

Aplicación de cubiertas vegetales para la mitigación de la Isla de Calor Urbana en la ciudad de Valparaíso, Chile

Claudio Carrasco Aldunate¹ | Massimo Palme² | Jorge Valenzuela Cabezas³

Recibido: 18-12-2023 | Versión final: 28-10-2024

Resumen

La implementación de cubiertas vegetales como estrategia de mitigación basada en la naturaleza, frente al cambio climático, se está aplicando de manera urgente en muchas ciudades, ya que además de entregar importantes y numerosos beneficios a la calidad del espacio público, ofrece reducciones en el consumo energético de los edificios, especialmente en días calurosos o de verano. La ciudad de Valparaíso, en la zona central de Chile, presenta un clima mediterráneo costero. En ella se ha evaluado el comportamiento térmico y la presencia de Isla de calor atmosférico y superficial, en verano e invierno, mediante transectos urbanos y teledetección. La isla de calor atmosférica presenta registros de hasta 5,2 °C a las 8 pm., en día despejado de invierno y hasta 8,8°C en día despejado de verano. Respecto de la isla de calor superficial, se han registrado valores de hasta 4 °C en invierno y hasta 6 °C en verano para días despejados a las 2 pm. En este trabajo, y como manera de mitigar estos comportamientos, se han evaluado escenarios y estrategias locales simulando la implementación de cubiertas vegetales en los edificios del sector céntrico de la ciudad, utilizando el software ENVI-met. Se presentan los resultados obtenidos de estas simulaciones, tanto para mitigar temperaturas superficiales como de temperatura del aire en la ciudad. La estrategia de implementar cubiertas vegetales es capaz de reducir las temperaturas superficiales de las cubiertas de los edificios, pero más significativa es la reducción de la temperatura del aire a nivel peatonal favoreciendo la vida urbana.

Palabras clave: clima urbano; isla de calor urbana; mitigación; vegetación urbana

Citación

Carrasco Aldunate, C. et al. (2024). Aplicación de cubiertas vegetales para la mitigación de la Isla de Calor Urbana en la ciudad de Valparaíso, Chile. *ACE: Architecture, City and Environment*, 19(56), 12581. <https://doi.org/10.5821/ace.19.56.12581>

Green Roofs Application on Urban Heat Island Mitigation in the Valparaíso City, Chile

Abstract

The implementation of green roofs as a nature-based strategy to mitigate climate change is urgently being applied in many cities, as in addition to providing important and numerous benefits to the quality of public spaces, it offers a reduction in the energy consumption of buildings, especially on hot or summer days. Valparaíso is a city located in the central zone of Chile, with a coastal Mediterranean climate. The thermal behaviour and the presence of an atmospheric and surface heat island have been evaluated in summer and winter using urban transects and remote sensing. The atmospheric heat island has been recorded up to 5.2°C at 8 pm, on a sunny winter day, and up to 8.8°C on a sunny summer day. Regarding the surface heat island, values up to 4°C in winter and up to 6°C in summer have been recorded for sunny days at 2 p.m. In this paper, and as a way to mitigate these behaviours, local scenarios and strategies have been simulated through the implementation of green roofs on buildings in the city centre, using the ENVI-met software. The results of these simulations are presented in order to mitigate both surface and air temperatures in the city. The strategy of implementing green roofs is able to reduce the surface temperatures of building roofs, but more important is the reduction of air temperature at pedestrian level, which favours urban life.

Keywords: urban climate; urban heat island; mitigation; urban greening

¹ Dr. Arquitecto, Facultad de Ingeniería Universidad de Valparaíso, Chile (ORCID: [0000-0003-3259-1493](https://orcid.org/0000-0003-3259-1493); Scopus Author ID: [57193324716](https://orcid.org/57193324716)), ² Dr. Ingeniero, Departamento de Arquitectura, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile (ORCID: [0000-0003-1166-2926](https://orcid.org/0000-0003-1166-2926); WoS ResearcherID: [H-5322-2011](https://orcid.org/H-5322-2011); Scopus Author ID: [55505323600](https://orcid.org/55505323600)), ³ Ingeniero Constructor, Facultad de Ingeniería Universidad de Valparaíso, Chile (ORCID: [0009-0006-5630-0215](https://orcid.org/0009-0006-5630-0215)). Correo de contacto: claudio.carrasco@uv.cl

1. Introducción

Las ciudades ofrecen mejoras en la calidad de vida de las personas, facilitando el acceso a servicios urbanos, desarrollo económico, laboral, familiar, comunitario, etc. De esta manera las ciudades se han ido sobre poblando en muchos casos y creciendo sobre el territorio, ocupando nuevos suelos, a veces siguiendo normativas y otras, como la mayoría de las ciudades latinoamericanas, de manera espontánea y descontrolada, especialmente en su periferia. Si bien las ciudades ocupan sólo el 3% del área terrestre (Roth, 2013), más de la mitad de la población mundial vive en ellas; en América Latina esta cifra es del 80% y se espera que para el 2050 sea del 90% (UN, 2018). Esto implica un crecimiento urbano acelerado donde se produce a gran velocidad el cambio de uso de suelo rural en uso de suelo urbano. En el caso de Chile, donde la población urbana es del 87,8% (Smith et. al, 2022), hay un constante crecimiento de la estructura urbana que mineraliza el territorio. De acuerdo con las proyecciones a nivel nacional, el porcentaje de población urbana pasaría de un 86.3% en el año 2002 a un 89.1% el año 2035 (INE, 2019). La rápida urbanización en las décadas recientes ha modificado de manera importante y sustancial la superficie del planeta modificando las capacidades de almacenamiento de calor. La calidad del entorno construido cobra cada vez más importancia si queremos avanzar hacia una ciudad más sostenible y resiliente, sensible al clima y que ofrezca un hábitat seguro y saludable.

Este proceso de crecimiento es acompañado por modificaciones de la morfología del territorio, materiales, usos, etc. dando origen a lo que llamamos clima urbano, cuya principal característica es su diferencia en temperatura con el entorno rural. Esto que se produce es el fenómeno de Isla de Calor Urbana (ICU o UHI por sus siglas en inglés), que hace referencia a la variación de temperatura producida por la aglomeración urbana con respecto al campo y fue acuñado por primera vez por Gordon Manley en "On the frequency of snowfall in metropolitan England" de 1958 (Núñez Peiró et al., 2016). Sin embargo, el primer registro que se tiene de este fenómeno fue hecho por Luke Howard (1883) y publicado en "The Climate of London".

Su intensidad depende de la topografía, la densidad y forma urbana, el calor antropogénico causado por edificios y automóviles, las propiedades térmicas y ópticas de las superficies y el uso del suelo, entre otros (Mihalakakou, 2002). Un factor importante que explica esta intensidad es la presencia o no de suelos permeables y de mayor o menor presencia de humedad relativa y de evaporación. Al respecto, Coutts (et. al., 2009), señala a importancia de la eliminación de la vegetación y de las superficies y suelos permeables en la manifestación de la isla de calor urbana. La literatura ha destacado que los diferentes tipos de materiales de cobertura del suelo, su albedo y rugosidad, el grado de impermeabilidad, así como la calidad y cantidad de vegetación, pueden tener un impacto significativo en la generación de la ICU (Carrasco y Palme, 2020).

El cambio climático modifica el régimen térmico aumentando las temperaturas máximas en verano provocando que muchas veces los espacios públicos sean inhabitables (Sánchez Montañés, B., et. al. 2023). Las ICU se han relacionado indirectamente con el cambio climático debido a provoca el aumento de la demanda de energía, los costos del aire acondicionado, la contaminación del aire, y las emisiones de gases de efecto invernadero y, por tanto, el aumento del calentamiento global (EPA, 2022), incidiendo en el consumo de energía y confort de los edificios, en la calidad del aire y el bienestar y salud de los habitantes (Carrasco et. al., 2017). Asociado a este fenómeno están las ICUS, que se refiere a la Isla de Calor Urbana Superficial. Esta es la diferencia de temperaturas entre las superficies urbanas (fuertemente mineralizada) y las superficies rurales (principalmente naturales y vegetales). A su vez la isla de calor atmosférico bajo la capa límite del aire urbano y la isla de calor superficial diurna y nocturna experimentan una intensificación, lo que ha llevado a un número creciente de noches tropicales que se han hecho más frecuentes en diversas regiones (Rasilla et. al 2019). Algunas investigaciones señalan que el estrés generado por calor está relacionado con una mayor demanda de energía en refrigeración (Akbari, 2001). Para las ciudades latinoamericanas se han registrado importantes diferencias de temperatura campo-urbano. La razón principal de esto es el aumento de la población y ampliación de los límites de las ciudades. La densificación y el desarrollo vertical también están causando el aumento en las temperaturas urbanas, especialmente en la noche (Palme y Carrasco, 2024; 2022).

