena, H. (2010-10). Análisis de los factores condicionantes sobre las temperaturas de emisión superficial en el área metropolitana de Valparaíso.. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117841>

Sarricolea, P., Smith, P., Romero Aravena, H, Serrano Notivoli, R., Fuentealba, M., Meseguer Ruiz, O. (2022). Socioeconomic inequalities and the surface heat island distribution in Santiago, Chile. *Science of The Total Environment*, Volume 832,2022,155152,ISSN 0048-9697. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155152>

Seguel Canessa, V. P. (2019). Metodología de evaluación para la implementación de fachada verde doble piel en edificios [Tesis de grado, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Siverio Valle, L., González Hernández, M. M., Fugère, J., & Fariñas Wong, E. Y. (2021). Proyecto de azotea verde en la Puerta Rosa, La Habana. *Eco Solar*, (76), 29-36. Recuperado a partir de <http://ecosolar.cubaenergia.cu/index.php/ecosolar/article/view/13>

Stewart, Iain, y Timothy Oke. 2012. "Local Climate Zones for Urban Temperature Studies." *American Meteorological Society* 93 (12): 1879-1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.

Stewart, I. D., Oke, T. R., & Krayenhoff, E. S. (2013). Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062–1080. doi:10.1002/joc.3746

Smith Guerra, Pamela; Henríquez Ruiz, Cristián. 2021 "Propuesta de un indicador para evaluar la calidad climática urbana: estudio de caso en una ciudad media mediterránea chilena." *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 30 (1): 144-157. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v30n1.79653>.

Villanueva-Solis, Jorge, Ranfla, Arturo, & Quintanilla-Montoya, Ana L. (2013). Isla de Calor Urbana: Modelación Dinámica y Evaluación de medidas de Mitigación en Ciudades de Clima árido Extremo. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000100003>

Yang, J., Shi, B., Shi, Y., Marvin, S., Zheng, Y., & Xia, G. (2020). Air pollution dispersal in high density urban areas: Research on the triadic relation of wind, air pollution, and urban form. *Sustainable Cities and Society*, 54, 101941. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101941>

Wang, R., Ren, C., Xu, Y., Lau, K. K.-L., & Shi, Y. (2018). Mapping the local climate zones of urban areas by GIS-based and WUDAPT methods: A case study of Hong Kong. *Urban Climate*, 24, 567–576. doi:10.1016/j.uclim.2017.10.001

Wei T, Wu J and Chen S (2021) Keeping Track of Greenhouse Gas Emission Reduction Progress and Targets in 167 Cities Worldwide. *Front. Sustain. Cities* 3:696381. doi: 10.3389/frsc.2021.696381

Williams Castro, C. (2019). Intensidad de las islas de calor urbanas superficiales en las principales conurbaciones de la V región de Valparaíso y factores geográficos explicativos para el caso específico de la conurbación del gran Valparaíso. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173610>

World Bank Open Data. (s. f.). World Bank Open Data.  
<https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.TOTL.UR.K2?end=2015&start=1990&view=chart>