



Facultad de Ingeniería.

Escuela de Construcción Civil.

“Incidencia de la Implementación de Fachadas y Cubiertas Verdes en el Microclima Urbano de la Ciudad de Antofagasta”

Por

Felipe Quiroga Espejo.

Tesis para optar al título de ingeniero en construcción.

Profesor Guía: Dr. Claudio Carrasco Aldunate.

Fecha 27/06/2025.

Dedicatorias y Agradecimientos.

A mis padres Danica Espejo y José Quiroga, quienes han sido mi pilar fundamental. Gracias por todo lo que hicieron y por lo que dejaron de hacer a lo largo de toda mi vida para que yo pudiera llegar hasta aquí. Su amor incondicional, sus consejos, su paciencia y su ejemplo me enseñaron el valor del esfuerzo, la humildad y la perseverancia. Esta meta también es de ustedes.

A Alondra González, mi fiel compañera de vida, gracias por tu gran amor y apoyo incondicional, por tu fe en mí hasta en los momentos más difíciles y por estar a mi lado en cada minuto de este largo viaje.

A mi hermana Sofía Quiroga, que hoy me mira con ojos llenos de curiosidad y cariño. Este trabajo también es para ti, para que cuando crezcas y lo leas, sepas que todo es posible si se hace con dedicación y perseverancia. Nunca dejes de soñar en grande.

A mis abuelos, tíos y primos, gracias a cada uno por formar parte de ese círculo que siempre me hizo sentir acompañado y querido. Cada gesto, palabra y momentos compartidos me dieron energía para llegar hasta acá, esto sin duda también es gracias a ustedes.

A mis amigos de la vida, los que siempre han estado, gracias por los momentos y por seguir caminando conmigo a pesar de la distancia y el tiempo.

A mis amigos de la universidad, gracias por todo lo pasado y hacer más ameno este largo camino. Sin duda me llevo amistades valiosas.

A mi profesor guía Dr. Claudio Carrasco, por su dedicación, disponibilidad, claridad y motivación, que hicieron de esta investigación posible.

Y a todos los que de alguna u otra manera contribuyeron en mi formación tanto dentro como fuera de la universidad durante este arduo camino.

¡¡¡GRACIAS TOTALES!!!

Felipe Quiroga Espejo

Índice

“Incidencia de la Implementación de Fachadas y Cubiertas Verdes en el Microclima Urbano de la Ciudad de Antofagasta”	1
Dedicatorias y Agradecimientos	2
Índice	3
Índice de Tablas	6
Índice de Figuras	8
Lista de Abreviaturas y Siglas	11
Resumen	12
1. Antecedentes Generales	13
1.1. Planteamiento del problema de investigación.	13
1.2. Estado del arte.	15
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo General.....	18
1.3.2. Objetivos Específicos	18
1.4. Alcances.....	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1. La temperatura del aire y su situación global	19
2.2. Clima	21
2.2.1. Características físicas de la superficie	22
2.2.2. Composición de la atmósfera	23
2.2.3. Factores climáticos y su influencia en la variación del clima	24
2.2.4. Escala de análisis del clima	25
2.3. Clima urbano: Fenómeno Isla de Calor Urbano (ICU)	26
2.3.1. Tipos de isla de calor urbano	29
2.4. Descriptores morfológicos y su influencia en la temperatura	30
2.5. Materialidad urbana y temperatura del aire.....	31
2.6. Medidas de mitigación del efecto ICU	36
2.6.1. Cubiertas verdes	38
2.6.2. Fachadas verdes.....	42
2.7. Métodos para la obtención de datos	44
2.7.1. Temperatura superficial terrestre	44

2.7.2. Interpretación de imágenes ráster satelitales	45
2.7.3. islas de calor atmosferico	46
2.7.4. Modelado de clima urbano	48
2.8. Caso de estudio ciudad de Antofagasta	51
2.8.1. Ubicación geográfica.....	51
2.8.2. Población	53
2.8.3. Clima promedio en Antofagasta	53
2.8.4. Isla de calor urbano en Antofagasta.....	56
2.8.5. Selección de especie óptima para Antofagasta	57
2.8.6. Gestión del recurso Hídrico en Antofagasta	58
3. Metodología de la investigación.....	60
3.1. Análisis térmico y diagnóstico inicial de Antofagasta en el contexto ICU	61
3.1.1. Obtención de imágenes satelitales.....	61
3.1.2. Procesamiento de datos satelitales con software QGIS.....	62
3.2. Selección de zonas de estudio	63
3.3. Modelado urbano con ENVI-met	63
3.3.1. Parámetros para las simulaciones.....	64
3.3.2. Simulación de escenarios.....	65
3.3.3. Adaptación de materiales.....	66
3.3.4. Visualización y resultados	66
3.5. Resultados.....	66
3.6. Evaluación de la viabilidad técnica-económica.....	66
4. Presentación y análisis de resultados.....	68
4.1. Resultados del Objetivo Especifico N°1	68
4.1.1. Selección de Imágenes Satelitales	68
4.1.2. Análisis de Temperatura Superficial Terrestre (LST) promedio para verano e invierno.....	71
4.1.3. Análisis de la Intensidad del Fenómeno de Isla de Calor Urbano ICU	73
4.1.4. Selección y Caracterización de las Zonas Críticas para Evaluación de Mitigación	75
4.2. Resultados del Objetivo Específico N°2	80
4.2.1. Modelación y configuración de los escenarios urbanos	80
4.2.2. Ubicación de los puntos de referencia (P.R.).....	88

4.2.3. Parámetros de configuración atmosférica utilizados en simulaciones	90
4.2.4. Configuración de especies vegetales para mitigación térmica urbana	91
4.2.5. Composición estructural de cubiertas y fachadas verdes	92
4.2.6. Resultados de simulaciones	94
4.2.7. Síntesis de resultados térmicos (Paseo Arturo Prat)	131
4.2.8 Síntesis de resultados térmicos (Paseo Manuel Matta)	133
4.2.9. Síntesis de resultados.....	135
4.3. Resultados Objetivo Específico N°3	137
4.3.1. Guía técnica para cubierta verde extensiva con Sedum sediforme	138
4.3.2. Guía técnica para fachada verde modular con Sedum sediforme.....	141
4.3.3 Análisis de costos de inversión inicial.....	146
4.3.4. Análisis de costos operativos anuales.....	148
4.3.5. Análisis de beneficios energéticos/económicos anuales.....	149
4.3.6 Evaluación Económica Integrada: Costos, Beneficios y Rentabilidad.....	150
5. Conclusiones.....	152
5.1. Conclusiones objetivo específico N°1	152
5.2. Conclusiones objetivo específico N°2.....	153
5.3. Conclusiones objetivo específico N°3.....	154
5.4. Conclusión Objetivo General	155
5.5 Futuras Investigaciones	156
Bibliografía.....	157
Anexos	166

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Clasificación de escala de clima como distancia horizontal.....	26
Tabla 2.2: Características de las islas de calor superficial y atmosférica.	30
Tabla 2.3: Calor específico de materiales de construcción típicos.	32
Tabla 2.4: Coeficientes de absortividad de materiales típicos.	33
Tabla 2.5: Albedo y emisividad de materiales típicos de uso urbano.	34
Tabla 2.6: Conductividad térmica, calor específico y densidad de algunos materiales de construcción.....	35
Tabla 2.7. Clasificación de intensidades ICUs verano e invierno.....	47
Tabla 2.8. Elección de Especia Optima	58
Tabla 4.1. Fechas de imágenes satelitales seleccionadas.....	69
Tabla 4.2: Resumen dimensiones modelación Paseo Prat.	84
Tabla 4.3: Resumen dimensiones modelación Paseo Matta.	88
Tabla 4.4: Configuración de especie Sedum Sediforme	91
Tabla 4.5: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "1" k=0 (0,2m). [X=61, Y=32]	95
Tabla 4.6 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 2" k=0 (0,2m). [X=61, Y=60].	97
Tabla 4.7 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 3" k=0 (0,2m). [X=61, Y=93].	99
Tabla 4.8: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 1" k=3 (1,8m). [X=61, Y=32].	101
Tabla 4.9: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "2" k=3 (1,8m). [X=61, Y=60].	103
Tabla 4.10 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 3" k=3 (1,8m). [X=61, Y=93].	105
Tabla 4.11: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 1" k=15 (23m). [X=61, Y=32].	107
Tabla 4.12: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "2" k=15 (23m). [X=61, Y=60]	109
Tabla 4.13: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "3" k=15 (23m). [X=61, Y=93].	111
Tabla 4.14: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, P. Referencia " 1" k=0 (0,2m). [X=31, Y=63].	113
Tabla 4.15: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 2" k=0 (0,2m). [X=63, Y=63].	115
Tabla 4.16 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia " 3" k=0 (0,2m). [X=89, Y=63].	117

Tabla 4.17: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "1" k=3 (1,8m). [X=31, Y=63].....	119
Tabla 4.18: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "2" k=3 (1,8m). [X=63, Y=63].	121
Tabla 4.19: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "3" k=3 (1,8m). [X=89, Y=63].	123
Tabla 4.20: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "1" k=15 (23m). [X=31, Y=63].....	125
Tabla 4.21: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "2" k=15 (23m). [X=63, Y=63].	127
Tabla 4.22: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "3" k=15 (23m). [X=89, Y=63].	129
Tabla 4.23. Especificaciones técnicas de materiales para cubierta verde	139
Tabla 4.24. Especificaciones técnicas de materiales para fachada verde modular ...	141
Tabla 4.25: Resultados de estimación de ahorros anuales por m2.....	149

Índice de Figuras

Figura 2.1: Gráfica niveles de concentración de CO_2 en la atmósfera.	20
Figura 2.2: Aumento de la temperatura media global desde 1880.....	20
Figura 2.3: Modelos de circulación atmosférica urbana.	26
Figura 2.4: Representación esquemática del efecto Isla de Calor Urbano.....	27
Figura 2.5: Intensidad, configuración y máximo térmico en la isla de calor.	28
Figura 2.6: Esquema de tipos de Islas de Calor Urbanas.....	29
Figura 2.7: Esquema de beneficios de la Infraestructura Verde.	37
Figura 2.8: Componentes generales de un techo verde.....	38
Figura 2.9: Disminución de T° superficiales con cubiertas verdes.	39
Figura 2.10: Cubiertas verdes en ampliación aeropuerto internacional de Santiago. .	41
Figura 2.11: Estructura del sistema de cubierta vegetal empleado.	41
Figura 2.12: Componentes de una fachada verde típica.	42
Figura 2.13: Diagrama de flujo para la obtención de la temperatura superficial terrestre con LANDSAT 8.....	45
Figura 2.14: Bandas de sensores OLI y TIRS de LANDSAT 8.	46
Figura 2.15: Temperaturas superficiales y atmosféricas durante el día y la noche.....	47
Figura 2.16: Detalles del proceso de simulación de los dos modelos seleccionados en ENVI-met.....	49
Figura 2.17: Resultados de la simulación del Modelo A.	49
Figura 2.18: Resultados de la simulación del Modelo B.....	49
Figura 2.19: Efectos de los escenarios de infraestructura verde propuestos a la temperatura de las superficies en el Modelo A.....	50
Figura 2.20: Efectos de los escenarios de infraestructura verde propuestos a la temperatura de las superficies en el Modelo B.....	51
Figura 2.21: Vista satelital Ciudad de Antofagasta.....	52
Figura 2.22: Plan regulador comunal de la ciudad de Antofagasta.	52
Figura 2.23: Temperaturas máximas y mínimas promedio año 2024.	53
Figura 2.24: Temperatura media mensual Región Antofagasta año 2023.....	53
Figura 2.25: Grafico proyección de días cálidos por año en Antofagasta.	55
Figura 2.26: Grafico proyección de $Temp^\circ$ máxima diaria en Antofagasta.	55
Figura 2.27: Mapa aumento de riesgo ICU por ciudad, Chile.	56
Figura 2.28: Variación de Temperaturas rurales y urbanas Antofagasta.	57
Figura 2.29: Portada portal de noticias “Adiós a la sequía en Antofagasta”	59
Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.	60
Figura 3.2: Selección de coordenadas de la ciudad de Antofagasta EarthExplorer ...	60
Figura 3.3: Esquema datos Ráster.....	62
Figura 3.4. Iniciación software.....	62

Figura 4.1: Elevación Solar de Fechas seleccionadas.....	70
Figura 4.2. Promedio de LST verano, Antofagasta.....	71
Figura 4.3. Promedio de LST invierno, Antofagasta.	72
Figura 4.4. Intensidad isla de calor urbano, verano, Antofagasta.	74
Figura 4.5. Intensidad isla de calor urbano, verano, Antofagasta.	74
Figura 4.6. Extracto del mapa promedio de LST, verano, Antofagasta.....	76
Figura 4.7. Extracto del mapa de intensidad de ICU, verano, Antofagasta.	76
Figura 4.8. Presentación de las dos zonas de estudio seleccionadas, Antofagasta.	77
Figura 4.9. Evidencia multitemporal de hotpost en las dos zonas de estudio seleccionadas.	78
Figura 4.10. Gráficos de comparación de Temp° de zonas de interés y zonas residenciales.....	79
Figura 4.11. Paseo Peatonal Arturo Prat, Antofagasta.....	81
Figura 4.12. Paseo Peatonal Arturo Prat, Antofagasta.....	82
Figura 4.13. Imagen satelital paseo peatonal Prat, Antofagasta.	83
Figura 4.14. Modelo en 2D de paseo peatonal Prat, Antofagasta.	83
Figura 4.15. Modelo en 3D de paseo peatonal Prat, Antofagasta.	84
Figura 4.16: Paseo Peatonal Manuel Matta, Antofagasta.	85
Figura 4.17: Paseo Peatonal Manuel Matta, Antofagasta.	85
Figura 4.18. Imagen satelital paseo peatonal Matta, Antofagasta.....	86
Figura 4.19. Modelo en 2D de paseo peatonal Matta, Antofagasta.	87
Figura 4.20. Modelo en 3D de paseo peatonal Matta, Antofagasta.	87
Figura 4.21. Ubicación de los receptores paseo peatonal Prat, Antofagasta.....	89
Figura 4.22. Ubicación de Receptores en paseo peatonal Matta, Antofagasta.	89
Figura 4.23. configuración del sistema constructivo en el Software.	93
Figura 4.24: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.....	95
Figura 4.25: diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.	96
Figura 4.26: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	97
Figura 4.27: Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.	98
Figura 4.28. Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.	99
Figura 4.29. Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.	100
Figura 4.30: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	101
Figura 4.31: Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.	102
Figura 4.32: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.....	103
Figura 4.33: Gráficos térmica (C°) para cada hora analizada.	104
Figura 4.34: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	105

Figura 4.35: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	106
Figura 4.36: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.....	107
Figura 4.37: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	108
Figura 4.38: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.....	109
Figura 4.39: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	110
Figura 4.40: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.....	111
Figura 4.41: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	112
Figura 4.42: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	113
Figura 4.43: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	114
Figura 4.44: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	115
Figura 4.45: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	116
Figura 4.46: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	117
Figura 4.47: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	118
Figura 4.48: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	119
Figura 4.49: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	120
Figura 4.50: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	121
Figura 4.51: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	122
Figura 4.52: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	123
Figura 4.53: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	124
Figura 4.54: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	125
Figura 4.55: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	126
Figura 4.56: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	127
Figura 4.57: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	128
Figura 4.58: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.	129
Figura 4.59: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.....	130
Figura 4.60: comparación vertical de temperaturas en el paseo Arturo Prat en PR1.	132
Figura 4.61: comparación vertical de temperaturas en el paseo Manuel Matta en PR3.	134
Figura 4.62: Gráfico Comparación de resultados con literatura referenciada. (C°).	136
Figura 4.63. Componentes de una cubierta verde extensiva.....	138
Figura 4.64: Análisis de precios unitarios para cubierta vegetal extensiva con Sedum sediforme.	146
Figura 4.65: Análisis de precios unitarios para fachada vegetal modular con Sedum sediforme.	147

Lista de Abreviaturas y Siglas

- **ICU:** Isla de Calor Urbano
- **LST:** Temperatura de la Superficie Terrestre (Land Surface Temperature)
- **SIG:** Sistemas de Información Geográfica
- **QGIS:** Sistema de Información Geográfica de Código Abierto (Quantum GIS)
- **ENVI-met:** Environmental Virtual Integrated Climate Model
- **NDVI:** Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference vegetation Index)
- **TOA:** Radiancia en la Superficie Atmosférica (Top of Atmosphere Radiance)
- **BT:** Temperatura de Brillo (Brightness Temperature)
- **NCh:** Norma Chilena
- **OGUC:** Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones
- **PM10:** Material Particulado Menor a 10 Micrómetros
- **IGRA:** Asociación Internacional de Techos Verdes (International Green Roof Association)
- **NOAA:** Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Oceanic and Atmospheric Administration)
- **WMO:** Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization)
- **IPCC:** Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change)
- **CLP:** Capa límite atmosférica.

Resumen

El fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU), es un problema ambiental que hoy en día afecta a las ciudades densamente urbanizadas, donde las temperaturas son más elevadas en las zonas más urbanizadas de la ciudad en comparación a las zonas rurales. Este aumento de calor es causado principalmente por la absorción y retención de energía en los materiales de construcción, como el asfalto y el hormigón, que son comúnmente utilizados en los entornos urbanos. En ciudades que presentan climas áridos como lo es la ciudad de Antofagasta, Chile, este fenómeno representa un desafío aun mayor, ya que las altas temperaturas y la falta de humedad impactan negativamente en la calidad de vida y el consumo energético.

El objetivo principal de esta investigación es evaluar el desempeño de las cubiertas y fachadas verdes en la mitigación del fenómeno de isla de calor urbano en Antofagasta, analizando como su implementación puede reducir la temperatura del aire circundante y mejorar la eficiencia energética en las edificaciones. El estudio utilizara herramientas digitales como QGIS para el análisis de imágenes satelitales y ENVI-MET para simular el comportamiento térmico de diferentes configuraciones urbanas que integren infraestructura verde.

Los resultados de esta investigación ofrecerán datos precisos sobre el impacto de las soluciones basadas en infraestructura verde en la reducción de la temperatura del aire en la ciudad de Antofagasta, un entorno caracterizado por condiciones climáticas extremas. A través de este trabajo de investigación, se espera contribuir al desarrollo de políticas urbanas que promuevan la integración de cubiertas y fachadas verdes, favoreciendo a la creación de ciudades más sostenibles, eficientes y con mejor calidad de vida en regiones áridas.

Palabras clave: Infraestructura verde, isla de calor urbano, microclima urbano, sustentabilidad en la construcción, vegetación urbana, mitigación del calor urbano, eficiencia energética.

1. Antecedentes Generales

1.1. Planteamiento del problema de investigación.

La creciente urbanización a nivel mundial ha traído consigo una serie de desafíos ambientales, siendo uno de los más relevantes el fenómeno conocido como Isla de Calor Urbano (ICU). Este fenómeno se caracteriza por un aumento de la temperatura en las áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes, resultado de la alta densidad de construcciones, la utilización de materiales que retienen calor, y la reducción de superficies verdes que podrían mitigar estos efectos. En ciudades situadas en zonas áridas, como Antofagasta, este problema se ve agravado debido a las características climáticas de la región, que incluyen altas temperaturas y baja humedad. La eficiencia energética de las edificaciones en estas áreas urbanas se ve comprometida por la necesidad constante de climatización, lo que a su vez incrementa el consumo energético y, en consecuencia, las emisiones de gases de efecto invernadero. La falta de estrategias sostenibles en la construcción que puedan aliviar el impacto de estos fenómenos agrava la situación, contribuyendo no solo al deterioro del microclima urbano, sino también a una mayor dependencia de fuentes energéticas no renovables.

En este contexto, surge la necesidad de desarrollar y aplicar soluciones constructivas innovadoras que no solo sean funcionales en términos de infraestructura, sino que también contribuyan a la sostenibilidad ambiental. Las fachadas verdes, como una estrategia de construcción sostenible, se presentan como una solución viable que podría mitigar los efectos adversos del calentamiento urbano y mejorar la eficiencia energética de los edificios. Sin embargo, la implementación de estas tecnologías en entornos áridos y desafiantes como Antofagasta requiere de un estudio detallado y específico que evalúe su viabilidad, impacto y efectividad.

En la ciudad de Antofagasta, ubicada en una de las regiones más áridas del mundo, la urbanización ha avanzado sin una consideración adecuada de los impactos ambientales a largo plazo. Las edificaciones predominantes en la ciudad están construidas con materiales que exacerban el efecto de Isla de Calor Urbano, lo que resulta en un microclima urbano cada vez más hostil, caracterizado por temperaturas elevadas y un aumento en la demanda de energía para climatización. Un estudio detalla que, El efecto (ICU) en Antofagasta produce un aumento de temperatura de 2 a 5 °C durante la noche, con una situación más dispersa durante el día (Palme & Carrasco, 2022), además otro estudio más reciente, registro una intensidad del efecto de ICU de 3.64(°C), con una proyección de para el año 2065, de 5.30(°C) en base al crecimiento urbano, provocando que sea la ciudad del país más afectada por el efecto de ICU, solo por detrás de la región metropolitana (Cristian Henríquez, 2021).

El problema específico radica en la falta de estrategias constructivas sostenibles adaptadas a las condiciones urbanas y climáticas de Antofagasta. Esto agrava el microclima urbano, afectando la calidad de vida y aumentando la vulnerabilidad frente al cambio climático. La investigación busca llenar este vacío proporcionando datos que orienten la implementación de fachadas verdes, evaluando su impacto en la eficiencia energética y su potencial para mitigar el efecto de ICU.

1.2. Estado del arte.

Actualmente, el planeta Tierra atraviesa un proceso de cambio climático que ha generado un aumento significativo de las temperaturas globales. Según el reporte global de clima anual de 2023, elaborado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), el año 2023 se destacó como el más cálido registrado desde 1850, donde la temperatura media global (tierra más océano), alcanzó los 14.98°C, superando en 1.18°C el promedio del siglo XX (1901-2000) (NOAA, 2023). Este fenómeno no es aislado, y las proyecciones para los próximos años indican un incremento sostenido, sin ir más allá, se prevé que la temperatura media mundial cercana a la superficie para cada año entre 2024 y 2028 sea entre 1,1°C y 1,9°C más alta que la de referencia del período 1850-1900. El mismo informe afirma que es probable (86%) que al menos uno de estos años establezca un récord de temperatura, superando a 2023" (WMO, 2024) Chile no ha sido ajeno a estos efectos del cambio climático. Durante el año 2023, la temperatura media de Chile continental fue de 13.5°C, lo que lo convirtió en el año más cálido desde 1961, superando el promedio climático en +1.09°C. En particular, se registraron temperaturas más altas en gran parte del territorio chileno, especialmente en las zonas norte y centro (DGAC, 2024).

Estos incrementos de temperatura están directamente vinculados a la intervención humana. En los últimos siglos, el crecimiento económico y demográfico han provocado transformaciones notables en el uso y la cobertura de la tierra. Uno de los ejemplos más evidentes de este fenómeno es la urbanización, un proceso mediante el cual los ecosistemas naturales son reemplazados por infraestructuras construidas, como edificios de hormigón y carreteras de asfalto, lo que altera de manera significativa los microclimas urbanos, exacerbando la acumulación de calor (Foley et al., 2005). En este contexto, Chile es uno de los países más urbanizados del mundo en una de las regiones más urbanizadas. Por consecuencia, las ciudades de Chile son fuente de muchas de las emisiones que generan el cambio climático, y están sujetas también a los impactos negativos derivados de ello (Ministerio de ciencias, 2019). Un indicador de esto es el informe de Estimaciones y proyecciones de la población de Chile, realizado por el Instituto Nacional de Estadísticas, el cual indica que al año 2019, el 88.4% de la población nacional reside en zonas urbanas, esto se ve incrementado en regiones del norte del país, llegando incluso a un 96.7% de población urbana en la región de Antofagasta, convirtiéndose así en la región con mayor concentración de población urbana del país, seguida por la región Metropolitana y Tarapacá (INE, 2019).

El proceso de urbanización ha sido identificado como un factor clave en el aumento de las temperaturas urbanas a través del comportamiento térmico de los materiales. Este fenómeno es conocido como "isla de calor urbano" (ICU), que se refiere al aumento de la temperatura en las áreas urbanas en comparación con las zonas rurales circundantes. Esto se debe a cambios en el balance energético, donde las áreas urbanas absorben más radiación solar y experimentan una menor evaporación, lo que intensifica las temperaturas en las

ciudades. Este efecto es más pronunciado en entornos densamente urbanizados, donde materiales como el hormigón y el asfalto retienen el calor, lo que conduce a condiciones más cálidas, especialmente durante la noche (Zhang et al., 2024).

En Chile, la alta concentración de población en áreas urbanas y la acelerada expansión de las ciudades, especialmente en el norte del país, ha intensificado la presencia del fenómeno de isla de calor urbano. Las regiones urbanizadas del país, como Antofagasta, donde el 96.7% de la población reside en zonas urbanas (INE, 2019), son particularmente vulnerables debido a la aridez natural del territorio, que agrava los efectos del calentamiento urbano. Según un Atlas de riesgos climáticos realizado por el ministerio de medio ambiente del gobierno de Chile, Antofagasta está dentro del rango “alto” en el aumento del riesgo de isla de calor urbana (ICU) integrando valores normalizados de amenaza, exposición y sensibilidad (ministerio de medio ambiente de Chile, 2020). Estudios recientes han demostrado que la urbanización en climas áridos, como el de Antofagasta, no solo exacerba el efecto de isla de calor, sino que también incrementa la demanda energética para la refrigeración de espacios interiores, elevando así las emisiones de gases de efecto invernadero (Salvati et al., 2017).

El fenómeno de la isla de calor urbano no solo afecta las temperaturas atmosféricas, sino que tiene consecuencias más amplias sobre la salud pública, el confort térmico, y la eficiencia energética en las ciudades (Stone, 2007), las diferencias de temperatura entre las áreas urbanas y rurales pueden llegar hasta los 5°C, con un impacto más severo en las noches de verano, lo que agrava las olas de calor (Santamouris, 2014). En el caso de Chile, las zonas densamente urbanizadas como Santiago y Antofagasta ya han comenzado a experimentar estos efectos. Un estudio realizado a ciudades costeras del Pacífico, reveló que el efecto ICU en Antofagasta produce un aumento de temperatura de 2 a 5 °C durante la noche, con una situación más dispersa durante el día (Palme & Carrasco, 2022). Otro estudio centrado en la variación en la intensidad de la isla de calor urbana en ciudades chilenas, realizado por el Instituto de geografía de la PUC, revela que en el año 2021, se registró una intensidad del efecto de ICU de 3.64(°C), con una proyección para el año 2065, de 5.30(°C), posicionando a Antofagasta como la segunda ciudad con mayor intensidad del efecto ICU, solo por detrás de la región Metropolitana (Henríquez, 2021), esto hace crucial la implementación de medidas de mitigación para el efecto de ICU.

Una revisión reciente indica que diferentes tipos de infraestructura verde, incluidos las cubiertas y fachadas, contribuyen significativamente a mitigar el efecto de la isla de calor urbano, regulando las temperaturas y mejorando el confort térmico en las ciudades (Shao & Kim, 2022). Por otra parte, dentro de los beneficios energéticos, estudios recientes revelan que estos contribuyen a una reducción significativa de la carga de refrigeración que llega hasta el 70%, así como a una disminución de la temperatura interior hasta 15 °C (Mihalakakou et al., 2023). Esto se produce debido a que los techos verdes son únicos en el sentido de que proporcionan dos mecanismos de refrigeración: activos por evaporación y pasivos por aislamiento (Jamei et al., 2021).

En el año 2019, el El Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) ha promovido la creación de la primera norma técnica nacional (NCh 3626;2020) para “Techos Verdes”, con el objetivo de garantizar la calidad en su diseño, construcción y funcionamiento, a fin de maximizar los diversos beneficios que este tipo de sistema constructivo puede proporcionar. Esto a través de una modificación de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) que impulsa el uso de techos verdes en los edificios, permitiendo destinar el 25% de la superficie para construcciones complementarias como baños, pérgolas, o quinchos, mientras que el 75% restante podrá utilizarse para terrazas, áreas verdes, jardineras, o la instalación de paneles solares (MINVU, 2019). A pesar de esto último no existen proyectos con fachadas y/o cubiertas verdes en la ciudad de Antofagasta a la actualidad.

Dada la vulnerabilidad de Antofagasta ante los efectos de la isla de calor urbano, es crucial analizar el comportamiento de las fachadas y cubiertas verdes en esta región. Las particularidades climáticas y la alta densidad poblacional, junto con el impacto del cambio climático, subrayan la importancia de implementar soluciones sostenibles que regulen las temperaturas y mejoren el confort térmico. Este estudio proporcionará información valiosa sobre el desempeño de las estrategias urbanas encargadas de mitigar el efecto ICU adaptadas a las necesidades locales.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Determinar la Incidencia de Fachadas y Cubiertas Verdes en el microclima urbano en la ciudad de Antofagasta.

1.3.2. Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar el comportamiento térmico superficial en la ciudad de Antofagasta.
- 2) Evaluar el impacto de las fachadas y cubiertas verdes en la temperatura del aire en zonas urbanas seleccionadas en Antofagasta.
- 3) Evaluar la viabilidad técnica-económica para implementación de las soluciones de infraestructura verde propuestas.

1.4. Alcances

- Este estudio se desarrolla considerando edificaciones existentes, por lo que los resultados obtenidos reflejan el comportamiento térmico bajo condiciones ya construidas. Sin embargo, la metodología aplicada y las soluciones evaluadas son perfectamente replicables en futuros proyectos de edificación dentro del mismo entorno urbano

2. Marco Teórico

2.1. La temperatura del aire y su situación global

La temperatura es un indicador que refleja la cantidad de energía calorífica presente en el aire, según Ahrens & Henson, (2019). Esta energía resulta de la absorción de la radiación solar directa y la radiación terrestre emitida por la superficie del suelo. Los procesos de transferencia de calor, como la conducción, la radiación y la convección, influyen directamente en temperatura atmosférica.

La temperatura, es expresada comúnmente en grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$), esto bajo el Sistema Internacional de Unidades (SI), se determina con la utilización de instrumentos de precisión como el termómetro, el cual permite registrar la variación térmica en un rango definido.

La temperatura esta influenciada por diversos factores que se relacionan entre sí, entre estos podemos encontrar la inclinación de los rayos solares, el tipo de sustrato, la dirección y velocidad de los vientos, la latitud, la altitud sobre el nivel del mar, la proximidad a masas de agua y la intervención humana (Stewart & Oke, 2012).

En este contexto, la intervención humana es considerada como la responsable de más de 90% de los cambios climáticos ocurridos en el planeta tierra (Nobre C., 2001). Estos cambios han traído consigo como consecuencia el fenómeno denominado como calentamiento global, el cual se define como el proceso de aumento progresivo de la temperatura promedio del planeta y se considera como uno de los mayores desafíos ambientales de era moderna. Este fenómeno resalta el incremento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, como el dióxido de carbono, metano y óxidos de nitrógeno, que atrapan el calor emitido por la superficie terrestre, reduciendo así su escape al espacio exterior (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Según estudios recientes citados en el portal informativo de la NASA (2020), se estima que con una probabilidad mayor al 95% que la tendencia al calentamiento global, es resultado de la actividad humana desde mediados del siglo XX, hasta ahora. Estos aumentos de temperaturas afectan tanto a los ecosistemas naturales como a los entornos urbanizados, intensificando el fenómeno de isla de calor urbano y generando consecuencias adversas para la calidad de vida humana y la infraestructura urbana. En la siguiente figura 2.1 se puede apreciar los altos niveles de concentración de dióxido de carbono en la atmósfera en comparación a registros anteriores por consecuencia del cambio climático.



Figura 2.1: Gráfica niveles de concentración de CO_2 en la atmósfera.

Fuente: (www.climate.nasa.gov NASA, 2020).

En la siguiente figura 2.2 extraída del reporte global de clima anual de 2023, elaborado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), destaca el año 2023 como el más cálido registrado desde 1850, donde la temperatura media global (tierra más océano), alcanzó los 14.98°C , superando en 1.18°C el promedio del siglo XX (1901-2000) (NOAA, 2023), además se puede apreciar claramente la tendencia al alza en las temperaturas desde que se tienen registro de estas.

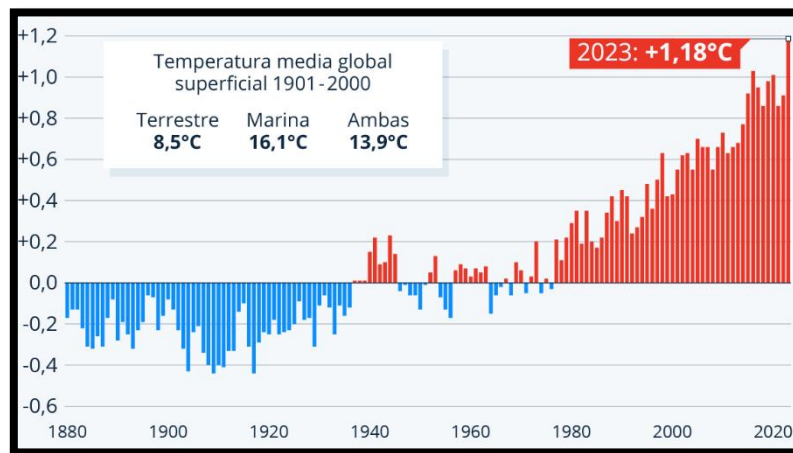


Figura 2.2: Aumento de la temperatura media global desde 1880.

Fuente: (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica NOAA, 2024).

Las proyecciones para los próximos años siguen indicando un incremento sostenido en las temperaturas, sin ir más allá, se prevé que la temperatura media mundial cercana a la superficie para cada año entre 2024 y 2028 sea entre $1,1^{\circ}\text{C}$ y $1,9^{\circ}\text{C}$ más alta que la de referencia del período 1850-1900. El mismo informe afirma que es probable (86%) que al menos uno de estos años establezca un récord de temperatura, superando a 2023 (WMO,

2024). Además, a largo plazo, se espera que la temperatura promedio global aumente entre 0,2°C y 0,3°C por década en los próximos 20 años. Esto implica un aumento proyectado de alrededor de 0,4°C a 0,6°C para 2040 en relación con las temperaturas actuales (NOAA, 2024).

2.2. Clima

El clima hace referencia al conjunto de condiciones atmosféricas características de una región durante un periodo de tiempo prolongado, como décadas, siglos o incluso milenios (IPCC, 2021). Este concepto abarca elementos relevantes como la temperatura, la humedad, la precipitación, la presión atmosférica y el viento, los cuales interactúan entre sí para definir los patrones climáticos de una zona específica. A diferencia del tiempo atmosférico, que describe las condiciones meteorológicas en lapsos cortos de tiempo como días o horas, el clima se enfoca en tendencias y comportamientos a largo plazo (Caballero et al., 2007).

Existen otros factores determinantes en el clima aparte de la temperatura, entre ellos podemos encontrar la humedad del aire, la radiación solar y los vientos, los cuales influyen de manera directa en la temperatura atmosférica.

La humedad del aire se refiere a la cantidad de vapor de agua existente en la atmósfera (Lawrence, 2005). Este contenido de humedad está vinculado directamente con la temperatura del aire, un ejemplo de esto puede ser que el aire cálido puede contener más vapor de agua que el aire frío.

Existen dos formas principales de medir la humedad:

- **Humedad absoluta:** Es la cantidad de vapor de agua presente en una unidad de volumen de aire, generalmente expresada en gramos por metro cúbico (g/m^3).
- **Humedad relativa:** Es la relación, expresada en porcentaje, entre la cantidad de vapor de agua actual en el aire y la cantidad máxima que podría contener a una temperatura.

Cuando el aire alcanza su capacidad máxima de contener vapor de agua a una temperatura específica, se dice que está en saturación, es a partir de este punto, que cualquier disminución de temperatura o adición de vapor de agua, puede provocar la condensación del vapor en forma líquida, lo que resulta en fenómenos como la formación de rocío o precipitación (GeoEnciclopedia, 2024).

La radiación corresponde a un tipo de energía electromagnética, que se describe como una forma ondulatoria de energía liberada por cualquier elemento con calor. Esta energía viaja a través del espacio a la velocidad de la luz y es crucial para los procesos meteorológicos y climáticos que regulan las dinámicas del planeta (Cox et al., 2023).

La radiación solar es uno de los factores más determinantes del clima, ya que desempeña un papel fundamental en la regulación de la temperatura atmosférica. Esta energía que es emitida por el sol, conocida como radiación solar, se manifiesta como un influjo constante que influye directamente en el calentamiento del aire y la superficie terrestre (Gutiérrez-Corea et al., 2020), la tierra recibe alrededor 174 petavatios de energía de radiación solar en la capa más externa de la atmósfera. Aproximadamente se refleja el 30% de esta energía, debido a la acción de las nubes, superficies terrestres y masas oceánicas, mientras que el 70% restante es absorbido por el planeta, contribuyendo al calentamiento global y al balance energético planetario (Conesa, 2012).

Según la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el viento se define como el movimiento horizontal del aire con respecto a la superficie terrestre, este es otro de los elementos destacados en la dinámica del clima. Este fenómeno se produce principalmente debido a las diferencias de presión o temperatura entre distintos puntos. Estos factores pueden verse influenciados por edificaciones, sus formas y los materiales utilizados en estas, los cuales alteran la circulación del aire, en donde las masas de aire caliente, al ser menos densas, tienden a elevarse, dejando un vacío que es ocupado por aire más frío y denso proveniente de las áreas circundantes. Este desplazamiento genera cambios en la temperatura del aire en el lugar afectado (Carrasco, 2008).

Los movimientos verticales del aire producidos por diferencias de densidad y temperatura se conocen como “corrientes de convección”, la interacción entre estos y el viento son esenciales para comprender la distribución del calor en la atmósfera y su influencia en los sistemas climáticos (Wallace & Hobbs, 2006).

2.2.1. Características físicas de la superficie

A grandes rasgos, se puede diferenciar entre dos agentes que componen el clima en una zona geográfica, las características físicas de la superficie y la composición de la atmósfera (Pielke et al., 2011). La interacción entre ambas es de mucha influencia en la temperatura atmosférica, definida como una característica del tiempo atmosférico relacionada con la temperatura de la superficie terrestre (Wallace & Hobbs, 2006).

Existe una serie de propiedades de las características físicas de las superficies urbanas que contribuyen a la formación y la intensificación del fenómeno ICU (Wallace & Hobbs, 2006).

Uno de estos es la capacidad calorífica, que hace referencia a la cantidad de energía necesaria para incrementar la temperatura de un cuerpo en una unidad de medida. Esta propiedad, describe la habilidad de un material para almacenar energía en forma de calor durante el proceso de calentamiento. La capacidad calorífica se puede calcular bajo dos

condiciones: a volumen constante (C_v) o a presión constante (C_p). Por lo general, la capacidad calorífica a presión constante es mayor, ya que incluye el trabajo adicional asociado con la expansión del material (Cengel C & Boles M, 2015).

La emisividad se describe como la relación entre la energía emitida por una superficie y la que emitirá un cuerpo negro ideal bajo la misma temperatura. Este concepto evalúa la capacidad de una superficie para emitir radiación térmica, con valor que van entre 0 y 1, los materiales con valores más próximos al 1 se consideran emisores altamente eficientes (Ghajar A. & Cengel Y., 2020).

Según la (NOAA, 2024), el albedo es la fracción de luz incidente o radiación electromagnética que se refleja a través de una superficie o elemento. Los valores del albedo, al igual que los de la emisividad, oscilan entre 0 (que corresponde a una superficie negra que absorbe toda la radiación incidente) y 1 (que corresponde a un elemento Reflector perfecto que refleja toda la radiación). Este concepto, es fundamental para el equilibrio energético del planeta, ya que determina la cantidad de energía solar que la tierra absorbe. En términos globales, el albedo planetario es de aproximadamente un 30% ($\alpha_p \approx 0.30$), lo que significa que cerca de un tercio de la radiación solar que llega a la tierra es reflejada de regreso al espacio. Este fenómeno se debe a la acción conjunta de elementos altamente reflectante, como las nubes, el hielo, la nieve y los desiertos, mientras que las superficies más oscuras, como los bosques o los océanos, tienen un valor de albedo más bajo, lo que significa que absorben más calor.

En el contexto urbano, un albedo elevado en los materiales de construcción utilizados en edificaciones y calles puede contribuir a disminuir la radiación solar absorbida por la ciudad, reduciendo así el calentamiento de las superficies (Marshall J. & Plumb R., 2016), Además, las superficies más frías resultantes favorecen a la disminución de la temperatura del aire circundante, ya que la convección del calor desde estas superficies se produce de manera más lenta, mitigando el sobrecalentamiento en áreas altamente urbanizadas (Santamouris M., 2001).

2.2.2. Composición de la atmósfera

La atmósfera terrestre está compuesta principalmente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), y otros gases en menor proporción, incluyendo gases de efecto invernadero (Wallace & Hobbs, 2006).

Esta desempeña un papel crucial al retener una porción de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre. Este proceso está influido por la presencia, en pequeñas cantidades, de ciertos gases como el vapor de agua, el dióxido de carbono y el óxido nitroso. Además, si no existiese la atmósfera, la temperatura media global sería de aproximadamente $-18\text{ (C}^\circ\text{)}$.

Gracias al denominado efecto invernadero el planeta es capaz de albergar vida manteniendo una temperatura aproximada de 15 (C°) (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023).

2.2.3. Factores climáticos y su influencia en la variación del clima

Las propiedades mencionadas anteriormente son relativamente invariables en el paso del tiempo, formando parte de los ciclos de transferencias de energía. Los predominantes son, la altura, la latitud, los cuerpos de agua y existencia de vegetación, que son parte de los factores climáticos que tienen influencia en la variación del clima (Y. Zhang et al., 2021).

La latitud es la medida angular entre cualquier punto de la tierra y el ecuador, la línea que divide el planeta en dos hemisferios. Esta es uno de los efectos más importantes en la determinación del clima de una respectiva región, ya que determina la cantidad de radiación solar que recibe un área específica de la superficie terrestre. A medida que la latitud aumenta desde la línea del ecuador hacia los polos, la radiación solar recibida disminuye debido al ángulo más oblicuo con que los rayos solares llegan a la superficie. Esto crea una distribución diferencial de energía que resulta en distintas zonas climáticas a lo largo de todo el globo terrestre (IPCC, 2023).

La latitud se define como la distancia vertical de un punto de la tierra con respecto al nivel medio del mar. Esta juega un papel importante en la determinación de las condiciones climáticas locales. Por cada 100 metros de elevación, el aire disminuye aproximadamente 0.65(C°) (gradiente térmico vertical), fenómeno denominado como gradiente adiabático. Este efecto se produce por la disminución de la presión atmosférica y la densidad del aire con la altura, lo que resulta en variaciones significativas en la temperatura, precipitaciones y otros parámetros meteorológicos en diferentes niveles de elevación (Barry, 2010).

Por otra parte, Además de la latitud y altitud, otros elementos juegan un rol fundamental en la determinación de las zonas climáticas:

- **Masas de agua:** Los cuerpos de agua, como ríos, lagos y estanques artificiales, juegan un papel crucial en la regulación climática al contribuir a la moderación de temperaturas tanto locales como regionales. Este proceso se da, a través de mecanismos como el enfriamiento por evaporación, donde el agua absorbe calor al evaporarse, y por su capacidad de alterar los patrones de viento en su entorno (Jandaghian & Colombo, 2024).
- **Corrientes marinas:** Sistemas de circulación oceánica que transportan calor desde las regiones ecuatoriales hacia los polos, influyendo significativamente en los patrones climáticos globales (Caesar et al., 2021).

- **Vegetación y grandes bosques:** Ecosistemas que regulan el clima local y regional mediante el intercambio de agua y energía con la atmósfera, afectando la humedad, temperatura y ciclos biogeoquímicos (Bonan, 2019).

2.2.4. Escala de análisis del clima

Según Oke et al., (2017) el clima el clima constituye un sistema integrado de fenómenos atmosféricos que interactúan en diferentes dimensiones espaciales y temporales. Su comportamiento puede ser analizado a través de distintas escalas que reflejan la complejidad de las interacciones atmosféricas, estas escalas se clasifican en:

- **Macroclima:** Se define por los patrones globales de circulación atmosférica, determinados principalmente por la distribución latitudinal de la radiación solar y la rotación terrestre. Abarca fenómenos a escala continental y hemisférica.
- **Clima Regional:** Representa modificaciones de la circulación general atmosférica debido a factores geográficos como la distribución de masas continentales, las corrientes oceánicas y la topografía regional. Comprende áreas de cientos a miles de kilómetros cuadrados.
- **Clima Local:** Caracterizado por las influencias del relieve local, incluyendo efectos orográficos como situaciones de barlovento y sotavento. Incorpora impactos antropogénicos como cambios en el uso del suelo y emisiones de gases de efecto invernadero. Su escala típica es de decenas de kilómetros.
- **Microclima:** Representa las condiciones atmosféricas a la menor escala, determinadas por factores superficiales específicos como la vegetación, estructuras urbanas o características del terreno. Opera en escalas desde metros hasta cientos de metros (Oke et al., 2017).

Las escalas atmosféricas conforman un sistema de clasificación que permite categorizar los procesos y fenómenos atmosféricos según sus dimensiones. Estos marcos de referencia son fundamentales para entender como los diferentes procesos atmosféricos interactúan y evolucionan en la atmósfera (World Meteorological Organization , 2017). Se propone una extensión horizontal para cada escala de estudio del clima, presentada en la siguiente tabla 2.1.

Tabla 2.1: Clasificación de escala de clima como distancia horizontal.

Escala	Extensión
Macro-escala	200 km a 1000km
Meso-escala	10km a 200km
Escala local	100 m a 50 km
Microescala	1cm a 1000m

(Fuente: Oke, 1988).

La siguiente figura 2.3 muestra dos modelos de circulación atmosférica urbana. El patrón de nubes urbanas (a) ocurre cuando la velocidad del viento sobre una ciudad excede los 3 m/s. En este caso, el aire urbano caliente y contaminado se eleva °C por encima de la capa límite urbana y se propaga hacia arriba. El modelo de cúpula urbana (b) se produce cuando la velocidad del viento sobre la ciudad es inferior a 3 m/s. En este caso, el aire caliente contaminado de la ciudad se acumula en la capa límite urbana y forma una cúpula contaminante.

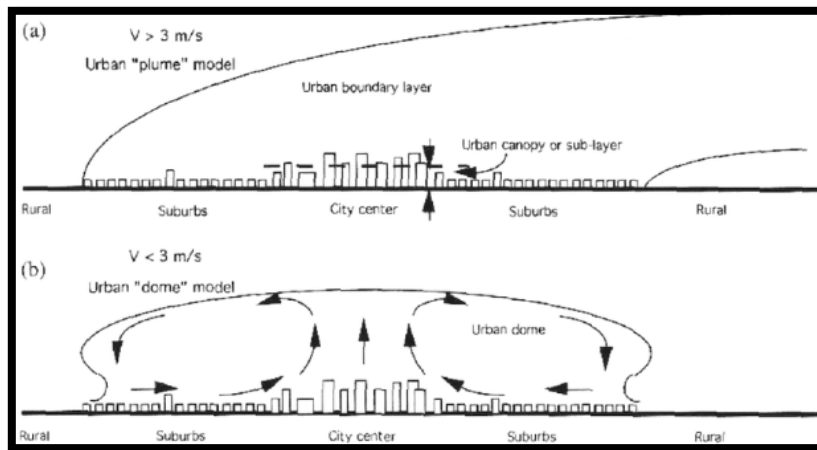


Figura 2.3: Modelos de circulación atmosférica urbana.

Fuente: (Atmospheric Chemistry and Physics, 2006).

2.3. Clima urbano: Fenómeno Isla de Calor Urbano (ICU)

El clima urbano se refiere a un sistema local climático, que es resultado de la interacción entre el entorno urbano y la atmósfera, el cual se caracteriza por tener condiciones meteorológicas que varían significativamente de las áreas rurales circundante (Stewart et al., 2014). Este fenómeno es resultado de las transformaciones antropogénicas del paisaje natural, donde la introducción de superficies impermeables, estructuras artificiales y actividades humanas alteran los procesos de intercambio de energía, momentum y masa entre la superficie terrestre y la atmósfera, generando un microclima propio de las áreas urbanizadas (Oke et al., 2017).

Es a partir de lo mencionado anteriormente que se genera el fenómeno conocido como Isla de Calor Urbano (ICU) que ocurre cuando las zonas más densamente urbanizadas presentan temperaturas del aire más altas que las áreas rurales circundantes, convirtiéndose en una de las consecuencias más claras de la influencia humana en el clima local (Zhao et al., 2021). Este aumento de temperatura se debe a varios factores, como el calor generado por actividades humanas, los materiales de construcción que almacenan más calor, la falta de superficies permeables que reduzcan la evapotranspiración, y la forma en que los edificios y calles afectan la ventilación y la radiación solar. La interacción de estos elementos no solo eleva las temperaturas en las ciudades, sino que también altera la circulación del aire y el equilibrio energético de la zona (J. Yang et al., 2020a).

El aumento de las temperaturas en las áreas urbanas se intensifica debido a las propiedades termofísicas de los materiales de construcción, que tienen una alta capacidad para almacenar y conducir calor. Estas características modifican los flujos de energía en la capa límite urbana, provocando que las temperaturas en las ciudades sean constantemente más altas en comparación con las zonas rurales cercanas (J. Yang et al., 2016). La figura 2.4 muestra este fenómeno de manera esquemática.

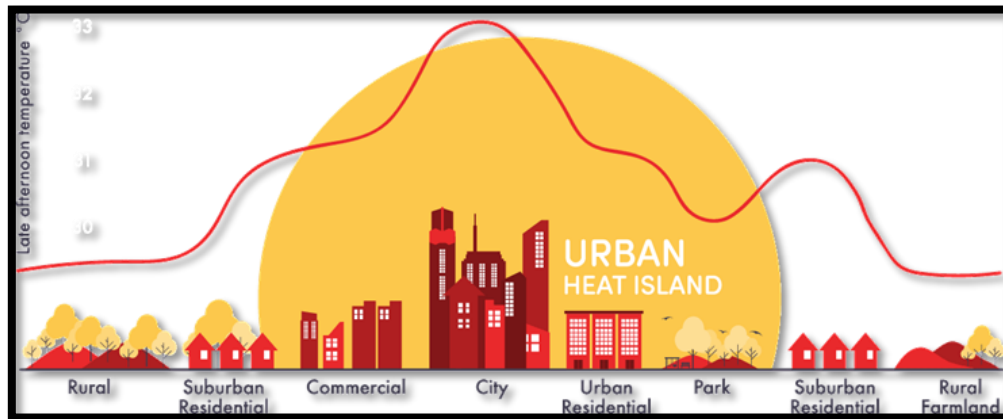


Figura 2.4: Representación esquemática del efecto Isla de Calor Urbano.

Fuente: (Kamyar Fuladlu, 2018, en World Meteorological Organization, 2021).

El comportamiento del fenómeno ICU muestra una marcada variación temporal, con distintos mecanismos de funcionamiento entre el día y la noche. Durante las horas diurnas, las superficies urbanas absorben y almacenan la radiación solar incidente, mientras que la geometría urbana genera múltiples reflexiones entre edificios, incrementando la cantidad de energía retenida en el cañón urbano (J. Yang et al., 2015). Durante la noche, el proceso se invierte: mientras las zonas rurales se enfrían rápidamente por radiación, las áreas urbanas mantienen temperaturas elevadas debido a la liberación gradual del calor almacenado en los materiales constructivos y la reducción de la velocidad de enfriamiento por la geometría urbana, alcanzando su máxima intensidad típicamente 3-5 horas después del atardecer (Giridharan & Emmanuel, 2018).

Es en este contexto, que el aumento de temperaturas en áreas urbanas debido a la ICU contribuye al incremento en la demanda energética para enfriamiento, exacerbando las emisiones de gases de efecto invernadero y empeorando la calidad de vida urbana (Carrasco, 2008). Además, este fenómeno tiene serias implicaciones para la salud pública, ya que puede aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias, golpes de calor y mortalidad, especialmente entre las poblaciones vulnerables como los ancianos y los niños (Cuerdo-Vilches et al., 2023). Este aumento de temperaturas trae consigo también un deterioro de la biodiversidad urbana, ya que las altas temperaturas pueden estresar o matar a las plantas y animales.

Gálvez en su informe en el congreso nacional del medio ambiente (2014) menciona los trabajos investigativos de Cuadrat (1993) y Gartland (2008) en los cuales las islas de calor se pueden describir en tres parámetros, representados en la figura 2.5.

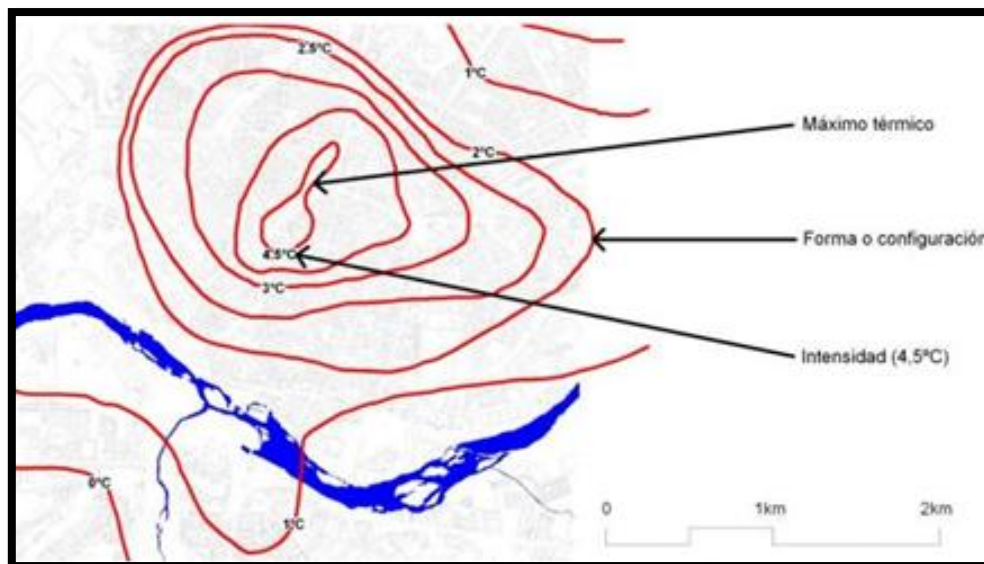


Figura 2.5: Intensidad, configuración y máximo térmico en la isla de calor.

Fuente: (Gálvez Salinas, 2014).

- **Intensidad de la ICU:** Es la medida de su fuerza o magnitud, esta hace referencia a la mayor diferencia de temperatura que es alcanzada en su máximo térmico dentro de la capa de dosel urbana (capa de aire de las ciudades más cercana a la superficie) con respecto a la de su entorno más cercano.
- **Máximo térmico:** Es el área donde se produce la mayor diferencia de temperatura.
- **Forma o configuración:** se refiere a la distribución espacial de las isotermas (curvas que representan la misma temperatura para una unidad espacial y temporal concreta).

2.3.1. Tipos de isla de calor urbano

Según Oke et al., (2017) las Islas de Calor Urbano son una diferencia de temperatura entre las áreas urbanas y rurales ($\Delta t = t_u - t_r$), clasificándose en cuatro tipos simples de ICU, los cuales se representan de manera esquemática en la figura 2.6.

- **Urban Canopy Layer (UCL) o dosel urbano:** La diferencia de temperatura del aire contenido en la capa del dosel urbano (capa entre la superficie urbana y el nivel del techo) y la altura correspondiente en la capa cercana a la superficie rural.
- **Urban Boundary Layer (UBL) o capa límite urbana:** Es la diferencia entre la temperatura de la capa que se encuentra en la parte superior de la UCL (dosel urbano) hasta la parte superior de la capa límite urbana UBL, y las elevaciones similares en la capa límite atmosférica de la región rural circundante.
- **Surface Urban Heat Island o Isla de Calor Urbana Superficial:** Son las diferencias de temperatura del aire entre la interfaz de la atmósfera exterior con los materiales solidos que se presentan en la ciudad y la interfaz de aire- tierra rural equivalente.
- **Subsurface Urban Heat Island o Isla de Calor Urbana Subsuperficial:** Son las diferencias entre los patrones de temperatura en el subsuelo de la ciudad, incluidos los suelos urbanos y la capa subterránea construida con aquellos, en el campo rural circundante.

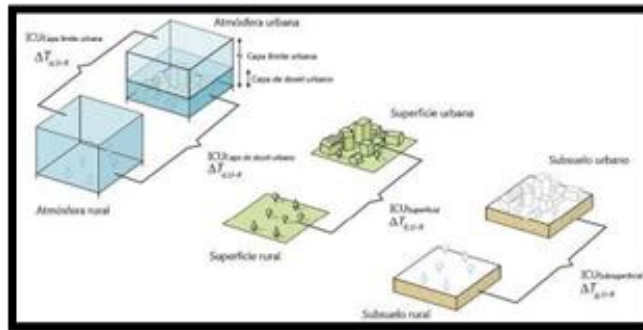


Figura 2.6: Esquema de tipos de Islas de Calor Urbanas.

(Fuente: Oke et al, 2017).

Moreno García & Serra, (2016), Clasifica en dos los tipos principales de isla de calor. Por un lado, está la isla de calor superficial (ICUs), que se refiere a la diferencia de temperatura entre los materiales y superficies urbanas en comparación con las superficies rurales cercanas a la ciudad. Por otro lado, se encuentra la isla de calor atmosférica, que hace alusión a la diferencia térmica en el aire entre las áreas urbanas y las rurales. Ambos fenómenos pueden observarse representados en la tabla 2.2 de a continuación.

Tabla 2.2: Características de las islas de calor superficial y atmosférica.

Características	Isla de calor superficial	Isla de calor atmosférica
Ritmo temporal	*Presente durante el día y la noche *Mayor intensidad durante el día y en verano	*Débil o inexistente durante el día *Mayor intensidad durante la noche o después de la puesta del sol y en invierno
Picos de intensidad	*Gran variación espacial y temporal: Durante el día de 10°C a 15°C Durante la noche de 5°C a 10°C	*Poca variación: Durante el día de -1,8°C a 3°C Durante la noche de 7°C a 12°C
Método de identificación	*Método indirecto Teledetección	*Método directo Estaciones meteorológicas fijas Transectos
Representación	*Imagen térmica	*Mapas de isotermas *Gráficos térmicos

Fuente: (Environmental Protection Agency, 2008, citado en Moreno & Serra, 2016).

2.4. Descriptores morfológicos y su influencia en la temperatura

Los descriptores morfológicos urbanos son los parámetros que caracterizan la forma y estructura tridimensional del entorno urbano, permitiendo analizar su influencia en las condiciones climáticas urbanas (Salvati et al., 2017).

Cuando existe una modificación de alguno de estos descriptores morfológicos, existe un impacto significativo en las temperaturas de las ciudades, influyendo en la temperatura del aire y en la temperatura de la superficie terrestre. Estos factores determinan como se distribuyen y almacenan el calor en las áreas urbanas, afectando directamente en el confort térmico y en el fenómeno ICU (Rodríguez-Álvarez, 2016).

A continuación, se definen los principales descriptores y sus efectos:

- **Relación de aspecto:** Determina la capacidad del cañón urbano para atrapar la radiación solar y modificar los patrones de flujo de aire, donde valores más altos indican una mayor capacidad de retención de calor y menor ventilación natural (Stewart & Oke, 2012).
- **Relación de área de piso:** Se define como la proporción entre el área construida y el área total de un terreno, presenta una fuerte correlación positiva con la temperatura de la superficie terrestre. Un mayor porcentaje de construcción implica una mayor capacidad de absorción y almacenamiento de calor, elevando las temperaturas superficiales (Yang et al., 2021).

- **Factor de cielo visible:** Es un parámetro adimensional que cuantifica la proporción de cielo visible desde un punto específico. Este descriptor morfológico influye significativamente en el balance radiativo urbano ya que valores bajos reducen la pérdida de radiación de onda larga durante la noche y limitan el enfriamiento (Bernard et al., 2018).
- **Altura media de los edificios:** Esta desempeña un papel relevante, especialmente durante las noches, ya que las estructuras más altas tienden a retener más calor debido al almacenamiento térmico en sus materiales constructivos, lo que contribuye a mantener las temperaturas más altas durante las horas nocturnas (X. Yang et al., 2017).

Por otra parte, la alta concentración de construcciones en un área impacta directamente en la temperatura del aire, por lo que zonas con alta densidad tienden a mostrar menores variaciones térmicas debido a la uniformidad de los materiales y el almacenamiento térmico (Azhdari et al., 2018). Además otros factores contextuales propios de cada ciudad como las zonas funcionales urbanas influyen en la variación de la temperatura, ya que, áreas comerciales e industriales, tienen a ser las mayores fuentes de calor, mientras que las zonas residenciales de la ciudad, presentan temperaturas más bajas, ya que existe una menor actividad humana y densidad de edificaciones (Huang & Wang, 2019).

2.5. Materialidad urbana y temperatura del aire

La materialidad urbana hace referencia al conjunto de materiales y superficies que conforman el entorno construido de cada ciudad, incluyendo las edificaciones, infraestructuras y pavimentos. Los cuales poseen propiedades térmicas y ópticas que influyen directamente en la variación térmica del ambiente urbano (Schrijvers et al., 2016).

Para un correcto estudio del fenómeno ICU, es fundamental entender la relación que existe entre la materialidad urbana y la temperatura del aire, ya que los materiales utilizados comúnmente en la envolvente urbana juegan un rol importante para el balance térmico de la ciudad, absorbiendo la radiación solar y disipando parte del calor acumulado mediante procesos de radiación y convección, resultando en un aumento de la temperatura del ambiente (Santamouris et al., 2011). En este contexto, los pavimentos, se desenvuelven como importantes fuentes de calor, esto debido a su extensa superficie y alta capacidad de almacenamiento calorífico, por lo que la comprensión de este material es fundamental para el estudio del clima urbano (Qin, 2015).

Según J. Yang et al., (2021) la temperatura del aire en el ambiente urbano se ve afectada por múltiples flujos de radiación (radiación directa y difusa de onda corta), radiación emitida por pavimentos y paredes del cañón urbano.

Cuando se hace referencia al termino de Calor Absorbido, este corresponde a la aptitud o facultad que tiene un cuerpo de almacenar calor por cada centígrado de temperatura. Por otra parte, el término Calor específico hace referencia a la cantidad de calor que hay que aportarle a 1 Kg de material para que este eleve su temperatura en 1 °C (Cengel C & Boles M, 2015) A continuación, en la tabla 2.1. se presenta el calor específico de algunos materiales de construcción típicamente utilizados en el entorno urbano.

Tabla 2.3: Calor específico de materiales de construcción típicos.

Material	C (J /Kg K)
hormigón	880
asfalto	920
revoque de cemento	1085
vidrio	836
lámina de acero	447
ladrillo	835

Fuente: (Incropera, Frank P., 1999).

Por otra parte, existen otras propiedades que inciden en los materiales de construcción, las cuales según la norma chilena (NCh853, 2007) se definen como:

- **Conductividad térmica:** Cantidad de calor que en condiciones estacionarias pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de material homogéneo, de caras planas y paralelas y de espesor unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Se expresa en $W/(m^*K)$.
- **Transmitancia Térmica:** Flujo de calor que pasa por una unidad de superficie de elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento. La Transmitancia Térmica se mide en $W / (m2 * °C)$ y se simboliza con una U.
- **Resistencia Térmica:** medida de la capacidad de un material o estructura para resistir el flujo de calor. Se mide en $(m2* °C) / W$ y se identifica con una R.

A continuación, en las tablas 2.4, 2.5 y 2.6, se presenta el listado de algunos materiales urbanos predominantes o comunes junto con sus propiedades físicas; absorptividad; emisividad; reflectancia (albedo), conductividad térmica, calor específico y densidad, estos respectivos coeficientes son de suma importancia, ya que serán empleados en la metodología de la investigación.

Tabla 2.4: Coeficientes de absorptividad de materiales típicos.

Materialidad	Absortividad
Aluminio pulido	0.3
Pintura de aluminio	0.2
Aluminio anodizado	0.15
Ladrillo acristalado	0.35
Ladrillo rojo claro común	0.55
Ladrillo rojo común	0.68
Ladrillo <i>copper wire cut</i>	0.52
Ladrillo azul	0.89
Corcho	0.45
Piedra caliza clara	0.35
Piedra caliza oscura	0.5
Linóleo marrón rojizo	0.84
Piedra arenisca gris claro	0.62
Piedra arenisca roja	0.73
Mármol blanco	0.44
Caucho gris	0.65
Mármol oscuro	0.66
Granito rojizo	0.55
Oxido de magnesio evaporado	0.08
Grafito	0.84
Porcelana	0.5
Acero vítreo esmaltado de color azul	0.8
Acero galvanizado nuevo	0.64
Acero galvanizado sucio	0.92
Acero galvanizado lavado en blanco	0.22
Hormigón	0.6
Cobre pulido	0.18
Cobre manchado	0.64
Plomo viejo	0.79
Tejas viejas de asbesto cemento	0.83
Tejas de asbesto cemento rojo	0.69
Cubierta de asbesto acanalado	0.81
Techo de asfalto nuevo	0.91
Techo de asfalto viejo	0.82
Plancha de techo cubierta de betún marrón	0.87
Pizarra gris azulado	0.87

Baldosa rojo arcilla	0.64
Baldosa hormigón bruto	0.65
Baldosa hormigón negro	0.91
Revestimiento blanco vitrificado	0.39
Azulejo holandés blanco	0.18
Cinc oxidado	0.74
Cinc pulido	0.55
Cinc muy pulido	0.34
Yeso/Cal	0.12

(Fuente: Díaz, 2012; Engineering ToolBox, 2009; Rosales, 2018).

Tabla 2.5: Albedo y emisividad de materiales típicos de uso urbano.

Elemento Urbano	Albedo	Emisividad
<i>Calle</i>		
Asfalto fresco	0.05	0.95
Asfalto antiguo	0.2	0.95
<i>Muros</i>		
Hormigón	0.10-0.35	0.94
Piedra	0.20-0.40	
Piedra Blanqueada	0.8	
Mármol Blanco	0.55	0.6
Mármol Gris		0.93
Granito oscuro	0.15	0.43
Granito claro	0.25	0.43
Ladrillo coloreado rojo	0.30-0.50	
Ladrillo rojo	0.20-0.30	0.9
Ladrillo oscuro	0.2	
Piedra caliza	0.03-0.45	
Grava	0.72	0.28
<i>Cubiertas</i>		
Asfalto liso	0.07	
Alquitrán c/grava	0.08-0.18	
Baldosas	0.10-0.35	
Pizarra	0.1	
Paja	0.15-0.20	
Acero corrugado	0.1-0.16	
Cubierta alta reflexión antigua	0.6-0.7	
Teja de cemento	0.1-0.37	0.63
Mortero	0.1-0.38	0.71-0.91
Acero galvanizado brillante	0.35	0.13
Papel de aluminio brillante	0.85	0.96
Cinc		0.1
Enlucido de Yeso/Cal		0.6
<i>Pinturas</i>		

Pintura aluminio	0.8	0.27-0.67
Pintura negra sobre aluminio	0.04	0.88
Pintura blanca sobre aluminio	0.8	0.91
Pigmento blanco	0.85	0.96
Pigmento gris	0.03	0.87
Pigmento verde	0.73	0.95
Urbano, promedio	0.15	
Cobertura de arena clara	0.40-0.60	0.88
Pintura Negra	0.05	
Pintura gris oscuro	0.09	
Pintura Marrón oscuro	0.12	
Pintura azul grisácea oscura	0.12	
Pintura marrón media	0.16	
Pintura marrón clara	0.2	
Pintura verde media opaca	0.41	
Pintura anaranjada media	0.42	
Pintura amarilla clara	0.5-0.7	
Pintura amarilla oscura	0.45	
Pintura azul media	0.45	
Pintura verde Kelly	0.49	
Pintura verde claro	0.53	
Pintura gris claro	0.6	

Fuente: (Carrasco Aldunate, 2008; Castro & Juzefiszyn, 2014)

Tabla 2.6: Conductividad térmica, calor específico y densidad de algunos materiales de construcción.

Material	Conductividad térmica	Calor específico	Densidad
	[W/mK]	[J/kgK]	[kg/m ³]
Poliuretano	0.026	1400	30
Aire	0.026	1063	1,223
Poliestireno	0.035	1675	50
Espuma fenólica	0.038	1400	30
Lana de vidrio	0.041	656	200
Corcho comprimido	0.085	2000	540
Mortero de cemento	0.090	669	1920
Madera de construcción	0.130	1360	630
Madera de pino	0.148	2512	640
Madera pesada	0.200	1250	700
Concreto celular	0.275	880	700
Concreto pesado	1.750	920	2300
Tierra con paja	0.300	900	400
Yeso	0.488	837	1440

Mortero cemento/arena	0.530	1000	1570
Agua	0.582	4187	1000
Ladrillos de arcilla	0.814	921	1800
Vidrio plano	1.160	830	2490
Arcilla	1.279	879	1460
Piedra arenisca	1.300	712	2000
Piedra	1.861	712	2250
Mármol	2.900	800	2590
Granito	3.500	754	2500
Acero	50.000	512	7800
Aluminio	160.000	896	2800

Fuente: (Casas & Cordero, n.d; E. M. González, 2014; Rodríguez Galbarro, 2022).