Por otra parte, se espera que el cambio climático intensifique las condiciones de ICU debido a situaciones extremas como olas de calor en verano, como ya se ha visto en diferentes partes del mundo, lo que afecta la economía, los ecosistemas y aumentando la mortalidad humana (Arellano-Ramos, et al., 2022). Esta situación se prevé más extrema si consideramos que para el año 2035 el número de personas viviendo en metrópolis aumentará a 3,47 mil millones, lo que representará el 39% de la población global y el 62,5% de la población urbana del mundo. Casi mil millones de personas se convertirán en habitantes metropolitanos en los próximos quince años (UNHABITAT 2020).

Las ciudades impactan el clima local y esto conlleva impactos a nivel global. Frente a esta situación se han planteado diferentes estrategias de adaptación y/o mitigación de este fenómeno del calentamiento urbano. Entre ellas está el Reverdecimiento urbano (cubiertas, calles, fachadas), diseño urbano relacionado con el agua y enfriamiento evaporativo, materiales frescos para pavimentos, fachadas y cubiertas, reducción de la liberación de calor antropogénico de edificios, vehículos, etc.; nuevos diseños de forma urbana con ventilación y sombras, etc. (Santamouris, & Kolokotsa, 2016; Palme y Carrasco, 2022). Estas estrategias han de ser de mitigación y adaptativas y no funcionan de similar manera en todos los climas, ni tampoco en todas las escalas. En particular la vegetación urbana puede reducir la contaminación del aire (Hong et al., 2021), secuestrando carbono (Seyedabadi et al., 2022), y purifican el aire y minimiza el ruido (Spcleantech). Y a la vez son superficies activas biológicamente, ofreciendo diversos servicios ecosistémicos. Son capaces de enfriar la temperatura ambiente (Jamei et al., 2021; Zheng et al., 2021) y mitigar las islas de calor urbanas (Aghamohammadi et al., 2021). El aumento de la vegetación disminuye el efecto de la isla de calor, ya que aumenta la evapotranspiración y por tanto reduce el flujo de calor sensible. Diversos estudios señalan que la vegetación puede reducir las islas de calor urbanas (Santamouris 2014; Imran et al., 2018; Palme y Carrasco, 2022). Sin embargo, igual de importante es que su presencia mejora la salud de los ciudadanos cuando hay una buena accesibilidad a los espacios verdes que a la vez presentan diversidad de coberturas del suelo y vegetación informal (Montoro-Gurich, & Pons-Izquierdo, 2023).

Considerando las tipologías de infraestructura verdes que se reconocen comúnmente en la literatura como son: las copa de los árboles, espacios verdes abiertos, techos verdes y sistemas de vegetación vertical (Bartesaghi et al., 2016), en diversas ciudades se han elaborado planes a mediano plazo para la implementación de vegetación como en Melbourne (Urban Forest Strategy, 2040), New York (Million Trees NYC), París (Climate action plan) o Barcelona (Climate Plan, 2008-2030) donde se proponen aumentos de arbolado, de espacios de vegetación y propiciar la inclusión de vegetación en muros y cubiertas (C40knowledgehub). Debido a la amplia variedad de servicios ecosistémicos proporcionados por los RR.GG., muchas ciudades han implementado legislación e incentivos para el desarrollo (Carter y Fowler, 2008; Chen, 2013). Por ejemplo, en Toronto, Canadá, los edificios comerciales, institucionales y residenciales con más de 2000 m². Además de las propiedades descritas sobre la vegetación, las cubiertas y techos verdes reducen significativamente la escorrentía de agua de lluvia y la escorrentía se ralentiza significativamente reducen la escorrentía de aguas pluviales sobre los tejados (Shafique et al.2018; Jusić et al.2019; Kolasa-Więcek y Suszanowicz 2021). También se sabe que la vegetación y los sustratos de los techos verdes son un buen aislante térmico para las edificaciones, lo que le permite reducir los costos de calefacción y de aire acondicionado, reduciendo la demanda de energía en las edificaciones (Aboelata 2021; Alim et al., 2022).

En Chile, para la Conferencia COP 25, se presentó una serie de planes y metas que buscan mitigar los impactos de las ciudades en el calentamiento global y en la salud de las personas. El "Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades" (PACC-ciudades), tiene como objetivo lograr que todas las ciudades del país tengan un plan de cambio climático (normativa aprobada recientemente). Una de las metas que se plantea es la de impulsar planes de Infraestructura Verde Urbana (IVU) en áreas metropolitanas y urbanas (Muñoz et al., 2019). Luego, el año 2022 finalmente se aprueba la Ley Marco de Cambio Climático, incorporando los Planes de Acción Comunal de Cambio Climático que entre cuyos objetivos contempla la elaboración de Medidas de mitigación, adaptación a nivel comunal (www.bcn.cl). El trabajo de investigación que se presenta, aborda la mitigación del calentamiento urbano de la ciudad de Valparaíso, Chile. El objetivo es determinar el impacto que provoca la implementación de cubiertas vegetales en las temperaturas superficiales y atmosféricas en el sector céntrico de la ciudad de Valparaíso, Chile.

2. Caso de Estudio

Valparaíso ciudad está ubicada en latitud 33,02 S y longitud 71,36 O, posee un clima mediterráneo costero que otorga un verano seco y caluroso, y un invierno frío y húmedo. Csb, de acuerdo a la clasificación de Köppen–Geiger y posee una población de 300.000 habitantes. La Figura 1 muestra cómo la ciudad presenta una condición de centro urbano en la parte baja y llana, con edificaciones de sobre los 12 m de altura hasta más de 40 m en cercanía del mar y algunos sectores de vegetación en algunas plazas. Este centro urbano está rodeado de una periferia de laderas edificadas con alturas en general entre 5 y 15 m. aunque con algunos edificios de sobre los 30 m.

Figura 1. Ubicación de la ciudad en el hemisferio sur e imagen tridimensional de su condición topográfica



Fuente: Elaboración propia en base a Google y Oyarzún et. al. 1996.

3. Materiales y método

El proceso metodológico de este trabajo de investigación presenta una serie de etapas. Consiste, en primer lugar, en determinar la presencia de isla de calor atmosférico en Valparaíso. Este fenómeno se registra de acuerdo a la metodología de transectos urbanos planteada por Martín Vide & Moreno (1990) y considerando tres horarios (10:30 am, 2:00 pm y 8:00 pm) para días representativos de invierno y verano.

Luego se contrasta esta ICU Atmosférica con la ICU Superficial, para invierno y verano. Esta última se determina utilizando imágenes de satélite. Una vez definidas ambas se determinan los sectores de la ciudad que presentan mayor incremento de temperatura para ambas épocas del año.

Definido esto se hace una evaluación de desempeño térmico de dos zonas determinadas (sector Almendral y sector Financiero).

Finalmente, mediante el uso del software ENVI-met se simulan escenarios donde a las edificaciones de cada sector se les integran cubiertas vegetales que varían en porcentaje de cobertura. Se evalúa el impacto de estas cubiertas vegetales en el desempeño térmico en el aire sobre las cubiertas y a nivel peatonal. Este desarrollo metodológico se explica en detalle en el siguiente capítulo y de acuerdo al avance en la obtención de resultados.