2.6. Medidas de mitigación del efecto ICU

Las medidas de mitigación del efecto ICU son una estrategia diseñada para disminuir el incremento de temperaturas en entornos urbanos y a su vez minimizar los impactos negativos que trae consigo el sobrecalentamiento de las ciudades. Dichas medidas buscan modificar las características térmicas del entorno urbano mediante soluciones tecnológicas, arquitectónicas y de planificación urbana, con el objetivo de reducir los riesgos asociados al cambio climático y mejorar el confort térmico (Santamouris, 2020).

Diversos estudios recientes han demostrado que las soluciones de infraestructura verde aplicadas en entornos urbanos tienen la capacidad de disminuir de forma cuantificable la temperatura del aire, mitigando así los efectos de la isla de calor urbana. Li et al. (2024) reportan que la vegetación urbana puede generar una reducción promedio cercana de hasta 2,2 °C en la temperatura del aire en zonas urbanas, mientras que Lin y Zhang (2022) evidencian que una cobertura vegetal superior al 75 % del entorno construido permite una disminución del orden de 1,2 °C en temperatura del aire. Estos impactos se atribuyen a la combinación de sombreado natural y procesos de evapotranspiración, los cuales favorecen el enfriamiento del microclima urbano inmediato.

Las medidas de mitigación del efecto ICU provocan un impacto que va más allá de la reducción de temperaturas, estas se presentan como una estrategia fundamental para la adaptación urbana frente al cambio climático, ya que a través de este tipo de intervenciones se espera incidir directamente en la salud de los habitantes, reduciendo los riesgos de mortalidad asociados a las olas de calor, especialmente en poblaciones vulnerables como personas de la tercera edad, niños y personas con condiciones médicas preexistentes (Heaviside et al., 2017).

Por otra parte, otro de los beneficios que trae consigo la aplicación de infraestructura verde en los entornos urbanos es en el ámbito económico, ya que impacta directamente en la

eficiencia energética, ya que, la reducción de temperatura permite disminuir significativamente la demanda energética para la refrigeración de los edificios, lo que significa menos costo de operación en los edificios y reducción de emisión de gases de efecto invernadero asociadas al consumo energético (Santamouris et al., 2015).

Según Laforteza et al., (2009) la implementación de estas medidas también trae consigo beneficios importantes en la calidad de vida urbana mejorando las condiciones de confort térmico en espacios públicos y promoviendo una mayor habitabilidad en las ciudades, generando un entorno urbano más amigable.

En la siguiente figura 2.7 se representan de forma esquemática los beneficios asociados a la aplicación de infraestructura verde en las zonas urbanas.

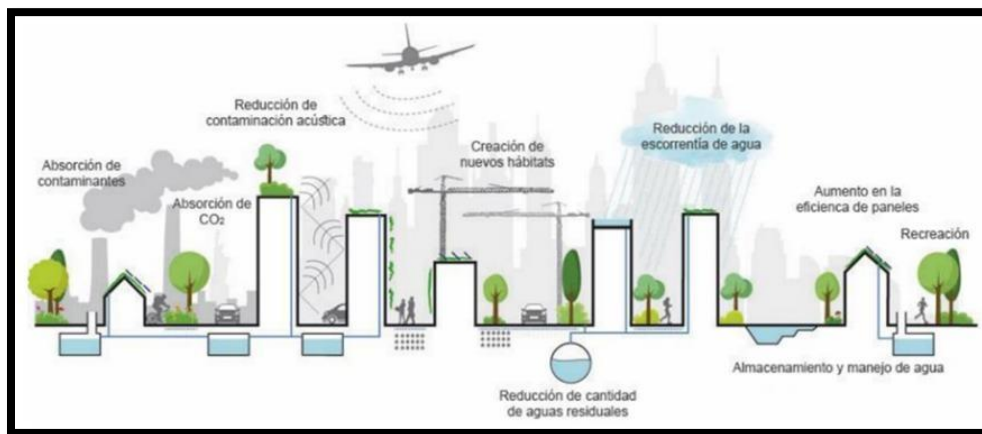


Figura 2.7: Esquema de beneficios de la Infraestructura Verde.

Fuente: (Catalano, 2017). En (Biosolar Roofs: A Symbiosis between Biodiverse Green Roofs and Renewable Energy).

La implementación de estas medidas de mitigación del fenómeno ICU requiere de un enfoque multidisciplinario que integre conocimientos de arquitectura, urbanismo, ingeniería ambiental y ciencias sociales, que busquen soluciones innovadoras y que principalmente sean adecuadas para el contexto climático y a las particularidades propias de cada entorno urbano, y así poder obtener el mejor desempeño para la disminución de la temperatura del aire circundante (Norton et al., 2015).

2.6.1. Cubiertas verdes

Las cubiertas verdes, también llamadas techos verdes, se presentan como una estrategia de infraestructura verde, siendo un sistema constructivo que añade vegetación en las cubiertas de los edificios con el objetivo de mitigar los efectos de ICU y mejorar el desempeño térmico de los edificios. Estos sistemas se componen de múltiples capas que incluyen sustratos, vegetación, membranas de drenaje y materiales impermeabilizantes, que transforman las superficies urbanas en espacios con capacidad de regular la temperatura (Razzaghmanesh et al., 2016). En la siguiente figura 2.10. se pueden apreciar los componentes generales de una cubierta verde en dos distintos casos. Según Minke (2004), en techos con inclinación mayor o igual a 5% (Figura 2.8, imagen 2), emplear la capa de drenaje pierde sentido y puede ser reemplazada por un sustrato más permeable.

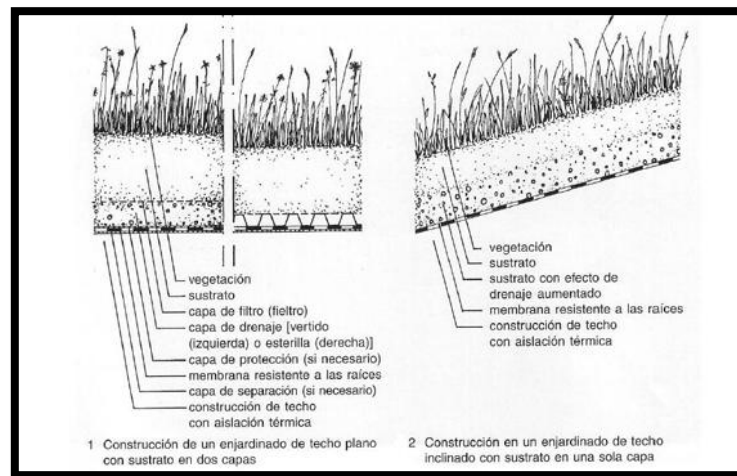


Figura 2.8: Componentes generales de un techo verde.

Fuente: (Minke, 2004).

El potencial de mitigación térmica de las cubiertas verdes es significativo, debido a que los techos verdes son únicos en el sentido de que proporcionan dos mecanismos de refrigeración, activos por evaporación y pasivos por aislamiento, reduciendo significativamente el consumo de energía en los edificios (Jamei et al., 2021). Durante el verano, disminuyen la demanda de refrigeración hasta en un 50%, mientras que, en invierno, pueden reducir la pérdida de calor en aproximadamente un 10% (Costanzo et al., 2016).

Según la guía técnica de techos verdes de la Asociación Internacional de Techos Verdes existen tres tipos de aplicación de estos (IGRA, 2023):

- **Extensivas:** Sistema ligero con vegetación resistente como musgos y sedums, requiere mínimo mantenimiento, profundidad de sustrato 6-15 cm.

- **Semi-intensivas:** Sistema intermedio que permite plantas herbáceas y arbustos pequeños, mantenimiento moderado, profundidad de sustrato 12-25 cm.
- **Intensivas:** Sistema robusto que soporta arbustos y árboles, requiere mantenimiento regular, profundidad de sustrato >25 cm, similar a un jardín convencional.

Según Castleton et al., (2010) se han logrado observar reducciones de la temperatura superficial en edificación de entre 20-60 (C°), en comparación con techos con superficies tradicionales, esto se puede observar esquemáticamente en la figura 2.9, influyendo directamente también en la temperatura del aire circundante, registrando una disminución de entre 1-3 (C°) en el ambiente inmediato.

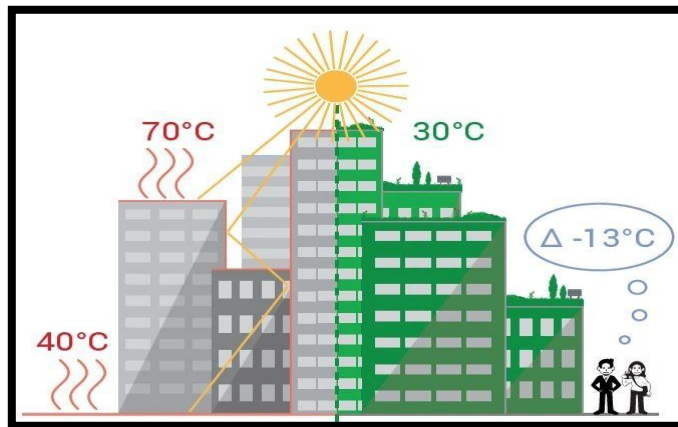


Figura 2.9: Disminución de T° superficiales con cubiertas verdes.
(GRÜNSTATTGRAU, 2019).

Del mismo modo otro estudio realizado en la ciudad de Chicago, realizado por Sharma et al., (2016), observo que la temperatura del techo disminuía linealmente con el aumento de la fracción de cubiertas verdes, alcanzando reducciones de la temperatura del aire de hasta 3(C°).

Las reducciones de temperatura recién mencionadas impactan directamente en la disminución de la demanda energética para refrigeración, un reciente estudio realizado por Mihalakakou et al., (2023), menciona que la carga energética puede alcanzar una reducción del 70%, así como una disminución de la temperatura interior de hasta 15 (C°), lo que se traduce en ahorros anuales energéticos de aproximadamente 11.53 kWh por metro cuadrado (Cai et al., 2019).

En un contexto más similar al de la presente investigación la implementación de cubiertas verdes extensivas ha demostrado un impacto tangible en la reducción del consumo energético para climatización en zonas áridas. En un estudio desarrollado por Wahba et al. (2018) en El Cairo, Egipto, se registró una disminución del 17–25 % en el consumo eléctrico anual tras la incorporación de vegetación en cubiertas verdes, pasando de 52 a 43 kWh/m²·año en tres tipologías residenciales. Complementariamente, una revisión

sistemática realizada por Jamei et al. (2023) identificó un promedio de reducción del 14,8 % en la carga de refrigeración en climas áridos cálidos.

Por otra parte, las cubiertas verdes muestran beneficios importantes para la salud pública y la calidad de la vida urbana, ya que se ha registrado que reducen los niveles de contaminación atmosférica, reduciendo la concentración de partículas PM10 hasta en un 35%, Además con la reducción de las temperaturas se previenen los riesgos asociados a las olas de calor, especialmente en poblaciones vulnerables, estudios sugieren que estas aplicaciones pueden reducir hasta en un 15% los riesgos de mortalidad debido a temperaturas extremas (Kumar & Kaushik, 2005).

El costo de instalación de las cubiertas verdes, puede ser inicialmente más alto que las cubiertas tradicionales, pero se ve compensado con los ahorros energéticos mencionados anteriormente, además trae consigo otros beneficios, que van desde la extensión de la vida útil de las membranas de las cubiertas hasta en 40 años, ya que protegen a estas de los rayos UV y las fluctuaciones térmicas (Cascone et al., 2018), además muestra reducción de la huella de carbono urbana y mejoras en la calidad de vida de los habitantes que residen alrededor de este tipo de cubiertas. Se estima que, por cada metro cuadrado de cubierta verde construido, las ciudades obtienen beneficios económicos directos e indirectos valorados entre 50 y 150 dólares anuales (Nektarios et al., 2021).

ZinCo© es una empresa internacional de origen alemán, que desarrolla sistemas de cubiertas verdes con más de 50 años de experiencia. En Latinoamérica, ZinCo© Andina se encarga de ofrecer soluciones para todo tipo de cubiertas en, Chile, Perú, Colombia y Ecuador. Sus sistemas van desde verdeados extensivos, hasta cubiertas con tránsito vehicular, teniendo en claro que cada situación es un caso particular y debe ser tratado como tal, debido a las condiciones climáticas propias de cada zona. La tecnología empleada permite una instalación sin necesidad de perforar la cubierta impermeable, además de ofrecer soluciones para la rehabilitación de estructuras (ZinCo© Andina, 2020).

Actualmente, la empresa ZinCo© Andina ha realizado más de 20 proyectos con la utilización de cubiertas verdes a lo largo de Chile, destacándose como uno de los más recientes y relevantes, el proyecto de cubiertas verdes aplicado en la etapa I, de la ampliación del aeropuerto internacional Comodoro Arturo Merino Benitez, Santiago, Chile. En la figura 2.10 se puede apreciar una fotografía del proyecto construido el año 2019. Se clasifica dentro del tipo de cubiertas verdes extensivas y su estructura se presenta en la figura 2.11.

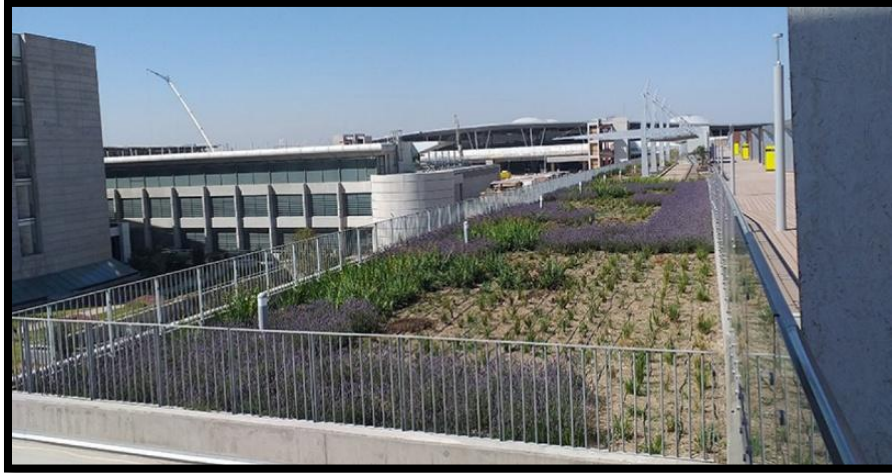


Figura 2.10: Cubiertas verdes en ampliación aeropuerto internacional de Santiago.

Fuente: (<https://www.zinco-greenroof.cl/> Santiago, Chile, 2019).

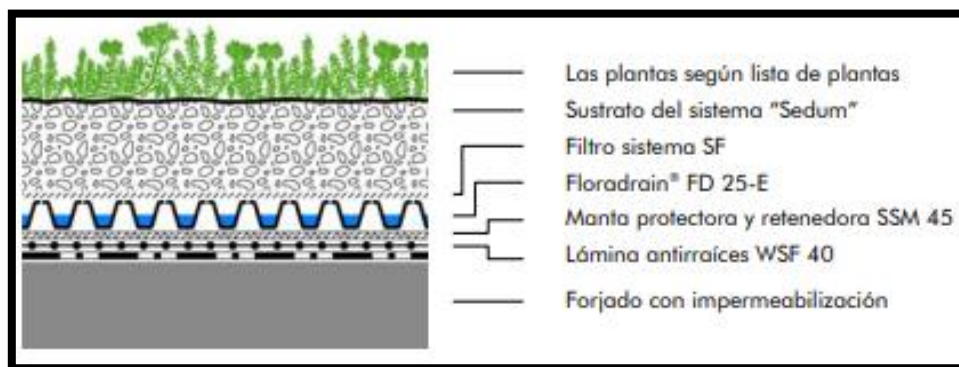


Figura 2.11: Estructura del sistema de cubierta vegetal empleado.

Fuente: (<https://www.zinco-greenroof.cl/>).

En el año 2019, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) ha promovido la creación de la primera norma técnica nacional (NCh 3626;2020) para "Techos Verdes", con el objetivo de garantizar la calidad en su diseño, construcción y funcionamiento, a fin de maximizar los diversos beneficios que este tipo de sistema constructivo puede proporcionar. Esto a través de una modificación de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC) que impulsa el uso de techos verdes en los edificios, permitiendo destinar el 25% de la superficie para construcciones complementarias como baños, pérgolas, o quinchos, mientras que el 75% restante podrá utilizarse para terrazas, áreas verdes, jardinerías, o la instalación de paneles solares (MINVU, 2019). A pesar de esto último no existen proyectos con infraestructura verde en la ciudad de Antofagasta a la actualidad.

2.6.2. Fachadas verdes

Las fachadas verdes son sistemas constructivos que involucran vegetación vertical aplicada en edificaciones, con el fin de cubrir total o parcialmente las superficies exteriores mediante plantas trepadoras, sistemas modulares especializados o sistemas de módulos especializados (Manso & Castro-Gomes, 2015). La aplicación de estas soluciones trae consigo beneficios que van desde la disminución de la temperatura del ambiente circundante a la fachada, mejorar la calidad del aire y proporcionar aislamiento térmico a los edificios.

La composición de las fachadas verdes suele ser mediante sistemas modulares con tecnologías de anclaje, soporte, sustrato vegetal y membranas impermeables. A continuación, en la figura 2.12 se presenta de manera esquemática los componentes típicos en el uso de una fachada verde.



Figura 2.12: Componentes de una fachada verde típica.

fuentes: (Univ. San Nicolas de Hidalgo, 2021).

Según Coma et al. (2017), las fachadas verdes se clasifican en 3 tipos:

- **Fachadas verdes (Green Walls):** También conocidos como paredes vivas, son estructuras verticales recubiertas de vegetación que generalmente emplean sistemas de soporte diseñados para sostener plantas en un medio de cultivo artificial, como paneles de fieltro, módulos o sistemas hidropónicos. Este tipo de fachada verde ofrece múltiples beneficios, como aislamiento térmico, reducción de ruido y mejora de la calidad del aire.

- **Fachadas de Doble Piel (Double-skin Green Facades):** Las fachadas de doble piel utilizan plantas trepadoras o enredaderas que crecen directamente sobre la pared de un edificio o en una estructura metálica separada, ofreciendo un efecto sombra que reduce significativamente la ganancia térmica en las superficies exteriores. Este tipo de fachada verde es más económico en términos de instalación y mantenimiento en comparación con los muros verdes, y es especialmente adecuado para edificios con orientaciones expuestas al oeste o sur.
- **Sistemas combinados:** Los sistemas combinados integran características tanto de los muros verdes como de las fachadas de doble piel, maximizando los beneficios de ambos enfoques. Estos sistemas son diseñados para proporcionar tanto aislamiento térmico como mejoras ecológicas y estéticas, adaptándose a diversas condiciones climáticas y necesidades arquitectónicas.

El mismo estudio registro que las fachadas verdes de doble piel y los muros verdes lograron reducir el consumo energético para enfriamiento y calefacción en un 33.8% y 58.9% respectivamente, gracias al efecto sombra y la reducción de temperaturas en las paredes exteriores (Coma et al., 2017).

En el contexto de la mitigación del efecto ICU, las fachadas verdes contribuyen significativamente, según un reciente estudio titulado “Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido: el caso de las fachadas verdes” elaborado por Suárez-Gómez et al., (2024), menciona que la aplicación de este tipo de infraestructura verde puede llegar a disminuir la temperatura superficial exterior de los muros en hasta 17.8 (C°) durante periodos de altas temperaturas, lo que a su vez permite la reducción de la temperatura del aire circundante a la fachada verde, el estudio experimental registro disminución de hasta 3.5 (C°) a 30 cm del follaje en periodos de altas temperaturas.

En esta misma línea, un estudio reciente llevado a cabo en la ciudad de Madrid, España, evaluó el comportamiento térmico de un sistema de fachada verde bajo condiciones reales durante la temporada de verano. La investigación comparó una fachada con vegetación frente a otra convencional y registró que la temperatura del aire adyacente a la fachada verde fue hasta 1.2 °C más baja, especialmente en torno a las 16:00 hrs, en días con alta radiación solar (Oquendo-Di Cosola et al., 2023).

Las disminuciones de temperatura anteriormente mencionadas se traducen en un menor consumo energético para la refrigeración, registrando aumento de la eficiencia energética de hasta un 34% durante la temporada de refrigeración (Manso et al., 2021), mientras que en un contexto más similar al estudiado en esta investigación, El-Zoklah & Refaat (2021) reportaron un ahorro energético anual de entre un 17% y 24% en climatización al implementar fachadas verdes en muros expuestos al sol en una vivienda unifamiliar ubicada en un clima desértico cálido. El sistema con cámara de aire mostró un rendimiento

particularmente superior, alcanzando hasta un 23,7% de ahorro en orientación oeste. Estos resultados se atribuyen a la capacidad de la fachada verde para reducir las cargas de enfriamiento en verano entre un 20% y 25%.

Además de los beneficios térmicos, las fachadas verdes contribuyen a mejorar la calidad del aire al filtrar partículas contaminantes y reducir los niveles de dióxido de carbono. Se ha demostrado que sistemas bien diseñados pueden capturar hasta un 40% de las partículas PM2.5 en áreas urbanas (Coma et al., 2017).

Aparte de los beneficios funcionales mencionados que trae consigo la aplicación de fachadas verdes, estas también mejoran significativamente la estética de los edificios, lo que resulta en un impacto positivo en la psicología de las personas que habitan el sector, al crear entornos más agradables visualmente y conectados con la naturaleza. Este cambio estético, en conjunto con los beneficios funcionales y ecológicos de este tipo de soluciones, incrementan el valor inmobiliario de las propiedades, especialmente en áreas densamente urbanizadas, en donde se valora altamente la presencia de vegetación (Besir & Cuce, 2018).

2.7. Métodos para la obtención de datos

Los métodos de obtención de datos utilizados en esta investigación permiten analizar las condiciones térmicas y climáticas del entorno urbano a través de herramientas avanzadas como sensores satelitales, sistemas de información geográfica (SIG) y modeladores climáticos. Estas técnicas ofrecen un enfoque integrado para recopilar, procesar y simular información, facilitando el estudio detallado del comportamiento térmico y la influencia de factores urbanos en el microclima.

2.7.1. Temperatura superficial terrestre

Para medir la Temperatura de la Superficie de la Tierra (LST) de forma remota se requiere información de sensores satelitales. Los sensores térmicos disponibles incluyen AVHRR de NOAA, TIRS de LANDSAT 8 y OLI. También hay sensores SENTINEL, MSI (Sentinel-2), OLCI y SLSTR (Sentinel-3). Este método es preciso dependiendo del estado de la imagen. Cubre un área grande a la vez, lo que facilita la comparación entre sectores. Cada satélite utiliza su propio algoritmo para estimar la temperatura de la superficie terrestre (temperatura superficial), siguiendo el mismo principio de determinar la relación entre la energía emitida por el suelo y la energía recibida por el sensor (Trujillo. S., 2012).

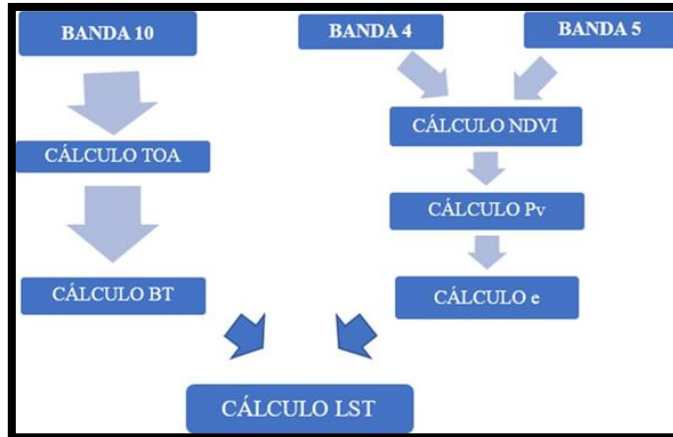


Figura 2.13: Diagrama de flujo para la obtención de la temperatura superficial terrestre con LANDSAT 8.

Fuente: (Avdan & Javanovska, 2016).

En la Figura 2.13. Representa un diagrama de flujo para obtener temperatura superficial terrestre con el sensor satelital del LANDSAT 8. Donde expresa la Banda 4 y 5, permanecientes a las bandas espectrales (Banda 1 a Banda 9) y la Banda 10 la cual es denominada una banda térmica, donde, entregara los datos, para luego realizar los cálculos tales como:

- **TOA:** Radiancia en la Superficie Atmosférica (Top of atmosphere).
- **NDVI:** Índice Diferencia de Vegetación Normalizada.
- **Pv:** Proporción de vegetación.
- **BT:** Temperatura de Brillo.
- **Calculo e:** Emisividad de la superficie.
- **LST:** Temperatura de la Superficie Terrestre

2.7.2. Interpretación de imágenes ráster satelitales

Para determinar las Islas de Calor de manera remota y desde la característica de la superficie terrestre, se utilizan generalmente, sistemas de información georreferenciada (SIG). Softwares tal como, ArcGIS Pro, SAGA GIS, QGIS, ofrecen herramientas para efectuar cálculos usando imágenes satelitales, desde un nivel de usuarios regulares como también nuevos usuarios.

En el caso del satélite LANDSAT 8, sus imágenes son de libre acceso y son por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Las imágenes obtenidas por el sensor OLI-TIRS constan de nueve bandas espectrales (Banda 1 a Banda 9), y dos bandas térmicas

(Banda 10 y Banda 11). La cuales se pueden apreciar con su respectiva longitud de onda y resolución en metros, en la siguiente figura 2.14.

Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Bandas	longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	*Banda 10 - Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100	

(USGS, 2013)

Figura 2.14: Bandas de sensores OLI y TIRS de LANDSAT 8.

(Fuente: Ariza, 2013).

El programa SIG cuenta con complementos que ayudan a la automatización al ejecutar los cálculos, ayudando a agilizar el proceso, cómo lo es, por ejemplo, el complemento RS&GIS (Barane & Dwarakish, 2017). Esta herramienta utiliza los algoritmos considerados por (Weng et al., 2004) y los proporcionados por el servicio geológico de los estados unidos (USGS) en los manuales LANDSAT.

2.7.3. islas de calor atmosferico

El fenómeno ICU se monitorea a través de una red de estaciones meteorológicas fijas y móviles. Las estaciones fijas, estratégicamente ubicadas en zonas urbanas y rurales, establecen condiciones de referencia, mientras que las mediciones móviles, realizadas a través de transectos predefinidos, permiten registrar la variabilidad del fenómeno, mediante instrumentación específica como termohigroanemómetros, del cual se obtienen datos certeros de la temperatura del aire y humedad relativa. Permitiendo una caracterización detallada de la variación térmica urbano-rurales (J. Yang et al., 2020).

Por otro lado, se han desarrollado métodos matemáticos capaces de simular el entorno urbano mediante herramientas digitales. Estas herramientas permiten estimar las condiciones climáticas urbanas al considerar múltiples factores, tales como la composición y morfología de los espacios urbanos, la ubicación geográfica, las fuentes de contaminación y las variables climáticas locales, lo que las convierte en una confiable y ampliamente aceptada por los especialistas en el área (Schmitz. L. & Rossi. F., 2020).

Se define en la Figura 2.15 que la diferencia entre estas temperaturas (día y noche) cuantifica el fenómeno ICU. Cuando el índice es positivo nos muestra que la temperatura de la zona urbana es mayor que la de la zona rural. Para cuantificar el efecto ICU se comparan la temperatura promedio de la zona urbana y la temperatura promedio de las áreas rurales no urbanizadas circundantes (Memon et al., 2009).

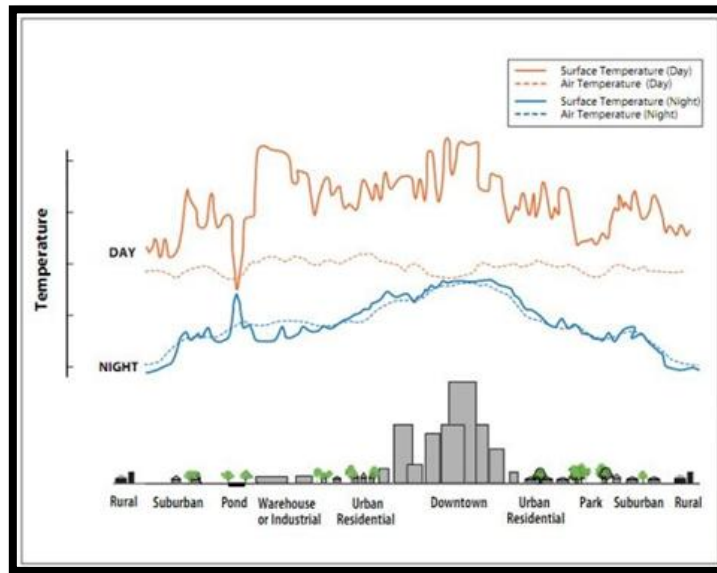


Figura 2.15: Temperaturas superficiales y atmosféricas durante el día y la noche.
(Fuente: EPA, 2011).

El fenómeno ICU se puede clasificar según la intensidad que tiene y su variación de temperaturas durante el día y la noche, esta clasificación se presenta en la siguiente tabla 2.7.

Tabla 2.7. Clasificación de intensidades ICUs verano e invierno.

Rango Intensidades ICUs	Categoría
0°C – 1°C	Muy Débil
1°C – 2° C	Débil
2°C – 3°C	Moderadamente Débil
3°C – 4°C	Moderada
4°C – 5°C	Moderadamente Fuerte
5°C – 6°C	Fuerte
6°C <	Muy Fuerte

Fuente: (Fernández-García, 1996).

2.7.4. Modelado de clima urbano

Para la modelación de climas urbanos existen herramientas digitales las cuales permiten simular escenarios meteorológicos urbanos. Para modelar los mapas de clima urbano existen herramientas informáticas tales como Urban Weather Generator (Palme et al., 2016) y ENVI-met utilizados para la simulación de las condiciones del entorno de un escenario acotado.

La herramienta informática ENVI-met, es un modelador de microclimas que simula la interacción superficie-planta-aire en un barrio urbano permitiendo un análisis a pequeña escala de las condiciones climáticas y estrategias de planificación urbana (Sahnoune & Benhassine, 2017).

ENVI-met es un paquete de herramientas, compuesto por 10 programas con los cuales se trabaja de manera independiente (pero vinculada), cada aspecto necesario para la simulación. A continuación, se describe cada aplicación.

- **Albero:** Se utiliza para editar las características tridimensionales de las especies arbóreas.
- **BIO-met:** Es una herramienta calcula índices de confort térmico humano en base a la simulación del clima urbano.
- **DataBase manager:** Es donde se configuran las características de los materiales disponibles.
- **ENVI-guide:** Añade los parámetros de simulación al proyecto.
- **ENVI-core:** Encargado de correr la simulación.
- **Forcing file manager Headquarter:** Es la aplicación que contiene la paleta de herramientas y desde donde se administra el proyecto.
- **Monde:** Es una característica en fase de pruebas, con la cual es posible enlazar el modelo de ENVI-met con información geográfica (SIG).
- **Leonardo:** Es el visualizador de los resultados que arroja la simulación.
- **Spaces:** Posee un grillado donde se modela el entorno del proyecto, en 2D y 3D.

Las características son configuradas desde la herramienta DataBase Manager. Para efectos de esta investigación, se modificará las sub-ventanas walls, greening, soils, profiles, materials y plants. Para definir un nuevo material, se debe crear una copia de los materiales que se encuentran por defecto, y sustituir sus valores por los deseados. Walls, está relacionado con la materialidad de las construcciones, y Greening, con los sistemas de techo y fachada verdes. Las propiedades de los materiales se configuran en la sub-ventana Materials.

ENVI-met se considera como el modelo informático a escala microclimática más relevante, estudiando morfologías urbanas y la influencia sobre el microclima urbano, de qué

manera inciden los materiales urbanos en la temperatura. Se han demostrado en estudios la capacidad de predicción de ENVI-met para reproducir temperaturas urbanas con diferentes escenarios mediante la aplicación de estrategias de mitigación del efecto ICU en ciudades latinoamericanas (Alchapar & Correa, 2015; Salata et al., 2016).

A modo de ejemplo de estudios realizados con el software ENVI-met, se presenta la investigación realizada por Abdulateef & A. S. Al-Alwan, (2022) titulada “The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island”, que tuvo por objetivo ofrecer conocimiento sobre la efectividad de una infraestructura verde urbana y la reducción de la Isla de Calor superficial en el área de estudio de Risafa, Baghdad en Irak. Estableciendo 2 modelos de distintos sectores a través de las simulaciones microclimáticas del software ENVI-met, creando 4 escenarios, un escenario base, escenario de materiales fríos, escenario de existencia de vegetación y un último escenario con nuevos parques urbanos. En las siguientes figuras se presentan los detalles del proceso de simulación (figura 2.16) y los resultados arrojados por la herramienta digital para el modelo A (figura 2.17) y para el modelo B (figura 2.18).

No.	Type	System	Subsystem
1	Model domain settings	Model location	Lati. 33°34'N, Long. 44°41'E
		Model Geometry	X-Grids = 160, Y-Grids = 160, Z-Grids = 20, dx = 6, dy = 6, dz = 2 (represents height), Model rotation out of grid north = 40°
		The default setting for walls and roofs	Materials
			Burned brick wall with default plaster 0.5
			Sandwich panel wall 0.7
	Aluminum wall 0.9		
	Light weight concrete tiles 0.3		
	Sandwich panel roof 0.7		
	The default setting for soil and asphalt	Loamy soil with an albedo of 0.2	
		Dark asphalt 0.2	
2	General simulation settings	Simulation starting date	21st July 2020
		Simulation starting time	6:00 a.m.
		Simulation duration	24 h
3	Basic Meteorological settings	Wind speed in 10 m above the ground (m/s)	11
		Wind direction(0 = from north...180 = from south)	300
		The temperature of the atmosphere (°C)	Min = 27.5 at 6:00 a.m. Max = 48.4 at 3:00p.m.
		Relative humidity in 2 m above the ground (%)	Min = 4 at 1:00p.m. Max = 7 at 6:00 a.m.

Figura 2.16: Detalles del proceso de simulación de los dos modelos seleccionados en ENVI-met. Fuente: (Abdulateef et al., 2022).

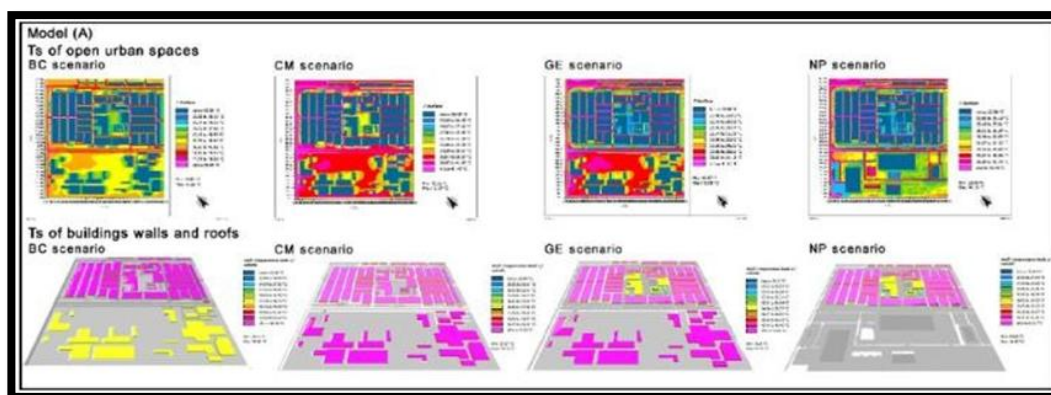


Figura 2.17: Resultados de la simulación del Modelo A.

(Fuente: Abdulateef et al., 2022).

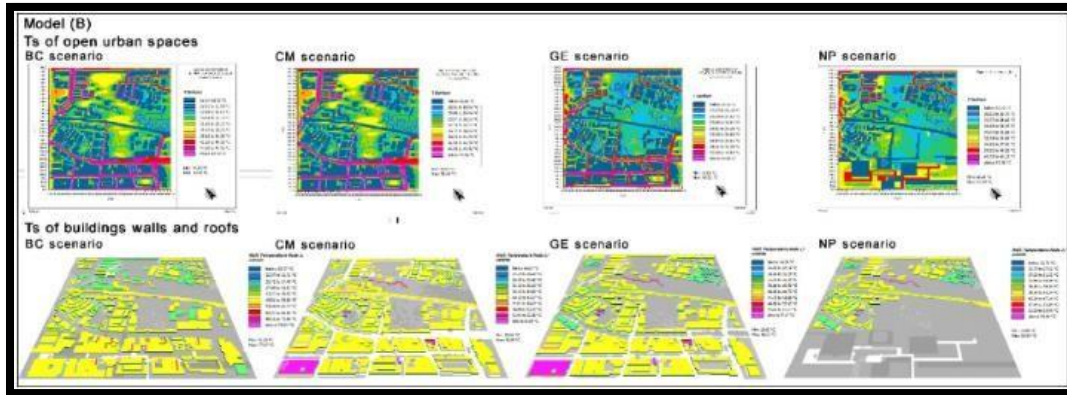


Figura 2.18: Resultados de la simulación del Modelo B.

(Fuente: Abdulateef et al., 2022).

En las siguientes figuras se presentan gráficos realizados en base a los resultados de la simulación en donde se muestran los efectos que tiene la aplicación de este tipo de infraestructura verde en las temperaturas de la superficie para el modelo A (figura 2.19) y para el modelo B (figura 2.20).

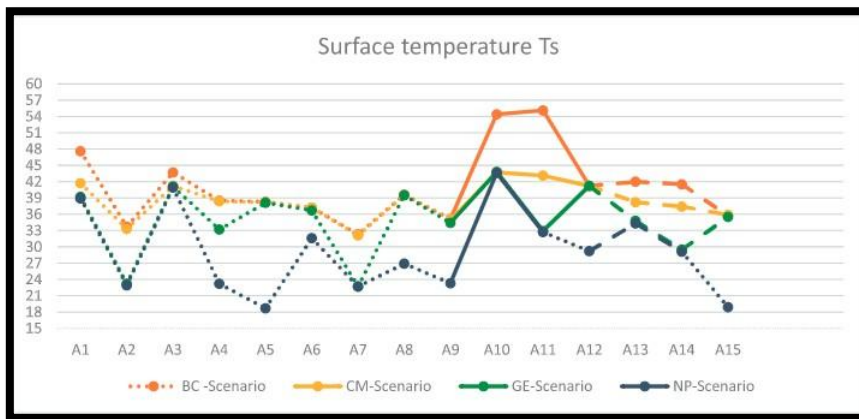


Figura 2.19: Efectos de los escenarios de infraestructura verde propuestos a la temperatura de las superficies en el Modelo A. Fuente: (Abdulateef et al., 2022).

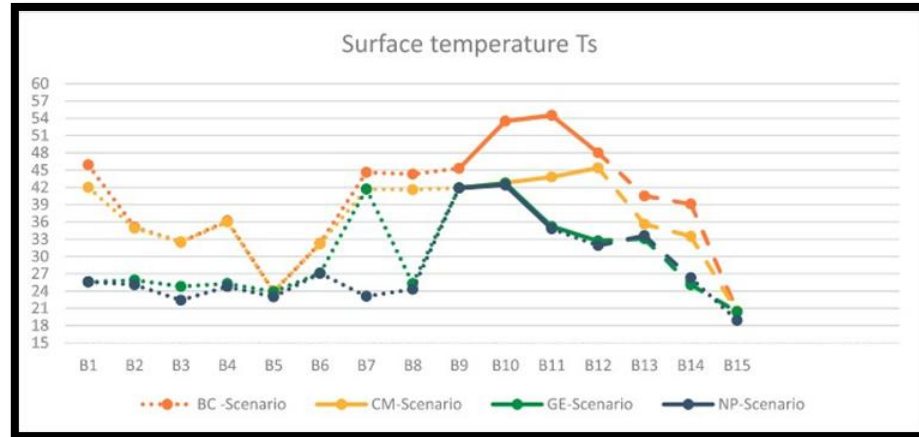


Figura 2.20: Efectos de los escenarios de infraestructura verde propuestos a la temperatura de las superficies en el Modelo B. Fuente: (Abdulateef et al., 2022).

Como resultados de los gráficos recientemente mencionados. Se demostró que la infraestructura verde urbana tiene un papel efectivo en la reducción de la intensidad del fenómeno ICU, registrando una disminución de la temperatura del aire de hasta 0,4 [°C] desde los 22[°C] en la ciudad de Bagdad, Irak. Exponen que al comparar los resultados de ambos modelos (A y B), se encontró que los puntos que tiene grandes copas de árboles, setos y fuentes de agua son testigos de una mayor disminución de temperatura superficial que aquellos que estaban cubiertos solo por pasto. Como también se observó que el escenario de materiales fríos demostró ser muy efectivo para bajar las temperaturas de los techos y paredes de las viviendas.

2.8. Caso de estudio ciudad de Antofagasta

El presente estudio se centrará específicamente en la ciudad de Antofagasta, ubicada en el norte grande de Chile, la cual presenta características climáticas y geográficas únicas que la convierten en un escenario relevante para estudiar los efectos del fenómeno de isla de calor urbana y evaluar estrategias de mitigación adaptadas a climas áridos.

2.8.1. Ubicación geográfica

La ciudad de Antofagasta se encuentra en la región homónima en el norte de Chile, siendo la capital de la II Región de Antofagasta. Su ubicación geográfica exacta es 23°38' Sur y 70°24' Oeste. Se extiende a lo largo de la costa del océano Pacífico, en el borde del

Desierto de Atacama, considerado uno de los más áridos del mundo. (Atlas Geográfico Sernageomin, 2016).

La comuna de Antofagasta cuenta con una extensión territorial de 30718,1 km² (Reporte Comunal - Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile). En las siguientes figuras se presenta una imagen de vista satelital de la ciudad de Antofagasta (figura 2.21) y el plan regulador comunal que rige actualmente en la ciudad (figura 2.22).

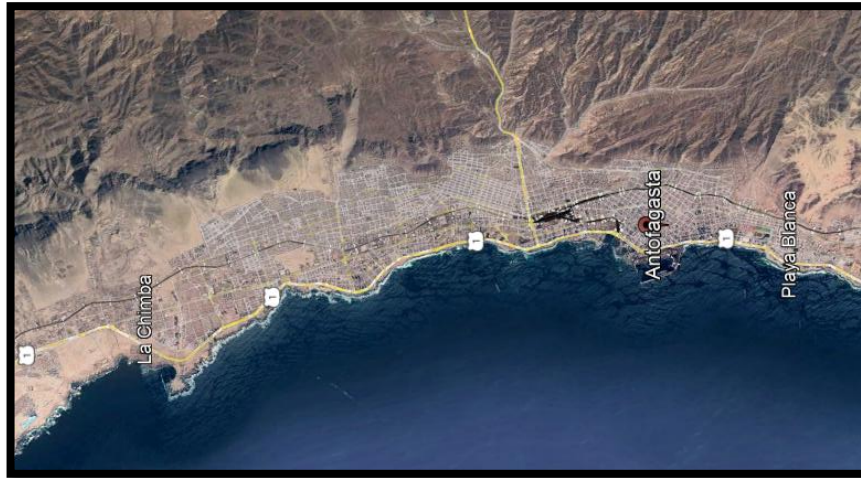


Figura 2.21: Vista satelital Ciudad de Antofagasta.
(Fuente: Google Earth Pro, 2022).



Figura 2.22: Plan regulador comunal de la ciudad de Antofagasta.

Fuente: (Municipalidad de Antofagasta, 2016).

2.8.2. Población

De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda realizado en el año 2017, la comuna de Antofagasta posee una población total de 361.873 habitantes. (Reporte Comunal -Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile, 2017). Según con las proyecciones de población realizadas por el Instituto Nacional de Estadísticas, para 2024 se espera un incremento del 22,8%, plasmando un total de 444.276 habitantes (Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile, 2017). Además de esto Antofagasta presenta una tasa de crecimiento poblacional intercensal anual del 2,0%, siendo la segunda más alta después de la región de Ñuble (Subdere, 2019).

2.8.3. Clima promedio en Antofagasta

Antofagasta, ubicada en el norte de Chile, es una ciudad costera que se caracteriza por su clima desértico costero (clasificación climática de Köppen: BWh), lo que significa que presenta condiciones áridas y muy secas, influenciadas por la corriente de Humboldt y el Desierto de Atacama, el más árido del mundo.

Según el CIREN (2022) el principal factor que controla la vegetación en este tipo de clima no es la temperatura, sino que la sequedad. Según un estudio hidrológico realizado por la dirección general de aguas la precipitación anual es muy baja, con un promedio de 3 a 5 mm de lluvia por año, concentrada principalmente en eventos irregulares. (DGAC, 2024).

Las temperaturas durante el presente año muestran variaciones moderadas, con un rango máximo de aproximadamente 10 °C entre las estaciones más cálidas (enero) y las más frescas (julio), esto se puede apreciar en la siguiente figura 2.23 muestra los registros de las temperaturas promedio máximas y mínimas durante el año 2024 en la ciudad de Antofagasta.

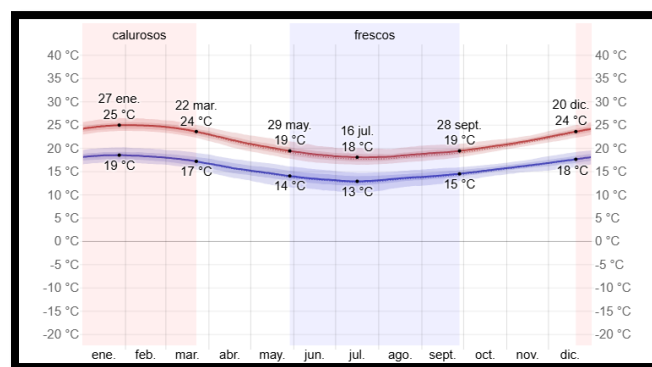


Figura 2.23: Temperaturas máximas y mínimas promedio año 2024.

(Fuente: es.weatherspark.com/).

Mundialmente las temperaturas han ido al alza debido al cambio climático y las proyecciones de temperaturas para los próximos años indican la misma tendencia. Chile no se ha visto ajeno a los efectos del cambio climático, sin ir más allá, según el reporte anual de la evolución del clima en Chile, realizado por la dirección general de aeronáutica civil, el año 2023, la temperatura media de Chile continental fue de 13.5°C, convirtiéndolo en el año más cálido desde 1961. Además, el mismo reporte indica que contando el año 2023, se marcaron 14 años consecutivos de temperaturas cálidas desde el año 2011. En la región de Antofagasta el año 2023 la temperatura media mensual se registró muy por encima de los promedios de años anteriores, esto se puede apreciar en el siguiente gráfico presentado en la figura 2.25.

El gráfico de la siguiente figura 2.24, muestra la evolución de la temperatura media mensual en la Región de Antofagasta durante el año 2023, comparada con promedios históricos de los periodos 1961-1990 y 1991-2010. Se observa una tendencia general al alza, destacando temperaturas medias más elevadas en gran parte del año, lo que refleja un posible efecto del cambio climático regional.

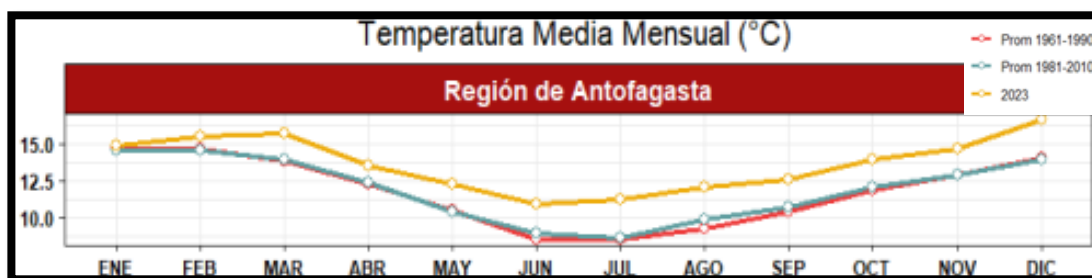


Figura 2.24: Temperatura media mensual Región Antofagasta año 2023.

(Fuente: DGAC 2024)

En el marco de las proyecciones de aumento de temperatura asociadas al cambio climático, la siguiente figura 2.25 muestra la evolución y proyección del número de días cálidos en Antofagasta entre 1970 y fines del siglo XXI. Se destaca que hacia el año 2050 se estiman aproximadamente 205 días con temperaturas elevadas, lo que equivale a un 56% del total anual. Este escenario sugiere una creciente exposición de la población a condiciones térmicas extremas, acentuando el fenómeno de isla de calor urbano y la necesidad urgente de implementar estrategias de mitigación adaptadas al entorno urbano local.

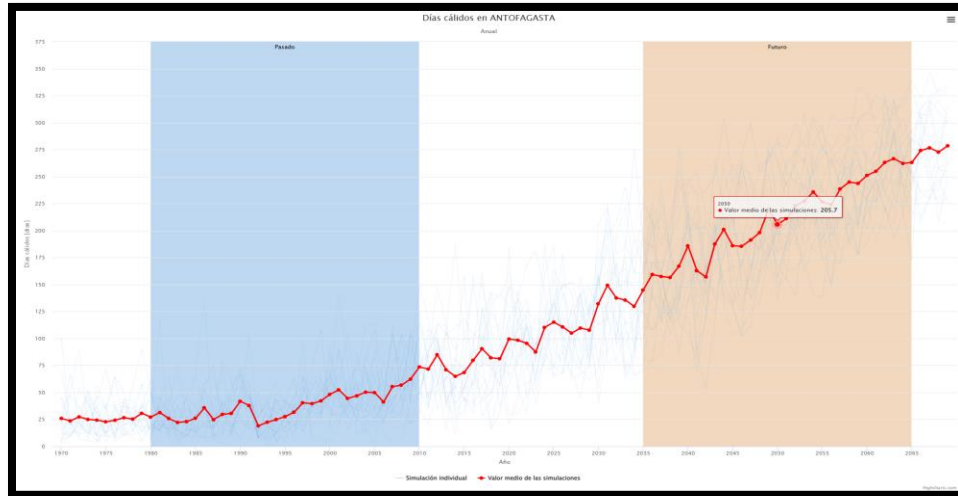


Figura 2.25: Grafico proyección de días cálidos por año en Antofagasta.

(Fuente: ARCLIM, MMA, 2024).

Complementariamente, la figura 2.26 presenta la evolución del promedio de la temperatura máxima diaria. A partir de la línea roja que representa el valor medio de las simulaciones, se observa un ascenso progresivo desde valores cercanos a 19 °C en los años 1970, hasta sobrepasar los 23 °C hacia el año 2080. Este aumento de más de 4 °C en un horizonte de 100 años sitúa a la ciudad frente a un escenario climático desafiante, donde la implementación de estrategias de mitigación térmica (como infraestructura verde urbana) será esencial para preservar el bienestar térmico de la población y reducir la presión sobre los sistemas de climatización y salud pública.

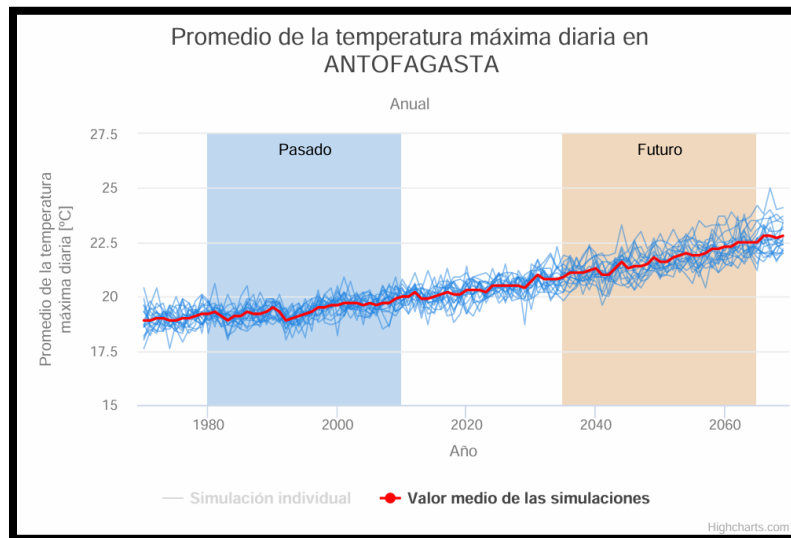


Figura 2.26: Grafico proyección de Temp° máxima diaria en Antofagasta.

(Fuente: ARCLIM, MMA, 2024).

En conjunto, los antecedentes presentados no solo confirman la tendencia de calentamiento en la región de Antofagasta, sino que también refuerzan la urgencia de incorporar soluciones resilientes frente al cambio climático, especialmente en entornos urbanos densamente edificados y con baja cobertura vegetal.

2.8.4. Isla de calor urbano en Antofagasta

El año 2022 el gobierno de Chile, a través del ministerio de medio ambiente crea el proyecto ARCLIM (atlas de riesgos climáticos) desarrollado por el Centro de Investigación del Clima y la Resiliencia (CR2) y el Centro de Cambio Global (CCG-Universidad Católica de Chile), con el fin de evaluar y gestionar los riesgos asociados al cambio climático en todas las regiones de Chile. Uno de los principales riesgos evaluados, que afecta la salud y bienestar de la población es el efecto de isla de calor urbano. En este contexto, el ARCLIM clasifica a la ciudad de Antofagasta dentro del riesgo “alto” en el mapa presentado en la figura 2.27 que representa el aumento de riesgo asociado al impacto de la intensidad del fenómeno ICU.



Figura 2.27: Mapa aumento de riesgo ICU por ciudad, Chile.

(Fuente: ARCLIM, 2022).

Un estudio reciente centrado en la variación en la intensidad de la isla de calor urbana por efecto del cambio climático en ciudades chilenas realizado por el instituto de geografía de la PUC (Henríquez, 2021) registro en la ciudad de Antofagasta una intensidad del fenómeno ICU de 3,64(°C), con una proyección de 5,30(°C) para 2065, lo que la convertiría en la ciudad de Chile con mayor intensidad de este fenómeno, solo por detrás de la región metropolitana. Lo que hace que la aplicación de medidas de mitigación para el efecto ICU para el presente y futuro sean indispensables.

Otro estudio realizado a ciudades costeras del Pacífico, reveló que el efecto ICU en Antofagasta produce un aumento de temperatura de 2 a 5 °C durante la noche, con una situación más dispersa durante el día (Carrasco et al., 2019). Lo anteriormente mencionado se puede apreciar en el gráfico de la siguiente figura 2.28.

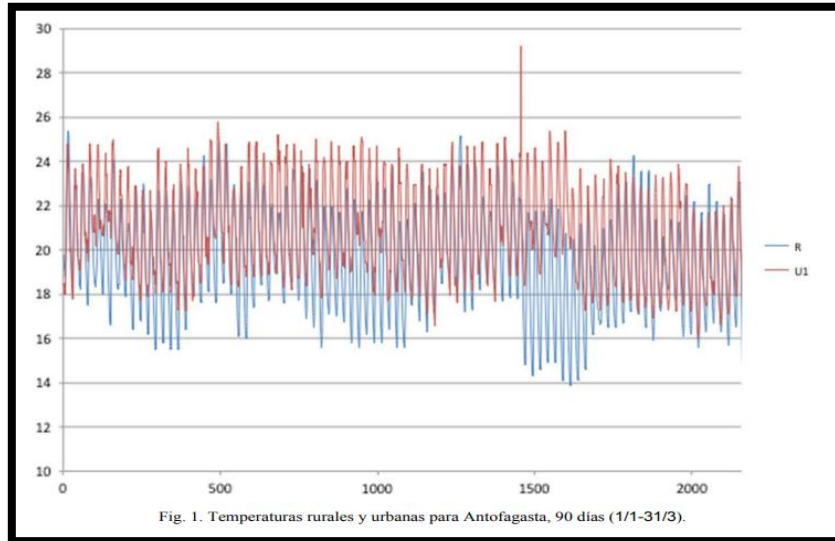


Figura 2.28: Variación de Temperaturas rurales y urbanas Antofagasta.

(Fuente: Palme et al., 2019).

2.8.5. Selección de especie óptima para Antofagasta

La elección de especies vegetales adecuadas es un componente crítico en el diseño de cubiertas verdes extensivas, especialmente en contextos de clima árido extremo como el de Antofagasta. La ciudad presenta condiciones ambientales de alta radiación solar, escasa o nula precipitación y una marcada amplitud térmica diaria, lo que limita significativamente la viabilidad de muchas especies vegetales convencionales.

En base al estudio técnico desarrollado por Agra et al. (2017) y Vera et al. (2018), y considerando criterios de resistencia a la sequía, adaptabilidad climática, velocidad de cobertura, mantenimiento y disponibilidad en Chile, se realizó una evaluación comparativa de distintas especies del género *Sedum*, ampliamente utilizadas en techos verdes a nivel internacional. El análisis determinó que *Sedum sediforme* representa la especie óptima para este entorno, debido a su metabolismo CAM facultativo, alta capacidad de almacenamiento hídrico, baja demanda de riego y eficiencia térmica probada, llegando a reducir la temperatura superficial del techo hasta en 30 °C respecto a cubiertas sin vegetación (Mahmoodzadeh et al., 2020).

La siguiente Tabla 2.8 resume las principales características de las especies consideradas y su idoneidad para el caso de Antofagasta:

Tabla 2.8. Elección de Especia Optima

Especie	Resistencia a sequía	Profundidad mínima de sustrato	Cobertura/crecimiento	Idoneidad para Antofagasta	Observaciones
Sedum sediforme	★★★★★ (muy alta)	6–8 cm	Medio-lento	✓ Alta (recomendada)	Excelente tolerancia hídrica y térmica. Compatible con sistemas modulares. Estética atractiva.
Sedum álbum	★★★★	5–7 cm	Medio	✓ Alta	Muy común en Chile. Buen cubresuelos, color verde-rojizo en estrés hídrico.
Sedum rupestre	★★★★	7–10 cm	Rápido	✓ Alta	Excelente para cobertura rápida. Bien adaptado a climas áridos.
Sedum spurium	★★★	10–15 cm	Rápido	△ Media	Requiere más agua que otros Sedum. Ideal para climas más templados.
Sedum acre	★★★★★	5–8 cm	Medio	△ Media-baja	Alta tolerancia, pero difícil de conseguir en viveros chilenos.
Sedum reflexum	★★★★	6–10 cm	Medio-rápido	✓ Alta	Alternativa válida a sediforme, también resistente y disponible.
Sedum sexangulare	★★★	8–10 cm	Medio	✗ Baja	Sensible al calor extremo. Poco común en Chile.

(fuente: elaboración Propia, 2025)

Si bien se identificaron otras especies con desempeño aceptable, *Sedum sediforme* fue recomendado como la opción principal por su equilibrio entre resiliencia, disponibilidad moderada y efectividad térmica. Además, su estructura superficial de raíces y bajo porte la hacen compatible con techos de poco espesor y baja carga estructural, condición fundamental para la aplicación de infraestructura verde en edificios existentes.

2.8.6. Gestión del recurso Hídrico en Antofagasta

Chile atraviesa una de las crisis hídricas más grandes de su historia, impulsada por más de una década de sequía prolongada, el avance del cambio climático y una creciente presión sobre los recursos naturales. Esta situación ha afectado particularmente a las zonas norte y centro del país, forzando a las autoridades a adoptar soluciones innovadoras para asegurar el suministro de agua potable a largo plazo.

En este contexto, la ciudad de Antofagasta ha dado un paso significativo hacia la sostenibilidad hídrica. Desde marzo de 2025, el 100 % del agua potable urbana de la ciudad

proviene de agua desalinizada, lo que la convierte en la primera gran ciudad latinoamericana en abastecerse completamente mediante esta fuente (GOB.cl, 2025), enfrentando así de gran manera la sequía a nivel comunal, tal como lo destaca la siguiente figura 2.29.



Figura 2.29: Portada portal de noticias “Adiós a la sequía en Antofagasta”

(Fuente: eldesconcierto.cl, 2025).

Esta transformación es liderada por la Planta Desaladora Norte, operada por Aguas Antofagasta, que actualmente produce 1.436 litros por segundo, cubriendo la totalidad de la demanda urbana (Aguas Antofagasta, 2025).

Además, Aguas Antofagasta ha anunciado el compromiso de destinar parte del volumen de agua desalinizada para fines de riego urbano, agrícola y de proyectos sociales (Andes.cl, 2025). Este enfoque abre una oportunidad concreta para el desarrollo de soluciones como la infraestructura verde en entornos urbanos áridos como Antofagasta, donde tradicionalmente las restricciones hídricas han sido una barrera crítica para este tipo de intervenciones.

En consecuencia, se propone que las cubiertas verdes incorporen especies vegetales de bajo requerimiento hídrico, combinadas con sistemas de riego eficiente como el riego por goteo. A futuro, se contempla complementar estas medidas con el uso de aguas grises tratadas, conforme a lo establecido por la Ley N°21.075, vigente desde 2024, que regula el reúso de aguas en el país.

3. Metodología de la investigación

Se presenta la siguiente figura 3.1 que en modo de diagrama de flujo explica a grandes rasgos la metodología general de la presente investigación.

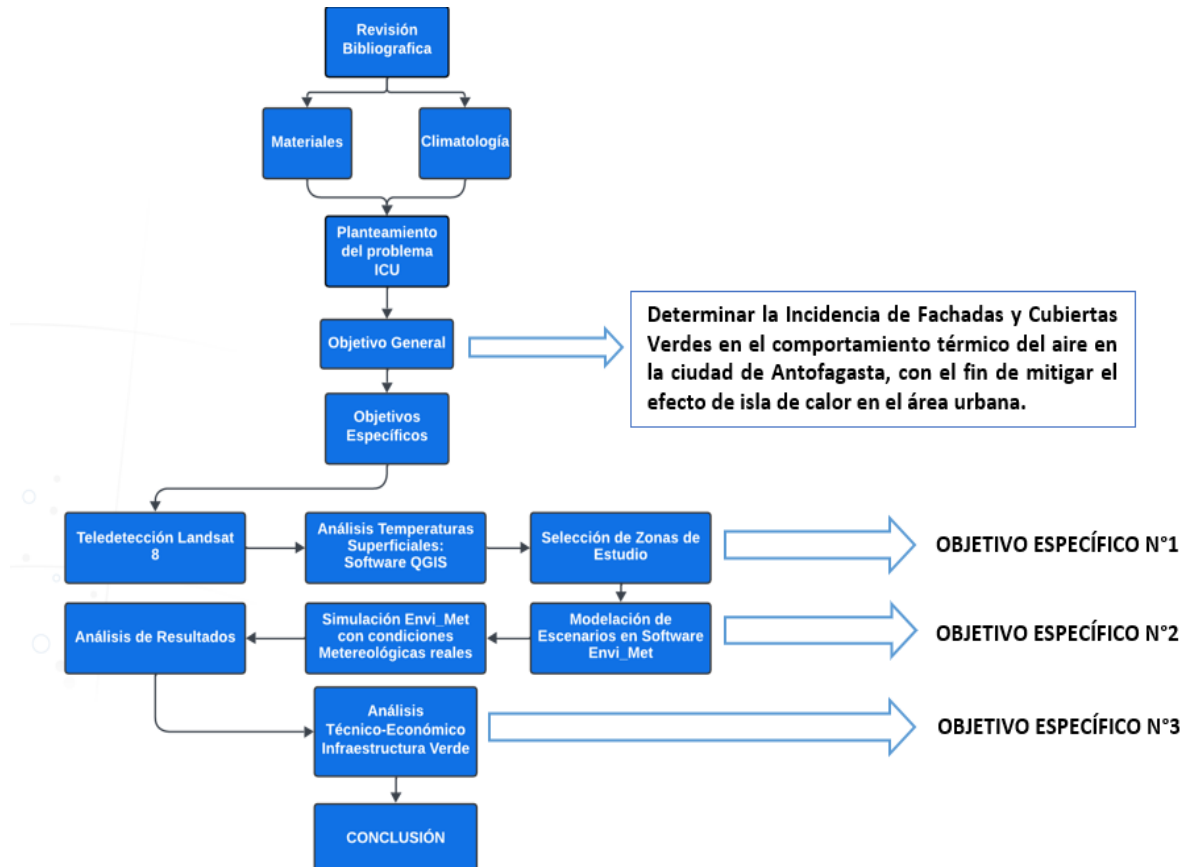


Figura 3.1: Diagrama de flujo de la metodología de la investigación.

(Fuente: Elaboración Propia, 2024).

3.1. Análisis térmico y diagnóstico inicial de Antofagasta en el contexto ICU

El primer paso es realizar un análisis térmico de la ciudad de Antofagasta para identificar las zonas de la ciudad más afectadas por el fenómeno de la Isla de Calor Urbano, esto permitirá establecer una línea base y priorizar las áreas de estudio.

3.1.1. Obtención de imágenes satelitales

Para determinar el comportamiento térmico y evidenciar el efecto ICU, se utilizarán imágenes satelitales LANDSAT8 disponibles en plataformas como EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

Las imágenes satelitales que se usaran en la investigación serán seleccionadas cuidadosamente para evitar interferencias meteorológicas, como nubosidad, y asegurarse así que sean validas. Del mismo modo se seleccionarán días cercanos a los solsticios (invierno y verano) para de esta manera obtener temperaturas máximas y mínimas representativas.

LANDSAT 8, es un satélite que ofrece el catálogo de imágenes satelitales más amplio de observación de la Tierra a nivel global, es un programa estadounidense entre la NASA y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). En la Figura 3.2 se presenta la herramienta digital EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), permite la descarga de las imágenes ráster provenientes de LANDSAT 8, previamente con la creación de un usuario donde se recalca el rojo el vínculo para las cuentas.

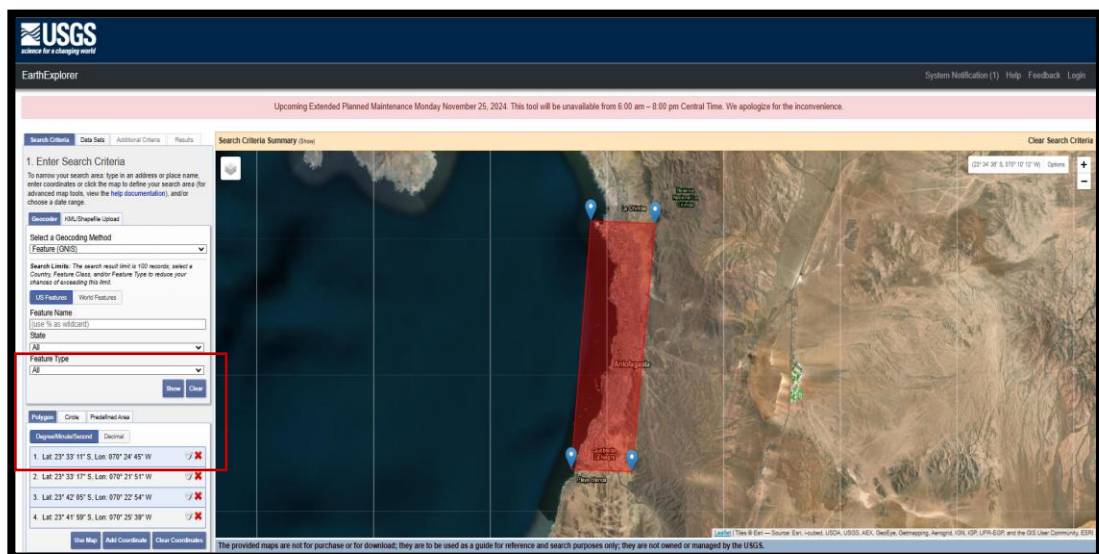


Figura 3.2: Selección de coordenadas de la ciudad de Antofagasta en EarthExplorer.

Fuente: (<https://earthexplorer.usgs.gov/>, 2024).

Los ráster se componen de una matriz de píxeles (también llamadas celdas), cada una con un valor que representa las condiciones de la zona cubierta por dicha celda (QGIS, 2020), se puede apreciar un esquema de datos ráster en la siguiente figura 3.3 para determinar la temperatura superficial se emplea como calculadora de mapas de bits.

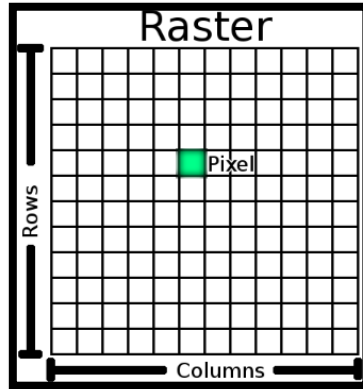


Figura 3.3: Esquema datos Ráster. (Fuente: QGIS, 2020).

3.1.2. Procesamiento de datos satelitales con software QGIS.

El software QGIS en su versión 3.4 con el complemento RS&GIS se empleará para calcular la temperatura superficial terrestre (Land Surface Temperature, LST) y generar mapas ráster de temperatura. En la siguiente figura 3.4 se puede ver la versión y iniciación del software que se utilizara en la investigación.



Figura 3.4. Iniciación software. (Fuente: Propia, 2024) en (QGIS 3.22.7).

Se clasificarán los valores obtenidos para identificar las áreas con mayor acumulación de calor en la ciudad. Además, los resultados serán cruzados con información georeferenciada (plan regulador de la comuna) que incluirán límites administrativos y zonas urbanas clave.

3.2. Selección de zonas de estudio

Para el desarrollo de esta investigación, la identificación de zonas de estudio se basó en un análisis térmico multitemporal, utilizando datos satelitales para detectar áreas urbanas con mayor intensidad del fenómeno de ICU. Se priorizaron sectores representativos de la ciudad de Antofagasta que concentran condiciones propicias tanto para el desarrollo del fenómeno térmico como para la posible implementación de medidas de mitigación basadas en infraestructura verde.