4. Resultados

4.1 Isla de Calor atmosférico

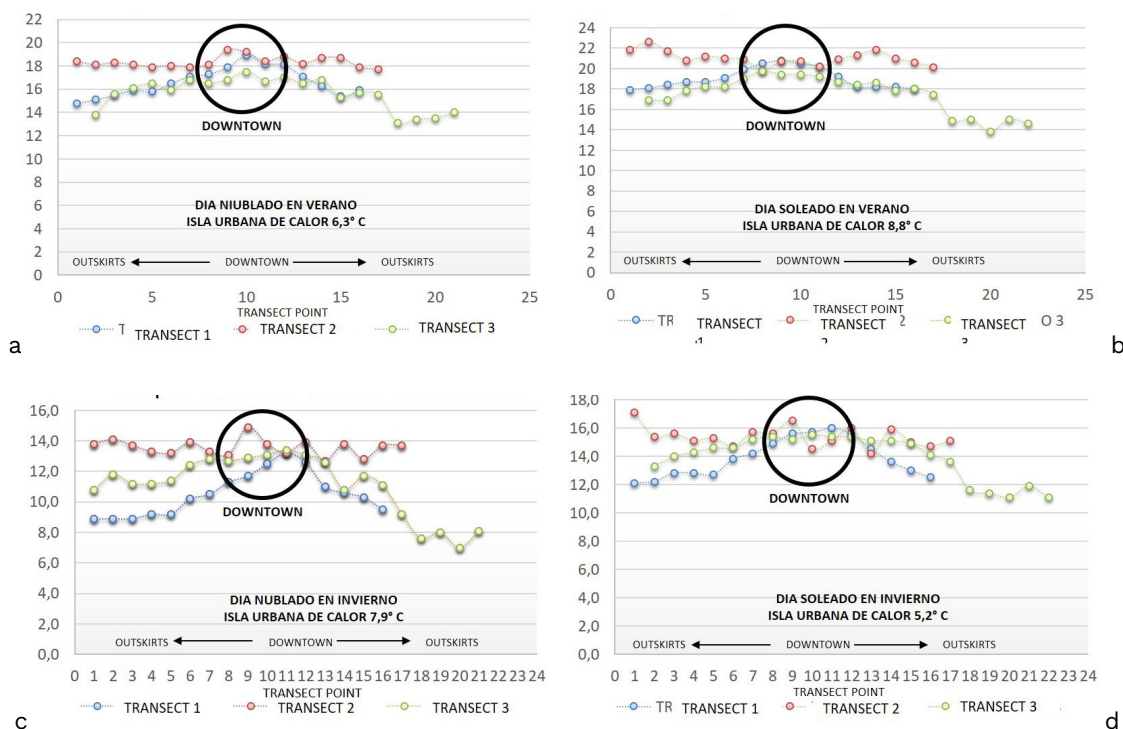
El efecto isla de calor atmosférico en Valparaíso ha sido evidenciado y registrado en diversas instancias. La comparación de temperaturas del aire entre 2007 y 2016, ha determinado que el fenómeno no sólo se ha mantenido, sino que se ha visto incrementado. Para las 20:00 horas, se presentan temperaturas más homogéneas en toda la ciudad, registrándose una ICU atmosférico de 5.1°C y 6.2°C, en invierno de los años 2007 y 2016 respectivamente y un incremento entre estos años de + 1.1°C. De igual manera se observa ICU atmosférica en verano de 2017, de 5.2°C (Figura 2).

Factores como la morfología urbana, la topografía y los materiales urbanos, no determinan del todo el microclima local, pero sí definen tendencias. Las altas edificaciones en orilla de mar definen a su vez cañones urbanos con bajo SVF (factor de cielo visible, SVF Sky View Factor en sus siglas en inglés) y la poca ventilación de calles, que promueven la acumulación de calor en el centro urbano y propiciando la isla de calor atmosférica de la ciudad (Carrasco et al., 2017).

En el caso de las islas de calor presentes en una ciudad como Valparaíso, una ciudad litoral, se debe considerar la participación de las masas oceánicas en el intercambio de calor. Se observan flujos de aire desde el mar al continente durante el día y en sentido inverso por las noches. Durante el día entran masas de aire con humedad a la ciudad y durante el atardecer, las masas de aire se dirigen hacia el mar, y la limpiarían de contaminantes atmosféricos.

Si bien el intercambio de calor con las masas oceánicas son favorables para la circulación de aire, se ven alteradas por construcciones verticales y pendientes bruscas geomorfológicas que interrumpen los flujos de aire (Romero et al., 2008).

Figura 2. Temperaturas del aire a las 20 hrs. para para la ciudad de Valparaíso



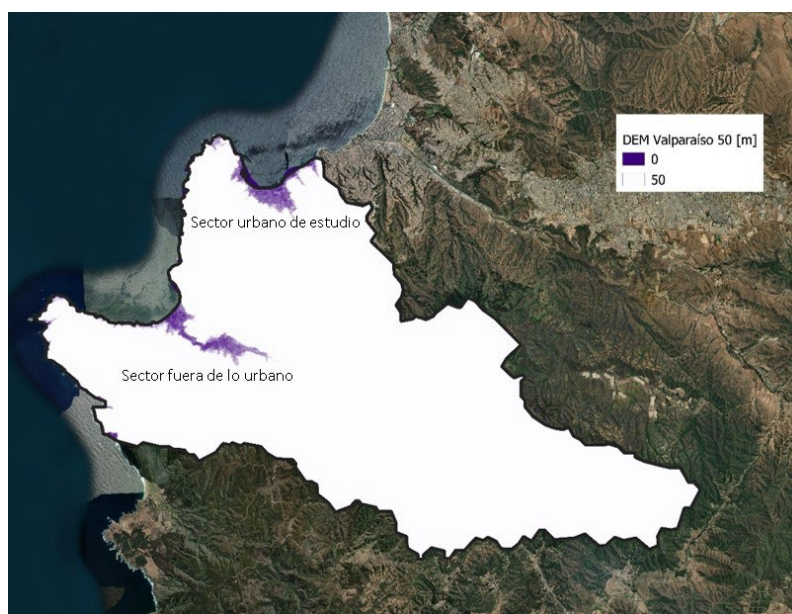
Fuente: Elaboración propia para el año en 2017, observando isla de calor atmosférico.

Notas: a) día nublado de verano, b) día soleado de verano, c) día nublado de invierno y d) día soleado de invierno. En todos los gráficos, en la coordenada vertical se señala la temperatura del aire. En la coordenada horizontal, el lugar de registro, que puede estar alejado o cercano del centro urbano o en el centro urbano.

4.2 Isla de Calor Superficial

Para esta investigación y considerando el registro de la ICU atmosférico, se determina la isla de calor superficial de la ciudad (ICUS). Para determinar la intensidad de las ICUS se ha utilizado el criterio empleado por Martín-Vide (et al., 2015), donde se escogen dos puntos, un sector urbano y otro no urbano. La Figura 3 muestra los sectores de estudio a comparar: urbano y no urbano. Este último debe tener solo un 10% de pavimentos, así también, la diferencia de altura entre ambas locaciones no debe superar los 30 [m] y en los casos donde se encuentren cuerpos de agua cercanos, la distancia entre ellos debe ser similar e idealmente no superar los 800 [m].

Figura 3. Modelo de elevación digital (DEM) hasta 50 [m] sobre el nivel del mar, Valparaíso



Fuente: Elaboración propia.

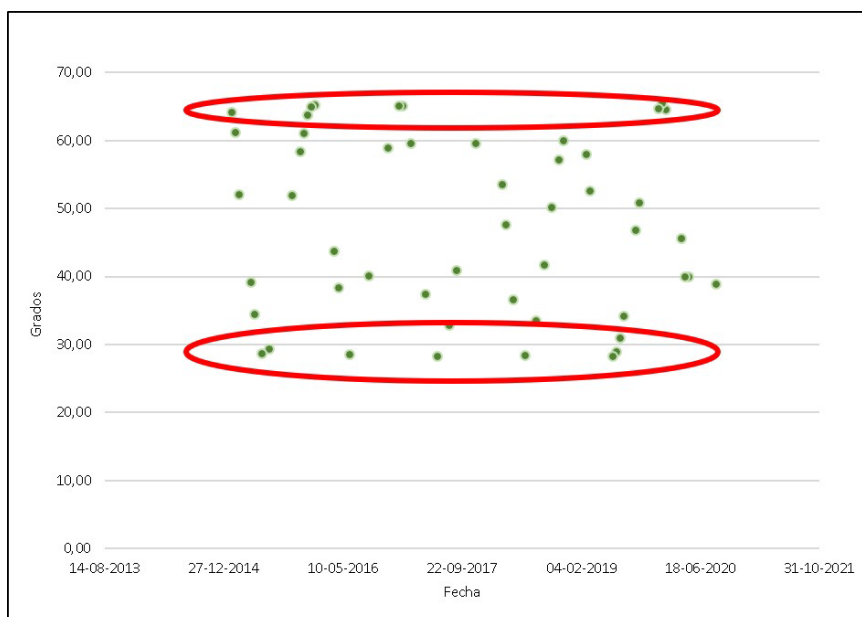
Nota: Las zonas obtenidas (color morado) se usan para delimitar los sectores de interés.