Las zonas seleccionadas responden a los siguientes criterios:

- **Alta densidad edificada y función urbana intensiva:** Se consideran sectores con predominio de edificaciones contiguas, alta proporción de superficie construida y un uso intensivo del suelo para funciones comerciales, administrativas o residenciales, lo cual favorece la acumulación térmica superficial y atmosférica.
- **Ausencia de cobertura vegetal:** Se priorizan áreas urbanas con escasa o nula vegetación, condición que agrava la magnitud del fenómeno ICU y que, a su vez, ofrece un alto potencial de mejora mediante soluciones basadas en naturaleza.
- **Viabilidad técnica para aplicar infraestructura verde:** Se incluyen edificaciones que presentan cubiertas planas o estructuras aptas para la incorporación de vegetación extensiva, como edificios de oficinas, departamentos, establecimientos públicos y recintos comerciales de gran superficie.
- **Relevancia social y urbana:** Se consideran áreas con alto flujo peatonal, centralidad funcional y valor simbólico o comercial para la ciudad, donde intervenciones de infraestructura verde podrían generar beneficios térmicos significativos y un impacto positivo directo en la calidad de vida de la población.

3.3. Modelado urbano con ENVI-met

Para evaluar los impactos de las cubiertas y fachadas verdes sobre el microclima urbano de Antofagasta, se empleará el software ENVI-met, una herramienta de simulación tridimensional que permite modelar interacciones entre la atmósfera, las superficies urbanas y la vegetación, con alta resolución espacial y temporal. El objetivo es simular diferentes configuraciones del entorno construido, tanto en condiciones actuales como con intervención de infraestructura verde.

La construcción de los modelos urbanos se realizará de manera completamente personalizada, utilizando la herramienta Spaces de ENVI-met, donde se modelarán con precisión las edificaciones, calles, vegetación y espacios abiertos dentro del área seleccionada. Para asegurar un nivel de realismo superior, se emplearán imágenes satelitales recientes de Google Earth Pro como base, las cuales serán alineadas y rotadas según el norte geográfico real de Antofagasta.

Posteriormente, el trazado detallado de las edificaciones se realizará de forma manual, utilizando como guía imágenes aéreas recientes y apoyándose en la herramienta Google Street View para verificar detalles constructivos en terreno. Esto permitirá una representación más precisa del entorno urbano, reconociendo formas, usos y estructuras específicas en cada cuadra. En los casos donde no se cuenta con datos exactos sobre la altura de los edificios, se recurrirá al apoyo de herramientas basadas en inteligencia artificial (IA), que permiten estimar estas dimensiones con buena precisión mediante el análisis visual y comparativo de proporciones observadas.

3.3.1. Parámetros para las simulaciones

Para ejecutar las simulaciones con precisión y coherencia con las condiciones reales de la ciudad de Antofagasta, se establecieron parámetros iniciales clave a través de la herramienta ENVI-guide, perteneciente al software ENVI-met. Esta plataforma permite configurar el comportamiento atmosférico del modelo en función de variables meteorológicas, físicas y vegetativas específicas. La correcta definición de estos parámetros es fundamental para garantizar que los resultados obtenidos reflejen adecuadamente la interacción entre el entorno construido y las estrategias de infraestructura verde aplicadas.

Los parámetros iniciales considerados para las simulaciones incluyen:

- **Datos climáticos locales:** Temperatura promedio, humedad relativa, radiación solar y velocidad/dirección del viento, con base en datos meteorológicos regionales recientes.
- **Materiales predominantes:** Incorporación de las características térmicas de los materiales urbanos típicos de Antofagasta, tales como el hormigón y el asfalto (conductividad térmica, albedo, emisividad, etc.).
- **Especies vegetales:** Se seleccionarán plantas adaptadas al clima árido, particularmente especies suculentas del género Sedum, configuradas en el modelo con parámetros fisiológicos específicos como índice de área foliar (LAI), albedo y tolerancia hídrica.

Este modelado urbano de alta resolución permitirá una evaluación confiable del comportamiento térmico urbano bajo distintas configuraciones, y será la base para analizar cuantitativamente el impacto de las estrategias de infraestructura verde propuestas.

3.3.2. Simulación de escenarios

Se modelarán distintos escenarios de intervención con infraestructura verde, con el objetivo de evaluar el impacto de diferentes niveles de cobertura vegetal en la temperatura del aire urbano. Las simulaciones se desarrollarán mediante el software ENVI-met, utilizando su motor de cálculo y simulaciones ENVI-core, el cual permite representar con alta resolución espacial y temporal los procesos de intercambio térmico en entornos urbanos complejos. Debido a la alta demanda computacional del software, cada simulación puede tardar entre días en completarse, dependiendo del hardware disponible. El enfoque se centrará en la aplicación progresiva de cubiertas y fachadas verdes sobre edificaciones seleccionadas.

Los escenarios definidos para esta investigación son los siguientes:

- **Escenario base:** Corresponde a la condición actual sin presencia de infraestructura verde (0 % de cobertura).
- **Escenario de cubiertas verdes:**

Aplicación del 50 % de cobertura verde en techos de edificaciones seleccionadas.

Aplicación del 100 % de cobertura verde en techos.

- **Escenario de fachadas verdes:**

Aplicación del 50 % de cobertura vegetal en fachadas.

Aplicación del 100 % de cobertura vegetal en fachadas.

- **Escenario combinado:** Cobertura del 100 % tanto en cubiertas como en fachadas, abarcando la totalidad del área edificada intervenida.

Cada uno de estos escenarios se simulará de manera independiente para evaluar el comportamiento térmico resultante. Esto permitirá identificar cómo varía la temperatura del aire en función del grado y tipo de intervención implementado.

Para cada uno de los escenarios es necesario correr una simulación distinta, por lo que, para cada escenario, existirá una temperatura del aire específica asociada a las condiciones modeladas.

3.3.3. Adaptación de materiales

El módulo "Greening" de ENVI-met permitirá configurar las propiedades del sistema de cubiertas y fachadas verdes, incluyendo: El espesor de la vegetación y sustrato, emisividad, albedo y coeficiente de agua del sustrato. Por otra parte, los materiales serán personalizados según las características térmicas propias de la ciudad de Antofagasta.

3.3.4. Visualización y resultados

Los resultados se procesarán con "Leonardo", una herramienta de ENVI-met que facilita la visualización de mapas de temperatura y otros indicadores clave. Se obtendrán mapas comparativos para cada escenario, mostrando las diferencias en la temperatura del aire y de las superficies.

3.5. Resultados

Una vez finalizadas las simulaciones, se procederá a evaluar y analizar los datos obtenidos.

Se compararán los resultados de los distintos escenarios para evaluar el impacto de la implementación de fachadas y cubiertas verdes en edificaciones de la ciudad de Antofagasta sobre la temperatura del aire y así contribuir a la mitigación el efecto ICU con medidas adaptadas a los climas áridos.

3.6. Evaluación de la viabilidad técnica-económica

Finalmente, se realizará una evaluación técnico-económica preliminar de las soluciones propuestas, con el objetivo de estimar su factibilidad práctica para ser implementadas en el contexto urbano de Antofagasta. Esta evaluación se centrará en las tipologías de infraestructura verde analizadas en la simulación (cubiertas y fachadas vegetadas) y se basará en la comparación entre los beneficios proyectados y los costos asociados a su implementación.

Desde la perspectiva técnica, se presentarán guías prácticas para la incorporación de infraestructura verde en edificaciones urbanas, enfocadas en cubiertas y fachadas vegetadas con especies de bajo requerimiento hídrico. Estas guías incluirán detalles sobre los materiales

a utilizar, procedimientos de instalación y mantenimiento básico, así como las condiciones mínimas requeridas para su correcto funcionamiento en el contexto climático de Antofagasta.

En el plano económico, la evaluación se realizará en base a los resultados obtenidos en las simulaciones térmicas. Particularmente, se tomará como referencia la disminución de temperatura del aire circundante en el entorno del paseo peatonal y sobre la superficie de las cubiertas intervenidas. Con estos datos, se proyectará un estimado preliminar del ahorro energético en climatización, considerando la reducción de carga térmica al interior de los edificios. Además, se recopilarán valores de mercado actualizados para estimar los costos de implementación por metro cuadrado, incluyendo materiales, vegetación, sustrato, instalación y sistemas complementarios.

Este análisis tendrá un carácter exploratorio y permitirá establecer las primeras proyecciones sobre la viabilidad de aplicar estas soluciones a mayor escala, aportando información clave para futuras decisiones de planificación urbana sostenible.

4. Presentación y análisis de resultados

4.1. Resultados del Objetivo Especifico N°1

El primer objetivo específico planteado en esta investigación consistió en determinar el comportamiento térmico superficial en la ciudad de Antofagasta, identificando de esta manera las áreas más críticas en términos del fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU). A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante el análisis satelital con imágenes Landsat 8 procesadas en el software QGIS.

4.1.1. Selección de Imágenes Satelitales

Para abordar el análisis térmico superficial de la ciudad de Antofagasta, se seleccionó una base de datos compuesta por 65 imágenes satelitales Landsat 8, que corresponden a la totalidad de las escenas disponibles entre los años 2017 y 2025 con condiciones aptas para análisis térmico. Esta base multitemporal incluyó capturas representativas tanto del periodo estival como invernal, permitiendo una caracterización estacional completa del fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU).

La elección de cada imagen consideró criterios técnicos fundamentales. En primer lugar, se priorizó la claridad atmosférica, excluyendo imágenes con nubosidad o interferencias radiométricas significativas, de manera de asegurar la calidad del análisis térmico. En segundo lugar, se seleccionaron únicamente aquellas escenas que contenían la Banda Térmica 10 calibrada, necesaria para la estimación precisa de la Temperatura Superficial Terrestre (Land Surface Temperature, LST). Asimismo, todas las imágenes debían presentar cobertura completa del área urbana de Antofagasta, asegurando así la continuidad espacial del estudio.

Complementariamente, se integraron parámetros astronómicos específicos para cada escena, tales como la elevación y el azimut solares, obtenidos directamente desde los archivos metadatos proporcionados por el USGS. Estos valores son fundamentales para asegurar la comparabilidad entre fechas, ya que el ángulo de incidencia solar influye directamente en la magnitud de la radiación capturada por la superficie terrestre, y por tanto, en las temperaturas observadas. En el conjunto de datos seleccionado, la elevación solar presentó rangos típicos entre 30° y 55°, lo que se alinea con las condiciones de iluminación solar propias del mediodía en latitudes medias, garantizando así condiciones radiométricas adecuadas para un análisis térmico consistente.

En la siguiente Tabla 4.1 se resumen las fechas seleccionadas, junto con la hora de paso del satélite, la elevación solar y el azimut correspondiente.

Tabla 4.1. Fechas de imágenes satelitales seleccionadas

N°	Fecha	Hora satélite (local)	Elevación solar (°)	Azimut solar (°)
1	25-02-2017	07:27:14	64,2	89,8
2	29-03-2017	07:27:43	59,3	85,6
3	16-05-2017	06:26:36	51,7	91,3
4	17-06-2017	06:26:13	33,7	87,4
5	20-08-2017	07:27:47	40,3	92,3
6	27-11-2017	07:27:14	46,7	89,1
7	27-01-2018	07:27:49	63,1	94,3
8	12-02-2018	07:27:36	61	87,8
9	28-02-2018	07:27:22	61	91,1
10	16-03-2018	07:27:17	58,4	88,2
11	01-04-2018	07:27:13	40,9	94,8
12	20-06-2018	06:25:40	33,1	91,5
13	19-03-2019	07:27:25	60,8	88,9
14	04-04-2019	06:36:32	37,8	89,4
15	20-04-2019	07:27:54	41,3	85,5
16	25-07-2019	06:26:30	37,8	92,1
17	11-09-2019	07:27:44	60,9	89
18	30-11-2019	07:27:44	57,7	85,7
19	23-12-2019	07:27:00	64,2	87
20	01-01-2020	07:26:36	62,5	88,4
21	17-01-2020	07:27:37	64	93,3
22	02-02-2020	07:26:01	63,1	87,3
23	05-03-2020	07:26:34	58,9	86,2
24	06-04-2020	07:27:20	37,3	92
25	22-04-2020	07:27:40	42	87
26	02-12-2020	07:29:08	60,1	87,5
27	03-01-2021	07:26:49	61,9	88,5
28	04-02-2021	07:27:17	62,3	87,7
29	20-02-2021	07:27:25	63,6	89
30	23-02-2021	07:27:41	61,7	90,6
31	24-03-2021	07:27:52	59	94,2
32	25-04-2021	07:27:15	39,7	92,6
33	28-06-2021	06:26:26	35,8	88,8
34	23-02-2022	07:27:13	63,4	85,2
35	27-03-2022	07:27:38	58,6	93,9
36	12-04-2022	07:27:25	57,5	85,9
37	15-06-2022	06:25:55	33,9	91,7
38	17-07-2022	06:26:29	34,9	89,5
39	18-08-2022	07:27:49	45,3	87,5
40	03-09-2022	06:30:26	36,9	86,4
41	05-10-2022	07:27:29	57,2	93,8
42	22-11-2022	07:27:31	45,7	91

43	24-12-2022	07:27:23	62	93
44	09-01-2023	07:29:04	60	87,7
45	25-01-2023	07:27:20	62,3	89,8
46	10-02-2023	07:27:28	61,8	93,4
47	26-02-2023	07:27:54	63,4	91,7
48	30-03-2023	07:27:48	59,8	93,2
49	15-04-2023	07:27:10	50,1	85,9
50	17-05-2023	06:26:32	59,4	87,6
51	18-06-2023	06:26:10	34,1	92
52	18-06-2023	06:26:10	34,1	92
53	05-08-2023	07:27:40	56,5	86,6
54	08-10-2023	07:27:22	53,3	91,8
55	11-12-2023	07:28:05	61,2	88,7
56	12-01-2024	07:28:10	62	88,3
57	29-02-2024	07:26:16	64,5	86,5
58	20-06-2024	06:26:31	37,3	89,2
59	06-07-2024	07:28:30	34,3	92,2
60	07-08-2024	07:27:10	38,1	94,8
61	23-08-2024	07:27:17	52,6	90,5
62	08-09-2024	07:27:28	59,1	85,8
63	13-12-2024	07:28:09	60,8	89,2
64	14-01-2025	07:27:32	64,3	88,9
65	19-03-2025	07:27:13	59,1	91,6

fuelle: (elaboración propia, 2025).

En la siguiente figura 4.1 se muestra el grafico de dispersión de la elevación solar de los días seleccionados.

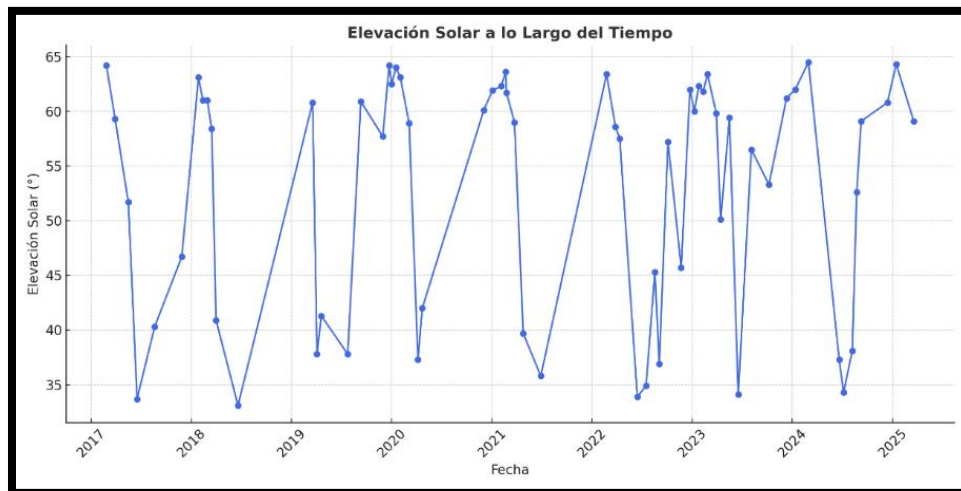


Figura 4.1: Elevación Solar de Fechas seleccionadas

Fuente: (Elaboración Propia, 2025).

4.1.2. Análisis de Temperatura Superficial Terrestre (LST) promedio para verano e invierno.

Una vez definida la base multitemporal de imágenes Landsat 8, se procedió a la generación de capas promedio de Temperatura Superficial Terrestre (Land Surface Temperature, LST) para las estaciones de verano e invierno, con el fin de representar de forma robusta y comparativa el comportamiento térmico superficial urbano en la ciudad de Antofagasta.

El procesamiento fue realizado en el software QGIS, utilizando como insumo las imágenes previamente corregidas y georreferenciadas, todas ellas con la Banda Térmica 10 calibrada (TIRS). Para cada estación se seleccionaron únicamente aquellas imágenes que correspondieran a los meses representativos: enero y febrero para verano, y junio, julio y agosto para invierno. A partir de esta selección, se generaron dos capas de promedio estacional mediante la calculadora ráster de QGIS, empleando el promedio de los valores de LST por cada píxel a lo largo del periodo 2017–2025.

Este enfoque permitió mitigar el efecto de anomalías térmicas puntuales y reducir el sesgo asociado a posibles variaciones climáticas interanuales. El resultado fue un modelo espacial de distribución térmica representativo de cada estación, con alta resolución y comparabilidad técnica.

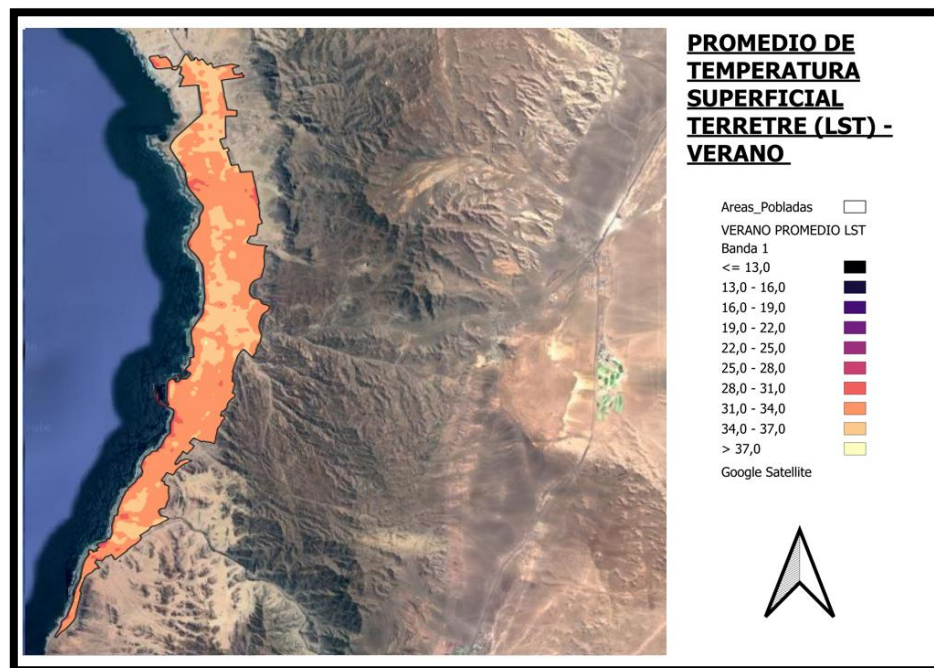


Figura 4.2. Promedio de LST verano, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

En la Figura 4.2 se presenta el mapa resultante del promedio de LST para el verano, donde se observan temperaturas máximas que alcanzan y superan los 37 °C en el área urbana central, particularmente en sectores con alta densidad de infraestructura pavimentada y escasa vegetación. En contraste, las áreas costeras presentan valores significativamente inferiores, evidenciando el efecto de amortiguación térmica proporcionado por la influencia marina

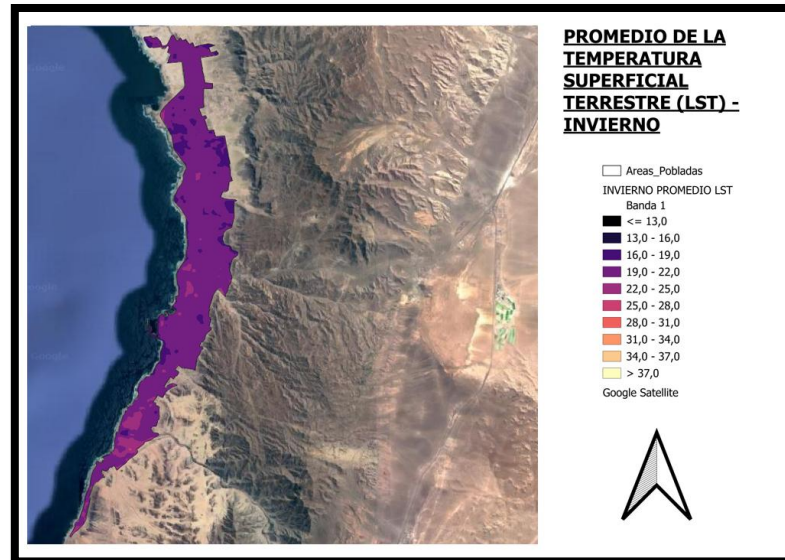


Figura 4.3. Promedio de LST invierno, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

En la Figura 4.3, correspondiente al promedio de LST en invierno, se observa una reducción significativa de las temperaturas superficiales respecto al verano, con valores predominantes entre 19 °C y 22 °C en la zona urbana. Las áreas más cálidas se concentran en el eje centro-sur de la ciudad, aunque con una intensidad mucho menor. A diferencia del verano, en donde las temperaturas máximas superaban los 38 °C, en invierno no se registran valores superiores a 25 °C en el promedio estacional, lo que confirma el efecto moderador de la radiación solar en este periodo del año.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que, si bien existe una reducción estacional significativa en las temperaturas superficiales durante el invierno, la configuración urbana de Antofagasta continúa presentando sectores con acumulación térmica relevante en ambas estaciones del año. Esta persistencia de condiciones térmicamente adversas, especialmente en zonas de alta densificación y baja cobertura vegetal, refuerza la importancia de considerar estrategias de mitigación pasiva del calor urbano. En este contexto, la implementación de infraestructura verde, como cubiertas y fachadas vegetales, se proyecta como una medida eficiente y técnicamente viable para disminuir la intensidad del fenómeno de Isla de Calor Urbano y mejorar el confort térmico a escala local.

4.1.3. Análisis de la Intensidad del Fenómeno de Isla de Calor Urbano ICU

Luego de haber generado las capas promedio de temperatura superficial terrestre (LST) para verano e invierno, se procedió a la estimación de la intensidad del fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU). Esta intensidad se define como la diferencia térmica entre las zonas urbanas consolidadas y las áreas rurales o periurbanas cercanas, donde existe mayor presencia de suelos naturales y vegetación.

Para llevar a cabo esta cuantificación, se utilizó la expresión comúnmente aceptada en estudios urbanos de análisis satelital, definida como:

$$\text{ICU} = \text{LST}_{\text{urbano}} - \text{LST}_{\text{rural}}$$

Donde:

- **LST_{urbano}**, corresponde a la temperatura superficial media en sectores altamente urbanizados.
- **LST_{rural}**, representa la temperatura media en áreas periféricas fuera del límite urbano no intervenidas o con baja densidad edificada.

En el entorno QGIS, esta operación fue realizada mediante la herramienta de calculadora ráster, aplicando una resta entre capas promedio de LST, recortadas mediante máscaras vectoriales correspondientes a las zonas urbanas y rurales previamente delimitadas. Estas máscaras fueron definidas a partir del límite urbano oficial y apoyadas en análisis visual sobre Google Satélite, asegurando la representatividad térmica de cada categoría.

El resultado permitió generar una capa ráster que representa espacialmente la intensidad de la ICU por píxel, expresada en grados Celsius. Esta capa fue posteriormente reclasificada en rangos de valores para facilitar su interpretación visual y generar las fichas correspondientes a verano e invierno, las cuales se pueden observar en las figuras 4.4 y 4.5.

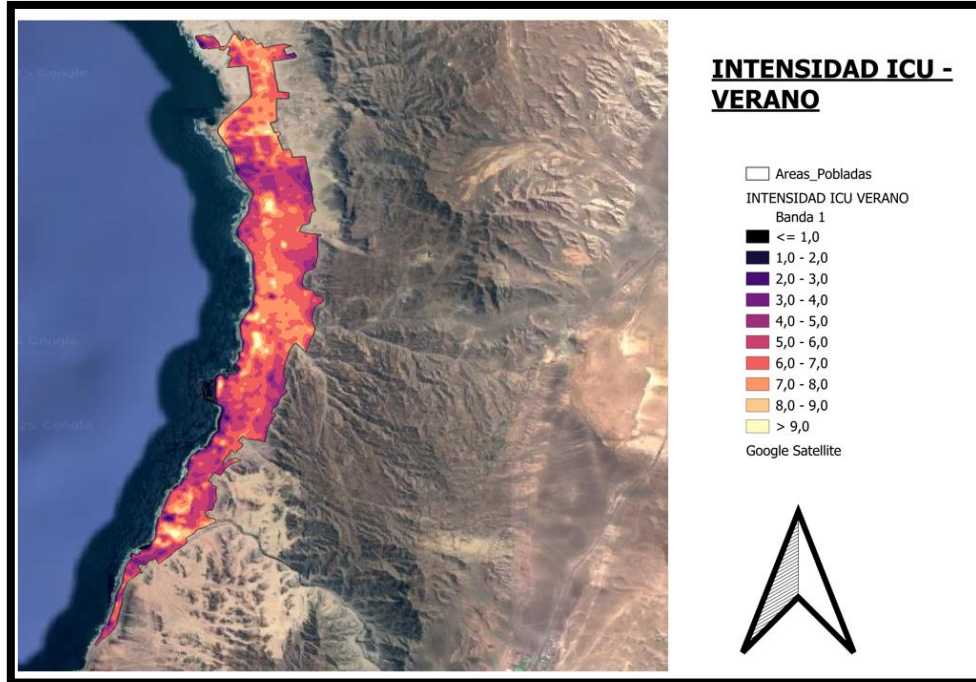


Figura 4.4. Intensidad isla de calor urbano, verano, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

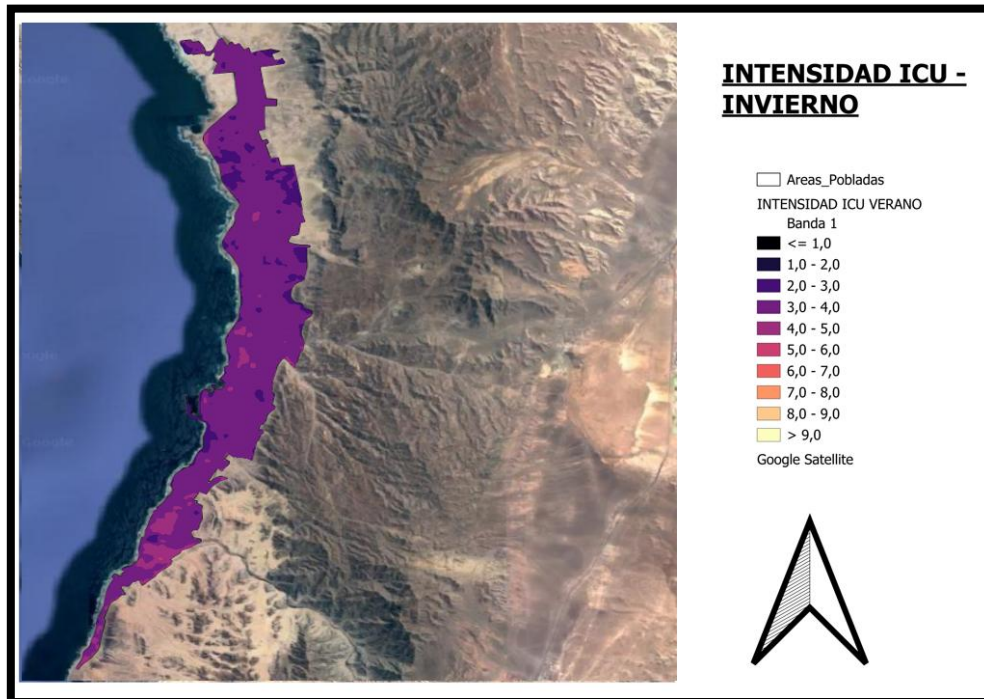


Figura 4.5. Intensidad isla de calor urbano, invierno, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

- En verano, los valores máximos de ICU superaron los 9 °C en sectores centrales y peatonales densamente contruidos, con un promedio general en zonas críticas entre 6,0 °C y 8,0 °C.
- En invierno, aunque la intensidad se redujo, se mantuvieron diferencias significativas, con valores entre 3,0 °C y 6,0 °C en los mismos sectores.

Con base en la clasificación de intensidades de ICU propuesta por Fernández-García (1996) (incluida en marco teórico) y a partir de los valores identificados en el análisis térmico estacional realizado en esta investigación, se puede determinar que el fenómeno de ICU en la ciudad de Antofagasta alcanza categorías de intensidad alta.

En verano, los registros en sectores densamente contruidos y de alta actividad urbana superan los 9 °C de diferencia térmica entre zonas urbanas y periféricas, lo que sitúa al fenómeno en la categoría de “Muy Fuerte”. Incluso en invierno, cuando la carga térmica disminuye, se evidencian diferencias de entre 3 °C y 6 °C, lo que corresponde a categorías “Moderada” a “Fuerte”, según la escala de referencia.

Estos resultados confirman la persistencia del fenómeno en la ciudad, tanto en su expresión máxima como en condiciones de menor estrés térmico, evidenciando la necesidad de estrategias efectivas de mitigación como la incorporación de infraestructura verde.

4.1.4. Selección y Caracterización de las Zonas Críticas para Evaluación de Mitigación

Con base en los resultados obtenidos del análisis térmico superficial (LST) y de la intensidad del fenómeno de Isla de Calor Urbano (ICU), se procedió a la identificación de una zona crítica representativa dentro del área urbana de Antofagasta para ser considerada como caso de estudio en la simulación de medidas de mitigación térmica.

En la Figura 4.6 se presenta un extracto del mapa de promedio de LST para el verano, previamente desarrollado, donde el recuadro azul delimita el sector seleccionado. Esta zona fue escogida debido a la notable presencia de concentraciones térmicas elevadas, identificadas mediante manchas térmicas claras que superan los 37 °C en promedio.

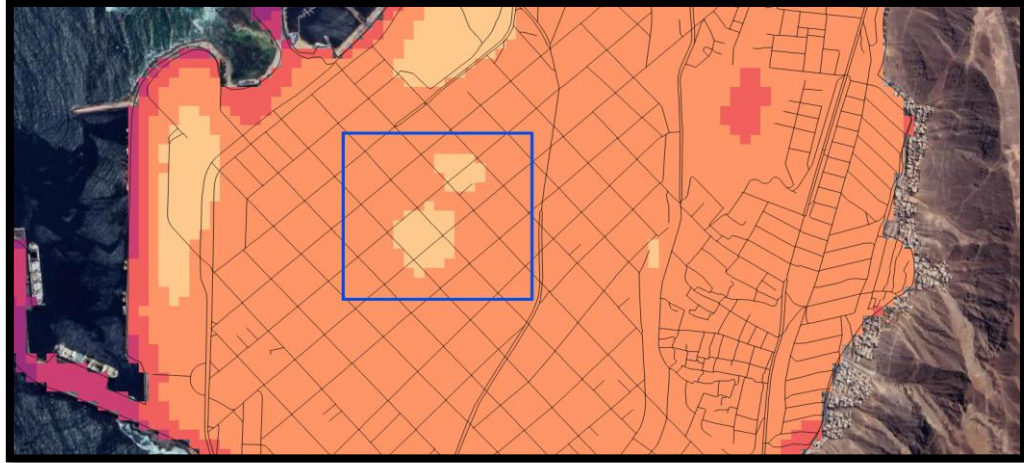


Figura 4.6. Extracto del mapa promedio de LST, verano, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

La Figura 4.7 muestra un extracto del mapa de intensidad del fenómeno ICU en la ciudad de Antofagasta, generado a partir del análisis comparativo entre temperaturas urbanas y rurales. En la imagen se aprecia con claridad la concentración de calor en el centro de la ciudad, destacando el área delimitada por el recuadro azul como una de las zonas con mayor carga térmica. Esta concentración, junto con su ubicación estratégica en el área comercial y administrativa de la ciudad, confirma la selección de esta área como el principal sector de estudio para la evaluación de estrategias de mitigación térmica en el presente trabajo.

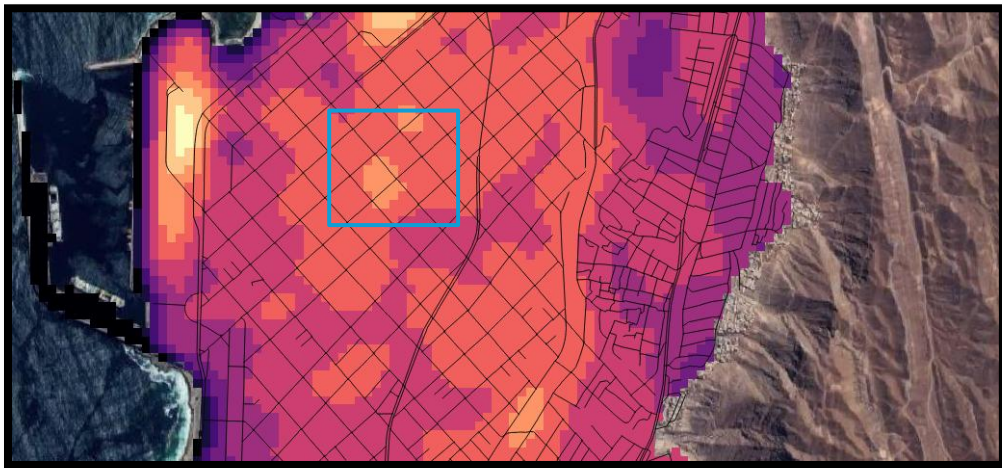


Figura 4.7. Extracto del mapa de intensidad de ICU, verano, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

A continuación, en la figura 4.8, se detalla la delimitación precisa de las dos subzonas de estudio contenidas dentro de los recuadros rojos. Estas corresponden a los dos únicos paseos peatonales del centro comercial y administrativo de la ciudad: el Paseo Peatonal Arturo Prat (Zona de Interés 1), comprendido entre las calles Baquedano, Latorre, Sucre y Matta; y el Paseo Peatonal Matta (Zona de Interés 2), entre las calles Maipú, Carlos Condell, Arturo Prat y Santos Ossa.

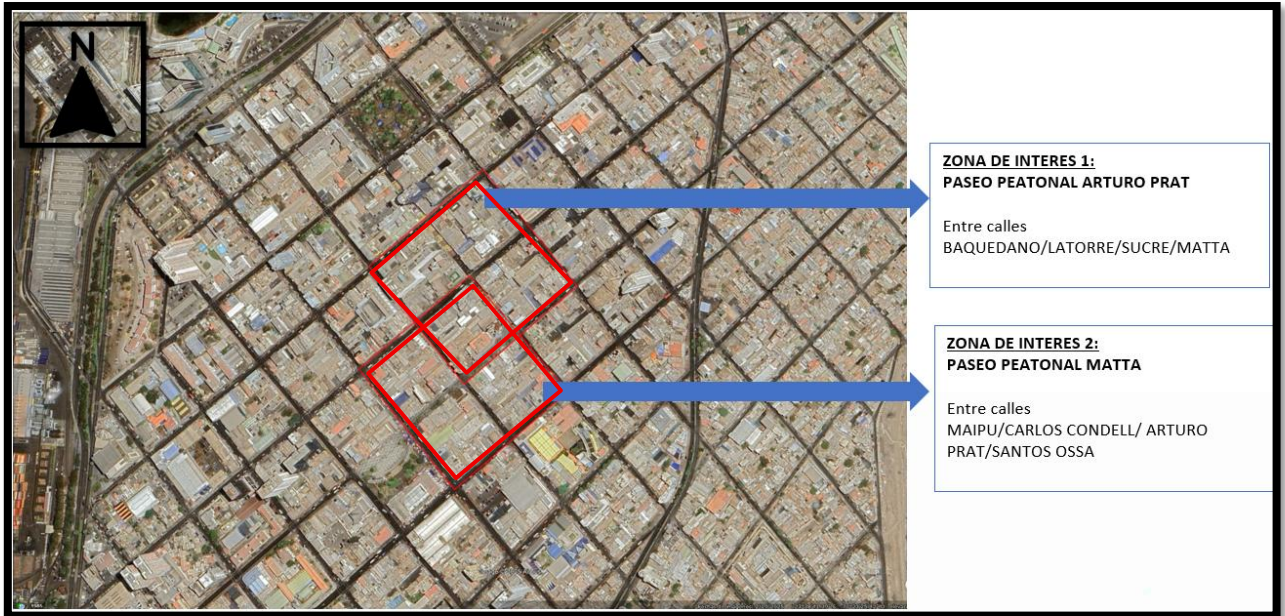


Figura 4.8. Presentación de las dos zonas de estudio seleccionadas, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth ,2025).

A modo de profundizar en la evaluación térmica de las zonas seleccionadas, en la figura 4.9 se presenta una secuencia multitemporal de mapas de Temperatura Superficial Terrestre (LST) correspondientes a distintos años entre 2017 y 2024. Esta ficha representa exclusivamente en los recuadros azules, el área donde se ubican los paseos peatonales seleccionados, permitiendo observar la persistencia de altas temperaturas a lo largo del tiempo. Las imágenes evidencian que, independientemente del año, estas zonas mantienen consistentemente los valores más elevados de LST dentro del centro urbano, destacándose como verdaderos focos térmicos (hotspots). Esta continuidad temporal confirma la criticidad del área en términos térmicos y valida su elección como caso de estudio prioritario para la aplicación de medidas de mitigación urbana.

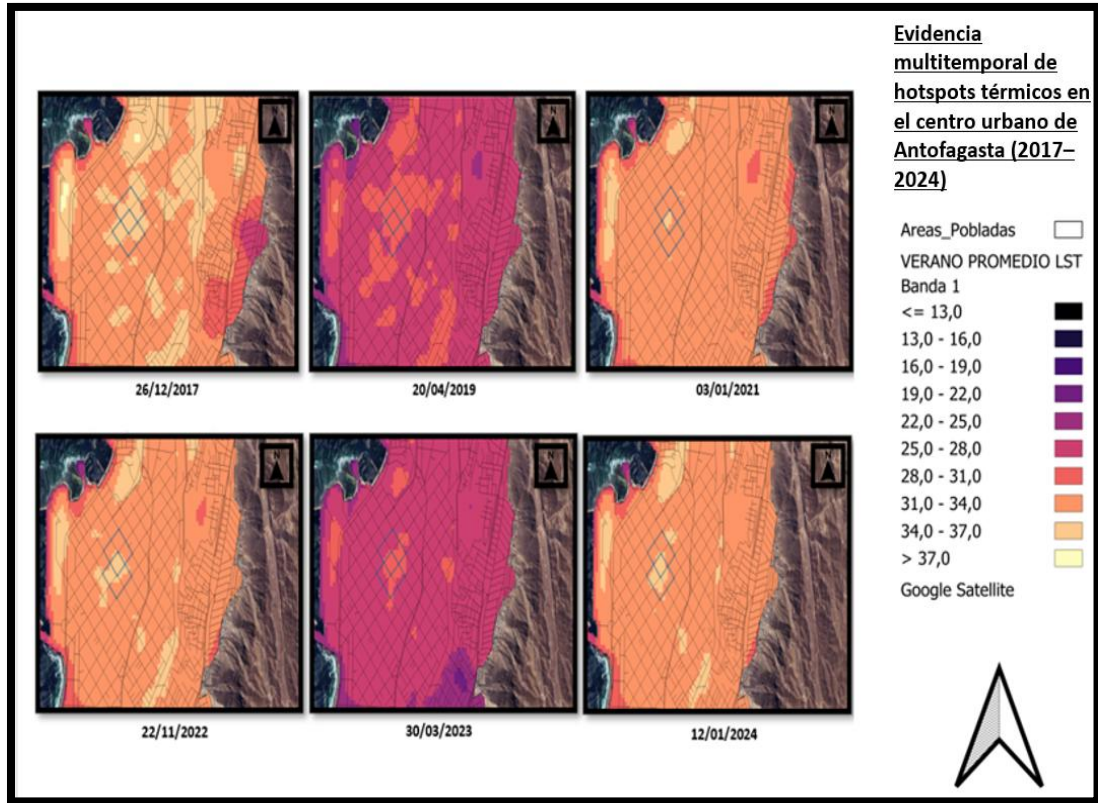


Figura 4.9. Evidencia multitemporal de hotpost en las dos zonas de estudio seleccionadas.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

La elección de estos sectores se fundamenta en múltiples criterios técnicos, térmicos y sociales:

- **Elevada temperatura superficial:** Ambas zonas presentan valores de LST superiores a 38 °C en promedio, pero en ocasiones se registraron temperaturas por encima de los 40°C, situándose como los sectores más cálidos del área urbana analizada, esto se puede observar en el siguiente gráfico de la figura 4.10, que compara la temperatura superficial (promedio, máxima y mínima) de estas zonas con 2 zonas residenciales para hacer la comparación de temperaturas.

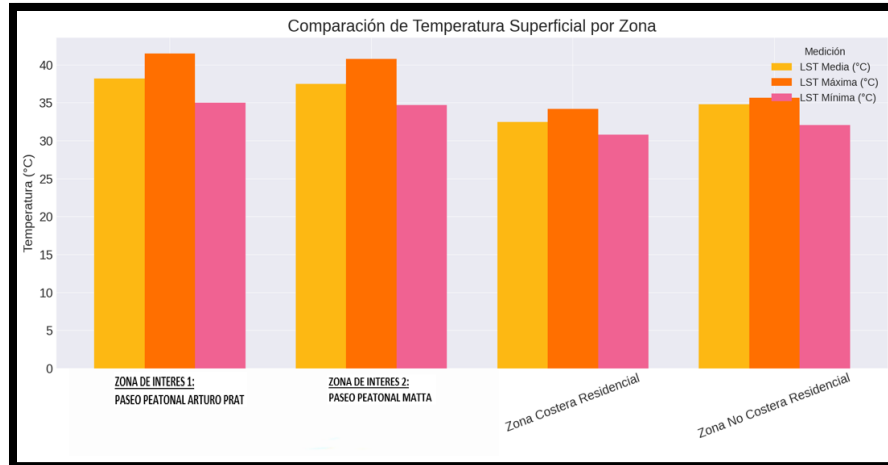


Figura 4.10. Gráficos de comparación de Temp° de zonas de interés y zonas residenciales.

Fuente: (Elaboración propia,2025).

- **Carencia de vegetación urbana:** Se observó una ausencia total de cobertura vegetal, lo que incrementa significativamente la acumulación térmica.
- **Importancia social y estratégica:** Al tratarse de los únicos paseos peatonales del centro, estas áreas tienen un alto valor urbano, comercial y simbólico para la comunidad, por lo que su intervención mediante estrategias de infraestructura verde puede generar beneficios inmediatos y replicables. Estos beneficios no se limitan únicamente al ámbito económico, sino que también incluyen impactos positivos en aspectos sociales, tales como la mejora del confort térmico para los peatones, el fortalecimiento del tejido social a través de espacios más habitables y seguros, la promoción de la salud pública mediante la reducción del estrés térmico y la creación de entornos más inclusivos y accesibles para toda la población.
- **Alta densidad edificada y función urbana intensiva:** Estas zonas concentran una gran cantidad de edificaciones comerciales, oficinas, bancos, instituciones públicas y equipamientos, lo que intensifica el flujo peatonal diario.
- **Orientación contrastante:** Ambos paseos presentan orientaciones distintas (uno en sentido norte-sur y el otro este-oeste) lo que permitirá analizar con mayor profundidad cómo la orientación influye en el comportamiento térmico y en la eficiencia de futuras medidas de mitigación, ya que la trayectoria solar y la generación de sombras proyectadas varía significativamente entre calles con orientación este-oeste y norte-sur, afectando directamente la acumulación térmica diaria

En síntesis, el análisis multitemporal del comportamiento térmico superficial en la ciudad de Antofagasta permitió confirmar la presencia del fenómeno ICU y así identificar dos zonas urbanas críticas, caracterizadas por altas temperaturas persistentes, baja cobertura vegetal y alta relevancia funcional. Estas condiciones justifican la elección de dichos sectores como casos de estudio para evaluar la implementación de soluciones de mitigación térmica, lo cual será abordado en los siguientes objetivos específicos.

4.2. Resultados del Objetivo Específico N°2

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes al Objetivo Específico N°2, centrado en evaluar el efecto térmico urbano de la implementación de infraestructura verde en zonas críticas del centro de Antofagasta, previamente identificadas en los resultados del Objetivo N°1 mediante análisis de LST. Se describe la modelación de escenarios en ENVI-met, la ubicación de los puntos de referencia (P.R), la configuración de parámetros atmosféricos y vegetales, así como la definición constructiva de las soluciones aplicadas. Finalmente, se exponen los resultados de las simulaciones y una síntesis de los resultados que permite comprender el impacto térmico de las intervenciones en distintos niveles y horarios.

4.2.1. Modelación y configuración de los escenarios urbanos

Para el desarrollo de las simulaciones en ENVI-met, se generaron modelos tridimensionales específicos y de alta precisión para los dos paseos peatonales seleccionados como zonas de estudio a través de la herramienta SPACES de Envi-met: el **Paseo Peatonal Arturo Prat** y el **Paseo Peatonal Matta**. La construcción de estos modelos fue realizada de manera completamente manual y personalizada, lo que implicó un trabajo meticuloso y demandante en términos de tiempo, con el objetivo de asegurar una representación fiel de la realidad urbana del centro de Antofagasta.

Cada modelo contempla la totalidad de las cuatro cuadras urbanas que conforman los paseos peatonales, y no solo el eje de circulación central. Esta decisión metodológica responde a la necesidad de aumentar la veracidad de las simulaciones, ya que ENVI-met calcula el comportamiento térmico en función de múltiples interacciones espaciales, incluyendo sombra proyectada, flujo de aire y almacenamiento de calor en edificaciones vecinas. Al modelar una mayor proporción del entorno construido, se mejora la precisión de los resultados en el área crítica de análisis.

Las dimensiones del modelo fueron configuradas según lo siguiente:

- **Tamaño del dominio:** $125 \times 125 \times 25$ celdas (grids).
- **Resolución espacial:** 2 metros por celda.
- **Superficie modelada:** $250 \text{ m} \times 250 \text{ m}$, lo que representa un área significativamente extensa en comparación con estudios similares, que suelen trabajar con dominios mucho más acotados.
- **Materialidad predominante:** Muros y techos asignados como "Concrete Wall (heavy)", coherente con la composición constructiva predominante en la zona céntrica de la ciudad.

a) Modelo Paseo Peatonal Arturo Prat

El primer modelo tridimensional fue desarrollado para el sector del Paseo Peatonal Arturo Prat, uno de los dos ejes urbanos seleccionados como zonas de estudio. La modelación comprende la totalidad de las cuatro cuadras que delimitan el paseo, lo cual permite capturar con mayor precisión las interacciones microclimáticas del entorno construido, en lugar de limitarse únicamente al eje central peatonal. Esta decisión metodológica mejora sustancialmente la calidad y representatividad de los resultados obtenidos en el área de análisis. En las siguientes figuras 4.11 Y 4.12 se muestran el eje central del paseo peatonal Arturo Prat.

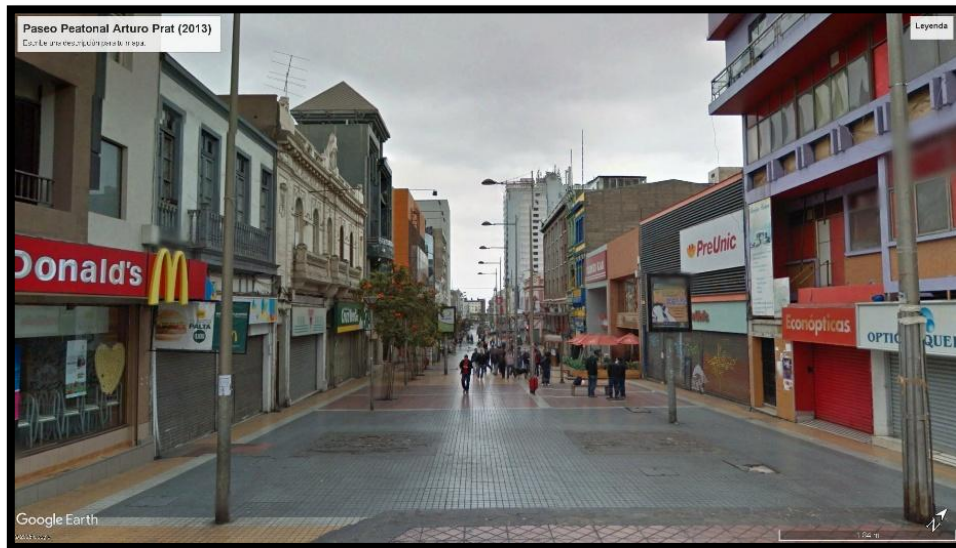


Figura 4.11. Paseo Peatonal Arturo Prat, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth Pro, 2025)

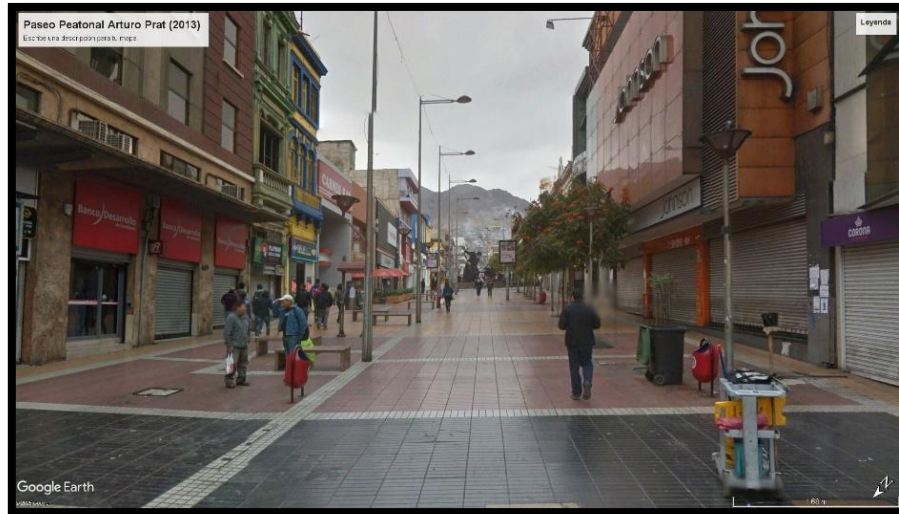


Figura 4.12. Paseo Peatonal Arturo Prat, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth Pro, 2025).

Para la elaboración del modelo, se utilizó como base una imagen satelital del presente año (2025) del área, extraída del software Google Earth Pro, la cual fue rotada $40,7^\circ$ en sentido horario con el objetivo de alinear el dominio de trabajo horizontalmente respecto al visor de ENVI-met Spaces. Esta rotación facilitó una construcción más precisa y ordenada del modelo urbano. Posteriormente, esta misma rotación fue registrada en la configuración del modelo dentro del software ENVI-met, de modo que la simulación tuviera en cuenta la orientación real del entorno edificado respecto al norte geográfico. Este aspecto resulta clave, ya que influye directamente en la incidencia de la radiación solar, la proyección de sombras y el comportamiento térmico del sitio modelado.

En la figura 4.13 se presenta la imagen satelital rotada utilizada como base del modelo tridimensional. Esta capa fue empleada como guía directa para el trazado de edificaciones, calles y espacios abiertos dentro del entorno de modelación, el rectángulo azul indica la ubicación del paseo peatonal Arturo Prat.

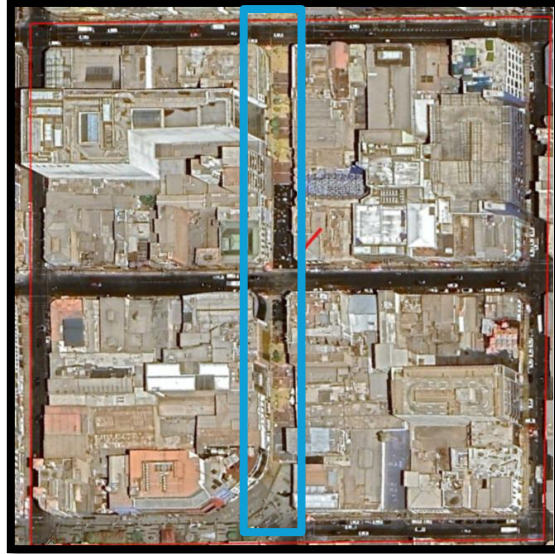


Figura 4.13. Imagen satelital paseo peatonal Prats, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth ,2025).

La figura 4.14 muestra la representación del modelo en vista 2D, donde se pueden apreciar las delimitaciones precisas de edificaciones, calzadas, paseos peatonales y espacios abiertos. Esta configuración detallada asegura una correcta asignación de funciones urbanas y materiales dentro del dominio de simulación.

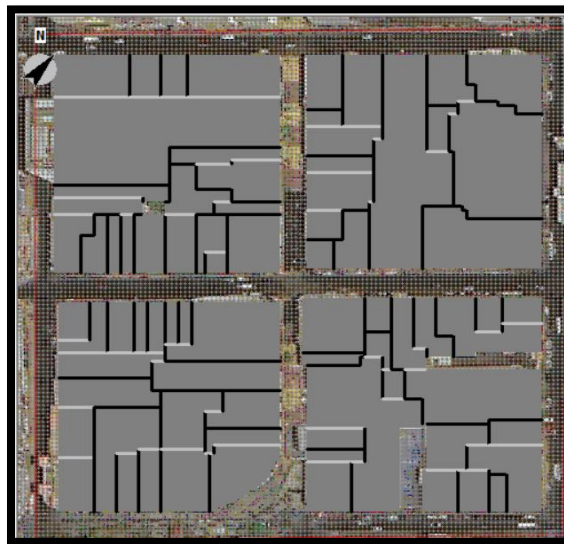


Figura 4.14. Modelo en 2D de paseo peatonal Prats, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

En la figura 4.15 se exhibe la visualización del modelo en 3D, una herramienta fundamental para validar la coherencia volumétrica del entorno urbano simulado. Esta vista tridimensional permite evaluar con mayor claridad las alturas relativas de las edificaciones, la continuidad del paseo peatonal y la relación con las calles adyacentes.

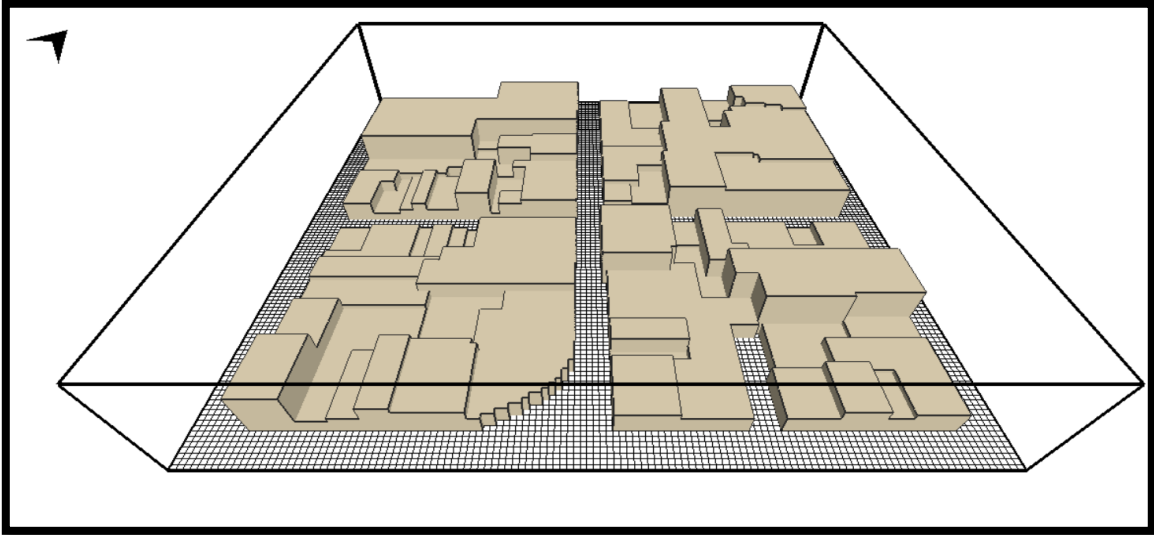


Figura 4.15. Modelo en 3D de paseo peatonal Prat, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

TABLA 4.2: Resumen dimensiones modelación Paseo Prat.

RESUMEN DIMENSIONES	Superficie estimada (m²)	Porcentaje del total (62.500 m²)
Área total del modelo	62.500	100%
Área construida total (techos)	39.000	62,40%
Área techos colindantes al paseo Prat	2.400	3,80%
Área de suelos/pavimentos	23.500	37,60%

Fuente: (elaboración propia, 2025)

b) Modelo Paseo Peatonal Matta

El segundo modelo corresponde al Paseo Peatonal Matta, la otra zona seleccionada como caso de estudio en el presente trabajo. Al igual que en el modelo anterior, se incorporaron las cuatro cuadras completas que conforman el entorno inmediato del paseo, permitiendo así una simulación más representativa del comportamiento microclimático urbano, en las siguientes figuras 4.16 y 4.17 extraídas de Google Earth pro, en su función Street View, se muestra el inicio y final del paseo peatonal.

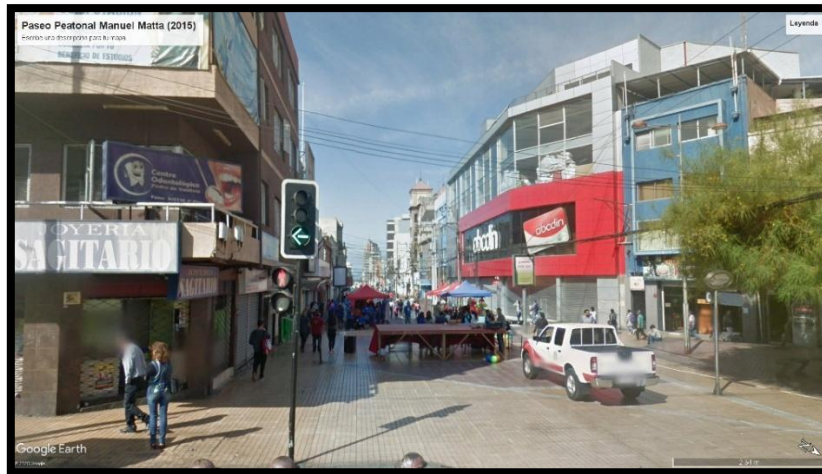


Figura 4.16: Paseo Peatonal Manuel Matta, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth Pro, 2025).

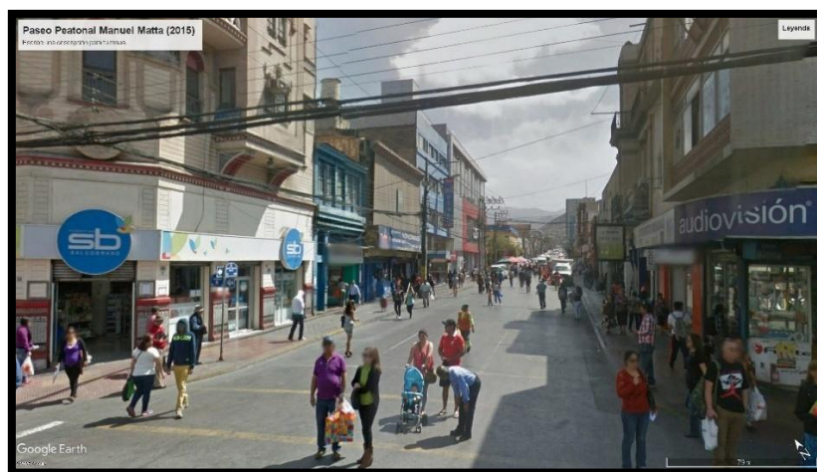


Figura 4.17: Paseo Peatonal Manuel Matta, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth Pro, 2025).

La imagen satelital utilizada como base fue obtenida desde Google Earth Pro y corresponde al año 2025. Esta fue rotada 41.4° en sentido horario, de modo de alinear

correctamente el dominio de modelación con la cuadrícula de ENVI-met Spaces. Como en el caso anterior, este ángulo fue posteriormente ingresado en la configuración del modelo dentro del software para asegurar una correcta interpretación de la orientación geográfica durante las simulaciones.

La figura 4.18 presenta la imagen base rotada que permitió el trazado detallado de edificaciones, calles y espacios abiertos dentro del dominio de simulación. El rectángulo azul destaca el eje peatonal central correspondiente al paseo peatonal Matta.

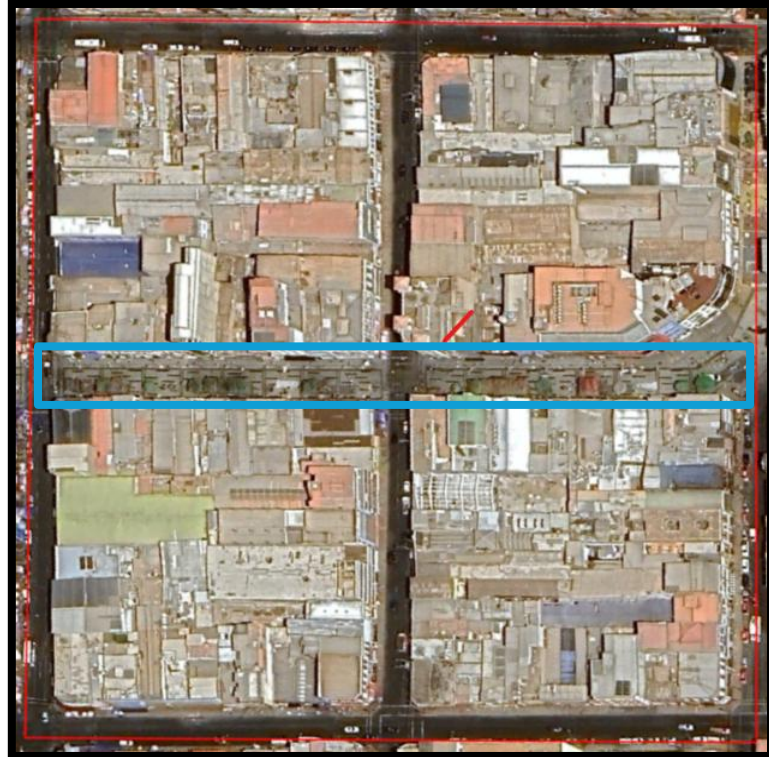


Figura 4.18. Imagen satelital paseo peatonal Matta, Antofagasta.

Fuente: (Google Earth ,2025).

En la figura 4.19 se muestra la vista 2D del modelo, en la cual es posible observar la geometría general del entorno construido, incluyendo muros, techos, espacios de circulación y vacíos urbanos.

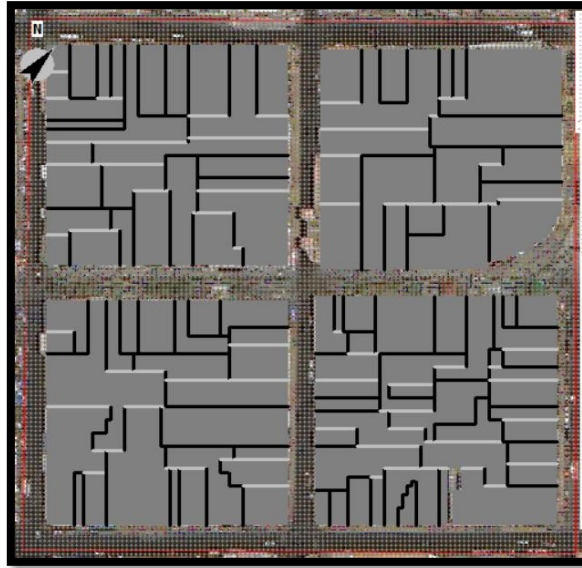


Figura 4.19. Modelo en 2D de paseo peatonal Matta, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

Finalmente, la 4.20 ilustra el resultado del modelo tridimensional generado, el cual permite validar la volumetría urbana, alturas relativas y configuración estructural del entorno simulado.

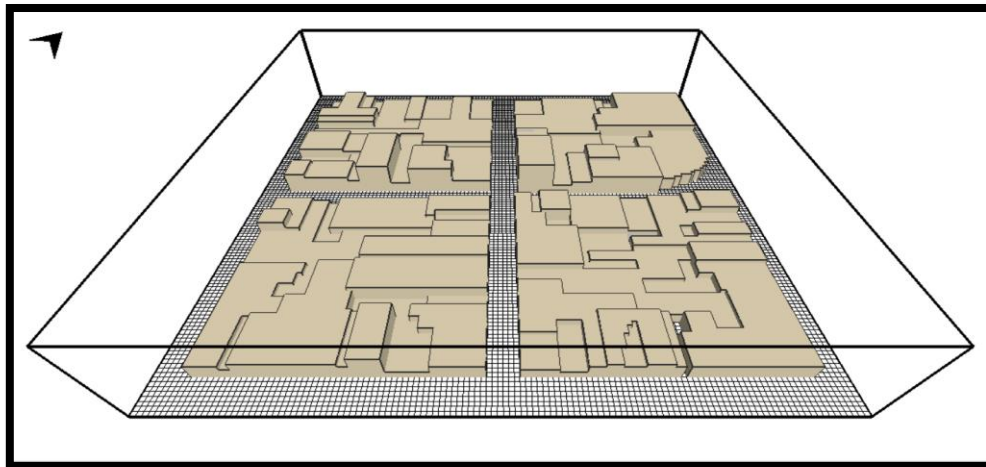


Figura 4.20. Modelo en 3D de paseo peatonal Matta, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

TABLA 4.3: Resumen dimensiones modelación Paseo Matta.

RESUMEN DIMENSIONES	Superficie estimada (m²)	% del total
Área total modelo	62.500	100%
Superficie construida total (techos)	40.000	64.0%
Superficie techos colindantes al paseo Matta	1.610	2.58%
Área suelos/pavimentos	22.500	36.0%

Fuente: (elaboración propia, 2025).

4.2.2. Ubicación de los puntos de referencia (P.R)

Para la precisa extracción de los datos a partir de los resultados de las simulaciones, se definieron tres puntos fijos dentro del modelo que actuarán como receptores de datos, a los cuales en adelante denominaremos **Puntos de Referencia (P.R)**. Estos puntos fueron ubicados estratégicamente en zonas representativas del área de estudio, considerando su exposición al entorno construido y su relevancia urbana.

Cada **P.R** fue posicionado de manera constante en todos los escenarios simulados para asegurar la coherencia comparativa entre los distintos resultados. En particular, se analizaron tres ubicaciones **P.R “1”**, **P.R “2”** y **P.R “3”** que permiten observar variaciones térmicas en distintos contextos del tejido urbano.

Los puntos de referencia se ubicaron estratégicamente para capturar condiciones térmicas representativas. **P.R “1”** y **P.R “3”** se situaron en el eje central de los paseos Prat y Matta, respectivamente, para evaluar el impacto directo de las soluciones sobre el espacio peatonal. En tanto, **P.R “2”** se ubicó en una intersección vial, con el fin de analizar si los beneficios microclimáticos alcanzan zonas de transición con menor intervención directa.

En las siguientes figuras 4.21 Y 4.22 se presenta visualmente la ubicación de estos puntos sobre los modelos digitales correspondientes a los sectores **Paseo Prat** y **Paseo Matta**, con una resolución espacial de 2 metros por celda.

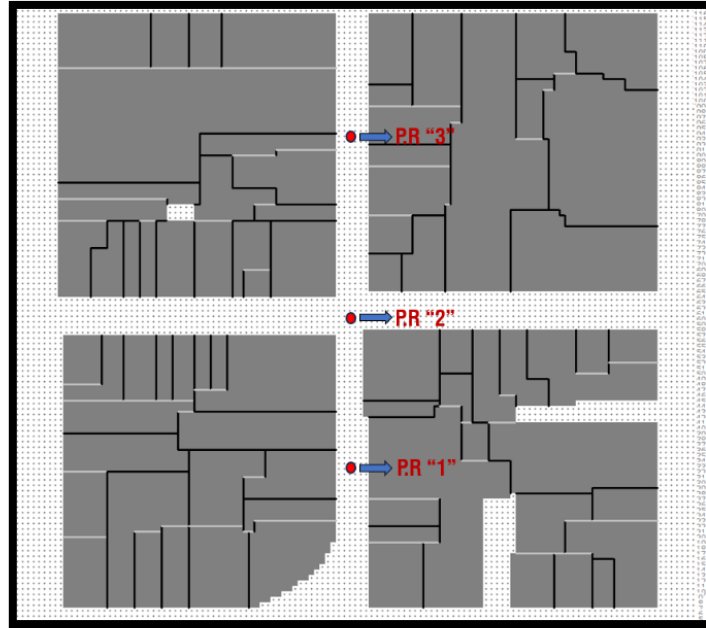


Figura 4.21. Ubicación de los receptores paseo peatonal Prat, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

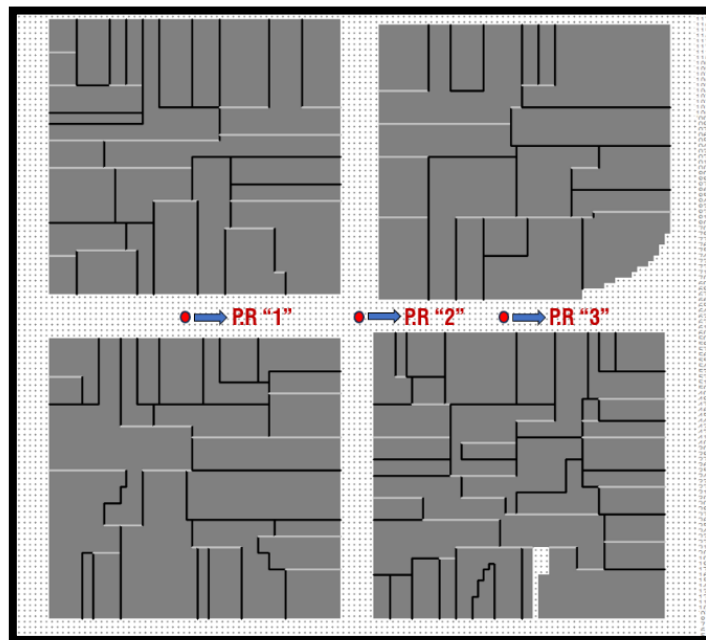


Figura 4.22. Ubicación de Receptores en paseo peatonal Matta, Antofagasta.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

4.2.3. Parámetros de configuración atmosférica utilizados en simulaciones

Para lograr una representación realista de las condiciones térmicas urbanas en el entorno modelado, se configuraron cuidadosamente los parámetros atmosféricos de entrada en el módulo ENVI-guide de ENVI-met, utilizando el apartado de "Meteorology: Simple Forcing", el cual se observa en la siguiente figura 4.15 con sus respectivas configuraciones.