Para efectos de esta investigación, se estudian las temperaturas superficiales del centro de Valparaíso, lugar de la comuna que concentra mayor cantidad de actividades antrópicas y los resultados del efecto de ICU atmosférico registran aquí las mayores diferencias de temperatura del aire entre la ciudad y el extra urbano.

Para determinar la temperatura superficial de la ciudad se utilizan imágenes de LANDSAT 8, seleccionadas y obtenidas a través de la herramienta EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Se seleccionan dos días por año, en el periodo 2015-2020, discriminando las fotografías según la nubosidad que se encuentre sobre la zona, debido a que alteran la lectura de la superficie. Para obtener datos que sean comparables entre sí, se buscan días cercanos a los solsticios y que presenten una elevación del sol similar. Para este proceso se emplea como calculadora de mapas de bits el programa QGIS y el complemento RS&GIS (Barane y Dwarakish, 2017). Luego de calcular la temperatura con el plugin, se obtendrá como resultado una imagen en el color nativo del sensor (escala de grises); se debe configurar las propiedades de capa y clasificar los datos para obtener tablas de temperatura. Adicionalmente, se incorporan mapas vectoriales al ráster (mapa de bits) para mejorar la comprensión de los resultados; se utilizan geo datos abiertos proporcionados por el INE (Instituto Nacional de Estadísticas de Chile), que corresponden a los límites de división político-administrativos y censal de la Región de Valparaíso.

Se recopilaron datos satelitales (LANDSAT 8) de 62 días obtenidos del periodo 2015-2020 y posteriormente se graficaron los ángulos de elevación solar en un diagrama de dispersión, tal como lo muestra la Figura 4.

Figura 4. Gráfico Elevación del sol/Días sin nubosidad



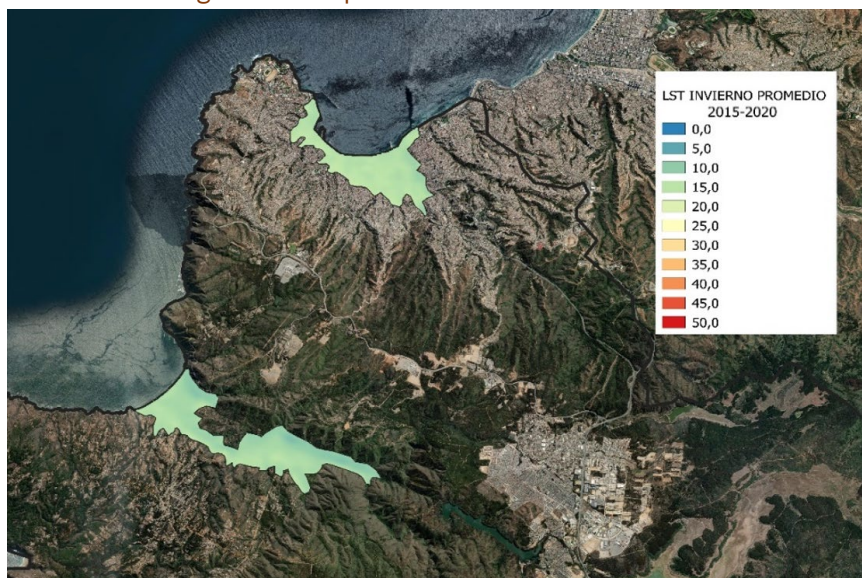
Fuente: Elaboración propia.

Nota: Se observa que el promedio de elevación solar a las 14:00 horas es de 30.3° en invierno y 62.9° en verano. El ángulo acimutal promedio a las 14:00 horas es de 330.7° en invierno y 292.6° en verano, medidos en sentido horario desde el norte geográfico.

Se considera como referencia el Sector denominado Laguna Verde, que cumple con las condiciones necesarias. En invierno la zona rural (Laguna Verde) presenta una temperatura media de 12.4 (°C) y en el centro de Valparaíso la temperatura media es de 14.5 (°C) (Figura 5).

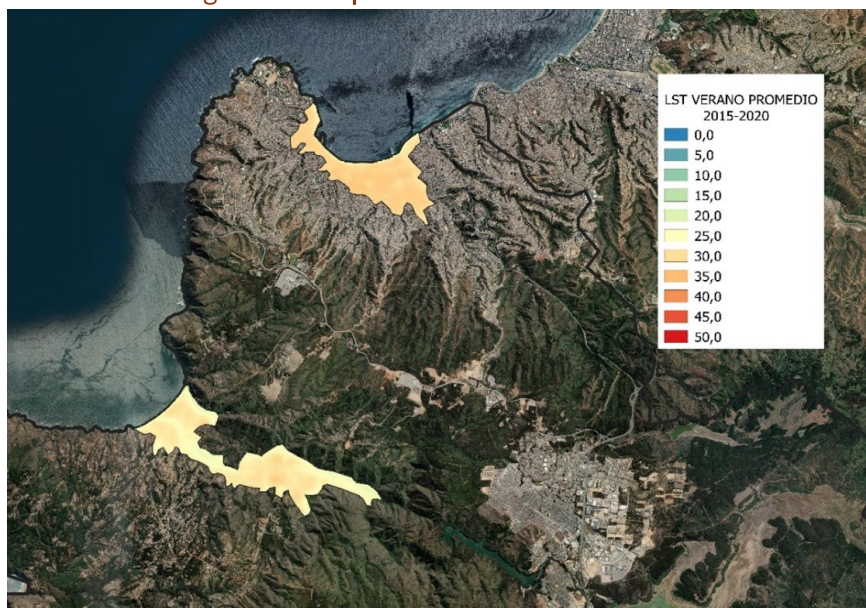
En verano, la zona rural (Laguna Verde) presenta una temperatura media de 26.9 (°C) y en el centro de Valparaíso la temperatura media es de 31.2 (°C) (Figura 6).

Figura 5. LST promedio invierno 2015-2020



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. LST promedio verano 2015-2020



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de la temperatura superficial terrestre mediante la información de LANDSAT 8, se utilizan las bandas 10 (sensor térmico 1), 4 (rojo) y 5 (infrarrojo cercano). A partir de la banda 10, se obtiene la radiación en la superficie atmosférica (TOA) y posteriormente la temperatura de brillo (BT). A partir de la combinación de las bandas 4 y 5 se obtiene el índice normalizado de vegetación (NDVI), posteriormente, la proporción de vegetación (Pv), y finalmente, la emisividad (ϵ). Con la temperatura de brillo y la emisividad se puede estimar finalmente la temperatura en la superficie terrestre (LST). Las fórmulas empleadas en el cálculo de la temperatura superficial se presentan a continuación y de acuerdo a Avdan y Jovanovska, (2016):

1) Radiación en la superficie atmosférica (TOA):

Medición de la radiación de un cuerpo para todo el espectro de frecuencias electromagnéticas (Lira Oliver & Guevara Mon, 2017).

$$L\lambda = M_L * Q_{cal} + A_L - O_i$$

Donde:

$L\lambda$ = Radiación en la superficie atmosférica (TOA).

M_L = Factor de re-escalado multiplicativo de la banda 10.

Q_{cal} = Correspondiente a la banda 10.

A_L = Factor de re-escalado aditivo de la banda 10.

O_i = factor de corrección de la banda 10.

2) Temperatura de brillo (BT):

Energía emitida por un cuerpo, ya que la radiación que emite un objeto es una función de su temperatura (Fernández Sarría, 2018)

$$BT = \frac{K2}{\ln\left[\left(\frac{K1}{L\lambda}\right) + 1\right]} - 273.15$$

Donde:

$K1$ y $K2$ = constantes de conversión térmica específicas de la banda 10.

$L\lambda$ = Radiación en la superficie atmosférica (TOA).

3) Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI):

Es la medida del estado de salud de la planta basada en cómo ésta refleja la luz en determinadas frecuencias (algunas ondas son absorbidas y otras son reflejadas) (EOS, 2023).

$$NDVI = \frac{NIR (Banda 5) - R (Banda 4)}{NIR (Banda 5) + R (Banda 4)}$$

Donde:

NIR = valores Banda 5.

R = valores Banda 4.

4) Proporción de vegetación (Pv):

$$Pv = \left(\frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \right)^2$$

Donde:

NDVI = Índice de vegetación de diferencia normalizada.

NDVI_s = Valor estimativo igual a 0,2.

NDVI_v = Valor estimativo igual a 0,5.