Esta sección permite definir un ciclo completo de 24 horas para la temperatura del aire y la humedad relativa, elementos fundamentales para simular los flujos de energía, la acumulación térmica en superficies urbanas y la interacción entre la atmósfera y el entorno construido.

Las condiciones meteorológicas se establecieron conforme a un escenario típico de verano en la ciudad de Antofagasta, replicando un día despejado con máximos niveles de radiación solar. La elección de estas condiciones busca representar un caso de un día cálido desde el punto de vista térmico, adecuado para evaluar el impacto potencial de las estrategias de mitigación.

Los parámetros empleados fueron los siguientes:

- **Temperatura del aire (ciclo diario):**
 - Mínima: 17 °C a las 05:00 horas
 - Máxima: 28 °C a las 14:00 horas
- **Velocidad del viento:** 2,0 m/s (medida a 10 m de altura)
- **Dirección del viento:** 225° (correspondiente a viento proveniente del suroeste)
- **Rugosidad superficial:** 0,010 m (microscale roughness length)
- **Cobertura de nubes:** 0/8 en todos los niveles (condiciones de cielo completamente despejado)

La simulación se ejecutó durante un periodo continuo de 24 horas, comenzando a las 06:00 AM hora local, lo que permite evaluar con precisión el comportamiento térmico tanto en condiciones diurnas como nocturnas. La tabla de valores horarios fue ajustada manualmente para asegurar un comportamiento térmico coherente a lo largo del día, con un aumento progresivo de la temperatura y disminución de la humedad relativa en las horas centrales, y una reversión del patrón hacia la noche.

Este conjunto de condiciones garantiza una base atmosférica uniforme y controlada, adecuada para comparar distintos escenarios de intervención con infraestructura verde.

4.2.4. Configuración de especies vegetales para mitigación térmica urbana

Tras un análisis comparativo de distintas especies vegetales adaptadas a sistemas de techos verdes extensivos (desarrollado previamente en el Marco Teórico) se determinó que el género *Sedum* ofrece el mejor rendimiento para condiciones climáticas áridas como las de Antofagasta. Dentro de este grupo, se seleccionó específicamente la especie *Sedum sediforme*, ampliamente reconocida por su capacidad de adaptación a entornos con baja disponibilidad hídrica, su crecimiento compacto y su eficiente desempeño en captación de humedad atmosférica.

Entre las razones técnicas que justifican su elección destacan:

- Requiere un espesor de sustrato reducido, entre 6 y 10 cm, lo que la hace apta para cubiertas extensivas de baja carga estructural.
- Presenta alta tolerancia al calor y a la radiación solar directa, lo que la convierte en una opción robusta para condiciones extremas.
- Su demanda hídrica es mínima una vez establecida, permitiendo su implementación sin necesidad de riego permanente.
- Posee un índice de área foliar (LAI) ideal para generar sombra superficial, disminuyendo el calentamiento directo del sustrato.
- Forma una cobertura vegetal densa y uniforme, lo que contribuye significativamente a la reducción de la temperatura superficial.

Para lograr una simulación más realista y específica, se optó por no utilizar la vegetación genérica incluida en la base de datos predeterminada de ENVI-met. Aunque el software cuenta con un perfil vegetal genérico asociado al género *Sedum*, este no representa con exactitud el comportamiento térmico del *Sedum sediforme*. Por esta razón, se construyó un perfil vegetal personalizado dentro del modelo, definiendo parámetros clave como albedo, altura máxima, índice LAI, resistencia estomática, profundidad radicular y tolerancias climáticas, a partir de información técnica especializada y antecedentes de uso en climas áridos.

A continuación, en la siguiente tabla 4.4, se presentan los parámetros utilizados para la configuración de esta especie en ENVI-met:

Tabla 4.4: Configuración de especie *Sedum Sediforme*

Parámetro	Valor asignado	Justificación
Tipo de planta	Low vegetation	Corresponde a cobertura extensiva, bajo porte (<i>Sedum</i> sp.).
Altura máxima	0.15 m	Basado en crecimiento típico de <i>Sedum sediforme</i> .
Leaf Area Index (LAI)	1.2 - 1.5	Valor promedio recomendado para especies tapizantes de bajo porte.
Albedo (reflectancia)	0.23	Valor moderado para vegetación suculenta, acorde a su pigmentación.

Fracción cubierta vegetal (fc)	0.9	Alta cobertura del suelo. Sedum forma alfombra densa.
Resistencia estomática mínima	250 s/m	Adaptado al estrés hídrico típico de zonas áridas como Antofagasta.
Profundidad radicular (root)	0.15 m	Cubiertas extensivas de baja exigencia.
C3/C4	C3	Confirmado para especies del género Sedum.
Tolerancia al calor	Alta	Sedum sediforme es óptima para zonas áridas y soleadas.
Tolerancia a sequía	Muy alta	Fundamental para condiciones antofagastinas sin riego adicional.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

4.2.5. Composición estructural de cubiertas y fachadas verdes

Para efectos de este estudio, se optó por la implementación de cubiertas verdes extensivas, decisión fundamentada en las condiciones de aridez extrema que caracterizan a la ciudad de Antofagasta. Estas soluciones son compatibles con climas desérticos donde el recurso hídrico es escaso y la vegetación debe presentar alta resistencia al estrés hídrico. La presente configuración también responde al tipo de vegetación previamente seleccionado (Sedum sediforme) el cual, por sus requerimientos mínimos de mantenimiento, se adapta eficazmente a este tipo de sistema.

Además, desde una perspectiva constructiva, las cubiertas extensivas presentan una ventaja significativa: su bajo peso estructural permite en muchos casos su instalación sin necesidad de refuerzos adicionales en la techumbre existente. Esto representa una mejora sustancial en términos de factibilidad técnica. En base a la configuración utilizada (con un sustrato de 6 cm y vegetación de bajo porte como el Sedum sediforme), se estima una carga adicional total inferior a 100–120 kg/m² en condiciones de saturación, valor ampliamente manejable por estructuras típicas de losas de hormigón armado en edificaciones urbanas, según estándares internacionales y referencias revisadas.

La evaluación detallada de la viabilidad técnico-económica de esta solución será presentada en el desarrollo del Objetivo Específico N°3, donde se analizarán los costos de implementación, mantenimiento y retorno social de la inversión.

En términos de configuración, el sistema constructivo modelado en ENVI-met está compuesto por tres capas principales, según se resume en la figura 4.23:

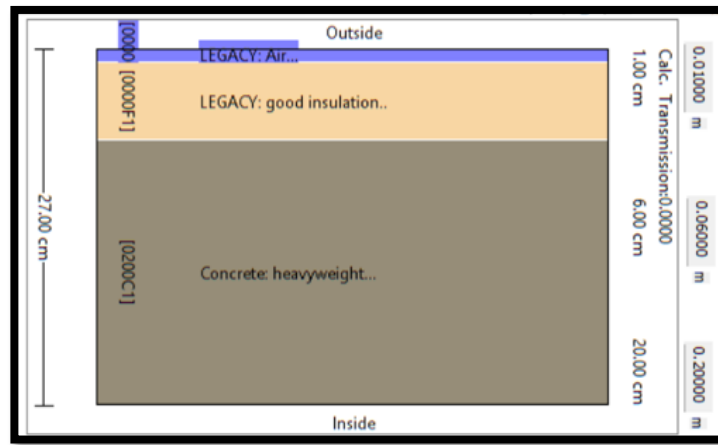


Figura 4.23. configuración del sistema constructivo en el Software.

Fuente: (Elaboración propia, ENVI_met ,2025).

- **Capa vegetal (1 cm) ("LEGACY: air"):** Representa la vegetación viva de manera simbólica dentro del modelo. Su función es servir como soporte para asignar el perfil vegetal personalizado de *Sedum sediforme*, con sus parámetros específicos de comportamiento fisiológico y espesor real definido en el módulo correspondiente de vegetación en ENVI-met.
- **Sustrato (6 cm) ("LEGACY: good insulation") :** Esta capa se configura utilizando un material con propiedades aislantes ("LEGACY: good insulation") que permite replicar el comportamiento térmico del sustrato real en las simulaciones, sin alterar la respuesta energética del sistema.
- **Base estructural (20 cm):** Representa la losa o muro de hormigón armado típico de las edificaciones urbanas del centro de Antofagasta, utilizando el material "Concrete Wall (heavy)" de la biblioteca de ENVI-met.

Aunque esta configuración corresponde originalmente a una cubierta horizontal, en el presente estudio se ha adoptado también para representar fachadas verdes verticales, con el objetivo de evaluar de forma coherente el desempeño térmico del sistema vegetal en distintas orientaciones. Esta estrategia metodológica ha sido aplicada en estudios previos, donde se busca mantener una misma composición de capas para facilitar la comparación de resultados y centrar el análisis en la influencia del material y su efecto mitigador, más allá del plano de aplicación.

4.2.6. Resultados de simulaciones

En esta sección se presentan los resultados extraídos para cada Punto de Referencia (P.R) definido, correspondientes a las distintas combinaciones de escenario y altura de análisis. Para cada uno de los tres P.R. se consideraron tres niveles de altura:

- **0,2 m:** Representa el comportamiento térmico a nivel del suelo, capturando la temperatura percibida directamente por el peatón en la superficie urbana.
- **1,8 m:** Corresponde a la altura media de percepción térmica humana en condiciones peatonales, permitiendo analizar el confort térmico en escala humana.
- **23 m:** Equivale a una cota sobre las cubiertas de las edificaciones, útil para analizar gradientes térmicos verticales y las diferencias de temperatura por sobre las superficies construidas.

Esta estratificación permite una evaluación integral del microclima urbano, considerando su impacto tanto a nivel de calle como en altura.

La extracción de datos se realizó durante 11 horas continuas del día (entre las 10:00 y 20:00 hrs), periodo que representa el rango de mayor actividad urbana y presencia peatonal en los paseos estudiados. Para cada combinación (P.R. y altura), se presentan los seis escenarios simulados, incluyendo el caso base y las cinco intervenciones con infraestructura verde.

Cada resultado se presenta mediante una tabla con los valores de temperatura potencial del aire por hora y dos gráficos asociados: uno que compara directamente los perfiles térmicos horarios entre escenarios, y otro que representa la magnitud de la diferencia térmica respecto al caso base. Esta estructura se repite en los 18 conjuntos de resultados (3 P.R. \times 3 alturas \times 2 modelos urbanos), permitiendo observar con claridad las tendencias de reducción térmica en función del tipo, intensidad y localización de la intervención aplicada

a) Resultados Paseo Arturo Prat (0.2m):

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	24,29	24,18	0,11	24,08	0,21	24,11	0,18	24,00	0,28	23,79	0,50
11:00:00	25,89	25,79	0,11	25,69	0,20	25,63	0,26	25,48	0,42	25,27	0,63
12:00:00	27,39	27,29	0,10	27,19	0,19	27,03	0,35	26,83	0,56	26,63	0,76
13:00:00	28,65	28,57	0,08	28,48	0,17	28,22	0,43	27,98	0,67	27,79	0,86
14:00:00	29,59	29,51	0,08	29,44	0,15	29,20	0,39	28,98	0,61	28,82	0,77
15:00:00	29,70	29,63	0,07	29,55	0,15	29,35	0,35	29,15	0,56	28,99	0,71
16:00:00	29,21	29,11	0,10	29,01	0,21	28,90	0,32	28,71	0,50	28,50	0,71
17:00:00	28,32	28,14	0,18	27,99	0,33	28,02	0,30	27,85	0,47	27,52	0,80
18:00:00	27,23	27,00	0,23	26,81	0,42	26,94	0,29	26,78	0,45	26,36	0,87
19:00:00	25,98	25,75	0,22	25,55	0,42	25,70	0,28	25,55	0,43	25,13	0,85
20:00:00	24,99	24,75	0,23	24,56	0,42	24,71	0,27	24,57	0,41	24,16	0,83

Fuente: (elaboración propia, 2025).

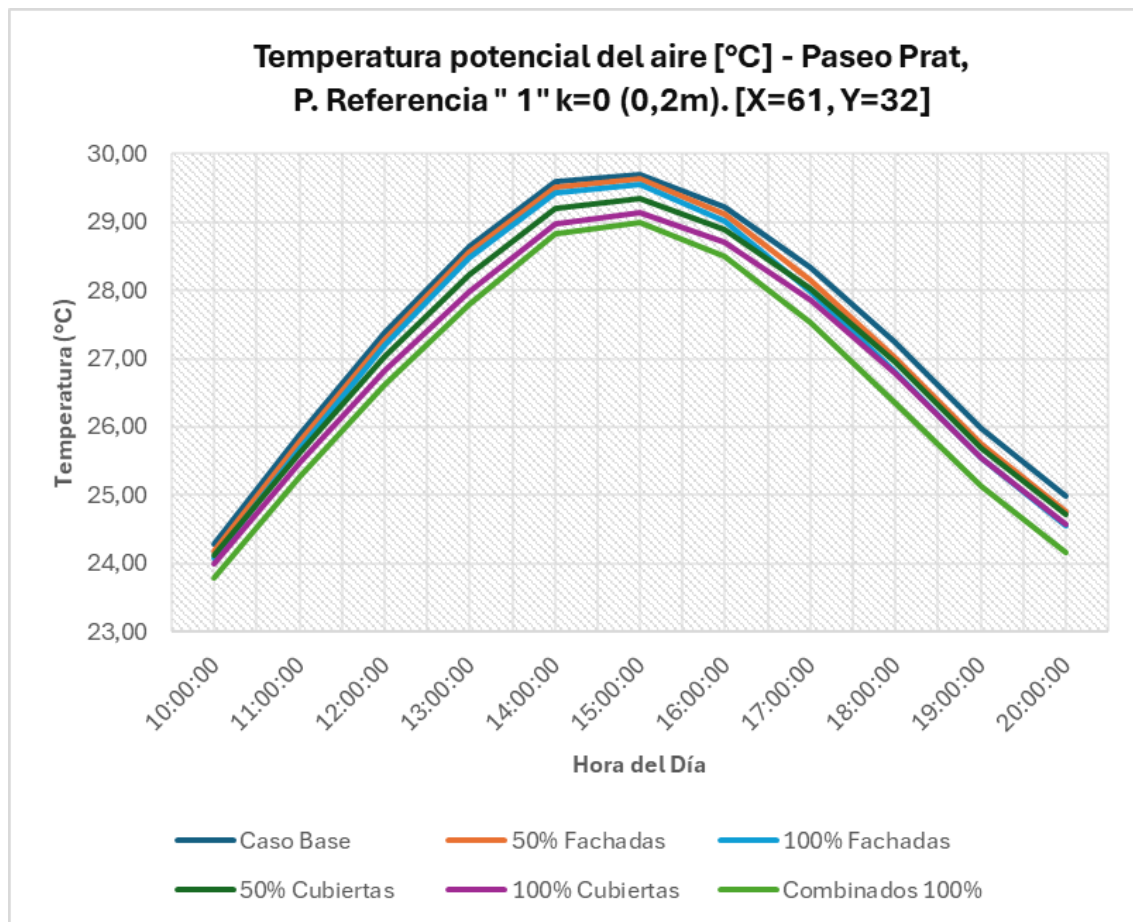


Figura 4.24: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

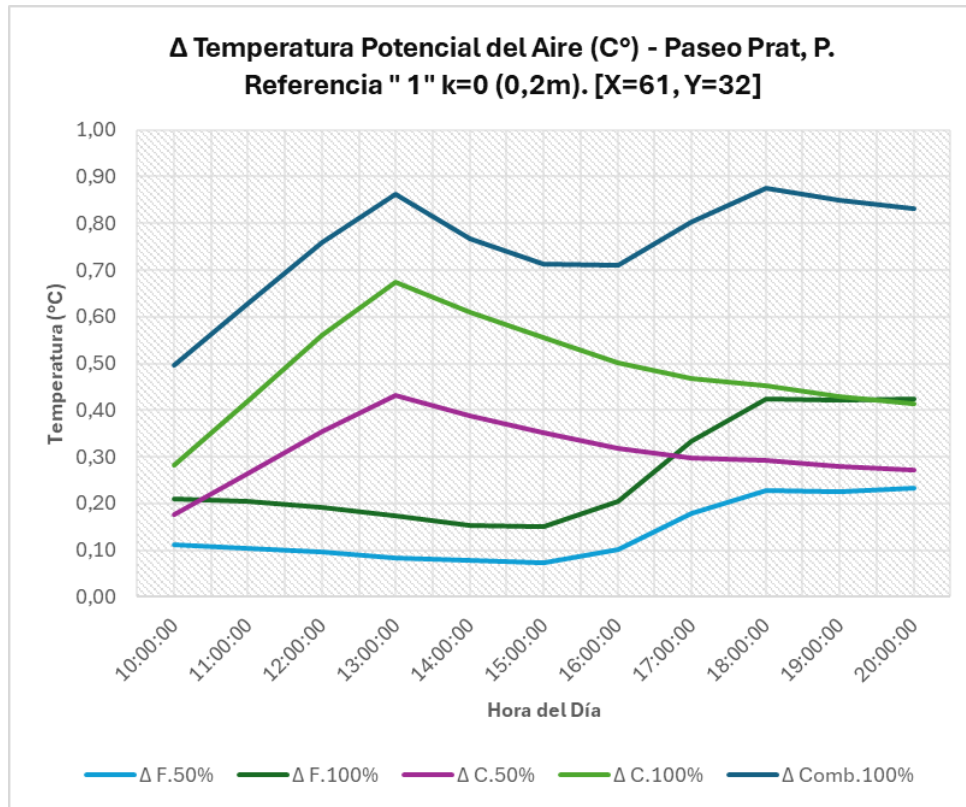


Figura 4.25: diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el Punto de Referencia 1 (PR1) del Paseo Prat, a 0.2 m de altura, la temperatura del aire alcanzó aproximadamente 29.7 °C a las 15:00 hrs en el escenario base, siendo uno de los valores más moderados de todo el paseo.

Las intervenciones con infraestructura verde generaron reducciones térmicas pequeñas pero constantes a lo largo del día. A las 14:00 hrs, la fachada verde al 50 % logró reducir la temperatura en unos 0.08 °C, mientras que las cubiertas verdes al 50 % tuvieron un efecto más notorio, con una disminución de 0.39 °C.

Estos efectos se intensificaron con coberturas completas, y alcanzaron su punto máximo con la solución combinada de fachadas y cubiertas verdes: a las 13:00 hrs, la temperatura del aire fue 0.86 °C más baja que en el caso base, y durante la tarde se mantuvo una diferencia entre 0.8 y 0.9 °C, como se observó a las 20:00 hrs con una reducción de 0.83 °C.

Tabla 4.6 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 2" k=0 (0,2m). [X=61, Y=60].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	24,68	24,58	0,10	24,43	0,25	24,65	0,02	24,57	0,11	24,32	0,36
11:00:00	27,32	27,26	0,07	27,11	0,21	27,29	0,04	27,14	0,18	26,92	0,40
12:00:00	30,16	30,11	0,05	29,98	0,18	30,10	0,06	29,90	0,26	29,70	0,46
13:00:00	31,95	31,89	0,06	31,81	0,14	31,88	0,07	31,63	0,32	31,48	0,47
14:00:00	32,91	32,87	0,04	32,79	0,13	32,84	0,07	32,61	0,31	32,47	0,45
15:00:00	33,21	33,16	0,05	33,03	0,18	33,14	0,07	32,91	0,30	32,73	0,48
16:00:00	32,51	32,42	0,09	32,23	0,29	32,45	0,07	32,24	0,28	31,95	0,57
17:00:00	30,83	30,68	0,15	30,36	0,47	30,77	0,06	30,59	0,24	30,12	0,71
18:00:00	29,05	28,85	0,20	28,47	0,59	29,00	0,05	28,84	0,22	28,25	0,80
19:00:00	27,07	26,88	0,19	26,51	0,56	27,03	0,05	26,88	0,20	26,31	0,77
20:00:00	25,53	25,36	0,17	25,00	0,53	25,49	0,04	25,35	0,18	24,81	0,72

Fuente: (elaboración propia, 2025).

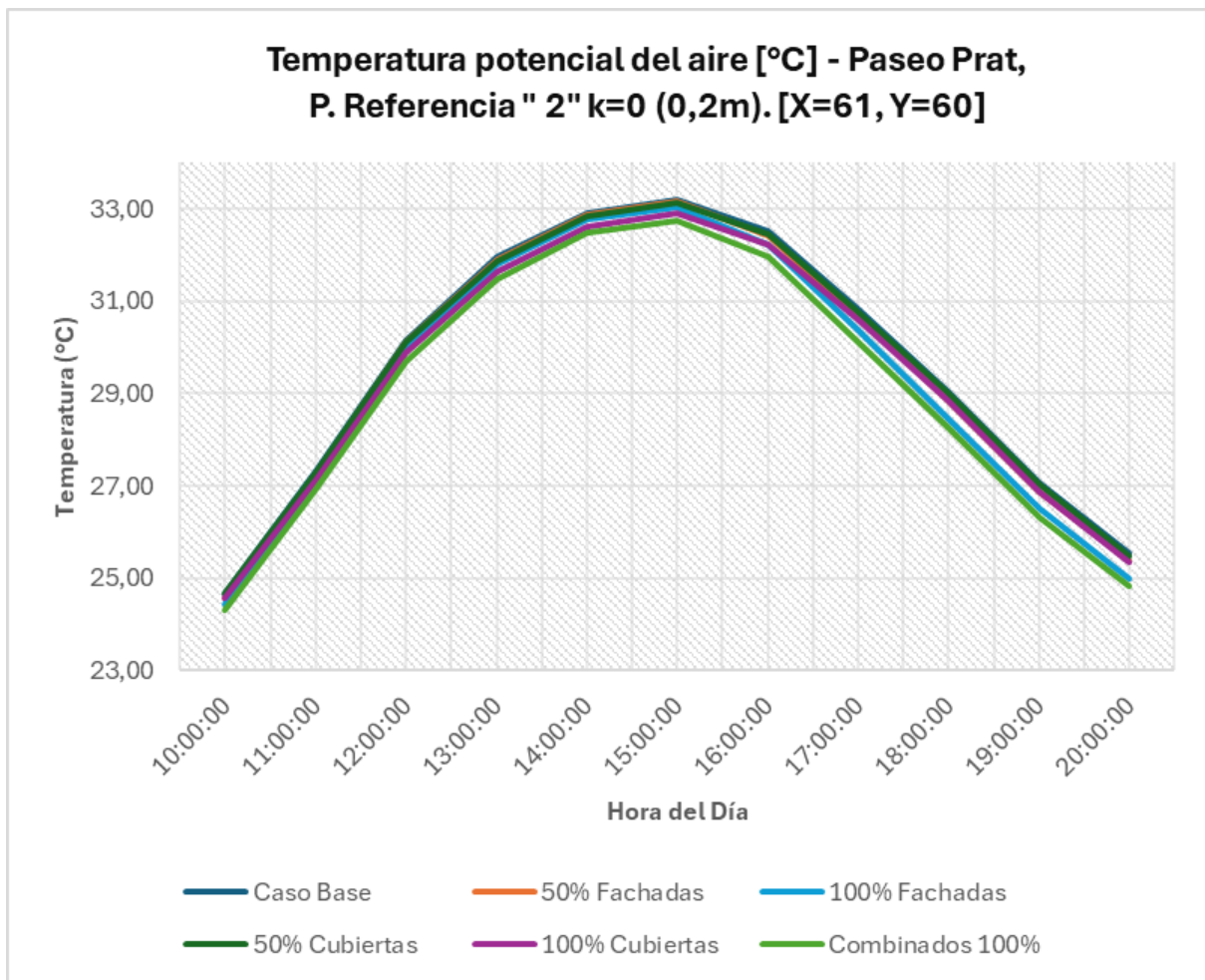


Figura 4.26: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

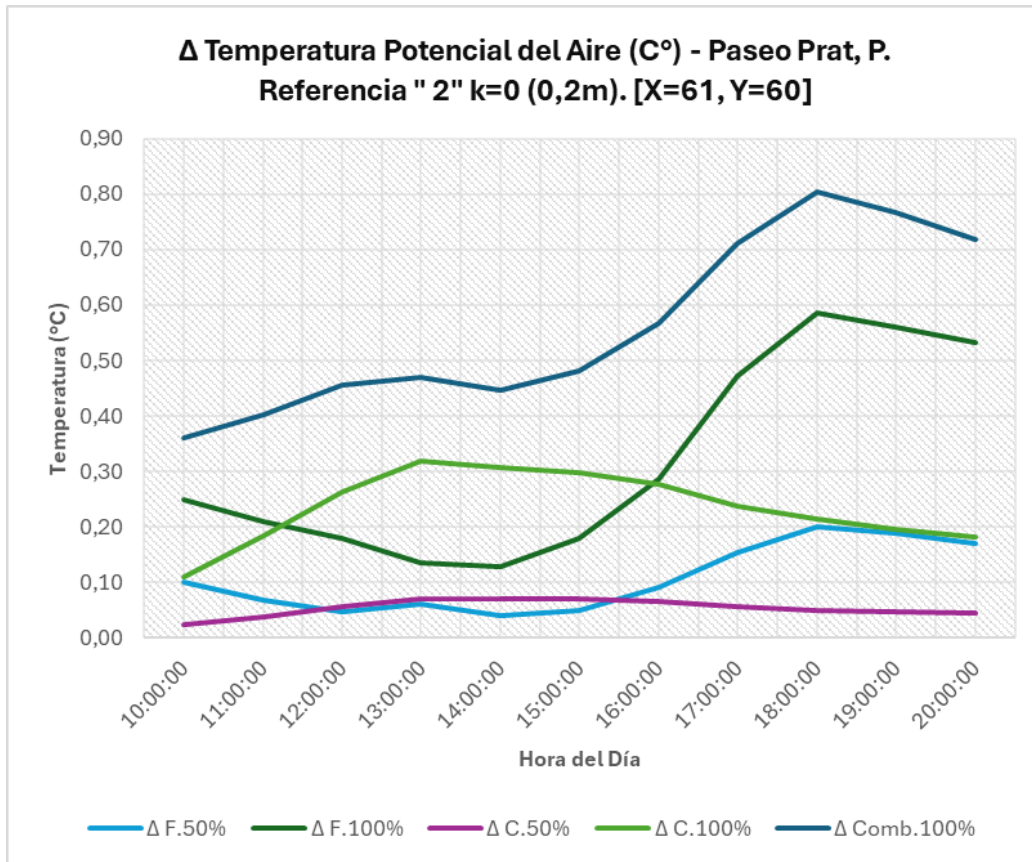


Figura 4.27: Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

El punto PR2, a nivel del suelo (0.2m), fue el que registró las temperaturas más altas en todo el Paseo Prat, alcanzando un máximo de unos 33.2 °C justo al mediodía. Esta cifra fue cerca de 3 °C más alta que en otros puntos del paseo a esa misma altura. Esto sugiere que se trata de un tramo con poca ventilación y alta acumulación de calor, probablemente por su ubicación en una intersección con tránsito vehicular, donde el asfalto cercano también contribuye al sobrecalentamiento por su capacidad para retener calor.

Las soluciones de infraestructura verde ayudaron a mitigar algo la temperatura, aunque al mediodía el efecto fue limitado (no más de medio grado menos). Sin embargo, hacia el final del día se notaron mayores diferencias: para las 6 de la tarde, la fachada completamente cubierta de vegetación logró bajar la temperatura en unos 0.6 °C, y la combinación de todas las soluciones alcanzó una reducción de hasta 0.8 °C. En cuanto a la radiación solar, el impacto fue más evidente en la tarde, cuando las fachadas ya no recibían sol directo, pero aun así ayudaron a controlar la reemisión del calor acumulado.

Tabla 4.7 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 3" k=0 (0,2m). [X=61, Y=93].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	24,19	24,09	0,10	23,80	0,39	24,34	-0,14	23,93	0,27	23,54	0,66
11:00:00	25,71	25,61	0,09	25,32	0,38	25,55	0,16	25,30	0,41	24,91	0,80
12:00:00	27,08	26,99	0,10	26,71	0,37	26,85	0,23	26,51	0,57	26,12	0,96
13:00:00	28,29	28,20	0,09	27,95	0,34	28,00	0,29	27,59	0,70	27,22	1,07
14:00:00	29,13	29,06	0,07	28,84	0,29	28,88	0,25	28,51	0,62	28,20	0,93
15:00:00	28,99	28,92	0,08	28,67	0,33	28,78	0,21	28,45	0,55	28,11	0,88
16:00:00	28,40	28,29	0,11	27,98	0,43	28,22	0,19	27,91	0,49	27,48	0,93
17:00:00	27,71	27,56	0,15	27,17	0,54	27,53	0,18	27,26	0,45	26,72	0,99
18:00:00	26,86	26,67	0,18	26,24	0,62	26,68	0,18	26,43	0,43	25,81	1,05
19:00:00	25,87	25,65	0,21	25,20	0,67	25,69	0,18	25,47	0,40	24,80	1,07
20:00:00	24,98	24,73	0,25	24,24	0,74	24,80	0,18	24,60	0,39	23,87	1,12

Fuente: (elaboración propia, 2025).

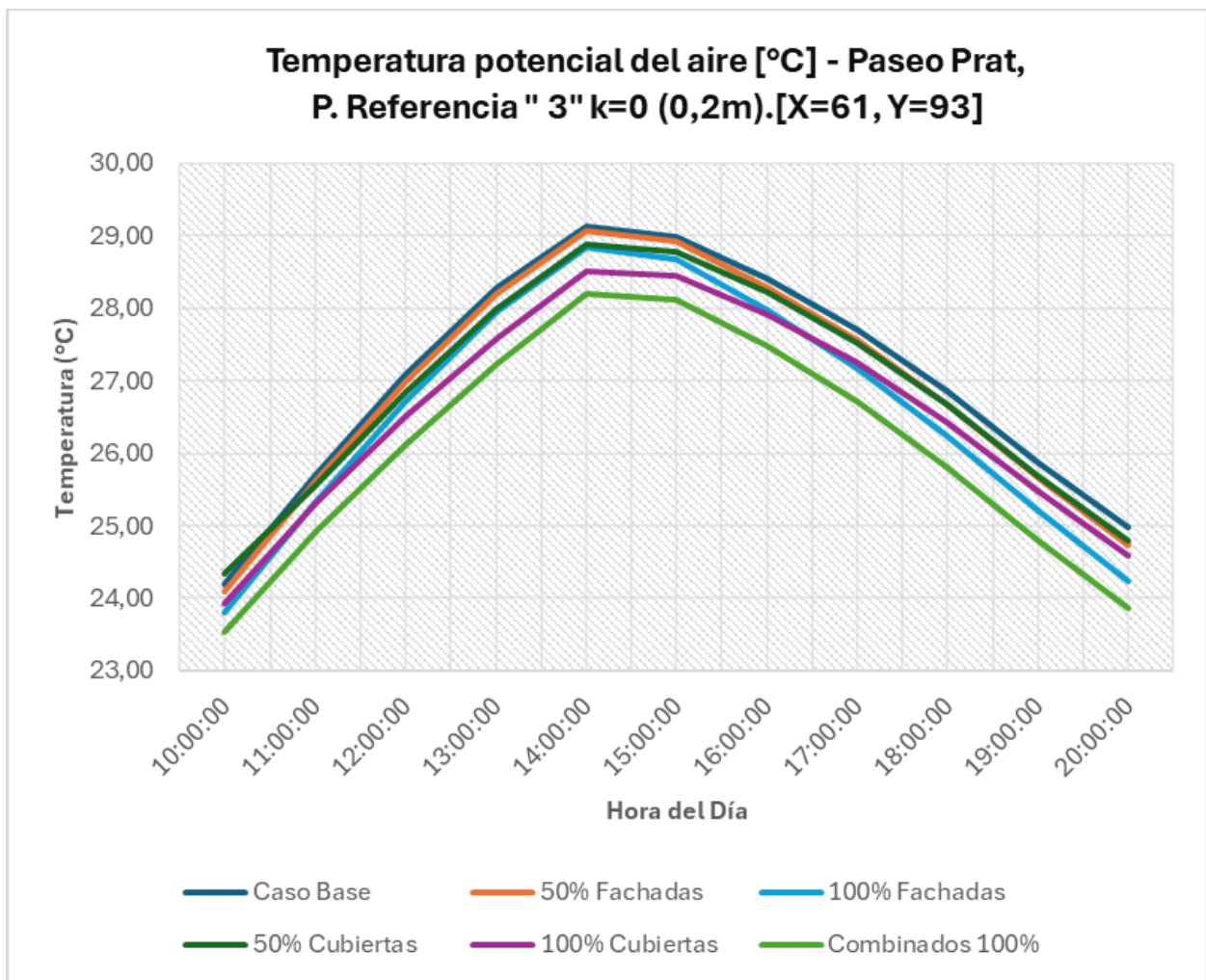


Figura 4.28. Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

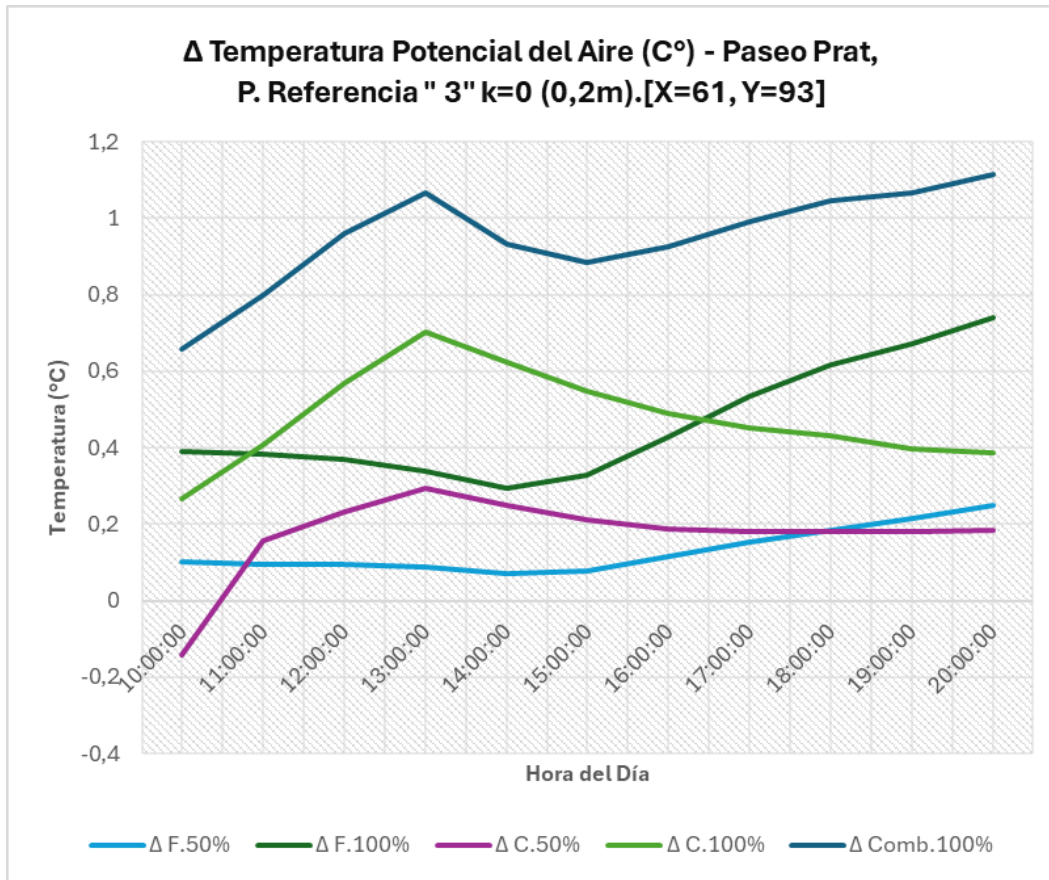


Figura 4.29. Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

El punto PR3, ubicado en el extremo norte del Paseo Prat, fue el que registró la temperatura base más baja del recorrido, con unos 29.2 °C. Esto sugiere que en esa zona hay mejor ventilación, posiblemente por la cercanía al mar o por las sombras que proyectan los edificios alrededor.

En este tramo, las soluciones verdes fueron particularmente efectivas. La combinación de techos y muros con vegetación logró una reducción de hasta 1.12 °C a las 8 de la noche, y desde la 1 de la tarde ya se notaba una baja cercana a 1.07 °C. Durante el mediodía, cuando el sol llega de manera más directa en las cubiertas, estas aportaron buena parte de esa reducción (entre 0.6 y 0.7 °C con cobertura completa). Por la tarde, las fachadas verdes tomaron el relevo y por sí solas ayudaron a bajar la temperatura hasta 0.54 °C.

Hubo una pequeña excepción al inicio del día (a las 10:00 hrs), cuando el escenario con cubiertas al 50% mostró un leve aumento de temperatura (+0.14 °C). Esto se puede explicar por el ángulo bajo del sol a esa hora y por una activación limitada del efecto evaporativo.

b) Resultados Paseo Arturo Prat (1.8m):

Tabla 4.8: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 1" k=3 (1,8m). [X=61, Y=32].											
Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	24,24	24,13	0,11	24,03	0,21	24,06	0,18	23,95	0,28	23,74	0,49
11:00:00	25,79	25,69	0,10	25,59	0,20	25,53	0,27	25,37	0,42	25,17	0,63
12:00:00	27,26	27,16	0,10	27,07	0,19	26,90	0,36	26,69	0,57	26,49	0,76
13:00:00	28,51	28,43	0,08	28,34	0,17	28,07	0,44	27,83	0,68	27,64	0,87
14:00:00	29,45	29,37	0,08	29,29	0,15	29,05	0,39	28,83	0,62	28,67	0,78
15:00:00	29,56	29,48	0,07	29,41	0,15	29,20	0,36	28,99	0,56	28,84	0,72
16:00:00	29,09	28,99	0,10	28,89	0,20	28,77	0,32	28,58	0,51	28,38	0,71
17:00:00	28,26	28,09	0,17	27,93	0,33	27,96	0,30	27,79	0,47	27,46	0,80
18:00:00	27,18	26,96	0,22	26,77	0,41	26,89	0,29	26,73	0,45	26,32	0,87
19:00:00	25,94	25,72	0,22	25,53	0,41	25,66	0,28	25,51	0,43	25,09	0,84
20:00:00	24,96	24,73	0,23	24,54	0,42	24,69	0,27	24,54	0,42	24,14	0,82

Fuente: (elaboración propia, 2025).

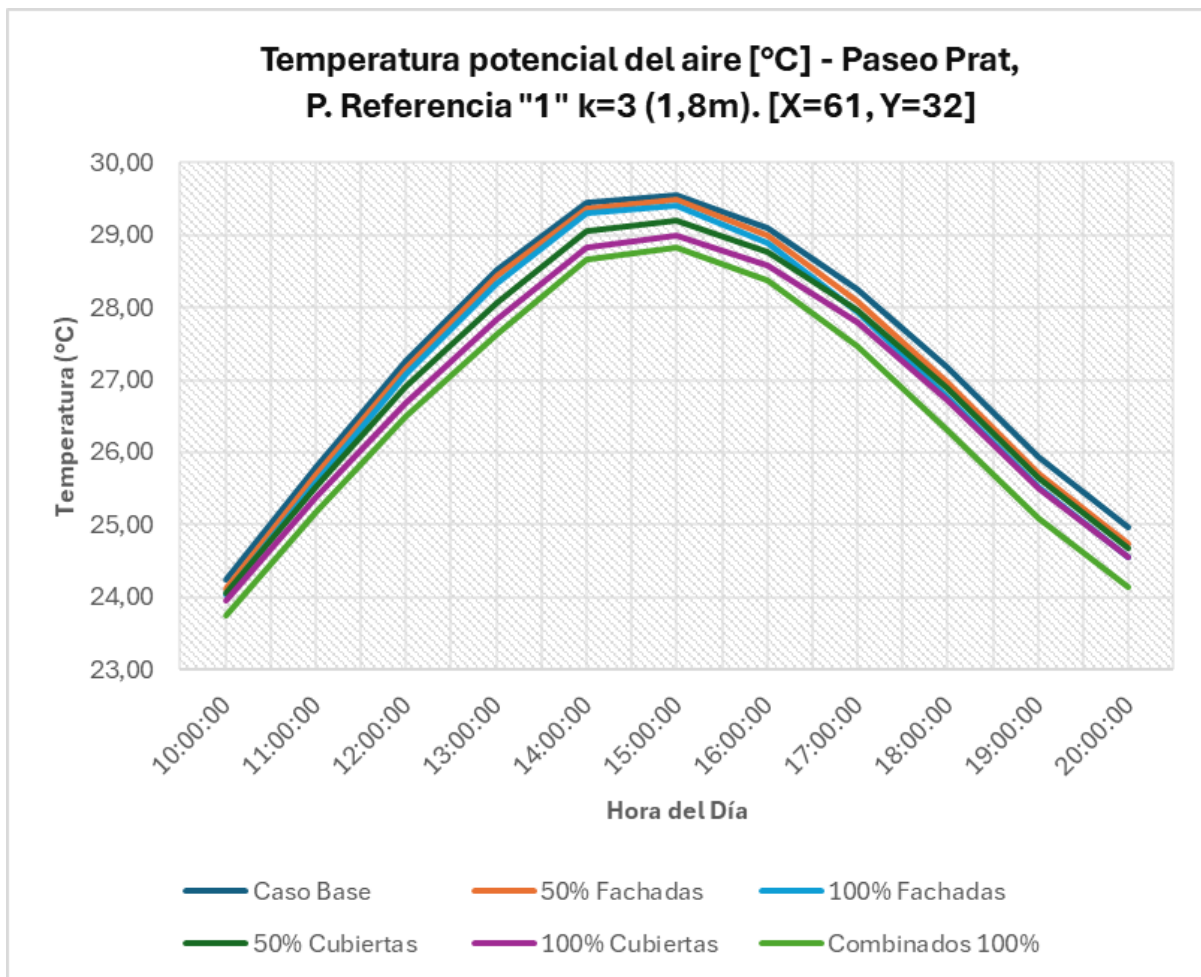


Figura 4.30: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

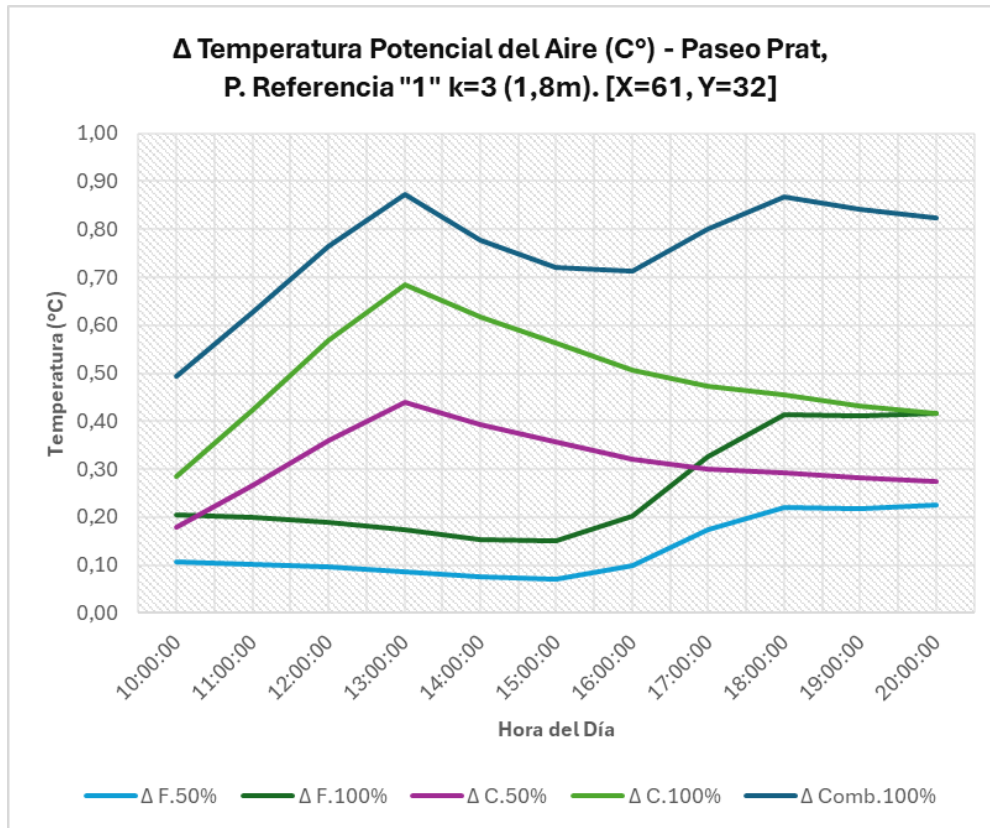


Figura 4.31: Gráficos Temperatura del aire y diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A la altura de la cabeza de una persona (1.8 m), el punto PR1 del Paseo Prat presentó una disminución gradual de la temperatura a lo largo del día gracias a la infraestructura verde, siendo más evidente durante la tarde. El escenario que combinó diferentes soluciones logró su mayor efecto a las 20:00 hrs, con una baja de alrededor de 0.84 °C, aunque ya a las 14:00 se notaba un descenso de cerca de 0.78 °C en comparación con la situación base.

Las cubiertas verdes fueron especialmente efectivas al mediodía, mientras que las fachadas con vegetación, aunque con un impacto un poco menor, ayudaron a reducir la radiación directa sobre los muros que dan al poniente. La orientación norte-sur del paseo hace que por la tarde el sol pegue de frente en estas fachadas.

A pesar de que es una zona bastante expuesta, la ventilación cruzada proveniente del oeste sirvió para dispersar el calor acumulado. En conjunto, estas soluciones verdes resultaron más eficaces por la tarde, ayudando a bajar el estrés térmico a una altura perceptible por los usuarios del paseo peatonal

Tabla 4.9: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "2" k=3 (1,8m). [X=61, Y=60].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	24,69	24,60	0,09	24,45	0,24	24,67	0,02	24,58	0,11	24,34	0,35
11:00:00	27,21	27,14	0,06	27,00	0,20	27,17	0,04	27,03	0,18	26,81	0,39
12:00:00	29,57	29,53	0,04	29,39	0,18	29,52	0,05	29,32	0,25	29,13	0,44
13:00:00	31,30	31,24	0,06	31,16	0,14	31,23	0,07	30,99	0,31	30,84	0,46
14:00:00	32,26	32,21	0,04	32,13	0,13	32,19	0,07	31,96	0,29	31,82	0,43
15:00:00	32,51	32,45	0,05	32,33	0,18	32,44	0,06	32,23	0,28	32,04	0,46
16:00:00	31,87	31,78	0,09	31,59	0,28	31,81	0,06	31,61	0,26	31,33	0,54
17:00:00	30,54	30,40	0,14	30,08	0,46	30,49	0,05	30,31	0,23	29,85	0,69
18:00:00	28,84	28,66	0,18	28,28	0,56	28,80	0,05	28,64	0,21	28,07	0,78
19:00:00	26,92	26,75	0,17	26,38	0,54	26,88	0,04	26,73	0,19	26,18	0,74
20:00:00	25,44	25,29	0,15	24,93	0,51	25,40	0,04	25,27	0,18	24,75	0,69

Fuente: (elaboración propia, 2025).

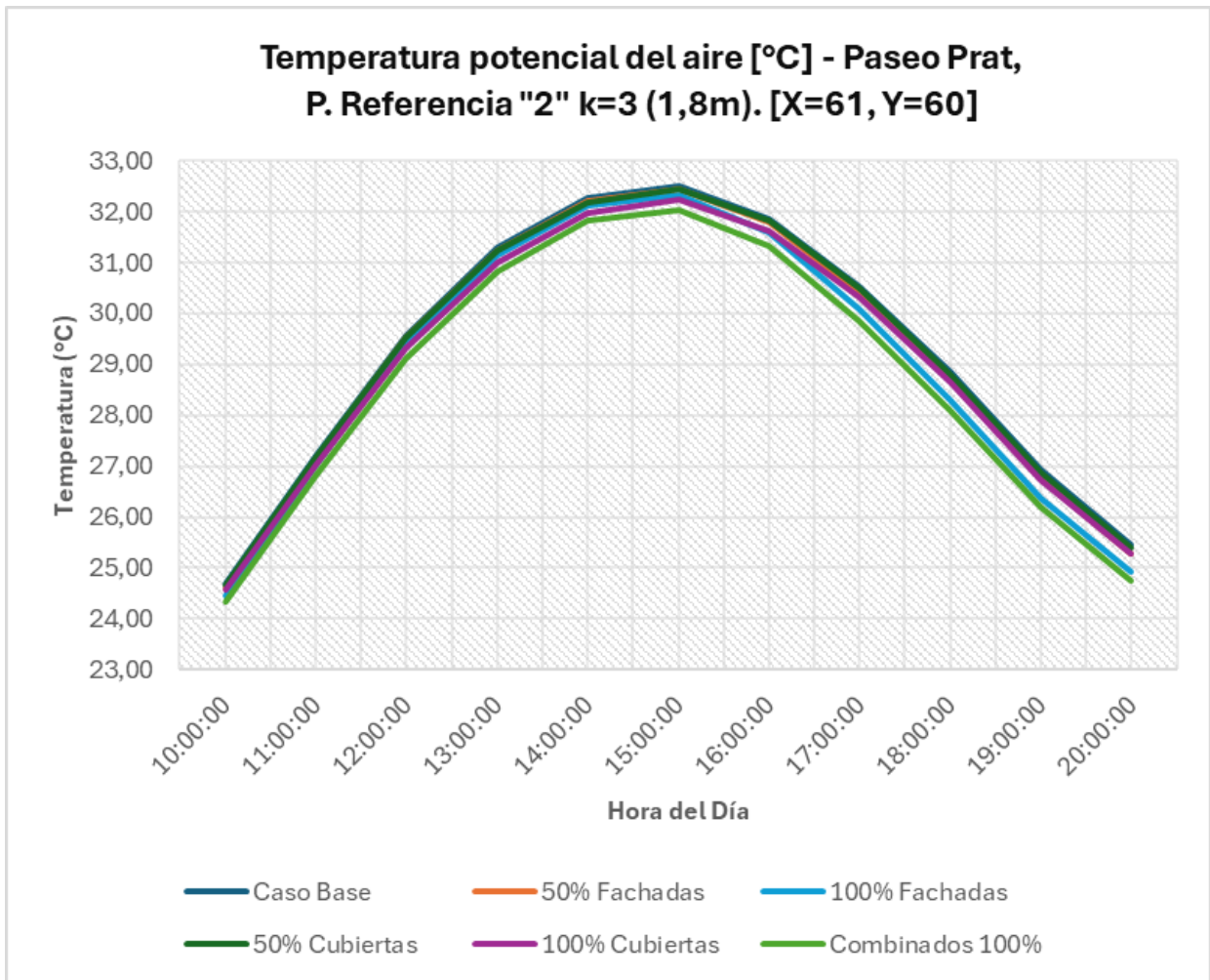


Figura 4.32: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

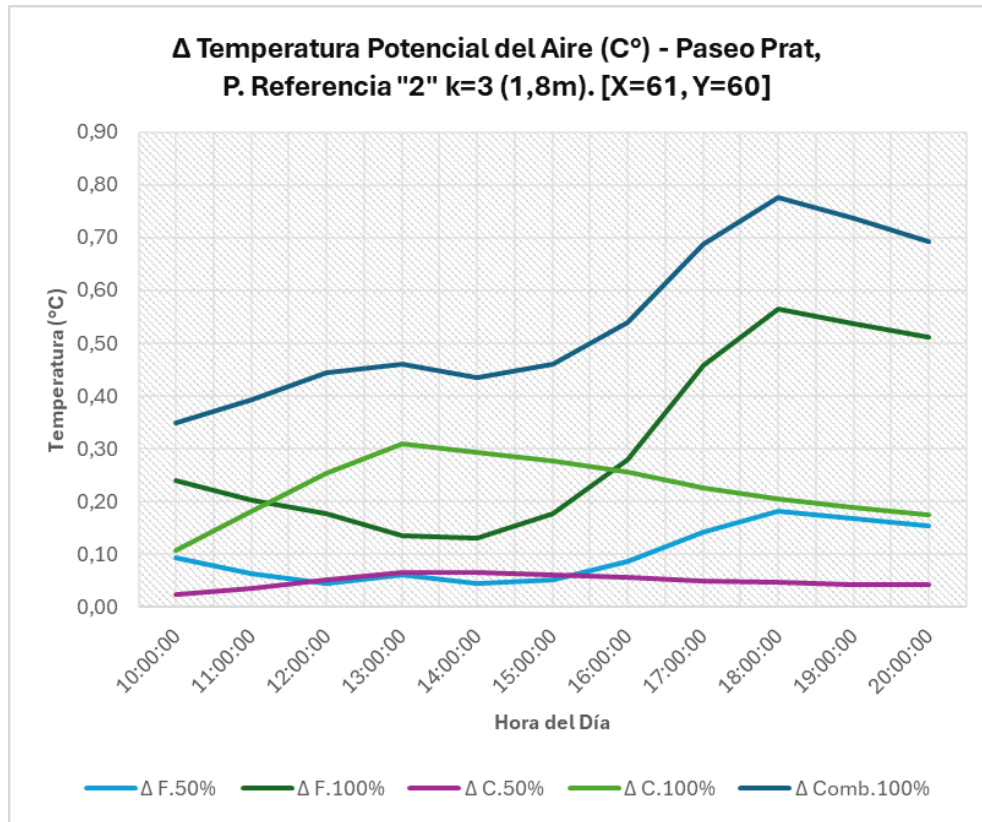


Figura 4.33: Gráficos térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A la altura de una persona (1.8 m), el punto PR2 marcó temperaturas con un máximo cercano a los 32.5 °C a las 3 de la tarde. Este comportamiento confirma que ahí se forma una especie de isla de calor debido a su temperatura más alta en comparación con los otros PR al mismo nivel en el mismo tramo, probablemente por la falta de ventilación y la fuerte exposición al sol en ese tramo más cerrado del paseo.

Durante las horas de más calor, las soluciones con vegetación ayudaron, aunque de forma moderada: tanto las fachadas como las azoteas verdes al 100% lograron reducir la temperatura del aire entre 0.2 y 0.3 °C. Ya en la tarde, el efecto fue más notorio. Las fachadas vegetadas, por ejemplo, llegaron a bajar la temperatura en unos 0.5 °C a las 5 de la tarde, al reducir la reemisión de calor de los muros que se habían recalentado.

Las cubiertas verdes, aunque tuvieron un impacto menor por sí solas, ayudaron a reforzar el efecto en el escenario combinado, que alcanzó su mayor eficacia a las 6 de la tarde con una reducción de cerca de 0.78 °C en comparación con el caso sin vegetación.

Tabla 4.10 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 3" k=3 (1,8m). [X=61, Y=93].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	24,17	24,07	0,10	23,78	0,39	24,30	-0,13	23,90	0,27	23,51	0,65
11:00:00	25,64	25,55	0,09	25,26	0,38	25,48	0,16	25,23	0,41	24,84	0,80
12:00:00	26,99	26,90	0,10	26,63	0,37	26,76	0,23	26,42	0,57	26,03	0,96
13:00:00	28,19	28,11	0,09	27,86	0,34	27,90	0,30	27,49	0,71	27,12	1,07
14:00:00	29,03	28,96	0,07	28,74	0,29	28,78	0,25	28,41	0,63	28,10	0,94
15:00:00	28,94	28,87	0,08	28,62	0,33	28,73	0,21	28,40	0,55	28,06	0,88
16:00:00	28,37	28,26	0,11	27,95	0,43	28,18	0,19	27,88	0,49	27,45	0,92
17:00:00	27,68	27,53	0,15	27,15	0,53	27,50	0,18	27,23	0,45	26,70	0,99
18:00:00	26,83	26,65	0,18	26,22	0,61	26,65	0,18	26,40	0,43	25,79	1,04
19:00:00	25,84	25,63	0,21	25,18	0,67	25,66	0,18	25,44	0,40	24,78	1,06
20:00:00	24,96	24,71	0,25	24,23	0,73	24,78	0,18	24,57	0,39	23,85	1,11

Fuente: (elaboración propia, 2025).

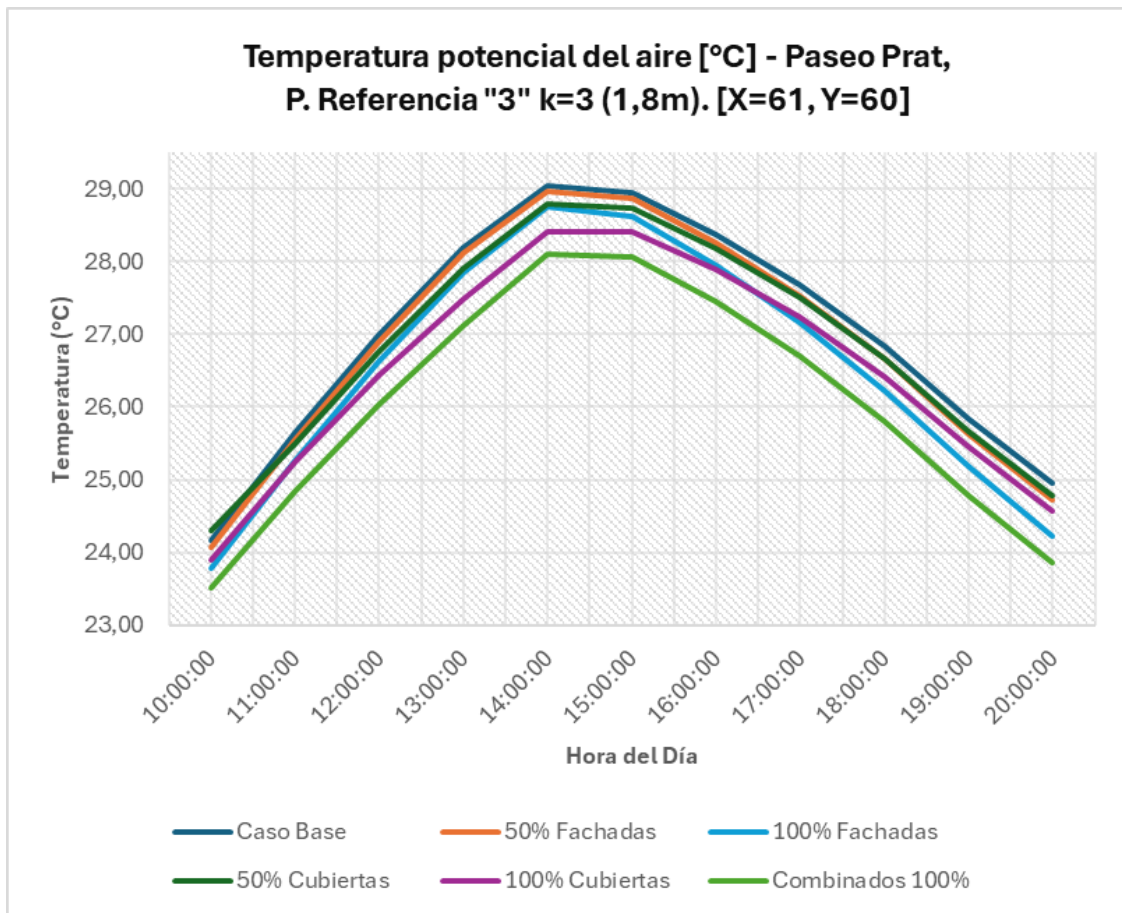


Figura 4.34: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

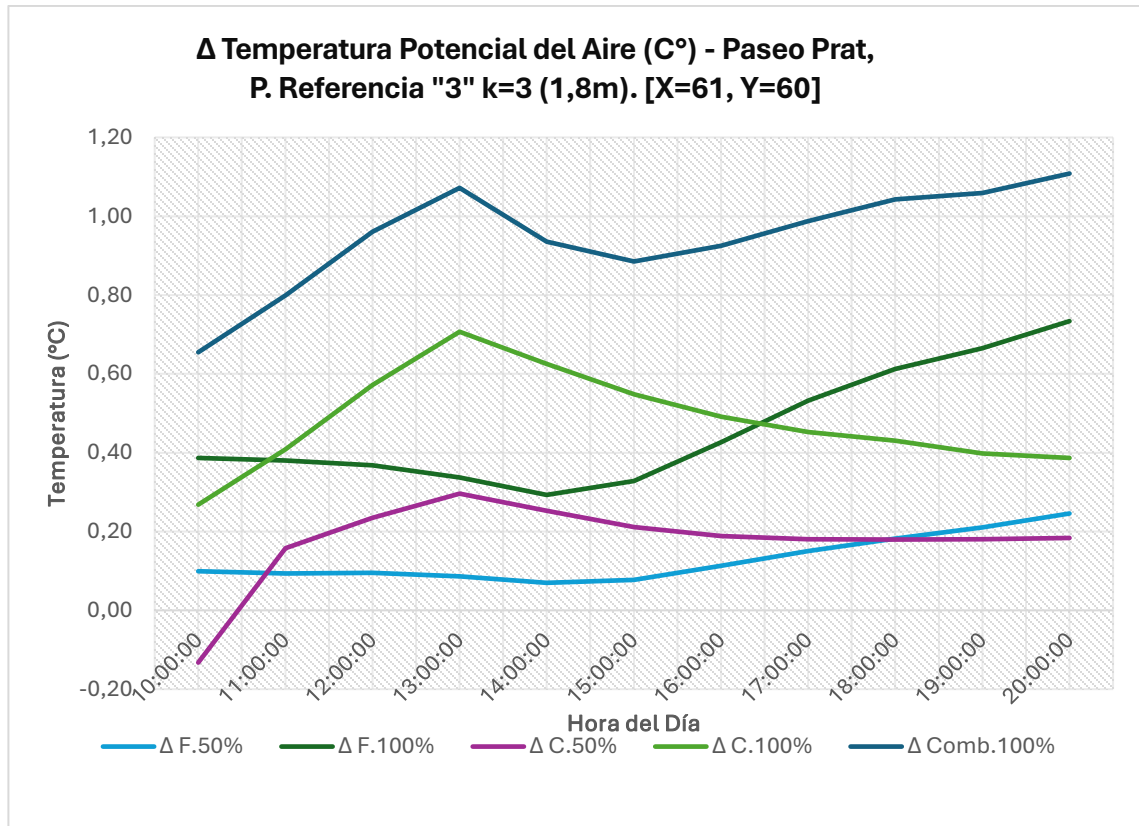


Figura 4.35: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el punto PR3 del Paseo Prat, a una altura de 1.8 m, se registraron las mayores reducciones de temperatura de todo el modelo. La situación base mostró un pico relativamente moderado, alrededor de 29.1 °C.

A la 1 de la tarde, la combinación de ambas estrategias logró una baja de unos 1.07 °C, siendo el descenso más marcado a esa hora. Más adelante, a las 5 de la tarde, las fachadas verdes por sí solas lograron una reducción de cerca de 1.0 °C, incluso superando al efecto combinado en ese momento (que fue de apenas 0.3 °C). Esto sugiere que las paredes vegetadas cumplen un papel clave al disipar el calor retenido en los muros.

El mayor descenso se registró a las 7 de la tarde, con una diferencia de unos 1.24 °C frente al caso sin vegetación, mostrando una buena sinergia entre las cubiertas y las fachadas hacia el final del día. Esta variación se explica por cómo incide el sol: por la mañana sobre las cubiertas, y por la tarde sobre los muros. Además, la orientación norte-sur y la apertura del lugar favorecieron una buena ventilación durante todo el día.

c) Resultados Paseo Arturo Prat (23m).

Tabla 4.11: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 1" k=15 (23m). [X=61, Y=32].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	23,08	23,06	0,01	23,03	0,04	23,02	0,06	22,98	0,10	22,94	0,14
11:00:00	24,14	24,13	0,01	24,10	0,04	24,04	0,09	23,97	0,17	23,93	0,21
12:00:00	25,29	25,28	0,01	25,25	0,04	25,15	0,14	25,04	0,25	25,00	0,29
13:00:00	26,38	26,37	0,01	26,35	0,04	26,20	0,18	26,06	0,32	26,02	0,36
14:00:00	27,33	27,32	0,01	27,29	0,03	27,16	0,17	27,03	0,30	26,99	0,33
15:00:00	27,45	27,44	0,01	27,42	0,03	27,30	0,15	27,19	0,26	27,16	0,29
16:00:00	27,23	27,22	0,01	27,19	0,04	27,11	0,12	27,01	0,21	26,98	0,25
17:00:00	26,76	26,74	0,02	26,71	0,05	26,66	0,10	26,58	0,18	26,53	0,22
18:00:00	26,03	26,01	0,02	25,97	0,06	25,95	0,08	25,89	0,14	25,83	0,20
19:00:00	25,16	25,14	0,02	25,10	0,06	25,10	0,07	25,05	0,11	25,00	0,16
20:00:00	24,46	24,44	0,02	24,41	0,05	24,40	0,06	24,36	0,10	24,31	0,15

Fuente: (elaboración propia, 2025).