5) Emisividad (ε):

$$\epsilon_\lambda = \epsilon_{v\lambda}Pv + \epsilon_{s\lambda}(1 - Pv) + C_\lambda$$

Donde:

ε_{vλ} = Emisividad de la vegetación.

ε_{sλ} = Emisividad del suelo.

C_λ = Rugosidad de la superficie (C = 0,005).

Pv = Proporción de vegetación.

6) Temperatura superficial terrestre (LST):

$$LST = \frac{BT}{\left(1 + \left(\frac{\lambda BT}{\rho} \right) * Ln(\epsilon_\lambda) \right)}$$

Donde:

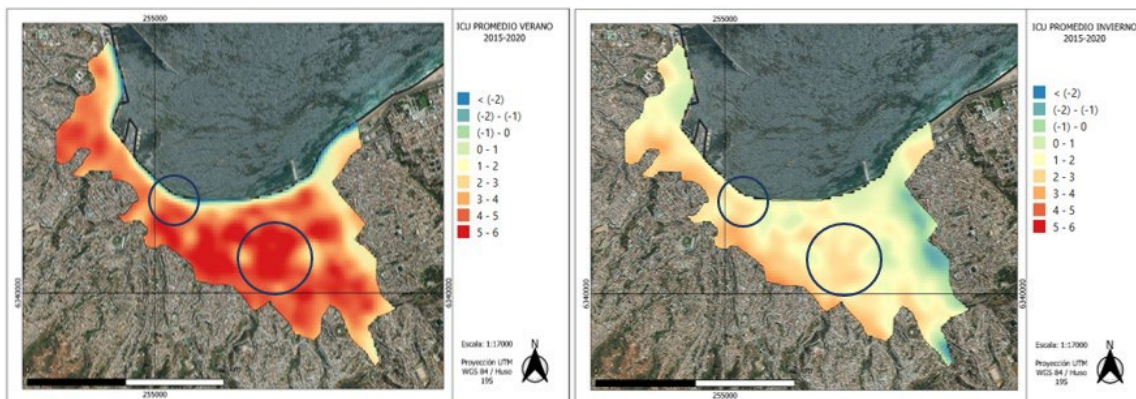
BT = Temperatura de brillo.

P = 1,438 * 10⁻² m K.

λ = Onda de radiación emitida con valor constante = 10,895.

(1321.08 / ln (774.89 / (3.3420 ^ - 04 * "banda" + 0.10000) + 1)) - 273.15

Figura 7. Intensidad ICUS promedio verano (izquierda) e invierno (derecha) para la zona céntrica de la ciudad



Fuente: Elaboración propia. En círculo los sectores de estudio.

Se observa en la Figura 7 que en invierno hay una ICUS máxima de aproximadamente 3°C en las zonas cubiertas por materiales minerales, hallándose ICUS más débiles en las proximidades del borde costero. Por el contrario, las zonas arboladas y/o cubiertas con vegetación, presentan temperaturas de -2°C bajo la temperatura rural de referencia, fenómeno que tiene relación con lo estudiado por García-Haro & Arellano Ramos (2018).

Las zonas próximas a la ladera presentan mayores temperaturas. En sectores relativamente planos, la baja elevación solar combinada con la orientación de las calles provoca que los cañones urbanos acumulen menor cantidad de radiación. En verano, las ICUS alcanzan valores de hasta 6°. La temperatura de toda el área que se encuentra bajo la cota 30 [m] es superior a la temperatura rural de referencia. Las zonas con vegetación, si bien se encuentran sobre la referencia por entre 1°C a 3°C, presentan un menor incremento en la temperatura de su superficie respecto de las zonas con cubierta mineral.

4.3 Cubiertas vegetales. Escenarios simulados

Diversos estudios han utilizado el software ENVI-met donde se visualiza el potencial que tiene esta herramienta para su uso en planificación urbana, evaluación de condiciones microclimáticas y en el estudio de posibles medidas de mitigación frente al calentamiento urbano (Shinzato et al., 2008; Willian et al., 2016; Salvati y Kolokotroni, 2020, Jamei et.al op. cit. 2023). ENVI-met es una dinámica de fluidos computacional (CFD), con la que es posible realizar simulaciones microclimáticas considerando suelo - vegetación - atmósfera (Bruse y Fleer, 1998).

Al considerar la mitigación del calentamiento de la ciudad, la incorporación de vegetación en el espacio urbano favorece el confort de los peatones y la disminución de las temperaturas a nivel de calle (Carrasco, 2015). Otros estudios han considerado la incorporación de cubiertas vegetales.

Una de las soluciones ecológicas con mayor viabilidad para zonas urbanizadas son los techos verdes; las cubiertas representan hasta el 32% de las superficies horizontales urbanas y por tanto la utilización de cubiertas vegetales y el suelo permeable utilizado para su implementación ayuda a reducir los efectos adversos de la urbanización en el clima local, favoreciendo un desempeño más sostenible de las ciudades (Jamei et.al op. cit. 2023).

Las cubiertas verdes impactan en el microclima al interior de los cañones urbanos a nivel de calle, favoreciendo menores temperaturas superficiales respecto de aquellos lugares que poseen cubiertas de hormigón; los factores que influyen en el desempeño que tienen los techos verdes son la velocidad del viento, la radiación solar, la distribución foliar de la vegetación empleada en las cubiertas vegetales y la presencia de vegetación y arbolado bajo el nivel de dosel (Alcázar 2015).

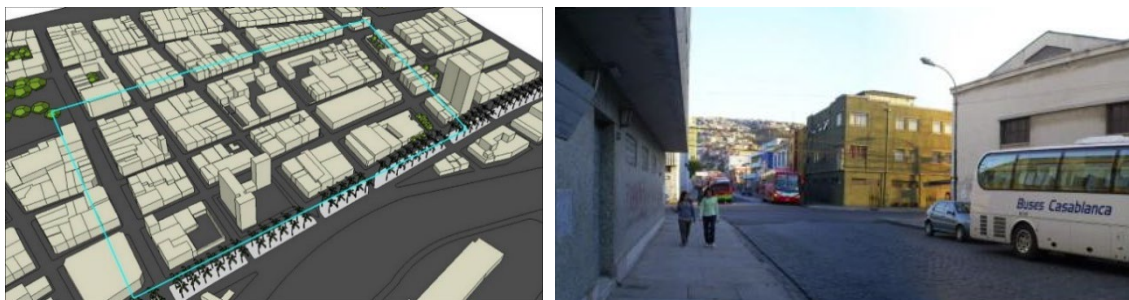
La aplicación de vegetación en distintas proporciones sobre las cubiertas afecta de forma distinta la disminución de la temperatura del aire y superficial. A partir del 50% de cubiertas de los edificios sustituidas por cubiertas vegetales se aprecian efectos favorables. Se ha observado una disminución de la temperatura atmosférica de entre 0.8 °C hasta 2°C a una altura de 2.5 m desde el nivel de calle (Sahnoune y Benhassine, 2017).

Para el proceso metodológico de esta investigación, primero se ha evaluado las islas de calor superficial, como mostrado en la Figura 7 donde se señala este desempeño en el plan de la ciudad. Luego se han seleccionado dos sectores del plan de la ciudad para evaluar la efectividad de la implementación de cubiertas vegetales en la ICU atmosférica y superficial (Figura 10 y Figura 11).

- SECTOR 1

Sector El Almendral de la ciudad (Figura 8), que presenta mayor temperatura superficial tanto en verano como invierno. Es el sector con los edificios de altura media en la ciudad, cañones con menor SVF y presenta una fuerte actividad tanto al interior de los edificios como a nivel de tránsito vehicular. La zona presenta una variación de temperatura superficial promedio de 5-6°C en verano y 1-2°C en invierno, sobre la temperatura superficial de la zona rural (Figura 7).

Figura 8. Sector 1, El Almendral



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Polígono simulado Sector El Almendral (izquierda). Imagen característica de la zona (derecha).

- SECTOR 2

Sector financiero de la ciudad (Figura 9), que presenta mayor temperatura superficial tanto en verano como invierno. Es el sector con los edificios de mayor altura en la ciudad, cañones con menor SVF y presenta una fuerte actividad tanto al interior de los edificios como a nivel de tránsito vehicular. La zona presenta una variación de temperatura superficial promedio de 4-5°C en verano y 0-1°C en invierno, sobre la temperatura superficial de la zona rural (Figura 7).

Figura 9. Sector 2, Financiero



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Polígono simulado Sector Financiero (izquierda). Imagen característica de la zona (derecha).

5. Resultados

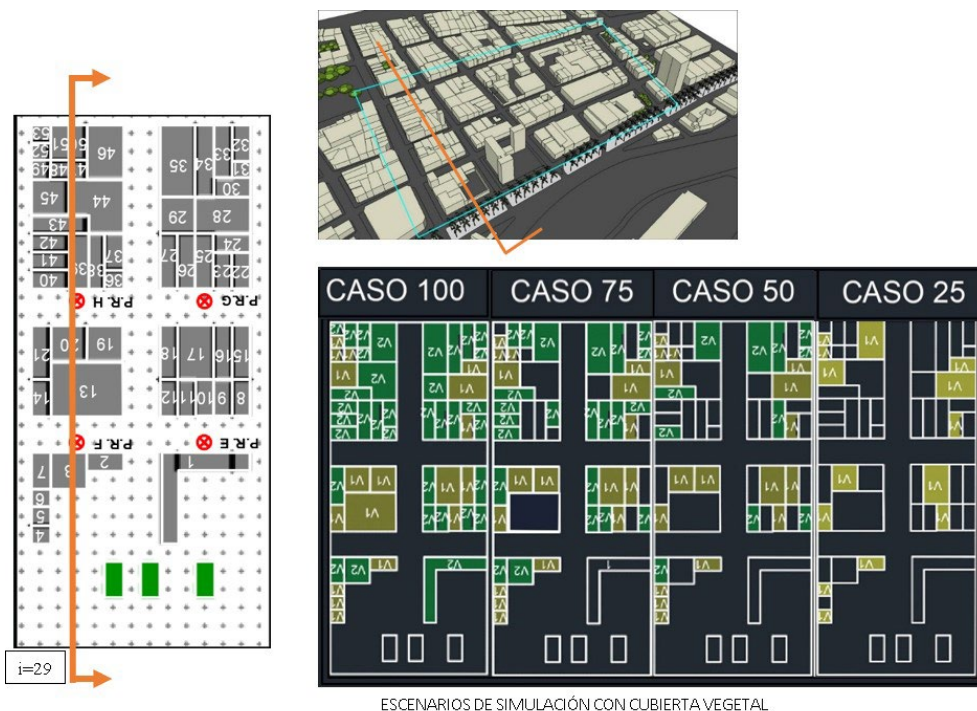
La Figura 12 muestra para el Sector 1 El Almendral, la variación de las temperaturas en el cañón urbano con y sin implementación de cubiertas vegetales. Se observa una diferencia de hasta 0,5°C entre la temperatura del aire al interior del cañón urbano en la situación de escenario sin cubierta vegetal y con 100% de cubierta vegetal implementada.

Se observa también que la cercanía de las cubiertas vegetales al nivel de calle, es decir edificios más bajos, favorece una mayor disminución de las temperaturas al interior del cañón propiciando un mayor confort térmico de los peatones.

La Figura 13 muestra para el Sector 2 Financiero, la variación de las temperaturas en el cañón urbano con y sin implementación de cubiertas vegetales.

Si bien son cañones que presentan menor temperatura que en el Sector 1, se observa también una diferencia de hasta 0,8°C entre la temperatura del aire al interior del cañón urbano en la situación de escenario sin cubierta vegetal y 100% de cubierta vegetal implementada, especialmente en aquellos cañones de menor altura, donde las cubiertas vegetales están más cercanas al nivel de calle.

Figura 10. Identificación de cada cubierta en el sector El Almendral



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La Figura 10 muestra la identificación de cada cubierta en cada sector de estudio El Almendral (derecha abajo). Se indica la sección graficada con los resultados en Figura 11 (derecha).

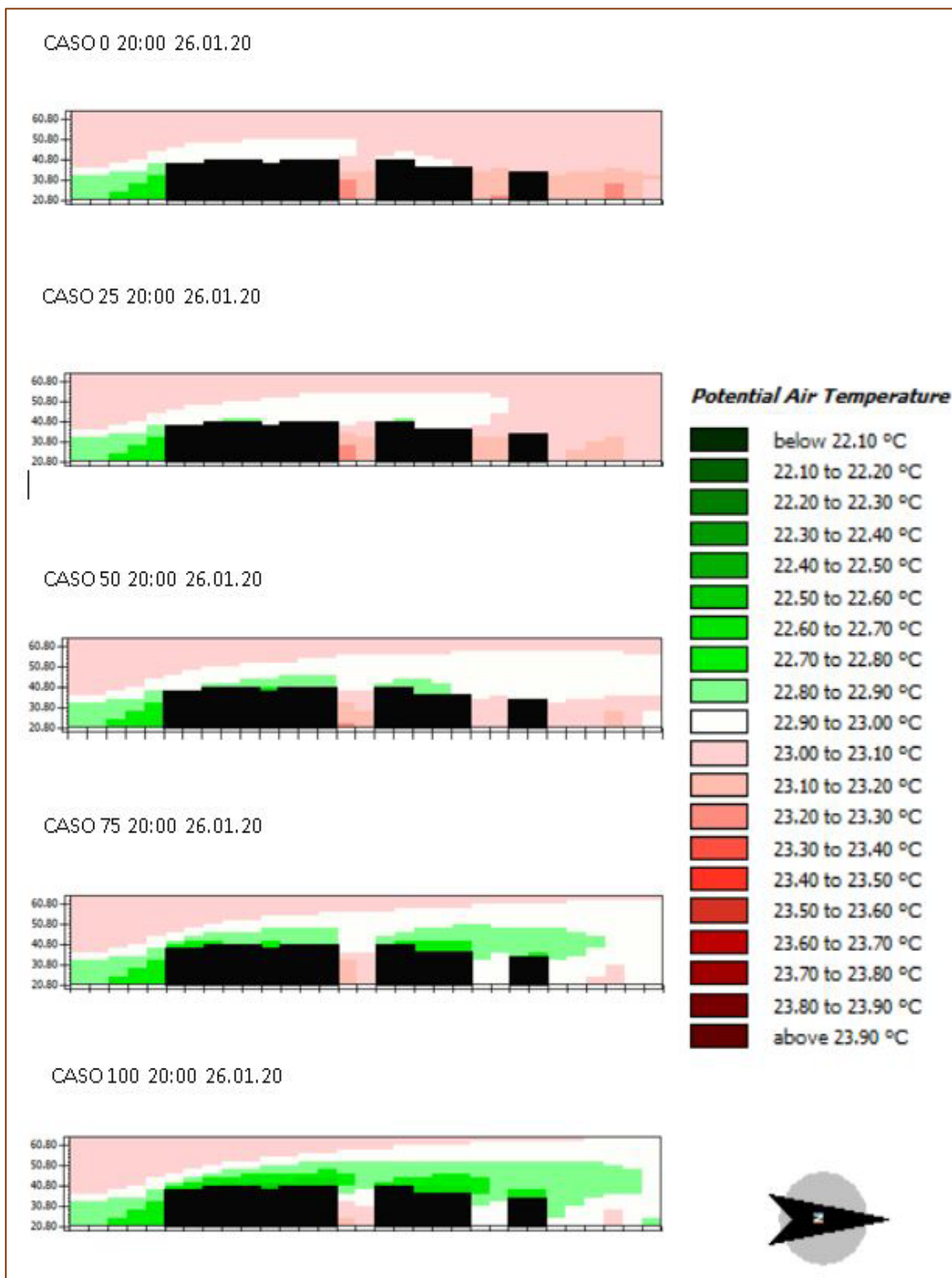
Figura 11. Identificación de cada cubierta en el sector Financiero



Fuente: Elaboración propia.

Nota: La Figura 11 muestra la identificación de cada cubierta en cada sector de estudio Sector Financiero (derecha abajo). Se indica la sección graficada con los resultados en Figura 11 (derecha).

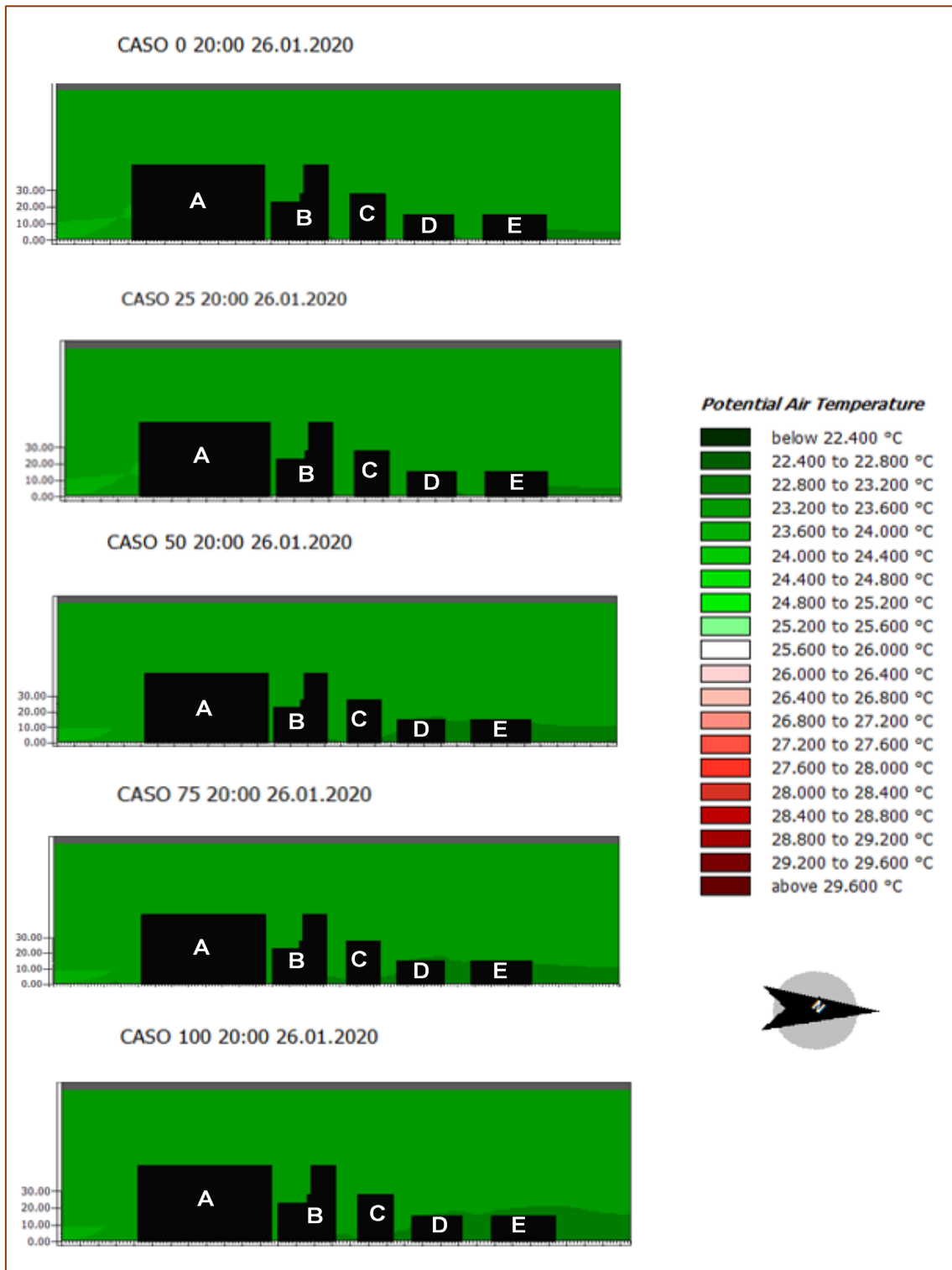
Figura 12. Gráficos de temperatura del aire a las 20:00 horas



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Corte longitudinal i=29, Sector 1 El Almendral, 20:00 horas. Se indica el porcentaje de cubiertas vegetales respecto del total de cubiertas del sector simulados (0%, 50% y 100%). Se señala la temperatura potencial del aire al interior del cañón urbano y sobre el dosel urbano.

Figura 13. Gráficos de temperatura del aire a las 20:00 horas



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Corte longitudinal i=25, Sector Financiero, 20:00 horas. Se indica el porcentaje de cubiertas vegetales respecto del total de cubiertas del sector simulados (0%, 50% y 100%). Se señala la temperatura potencial del aire al interior del cañón urbano y sobre el dosel urbano.

6. Conclusiones

La consideración de momentos futuros de mayor temperatura del aire como plantean los escenarios a mediano plazo obliga a tomar medidas de adaptación y mitigación. Si bien estos ejercicios plantean avances en esa dirección, la combinación de diversas estrategias de mitigación se debe seguir evaluando. En este sentido, con ENVI-met se simulan escenarios que permiten una mejor toma de decisiones al momento de planificar la ciudad.

Se ha observado que las cubiertas vegetales que se encuentran en las edificaciones más altas son las que más evapotranspiración presentan, respecto de aquellas que se encuentran sobre edificios rodeados por edificaciones u objetos de mayor altura. Si bien las cubiertas vegetales en edificaciones más altas favorecerían una mitigación del efecto de isla de calor a nivel global de la ciudad, sobre el dosel urbano, no menos importante es que las cubiertas vegetales ubicadas en edificaciones de menor altura favorecen la mitigación del calor al interior del cañón impactando positivamente en disminuir las temperaturas del aire a nivel peatonal. La integración de la vegetación en cubiertas a nivel local (nacional) se facilita en la actualidad con la implementación de la ley que permite la utilización de aguas grises para riego en Chile (modificación a la Ley 21.075).

Para un clima mediterráneo como es dónde se emplaza el caso de estudio, las soluciones basadas en la naturaleza y las estrategias de mayor vegetación deberían ir acompañadas de estrategias de cubiertas con materiales fríos y de refrigeración evaporativa en el espacio público. Este urban greening debe favorecer el mayor confort del espacio público, para lograr mejores hábitats para los ciudadanos y a la vez una disminución de los consumos de energía en las edificaciones.

Agradecimientos

Este trabajo se realizó con el apoyo del Proyecto Fondecyt 1200275 adjudicado en Chile por ANID.

Autoría

Todos los autores han participado conjuntamente en las distintas fases de documentación, concepción, elaboración y redacción de resultados de la investigación.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Bibliografía

Abuelata, A. (2021). Assessment of green roof benefits on buildings'energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities. *Energy* 219, 119514. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119514>

Alim, M.A., Rahman, A., Tao, Z., Garner, B., Griffith, R., & Liebman, M. (2022). Green roof as an effective tool for sustainable urban development: an Australian perspective in relation to stormwater and building energy management. *J. of Cleaner Production*, 362, 132561. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132561>

Aghamohammadi, N., Fong, C.S., Mohd Idrus, M.H., Ramakreshnan, L., Haque, U. (2021b). Outdoor thermal comfort and somatic symptoms among students in a tropical city. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103015. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103015>

Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* 70(3), 295 -310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)

Alcazar, S. (2015). Efectos de las cubiertas ajardinadas sobre el microclima urbano en verano (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/40080/1/SUSANA_SAIZ_ALCAZAR.pdf

Arellano Ramos, B.; Roca Cladera, J.; Serra de Larrocha, C.; Martínez Santafé, M.D.; Biere Arenas, R.M.; & Lana Pons, F.J. (2022). Olas de Calor en la ciudad de Barcelona: 1971-2020. *ACE: Architecture, City and Environment*, 17(50). <https://doi.org/doi:10.5821/ace.17.50.11684>

Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *Journal of Sensors*, 1480307. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>

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, ISBN: 978-93-5267-355-1, [ICGCSC-2017], MITE, Moodbidri, INDIA, 17th – 18th March, 2017, pp 195-199.

Bartesaghi, Koc, C., Osmond, P., Peters, A. (2016). A Green Infrastructure Typology Matrix to Support Urban Microclimate Studies. *Procedia Engineering*, 169, 183-190. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.022>

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. <https://www.bcn.cl/portal>

Carrasco, C., Barra, P. Llanos, S. (2015), *Pedestrian Use of Squares and Urban Microclimate in Valparaíso, Chile*. Trabajo presentado en el ICUC9 9th International Conference on Urban Climate, 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse, Francia.

Carrasco, C., Palme, M., Angel Galvez, M., Inostroza, L., Padilla, U., & Fonseca, A. (2017). Urban Heat Island of Valparaíso, Chile - A Comparison between 2007 and 2016. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(7). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/7/072036/pdf>

Carrasco, C.; Palme, M. (2020). Urban Form and Urban Materials as Controller of Urban Climate in Valparaíso, Chile. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 503, 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012049>

Carter, T., Fowler, L. (2008). Establishing green roof infrastructure through environmental policy instruments. *Environmental Management*, 42(1), 151–164. <https://doi.org/10.1007/s00267-008-9095-5>

Chen, C-F. (2013). Performance evaluation and development strategies for green roofs in Taiwan: a review. *Ecological Engineering*, 52, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.12.083>

Coutts, A.M., Beringer, J., Jimi, S. & Tapper, N.J. (2009), The urban heat island in Melbourne: drivers, spatial and temporal variability, and the vital role of stormwater. Stormwater 2009.

C40 Knowledge. www.c40knowledgehub.org

EPA. (25 de julio de 2022). Agencia de Protección ambiental de Estados Unidos. <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/las-islas-de-calor:text=invernadero>

Hong, Y., Xu, X., Liao, D., Ji, X., Hong, Z., Chen, Y., Xu, L., Li, M., Wang, H., Zhang, H., Xiao, H., Choi, S-D., Chen, J. (2021). Air pollution increases human health risks of PM2.5-bound PAHs and nitro-PAHs in the Yangtze River Delta, China. *Sci. of The Total Environment*, 770, 145402 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145402>

Howard, L. (1833). The Climate of London.

Instituto Nacional de estadísticas. Gobierno de Chile (2019). <https://www.ine.gob.cl/>

Jamei, E., Chau, H.W., Seyedmahmoudian, M., Stojcevski, A. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Sci. of The Total Environment*, 791, 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>

Jamei, E., Thirunavukkarasu G., Chau, H.W., Seyedmahmoudian M, Stojcevski A., Mekhilef Saad (2023). Investigating the cooling effect of a green roof in Melbourne. *Building and Environment*, 246, 110965. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110965>

Jusić, S., Hadžić, E., Milišić, H (2019). Stormwater management by green roof. *ACTA Sci Agric* 3, 57–62.

Kolasa-Więcek, A., Suszanowicz, D. (2021) The green roofs for reduction in the load on rainwater drainage in highly urbanised areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(26), 34269-34277. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12616-3>

- Martín-Vide, J.; Sarricolea, P.; & Moreno-García, M.C. (2015). On the definition of urban heat island intensity: the “rural” reference. *Frontiers in Earth Science*, 3. <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00024>
- Martin Vide, J.M., Moreno G., M.C. (1990). Avance de Resultados sobre la Isla de Calor de Barcelona y de otras ciudades catalanas. En VI Trobades Científiques de la Mediterrània. Institut d’ Estudis Catalans, Institut Menorquí d’ Estudis. Maó, Menorca.
- Mihalakakou, H.A. Flocas, M. Santamouris, C.G. Helmis, (2002). Application of neural networks to the simulation of the heat island over Athens, Greece, using synoptic types as a predictor. *Journal of Applied Meteorology* 41(5) 519-527. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0519:AONNTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0519:AONNTT>2.0.CO;2)
- Montoro-Gurich, C. & Pons-Izquierdo, J.J. (2023). Envejecimiento demográfico y accesibilidad a las zonas verdes. Un análisis intraurbano de las ciudades españolas. *ACE: Architecture, City and Environment*, 18(53), 12073. <https://doi.org/10.5821/ace.18.53.12073>
- Muñoz, J.C., J. Barton, D. Frías, A. Godoy, W. Bustamante Gómez, S. Cortés, M. Munizaga, C. Rojas y E. Wagemann (2019). Ciudades y cambio climático en Chile: Recomendaciones desde la evidencia científica. Santiago: Comité Científico COP25; Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.
- Núñez Peiró, M., Román López, E., Sánchez-Guevara, C., & Neila González, F. J. (2016). Towards a Dynamic Model for the Urban Heat Island of Madrid. *Anales de Edificación*, 2(1), 49. <https://doi.org/10.20868/ade.2016.3198>
- Oyarzún, A.; Arancibia, R., Galdames, L., et al. (1998). Estudio del borde superior de Valparaíso. *Revista Facultad de Arquitectura*, 2(2).
- Palme, M.; & Carrasco, C. (2024) Isla de calor en ciudades de Chile: una revisión. Intensidad, variabilidad, impactos y medidas de mitigación. En: Lemoine-Rodríguez R., Pérez Vega A., Mas J_F., (Eds.), Avances en el estudio de islas de calor urbano en América Latina (pp. 306-328). CIGA, UNAM, ISBN: 978-607-30-9293-7. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786073092937e.2024>
- Palme, M.; & Carrasco, C. (2022) Urban heat island in Latin American cities: a review of trends, impacts, and mitigation strategies. En: Khan A., Akbari H., Fiorito F., Mithun M., Niyogi D. (Eds), Global Urban Heat Island Mitigation (pp. 251-267). Elsevier, ISBN: 978-0-323-85539-6. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00014-7>
- Palme, M.; La Rosa, D.; Privitera, R.; & Carrasco, C. (2021). Building Performance Simulation to support green urban planning: a machine learning approach. En Building simulation Association Congress IBPSA. Bélgica, Bruselas. <https://doi.org/10.26868/25222708.2021.30196>
- Rasilla, D.; Allende, F., Martilli, A. and Fernández F. (2019). Heat Waves and Human Well-Being in Madrid (Spain). *Atmosphere*, 10(5), 288. <https://doi.org/10.3390/atmos10050288>
- Romero, H.; Molina, M.; Vásquez, A., & Smith, P. (2008). El clima urbano del puerto de Valparaíso: construcción social del espacio en ciudades costeras (Vol. II, p. 103). Revista da Faculdade da Universidade do Porto – Geografía.
- Roth, M., (2013). In: Handbook of Environmental Fluid Dynamics, Vol. 2. Harindra Joseph Sermal Fernando, ISBN 978-1-4665-5601-0, pp. 143 -159. <https://doi.org/10.1201/b13691>
- 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>
- Salvati, A.; & Kolokotroni, M. (2020). Impact of urban albedo on microclimate and thermal comfort over a heat wave event in London. Conference: Windsor 2020 Resilient Comfort Proceedings At: Windsor, UK, May, 566-578. <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/22214>

- Sánchez Montañés, B.; Rey Pérez, J.; Peral López, J.; & Cortés Sánchez, L.M. (2023). Propuesta de una metodología para la integración de elementos de control climático en entornos urbanos patrimoniales en el sur de Europa. *ACE: Architecture, City and Environment*, 18(53). <https://doi.org/10.5821/ace.18.53.12070>
- Santamouris, M., Kolokotsa, D., (2016). *Urban Climate Mitigation Techniques*. Taylor & Francis Group Ltd, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxford, OX14 4RN, UK. <https://doi.org/10.4324/9781315765839>
- 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>
- Shafique M, Kim R, Kyung-Ho K (2018) Green roof for stormwater management in a highly urbanized area: the case of Seoul, Korea. *Sustainability* 10(3), 584. <https://doi.org/10.3390/su10030584>
- Seyedabadi, M.R.; Karrabi, M.; & Nabati, J. (2022) Investigating green roofs' CO2 sequestration with cold- and drought-tolerant plants (a short- and long-term carbon footprint view). *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 14121-14130. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16750-w>
- Shinzato, P.; Bruse, M.; Simon, H.; & Silva, D.H. (2008). Simulation of the Influence of Vegetation on Microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo. *Rev SBAU Piracicaba*, 4(2), 1-19.
- Smith, P.; Sarricolea, E.; Pablo, T.; Peralta, O.; & Toro, C. (2022). Surface urban heat islands in 33 medium-sized cities across different climates in Chile. In: Khan, A.; Akbari, H.; Fiorito, F.; Mithun, M., Niyogi, D. (Eds), *Global Urban Heat Island Mitigation* (pp. 223-243) Elsevier, ISBN: 978-0-323-85539-6. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85539-6.00004-4>
- South Poland Cleantech Cluster. <https://spcleantech.pl/smart-cityzrownowazony-da-zy-sciany>
- UNHABITAT 2020 Global Database of Metropolises 2020 (UN-HABITAT)
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018).
- Willian, J.; Novais, Z.; Finger, S.; Daniela, R.; Souza, D.; & Soares, N. (2016). Simulação por ENVI-met das Condições Higrotérmicas da Universidade de Cuiabá, Campus Barão ENVI-met Simulation of Hygrothermal Conditions of University of Cuiabá, Barão Campus. 200–205.
- Zheng, X.; Kong, F.; Yin, H.; Middel, A.; Liu, H.; Wang, D.; Sun, T.; & Lensky, I (2021). Outdoor thermal performance of green roofs across multiple time scales: A case study in subtropical China. *Sustainable Cities and Society* 70, 102909. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102909>