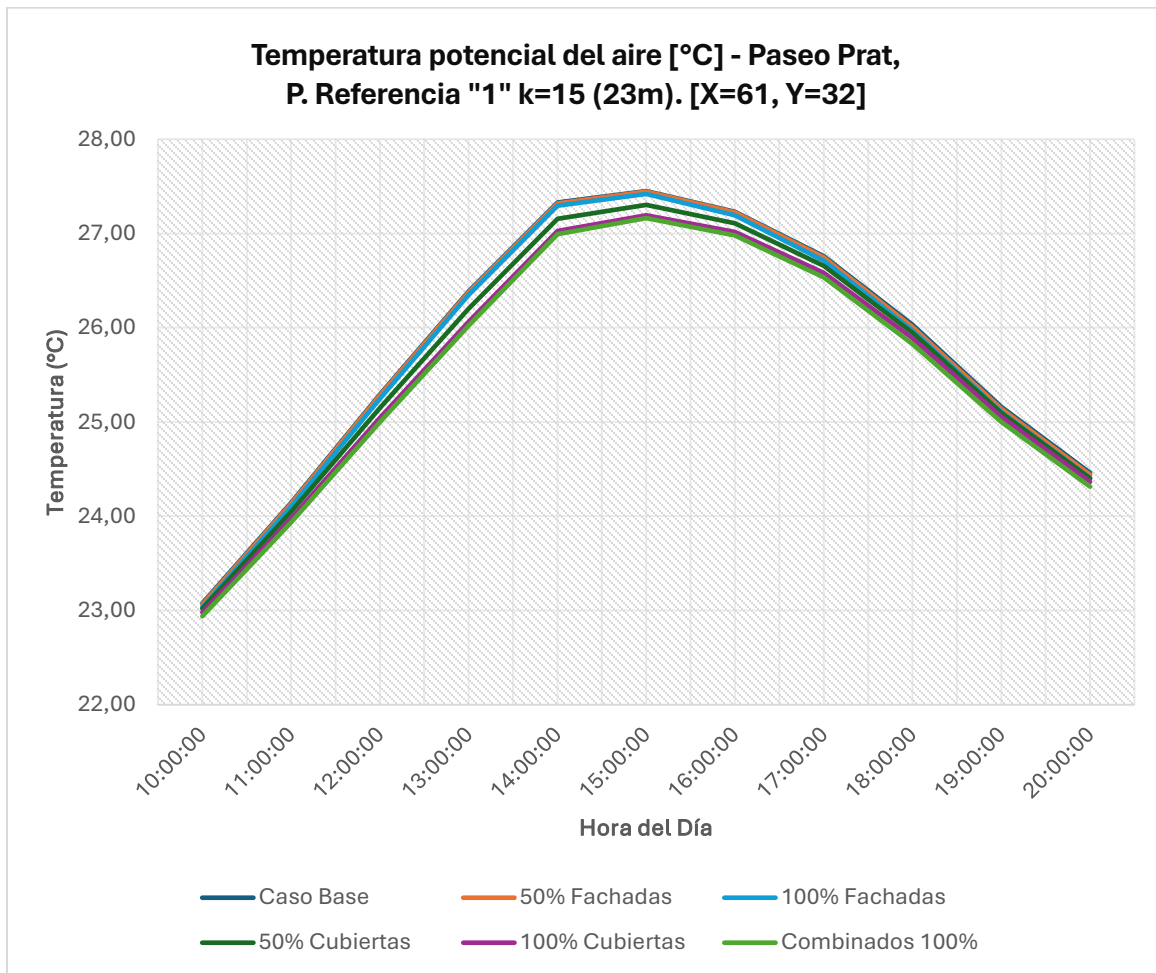


Figura 4.36: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

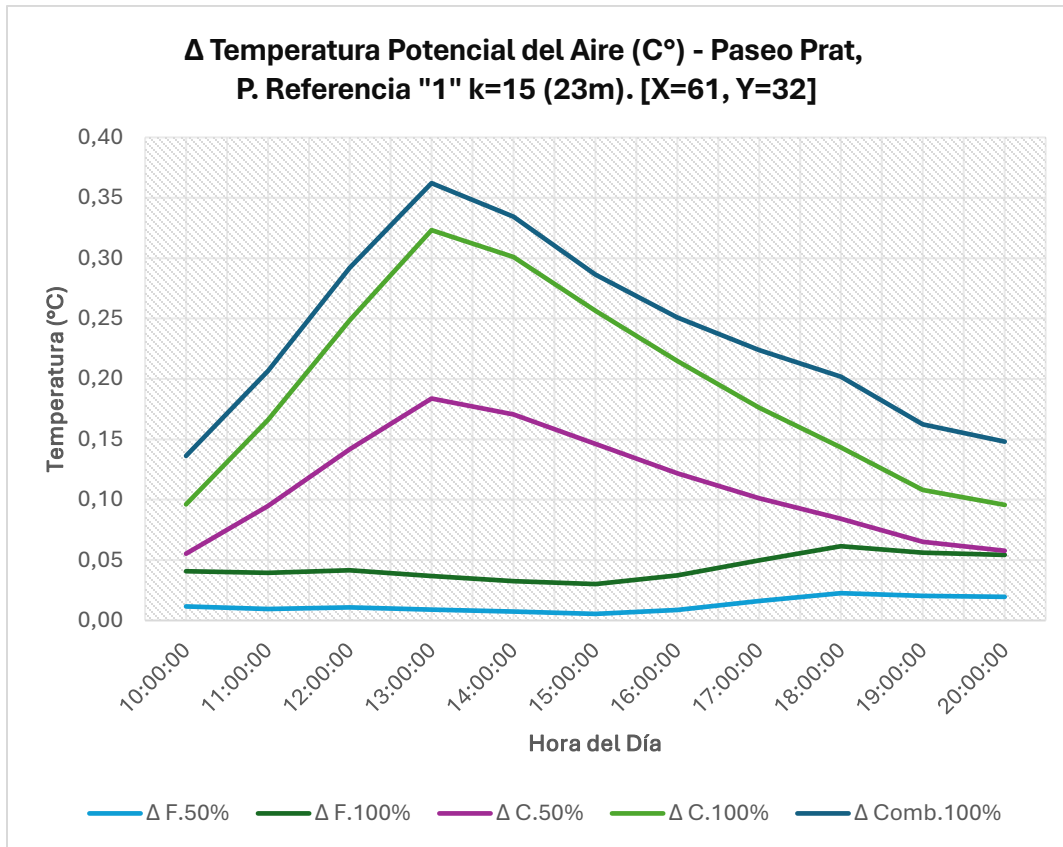


Figura 4.37: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A 23 m de altura, en el punto PR1, es decir, sobre el nivel de las cubiertas, la temperatura base alcanzó un máximo de aproximadamente 27.3 °C a las 2 de la tarde, lo que refleja condiciones más frescas en comparación con el nivel peatonal. A esa altura, las fachadas verdes prácticamente no tuvieron impacto (menos de 0.05 °C de diferencia), ya que su efecto se limita a niveles más bajos.

Por otro lado, las cubiertas verdes sí marcaron una diferencia: al mediodía lograron bajar la temperatura hasta unos 0.30 °C, y en el escenario combinado este efecto se elevó ligeramente, entre 0.32 y 0.36 °C. Esta mejora se debe a que los techos reciben sol directo y al proceso de evapotranspiración del sistema vegetal Sedum, que funciona mejor bajo alta radiación solar.

Ya por la tarde, el efecto de enfriamiento fue disminuyendo (por debajo de los 0.2 °C después de las 6 de la tarde), conforme el aire en las zonas altas empezaba a estabilizarse térmicamente. Además, el viento costero ayuda a disipar el calor a esa altura, lo que refuerza el papel de las cubiertas verdes como reguladoras térmicas en los niveles superiores del entorno urbano. En contraste, las fachadas verdes pierden relevancia en este nivel, ya que no interactúan directamente con él.

Tabla 4.12: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "2" k=15 (23m). [X=61, Y=60] .

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	22,91	22,90	0,01	22,89	0,03	22,91	0,01	22,85	0,07	22,82	0,09
11:00:00	24,03	24,02	0,01	24,00	0,02	24,01	0,02	23,91	0,11	23,89	0,14
12:00:00	25,24	25,23	0,01	25,22	0,03	25,21	0,03	25,07	0,17	25,04	0,20
13:00:00	26,40	26,40	0,01	26,38	0,02	26,36	0,05	26,18	0,22	26,16	0,25
14:00:00	27,38	27,37	0,01	27,36	0,02	27,33	0,05	27,17	0,21	27,15	0,23
15:00:00	27,44	27,43	0,01	27,42	0,02	27,40	0,03	27,26	0,17	27,24	0,19
16:00:00	27,19	27,18	0,01	27,16	0,03	27,16	0,02	27,04	0,15	27,01	0,18
17:00:00	26,65	26,64	0,01	26,61	0,04	26,64	0,02	26,53	0,12	26,49	0,16
18:00:00	25,88	25,87	0,02	25,83	0,05	25,88	0,01	25,79	0,09	25,74	0,15
19:00:00	25,03	25,01	0,01	24,98	0,04	25,02	0,00	24,96	0,06	24,92	0,10
20:00:00	24,37	24,36	0,01	24,34	0,03	24,36	0,00	24,32	0,05	24,29	0,08

Fuente: (elaboración propia, 2025).

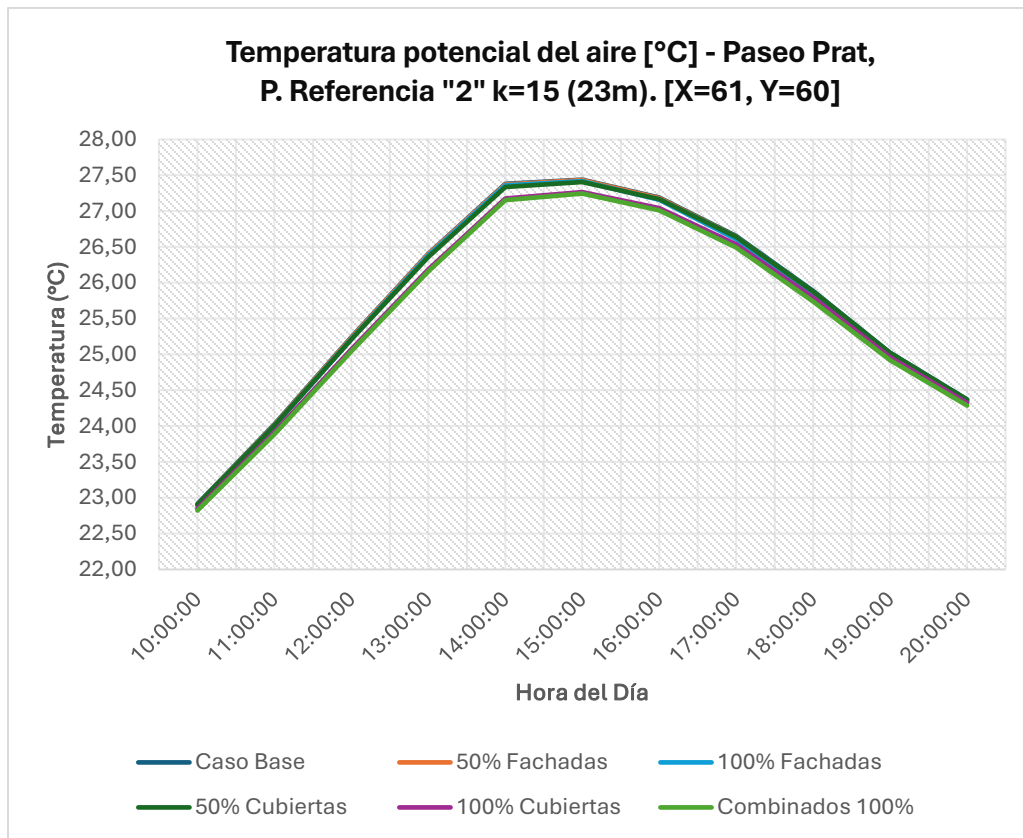


Figura 4.38: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

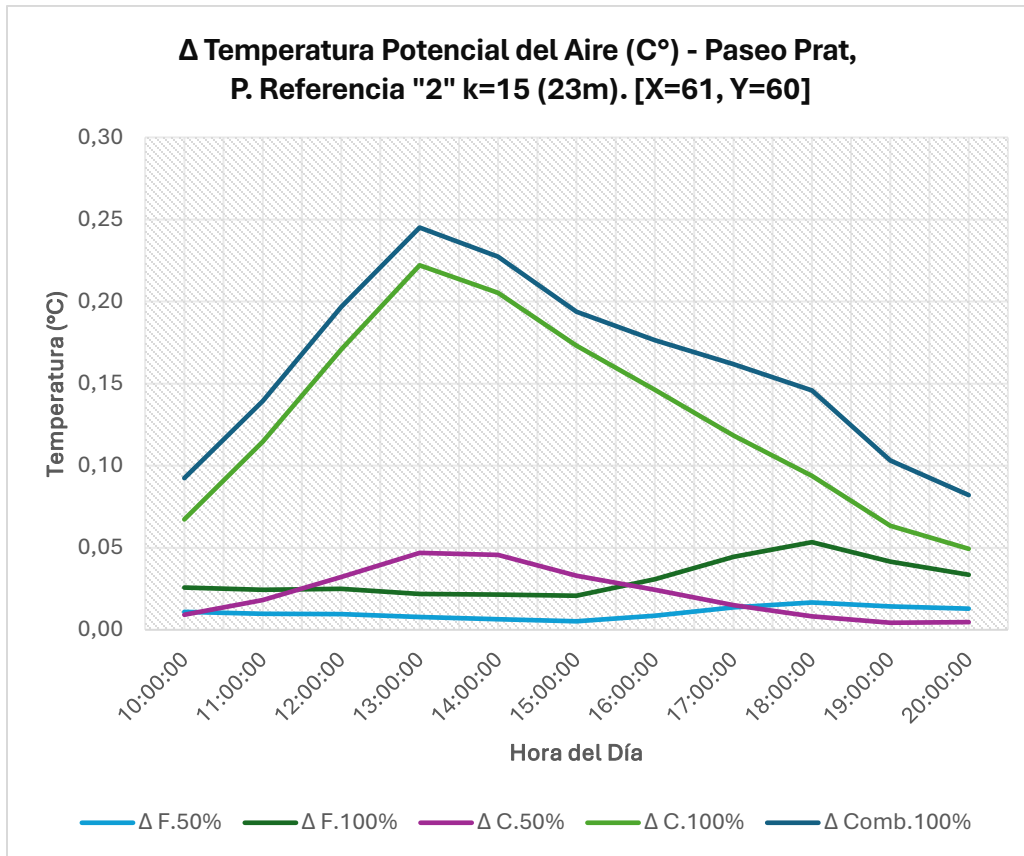


Figura 4.39: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A 23 m de altura, en el punto PR2, la temperatura base alcanzó un máximo moderado de unos 27.4 °C a las 3 de la tarde, lo que refleja una mejor capacidad para disipar el calor en las zonas más altas. En este nivel, las fachadas verdes no mostraron un impacto significativo (menos de 0.1 °C de diferencia), algo esperable dado que su influencia se concentra más cerca del nivel peatonal.

En cambio, las cubiertas verdes sí ofrecieron una mitigación térmica clara: a la 1 de la tarde, las cubiertas al 100% lograron reducir la temperatura en alrededor de 0.2 °C. Cuando se aplicaron en conjunto con otras soluciones, el efecto subió a unos 0.3 °C, gracias al aislamiento adicional y al proceso de evapotranspiración que se activa con la radiación solar directa.

Aunque estos efectos son más discretos que los observados en niveles bajos, siguen siendo relevantes, sobre todo en zonas expuestas al sol y al viento costero. Ya hacia el anochecer, las diferencias térmicas bajaron a entre 0.1 y 0.2 °C, lo que indica que el calor tiende a estabilizarse al perderse la radiación solar.

Tabla 4.13: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia "3" k=15 (23m). [X=61, Y=93].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	23,51	23,49	0,02	23,30	0,20	23,63	-0,13	23,27	0,24	23,06	0,45
11:00:00	24,58	24,56	0,02	24,39	0,19	24,49	0,09	24,22	0,37	24,01	0,57
12:00:00	25,69	25,67	0,02	25,50	0,19	25,54	0,15	25,18	0,51	24,97	0,72
13:00:00	26,74	26,71	0,02	26,56	0,17	26,54	0,20	26,10	0,63	25,91	0,82
14:00:00	27,60	27,58	0,02	27,45	0,15	27,44	0,17	27,05	0,56	26,88	0,72
15:00:00	27,69	27,67	0,02	27,51	0,17	27,56	0,13	27,20	0,48	27,03	0,66
16:00:00	27,41	27,39	0,02	27,21	0,20	27,30	0,11	26,99	0,42	26,78	0,63
17:00:00	26,91	26,88	0,03	26,68	0,24	26,81	0,10	26,53	0,38	26,30	0,62
18:00:00	26,18	26,15	0,03	25,91	0,26	26,09	0,09	25,83	0,35	25,56	0,62
19:00:00	25,30	25,27	0,03	25,03	0,27	25,21	0,09	24,98	0,32	24,72	0,58
20:00:00	24,56	24,53	0,03	24,28	0,28	24,48	0,09	24,27	0,30	23,99	0,58

Fuente: (elaboración propia, 2025).

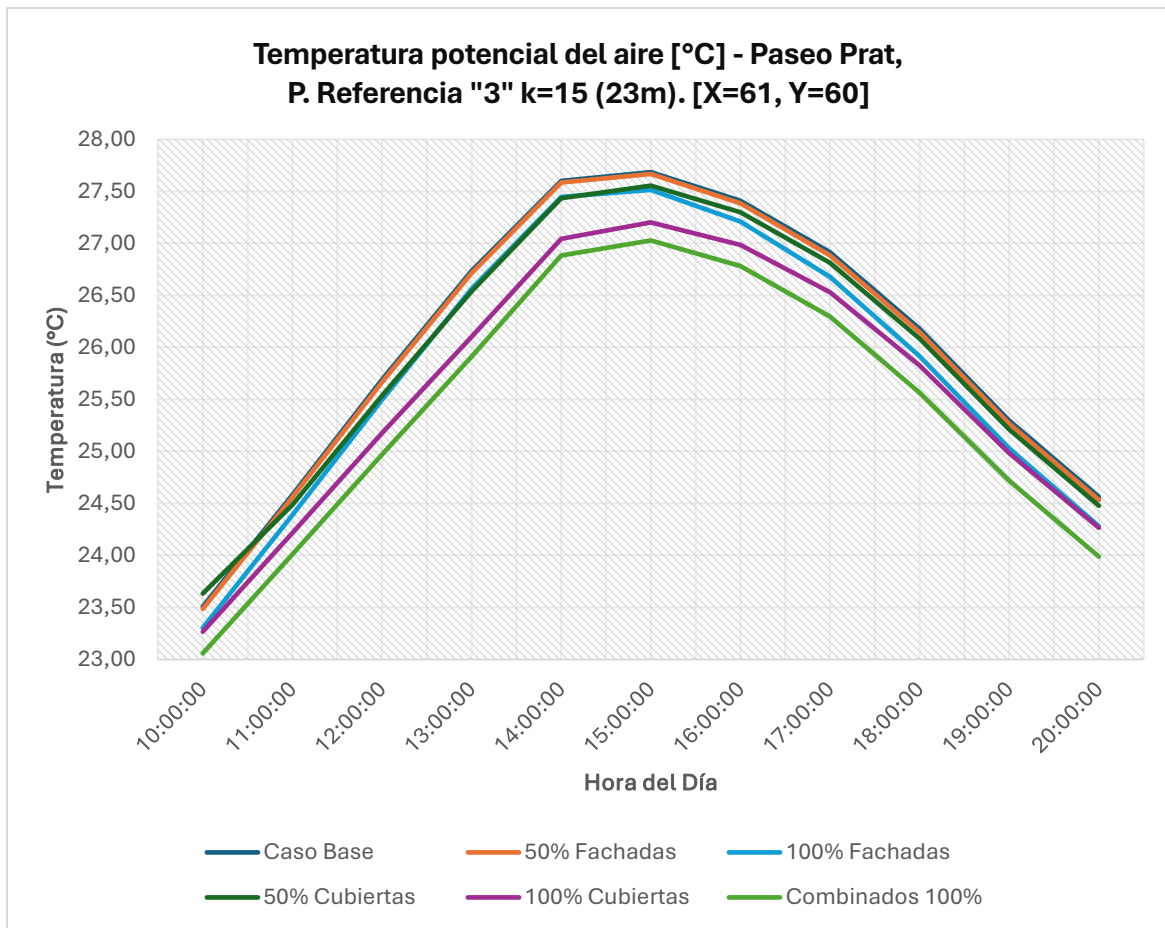


Figura 4.40: Gráficos Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

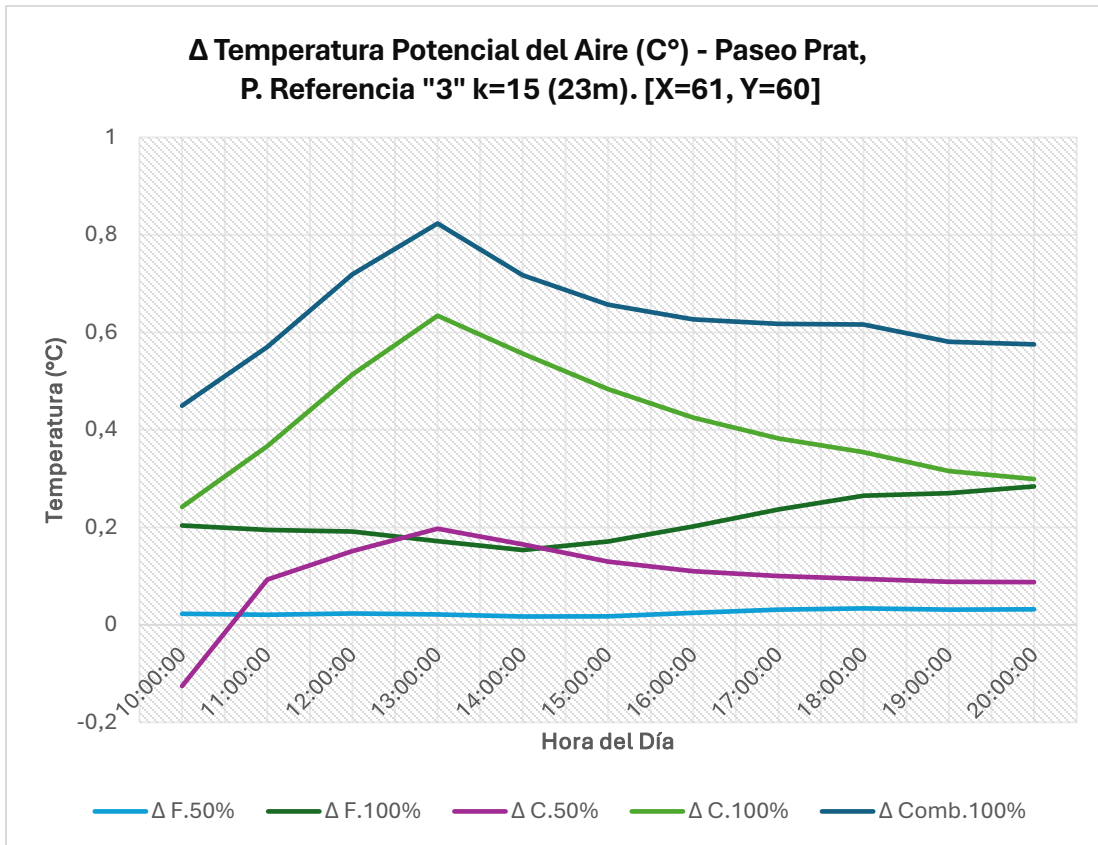


Figura 4.41: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el punto PR3, a 23 m de altura, la temperatura base alcanzó un máximo de unos 27.6 °C a las 14:00 hrs, apenas por encima de lo registrado en los otros dos puntos a esa misma altitud. Al igual que en las otras zonas elevadas, las fachadas verdes no tuvieron un efecto relevante (menos de 0.05 °C de diferencia), ya que su influencia se limita a niveles más bajos.

En contraste, los techos verdes sí mostraron una buena capacidad para enfriar el aire. A las 14:00 hrs, una cubierta vegetal al 100 % logró reducir la temperatura en aproximadamente 0.56 °C, manteniendo un efecto sostenido de entre 0.4 y 0.5 °C entre las 12:00 y 15:00 hrs. Esta eficacia un poco mayor podría deberse a que los techos cercanos al PR3 reciben más sol directo.

El escenario combinado fue aún más efectivo, alcanzando una reducción máxima de unos 0.63 °C entre las 13:00 y 14:00 hrs. Ya hacia las 19:00 hrs, las diferencias térmicas se redujeron a menos de 0.2 °C, aunque el efecto de las cubiertas duró un poco más que en PR1 y PR2.

d) Resultados Paseo Peatonal Matta (0.2m):

Tabla 4.14: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, P. Referencia " 1" k=0 (0,2m). [X=31, Y=63].											
Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	26,53	26,47	0,06	26,30	0,23	26,58	-0,05	26,57	-0,04	26,28	0,25
11:00:00	29,03	29,07	-0,04	28,93	0,10	29,15	-0,12	29,13	-0,10	28,88	0,15
12:00:00	31,21	31,32	-0,11	31,24	-0,03	31,38	-0,17	31,35	-0,14	31,17	0,04
13:00:00	32,85	33,02	-0,17	32,92	-0,08	33,04	-0,20	33,00	-0,15	32,83	0,02
14:00:00	33,80	34,01	-0,20	33,90	-0,10	34,01	-0,21	33,99	-0,18	33,81	-0,01
15:00:00	33,39	33,58	-0,19	33,45	-0,06	33,59	-0,20	33,61	-0,22	33,39	0,01
16:00:00	31,87	32,00	-0,13	31,82	0,05	32,03	-0,16	32,08	-0,21	31,78	0,09
17:00:00	30,41	30,46	-0,05	30,26	0,16	30,53	-0,11	30,61	-0,20	30,23	0,18
18:00:00	28,36	28,32	0,04	28,10	0,26	28,42	-0,06	28,51	-0,15	28,09	0,27
19:00:00	26,53	26,44	0,09	26,25	0,28	26,56	-0,03	26,62	-0,09	26,24	0,30
20:00:00	25,10	24,98	0,12	24,80	0,30	25,09	0,00	25,12	-0,03	24,78	0,32

Fuente: (elaboración propia, 2025).

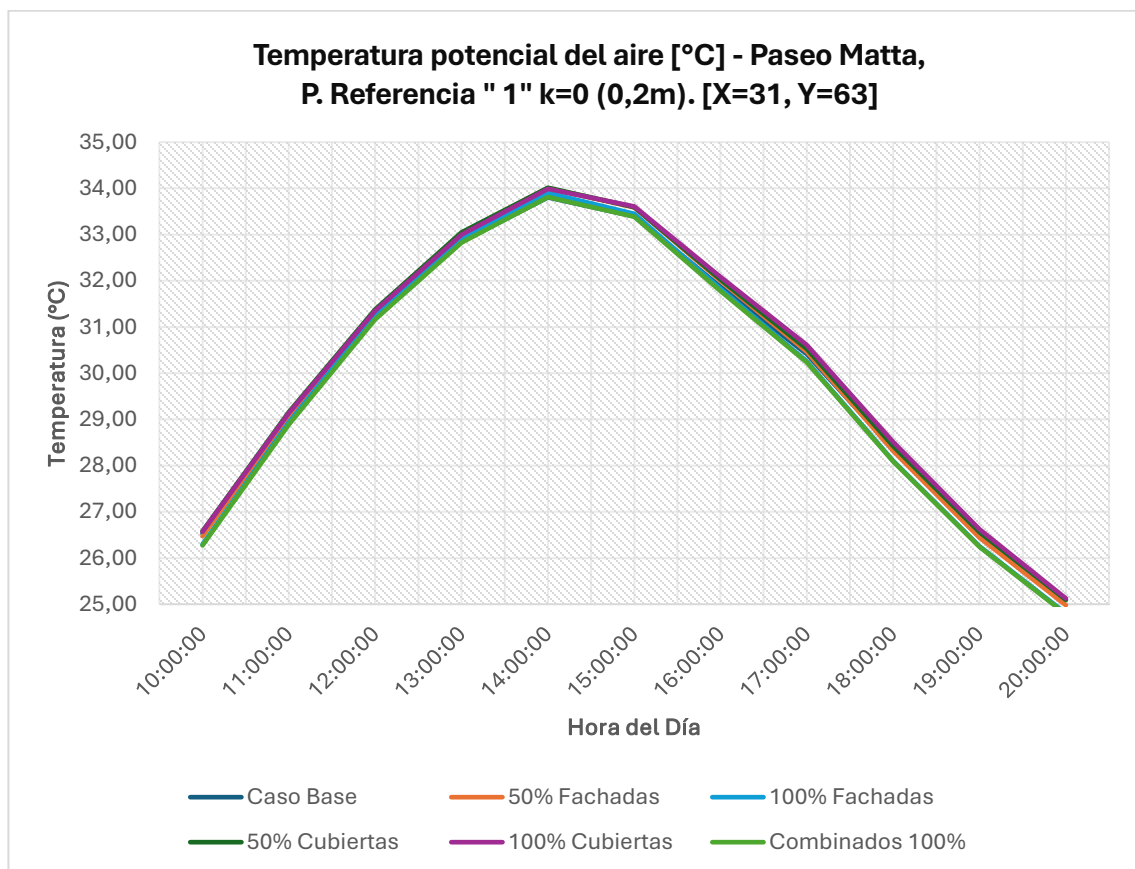


Figura 4.42: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

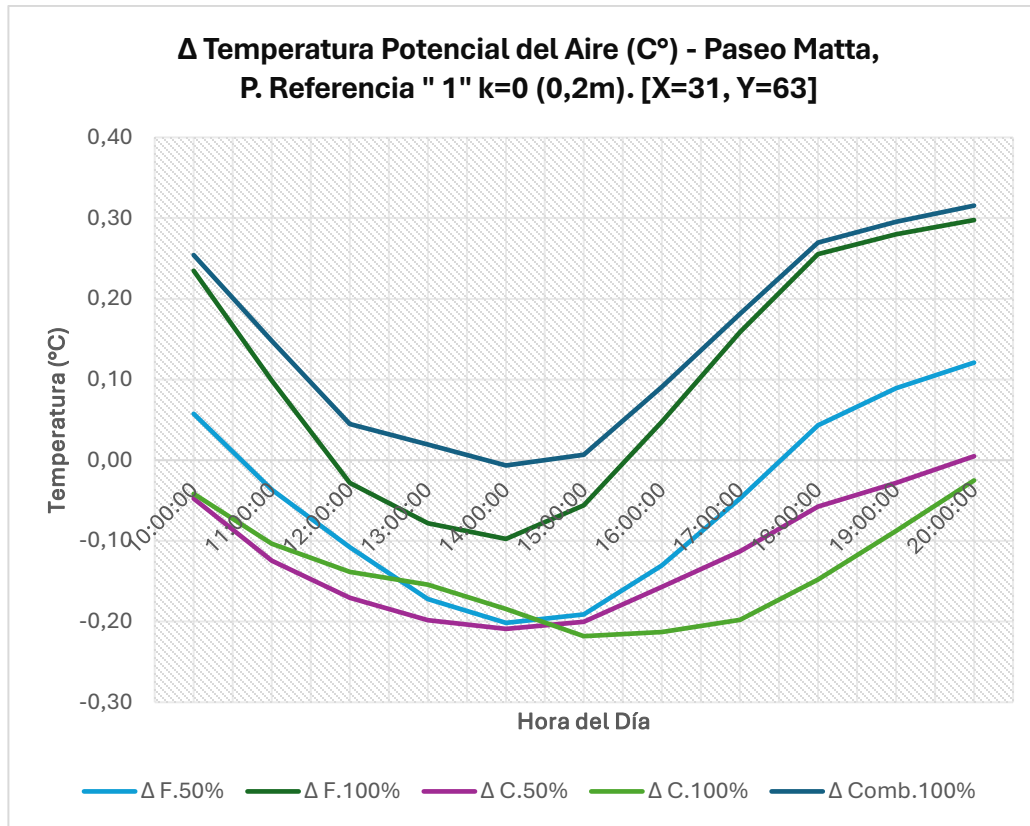


Figura 4.43: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el punto PR1 del Paseo Matta, a solo 0.2 m del suelo, se registraron las condiciones térmicas más extremas de todos los puntos evaluados, con un pico de temperatura de aproximadamente 33.8 °C a las 14:00 hrs. Esta cifra, más de 3 °C por encima de los valores registrados en puntos similares del Paseo Prat, esto puede producirse por a escasa ventilación y a la fuerte acumulación de calor en una zona con una configuración urbana más cerrada.

Durante el mediodía, las soluciones verdes, especialmente en versiones parciales, no lograron generar un enfriamiento real; incluso se observaron ligeros aumentos de temperatura. Por ejemplo, con fachadas verdes al 50 %, se registró un alza de unos 0.17 °C a las 13:00 hrs.,

Sin embargo, ya hacia la tarde, las fachadas con vegetación empezaron a desempeñar un papel mitigador, logrando reducir la temperatura en alrededor de 0.26 °C a las 18:00 hrs. El escenario combinado fue el más efectivo, alcanzando una diferencia de 0.32 °C a las 20:00 hrs, lo que resalta el aporte de la vegetación vertical para disminuir la reemisión de calor desde los muros al finalizar el día.

Tabla 4.15: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Prat, Punto de Referencia " 2" k=0 (0,2m). [X=63, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	26,59	26,40	0,19	26,16	0,43	26,56	0,03	26,49	0,10	26,03	0,56
11:00:00	29,10	29,01	0,10	28,80	0,30	29,10	0,00	28,99	0,11	28,58	0,52
12:00:00	31,20	31,16	0,04	30,99	0,21	31,19	0,01	31,05	0,15	30,69	0,51
13:00:00	32,63	32,67	-0,03	32,50	0,13	32,61	0,02	32,44	0,19	32,14	0,49
14:00:00	33,45	33,49	-0,04	33,36	0,09	33,45	0,00	33,30	0,16	33,02	0,43
15:00:00	33,61	33,62	-0,02	33,45	0,15	33,62	-0,02	33,48	0,12	33,14	0,47
16:00:00	32,81	32,76	0,05	32,51	0,30	32,83	-0,02	32,71	0,10	32,22	0,59
17:00:00	31,13	30,97	0,16	30,62	0,51	31,14	-0,01	31,05	0,08	30,37	0,76
18:00:00	28,76	28,50	0,25	28,09	0,67	28,73	0,02	28,67	0,09	27,87	0,89
19:00:00	26,89	26,61	0,28	26,22	0,68	26,85	0,04	26,78	0,11	26,02	0,88
20:00:00	25,44	25,13	0,31	24,75	0,69	25,37	0,07	25,29	0,15	24,57	0,87

Fuente: (elaboración propia, 2025).

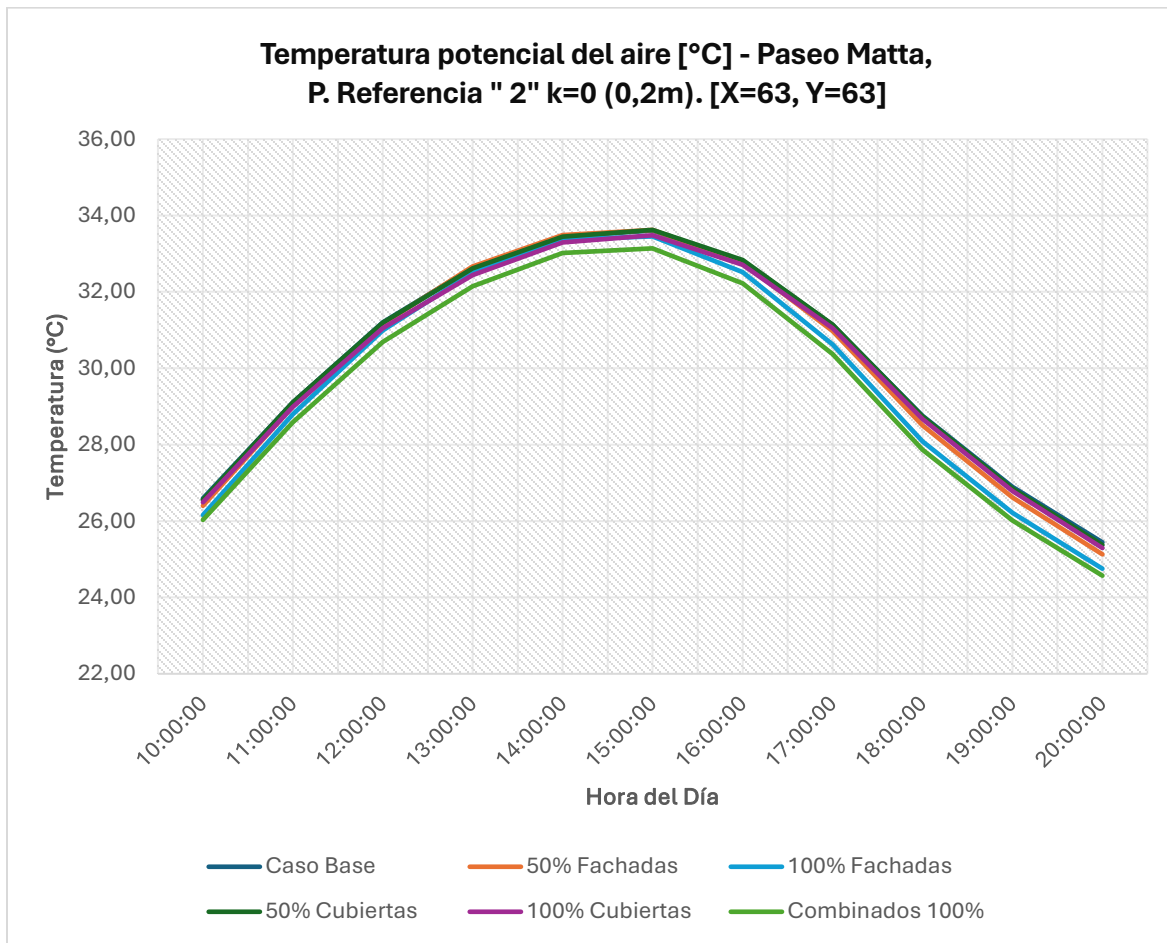


Figura 4.44: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

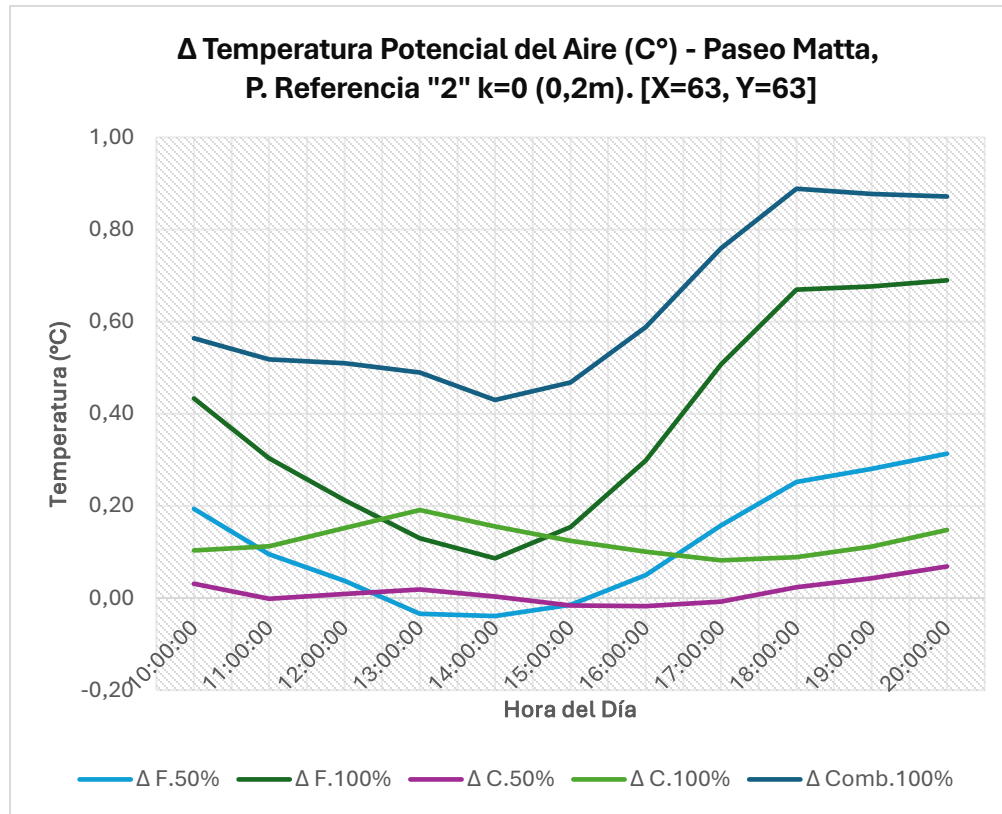


Figura 4.45: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

El punto PR2 del Paseo Matta, ubicado a 0.2 m del suelo, presentó una de las condiciones térmicas más altas y persistentes del tramo, alcanzando un máximo de 33.4 °C a las 14:00 hrs y manteniéndose por encima de los 31 °C hasta las 17:00 hrs. Esta prolongación del calor sugiere una fuerte exposición solar durante la tarde y poca ventilación en esta zona central del paseo.

Durante las horas de mayor radiación, las soluciones vegetales no lograron mitigar el calor de forma efectiva. En el mejor de los casos, las diferencias fueron mínimas, casi nulas (± 0.1 °C). Sin embargo, al bajar el sol, el efecto de las fachadas verdes se volvió más evidente, con una reducción de aproximadamente 0.5 °C a las 17:00 hrs.

La incorporación de cubiertas vegetadas aportó un valor importante al final del día: entre las 18:00 y 19:00 hrs, el escenario combinado logró disminuir la temperatura del aire hasta en 0.89 °C, superando claramente lo que podía lograrse con cada sistema por separado. Este resultado demuestra que, aunque las cubiertas verdes no fueron tan eficaces por sí solas durante el día, su acción en conjunto con las fachadas vegetadas fue clave para disipar el calor acumulado en este cañón urbano de alta exposición.

Tabla 4.16 Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia " 3" k=0 (0,2m). [X=89, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	26,33	26,09	0,24	25,75	0,58	26,29	0,05	26,19	0,14	25,56	0,77
11:00:00	28,55	28,44	0,11	28,15	0,40	28,55	0,00	28,41	0,13	27,87	0,67
12:00:00	30,39	30,37	0,01	30,13	0,26	30,39	0,00	30,23	0,16	29,77	0,62
13:00:00	31,72	31,78	-0,06	31,56	0,15	31,71	0,00	31,53	0,19	31,14	0,57
14:00:00	32,34	32,41	-0,07	32,19	0,14	32,36	-0,02	32,18	0,15	31,79	0,54
15:00:00	32,44	32,47	-0,04	32,21	0,22	32,48	-0,05	32,31	0,12	31,84	0,60
16:00:00	31,56	31,50	0,06	31,15	0,40	31,59	-0,04	31,43	0,12	30,78	0,77
17:00:00	30,24	29,62	0,62	29,26	0,98	30,07	0,17	30,10	0,14	29,95	0,29
18:00:00	28,66	28,39	0,27	27,82	0,83	28,62	0,03	28,48	0,18	27,47	1,18
19:00:00	26,93	26,61	0,32	26,05	0,89	26,85	0,08	26,71	0,22	25,70	1,23
20:00:00	25,59	25,20	0,39	24,63	0,95	25,47	0,12	25,31	0,28	24,31	1,28

Fuente: (elaboración propia, 2025).

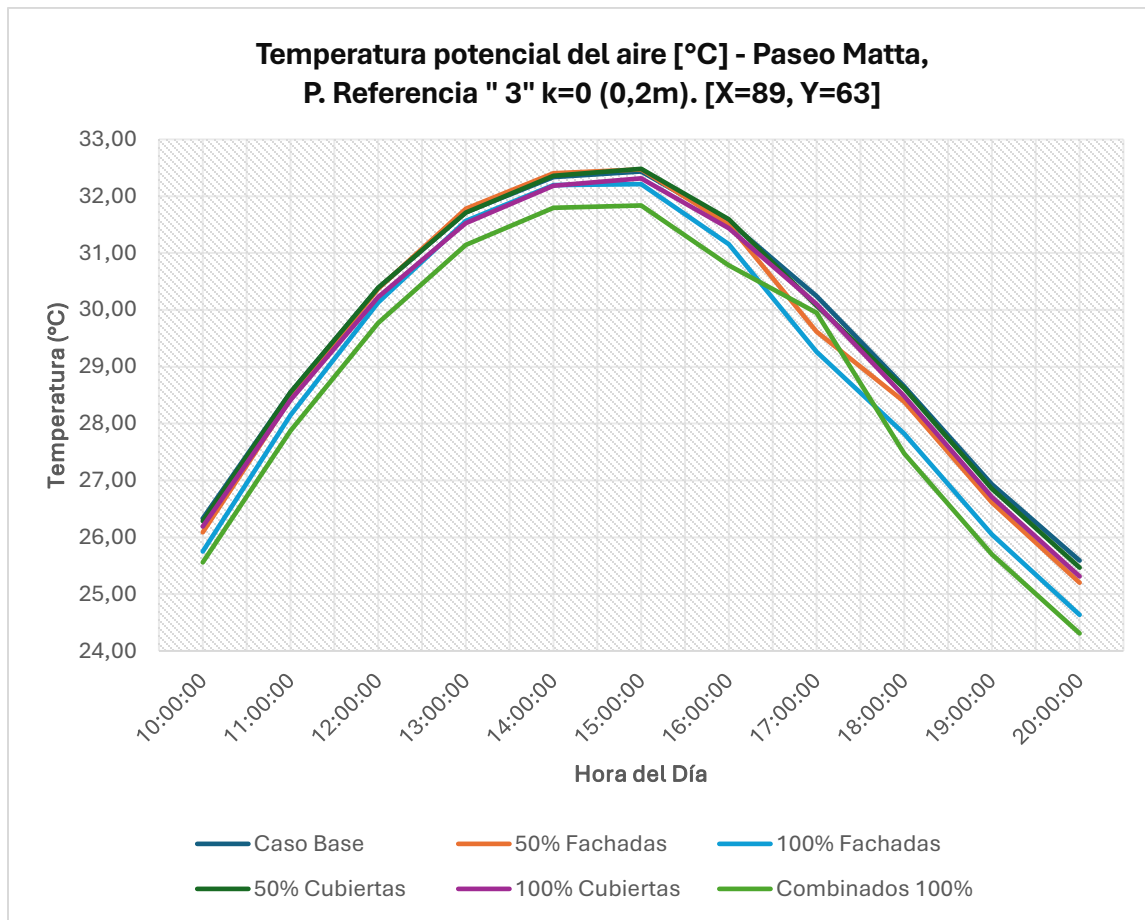


Figura 4.46: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

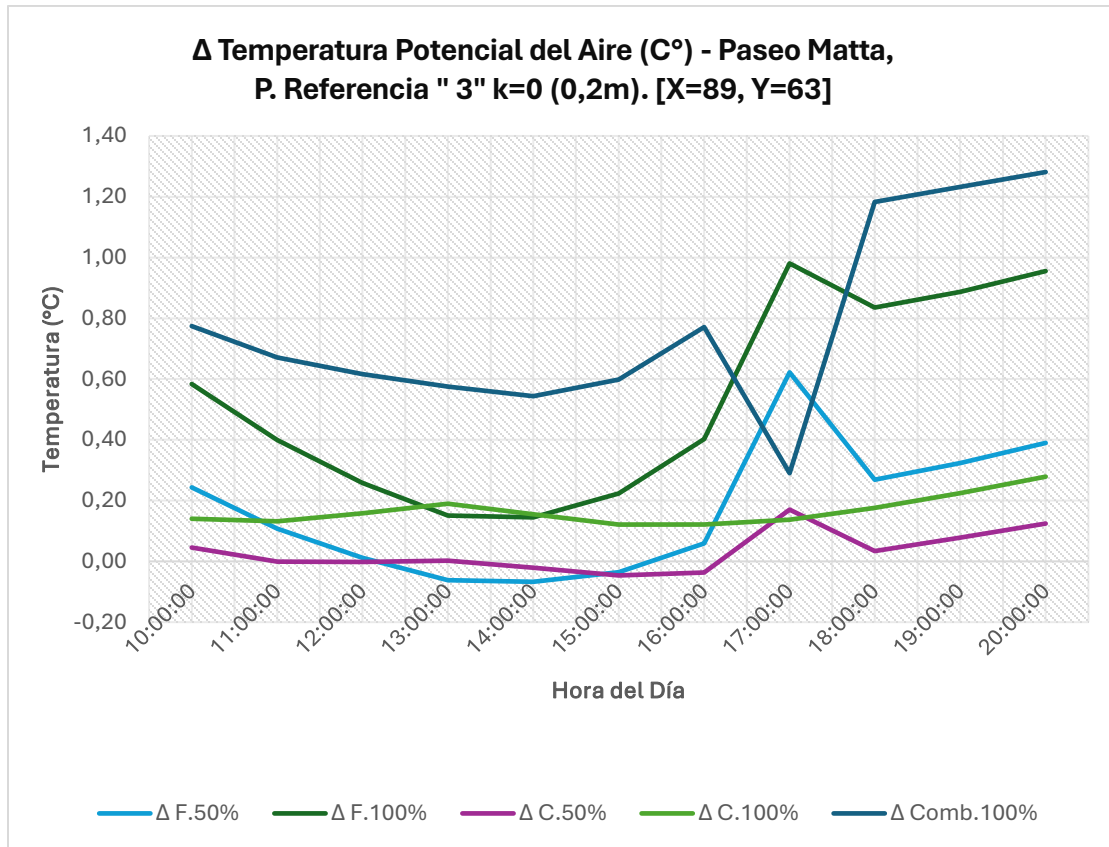


Figura 4.47: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el Punto de Referencia 3 del Paseo Matta, ubicado a 0.2 m del suelo en la parte oriente del paseo, se registraron condiciones térmicas relativamente más suaves en comparación con otros sectores del eje. La temperatura máxima en el escenario base fue de 32.4 °C a las 14:00 hrs, lo que sugiere una menor acumulación de calor, posiblemente por una mejor ventilación transversal o por sombras proyectadas debido a la configuración urbana.

A diferencia de los puntos más interiores, este sector comenzó a mostrar beneficios térmicos desde las horas centrales del día. A las 13:00 hrs, las fachadas verdes al 100 % lograron reducir la temperatura del aire en 0.16 °C, mientras que las cubiertas al 100 % alcanzaron una reducción de 0.19 °C. Durante la tarde, las fachadas vegetadas siguieron cobrando relevancia, llegando a bajar la temperatura en 0.95 °C a las 20:00 hrs.

No obstante, fue la solución combinada la que mostró el mayor impacto térmico de toda la jornada, con una reducción de 1.28 °C a las 20:00 hrs en comparación con el caso base, estos resultados posicionan al PR3 como el punto con mejor respuesta térmica del Paseo Matta, demostrando una interacción efectiva entre las condiciones locales y la capacidad de enfriamiento combinada de muros y techos con vegetación.

e) Resultados Paseo Matta (1.8m):

Tabla 4.17: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia " 1" k=3 (1,8m). [X=31, Y=63].											
Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	25,86	25,80	0,07	25,64	0,22	25,89	-0,03	25,62	0,24	25,62	0,24
11:00:00	28,10	28,11	-0,01	27,99	0,11	28,19	-0,09	27,94	0,16	27,94	0,16
12:00:00	30,13	30,20	-0,07	30,12	0,01	30,26	-0,13	30,05	0,08	30,05	0,08
13:00:00	31,70	31,82	-0,13	31,74	-0,04	31,85	-0,15	31,64	0,06	31,64	0,06
14:00:00	32,65	32,80	-0,15	32,71	-0,06	32,81	-0,15	32,62	0,03	32,62	0,03
15:00:00	32,30	32,44	-0,14	32,32	-0,02	32,44	-0,14	32,26	0,04	32,26	0,04
16:00:00	31,30	31,39	-0,09	31,24	0,06	31,41	-0,11	31,20	0,10	31,20	0,10
17:00:00	29,90	29,91	-0,02	29,74	0,16	29,97	-0,08	29,72	0,18	29,72	0,18
18:00:00	28,04	27,98	0,06	27,80	0,24	28,07	-0,03	27,79	0,25	27,79	0,25
19:00:00	26,30	26,21	0,10	26,05	0,25	26,32	-0,01	26,03	0,27	26,03	0,27
20:00:00	24,95	24,83	0,12	24,68	0,27	24,94	0,01	24,66	0,28	24,66	0,28

Fuente: (elaboración propia, 2025).

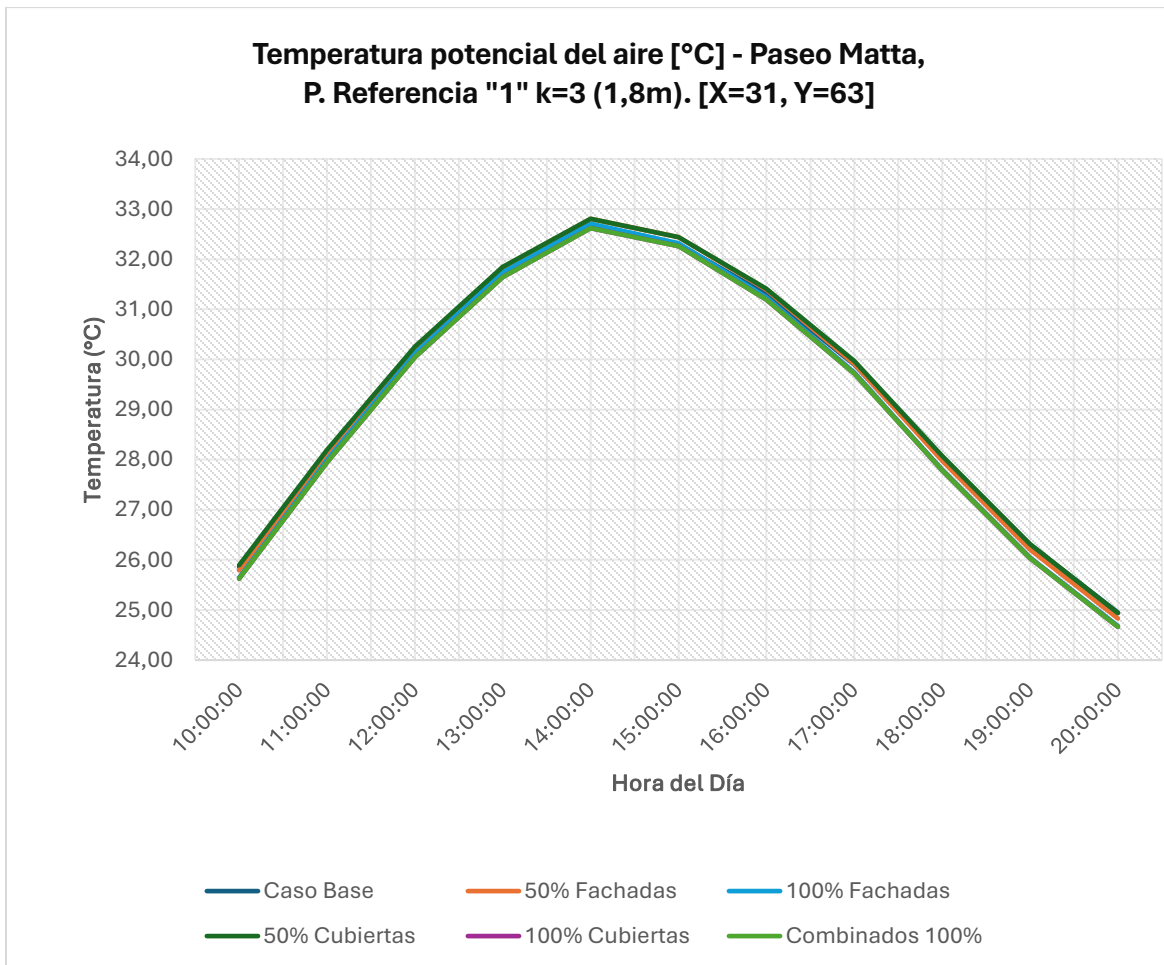


Figura 4.48: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

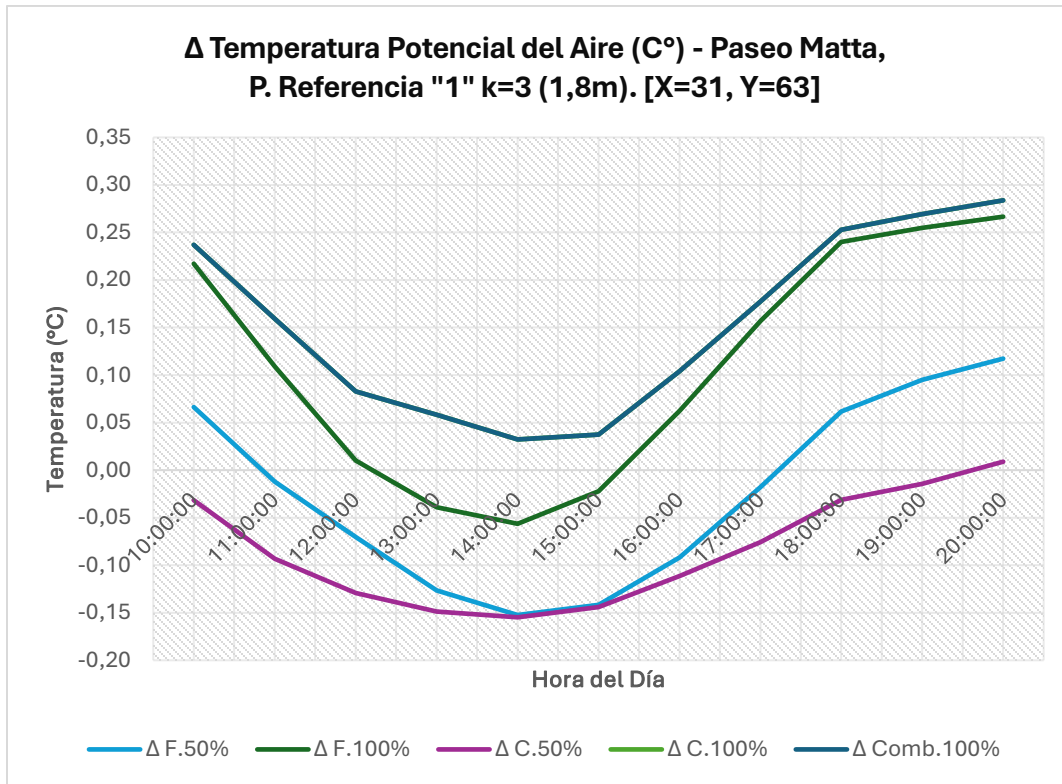


Figura 4.49: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A 1.8 m de altura, el punto PR1 del Paseo Matta fue uno de los entornos más cálidos observados, con una temperatura cercana a los 32.8 °C a las 14:00 hrs en el escenario base. Este valor, apenas por debajo del registrado a 0.2 m, indica una baja estratificación térmica y una fuerte mezcla vertical de aire caliente.

Durante el mediodía, las soluciones vegetales no mostraron beneficios claros; incluso se observaron efectos neutros o ligeramente negativos. Las cubiertas verdes al 100 % incrementaron la temperatura en aproximadamente 0.15 °C, y las fachadas verdes, tanto al 50 % como al 100 %, provocaron variaciones entre +0.01 y +0.10 °C.

A partir de las 16:00 hrs se empezó a notar un cambio en esta tendencia: las fachadas verdes al 100 % comenzaron a enfriar levemente el entorno, con una reducción de unos 0.06 °C, que se intensificó a las 17:00 hrs con una baja de 0.16 °C. Este efecto se relaciona con la menor liberación de calor desde los muros vegetados al atardecer.

Por su parte, los techos verdes continuaron sin mostrar efectos significativos en la mejora térmica a esta altura. La estrategia combinada, en cambio, fue la que logró el mayor enfriamiento, con una diferencia de aproximadamente 0.30 °C entre las 19:00 y 20:00 hrs, mejorando el confort térmico al cierre del día.

Tabla 4.18: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "2" k=3 (1,8m). [X=63, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	26,15	25,96	0,19	25,72	0,43	26,12	0,03	26,04	0,11	25,58	0,56
11:00:00	28,39	28,29	0,09	28,08	0,30	28,38	0,00	28,26	0,12	27,86	0,53
12:00:00	30,38	30,34	0,04	30,17	0,21	30,37	0,01	30,22	0,16	29,86	0,52
13:00:00	31,79	31,82	-0,03	31,66	0,13	31,76	0,03	31,58	0,21	31,28	0,51
14:00:00	32,61	32,65	-0,04	32,52	0,09	32,60	0,01	32,44	0,17	32,16	0,45
15:00:00	32,71	32,73	-0,02	32,55	0,16	32,73	-0,02	32,58	0,13	32,23	0,48
16:00:00	31,95	31,91	0,05	31,65	0,30	31,97	-0,02	31,85	0,10	31,36	0,59
17:00:00	30,42	30,27	0,16	29,92	0,50	30,43	-0,01	30,34	0,08	29,67	0,76
18:00:00	28,45	28,20	0,25	27,80	0,66	28,42	0,03	28,36	0,09	27,57	0,88
19:00:00	26,70	26,42	0,28	26,03	0,66	26,65	0,05	26,58	0,12	25,83	0,86
20:00:00	25,32	25,01	0,31	24,65	0,68	25,25	0,07	25,17	0,15	24,46	0,86

Fuente: (elaboración propia, 2025).

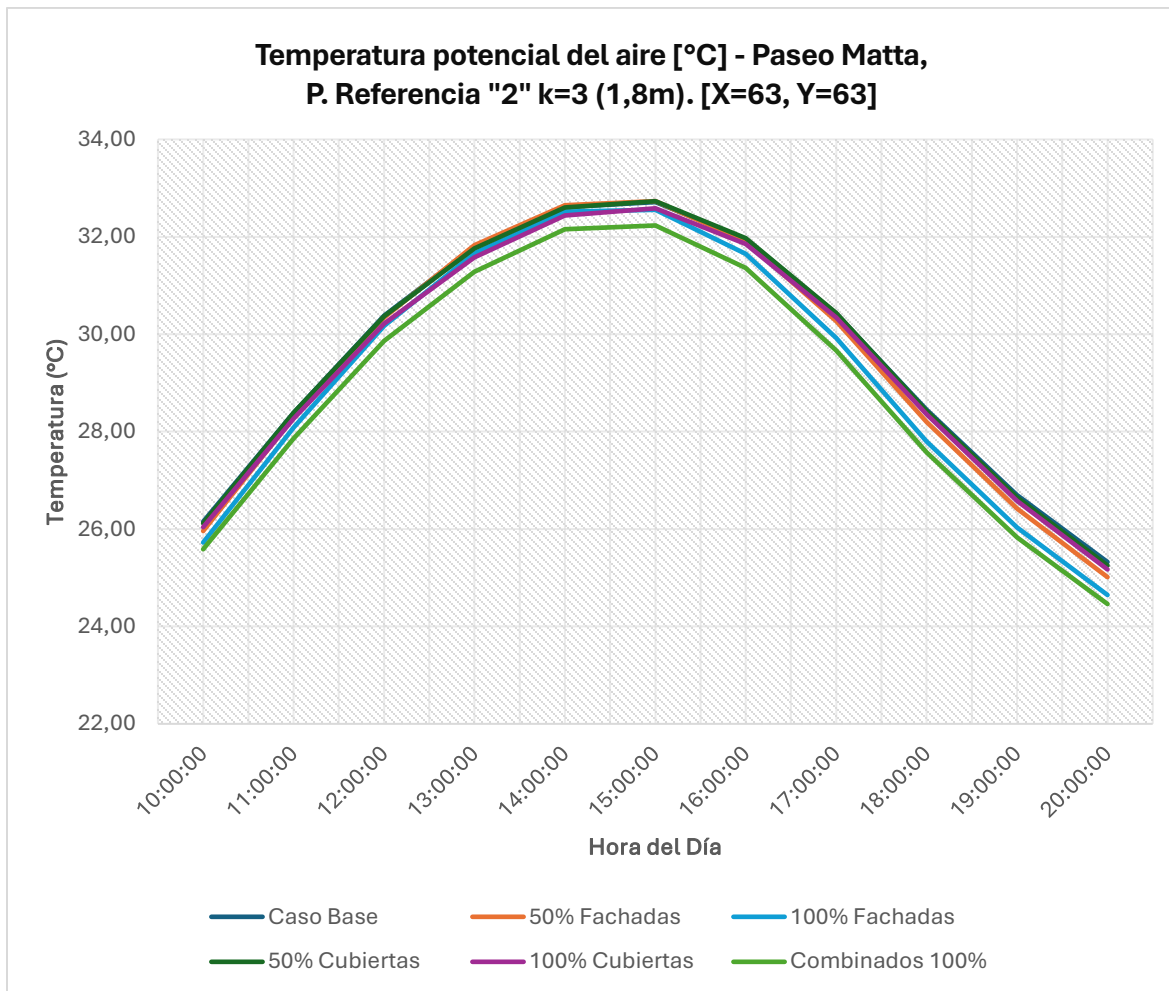


Figura 4.50: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

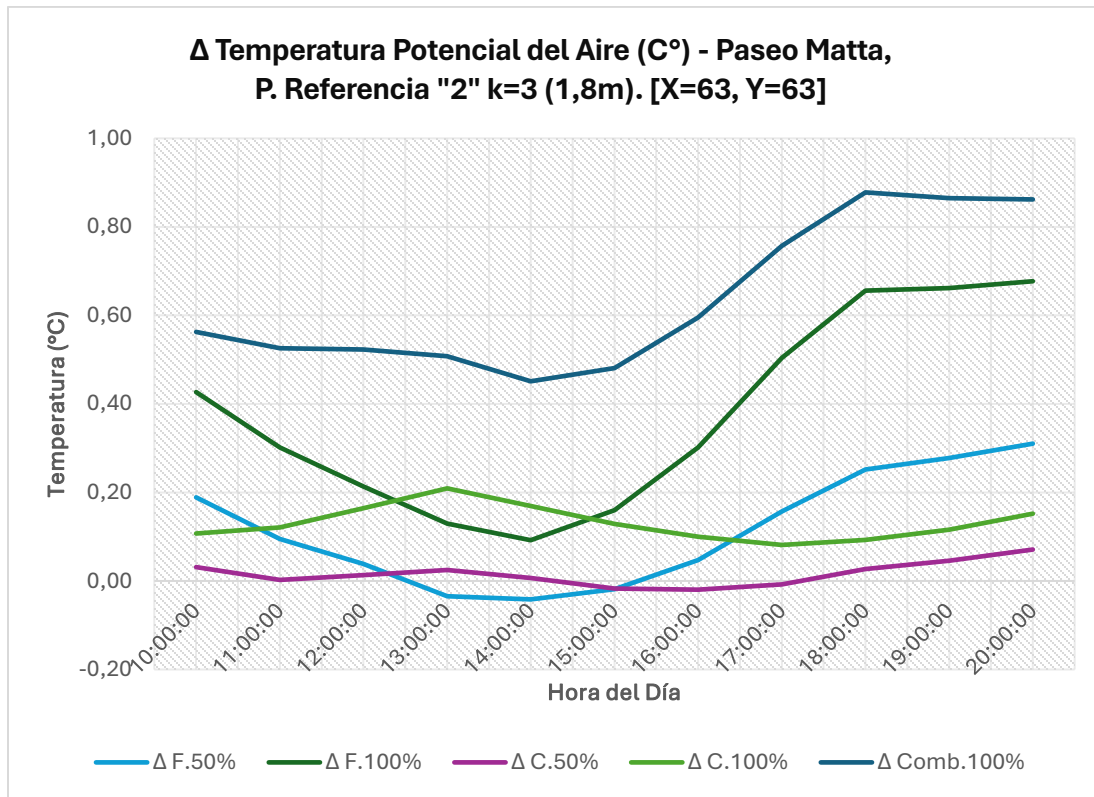


Figura 4.51: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el punto PR2 del Paseo Matta, a 1.8 m de altura, se registraron condiciones de fuerte estrés térmico. El escenario base alcanzó hasta unos 32.6 °C entre las 14:00 y 15:00 hrs, y mantuvo temperaturas elevadas, alrededor de 30.4 °C, incluso hasta las 17:00 hrs.

Durante el mediodía, las soluciones con vegetación mostraron efectos muy limitados. Las fachadas y cubiertas verdes variaron entre -0.02 °C y +0.03 °C, sin generar un enfriamiento significativo. Sin embargo, a partir de las 16:00 hrs, la fachada verde al 100 % empezó a marcar una diferencia más clara, logrando una reducción de unos 0.30 °C, que se intensificó conforme avanzaba la tarde.

Entre las 17:00 y 18:00 hrs, las fachadas verdes alcanzaron descensos de temperatura de hasta 0.66 °C, mientras que las cubiertas verdes por separado continuaron mostrando efectos menores (por debajo de 0.1 °C). El mayor impacto térmico lo consiguió el escenario combinado: a las 18:00 y 19:00 hrs, la temperatura fue entre 0.84 y 0.88 °C menor respecto al caso base. Esto refleja una sinergia efectiva al final del día, cuando las fachadas verdes ayudan a reducir la reemisión del calor acumulado, y las cubiertas verdes, contribuyen con enfriamiento por radiación y posible evapotranspiración tardía.

Tabla 4.19: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "3" k=3 (1,8m). [X=89, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	25,93	25,69	0,24	25,35	0,58	25,87	0,06	25,77	0,16	25,15	0,78
11:00:00	28,01	27,88	0,12	27,59	0,42	27,98	0,03	27,83	0,17	27,30	0,71
12:00:00	29,80	29,75	0,04	29,50	0,29	29,76	0,04	29,58	0,21	29,12	0,68
13:00:00	31,12	31,15	-0,03	30,93	0,18	31,07	0,05	30,86	0,25	30,47	0,64
14:00:00	31,76	31,80	-0,04	31,59	0,18	31,74	0,02	31,55	0,21	31,16	0,60
15:00:00	31,86	31,87	-0,01	31,60	0,25	31,86	0,00	31,68	0,18	31,21	0,65
16:00:00	31,19	31,11	0,08	30,77	0,42	31,19	0,00	31,03	0,16	30,39	0,81
17:00:00	29,98	29,35	0,64	28,98	1,00	29,80	0,18	29,81	0,17	29,69	0,29
18:00:00	28,48	28,20	0,27	27,64	0,84	28,42	0,06	28,27	0,21	27,28	1,20
19:00:00	26,79	26,47	0,32	25,91	0,88	26,70	0,10	26,55	0,25	25,56	1,24
20:00:00	25,49	25,11	0,38	24,54	0,94	25,35	0,14	25,19	0,29	24,21	1,28

Fuente: (elaboración propia, 2025).

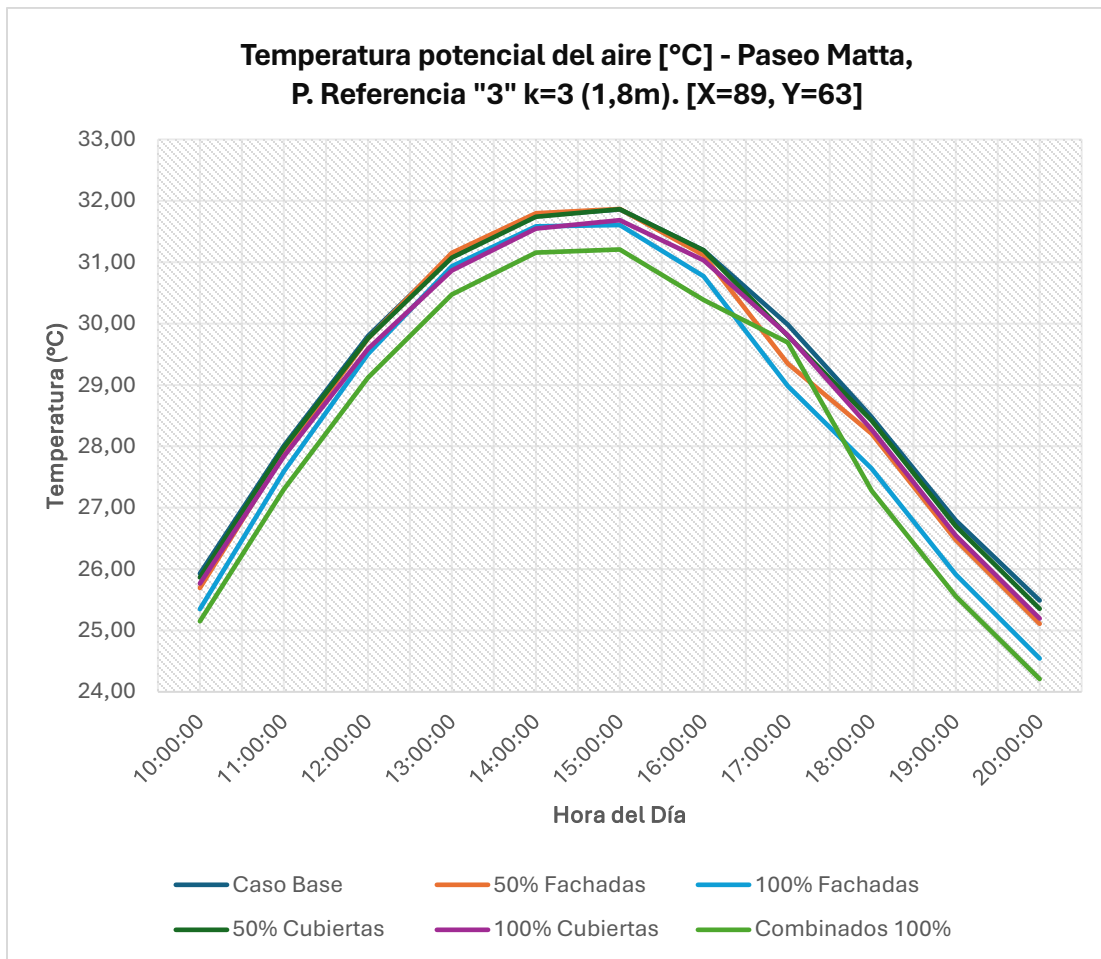


Figura 4.52: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

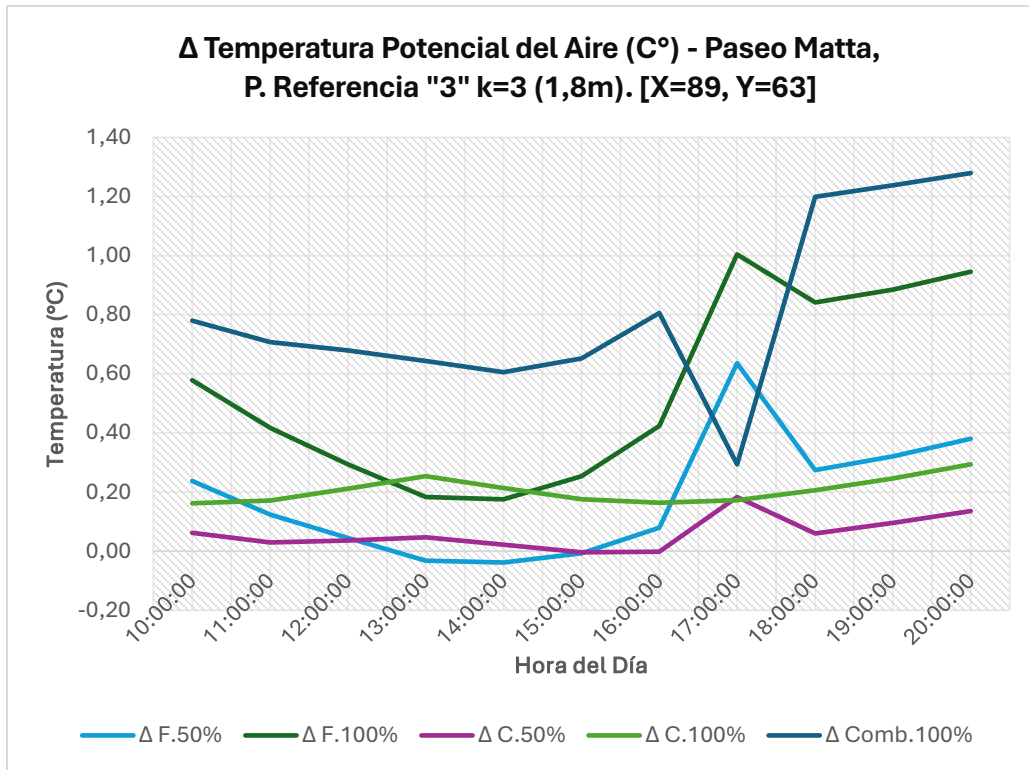


Figura 4.53: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el punto PR3 del Paseo Matta, a 1.8 m de altura, se registró el mejor desempeño térmico del paseo frente a las soluciones con vegetación. Aunque la temperatura base fue alta (alrededor de 31.7 °C a las 14:00 hrs), fue la más baja entre los tres puntos analizados, lo que sugiere condiciones urbanas más favorables, posiblemente por una mejor ventilación o menor acumulación de calor.

A diferencia de PR1 y PR2, este punto no presentó aumentos de temperatura asociados al uso de vegetación durante el mediodía. Por el contrario, las fachadas y cubiertas verdes al 100 % lograron reducir la temperatura en aproximadamente 0.18 °C y 0.21 °C, respectivamente, mientras que la combinación de ambas alcanzó una mejora de 0.60 °C.

A las 17:00 hrs, las fachadas verdes por sí solas lograron una reducción de cerca de 1.0 °C. Sin embargo, el escenario combinado mostró su mayor efecto una hora más tarde, a las 18:00 hrs, con un descenso de 1.20 °C, seguido por el valor más significativo del día a las 19:00 hrs, con 1.24 °C menos en comparación con el caso base.

Esta sinergia indica que, hacia el final del día, la acción conjunta de fachadas verdes (que retienen menos calor) y cubiertas verdes (que disminuyen su emisión térmica) permite una reducción muy efectiva de la temperatura. Incluso a las 20:00 hrs, el enfriamiento combinado se mantenía por encima de 1.2 °C.

f) Resultados Paseo Peatonal Matta (23m):

Tabla 4.20: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia " 1" k=15 (23m). [X=31, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	22,66	22,65	0,01	22,64	0,02	22,66	0,00	22,65	0,01	22,63	0,03
11:00:00	23,59	23,58	0,01	23,57	0,02	23,58	0,01	23,56	0,03	23,53	0,05
12:00:00	24,67	24,67	0,00	24,65	0,01	24,66	0,01	24,62	0,05	24,59	0,07
13:00:00	25,74	25,74	-0,01	25,73	0,01	25,73	0,01	25,67	0,07	25,64	0,10
14:00:00	26,72	26,73	-0,01	26,72	0,00	26,71	0,01	26,65	0,07	26,63	0,09
15:00:00	26,70	26,71	-0,01	26,70	0,00	26,69	0,01	26,65	0,04	26,63	0,07
16:00:00	26,50	26,51	-0,01	26,50	0,00	26,50	0,00	26,48	0,03	26,45	0,05
17:00:00	26,05	26,06	0,00	26,04	0,01	26,05	0,00	26,04	0,01	26,01	0,04
18:00:00	25,44	25,44	0,00	25,43	0,01	25,45	0,00	25,44	0,00	25,41	0,03
19:00:00	24,83	24,83	0,00	24,82	0,01	24,84	-0,01	24,84	0,00	24,81	0,02
20:00:00	24,30	24,30	0,00	24,29	0,01	24,31	0,00	24,30	0,00	24,28	0,02

Fuente: (elaboración propia, 2025).

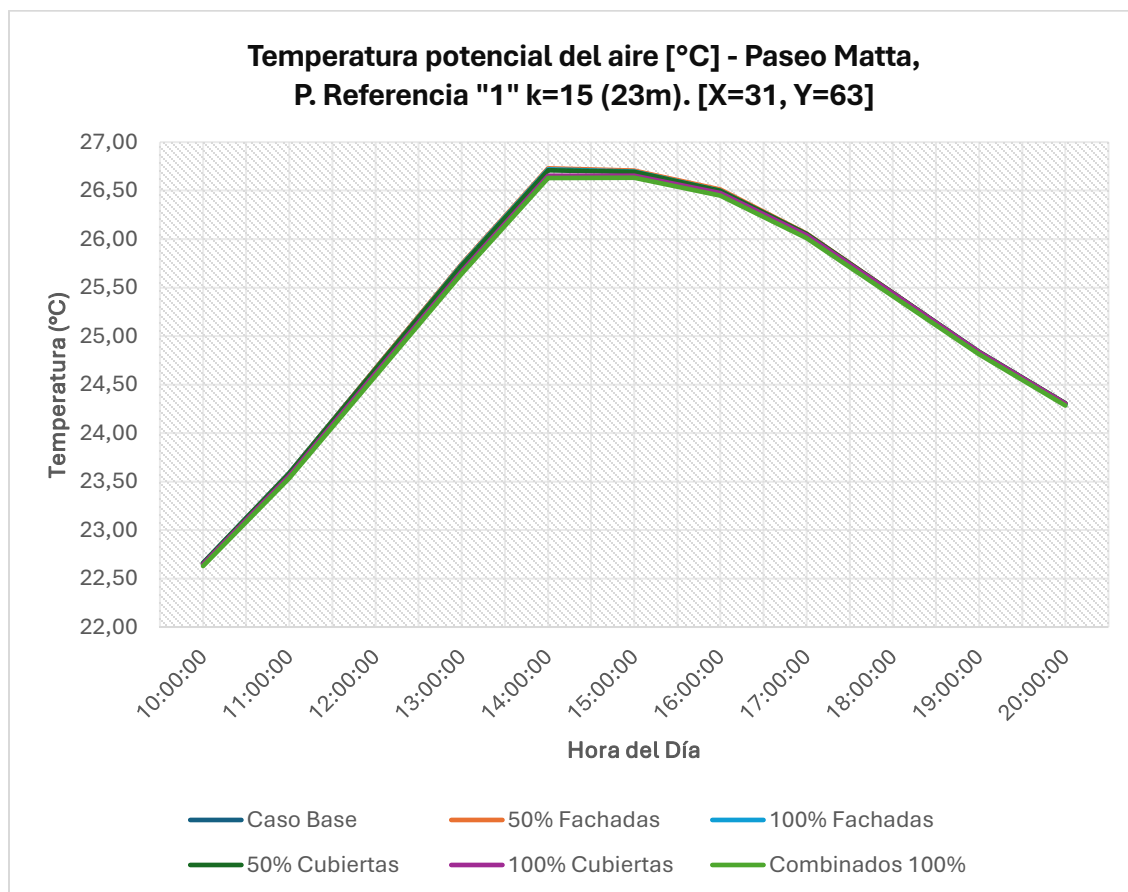


Figura 4.54: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

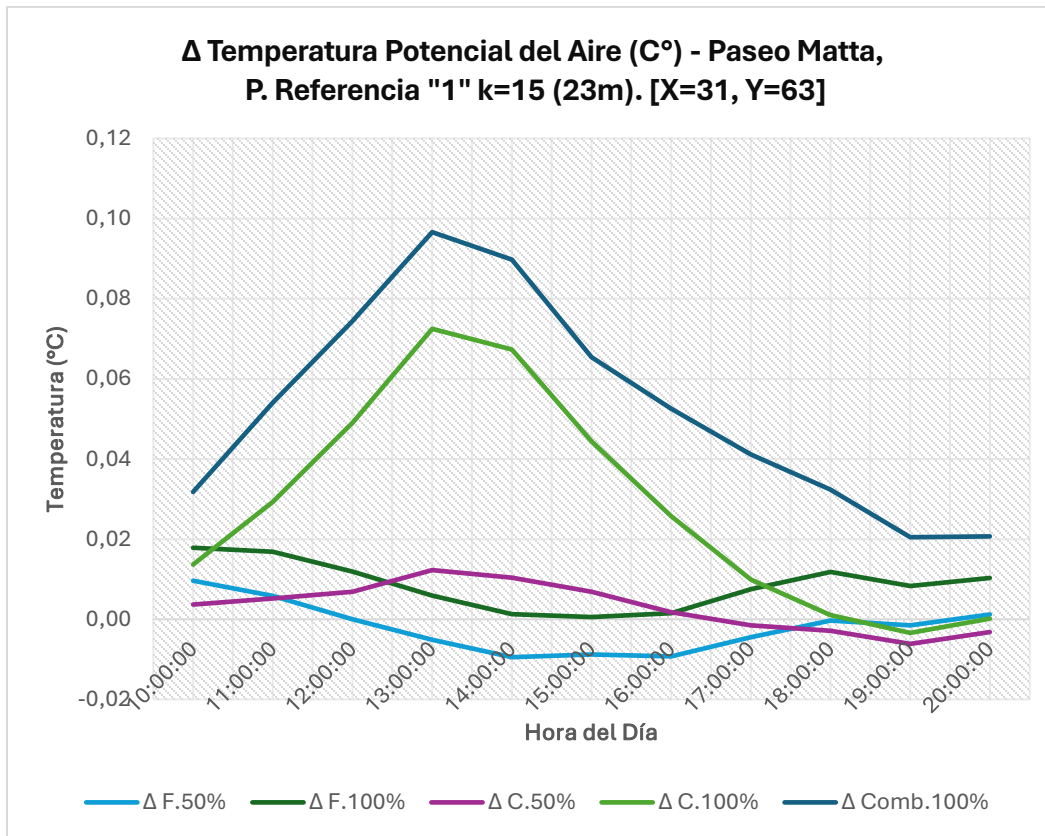


Figura 4.55: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

En el punto PR1 del Paseo Matta, a 23 m de altura, la influencia térmica de la infraestructura verde fue muy limitada. Las temperaturas base oscilaron entre aproximadamente 24 °C en la mañana y 26.7 °C en la tarde, sin mostrar grandes variaciones a lo largo del día.

Las intervenciones con vegetación, tanto en fachadas verdes como en cubiertas verdes, no provocaron cambios significativos en la temperatura del aire a esta altitud. Las reducciones más altas registradas con cubiertas verdes al 100 % apenas llegaron a entre 0.07 y 0.10 °C, valores que entran dentro del margen de error y reflejan un comportamiento prácticamente neutro.

Esto se debe a que en esta capa superior del entorno urbano hay una circulación de aire muy activa, influida por el viento costero y la mezcla atmosférica natural, lo que dificulta que la vegetación tenga un efecto más efectivo a esa altura. Además, la menor altura de los edificios en este sector puede impedir que la vegetación se note a esos niveles.

Tabla 4.21: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "2" k=15 (23m). [X=63, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	22,99	22,96	0,02	22,93	0,06	22,94	0,05	22,88	0,11	22,81	0,17
11:00:00	24,05	24,03	0,02	23,98	0,06	23,98	0,07	23,87	0,18	23,79	0,26
12:00:00	25,22	25,21	0,01	25,17	0,06	25,12	0,10	24,96	0,26	24,89	0,34
13:00:00	26,34	26,34	0,00	26,29	0,04	26,20	0,13	26,00	0,33	25,93	0,41
14:00:00	27,29	27,30	-0,01	27,26	0,04	27,17	0,12	27,00	0,29	26,93	0,37
15:00:00	27,32	27,32	0,00	27,28	0,04	27,22	0,10	27,07	0,25	26,99	0,33
16:00:00	27,07	27,07	0,00	27,01	0,06	26,98	0,09	26,86	0,21	26,77	0,30
17:00:00	26,53	26,51	0,02	26,46	0,07	26,46	0,07	26,36	0,17	26,25	0,28
18:00:00	25,78	25,75	0,03	25,70	0,08	25,71	0,07	25,63	0,15	25,54	0,24
19:00:00	24,99	24,96	0,02	24,93	0,05	24,94	0,04	24,88	0,11	24,81	0,18
20:00:00	24,37	24,35	0,02	24,33	0,04	24,33	0,04	24,28	0,09	24,22	0,15

Fuente: (elaboración propia, 2025).

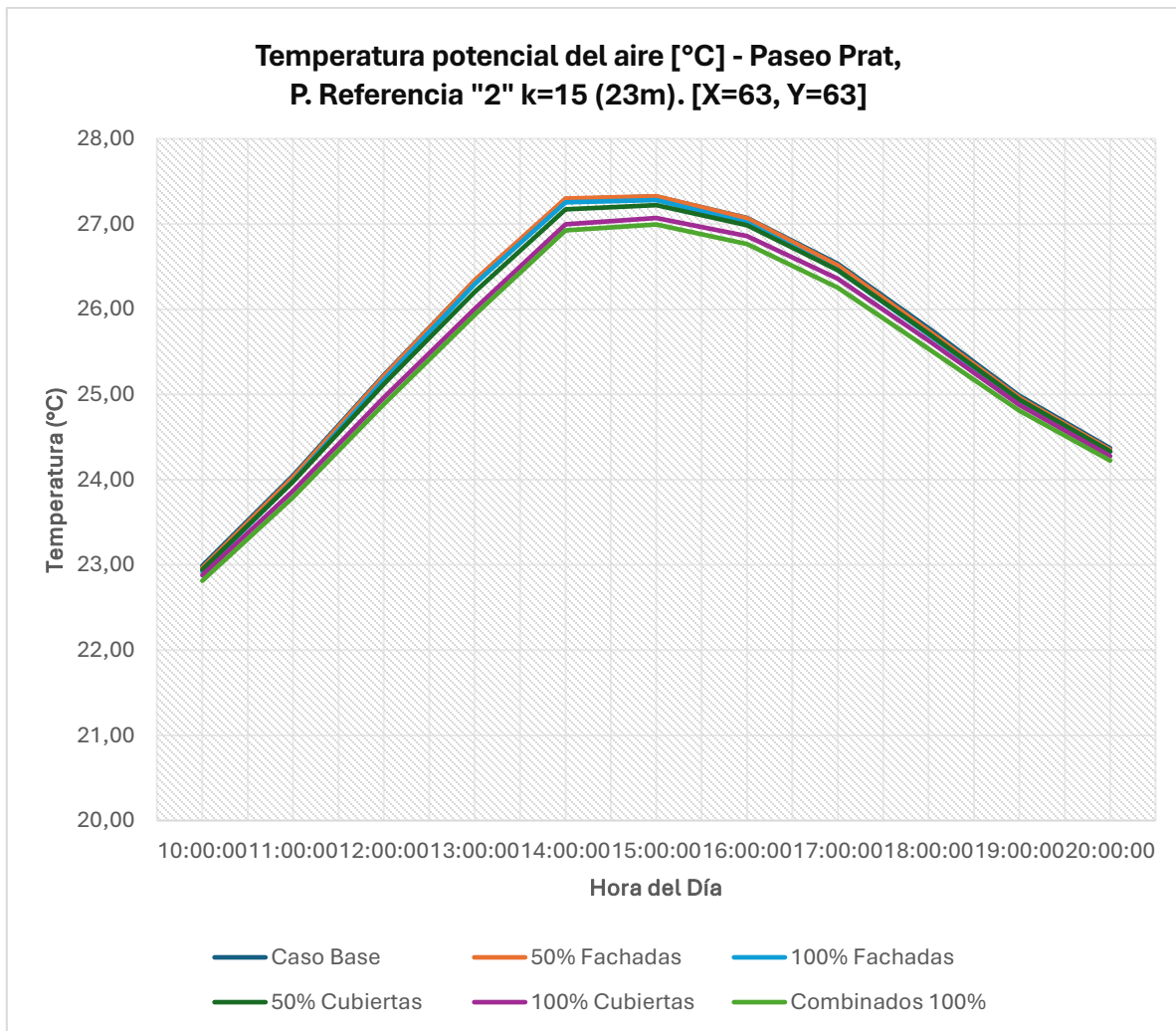


Figura 4.56: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

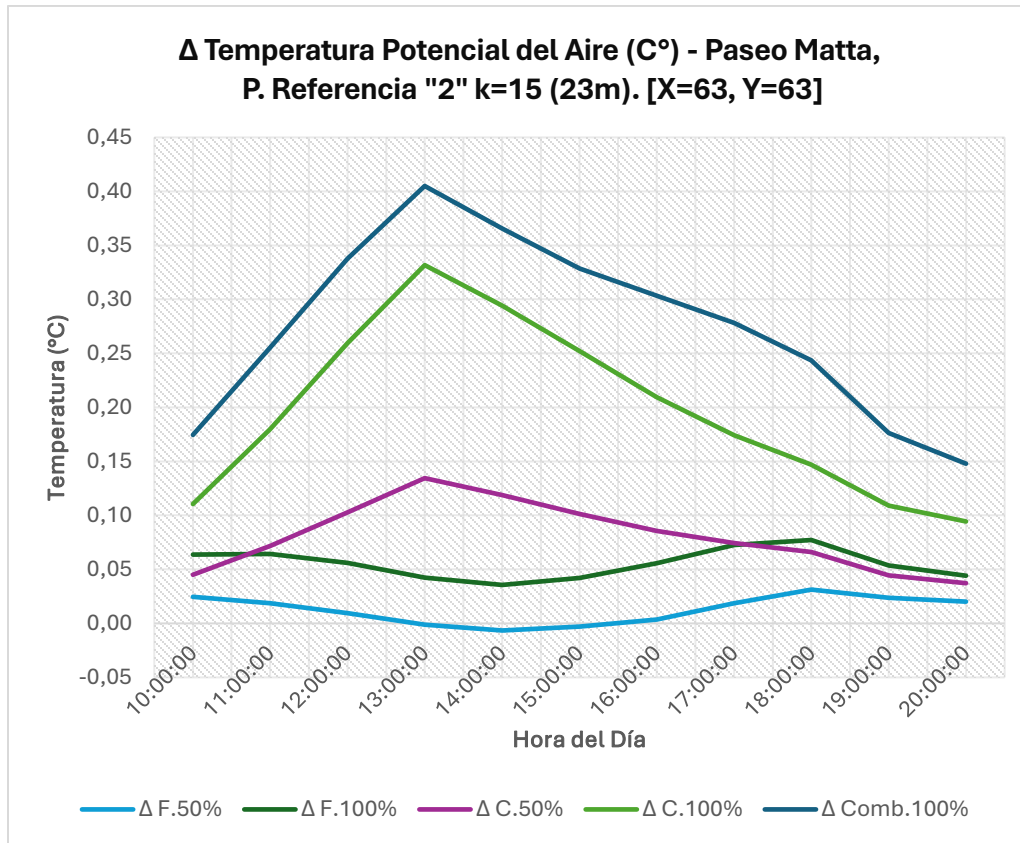


Figura 4.57: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A esta altura, la infraestructura verde tuvo un efecto más visible que en PR1. Las fachadas verdes no generaron cambios significativos (menos de 0.1 °C durante todo el día), ya que su acción está enfocada en niveles más cercanos al suelo y no alcanza directamente estas cotas.

En cambio, las cubiertas verdes sí mostraron una capacidad real para enfriar el aire cercano durante las horas de mayor sol. Entre las 11:00 y las 15:00 hrs, una cubierta verde al 100 % logró reducir la temperatura entre 0.25 y 0.37 °C, alcanzando un máximo de 0.41 °C a las 13:00 hrs frente al caso base. Aunque estas reducciones son discretas, demuestran un efecto directo y positivo de la vegetación sobre cubierta en el aire inmediato.

La combinación de cubiertas y fachadas verdes amplificó un poco este beneficio, alcanzando una reducción máxima cercana a los 0.50 °C durante las horas centrales. Luego, el efecto fue bajando gradualmente: a las 15:00 hrs la diferencia fue de unos 0.33 °C, bajó a 0.28 °C a las 17:00 hrs y cerró el día con cerca de 0.18 °C a las 19:00 hrs. Al finalizar la jornada, a las 20:00 hrs, las temperaturas entre todos los escenarios eran prácticamente iguales, con diferencias menores a 0.05 °C, lo que refleja que el aire en altura tiende a estabilizarse una vez que desaparece la radiación solar.

Tabla 4.22: Temperatura potencial del aire [°C], Paseo Matta, Punto de Referencia "3" k=15 (23m). [X=89, Y=63].

Hora	Caso Base	50% Fachadas	Δ F.50%	100% Fachadas	Δ F.100%	50% Cubiertas	Δ C.50%	100% Cubiertas	Δ C.100%	Combinados 100%	Δ Comb.100%
10:00:00	23,16	23,12	0,04	23,06	0,10	23,09	0,07	23,00	0,16	22,91	0,25
11:00:00	24,24	24,21	0,03	24,14	0,09	24,14	0,10	24,00	0,24	23,90	0,34
12:00:00	25,41	25,39	0,02	25,33	0,08	25,27	0,13	25,08	0,32	24,98	0,43
13:00:00	26,49	26,49	0,00	26,42	0,07	26,32	0,17	26,09	0,40	25,99	0,50
14:00:00	27,40	27,41	0,00	27,35	0,05	27,26	0,14	27,05	0,35	26,96	0,44
15:00:00	27,52	27,52	0,00	27,46	0,07	27,40	0,13	27,21	0,31	27,11	0,41
16:00:00	27,29	27,28	0,01	27,20	0,09	27,18	0,11	27,02	0,27	26,89	0,40
17:00:00	26,78	26,66	0,12	26,38	0,40	26,75	0,03	26,53	0,24	26,55	0,23
18:00:00	26,00	25,95	0,05	25,86	0,14	25,89	0,10	25,77	0,23	25,62	0,38
19:00:00	25,13	25,09	0,04	25,02	0,11	25,04	0,09	24,94	0,19	24,82	0,31
20:00:00	24,47	24,43	0,04	24,38	0,09	24,39	0,08	24,29	0,18	24,20	0,27

Fuente: (elaboración propia, 2025).

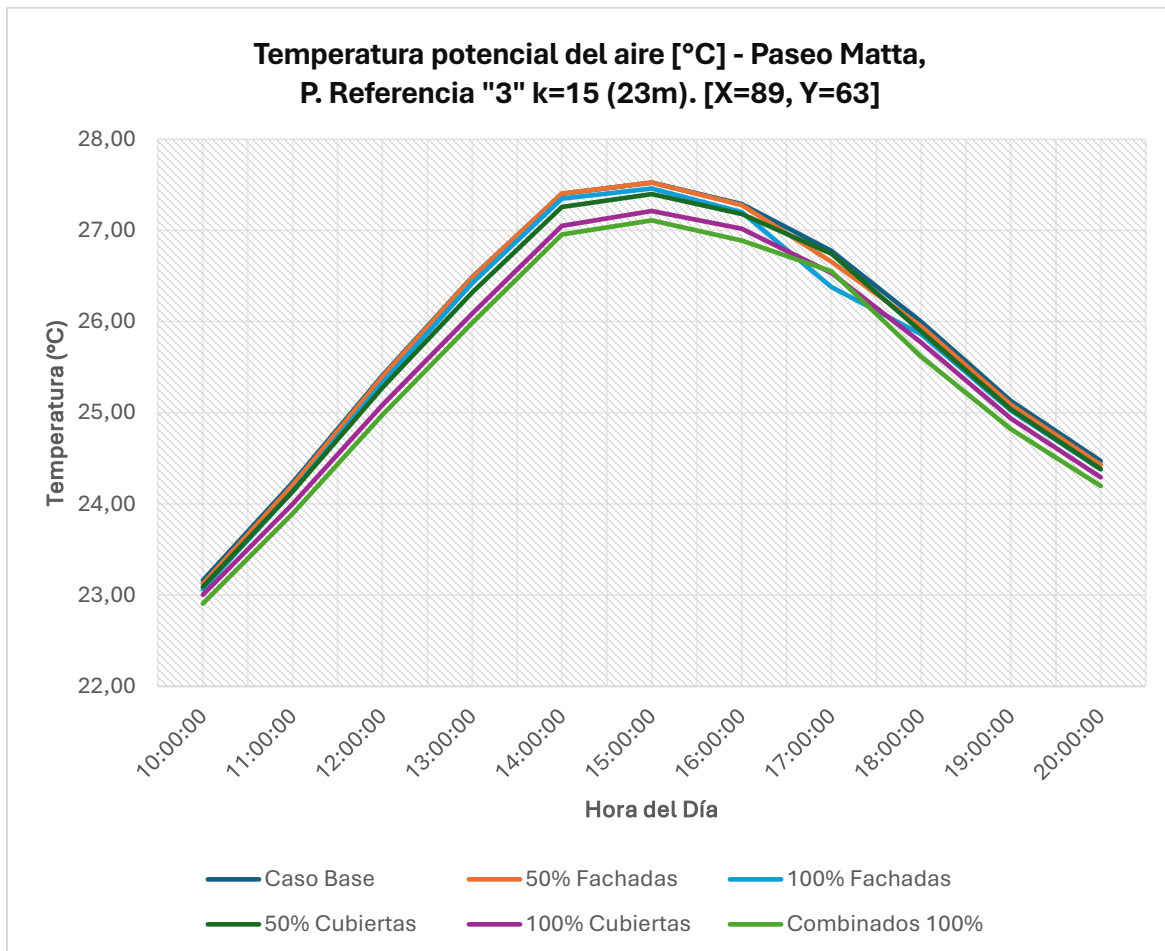


Figura 4.58: Gráfico Temperatura del aire (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

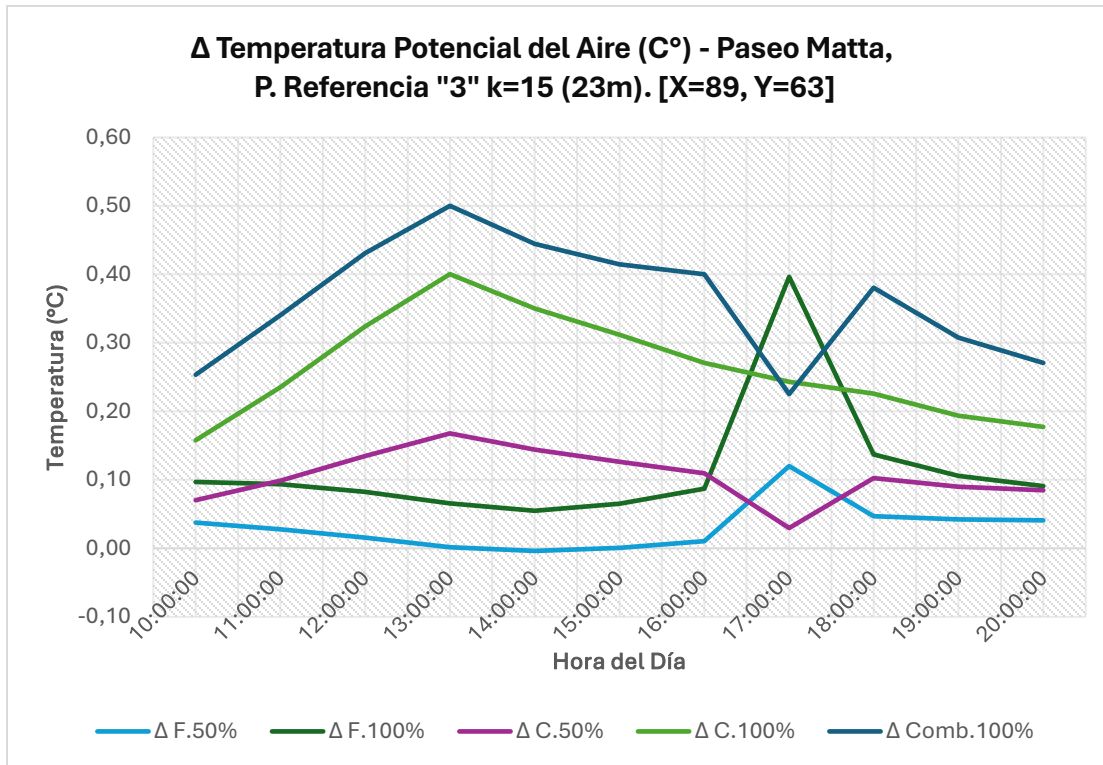


Figura 4.59: Gráfico diferencia térmica (C°) para cada hora analizada.

Fuente: (elaboración propia, 2025).

A 23 m de altura, el punto PR3 del Paseo Matta presentó una condición térmica moderada, con una temperatura base máxima de aproximadamente 27.4 °C entre las 14:00 y 15:00 hrs, similar a la registrada en PR2 a esta misma cota.

Las cubiertas verdes fueron las únicas que mostraron un efecto mitigador claro: durante las horas centrales del día (13:00–14:00 hrs), una cubierta verde al 100 % logró reducir la temperatura del aire entre 0.40 y 0.50 °C, siendo este uno de los descensos más significativos registrados en altura dentro del sector. Este buen desempeño sugiere que el entorno inmediato de PR3 con más cubiertas expuestas o condiciones locales favorables potenció el efecto de enfriamiento.

En contraste, las fachadas verdes no tuvieron impacto sobre la temperatura del aire a esta altitud, con diferencias siempre por debajo de ± 0.05 °C, lo que reafirma su escasa influencia en capas elevadas del entorno urbano.

La intervención combinada replicó en gran medida el comportamiento de las cubiertas verdes, alcanzando una reducción máxima de unos 0.41 °C a las 15:00 hrs. Después de ese punto, el efecto mitigador comenzó a disminuir de forma progresiva: fue de 0.40 °C a las 16:00 hrs, bajó a 0.27 °C a las 17:00 hrs y quedó por debajo de 0.2 °C después de las 18:00 hrs. Al finalizar la jornada, a las 20:00 hrs, la diferencia frente al escenario base fue de apenas 0.09 °C, lo que refleja una homogeneización térmica del aire en altura al caer la noche.

4.2.7. Síntesis de resultados térmicos (Paseo Arturo Prat)

Los tres puntos de referencia del Paseo Arturo Prat mostraron patrones consistentes de mitigación térmica gracias al uso de infraestructura verde, aunque con variaciones importantes en la magnitud del enfriamiento según las condiciones microclimáticas de cada sector.

El punto central del paseo (PR2) fue el más cálido en todos los niveles, alcanzando temperaturas de alrededor de 33 °C a nivel del suelo y entre 32 y 33 °C a 1.8 m durante las horas de mayor carga térmica. Esta diferencia de 3 a 4 °C en comparación con PR1 y PR3 indica que PR2 se encuentra en un tramo urbano más cerrado, con menor ventilación transversal y mayor exposición solar directa, lo que favorece una isla de calor local más intensa.

En contraste, los extremos del paseo (PR1 al sur y PR3 al norte) presentaron temperaturas base más moderadas, entre 29 y 30 °C. Esto probablemente se relaciona con una mejor ventilación cruzada, influida por la cercanía a calles transversales y la orientación norte-sur del eje, que permite alternancia de sombra según la ubicación de los edificios. Estas condiciones iniciales también incidieron en la eficacia de las soluciones vegetales.

En términos generales, las intervenciones verdes en el Paseo Prat no generaron aumentos térmicos en ningún momento. Incluso en las horas críticas del mediodía, el efecto fue neutro o levemente refrescante. Las cubiertas verdes mostraron su mejor desempeño entre las 12:00 y 15:00 hrs, especialmente en sectores bien expuestos al cielo. En PR3, por ejemplo, una cubierta verde al 100 % redujo la temperatura del aire entre 0.6 y 0.7 °C, mientras que en PR2 el mismo tipo de intervención produjo un descenso más modesto, entre 0.2 y 0.3 °C.

Las fachadas verdes comenzaron a mostrar efectos más notables hacia la tarde, cuando las superficies verticales acumulaban y liberaban calor. En ese periodo, las fachadas verdes ayudaron a mantener el aire más fresco: a las 18:00 hrs, se registró una reducción de aproximadamente 0.5 °C en PR2 y hasta 0.8 °C en PR3. En PR1, donde la ventilación es más eficiente y los muros acumulan menos calor, el beneficio fue algo menor, con descensos entre 0.3 y 0.4 °C.

La solución combinada mostró una sinergia positiva en los tres puntos. Fue el escenario más eficaz en términos de reducción térmica. En PR1 y PR3, esta estrategia logró efectos sostenidos desde temprano, con reducciones de entre 0.8 y 1.1 °C entre las 13:00 y 20:00 hrs. En PR2, la combinación tuvo un efecto más discreto al mediodía, pero hacia las 18:00 hrs alcanzó una baja de 0.8 °C, superando los resultados de cada solución aplicada por separado (~0.5 °C).

Destaca especialmente el desempeño de PR3, donde se registró la mayor reducción de todo el paseo: una baja de aproximadamente 1.2 °C a las 20:00 hrs a 0.2 m de altura. Esto

confirma su condición como el punto con mayor beneficio térmico. En comparación, PR2 alcanzó un máximo de 0.8 °C y PR1 se mantuvo en el rango de 0.8 a 0.9 °C, lo que refleja una eficacia intermedia. Estas diferencias refuerzan la importancia de las condiciones locales como la apertura del cañón urbano, altura de las edificaciones y ventilación disponible en el impacto de las soluciones basadas en vegetación.

Como complemento a la extracción de los resultados de manera numérica, se incluye la siguiente figura 4.60 Que muestra una comparación visual entre el escenario base y el escenario combinado en corte vertical sobre el eje del Paseo Arturo Prat. La figura permite observar de forma clara el efecto refrescante de la intervención vegetal en el entorno peatonal, así como también una reducción térmica apreciable en la capa de aire situada sobre las cubiertas (relevante para enfriamiento interior y ahorros energéticos), evidenciando el aporte del sistema a distintas alturas.

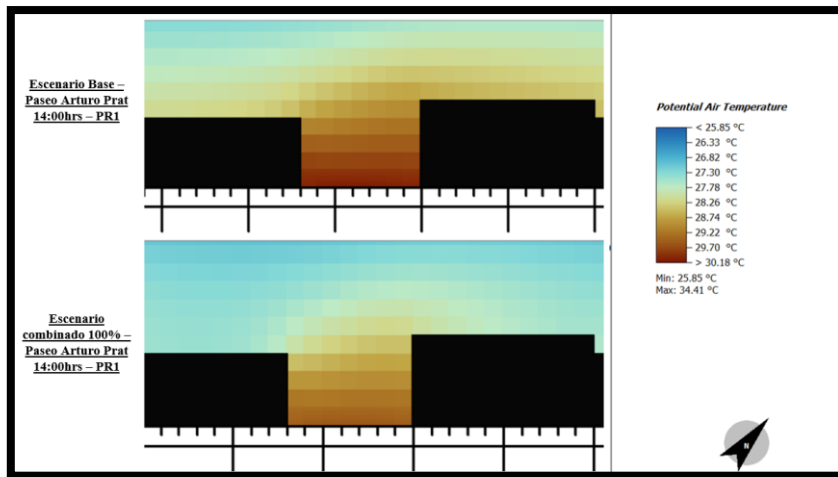


Figura 4.60: comparación vertical de temperaturas en el paseo Arturo Prat en PR1.

Fuente: (elaboración propia, Envimet, 2025).

En altura (23 m), los beneficios fueron más discretos, pero aún medibles. Las cubiertas verdes lograron reducir la temperatura del aire durante el mediodía entre 0.3 y 0.6 °C, siendo PR3 nuevamente el punto más beneficiado. Este efecto fue disminuyendo gradualmente hacia la tarde, influido por el viento costero y la tendencia a la estabilización térmica en capas altas. Aun así, los resultados indican que incluso en niveles elevados, las cubiertas verdes pueden aportar levemente al enfriamiento ambiental.

En resumen, los resultados del Paseo Prat demuestran que incorporar vegetación en fachadas y cubiertas es una estrategia efectiva para mitigar la isla de calor urbana, especialmente a escala peatonal. Las reducciones térmicas registradas oscilaron entre 0.5 y 1.2 °C, con mayor impacto en sectores ventilados o bien expuestos al cielo. Las diferencias entre puntos refuerzan la necesidad de considerar variables clave (orientación, forma urbana y dinámica del viento) al diseñar e implementar soluciones vegetales en el espacio público.

4.2.8 Síntesis de resultados térmicos (Paseo Manuel Matta)

El Paseo Matta presentó desafíos térmicos más intensos que el Paseo Prat, en parte debido a su orientación este-oeste y a una configuración urbana que favorece la exposición directa al sol durante gran parte del día. Los puntos PR1 (poniente) y PR2 (centro) registraron las temperaturas más altas del estudio, alcanzando picos de aproximadamente 33.8 °C y 33.4 °C a nivel del suelo, respectivamente. Estas cifras reflejan una fuerte acumulación de calor y escasa ventilación. En cambio, PR3 (oriente) mostró un pico ligeramente menor, cercano a los 32.3 °C, posiblemente gracias a una mayor apertura hacia calles transversales o a la presencia ocasional de sombra.

Durante las horas centrales del día (12:00–15:00 hrs), las intervenciones con infraestructura verde en PR1 y PR2 no lograron un enfriamiento sustancial; en algunos casos, incluso se registraron ligeros aumentos térmicos (entre +0.1 y +0.2 °C), especialmente cuando las coberturas eran parciales. Este comportamiento se relaciona con la limitada capacidad evaporativa del *Sedum sediforme* bajo radiación solar intensa, así como con posibles alteraciones en los flujos de aire o cambios en el albedo de superficies que antes eran más reflectantes. Incluso con vegetación al 100 %, el efecto al mediodía fue generalmente neutro. En contraste, PR3 tuvo un desempeño más favorable durante ese mismo periodo: entre las 13:00 y 14:00 hrs, una cubierta verde al 100 % logró un enfriamiento de hasta 0.6 °C, sin registrar penalizaciones térmicas.

Durante la tarde, los beneficios de la vegetación se hicieron más evidentes. A partir de las 16:00 hrs, las fachadas verdes comenzaron a reducir la temperatura del aire de forma significativa, especialmente en PR2 y PR3. En PR2, las fachadas verdes al 100 % lograron una reducción de unos 0.5 °C a las 17:00 hrs, que aumentó a 0.7 °C a las 18:00 hrs. En PR3, este efecto fue aún más notorio, alcanzando hasta 0.9 °C hacia el final de la jornada. Por su parte, las cubiertas verdes mostraron un rendimiento más discreto cuando se usaron por separado (entre 0.1 y 0.3 °C en sus mejores momentos), pero aumentaron su eficacia al combinarse con las fachadas.

La estrategia combinada de fachadas y cubiertas verdes evidenció la mayor capacidad de mitigación térmica, especialmente entre las 18:00 y 20:00 hrs. En PR2, esta combinación logró una reducción de aproximadamente 0.9 °C al atardecer, superando el rendimiento de cada intervención por separado. En PR3, el efecto combinado fue aún más fuerte: entre las 18:00 y 20:00 hrs, la temperatura del aire bajó hasta 1.2 °C frente al caso base, marcando el mayor impacto observado en todo el estudio. Esta sinergia muestra que, bajo condiciones adecuadas, las cubiertas verdes comienzan a aportar de forma más activa al enfriamiento del aire conforme avanza la tarde, sumándose al efecto temprano de las fachadas verdes.

Al comparar los tres puntos, PR3 fue el más beneficiado en términos absolutos, con un enfriamiento promedio diario cercano a 0.5 °C y un pico de más de 1 °C en la noche. PR2,

pese a su condición térmica inicial más severa, también alcanzó reducciones importantes al final del día (entre 0.8 y 0.9 °C con la estrategia combinada). PR1, en cambio, mostró los efectos más modestos: a las 20:00 hrs, el enfriamiento combinado apenas superó los 0.3 °C, probablemente porque la brisa costera ayudó de forma natural a moderar la temperatura, reduciendo la necesidad de intervención vegetal.

Para entender también el análisis de manera visual, en la figura 4.61 se incluye la siguiente representación vertical del perfil térmico en el punto PR3 del Paseo Manuel Matta, comparando el escenario base con el escenario combinado al 100 %. Esta visualización permite observar claramente la reducción térmica alcanzada gracias a la infraestructura verde, tanto a nivel peatonal como en las capas de aire sobre las cubiertas, al igual que el modelo anterior.

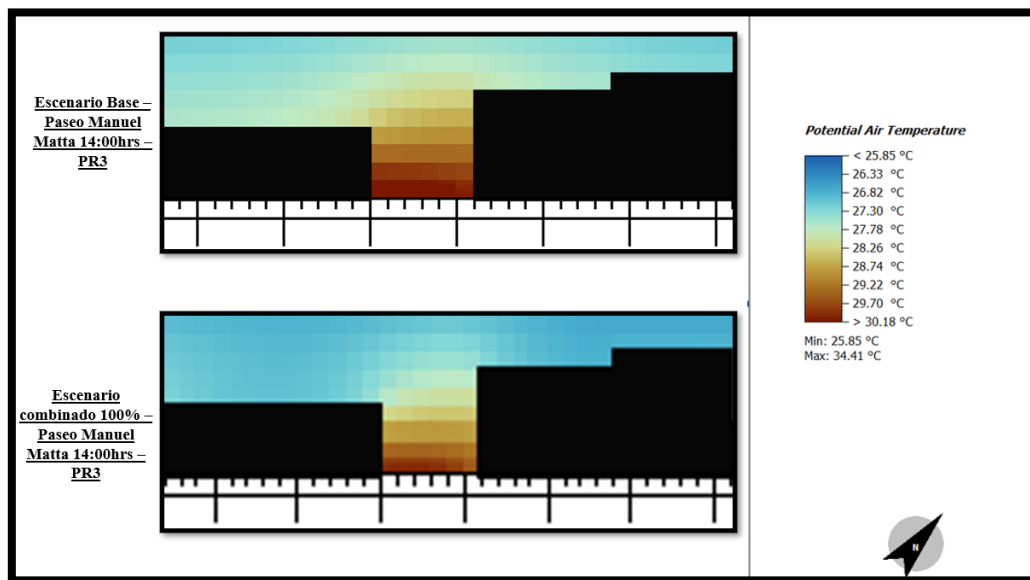


Figura 4.61: comparación vertical de temperaturas en el paseo Manuel Matta en PR3.

Fuente: (elaboración propia, Envimet, 2025).

En resumen, la efectividad de las soluciones basadas en vegetación en el Paseo Matta dependió en gran medida del horario y del punto específico. En los tramos más cerrados (PR1 y PR2), el impacto fue limitado durante el mediodía, incluso levemente negativo en algunos casos, pero hacia el atardecer su aporte fue clave para refrescar el ambiente, sobre todo en la zona oriental. Estos hallazgos subrayan la importancia de adaptar el diseño urbano al contexto local: seleccionar especies vegetales con alta capacidad de evapotranspiración diurna, incorporar elementos de sombra adicionales y considerar la geometría del espacio son factores esenciales para maximizar el efecto de la vegetación en cañones urbanos orientados de este a oeste en climas áridos extremos.

4.2.9. Síntesis de resultados

Este apartado presenta una síntesis comparativa de los resultados térmicos obtenidos mediante simulaciones en los paseos peatonales Arturo Prat y Matta, considerando las condiciones climáticas locales, la geometría urbana y la implementación de infraestructura verde. El objetivo no es solo contrastar ambos casos de estudio, sino también validar los resultados en relación con la literatura científica reciente sobre soluciones basadas en la naturaleza y su impacto sobre la temperatura del aire en entornos urbanos áridos.

Al comparar ambos paseos, se evidencian diferencias claras atribuibles principalmente a la orientación urbana, la exposición solar directa y la dinámica de ventilación natural. El Paseo Arturo Prat, con orientación predominante norte-sur, presentó temperaturas diurnas más moderadas en el escenario base, registrando diferencias promedio de entre 2 y 4 °C respecto del Paseo Matta (orientado este-oeste). Por ejemplo, en el punto PR1-Prat se observaron 29.5 °C frente a 33.8 °C en PR1-Matta a las 14:00 hrs. Esta diferencia se explica porque la orientación norte-sur genera alternancia de sombra en ambas fachadas a lo largo del día, mientras que la orientación este-oeste en Matta deja expuesto todo el cañón urbano a radiación solar directa durante las horas críticas. Además, las condiciones locales de viento favorecen la ventilación cruzada en el corredor de Prat, mientras que en Matta el flujo de viento a pesar de ser paralelo al paseo, tiende a conservar su trayectoria longitudinal sin generar acumulaciones ni remolinos en el cañón, lo que contribuye al estancamiento térmico.

Estas condiciones iniciales influyeron directamente en el desempeño de la infraestructura verde. En el Paseo Prat, la vegetación entregó un enfriamiento sostenido, con reducciones promedio de 0.5 °C durante el mediodía y hasta 1.2 °C hacia el final de la tarde, como se observó en el punto PR3. En cambio, en Paseo Matta, los efectos fueron más heterogéneos: durante el tramo de mayor radiación (11:00–15:00 hrs), se registraron beneficios reducidos o incluso leves aumentos térmicos en puntos como PR1 y PR2, debido al bajo rendimiento evaporativo del Sedum bajo estrés térmico y a la falta de sombra estructural. Sin embargo, hacia la tarde ambos paseos convergieron en resultados: entre las 17:00 y 20:00 hrs, se observaron reducciones de entre 0.8 y 1.2 °C gracias al aporte conjunto de fachadas y cubiertas verdes, coincidiendo con la caída de la radiación solar y la inversión del balance térmico.

Desde un enfoque cuantitativo, el Paseo Matta alcanzó reducciones máximas de hasta 1.3 °C en sus mejores escenarios, especialmente en horario nocturno (PR3), superando levemente los valores observados en Prat (1.1 °C). Esta diferencia se explica por el mayor punto de partida térmico de Matta, lo que permite un mayor margen de mitigación. En promedio, las cubiertas verdes contribuyeron con una reducción del 20–30 % del sobrecalentamiento diurno (aproximadamente 1 °C frente a un aumento base de 3 °C), mientras que las fachadas verdes aportaron entre un 10 y 20 % adicional. En conjunto, la

estrategia combinada logró reducir hasta un 30–40 % del exceso térmico, cifras que coinciden con lo reportado en la literatura especializada.

El Estudio de Li et al. (2024) indica que las soluciones verdes urbanas pueden reducir la temperatura del aire entre 0.5 y 1.0 °C, en línea con los resultados obtenidos en los paseos Prat y Matta. De manera similar, Castleton et al. (2010) documentan reducciones de entre 1 y 3 °C en el aire circundante gracias a cubiertas verdes, mientras que Oquendo-Di Cosola et al. (2023) reportan un descenso de hasta 1.2 °C en el aire junto a fachadas verdes activas, particularmente a las 16:00 hrs en verano en un clima mediterráneo continental. Los resultados simulados en ambos paseos se encuentran dentro de esos rangos, reforzando su validez técnica, en la figura 4.62 de a continuación se puede visualizar de manera grafica estas comparaciones.

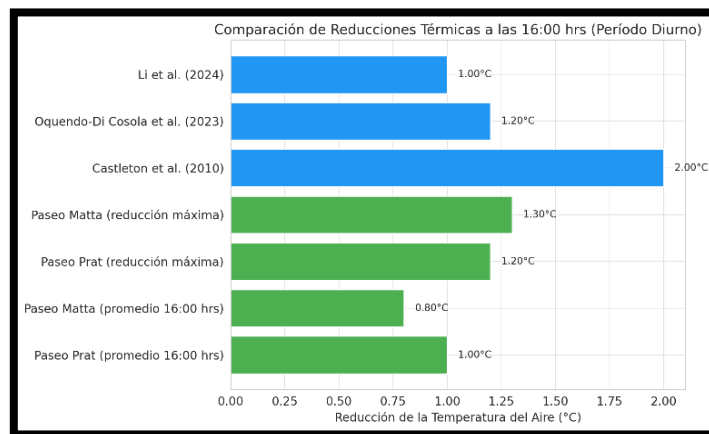


Figura 4.62: Gráfico Comparación de resultados con literatura referenciada. (C°).

Fuente: (elaboración propia, 2025).

También se observó una diferencia de comportamiento según el momento del día. Las cubiertas verdes resultaron más efectivas durante las horas de mayor radiación (10:00–16:00 hrs), mientras que las fachadas verdes mantuvieron su efecto durante la tarde y noche, evitando que los muros recalienten el aire. Esta diferencia funcional sugiere que ambas estrategias se complementan: mientras las cubiertas verdes limitan la ganancia térmica durante el día, las fachadas verdes reducen la reemisión térmica en horas vespertinas.

En definitiva, la comparación entre ambos paseos pone en evidencia la relevancia del diseño urbano-climático para maximizar la efectividad de las soluciones verdes. En corredores orientados de norte a sur como Prat, la infraestructura verde mostró una efectividad constante y sin efectos adversos; en corredores este-oeste como Matta, su desempeño fue más limitado durante el mediodía, pero logró un impacto destacado al final del día. En ambos casos, las intervenciones permitieron reducir el microclima urbano entre 0.5 y 1.2 °C, aportando a la creación de espacios peatonales más confortables y resilientes frente al calentamiento urbano.

4.3. Resultados Objetivo Específico N°3

En este capítulo se presentan los resultados correspondientes al Objetivo Específico N°3, enfocado en evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar soluciones basadas en infraestructura verde en zonas urbanas críticas del centro de Antofagasta. El análisis considera los efectos térmicos obtenidos previamente, con el propósito de determinar no solo la efectividad de las cubiertas verdes extensivas y las fachadas verdes modulares en cuanto a reducción de temperatura, sino también su factibilidad desde el punto de vista constructivo, operativo y financiero.

Para ello, se incluye primero una guía técnica que resume los principales aspectos de cada solución: características constructivas, materiales empleados, procesos de instalación y requerimientos de riego y mantenimiento, siempre teniendo en cuenta las condiciones climáticas particulares de la ciudad. Posteriormente, se desarrollan dos análisis económicos complementarios. El primero se centra en la inversión inicial, calculada mediante costos unitarios directos bajo el formato APU; el segundo aborda los costos operativos anuales asociados al mantenimiento y al consumo hídrico.

Finalmente, se estima el beneficio económico que podría lograrse a partir de la disminución térmica promedio de 1 °C, tomando como referencia literatura especializada en contextos áridos. Según este análisis, se proyecta un ahorro energético potencial de hasta un 20 % para cubiertas verdes y un 15 % para fachadas verdes, respaldado por estudios recientes como los de Wahba et al. (2018), Jamei et al. (2023) y El-Zoklah & Refaat (2021), que reportan reducciones del consumo energético anual por climatización en rangos comparables bajo condiciones climáticas similares.

Estos tres aspectos (la inversión inicial, los costos operativos y el ahorro energético) se analizan de manera conjunta para obtener una visión más completa del rendimiento económico de cada solución. Al cruzar estos datos, se busca determinar si los beneficios a largo plazo compensan la inversión y el mantenimiento requerido, ofreciendo así una base sólida para la toma de decisiones técnicas y urbanas.

4.3.1. Guía técnica para cubierta verde extensiva con *Sedum sediforme*

Considerando las condiciones climáticas de Antofagasta y los requerimientos del presente estudio, se ha definido la aplicación de cubiertas verdes extensivas con vegetación suculenta, específicamente el *Sedum sediforme*, como la solución más eficiente desde el punto de vista técnico y operativo. Esta elección responde a criterios de resistencia a la sequía, bajo requerimiento hídrico y mínima mantención, lo cual ha sido validado tanto por la bibliografía revisada como por estudios aplicados en condiciones urbanas y semiáridas similares.

La siguiente guía se elabora a partir de los lineamientos técnicos proporcionados por dos referentes especializados en sistemas verdes urbanos: la empresa chilena “ZinCo Techos Verdes” y “Toxement”, integrando buenas prácticas nacionales y criterios técnicos establecidos en la normativa chilena NCh3626:2020 para techos verdes, la principal composición de la cubierta se aprecia en la siguiente figura 4.63.

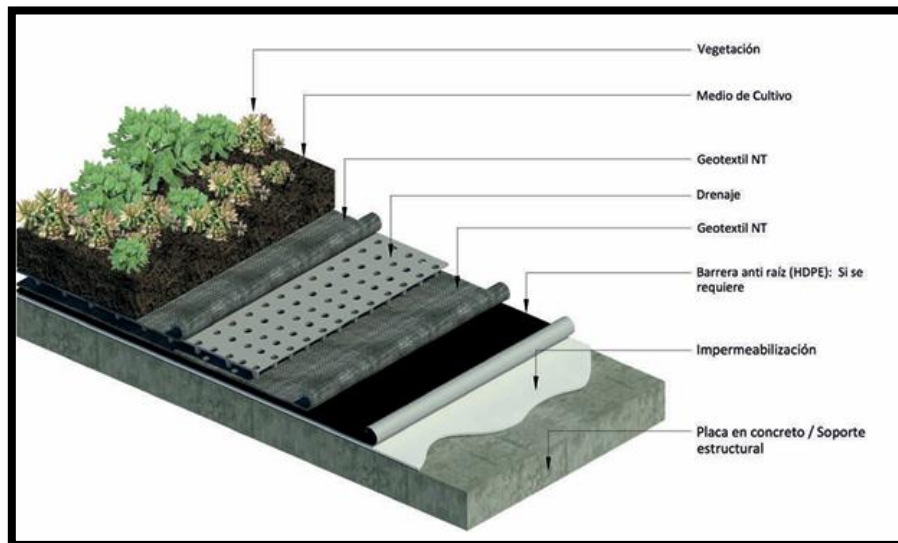


Figura 4.63. Componentes de una cubierta verde extensiva

Fuente: (Guía para la especificación de una cubierta verde, Toxement ,2020).

a) Especificaciones técnicas de materiales.

Tabla 4.23. Especificaciones técnicas de materiales para cubierta verde

Componente	Especificaciones principales del material
Impermeabilización	Membrana bicapa modificada SBS (mínimo 3 + 4 mm), o membranas sintéticas tipo PVC (≥ 1.2 mm), resistentes a raíces (certificación FLL o similar).
Barrera antiraíz	Lámina HDPE o PVC $\geq 0,5$ mm. Evita penetración radicular hacia la impermeabilización. Debe cubrir toda la superficie y elevarse en perímetros.
Capa drenante	Lámina nodular prefabricada de polietileno (altura 20 mm), con capacidad de almacenamiento ($\sim 3-5$ L/m ²) y alta compresibilidad (>200 kPa).
Geotextil filtro	Geotextil no tejido de polipropileno (150–300 g/m ²), apertura de poro $<0,2$ mm, permeabilidad >100 L/(s·m ²), resistente al punzonado.
Sustrato (medio de cultivo)	Mezcla 80% inorgánica (arcilla expandida, puzolana, piedra pómez) y 20% orgánica (compost, fibra de coco). pH 6,5–8,5. Espesor recomendado: 8–10 cm.
Vegetación (Sedum)	<i>Sedum sediforme</i> , en tapetes o esquejes (~ 100 g/m ²). Requiere poco sustrato y presenta alta supervivencia sin riego permanente tras el periodo de establecimiento inicial.

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

a) Procedimiento general de instalación

La instalación de una cubierta verde extensiva sobre losa de hormigón armado exige un protocolo constructivo riguroso, capa por capa, para garantizar la estanqueidad, funcionalidad y durabilidad del sistema. A continuación, se presenta un resumen del procedimiento técnico a seguir:

- **1.Preparación de la Superficie:** Se debe inspeccionar y acondicionar la losa estructural. Esta debe estar seca ($<4\%$ de humedad), limpia, con pendiente mínima del 2% hacia desagües, y libre de fisuras o nidos de grava. Las juntas deben sellarse con materiales elásticos (p. ej., poliuretano) y se deben prever detalles perimetrales como ángulos metálicos o muretes para contención del sustrato.
- **2. Impermeabilización:** Se instala una membrana impermeable, en el caso de membranas asfálticas, se aplica imprimante y se sueldan los rollos por termofusión. En membranas sintéticas, se fijan mecánicamente o por adhesivo y se sellan los solapes. Es indispensable impermeabilizar cuidadosamente sumideros, parapetos y penetraciones. Posteriormente, se recomienda realizar una prueba de estanqueidad (inundación de 24-48 h).
- **3. Barrera Antiraíz:** En caso de que la impermeabilización no cuente con protección antiraíz, se instala una lámina HDPE de 0,5 mm sobre toda el área vegetada, con solapes de 20 cm y sellado adecuado, especialmente en bordes y alrededor de penetraciones.

- **4. Capa Drenante:** Se coloca una lámina nodular prefabricada (o grava liviana si aplica), permitiendo el escurrimiento y retención de agua. Debe cubrir toda la superficie, incluyendo franjas de grava perimetral (20–30 cm) para facilitar el mantenimiento y drenaje en bordes y sumideros.
- **5. Geotextil Filtro:** Se extiende un geotextil no tejido sobre la capa drenante, solapando un mínimo de 10 cm. Actúa como barrera física que evita el paso del sustrato hacia el drenaje, manteniendo la funcionalidad del sistema.
- **6. Carga y Distribución del Sustrato:** El sustrato técnico se distribuye con cuidado sobre el geotextil hasta alcanzar un espesor uniforme (~10 cm), evitando compactaciones excesivas. Se recomienda perfilar los bordes y proteger zonas críticas como bajadas de agua.
- **7. Instalación del Sedum:** Dependiendo del formato, se pueden utilizar tapetes pre-cultivados, esquejes o plantines. En el caso de esquejes, se distribuyen de forma homogénea (~100 g/m²) y se presionan levemente contra el sustrato. Se recomienda realizar esta plantación en primavera u otoño para facilitar el prendimiento.
- **8. Riego de Implantación:** Inmediatamente después de la plantación, se debe realizar un riego profundo y mantener un programa de riego de apoyo durante las primeras 4–8 semanas. Posteriormente, el riego puede espaciarse dependiendo de las condiciones climáticas locales.
- **9. Revisión Final y Entrega:** Se inspecciona la estanqueidad, funcionamiento de drenajes y prendimiento vegetal. Se reponen áreas fallidas y se entregan las recomendaciones de mantenimiento al propietario. Se sugiere una revisión a los 2–3 meses post-instalación para validar el éxito del sistema.

b) Recomendaciones estructurales y de mantenimiento

- **Recomendaciones estructurales:**

Antes de ejecutar una cubierta verde extensiva, es fundamental verificar que la estructura del edificio soporte las cargas adicionales. Un sistema típico con Sedum sediforme puede añadir entre 80 y 120 kg/m² cuando el sustrato está saturado, sin considerar carga viva. Se recomienda realizar un estudio estructural conforme a la normativa chilena vigente, incluyendo NCh1537 y OGUC, para determinar la factibilidad del diseño. La pendiente mínima recomendada es de 1–2% para garantizar drenaje eficiente. En pendientes superiores a 15% podrían requerirse soluciones adicionales para evitar deslizamiento del sustrato. Además, es necesario prever elementos de contención perimetral, juntas estructurales y protección de parapetos, para garantizar la durabilidad del sistema.

▪ **Mantenimiento de la cubierta verde extensiva:**

El sistema extensivo con sedum requiere un mantenimiento mínimo, centrado principalmente en la inspección periódica y pequeñas intervenciones. Se recomienda realizar al menos dos revisiones anuales, una en primavera y otra en otoño. Estas revisiones deben enfocarse en verificar el estado de la vegetación, drenajes y materiales expuestos.

Durante los primeros meses, es fundamental un programa de riego de establecimiento. Luego, el riego puede limitarse a condiciones climáticas extremas, como veranos muy secos. Se debe evitar el exceso de riego, ya que las suculentas como el sedum pueden ser susceptibles a la pudrición. La fertilización puede realizarse anualmente con dosis bajas y productos de liberación controlada.

En cuanto a vegetación, puede ser necesario replantar zonas con bajo nivel de cobertura o realizar una poda ligera si se acumula materia seca. El control de malezas también es clave, especialmente para evitar que raíces invasivas comprometan la impermeabilización.

El sistema de drenaje debe mantenerse despejado, especialmente después de otoños con acumulación de hojas. Se recomienda revisar también el sistema de riego si se encuentra instalado, asegurando su operatividad. Finalmente, es necesario revisar los parapetos, sellos y materiales expuestos para garantizar la integridad del sistema en el tiempo.

4.3.2. Guía técnica para fachada verde modular con Sedum sediforme

En el marco de esta investigación, se propone la implementación de fachadas verdes modulares con vegetación tipo Sedum sediforme como medida complementaria de mitigación térmica en entornos urbanos de clima árido, como el de la ciudad de Antofagasta. Esta solución fue seleccionada considerando sus propiedades pasivas de regulación térmica, su adaptabilidad a muros verticales y su bajo requerimiento hídrico, lo cual la hace altamente viable en contextos con escasez de agua.

Para efectos de esta tesis, se ha optado por una solución de sistema modular con estructura metálica y módulos vegetales independientes, que permite una instalación controlada, con mantenimiento sencillo y mínima intervención estructural.

a) Especificaciones técnicas de materiales.

Tabla 4.24. Especificaciones técnicas de materiales para fachada verde modular

Componente	Descripción Técnica
Soporte estructural base	Muro de hormigón armado (u otro sustrato portante equivalente), con superficie regular y resistencia estructural verificada según NCh1537 y OGUC.
Anclajes o fijaciones	Tornillos de expansión tipo Hilti (o similares), de acero galvanizado o inoxidable, adecuados para fijación en hormigón. Mínimo 4 fijaciones por módulo.

Componente	Descripción Técnica
Estructura metálica porta-módulos	Marco de perfilera galvanizada o aluminio estructural. Disposición vertical y modular, fijado a muro con separación mínima de 2 cm para ventilación.
Módulo vegetal contenedor	Bandejas plásticas de HDPE o polipropileno reciclado, con cámaras de retención de agua, sistema de drenaje y profundidad mínima de 10 cm para sustrato.
Sustrato liviano para fachada	Mezcla inorgánica de perlita, vermiculita y compost vegetal, con densidad < 900 kg/m ³ , espesor aprox. 8–10 cm.
Vegetación – <i>Sedum sediforme</i>	Especie crasa resistente a radiación y sequía. Modo de instalación: plantines o tepes prevegetados. Cobertura inicial ≥ 80%.
Sistema de riego	Cinta de riego por goteo o microaspersores integrados en cada módulo. Conexión a red o estanque. Control con válvula y temporizador programable.
Geotextil filtrante (opcional)	Tela no tejida de poliéster o polipropileno, para separar el sustrato del drenaje. Gramaje mínimo: 150 g/m ² .

Fuente: (Elaboración propia, 2025).

b) Procedimiento general de instalación

La instalación de una fachada verde modular sobre muros de hormigón armado debe desarrollarse de forma secuencial y rigurosa, considerando criterios constructivos, estructurales e hidráulicos. A continuación, se detalla el procedimiento técnico recomendado para garantizar un sistema funcional, seguro y duradero:

- **Revisión y preparación del muro:** Se debe inspeccionar cuidadosamente el estado del muro de hormigón. Este debe encontrarse limpio, seco, sin fisuras visibles ni desprendimientos superficiales. Si existen patologías como grietas estructurales, humedad o desconchados, deben ser reparadas previamente. Una vez asegurada la estabilidad del muro, se delimita el área de instalación en obra y se trazan los ejes de modulación (por ejemplo, cada 60 cm en eje vertical y horizontal), que servirán como base para la ubicación precisa de la estructura portante.
- **Aplicación de la impermeabilización:** Se instala una membrana impermeabilizante sobre toda el área a intervenir. En caso de membranas asfálticas autoadhesivas, es necesario aplicar previamente un imprimante asfáltico para mejorar la adherencia. Las bandas deben colocarse con traslapes de al menos 10 cm, sellando con soplete en los bordes y asegurando continuidad en encuentros verticales y horizontales. La impermeabilización debe extenderse más allá del área vegetal para evitar filtraciones por capilaridad en los bordes.

- **Trazado y colocación de anclajes:** Sobre la superficie impermeabilizada se trazan las líneas guía para el posicionamiento de los perfiles verticales. Se marcan los puntos de fijación y se perfora el muro con broca apropiada, atravesando la membrana. Los anclajes pueden ser mecánicos o químicos, dependiendo del sistema. Cada punto perforado debe sellarse perimetralmente para mantener la estanqueidad. Es clave utilizar plantillas o gabarros para asegurar una alineación precisa, lo que facilitará el montaje posterior de los módulos.
- **Montaje de la estructura soporte:** Se instalan los perfiles verticales galvanizados, fijándolos firmemente a los anclajes con pernos y arandelas. Luego, se agregan los perfiles horizontales que servirán como soporte directo para los módulos. El sistema debe quedar totalmente aplomado y nivelado. Si se incluye aislamiento térmico adicional (como placas de XPS), estas se colocan entre montantes, adheridas con pegamento compatible, dejando libres las zonas de anclaje.
- **Instalación de módulos vegetales:** Una vez montada la subestructura metálica, se procede a fijar los módulos verdes, preferentemente partiendo desde la fila inferior. Los módulos pueden venir preplantados o vacíos, según el diseño. Se encajan o atornillan a la estructura con sistemas de fijación específicos. Es importante verificar que queden correctamente nivelados, sin movimiento y con una separación mínima entre unidades para permitir dilatación térmica.
- **Conexión del sistema de riego y canaleta:** Se instala el sistema de riego por goteo, con una red de distribución que alimenta cada módulo. Usualmente se incluye una tubería superior principal desde la cual bajan derivaciones hacia cada hilera. En la parte inferior se instala una canaleta recolectora con ligera pendiente, conectada a un aljibe o depósito con bomba. El sistema puede configurarse en circuito cerrado, permitiendo la reutilización del agua, o abierto si se conecta a red potable y evacuación.
- **Pruebas hidráulicas y ajustes** Antes de la puesta en marcha definitiva, se debe verificar el correcto funcionamiento del sistema de riego. Se enciende la bomba o se abre la llave de paso, comprobando la distribución uniforme del agua en cada módulo. Se ajustan goteros si es necesario y se corrigen fugas. El temporizador debe configurarse con un programa adecuado al clima local. Si se desea, puede incorporarse fertilizante líquido de manera periódica a través del riego.
- **Puesta en marcha y monitoreo inicial:** Tras finalizar la instalación, se activa el sistema y se supervisa su funcionamiento durante las primeras semanas. Se recomienda observar diariamente el comportamiento del sistema, el estado del sustrato y la vegetación. Cualquier falla debe corregirse inmediatamente, incluyendo reposición de plantas o ajustes en el riego. Un monitoreo inicial adecuado permite asegurar el correcto establecimiento de la vegetación y previene futuros problemas operativos.

c) Recomendaciones estructurales y de mantenimiento

La instalación de un sistema modular de fachada verde en muros de hormigón armado requiere que dicha estructura cumpla con ciertos criterios técnicos para garantizar seguridad y durabilidad a largo plazo. En primer lugar, se debe asegurar que el muro soporte tenga capacidad estructural suficiente para resistir las cargas permanentes del sistema instalado (aproximadamente entre 80 y 120 kg/m²), así como cargas accidentales adicionales durante el mantenimiento. Todo proyecto debe estar respaldado por un informe estructural conforme a la NCh1537 y NCh433 (para considerar acciones sísmicas), y en caso de edificaciones existentes, es obligatoria la verificación del ingeniero calculista. Si se requiere, deberán considerarse refuerzos estructurales previos a la instalación.

El sistema de fijación debe contemplar anclajes apropiados al tipo y resistencia del hormigón: pernos de expansión galvanizados o anclajes químicos (varillas roscadas M8–M10) con empotramientos ≥ 8 cm y sellados posteriores para evitar ingreso de humedad. Debe evitarse perforar cerca de bordes o zonas con poca armadura, y respetarse las distancias mínimas entre fijaciones conforme a los manuales técnicos del fabricante. Dada la condición sísmica de Chile, se recomienda prever dispositivos adicionales de retención (como topes o seguros metálicos) para evitar desprendimientos de módulos ante movimientos telúricos.

▪ Impermeabilización y protección del muro:

La protección del muro contra humedad es crítica, especialmente considerando que el sistema de riego mantiene una humedad constante. Es imperativo instalar una membrana impermeable continua (asfáltica, EPDM, PVC) cubriendo completamente la zona que contendrá módulos, y extendiéndose más allá de sus límites verticales y horizontales. Todo punto de perforación debe sellarse con materiales adecuados (masillas de poliuretano o sellos de paso de alta adherencia), evitando fisuras que puedan derivar en infiltraciones o patologías como eflorescencias y desprendimientos de terminaciones interiores.

▪ Prevención de corrosión y daños UV:

En ciudades costeras como Antofagasta, se debe considerar la elevada salinidad y radiación solar. Todos los materiales metálicos deben ser galvanizados o contar con protección anticorrosiva adicional, y los componentes plásticos expuestos al sol (como tubos, goteros o bordes de geotextil) deben ser estabilizados UV. Los pernos visibles deben ser protegidos con pintura galvánica, y los módulos deben diseñarse para evitar acumulación de agua estancada o deterioro prematuro del sustrato.

- **Accesibilidad para mantenimiento:**

Desde la etapa de diseño debe considerarse el acceso seguro para labores de mantenimiento. En edificaciones de más de dos niveles, se recomienda prever balcones, pasarelas técnicas, o anclajes para cuerdas de seguridad (líneas de vida). Idealmente, los módulos deben ser desmontables para facilitar reposiciones vegetales o reparaciones sin necesidad de desmontar toda la estructura. La planificación de la mantención debe formar parte de la estrategia constructiva desde el inicio del proyecto.

- **Rutinas de mantenimiento:**

El mantenimiento del sistema debe diferenciarse en dos etapas: establecimiento y operación. En los primeros 3 a 6 meses, se requiere un monitoreo más frecuente del sistema de riego, la cobertura vegetal y las posibles fallas de módulos, se recomienda una vez por semana. En la etapa permanente (tras establecimiento del sedum), el sistema solo requiere inspecciones mensuales.

4.3.3 Análisis de costos de inversión inicial

Para evaluar la viabilidad económica de implementar infraestructura verde en los sectores críticos de Antofagasta, se desarrolló un análisis de precios unitarios (APU) para cada una de las soluciones constructivas propuestas: la cubierta verde extensiva y la fachada verde modular, ambas con vegetación del tipo Sedum sediforme. Estos APU que se muestran en las figuras 4.64 Y 4.65, incluyen todos los materiales, sistemas de instalación y rendimientos definidos en el apartado técnico del capítulo anterior, y fueron elaborados siguiendo los criterios habituales de presupuestación en obras de construcción, utilizando precios actualizados a junio de 2025.

CUBIERTA VEGETAL EXTENSIVA CON SEDUM SEDIFORME				UNIDAD	m ²
Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Subtotal
MATERIALES	Membrana asfáltica 3 mm anti-raíz	m ²	1.10	\$5.040	\$5.544
	Lámina polietileno 200 micras	m ²	1.05	\$1.350	\$1.418
	Lámina drenante nodular 20 mm	m ²	1.05	\$3.500	\$3.675
	Geotextil no tejido 150-200 g/m ²	m ²	1.05	\$924	\$970
	Sustrato ligero (10 cm)	m ³	0.10	\$120.000	\$12.000
	Vegetación Sedum pre-cultivada	m ²	1.00	\$20.000	\$20.000
	Sistema de riego por goteo (materiales)	m ²	1.00	\$1.730	\$1.730
					\$45.337
MANO DE OBRA	Maestro impermeabilizador (20 m ² /j)	día	0.05	\$40.000	\$2.000
	Ayudante general	día	0.05	\$30.000	\$1.500
	Jardinero instalador Sedum	día	0.05	\$35.000	\$1.930
					\$5.430
EQUIPOS	Grúa Pluma pequeña	m ²	1		\$2.143
Costo Directo (CD)					\$52.910
Gastos Generales (GG)					\$15.143
Subtotal CD + GG					\$68.053
Utilidad (10%)					\$6.805
Precio Unitario Final		m ²	1		\$74.858

Figura 4.64: Análisis de precios unitarios para cubierta vegetal extensiva con Sedum sediforme.

Fuente: (Elaboración propia ,2025).

El precio unitario final alcanza los \$74.858 CLP/m², lo que corresponde a **\$89.081 CLP/m²** con IVA incluido. Este valor se encuentra dentro del rango referencial nacional reportado por fuentes como Habitissimo.cl, que sitúan los costos de cubiertas verdes entre \$72.000 y \$183.000 CLP/m² en Chile.

FACHADA VEGETAL MODULAR CON SEDUM SEDIFORME				UNIDAD	m ²
ítem	Descripción	Unidad	Cantidad	P. Unitario	Subtotal
MATERIALES	Módulos prefabricados (PVC/HDPE)	m ²	1	\$56.700	\$56.700
	Anclajes/fijaciones metálicas	m ²	1	\$1.600	\$1.600
	Sustrato especial (80 L)	m ²	1	\$26.880	\$26.880
	Vegetación Sedum sediforme	m ²	1	\$12.000	\$12.000
	Sistema de riego automatizado	m ²	1	\$2.000	\$2.000
					\$99.180
MANO DE OBRA	Montajista estructural	dia	0.10	\$40.000	\$4.000
	Ayudante en altura	dia	0.10	\$35.000	\$3.500
	Jardinero vertical	dia	0.10	\$32.500	\$3.250
					\$10.750
EQUIPOS	Andamio tubular proporcional	m ²	1		\$4.000
Costo Directo (CD)					\$113.930
Gastos Generales (GG)					\$21.200
Subtotal CD + GG					\$135.130
Utilidad (10%)					\$13.513
Precio Unitario Final		m ²	1		\$148.643

Figura 4.65: Análisis de precios unitarios para fachada vegetal modular con Sedum sediforme.

Fuente: (Elaboración propia ,2025).

La fachada vegetal modular presenta un costo unitario base de \$148.643 CLP/m², lo que equivale a **\$176.885 CLP/m² con IVA**. Este valor, si bien superior, se alinea con precios internacionales reportados para soluciones modulares verticales, como los publicados por Citychangers.org (EUR/USA: aprox. USD 160/m²).

Los valores de gastos generales y utilidad fueron estimados considerando precios actualizados y ajustados a la realidad constructiva de Antofagasta. Se utilizaron fuentes locales y criterios técnicos habituales para reflejar de forma realista los costos actuales del mercado regional.

4.3.4. Análisis de costos operativos anuales

Una vez definida la inversión inicial de cada sistema, se procede a estimar sus costos operativos anuales, considerando el contexto local de Antofagasta y las características particulares de cada solución. Este cálculo contempla exclusivamente gastos recurrentes asociados a la mantención mínima requerida para que los sistemas funcionen correctamente a lo largo del tiempo, bajo condiciones áridas y con el uso de vegetación tipo Sedum sediforme.

Los ítems considerados en este análisis fueron definidos a partir de las recomendaciones establecidas en la guía técnica (sección 4.3.1) y se basan en valores de mercado actualizados para la ciudad de Antofagasta, incluyendo tarifas de agua potable, mano de obra especializada y materiales de reposición.

Para la Cubierta verde extensiva con Sedum sediforme el costo operativo anual estimado es de aproximadamente **\$2.400 CLP/m²·año**. Este bajo valor responde a que este tipo de vegetación requiere escasa intervención durante el año, siendo suficientes dos visitas de inspección para verificar el estado de las plantas y del sistema de riego por goteo.

En el caso de la fachada verde modular, el costo operativo asciende a cerca de **\$9.500 CLP/m²·año**, debido a la mayor complejidad asociada al mantenimiento en superficies verticales. Este valor contempla la necesidad de monitoreo frecuente, reemplazo eventual de módulos y la participación de personal capacitado para labores en altura. Aun así, se mantiene en rangos razonables gracias al bajo consumo hídrico del sedum y a su resistencia estructural.

4.3.5. Análisis de beneficios energéticos/económicos anuales

Este apartado estima el beneficio energético anual que ofrecen las soluciones de infraestructura verde propuestas evaluadas bajo las condiciones climáticas áridas de Antofagasta. Se cuantifica el ahorro energético en climatización por metro cuadrado, a partir de los porcentajes de eficiencia térmica reportados en literatura y simulaciones locales, junto con la tarifa eléctrica vigente.

Supuestos de cálculo:

- **Consumo energético base de climatización:** 100 kWh/m²·año.
- **Tarifa eléctrica promedio 2025 (Antofagasta, CGE):** \$244 CLP/kWh.
- **Porcentaje de ahorro energético estimado:** Cubierta verde extensiva 20 % y Fachada verde modular 15 %.

Tabla 4.25: Resultados de estimación de ahorros anuales por m²

Solución	Consumo post-intervención (kWh/m ² ·año)	Ahorro (kWh/m ² ·año)	Costo anual (CLP/m ² ·año)	Ahorro anual (CLP/m ²)	% Ahorro
Base (sin vegetación)	100	–	\$24.400	–	–
Cubierta verde extensiva	80	20	\$19.520	\$4.880	20 %
Fachada verde modular	85	15	\$20.740	\$3.660	15 %

Fuente: (Elaboración propia ,2025).

Una cubierta verde extensiva con sedum puede reducir 20 kWh/m²·año del consumo eléctrico destinado a climatización, lo que representa un ahorro de **\$4.880 CLP** por m² al año. Este impacto se explica por su mayor exposición solar directa durante el día, que permite reducir considerablemente las cargas térmicas al interior del edificio.

En tanto, una fachada verde modular, aplicada en orientaciones críticas (norte y poniente), reduce el consumo en 15 kWh/m²·año, equivalente a un ahorro de **\$3.660 CLP por m² anuales**. Aunque su efecto es levemente inferior al de la cubierta, sigue siendo considerable, especialmente en edificios con grandes superficies verticales.

4.3.6 Evaluación Económica Integrada: Costos, Beneficios y Rentabilidad

Este apartado presenta un análisis técnico-económico integrado que cruza los tres componentes evaluados previamente: la inversión inicial, los costos operativos anuales y los beneficios energéticos proyectados para cada una de las soluciones de infraestructura verde. El objetivo es obtener indicadores clave como la relación costo-beneficio y el periodo de retorno (payback), ofreciendo una mirada clara sobre la rentabilidad relativa de estas estrategias en el contexto urbano de Antofagasta.

- **Cubiertas Verdes Extensivas**

En el caso de las cubiertas verdes, se estimó una inversión inicial de \$89.081 CLP/m², con un costo operativo anual de \$2.400 CLP/m²·año, considerando tareas de mantenimiento e irrigación. A partir de los ahorros energéticos estimados (basados en una reducción térmica promedio de 1 °C) se proyecta un ahorro en climatización de \$4.880 CLP/m²·año.

Esto se traduce en un beneficio neto anual de \$2.480 CLP/m² (ahorro menos costo operativo), lo que arroja un periodo de retorno aproximado de 35,9 años. Si bien se trata de un horizonte de recuperación amplio, es importante entenderlo dentro del ciclo de vida de la edificación y los principios de sostenibilidad urbana.

El índice costo-beneficio, calculado como la relación entre el ahorro y el gasto operativo anual, alcanzó un valor de 2,03. Esto implica que, por cada peso invertido en operación anual, se recuperan más del doble en ahorro energético, lo que refuerza su eficiencia relativa como sistema pasivo de climatización.

- **Fachadas Verdes Modulares**

En el caso de las fachadas verdes, la inversión inicial es considerablemente más alta, alcanzando los \$176.885 CLP/m². El costo operativo anual estimado es de \$9.500 CLP/m²·año. Basado también en una reducción térmica de 1 °C (según datos de literatura especializada para climas áridos y cálidos), se estima un ahorro energético anual de \$3.660 CLP/m².

Esto genera un beneficio neto anual negativo (-\$5.840 CLP/m²), es decir, el ahorro energético no cubre los costos operativos. En consecuencia, el periodo de retorno no es aplicable o válido en términos positivos (-30,3 años), lo que indica que la inversión, bajo estos parámetros, no se recupera mediante los ahorros directos en energía. El índice costo-beneficio fue de 0,39, lo que sugiere que solo se recupera un 39 % del gasto anual en operación.

A pesar de estos resultados, el análisis no descarta las fachadas verdes como solución viable, pero sugiere que su implementación debe evaluarse considerando beneficios colaterales, como el confort térmico pasivo, la mejora estética del entorno, la retención de contaminantes o el aumento del valor inmobiliario.

- **Reflexión Comparativa**

Ambas soluciones presentan resultados económicos diferentes. Las cubiertas verdes muestran una mayor rentabilidad relativa, con buena relación entre ahorro y costos de operación, aunque con un periodo de retorno prolongado. Las fachadas verdes, en cambio, presentan un desbalance económico bajo las condiciones analizadas, aunque su aporte puede ser relevante en otros planos que este análisis no contempla.

Esta evaluación cruzada permite tomar decisiones más informadas desde un punto de vista económico y técnico, aportando evidencia clara sobre la eficiencia financiera de cada estrategia en un entorno como el de Antofagasta, caracterizado por un clima árido, alta radiación solar y baja cobertura vegetal urbana.

5. Conclusiones

5.1. Conclusiones objetivo específico N°1

El trabajo realizado en este primer objetivo permitió caracterizar el comportamiento térmico superficial en Antofagasta, y así confirmar la presencia del fenómeno de Isla de Calor Urbano Superficial (ICUS), a partir de un análisis multitemporal detallado de imágenes satelitales. Esta evaluación puso en evidencia zonas urbanas que concentran temperaturas superficiales elevadas de forma persistente, asociadas principalmente a una alta densidad edificada, escasa vegetación y una intensa actividad funcional. A partir de estos resultados, se definieron dos sectores prioritarios que servirán como base para evaluar soluciones de mitigación térmica. Esta selección, respaldada por datos concretos, entrega una base sólida para el desarrollo de los siguientes objetivos, centrados en la simulación y análisis de alternativas constructivas aplicadas al contexto urbano local.

Además, considerando la clasificación de intensidades del fenómeno ICU de manera superficial propuesta por Fernández-García (1996), y con base en los resultados térmicos obtenidos, se concluye que el fenómeno alcanza niveles críticos en la ciudad. Durante el verano, las diferencias de temperatura entre zonas urbanas e interurbanas superan los 9 °C en algunos sectores del centro, lo que ubica su intensidad en la categoría de “Muy Fuerte”. Incluso en invierno, cuando las temperaturas son más moderadas, se registran diferencias que oscilan entre 3 °C y 6 °C, correspondientes a intensidades “Moderada” y “Fuerte”, reafirmando la necesidad urgente de aplicar estrategias de mitigación urbana en estas áreas críticas.

5.2. Conclusiones objetivo específico N°2

El análisis de los resultados obtenidos en los paseos Arturo Prat y Manuel Matta permite concluir que la implementación de infraestructura verde aporta beneficios térmicos concretos al microclima urbano de Antofagasta, contribuyendo de manera efectiva a mitigar el efecto de isla de calor a escala peatonal.

En el caso del Paseo Arturo Prat, cuya orientación norte-sur favorece la ventilación cruzada y genera sombras alternas durante el día, las soluciones verdes mostraron una reducción térmica sostenida sin registrar aumentos de temperatura. Las cubiertas verdes alcanzaron reducciones de hasta 1,2 °C (PR3, a las 20:00 hrs), mientras que las fachadas verdes fueron especialmente efectivas durante la tarde, con descensos de hasta 0,8 °C. La estrategia combinada fue la más eficiente, logrando reducciones de entre 0,8 y 1,1 °C entre las 13:00 y 20:00 hrs. Bajo estas condiciones urbanas favorables, la infraestructura verde demostró capacidad para reducir entre un 30 y un 40 % del sobrecalentamiento diurno típico (~3 °C).

Por otro lado, el Paseo Manuel Matta con orientación este-oeste predominante y una configuración urbana más cerrada, presentó un escenario térmico más desafiante con resultados que no fueron constantes como si lo fueron los resultados del Paseo Prat. Durante las horas de mayor radiación (11:00–15:00 hrs), algunas intervenciones presentaron efectos neutros o leves aumentos térmicos (hasta +0,2 °C), asociados a la baja eficiencia evaporativa del Sedum sediforme en condiciones extremas y al cambio en el albedo de la superficie. Sin embargo, hacia el final del día, ambas soluciones verdes comenzaron a expresar su potencial: en especial, la estrategia combinada alcanzó su mayor eficacia en PR3, con una reducción de hasta 1,3 °C a las 20:00 hrs.

Estos resultados son coherentes con lo reportado en estudios recientes, que documentan descensos térmicos entre 0,5 y 1,2 °C para soluciones basadas en vegetación urbana en contextos áridos (Castleton et al., 2010; Oquendo-Di Cosola et al., 2023; Li et al., 2024). Además, la evidencia confirma la complementariedad funcional de ambas estrategias: las cubiertas verdes reducen la ganancia térmica durante las horas de mayor sol, mientras que las fachadas verdes atenúan la reemisión de calor acumulado en la tarde.

En síntesis, los resultados validan el uso de infraestructura verde como una estrategia eficaz desde el punto de vista climático para disminuir la temperatura del aire en entornos urbanos expuestos. La magnitud del beneficio depende fuertemente del contexto físico (orientación, ventilación y morfología urbana), lo que subraya la importancia de un diseño adaptado a las condiciones locales. Esta investigación entrega evidencia cuantitativa robusta que respalda la incorporación de soluciones vegetales puede ser parte integral de la planificación urbana, con miras a mejorar el confort térmico, la resiliencia ambiental y la calidad de vida en ciudades costeras de clima árido como Antofagasta.

5.3. Conclusiones objetivo específico N°3

La evaluación técnico-económica realizada para las soluciones de infraestructura verde (cubiertas verdes extensivas y fachadas verdes modulares) permitió establecer con claridad su nivel de viabilidad en contextos urbanos áridos como el de Antofagasta. Para ello, se definieron previamente sistemas constructivos específicos para cada tipo de intervención, en base a normativa chilena vigente y apoyándose en manuales técnicos especializados, lo que aseguró propuestas coherentes con las condiciones climáticas y técnicas locales. La elección de *Sedum sediforme* como especie vegetal respondió a sus cualidades de alta resistencia térmica, bajo requerimiento hídrico y mínimo mantenimiento, características especialmente relevantes en zonas con las condiciones climáticas áridas y con poca precipitación anual.

Desde una perspectiva técnica, ambas soluciones resultaron factibles en términos de instalación, mantención y compatibilidad con las estructuras urbanas existentes. Las guías desarrolladas consideran materiales disponibles localmente, métodos constructivos adecuados al entorno urbano y criterios operativos de bajo impacto, lo que facilita su aplicación en otros sectores similares.

En el plano económico, surgieron diferencias importantes. Las cubiertas verdes presentan una inversión inicial de \$89.081 CLP/m² y un costo operativo de \$2.400 CLP/m²·año. Por su parte, las fachadas verdes alcanzan \$176.885 CLP/m² de inversión inicial y \$9.500 CLP/m²·año en operación. Con base en una reducción térmica promedio de 1 °C, se proyectaron ahorros energéticos anuales de \$4.880 CLP/m² para cubiertas y \$3.660 CLP/m² para fachadas. Esto se tradujo en un beneficio neto anual positivo de \$2.480 CLP/m² para las cubiertas, con un índice costo-beneficio de 2,03 y un periodo de retorno de 35,9 años. En contraste, las fachadas verdes arrojaron un resultado negativo (-\$5.840 CLP/m²), con un índice de 0,39, lo que indica que el ahorro energético estimado no cubre los costos operativos actuales.

Aun así, este resultado no desacredita su valor como estrategia de adaptación climática. Las fachadas verdes generan beneficios que no fueron monetizados en este análisis, como la mejora del confort térmico pasivo, el aporte estético al entorno urbano, la retención de contaminantes y el potencial incremento del valor inmobiliario. Estos aportes amplían su relevancia dentro de un enfoque integral de sostenibilidad urbana.

En conclusión, si bien las cubiertas verdes muestran una mayor rentabilidad directa bajo los parámetros evaluados, ambas soluciones resultan viables y complementarias en la construcción de una ciudad más resiliente, adaptada al cambio climático y con mejor calidad ambiental para sus habitantes.

5.4. Conclusión Objetivo General

La presente investigación cumplió de forma satisfactoria su objetivo general, orientado a determinar la incidencia de fachadas verdes modulares y cubiertas verdes extensivas con vegetación de tipo *Sedum Sediforme*, en el microclima urbano en la ciudad de Antofagasta para mitigar el efecto de isla de calor urbano en sectores críticos del centro de la ciudad.

Desde una perspectiva climática, los resultados fueron concluyentes: las intervenciones vegetales lograron disminuir la temperatura del aire hasta en 1,3 °C en momentos críticos del día, con una media cercana a 1 °C. Esta reducción equivale a mitigar entre un 30 y un 40 % del sobrecalentamiento urbano observado, lo que representa un aporte sustancial al confort térmico y la habitabilidad de zonas densamente construidas. En este sentido, las cubiertas verdes demostraron mayor efectividad en las horas de máxima radiación solar, moderando las ganancias de calor de los techos expuestos, mientras que las fachadas verdes resultaron especialmente útiles en la tarde, cuando ayudaron a frenar la reemisión térmica de los muros. Adicionalmente, el estudio identificó una clara complementariedad entre ambas soluciones vegetales, evidenciando que su implementación combinada potencia los beneficios térmicos.

En cuanto al análisis económico, los datos integrados mostraron diferencias relevantes entre ambas soluciones. Las cubiertas verdes extensivas evidenciaron un retorno energético positivo, con una relación beneficio/costo superior a 2 y un periodo de retorno estimado en 36 años, lo que las posiciona como una alternativa sostenible a largo plazo. Por el contrario, las fachadas verdes, si bien factibles desde el punto de vista técnico, no lograron recuperar su inversión considerando únicamente los ahorros energéticos actuales. Sin embargo, este resultado no debe interpretarse como un fracaso económico, ya que es fundamental considerar distintos escenarios a futuro. Es bien sabido que las tarifas eléctricas han mantenido una tendencia sostenida al alza durante la última década en Chile, y no existen indicios claros de una reversión de esto. En este contexto, es razonable proyectar que el ahorro energético asociado a estas soluciones cobre mayor relevancia económica en el mediano y largo plazo. Además, el aumento progresivo de jornadas con temperaturas elevadas en ciudades áridas como Antofagasta incrementa la necesidad de estrategias de mitigación térmica en el entorno urbano.

Más allá de los números, esta investigación permite destacar un conjunto de beneficios menos tangibles, pero igual o más importantes. La infraestructura verde aporta valor en múltiples dimensiones: mejora la calidad del aire, promueve la biodiversidad urbana, ayuda a filtrar contaminantes y contribuye a la percepción visual del espacio público. También existe evidencia creciente sobre su impacto positivo en el bienestar emocional de las personas, especialmente en entornos urbanos con escasa presencia de naturaleza. El contacto visual o físico con vegetación puede disminuir el estrés, mejorar el estado de ánimo y fortalecer el vínculo entre los habitantes y su entorno urbano.

En síntesis, este trabajo demostró que las soluciones vegetales no solo representan una inversión energética o económica, sino también una apuesta por una ciudad más sustentable, saludable y resiliente. Su efectividad varía según el contexto urbano y las condiciones locales, pero su potencial es claro y cuantificable, las fachadas y cubiertas verdes mejoran la calidad ambiental y humana de espacios que, hasta ahora, han estado marcados por la aridez y el sobrecalentamiento.

5.5 Futuras Investigaciones

A partir de los resultados alcanzados en esta investigación, se identifican nuevas líneas de estudio que podrían complementar y profundizar los alcances del presente trabajo, especialmente considerando escenarios futuros de cambio climático, avances tecnológicos y la dimensión social de las soluciones evaluadas. En este contexto, se proponen las siguientes investigaciones derivadas:

- **Evaluación del impacto psicológico y percepción ciudadana de infraestructura verde en sectores áridos urbanos.**
- **Evaluación de soluciones híbridas: combinación de infraestructura verde con pavimentos reflectantes o materiales de cambio de fase (PCM).**
- **Análisis de costo-efectividad considerando escenarios de aumento tarifario y cambio climático (2025–2050).**

Bibliografía

- Abdulateef, M. F., & A. S. Al-Alwan, H. (2022). The effectiveness of urban green infrastructure in reducing surface urban heat island. *Ain Shams Engineering Journal*, 3(1), 101526. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.06.012>
- Aguas Antofagasta. (2025). Planta Desaladora Norte – Información técnica de operación. Recuperado de <https://www.aguasantofagasta.cl>
- Ahrens, C. D., & Henson, R. (2019). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*.
- Alchapar, N., & Correa, E. (2015). Reflectancia solar de las envolventes opacas de la ciudad y su efecto sobre las temperaturas urbanas. *Informes de La Construcción*, 67(540), e112. <https://doi.org/10.3989/ic.14.131>
- Andes.cl. (2025). Aguas Antofagasta destinará agua desalada para riego urbano y social. Recuperado de <https://www.andes.cl/noticia/agua-desalada-urbanismo>
- Azhdari, A., Soltani, A., & Alidadi, M. (2018). Urban morphology and landscape structure effect on land surface temperature: Evidence from Shiraz, a semi-arid city. *Sustainable Cities and Society*, 41, 853–864. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.034>
- Barane, P. K., & Dwarakish, G. S. (2017). Development of a Tool for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat Data Products. *Proceedings Volume of International Conference*. 195–199.
- Barry, R. G. , & C. R. J. (2010). *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge.
- Bernard, J., Bocher, E., Petit, G., & Palominos, S. (2018). Sky View Factor Calculation in Urban Context: Computational Performance and Accuracy Analysis of Two Open and Free GIS Tools. *Climate*, 6(3), 60. <https://doi.org/10.3390/cli6030060>
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 915–939. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Biblioteca Del Congreso Nacional de Chile. (2017). *Reporte Comunal Antofagasta*.
- Bonan, G. (2019). *Climate Change and Terrestrial Ecosystem Modeling*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781107339217>
- Caesar, L., McCarthy, G. D., Thornalley, D. J. R., Cahill, N., & Rahmstorf, S. (2021). Current Atlantic Meridional Overturning Circulation weakest in last millennium. *Nature Geoscience*, 14(3), 118–120. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00699-z>
- Cai, L., Feng, X.-P., Yu, J.-Y., Xiang, Q.-C., & Chen, R. (2019). Reduction in Carbon Dioxide Emission and Energy Savings Obtained by Using a Green Roof. *Aerosol and Air Quality Research*, 19(11), 2432–2445. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.09.0455>

- Carrasco Claudio. (2008). *Morfología y microclima urbano: análisis de la forma espacial y materiales modeladores del microclima de tejidos urbanos mediterráneos costeros. El caso de la ciudad de Valparaíso.*
- Cascone, S., Catania, F., Gagliano, A., & Sciuto, G. (2018). A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings. *Building and Environment*, 136, 227–239. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.052>
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- Cengel C, & Boles M. (2015). *Termodinámica Octava Edición.* 167–214. <https://doi.org/10.1063/1.556031>
- Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, 111, 228–237. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014>
- Conesa, J. A. (2012). *Energías solar y eólica / Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería Química.*
- Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2016). Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy and Buildings*, 114, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.053>
- Cox Figueroa Enrry José, Espinoza Sánchez Marta Gema, & Falcone Figueroa Frank Fabricio. (2023). *Radiación electromagnética y su incidencia en los seres humanos.*
- Cristian Henríquez, P. S. P. C. & J. Q. (2021). *VARIACIÓN EN LA INTENSIDAD DE LA ISLA DE CALOR URBANA POR EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CIUDADES CHILENAS.*
- Cuerdo-Vilches, T., Díaz, J., López-Bueno, J. A., Luna, M. Y., Navas, M. A., Mirón, I. J., & Linares, C. (2023). Impact of urban heat islands on morbidity and mortality in heat waves: Observational time series analysis of Spain's five cities. *Science of The Total Environment*, 890. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164412>
- DIRECCION GENERAL DE AERONAUTICA CIVIL. (2024). *REPORTE ANUAL DE LA EVOLUCIÓN DEL CLIMA EN CHILE.* <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/publicaciones/documentoPdf/reporteEvolucionClima/reporteEvolucionClima2023.pdf>
- Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentice, I. C., Ramankutty, N., & Snyder, P. K. (2005). Global Consequences of Land Use. *Science*, 309(5734), 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

- eldesconcierto.cl. (2025, marzo). Adiós a la sequía en Antofagasta: cómo pasó a ser la primera ciudad latinoamericana con 100 % de agua potable sacada del mar. Recuperado de <https://www.eldesconcierto.cl>
- El-Zoklah, M., & Refaat, S. S. (2021). Effectiveness of living wall systems on building thermal performance and energy efficiency in hot desert climates. *Journal of Building Engineering*, 43, 102544. <https://www.sbt-durabi.org/articles/xml/Dv9R/#:~:text=25cm%20wall%20gives%20better%20saving,and%20payment%20by%2029%3A31.8>
- GeoEnciclopedia. (2024). Humedad relativa y absoluta: qué son y diferencia. <https://www.geoenciclopedia.com/humedad-relativa-y-absoluta-que-son-y-diferencia-839.html>
- Ghajar A., & Cengel Y. (2020). Heat and Mass Transfer - Fundamentals and Applications, 6th Edition, McGraw-Hill Education, New York, NY, 2020. 119–123.
- Giridharan, R., & Emmanuel, R. (2018). The impact of urban compactness, comfort strategies and energy consumption on tropical urban heat island intensity: A review. *Sustainable Cities and Society*, 40, 677–687. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.024>
- Gobierno de Chile [GOB.cl]. (2025). Planta desalinizadora Norte – Aguas Antofagasta. Recuperado de <https://www.gob.cl/noticias/planta-desalinizadora-antofagasta>
- Gutiérrez-Corea, F. V., Manso-Callejo, M. Á., & Serradilla-García, F. (2020). Modelización y predicción espacio-tiempo de la irradiancia solar global a corto plazo mediante redes neuronales artificiales y geoestadística. *Revista Cartográfica*, 100, 13–40. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i100.699>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 31–44. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Huang, X., & Wang, Y. (2019). Investigating the effects of 3D urban morphology on the surface urban heat island effect in urban functional zones by using high-resolution remote sensing data: A case study of Wuhan, Central China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 152, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.010>
- INE. (2019). ESTIMACIONES Y PROYECCIONES DE LA POBLACIÓN DE CHILE 2002-2035 TOTALES REGIONALES, Población URBANA Y RURAL. https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/proyecciones-de-poblacion/publicaciones-y-anuarios/base-2017/ine_estimaciones-y-proyecciones-2002-2035_base-2017_reg_%C3%A1rea_s%C3%ADntesis.pdf?sfvrsn=aaeb88e7_5
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2023). *Changing State of the Climate System*. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 287–292). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.004>
- Jamei, E., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., & Stojcevski, A. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*, 791, 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>
- Jamei, E., Chau, H. W., Seyedmahmoudian, M., & Mekhilef, S. (2023). Green roof and energy – role of climate and design elements in hot and temperate climates. *Heliyon*, 9(8), e15917. <http://dx.doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15917>
- Jandaghian, Z., & Colombo, A. (2024). The Role of Water Bodies in Climate Regulation: Insights from Recent Studies on Urban Heat Island Mitigation. *Buildings*, 14(9), 2–3. <https://doi.org/10.3390/buildings14092945>
- Kumar, R., & Kaushik, S. C. (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40(11), 1505–1511. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.11.015>
- Lafortezza, R., Carrus, G., Sanesi, G., & Davies, C. (2009). Benefits and well-being perceived by people visiting green spaces in periods of heat stress. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8(2). <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2009.02.003>
- Lawrence, M. G. (2005). The Relationship between Relative Humidity and the Dewpoint Temperature in Moist Air: A Simple Conversion and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–234. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- Li, Y., Wang, Y., Zhang, J., Zhao, Y., & Liu, Z. (2024). Green spaces provide substantial but unequal urban cooling globally. *Nature Communications*, 15, 4210. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51355-0>
- Lin, C., & Zhang, S. (2022). Impact of Green Roofs and Walls on the Thermal Environment. *Buildings*, 14(12), 4063. <https://doi.org/10.3390/buildings14124063> [yourhome.gov.au+6mdpi.com+6researchgate.net+6](https://www.yourhome.gov.au+6mdpi.com+6researchgate.net+6)
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863–871. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.203>
- Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110111>
- Margarita Caballero, Socorro Lozano, & Beatriz Ortega. (2007). *EfEcto invErnadEro, calEntamiEnto global y cambio climático: una pErspEctiva dEsde las ciEncias de la tiErra*. https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf

- María del Carmen Moreno García, & Juan Antonio Serra Pardo. (2016). El estudio de la isla de calor urbana en el ámbito mediterráneo: una revisión bibliográfica. <https://www.ub.edu/geocrit/b3w-1179.pdf>
- Marshall J., & Plumb R. (2016). *ATMOSPHERE, OCEAN, AND CLIMATE DYNAMICS: AN INTRODUCTORY TEXT*. 10–12. <https://paleodyn.uni-bremen.de/study/Dyn2/atmosphere-ocean-climate-dynamics-marshall-plumb.pdf>
- Memon, R. A., Leung, D. Y. C., & Liu, C.-H. (2009). An investigation of urban heat island intensity (UHII) as an indicator of urban heating. *Atmospheric Research*, 94(3), 491–500. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.07.006>
- Mihalakakou, G., Souliotis, M., Papadaki, M., Menounou, P., Dimopoulos, P., Kolokotsa, D., Paravantis, J. A., Tsangrassoulis, A., Panaras, G., Giannakopoulos, E., & Papaefthimiou, S. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability: Progress and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113306. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113306>
- MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. E. (2019). Ciudades y cambio climático en Chile: Recomendaciones desde la evidencia científica. https://minciencia.gob.cl/uploads/filer_public/c9/2c/c92c6295-5baa-438d-960e-56d5dad32f64/ciudades_y_cambio_climatico_en_chile.pdf
- ministerio de medio ambiente de Chile. (2020). *ATLAS DE RIESGOS CLIMÁTICOS*.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2025). Informe de gestión hídrica nacional 2025. Recuperado de <https://www.mop.cl>
- NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica). (2024). Glosario de términos climáticos y meteorológicos.
- Nobre C. (2001). “Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país”. *Revista Brasileira de Meio Ambiente* 13: 27-41).
- NORMA CHILENA NCh853-2007. (2007). Acondicionamiento térmico - Envoltente térmica de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas.
- Norton, B. A., Coutts, A. M., Livesley, S. J., Harris, R. J., Hunter, A. M., & Williams, N. S. G. (2015). Planning for cooler cities: A framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 134, 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.018>
- Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA). (2023). reporte global de clima anual de 2023.
- OKE. T. R. (1987). *BOUNDARY LAYER CLIMATES*.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

- Oquendo-Di Cosola, V., Olivieri, F., Olivieri, L., & Ruiz-García, L. (2023). Assessment of the impact of green walls on urban thermal comfort in a Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 296, 113375. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113375>
- Palacio, C., & Jimenez, J. (2012). CLIMATOLOGÍA URBANA Y DE MONTAÑAS.
- Palme, M., & Carrasco, C. (2022). Urban heat island in Latin American cities: a review of trends, impacts, and mitigation strategies. *Global Urban Heat Island Mitigation*, 251–267. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00014-7>
- Palme, M., Lobato, A., & Carrasco, C. (2016). Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in Cities of Latin-American Pacific Coast. *Procedia Engineering*, 169, 199–206. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.024>
- Pielke, R. A., Pitman, A., Niyogi, D., Mahmood, R., McAlpine, C., Hossain, F., Goldewijk, K. K., Nair, U., Betts, R., Fall, S., Reichstein, M., Kabat, P., & de Noblet, N. (2011). Land use/land cover changes and climate: modeling analysis and observational evidence. *WIREs Climate Change*, 2(6), 828–850. <https://doi.org/10.1002/wcc.144>
- Qin, Y. (2015). Urban canyon albedo and its implication on the use of reflective cool pavements. *Energy and Buildings*, 96, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.005>
- Razzaghmanesh, M., Beecham, S., & Salemi, T. (2016). The role of green roofs in mitigating Urban Heat Island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 15, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.11.013>
- Rodríguez-Álvarez, J. (2016). Urban Energy Index for Buildings (UEIB): A new method to evaluate the effect of urban form on buildings' energy demand. *Landscape and Urban Planning*, 148, 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.01.001>
- Sahnoune, S., & Benhassine, N. (2017). Quantifying the Impact of Green-Roofs on Urban Heat Island Mitigation. *International Journal of Environmental Science and Development*, 8(2), 116–123. <https://doi.org/10.18178/ijesd.2017.8.2.932>
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., & de Lieto Vollaro, A. (2016). Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustainable Cities and Society*, 26, 318–343. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.07.005>
- Salvati, A., Coch Roura, H., & Cecere, C. (2017). Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. *Energy and Buildings*, 146, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.025>
- Santamouris M. (2001). *Energy and Climate in the Urban Built Environment* (M. Santamouris, Ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315073774>
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682–703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>

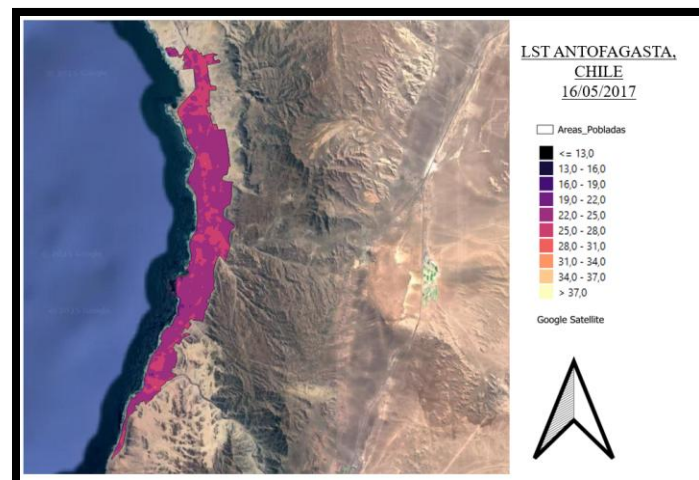
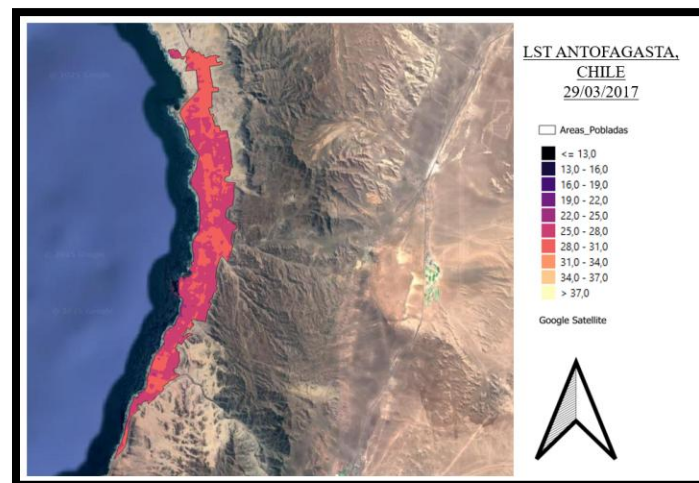
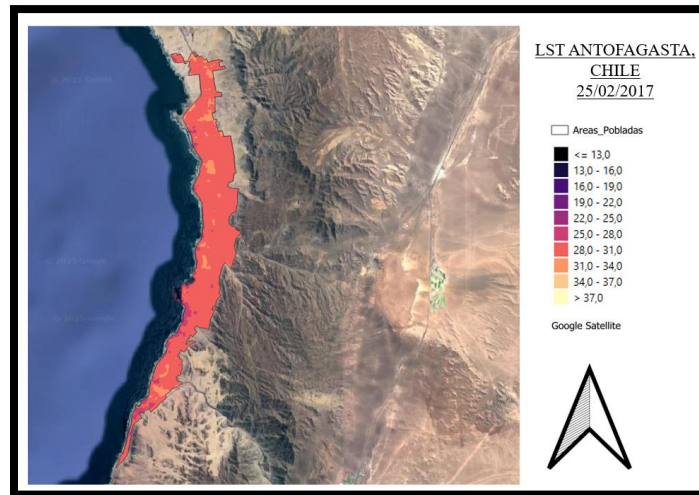
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. *Energy and Buildings*, 207, 109482. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings*, 98, 63–73. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052>
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085–3102. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>
- SCHMITZ, L., & ROSSI, F. (2020). Characterization and mitigation through Urban Climatic Map: Investigations on the urban climate of Curitiba - Brazil.
- Schrijvers, P. J. C., Jonker, H. J. J., de Roode, S. R., & Kenjereš, S. (2016). The effect of using a high-albedo material on the Universal Temperature Climate Index within a street canyon. *Urban Climate*, 17, 284–303. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.02.005>
- Shao, H., & Kim, G. (2022). A Comprehensive Review of Different Types of Green Infrastructure to Mitigate Urban Heat Islands: Progress, Functions, and Benefits. *Land*, 11(10), 1792. <https://doi.org/10.3390/land11101792>
- Sharma, A., Conry, P., Fernando, H. J. S., Hamlet, A. F., Hellmann, J. J., & Chen, F. (2016). Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters*, 11(6), 064004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064004>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the 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. (2014). Evaluation of the ‘local climate zone’ scheme using temperature observations and model simulations. *International Journal of Climatology*, 34(4), 1062–1080. <https://doi.org/10.1002/joc.3746>
- Stone, B. (2007). Urban and rural temperature trends in proximity to large US cities: 1951–2000. *International Journal of Climatology*, 27(13), 1801–1807. <https://doi.org/10.1002/joc.1555>
- Stull, R. B. (1988). An introduction to boundary layer meteorology (Vol. 13).
- Suárez-Gómez, P. A., Cantón-Ivanishevich, M. A., & Correa-Cantaloube, É. N. (2024). Evaluación de estrategias de enverdecimiento vertical en clima árido. El caso de las fachadas verdes. *Revista de Arquitectura*, 26(2), 75–90. <https://doi.org/10.14718/RevArq.2024.26.5014>
- Trujillo, S. (2012). Estimación de temperatura superficial en el Valle de Aburrá mediante técnicas de percepción remota.

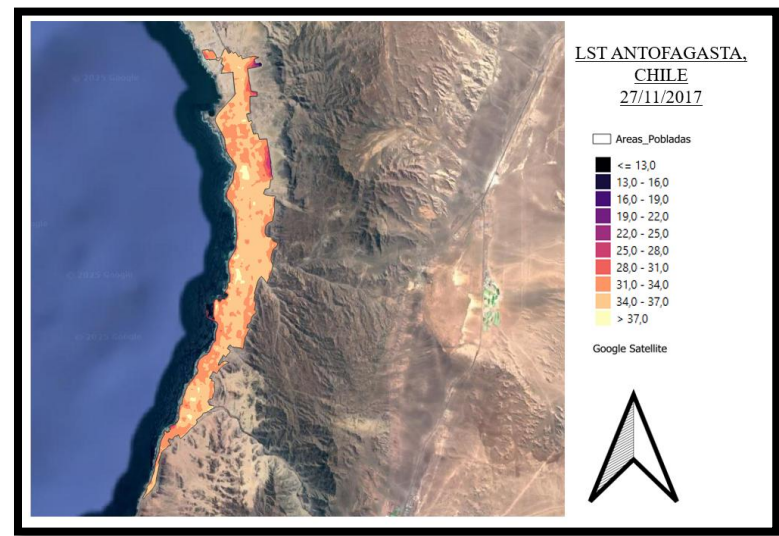
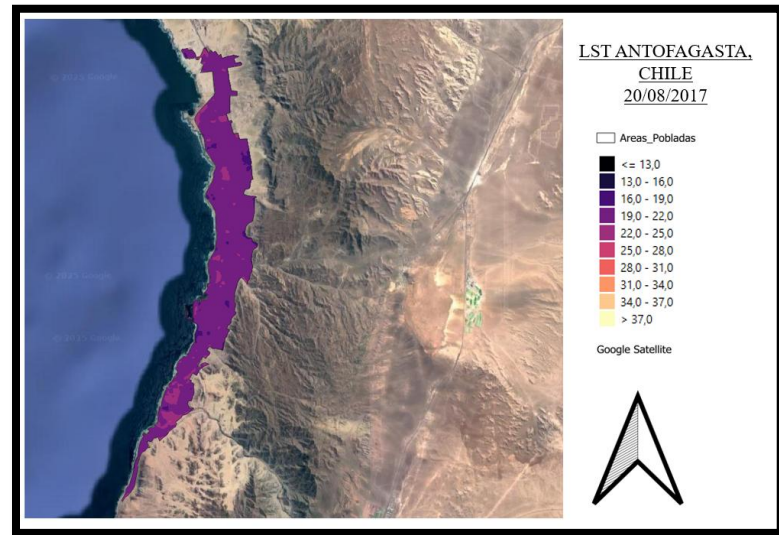
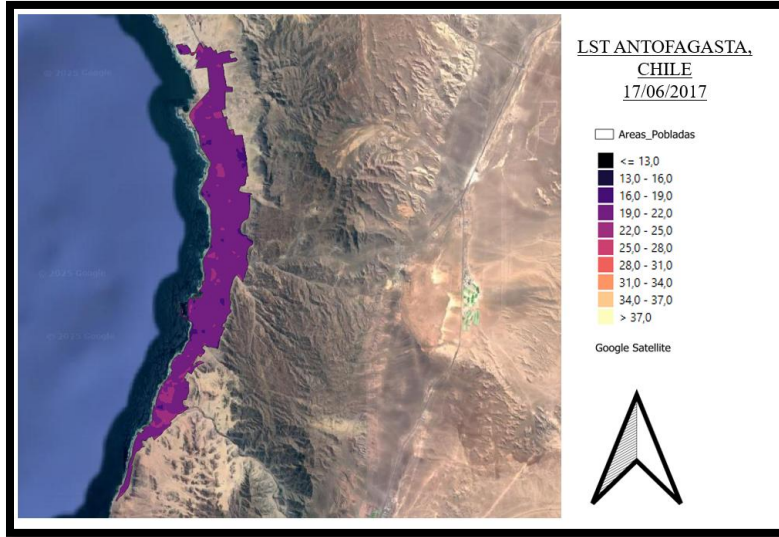
- Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, pp 123-125. [https://www.gnss-x.ac.cn/docs/Atmospheric%20Science%20An%20Introductory%20Survey%20\(John%20M.%20Wallace,%20Peter%20V.%20Hobbs\)%20\(z-lib.org\).pdf](https://www.gnss-x.ac.cn/docs/Atmospheric%20Science%20An%20Introductory%20Survey%20(John%20M.%20Wallace,%20Peter%20V.%20Hobbs)%20(z-lib.org).pdf)
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- WMO. (2024). *WMO Global Annual to Decadal Climate Update 2024-2028*.
- World Meteorological Organization (WMO). (2017). *International Cloud Atlas - Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*. https://cloudatlas.wmo.int/docs/wmo_407_en-v1.pdf
- Yang, J., Wang, Y., Xiu, C., Xiao, X., Xia, J., & Jin, C. (2020). Optimizing local climate zones to mitigate urban heat island effect in human settlements. *Journal of Cleaner Production*, 275, 123767. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123767>
- Yang, J., Wang, Z.-H., & Kaloush, K. E. (2015). Environmental impacts of reflective materials: Is high albedo a ‘silver bullet’ for mitigating urban heat island? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 830–843. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.092>
- Yang, J., Wang, Z.-H., Kaloush, K. E., & Dylla, H. (2016). Effect of pavement thermal properties on mitigating urban heat islands: A multi-scale modeling case study in Phoenix. *Building and Environment*, 108, 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.021>
- Yang, J., Yang, Y., Sun, D., Jin, C., & Xiao, X. (2021). Influence of urban morphological characteristics on thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103045. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103045>
- Yang, X., Li, Y., Luo, Z., & Chan, P. W. (2017). The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, 37(2), 890–904. <https://doi.org/10.1002/joc.4747>
- Zhang, L., Luo, F., Pan, G., Zhang, W., Ren, G., Zheng, Z., & Yang, Y. (2024). Elucidating the Multi-Timescale Variability of a Canopy Urban Heat Island by Using the Short-Time Fourier Transform. *Geophysical Research Letters*, 51(1). <https://doi.org/10.1029/2023GL106221>
- Zhang, Y., Held, I., & Fueglistaler, S. (2021). Projections of tropical heat stress constrained by atmospheric dynamics. *Nature Geoscience*, 14(3), 133–137. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00695-3>
- Zhao, L., Oleson, K., Bou-Zeid, E., Krayenhoff, E. S., Bray, A., Zhu, Q., Zheng, Z., Chen, C., & Oppenheimer, M. (2021). Global multi-model projections of local urban climates. *Nature Climate Change*, 11(2), 152–157. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00958-8>

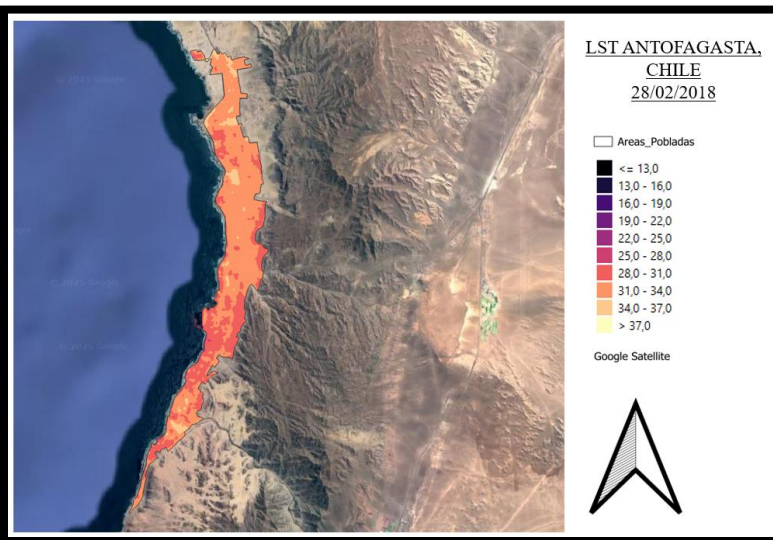
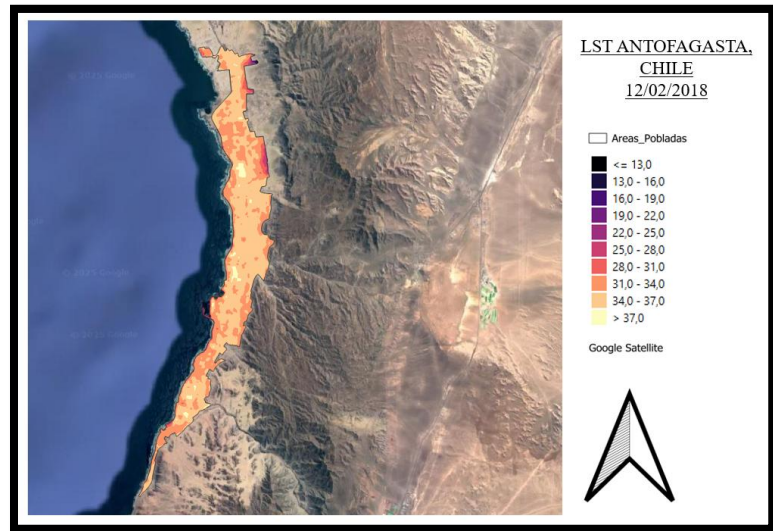
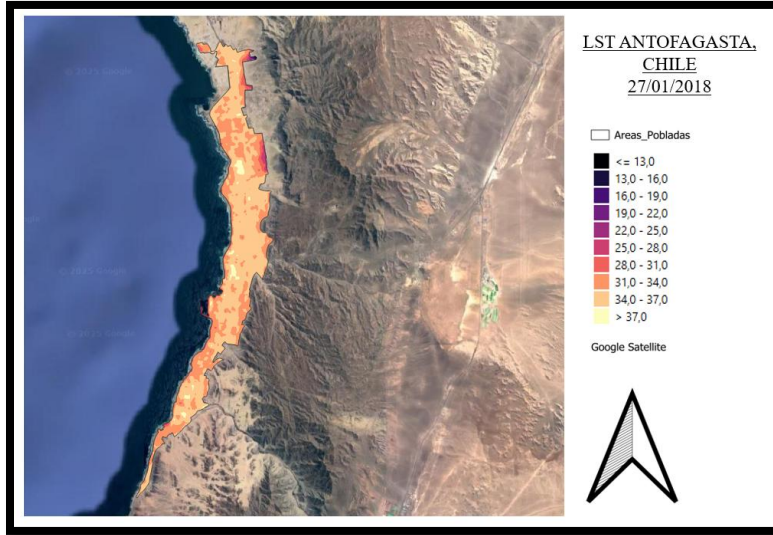
- Zhou, Y., Li, H., & Li, X. (2024). Building energy savings by green roofs and cool roofs in current and future climates. *npj Urban Sustainability*, 4, 1–9. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00159-8>
- Agra, H. et al. (2017). Sedum-dominated green roofs in a semi-arid region increase CO₂ concentrations during the dry season. *Science of the Total Environment*, 584–585, 1147–1154.
- Mahmoodzadeh, M., et al. (2020). Effects of Extensive Green Roofs on Energy Performance of School Buildings in Four North American Climates. *Water*, 12(1), 6.
- Vera, S., et al. (2018). Experimental study on the stomatal resistance of green roof vegetation of semiarid climates for building energy simulations. IBPC 2018.
- Wahba, S. M., Kamel, B. A., Nassar, K. M., & Abdelsalam, A. S. (2018). *Effectiveness of green roofs and green walls on energy consumption and indoor comfort in arid climates*. *Civil Engineering Journal*, 4(10), 2385–2397. <https://doi.org/10.28991/cej-03091158>

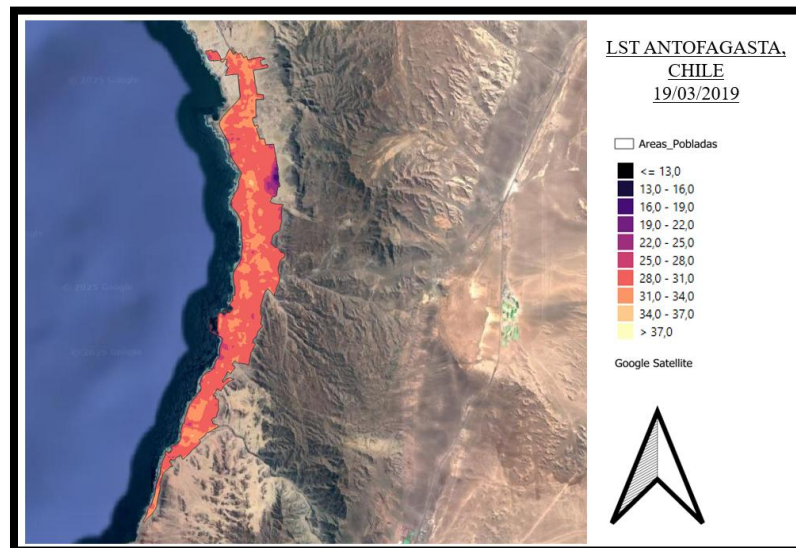
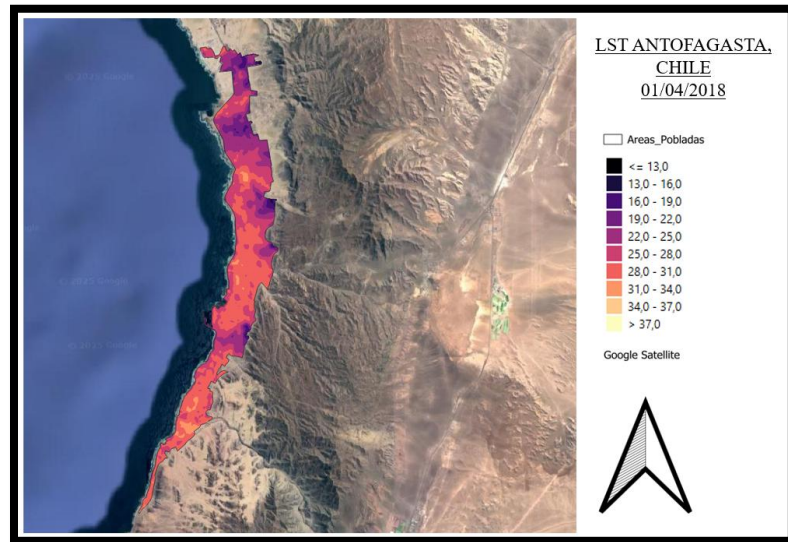
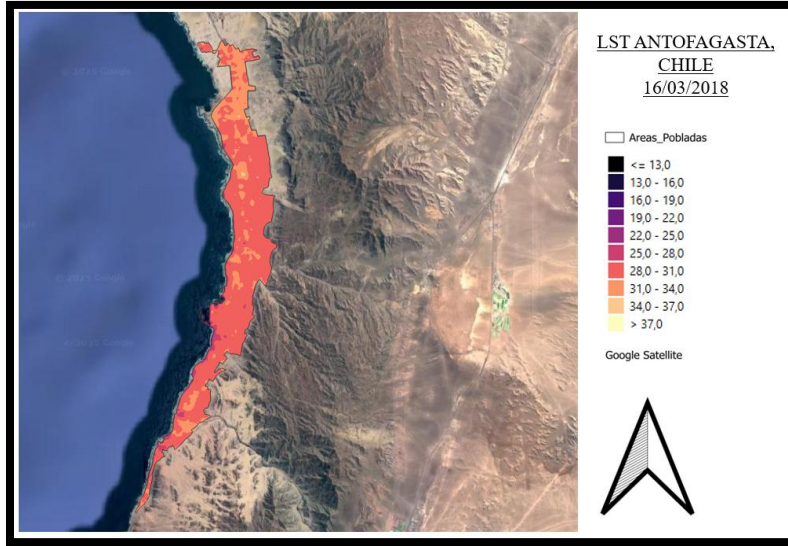
Anexos

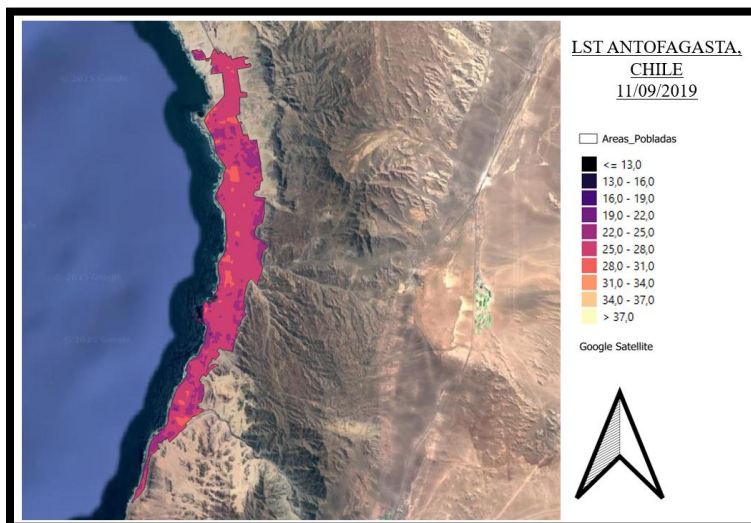
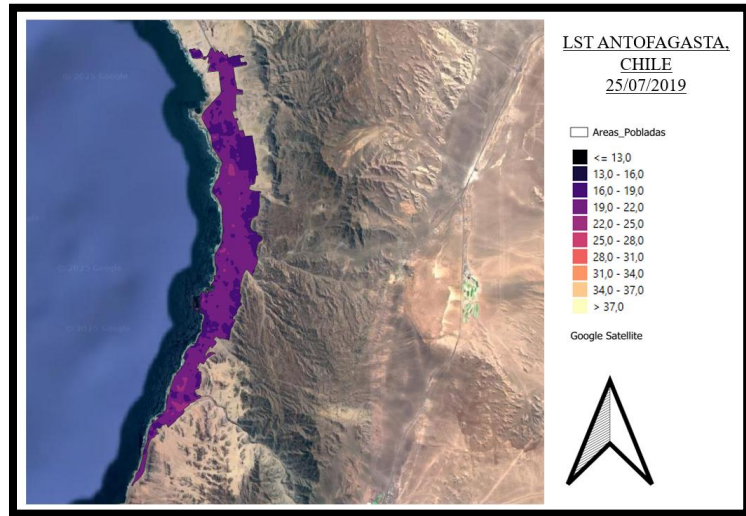
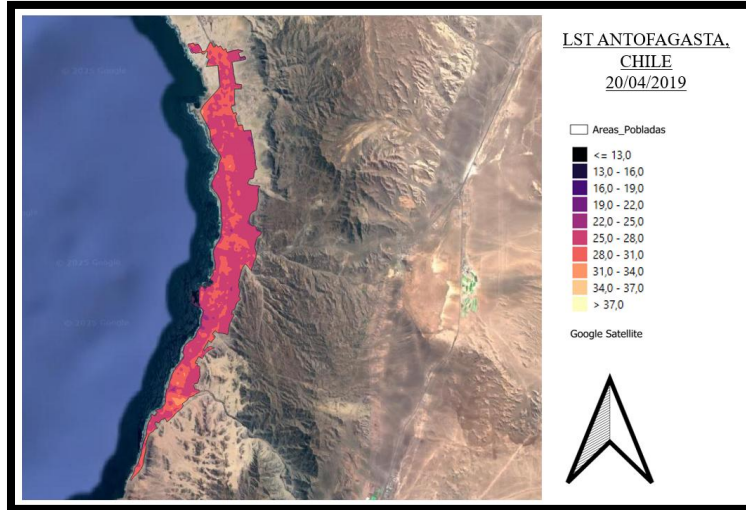
- Mapas térmicos LST los días seleccionados en el objetivo específico N°1:

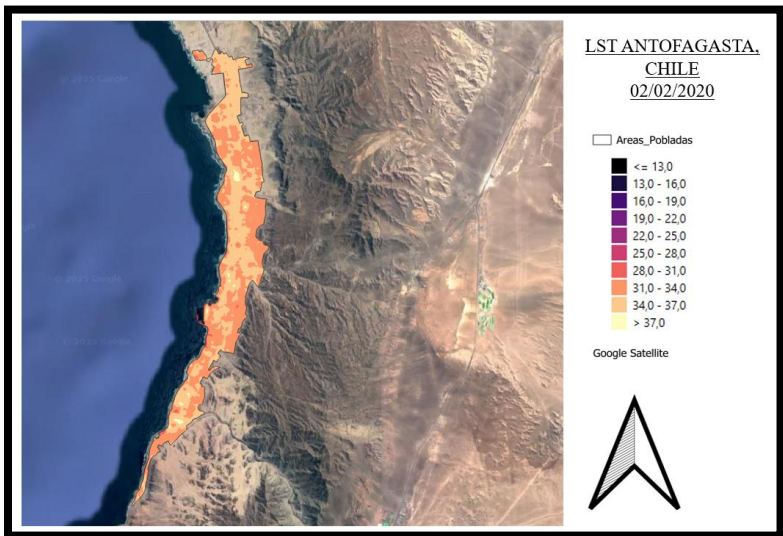
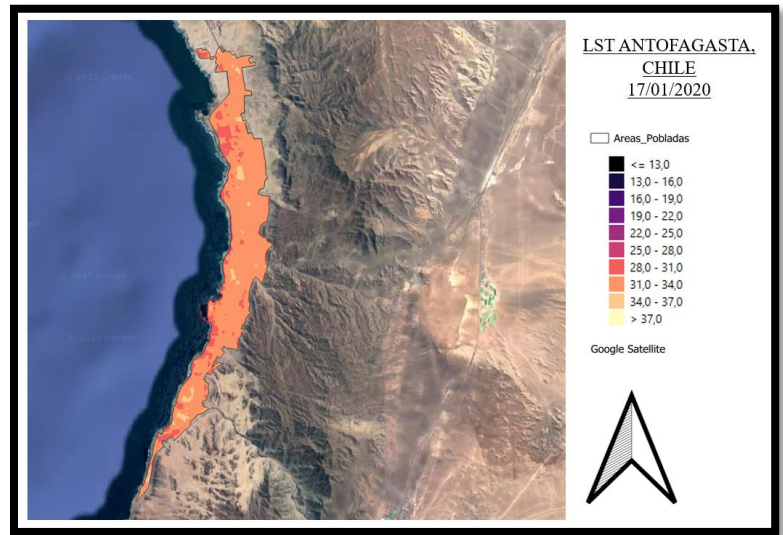
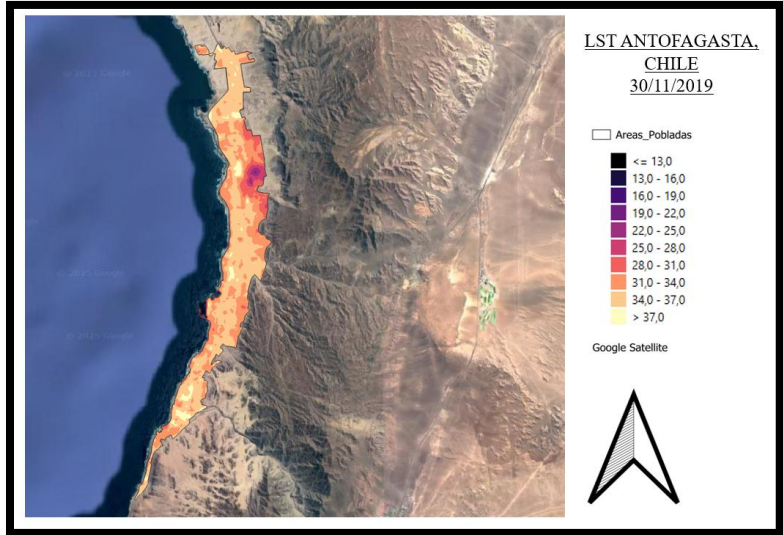


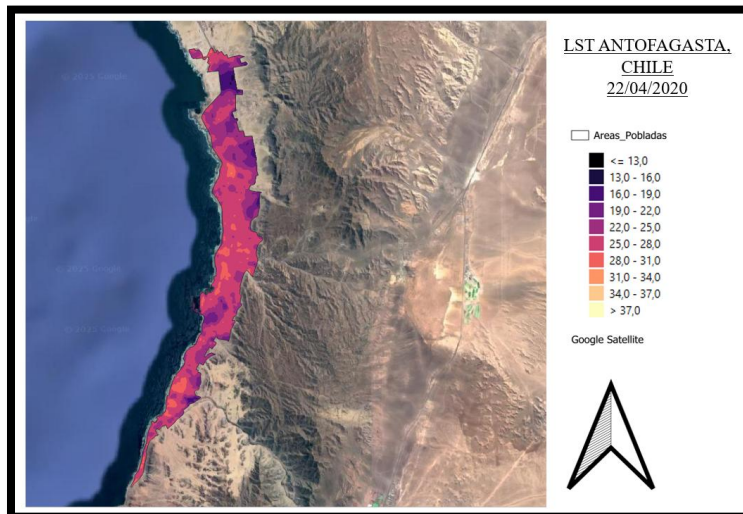
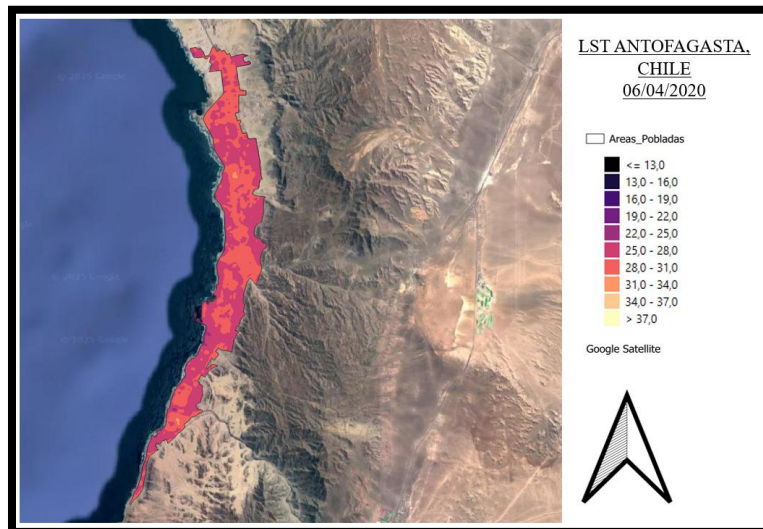
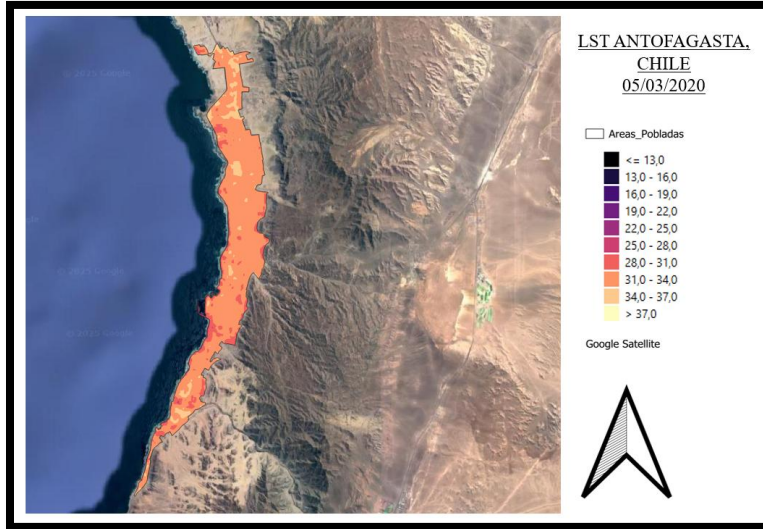


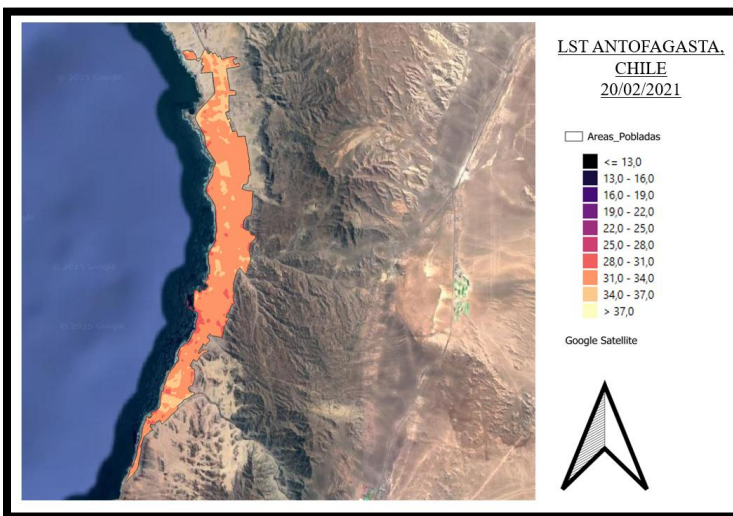
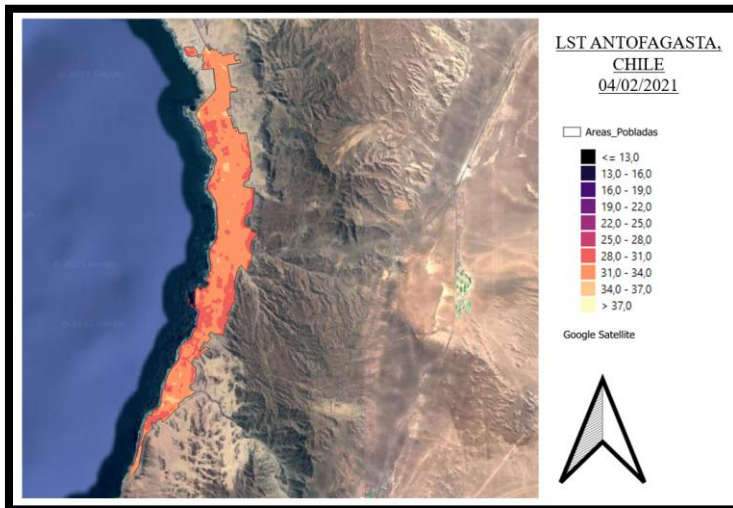
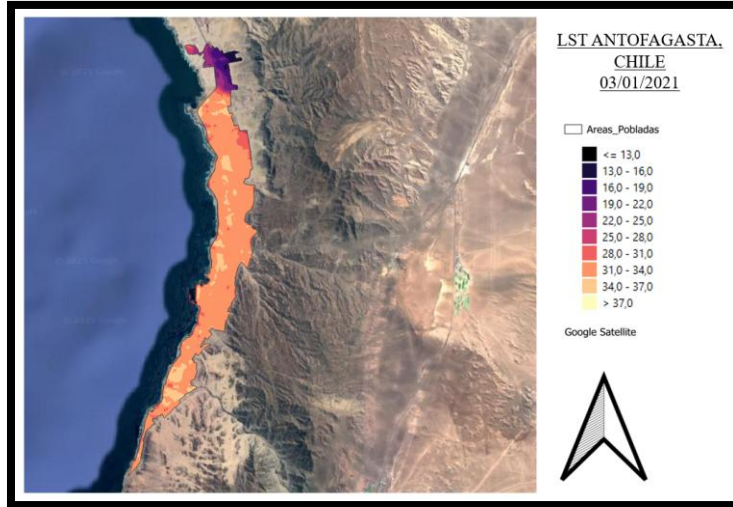


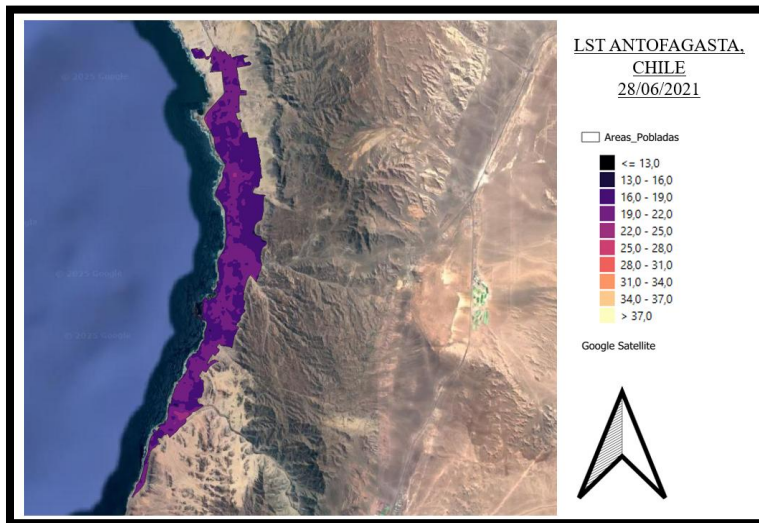
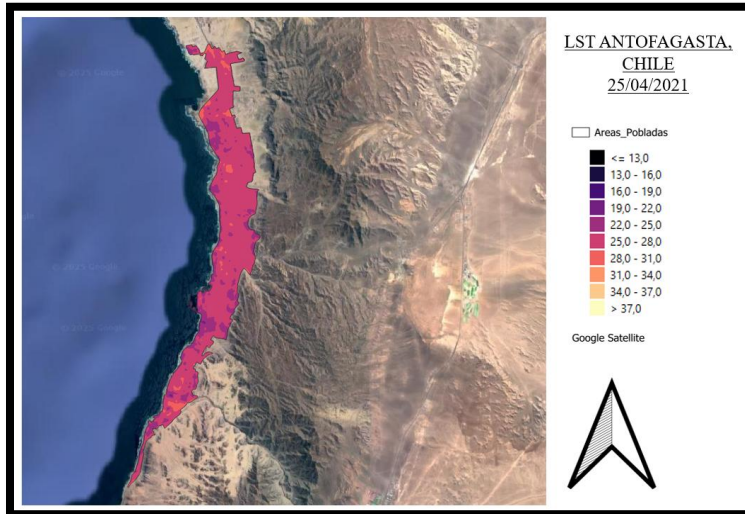
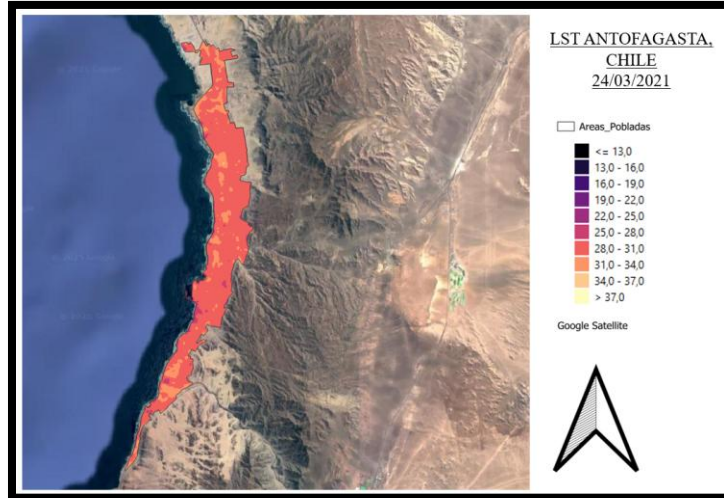


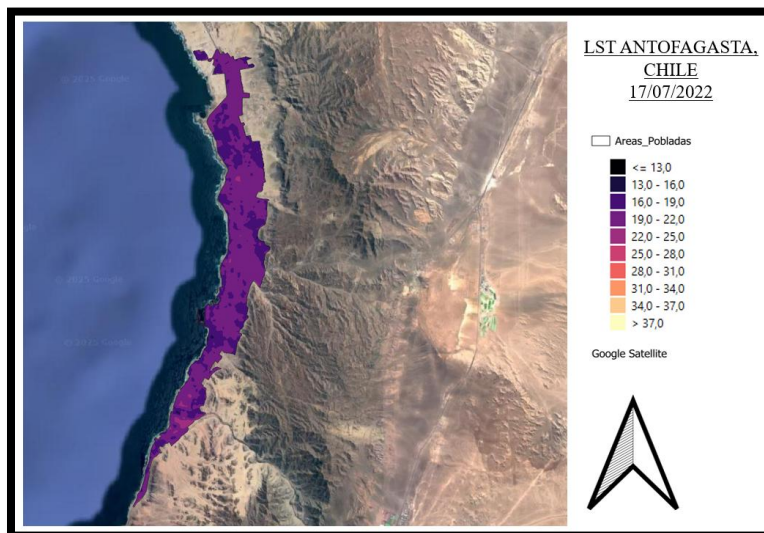
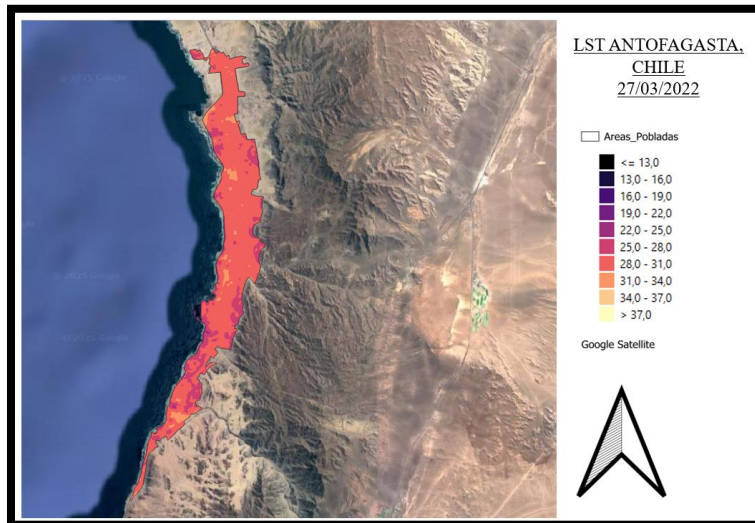
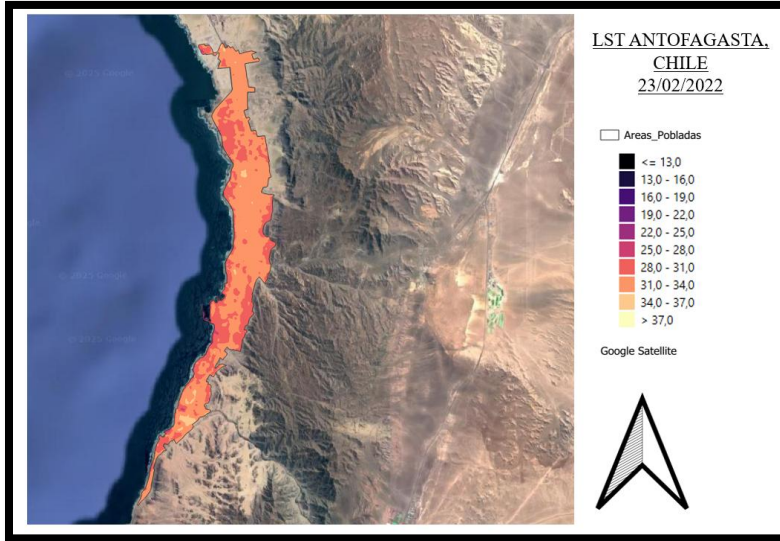


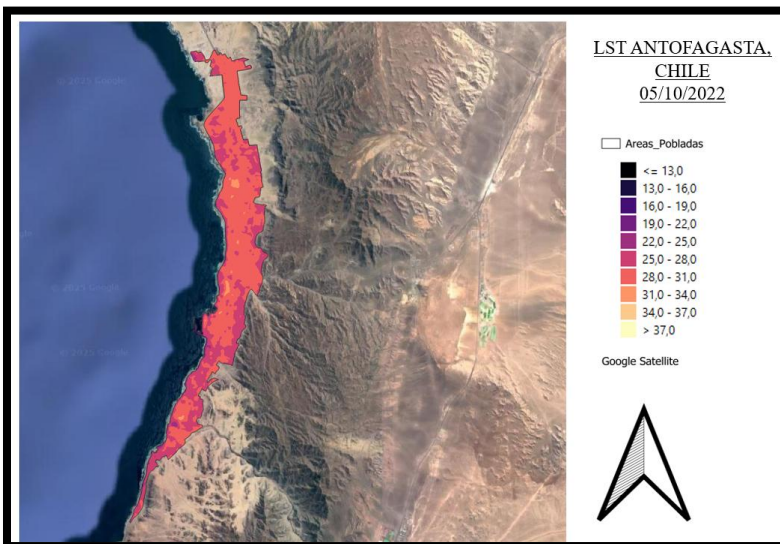
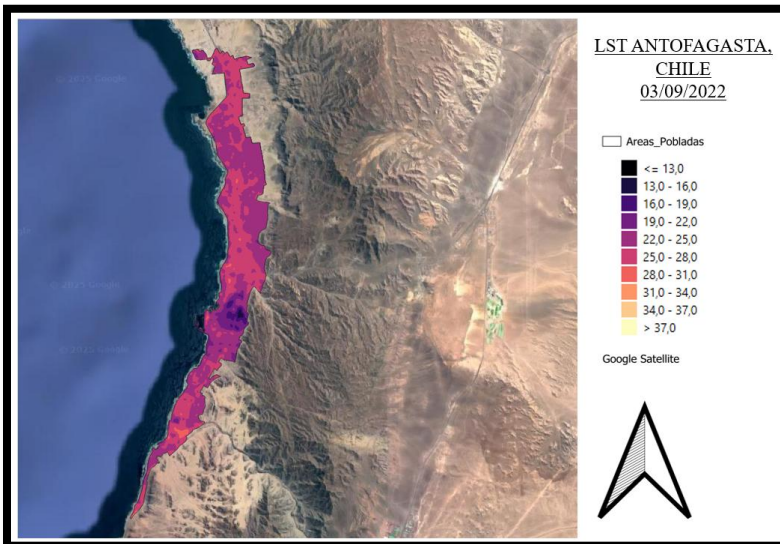
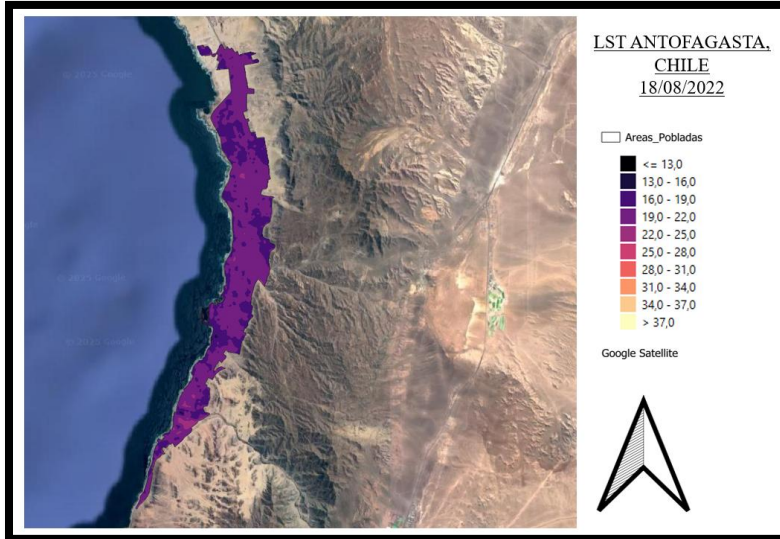


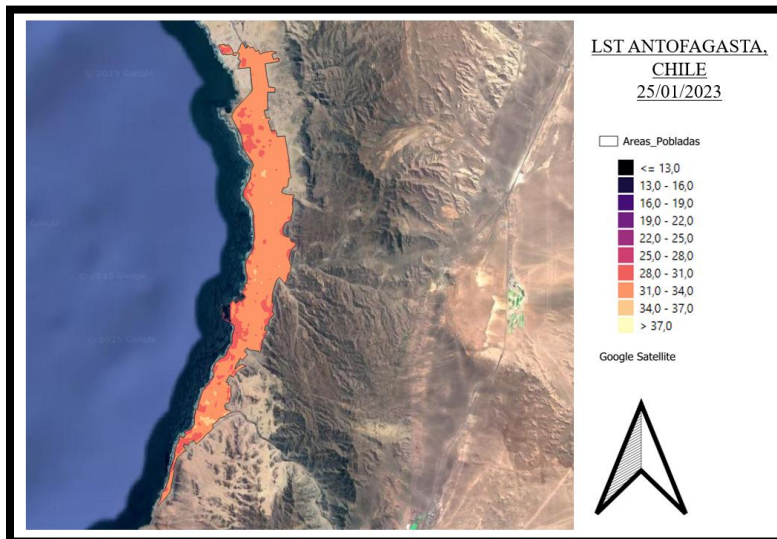
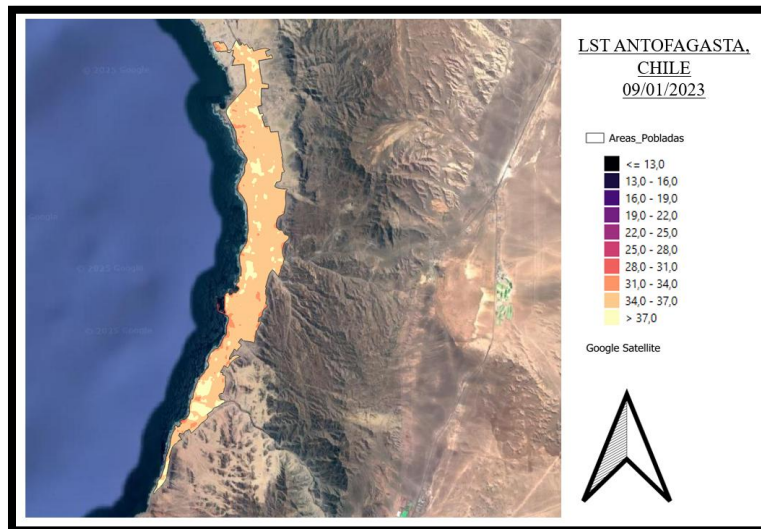
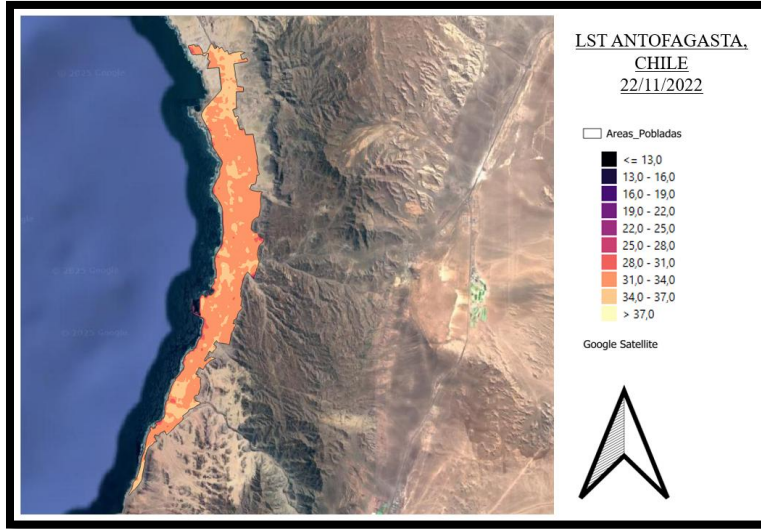


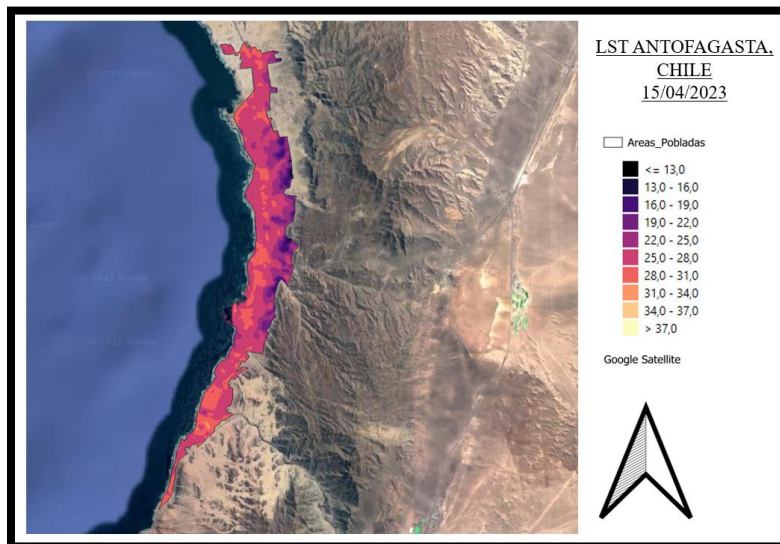
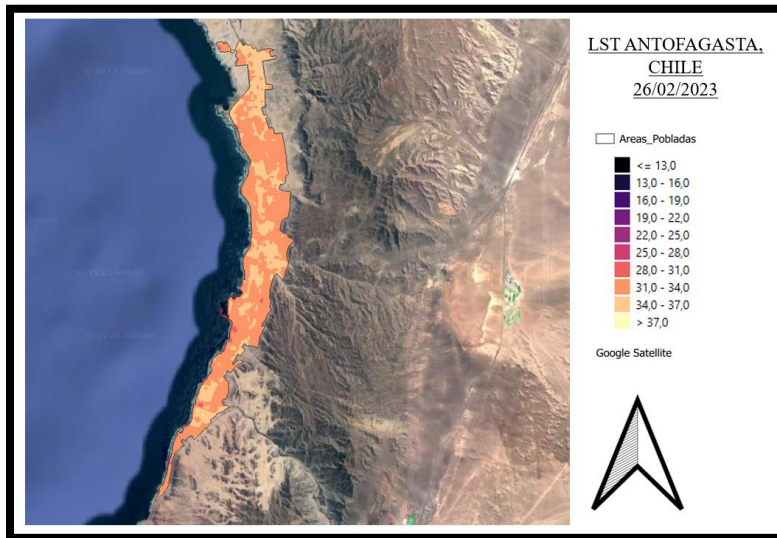
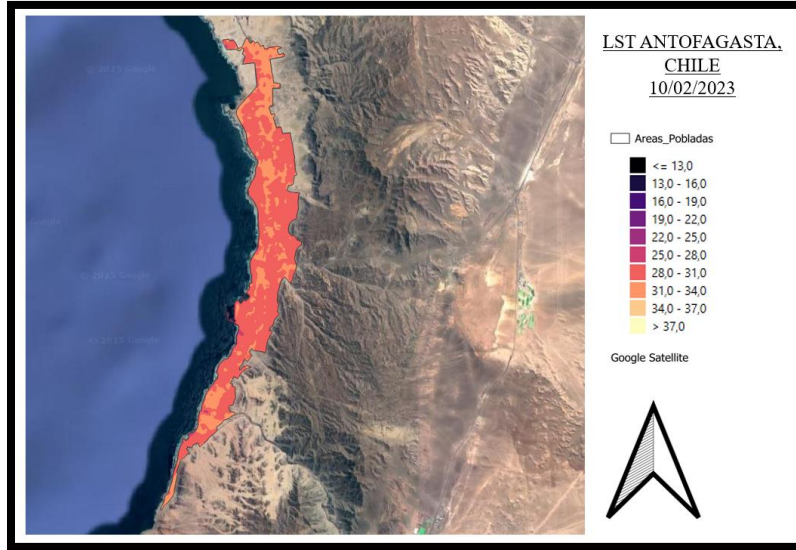


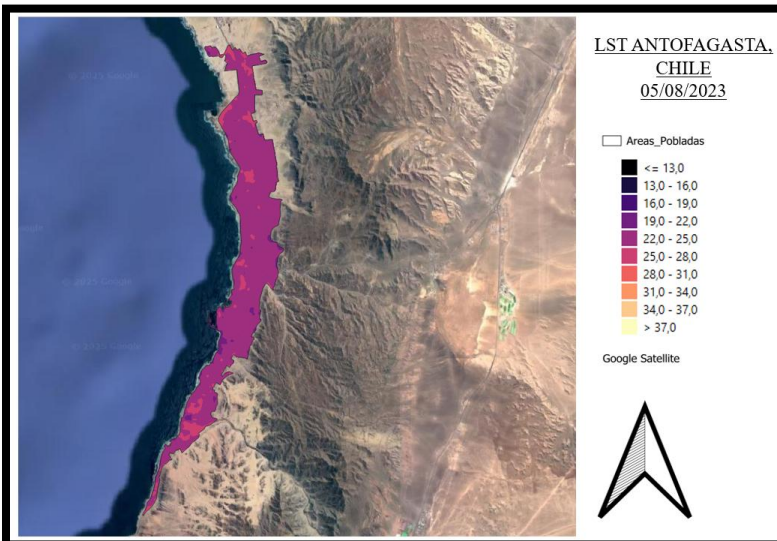
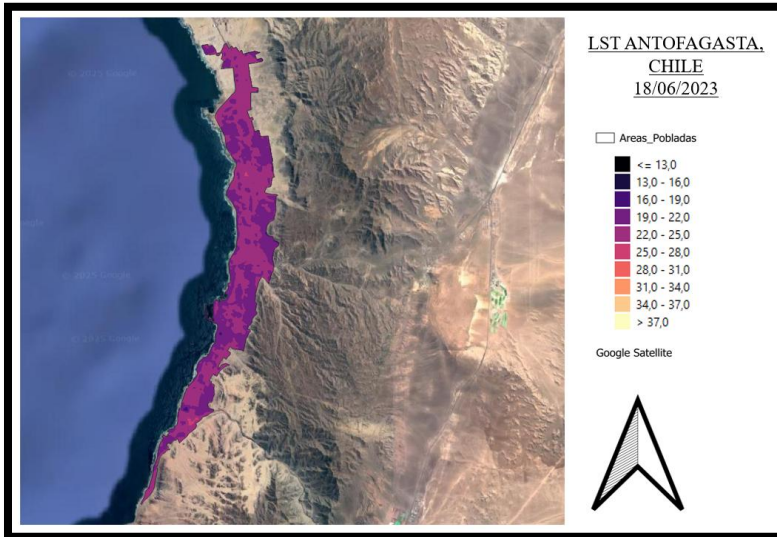
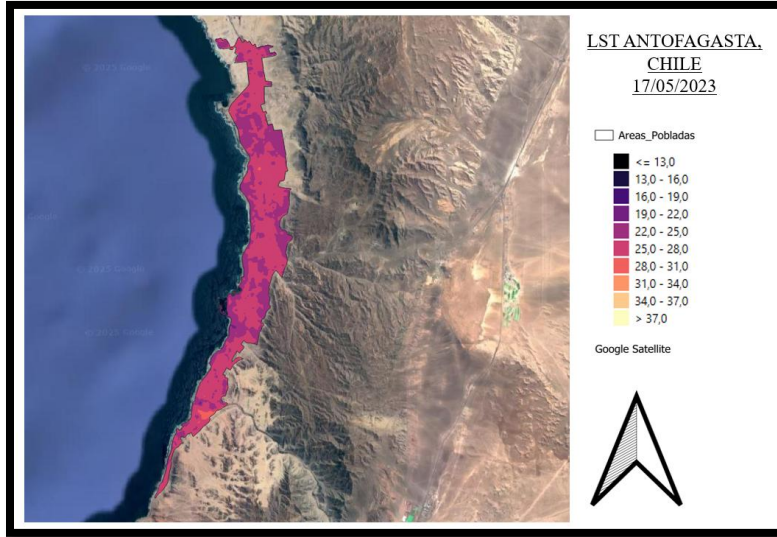


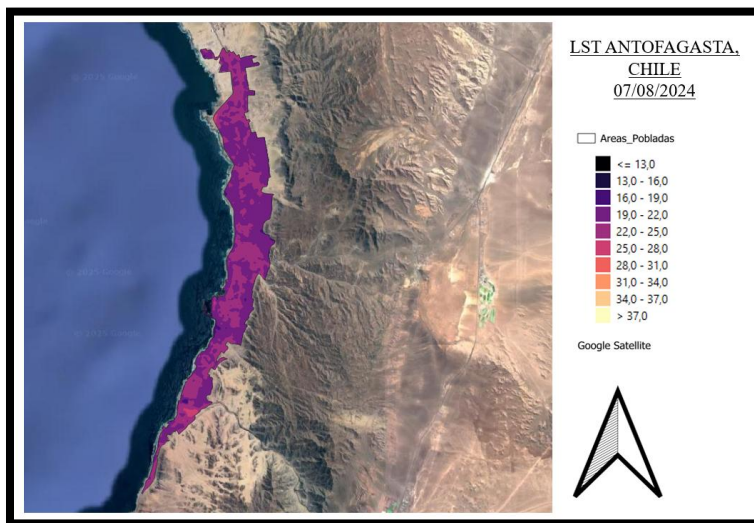
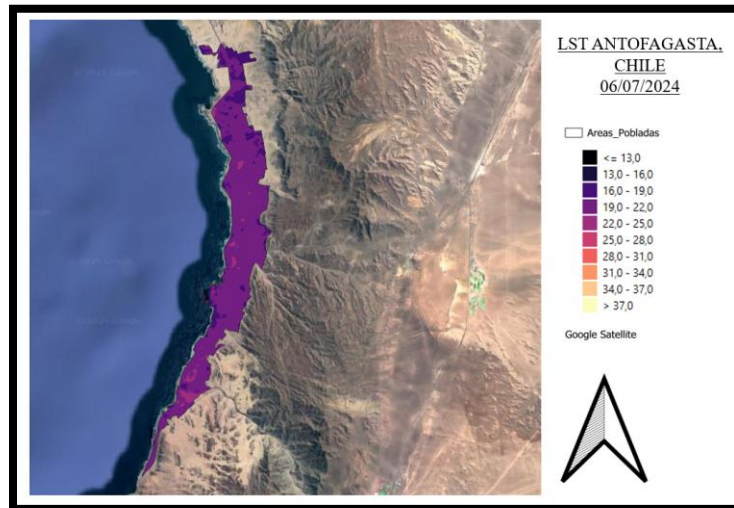
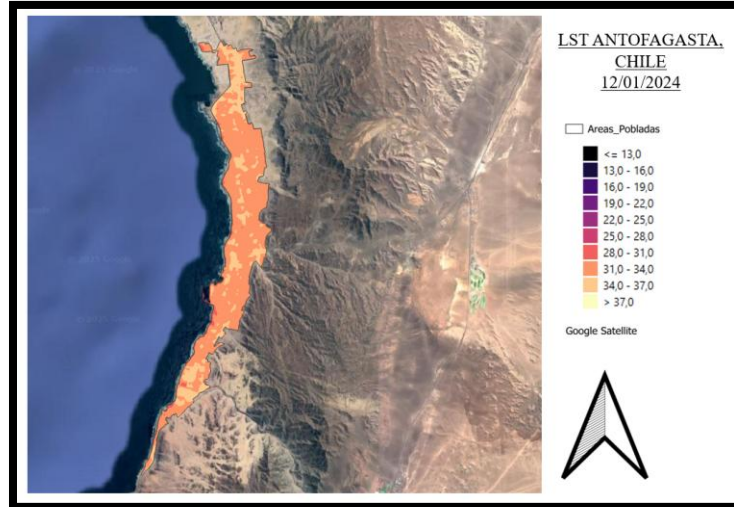


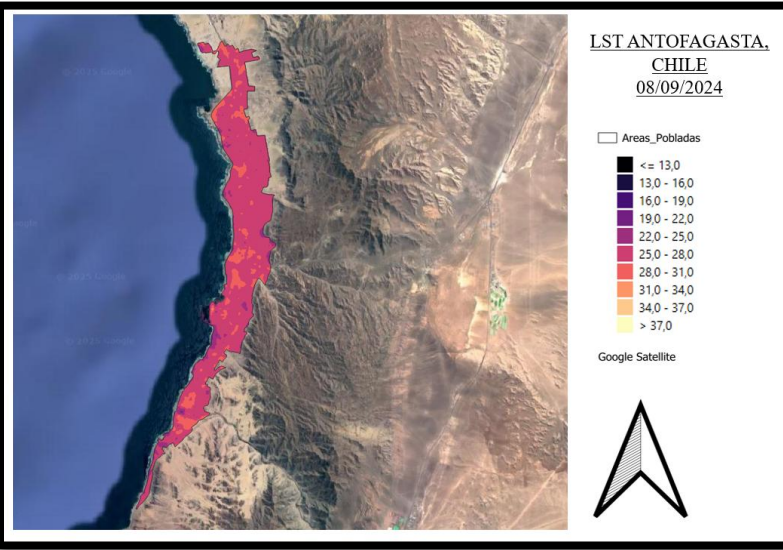
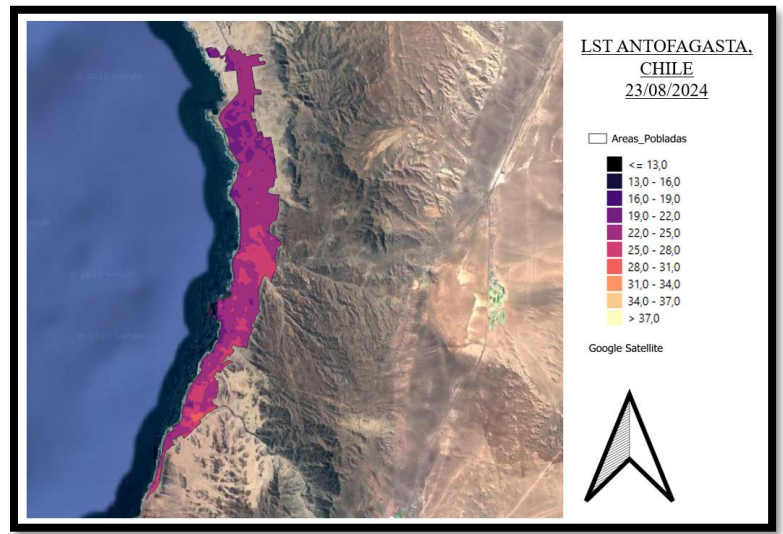
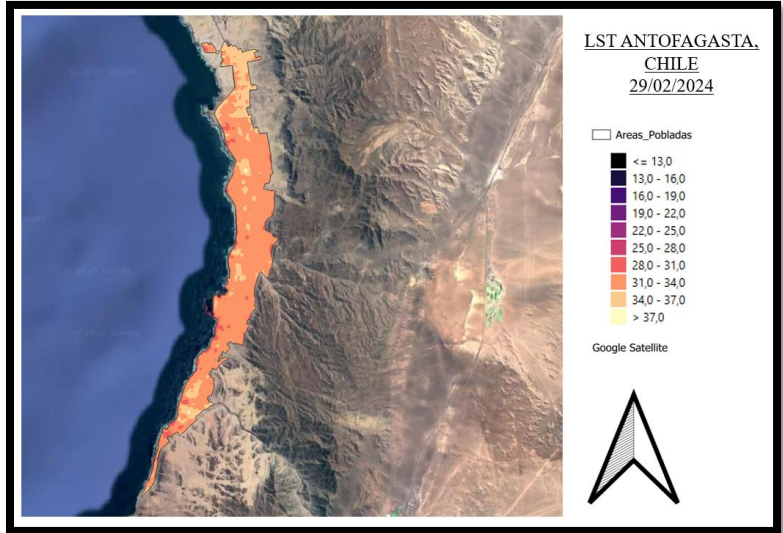


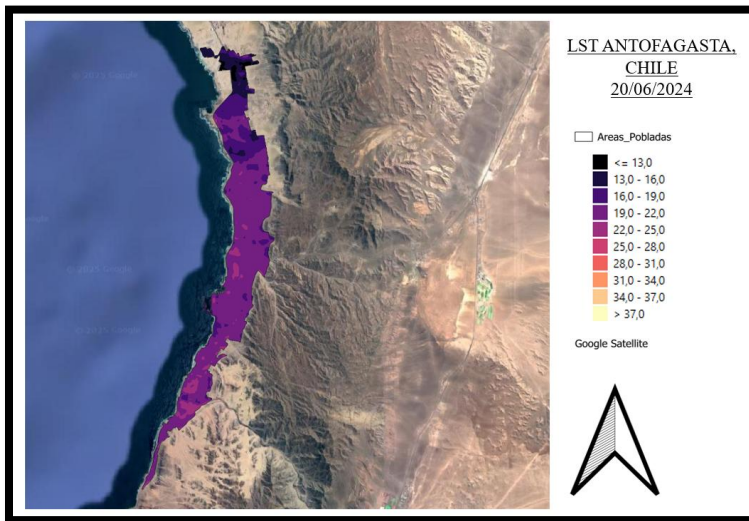
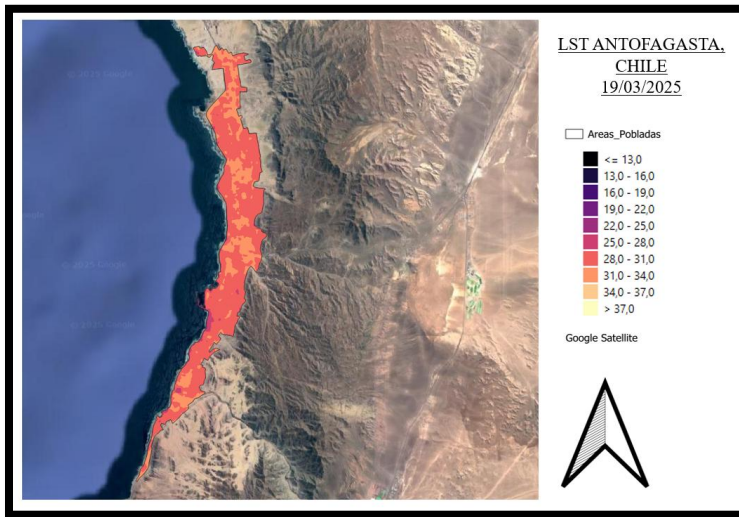
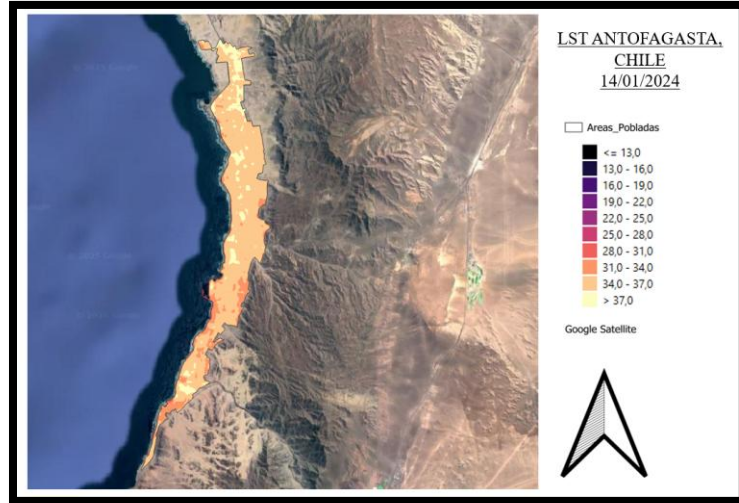


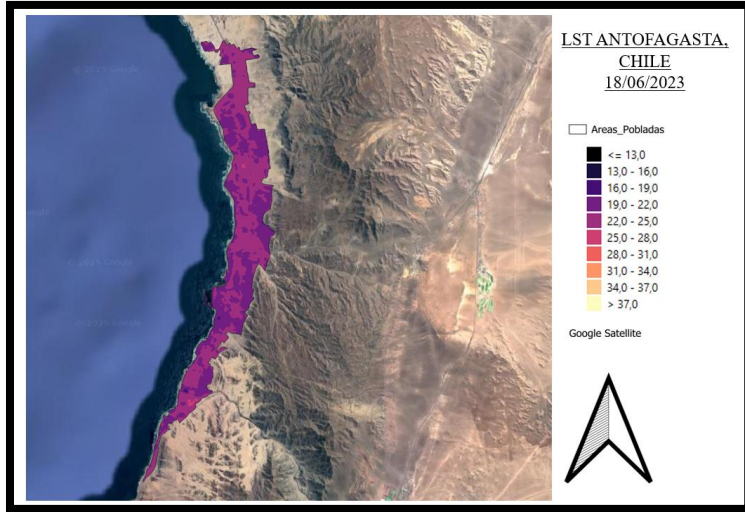




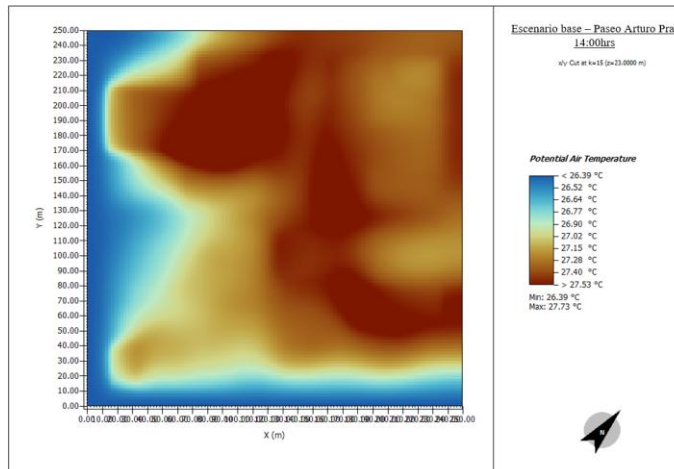
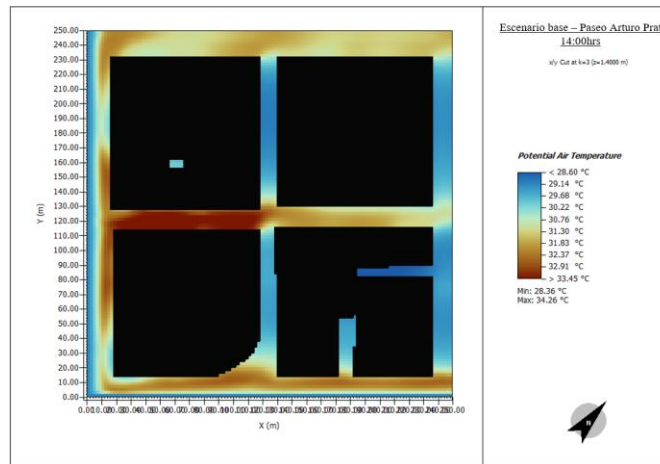
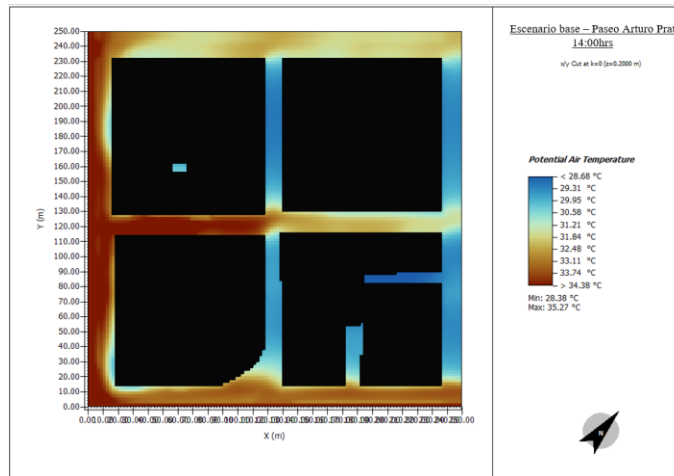


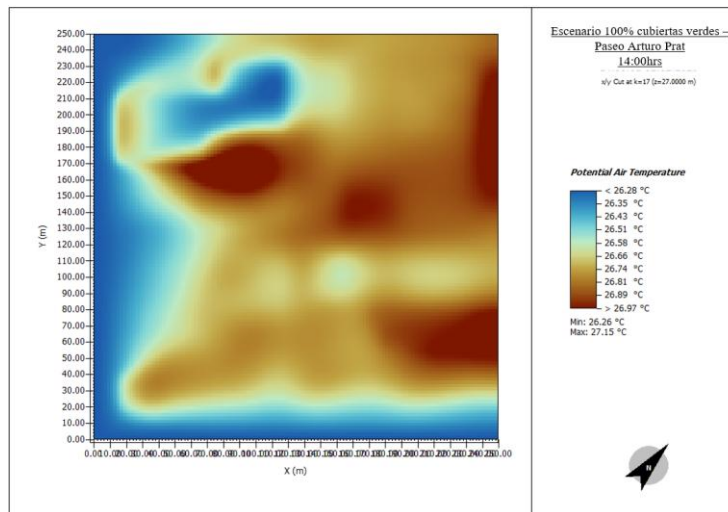
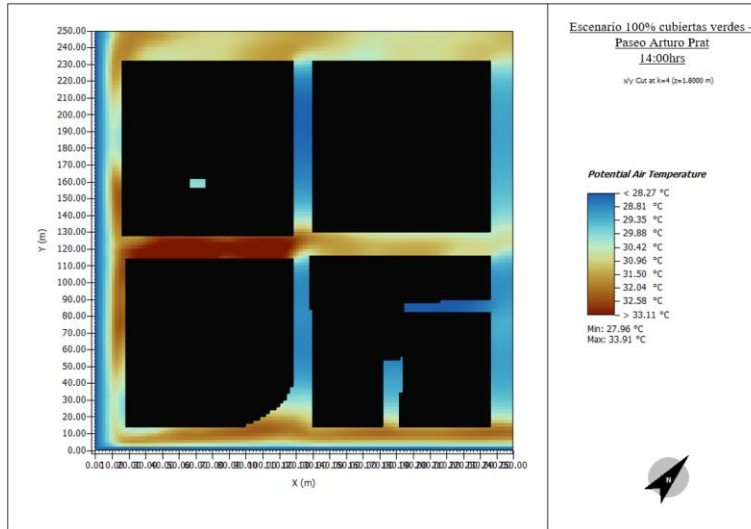
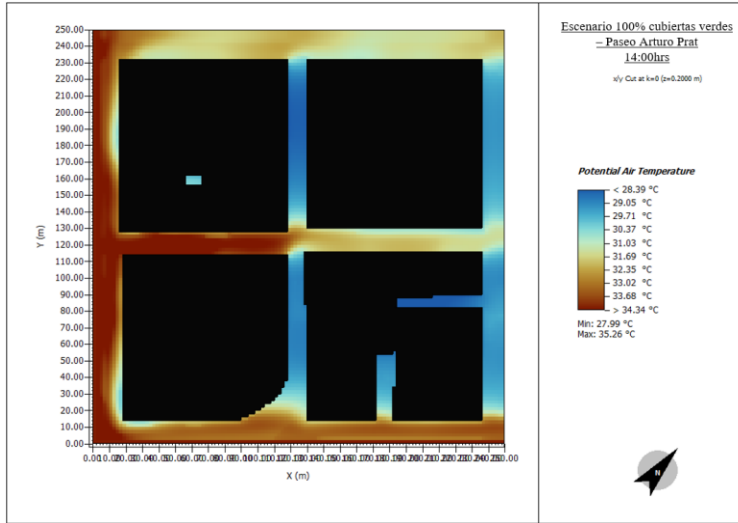


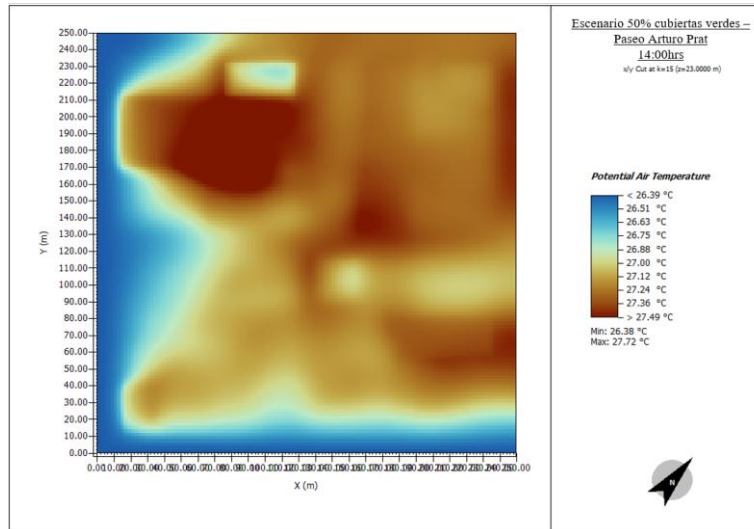
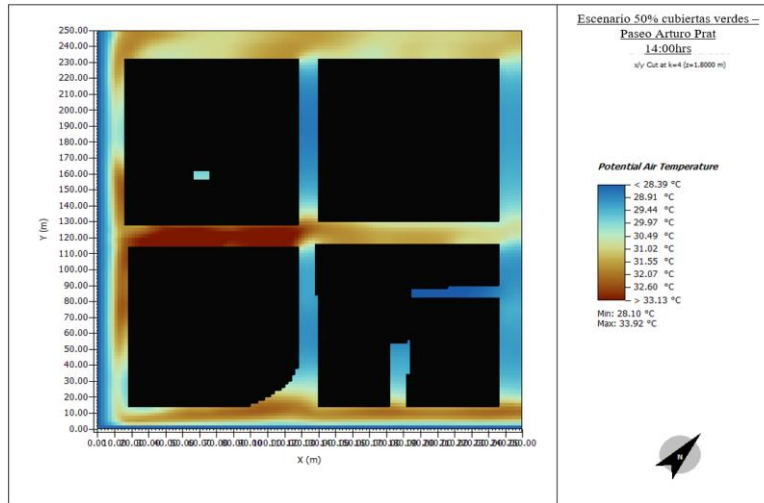
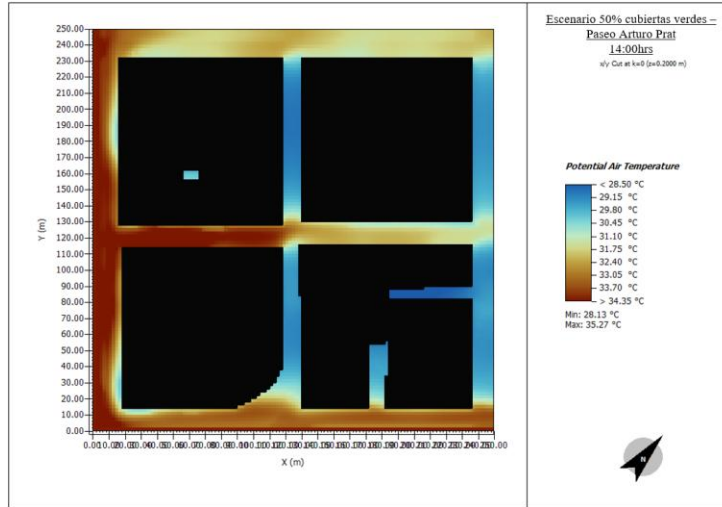


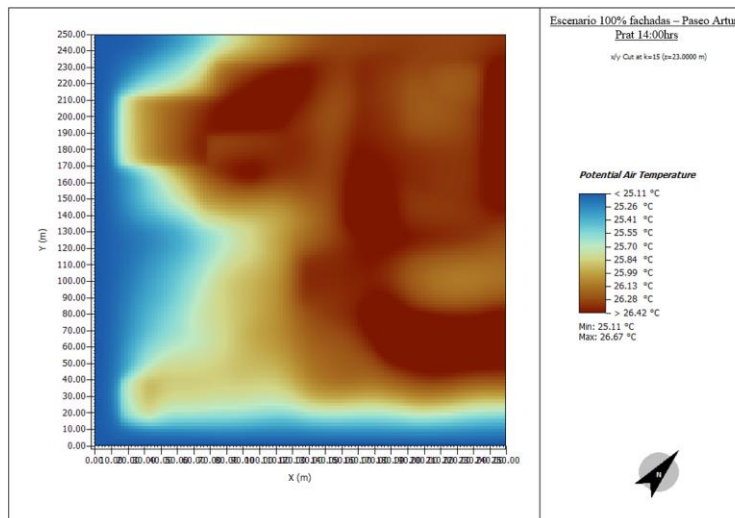
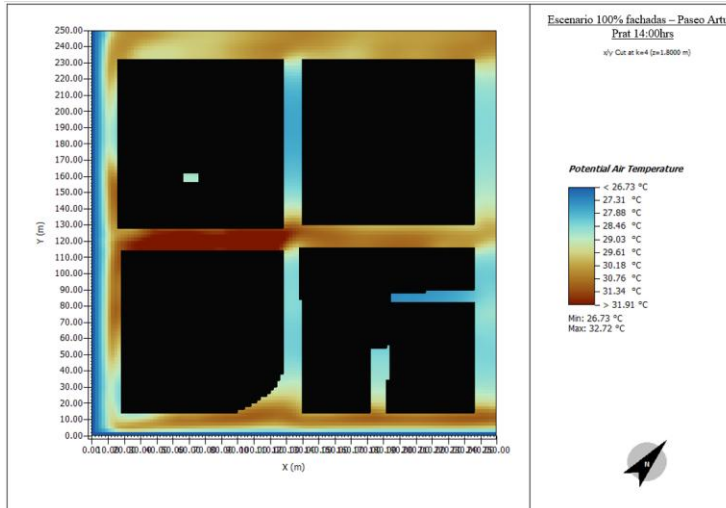
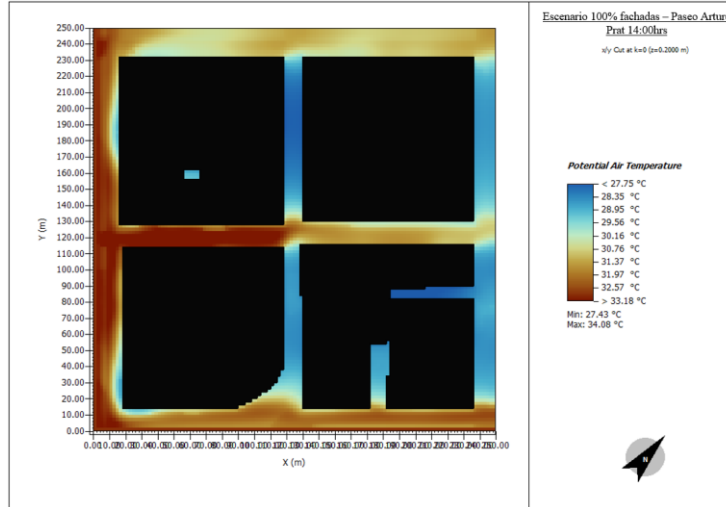


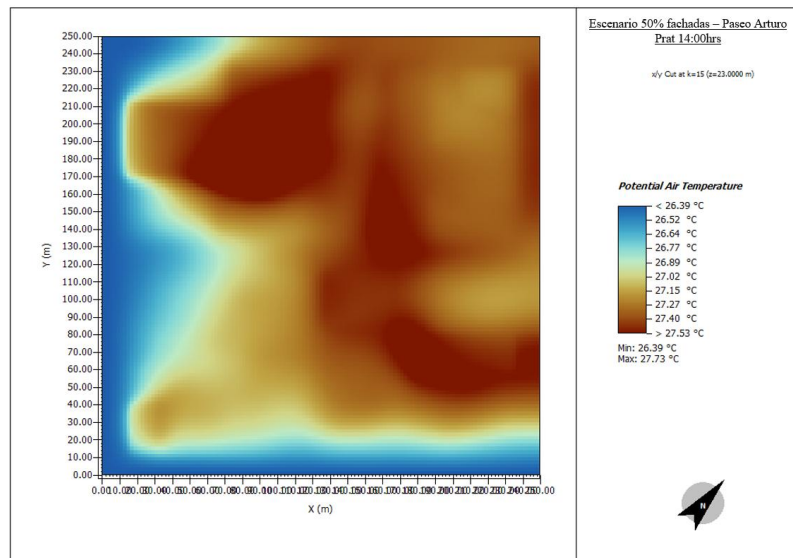
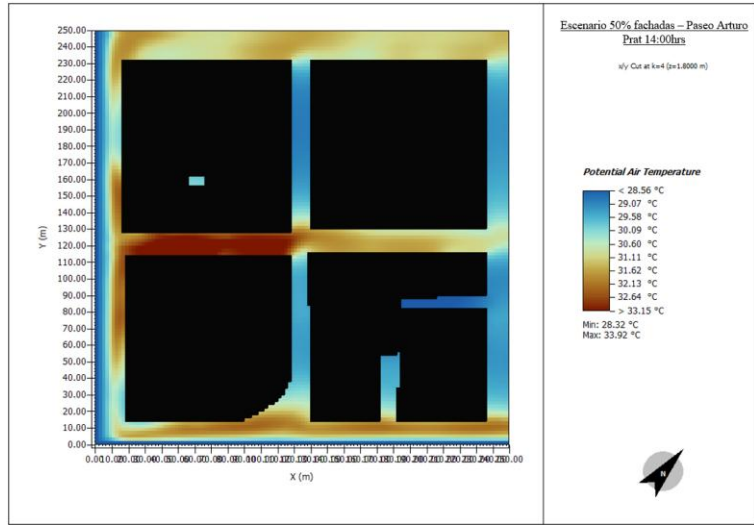
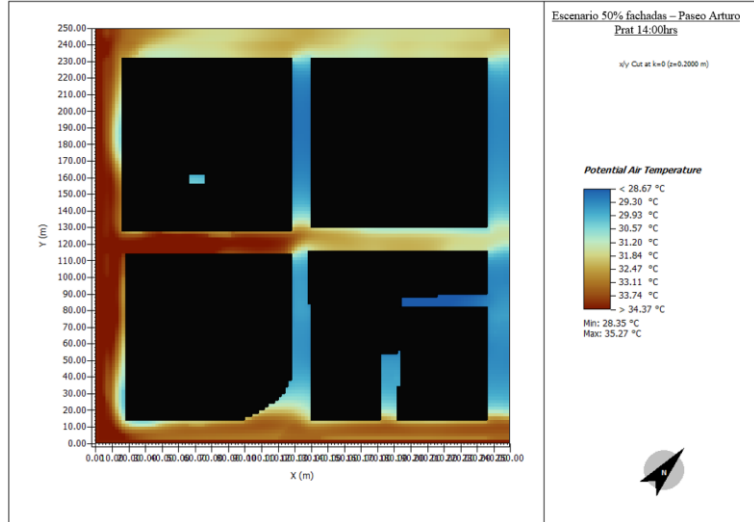
- Resultados visualizados en Envimet (Leonardo) en vista planta de todos los escenarios simulados en la presente investigación, para las 3 alturas examinadas (0.2m, 1.8m, 23m) a las 14hrs en el siguiente orden (escenario base, cubiertas verdes 100%, cubiertas 50%, fachadas verdes 100%, fachadas 50% y escenario combinado 100%) y además se adjuntarán en corte vertical en el eje peatonal para ambos paseos mapas térmicos de los resultados más representativos:
- **Modelo paseo Arturo Prat:**

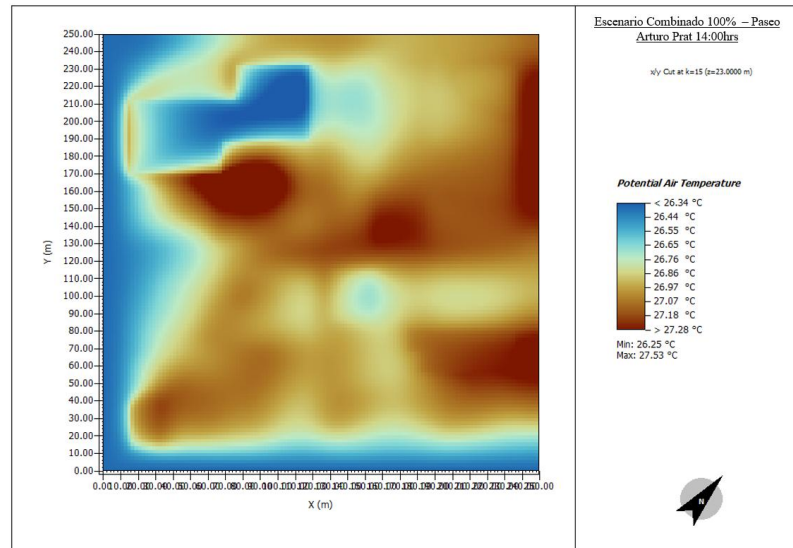
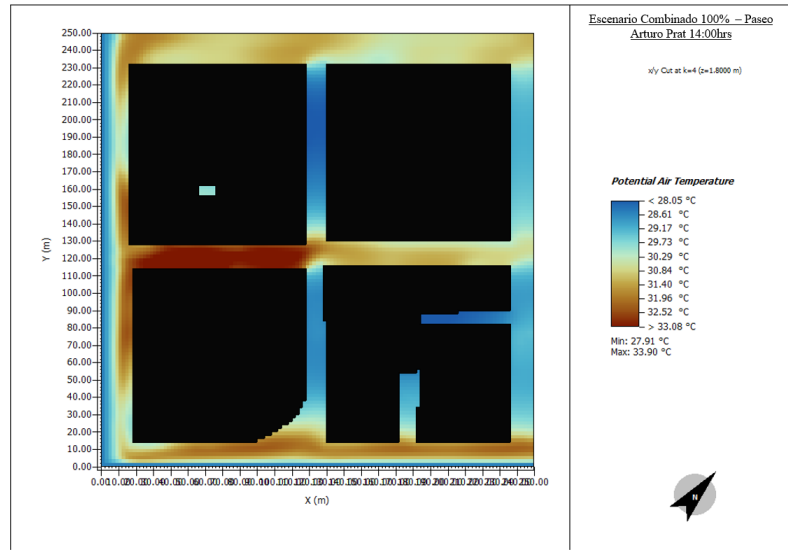
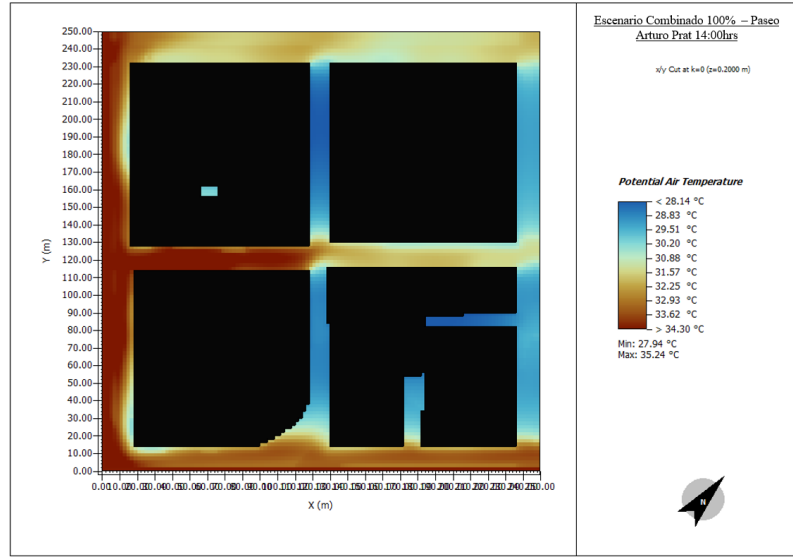


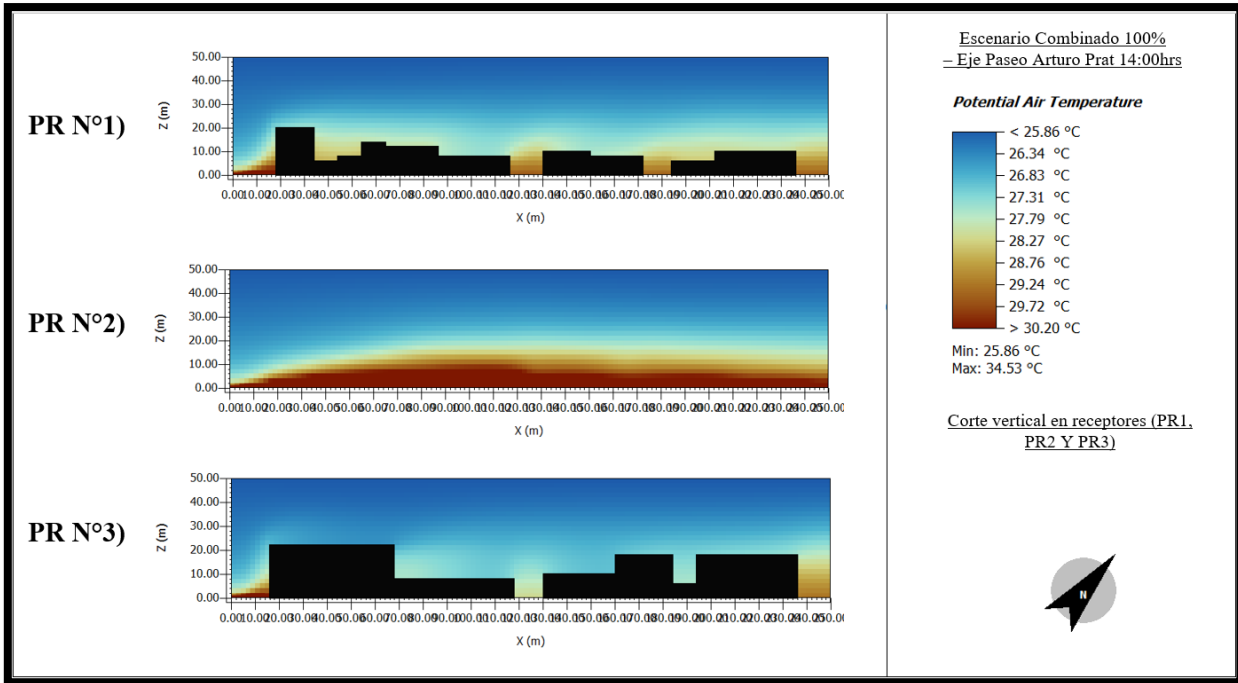
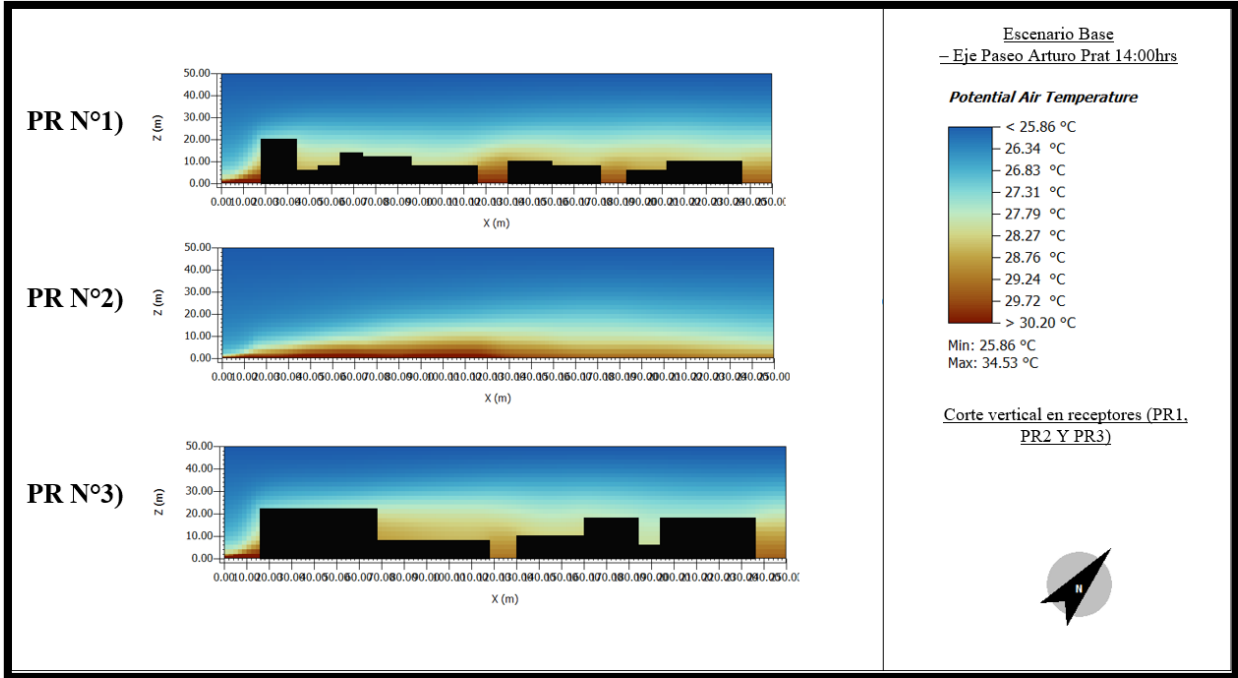












- Modelo Paseo Manuel Matta:

