

Estado de las infraestructuras urbanas y respuesta térmica: un punto de partida para el análisis del riesgo por calor. Caso Mendoza, Argentina

State of Urban Infrastructure and thermal response: A starting point for heat risk analysis. Mendoza-Argentina Study Case

MARÍA FLORENCIA COLLI¹  0000-0002-3068-5149

CLAUDIA MARTINEZ¹  0000-0001-9537-5259

ÉRICA CORREA¹  0000-0003-1690-076X

¹Instituto de Ambiente Hábitat y Energía. (CONICET), Mendoza, Argentina.

Resumen

La geomática es clave para analizar la dinámica de las transformaciones urbanas con el fin de optimizar su gestión. Este trabajo tiene como objetivo identificar en qué medida el estado de las infraestructuras verde, azul y gris, evaluadas a través de índices espectrales (NDVI, LWCI, MSI, NDBI), influye en el comportamiento térmico de la ciudad, utilizando como referencia la Clasificación Climática Local del Área Metropolitana de Mendoza- Argentina. El objetivo final es desarrollar métodos de diagnóstico ágiles que permitan detectar sectores críticos en riesgo por calor en áreas urbanas. Este estudio ha posibilitado una evaluación georreferenciada, multidimensional y detallada de los factores que influyen en el comportamiento térmico de la ciudad, evidenciando la relación entre vegetación, estado hídrico, impermeabilización de suelo y temperatura. Los resultados permiten implementar un método sencillo para identificar debilidades y diseñar estrategias de ordenación territorial basada en evidencia, ofreciendo herramientas para la gestión del riesgo por calor y la mejora de la resiliencia urbana a fin de disminuir sus impactos sobre la salud pública, la habitabilidad del espacio público y el consumo de energía.

Palabras clave: Riesgo térmico urbano; Zonas Climáticas Locales; Índices espectrales; Datos espaciales; Área Metropolitana de Mendoza.

Fechas • Dates

Recibido: 2024.12.05
Aceptado: 2025.06.18
Publicado: 2025.08.07

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

María Florencia Colli
colliflorencia9@gmail.com

Abstract

Geomatic tools are essential for analyzing urban transformations to optimize management. This study aims to assess how the state of green, blue, and grey infrastructures, evaluated through spectral indices (NDVI, LWCI, MSI, NDBI), influences the city's thermal behavior. The Local Climate Classification of the Mendoza Metropolitan Area, Argentina, is used as a reference. The goal is to develop quick diagnostic methods to detect heat-risk areas in cities. This study provides a georeferenced, multidimensional, and detailed evaluation of the factors affecting the city's thermal behavior. It highlights the relationship between vegetation, water status, soil impermeability and temperature. The results allow the implementation of a simple method to identify weaknesses and design evidence-based spatial planning strategies, offering tools for heat risk management and the improvement of urban resilience in order to reduce impacts on public health, the habitability of public space and energy consumption.

Keywords: Urban thermal risk; Local Climate Zones; Spectral indices; Spatial data; Mendoza Metropolitan Area.

1. Introducción

El impacto del calentamiento global muestra mayor intensidad en las ciudades. Las zonas urbanas poseen temperaturas más elevadas que sus periferias, debido principalmente a la disminución de la cubierta verde, la mayor ganancia y acumulación de calor asociada a su geometría y las propiedades opto térmicas de los materiales de construcción y el calor residual de las actividades humanas (Yang et al., 2024). Las investigaciones evidencian que las ciudades del mundo se están calentando a un ritmo dos veces superior a la media mundial debido a los efectos de la isla de calor y el sobrecalentamiento urbano. Las consecuencias de estos efectos son intensificadas por el incremento en la ocurrencia de eventos de calor extremo -olas de calor- generados por el cambio climático (Aubrecht et al., 2013; Fernandez-Milan et al., 2015).

El aumento de la temperatura urbana constituye riesgos significativos para la salud de los ciudadanos. Genera estrés térmico, golpes de calor, sequedad, afecciones respiratorias y cardíacas, alergias, incrementos de plagas y vectores (dengue, zika y chikungunya), entre otras (Mora et al., 2017). Además, aumenta el consumo energético en refrigeración para lograr confort en el periodo estival (Li et al., 2019; Zhou et al., 2020; He et al., 2021). La Isla de Calor Urbana puede actuar en sinergia con las olas de calor y empeorar aún más la condición socioambiental de la ciudad. Una comprensión integral de la distribución espacial de la temperatura y sus patrones de comportamiento adquiere una importancia primordial para el manejo de los riesgos relacionados con el calor, ya que sustenta la formulación de estrategias de mitigación y adaptación eficaces para los planificadores urbanos y los responsables de la regeneración de políticas.

En Sudamérica, la insuficiente adaptación al cambio climático ha expuesto a las poblaciones locales a riesgos sustanciales en el ámbito de la salud (Hartinger et al., 2024). De modo particular en las ciudades el riesgo por calor comprende elementos de peligro, vulnerabilidad y exposición. El riesgo de calor urbano está impulsado por el cambio climático e influenciado por las características urbanas a través de las cuales las medidas de adaptación pueden abordar los elementos de riesgo (Dong et al., 2020; Wang et al., 2023; Zhu y Yuan, 2023). La falta de evaluaciones de vulnerabilidad y la escasa implementación de estrategias de adaptación reflejan la limitada capacidad de las ciudades de la región para dirigir recursos y políticas específicas de ordenación territorial que impacten positivamente en la calidad de vida de los ciudadanos.

Ante esta problemática, es imprescindible que las ciudades incluyan en su planificación la variable climática, aumentando su resiliencia y transformándose en un actor clave para la mitigación de los efectos adversos del cambio climático.

La consecución de ciudades sostenibles y resilientes exige políticas de ordenación territorial en todas las escalas (regional, metropolitana, urbana y residencial). Para lograr ciudades resilientes, es esencial realizar un diagnóstico preciso del espacio urbano, identificar zonas de alto riesgo térmico y a partir de ello, generar estrategias adecuadas para responder a las necesidades específicas de cada una (Li *et al.*, 2023). Por esto es importante desarrollar herramientas que permitan diagnosticar y analizar el comportamiento de los distintos sectores que componen la ciudad con el fin de identificar cuáles son los factores condicionantes de su desempeño térmico.

Las características de las infraestructuras urbanas verde, azul y gris (IVAG) tienen un rol protagónico dentro de los factores condicionantes del desempeño térmico de las ciudades, Benedict y McMahon (2002) y Veerkamp *et al.* (2021) conceptualizan la infraestructura verde como una red interconectada de áreas con vegetación que preserva las funciones y valores de los ecosistemas naturales, proporcionando beneficios ecosistémicos. Este enfoque presenta la infraestructura verde como un marco ecológico innovador que ofrece una estrategia integral para la conservación de la naturaleza, crucial para la sustentabilidad urbana. El término de infraestructura verde pretende simplificar la complejidad de los conceptos ecológicos relacionados con la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas y los servicios que prestan, mediante una analogía con la infraestructura gris (Salvo-Tierra *et al.*, 2021). La infraestructura verde está estrechamente vinculada con la denominada infraestructura azul, que comprende el sistema hidrológico de un área, incluyendo cursos fluviales, cuerpos de agua, sistemas de riego y desagüe, entre otros elementos. Es importante conocer los procesos y elementos relacionados con el agua para comprender su funcionamiento y los servicios que proporcionan (Magdaleno-Mas *et al.*, 2018). En contraposición a la infraestructura verde y azul, la infraestructura gris se ha definido como todas aquellas estructuras convencionales de transporte, de distribución de servicios, sociales o comerciales, viviendas y espacios impermeabilizados (Baxendale *et al.*, 2019).

Frente al desafío de generar información espacial, que permita monitorear el estado y evolución de las infraestructuras, la percepción remota es una técnica destacada para cumplir con este requisito. En las últimas décadas, las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica, Teledetección y Geomática han ocupado un lugar prioritario en el estudio de la infraestructura urbana (Escalante y Grande, 2014; Ruiz *et al.*, 2022). Su uso posibilita un análisis de alta resolución espacial y temporal, y proporciona un valioso conjunto de herramientas que minimizan la necesidad de estudios de campo, incluso en entornos urbanos heterogéneos y complejos. La diversidad de imágenes, periodicidad de adquisición, la variedad de resoluciones espaciales y la obtención de información espectral, permiten la caracterización y análisis de diferentes espacios geográficos. A nivel internacional y local, los índices espectrales han sido ampliamente utilizados para determinar características específicas de la vegetación en sus inicios, y en las últimas décadas se ha avanzado en su uso para determinar cambios en los patrones urbanos de cobertura de suelo (Sun *et al.*, 2021; Banerjee *et al.*, 2024).

El análisis del estado de las infraestructuras urbanas en ciudades áridas mediante el uso de geomática ha sido objeto de estudio de autores, de modo particular Hui Wang *et al.* (2023) en su revisión denominada “Cambios en la cobertura terrestre en tierras secas del mundo”, recopilan diversas experiencias de análisis de cobertura de suelo basadas en el uso de herramientas de la geomática

aplicadas en 22 casos alrededor del mundo, concluyendo que las zonas áridas son sensibles al cambio climático y a las actividades humanas y, por lo tanto, los estudios de cobertura terrestre en dichas tierras secas son importantes para el desarrollo sostenible global. Akinyemi et al. (2019) indican para ciudades áridas de África que el conocimiento sobre los efectos del cambio de la LST en suelos en proceso de urbanización es muy limitado. Se han examinado las variaciones de la LST y la vegetación en la región semiárida de Gaborone (capital de Botsuana-África) utilizando la LST diurna y nocturna con MODIS (DNLST) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) entre 2000 y 2018. La validación con datos de temperatura de estaciones sinópticas y niveles de agua de represas proporcionó evidencia empírica de que el uso de sistemas de información geográfica suministra estimaciones de DNLST certeras en zonas áridas en proceso de urbanización. Además, los resultados también sugieren que la variabilidad climática en zonas áridas en proceso de urbanización puede ser descripta mediante el análisis del cambio de la cobertura y su impacto sobre la LST. Los autores sostienen que este tipo de análisis proporciona información útil para la planificación espacial de zonas áridas a fin de crear ciudades resilientes al cambio climático. En el mismo sentido, Aslam et al. (2021) estudiaron en Islamabad-Pakistán una correlación positiva clara entre LST y NDBI y una correlación negativa entre LST y NDVI, lo que indica el impacto de la urbanización en la LST y la importancia de integrar las Zonas Climáticas Locales (ZCL) en los futuros planes de desarrollo urbano. Cai et al. (2021) destacan que las ZCL tienen múltiples influencias en el desarrollo de la LST y su combinación está poco estudiada.

Actualmente, se están desarrollando estudios centrados en el riesgo térmico en las ciudades, utilizando la metodología conocida como el Triángulo de riesgo de Crichton (Zhu et al., 2023). Este método de evaluación consta de tres componentes: peligro, exposición y vulnerabilidad (Dong et al., 2020). Los indicadores de peligro por calor giran predominantemente en torno a las ICU -islas de calor urbanas- (Wang et al., 2023). Los indicadores de exposición al calor utilizan variables como la densidad de población, el recuento de población, la iluminación nocturna, entre otros. Los indicadores de vulnerabilidad térmica abarcan el recuento de la población de edad avanzada y los atributos socioeconómicos. (Zhu et al., 2023; Papalardo et al., 2023; Zeng et al., 2022; Wang et al., 2023). Aunque estas investigaciones han contribuido a la comprensión del riesgo por calor es posible que no proporcionen una perspectiva integral que pueda ofrecer información sobre la morfología y la función de las zonas de la ciudad en el contexto del riesgo térmico que pueda ser aprovechada por los planificadores urbanos (Xiang et al., 2024). En consecuencia, existe una necesidad imperiosa de ampliar el alcance de estas evaluaciones para abarcar una perspectiva espacial a nivel de trama urbana, que pueda facilitar la planificación e implementación de estrategias de mitigación más informadas. Por otra parte, aunque ha habido un creciente cuerpo de investigación sobre el riesgo térmico, es escasa la comprensión de cómo estos índices se relacionan con el estado de las infraestructuras verde-azul y gris, en diversas condiciones urbanas.

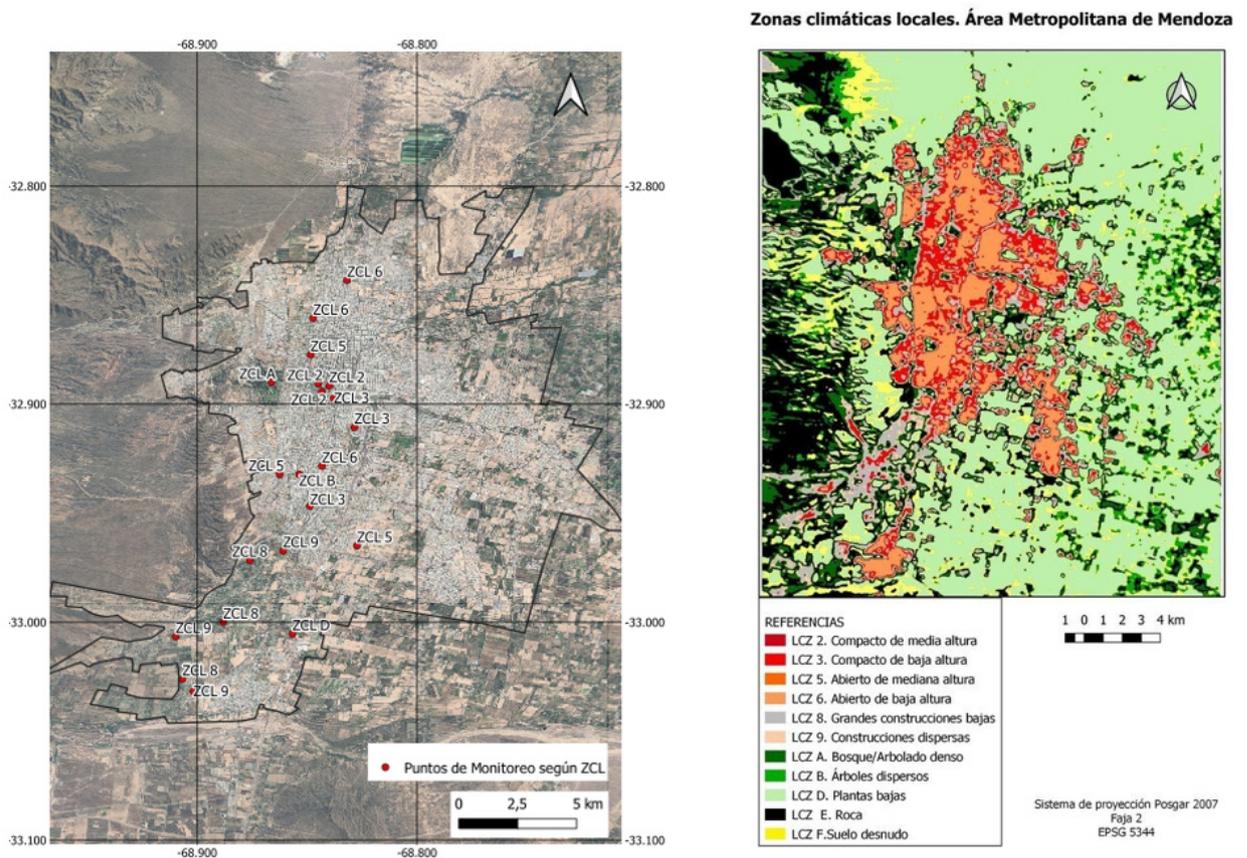
En este contexto, la presente investigación busca superar el abordaje actual de la problemática mediante el desarrollo de métodos que permitan identificar de manera más precisa sectores críticos dentro del entramado urbano.

La hipótesis de trabajo considera que existe una relación causal entre el estado de las Infraestructuras urbanas (IVAG) y el comportamiento térmico de la ciudad. Conocer esta relación posibilita el desarrollo de herramientas que faciliten el análisis del riesgo por calor, la toma de decisiones en el diseño urbano y la gestión sostenible de las ciudades

1.1. Zona de estudio y zonificación climática local

El espacio geográfico de estudio o experimentación es el Área Metropolitana de Mendoza -AMM- (32° 52' 37.08" S; 68° 50' 28.03"O), localizada en el Oasis Norte de la provincia (790 msnm) y ubicada en la diagonal árida de Argentina. Presenta clima seco desértico (BW según la clasificación climática de Köppen-Geiger), con inviernos fríos y una temperatura media en julio de 7,3°C; veranos calurosos con 24,9°C de temperatura media en enero con importantes amplitudes térmicas diarias y estacionales. La cantidad e intensidad de radiación solar es elevada en verano (1022 W/m² máximos diarios) y cuenta con numerosos días de cielo claro (2762 horas anuales de sol). Los vientos son moderados y poco frecuentes, de velocidad promedio 1,7 m/s (h =10 m) con dirección predominante S-E. La precipitación media anual es de aproximadamente 250 mm. Las características de aridez, las escasas precipitaciones y un alto índice de evapotranspiración dan lugar a un pronunciado déficit hídrico. Desde el punto de vista microclimático, su elevada heliofanía, escasa frecuencia e intensidad de vientos y acotadas precipitaciones anuales, sumadas a una anomalía térmica positiva en altura y frecuentes inversiones térmicas, son condiciones óptimas para el desarrollo del fenómeno de isla de calor (Correa et al., 2012).

Figura 1. Área Metropolitana de Mendoza y Zonas Climáticas Locales.



Fuente: Colli et al., 2020

El acelerado crecimiento urbano de las últimas décadas ha dado como resultado una ciudad dispersa, con baja densidad de población en las zonas periféricas y déficit de abastecimiento de servicios básicos. Esta configuración conlleva dificultades asociadas al ordenamiento de los procesos de urbanización y gestión de recursos y servicios urbanos, impactando negativamente sobre la calidad de vida de los habitantes. Respecto de la morfología urbana, se caracteriza por presentar

una trama del tipo racional, con manzanas rectangulares con orientación N-S, E-O, distribuidas porcentualmente de manera equitativa (30%) (Sosa et al., 2018). La ciudad, presenta una configuración espacial del tipo abierto –baja compacidad–, resultante de canales viales anchos de 20 o 30 metros, de baja densidad edilicia, determinada por construcciones de un nivel (3 m de altura); alto sellamiento de suelo con valores de Factor de Ocupación del Suelo -FOS- iniciales de 35% que, luego de ampliadas las viviendas, resultan superiores a 60%. Se observa concentración de área libre en el centro de la manzana. El conglomerado urbano está profusamente arbolado con diversas especies plantadas en líneas paralelas a un sistema de riego artificial, donde el 68% se concentra en tres especies forestales (*Morus alba* 39%, *Fraxinus ssp.* 20% y *Platanus hispanica* 9%) y el 38% restante está conformado por un conjunto de 22 especies en donde la representatividad de cada una de ellas es inferior al 5% (Martinez et al., 2014).

Se ha desarrollado para el área de estudio la Zonificación Climática Local (Colli et al., 2020) donde se determinan 6 ZCL de categoría edificada y 5 de cobertura (Figura 1)

2. Metodología

La metodología utilizada para identificar las relaciones existentes entre las infraestructuras urbanas y los patrones de comportamiento térmico del AMM se ha estructurado en tres etapas: 2.1 Monitoreo de temperaturas intraurbanas y obtención de temperaturas representativas por LCZ. 2.2 Obtención de índices espectrales para áreas representativas de cada ZCL y análisis estadístico descriptivo. 2.3 Análisis de componentes principales a fin de identificar en qué medida, la temperatura del aire -T Min., Tmed. y TMax. - puede ser explicada por los índices espectrales analizados.

2.1. Monitoreo de temperaturas intraurbanas y obtención de temperaturas representativas por ZCL

El monitoreo intraurbano del AMM se desarrolló durante un período de 27 días comprendido entre el 15 de febrero y 14 de marzo de 2021. Para la campaña se utilizaron 13 sensores fijos de temperatura y humedad relativa de tipo HOBO UX100-003 (HOBO®; Inicio; Cape Cod, MA) con un registro de datos cada 15 minutos. Los sensores fueron colocados en las diferentes ZCL identificadas para el AMM (Colli et al., 2020) a una altura de 2,5 m en postes de luminaria pública dentro de cajas de PVC blanco perforado, para evitar la irradiación y permitir una adecuada circulación del aire (Oke, 2004). Debido a que cada ZCL posee más de un punto de monitoreo, se realizó una proyección del comportamiento térmico promedio de la temperatura mínima, media y máxima de cada zona.

2.2. Criterio de selección de día de análisis

Se selecciona un día representativo es representativo de los días calurosos en Mendoza, día estable, con altos niveles de radiación solar, baja nubosidad (menor al 10% de cobertura), baja velocidad de viento y cercano a día de pasada de satélite (nubosidad menor al 10% de cobertura). El día seleccionado -26 de febrero de 2021- es representativo de los días calurosos de febrero de los últimos 24 años. El análisis estadístico considera la realización de un ANOVA y se comprueba que el día de análisis versus la serie 2001-2024 no muestra diferencias significativas, por lo tanto, los días son contrastables y el día de análisis seleccionado puede considerarse representativo de los días típicos calurosos de febrero.

Tabla 1. Resumen del ANOVA realizado para seleccionar el día típico de verano. Serie temporal 2001-2024

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	768,52	24	32,02166667	0,097282983	0,999999887	1,964305634
Dentro de los grupos	8229	25	329,16			
Total	8997,52	49				

Fuente: Elaboración propia

2.3. Obtención de índices espectrales para áreas representativas de cada LCZ y análisis estadístico descriptivo

El área representativa de cada LCZ se ha establecido como el radio de alcance de cada sensor, que delimita la zona dónde los índices espectrales serán calculados. La misma se estableció de acuerdo con el criterio de la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (World Meteorological Organization, 2014). De la aplicación a cada una de las zonas monitoreadas, resulta que para las ZCL 2 y 3, el alcance es de 133 m de radio y para el resto de las zonas identificadas es de 219 m de radio.

La caracterización de áreas urbanas mediante índices espectrales es una herramienta que posibilita monitorear distintas zonas urbanas y determinar los parámetros críticos que las afectan. A partir de imágenes satelitales ópticas y aplicación de álgebra de bandas se puede obtener información de vegetación y suelo. Para manipular e interpretar esa gran cantidad y diversidad de datos e información, se generan los índices espectrales, transformando las bandas originales de las imágenes satelitales, en bandas nuevas y sintéticas.

Las técnicas involucradas en el desarrollo de los mismos presentan ventajas en lo referente a costos, menor tiempo invertido en la recolección de datos, información precisa, y mayor facilidad en la interpretación y predicción de fenómenos ambientales (Sánchez Vega, 2017). Para el análisis de la infraestructura verde y azul, se seleccionó un conjunto de índices espectrales: el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Humedad en las Hojas (LWCI) e Índice de Estrés Hídrico (MSI); y para caracterizar la dimensión del ambiente edificado, es decir la infraestructura gris, se seleccionó el Índice Normalizado de Suelos Construidos (NDBI).

En el proceso de geomática se utilizaron imágenes satelitales multispectrales Sentinel-2A. Se analizaron y procesaron mediante el programa QGIS, imágenes correspondientes al día 24 de febrero de 2021; para el desarrollo de NDVI, LWCI y MSI. Para el NDBI, se seleccionan imágenes correspondientes al invierno, día 29 de junio de 2021, donde los árboles están sin follaje, con el objeto de evitar la interferencia de la canopia que impide la visualización por teledetección de la infraestructura gris que se encuentra debajo de la misma. Las bandas de los productos seleccionados fueron calibradas y los valores digitales fueron transformados a reflectancia mediante corrección atmosférica, con el método DOS1 mediante el plugin SCP de QGIS (Chavez, 1999). Las imágenes fueron adquiridas de la página web del Servicio Geológico de EE. UU. Los productos que se utilizaron fueron:

-Sentinel-2A _ PRODUCT_ID:L1C_T19HED_A029651_20210224T143334.-Sentinel-2A_PRODUCT_ID:L1C_T19HED_A022530_20210629T143800.

2.4. Análisis de componentes principales

Se realizó un análisis estadístico descriptivo con el fin de identificar en qué medida, la temperatura del aire en las distintas ZCLs puede ser explicada por los índices espectrales analizados. El mismo consiste en la toma de valores máximos, mínimos, medios y desviación estándar para los índices calculados en cada zona. Se evaluó además el desempeño térmico registrado con los sensores fijos, temperatura ambiente: mínima, media y máxima, para el día 26 de febrero de 2021 por ser un día típico del verano en Mendoza (Sosa et al., 2017). Es decir, un día estable, con altos niveles de radiación solar, baja nubosidad, velocidad de viento y humedad, todas características representativas de un día típico de verano en Mendoza. Estadísticamente, las condiciones meteorológicas del día seleccionado son coincidentes con las temperaturas máximas (máxima, mínima y media) representativas del período, según los datos registrados en la estación Meteorológica del Aeropuerto Internacional Gobernador Francisco Gabrielli. Para demostrar esto se confeccionó una tabla con la estadística de los días más calurosos del mes de febrero para la serie temporal 2001 a 2024, se realiza un Análisis de la Varianza (ANOVA) y se comprueba que el día de análisis versus la serie 2001-2024 no muestra diferencias significativas, por lo tanto, los días son contrastables y el día de análisis seleccionado puede considerarse representativo de los días típicos calurosos de febrero. Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r) con el fin de detectar y cuantificar las relaciones entre los índices espectrales analizados respecto a las temperaturas mínima, media y máxima. Los coeficientes de correlación son la expresión numérica que indica el grado de relación lineal existente entre dos variables cuantitativas. Se utilizó este método para escoger las variables explicativas de mayor importancia, ya que se comparan datos que no son dimensionalmente homogéneos o donde el orden de magnitud de las variables medidas es diferente.

También, se efectuó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para establecer las variables explicativas de las temperaturas mínima, media y máxima. El ACP es una técnica multivariante de interdependencia, que permite explicar la mayor parte de la variabilidad total de un conjunto de variables observables, a través de un número menor de componentes o factores comunes no observables. El ACP es una técnica descriptiva, pero también puede ser utilizado con fines de inferencia. Tiene como objetivo calcular una serie de combinaciones lineales de las variables, de forma que maximicen la varianza de las componentes, con la restricción de que distintas combinaciones lineales sean ortogonales. Los primeros componentes principales bastan para describir, en alto porcentaje, la variabilidad total de las variables originales.

3. Resultados

3.1. Obtención de datos y confección de mapas de temperaturas representativas de ZCL

A partir del monitoreo de las temperaturas intraurbanas de un conjunto de sectores del AMM representativos de las ZCL, se evaluó el desempeño térmico registrado con los sensores fijos, para el día 26 de febrero de 2021. Los valores de temperatura del aire para las categorías -temperatura mínima, media y máxima- en cada zona, se representan en la Tabla 2 y se realiza una proyección de la media de los puntos de monitoreo al resto de la ZCLs (Figura 2). Esto se implementa en función de los resultados arrojados por el análisis estadístico de las temperaturas del aire monitoreadas en distintos canales representativos de cada ZCL identificada (se colocaron al menos tres sensores por cada zona y localizados en diferentes sectores del desarrollo de la misma). Ver Fig. 1. Los Test de Tukey arrojaron que no se verifica diferenciación significativa intrazonal de la

temperatura, pero sí interzonal. En base a ello se decidió tomar el valor de la media de las temperaturas del aire registradas para cada zona en los tres rangos mencionados previamente -máxima, mínima y media-.

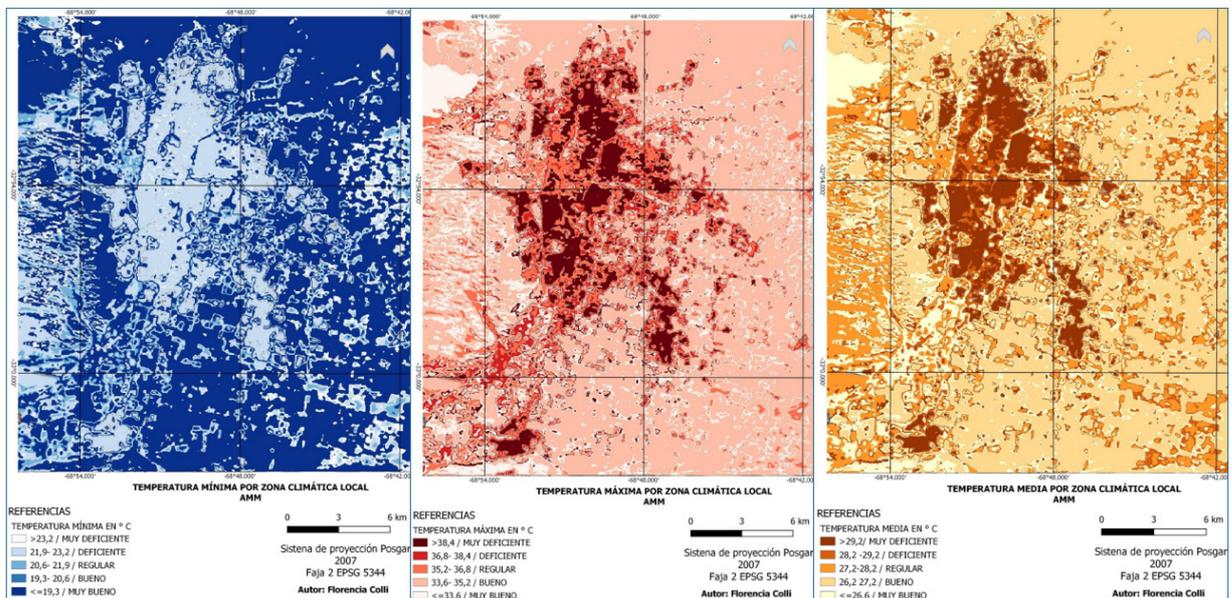
Tabla 2. Desempeño térmico en cada Zona Climática Local.

LCZ	T Max	T Min	T Med
2	34,0	24,5	29,1
3	35,8	23	28,7
5	39,2	22,2	30,2
6	40	23,1	29,8
8	37,3	18,7	26,2
9	32,4	19,2	25,6

Fuente: Elaboración propia

Respecto de las temperaturas máximas, el mayor valor se registra para la ZCL 6 (40,0°C) y el registro más bajo dentro de las máximas corresponde a la ZCL 9 (32,4°C), existiendo una amplitud entre ellas de 7,6 °C. Con respecto a las temperaturas mínimas, el mayor valor dentro corresponde a la ZCL 8 (18,7 °C) y el valor más alto de las mínimas, se registra en la ZCL 2 (24,5 °C). Respecto de las temperaturas medias, el valor más bajo se registra en la ZCL 9 (25,6 °C) y el mayor valor corresponde a la ZCL 5 (30,2°C).

Figura 2. Distribución espacial del desempeño térmico (°C) de temperaturas máxima, mínima y media representativa de cada ZCL.



Fuente: Elaboración propia

3.2. Estado de la infraestructura verde, azul y gris en cada zona climática del AMM.

Como producto de la aplicación del álgebra de bandas específico para el desarrollo de los Índices espectrales seleccionados, en el área correspondiente al radio de alcance establecido para cada

sector monitoreado (Figura 2), se obtiene un ráster de cada índice donde cada píxel brinda el valor del mismo. La Tabla 3 presenta los rangos de valorización de cada índice para su normalización, entendiéndose que la valorización muy deficiente representa malas condiciones de la IVAG. Con respecto al NDBI se ha decidido asignar una valoración positiva a los sectores con bajos valores, considerándolos como situaciones favorables, mientras que los sectores con valores altos se interpretan como situaciones adversas.

Tabla 3. Rango y valorización de cada índice espectral.

Rango				Valoración
NDVI	LWCI	MSI	NDBI	
<=0	<=-0,42	>1,53	>0,37	Muy deficiente
>0 -0,2	>-0,42-0,05	1,26-1,53	0,20-0,37	Deficiente
0,2-0,4	0,05-0,54	0,98-1,26	0,02-0,20	Regular
0,4-0,6	0,54-1,02	0,70-0,98	-0,16	Bueno
0,6-1	>1,02	<=0,70	<=-0,14	Muy bueno

Fuente: Elaboración propia

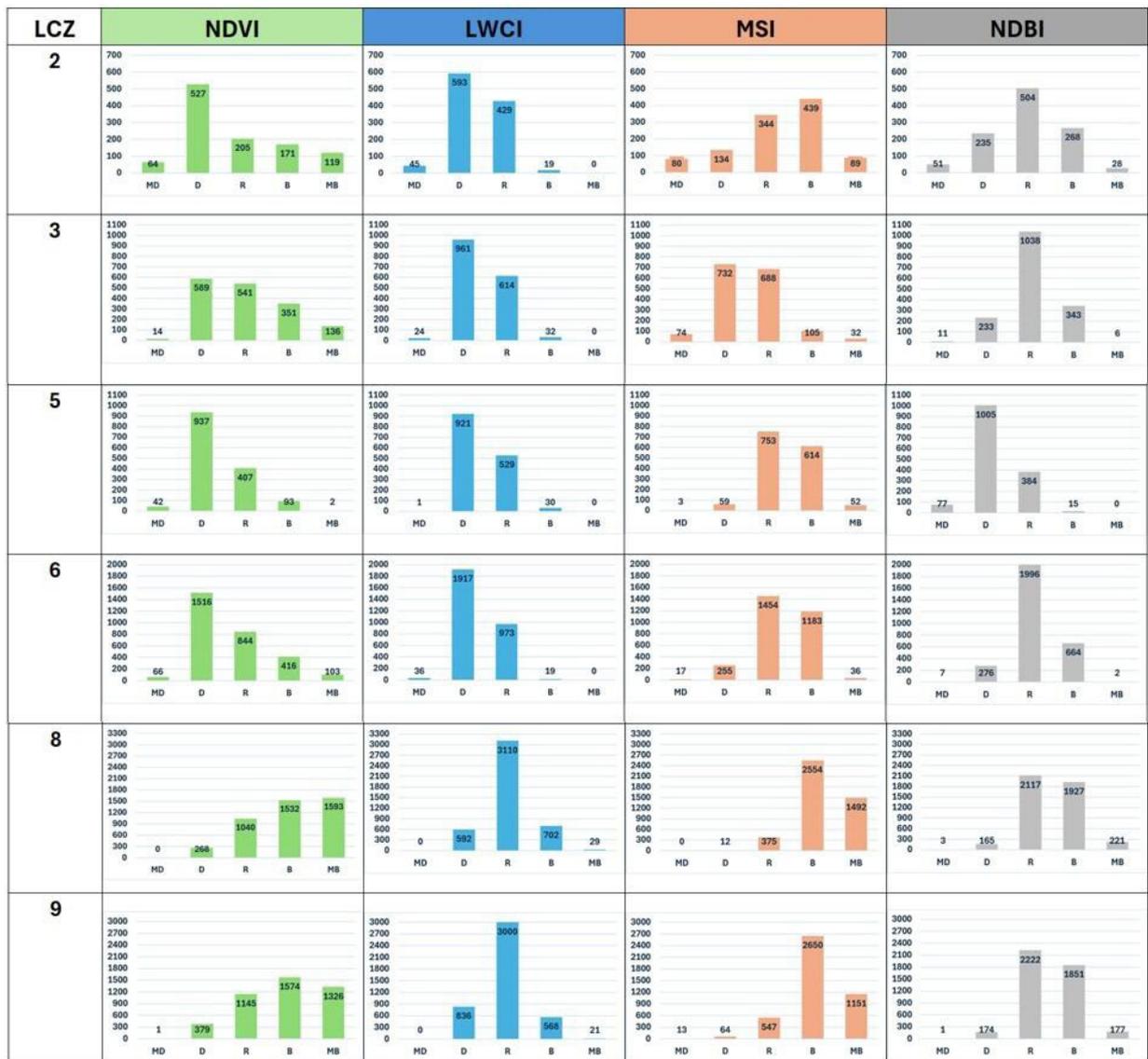
En la Figura 3 se presenta la distribución de frecuencias de los índices espectrales por cada ZCL analizada. Se observa que las ZCL 2 y 3 se localizan en el área central de la ciudad, de mayor densidad edilicia donde se concentran las actividades administrativas y comerciales, esto se ve reflejado en sus valores de NDBI en torno a las categorías regular y deficitaria. Respecto a la distribución de frecuencias de NDVI, en ambas zonas, se observa que corresponde a las categorías deficitaria y regular. Lo mismo sucede con el comportamiento del LWCI. Sin embargo, se observa que, si bien en la ZCL 2 la calidad y el contenido de humedad se muestran deficitarios, indicando que el estado vegetativo está deprimido, no hay evidencia de signos de estrés. Para el caso de la ZCL 3 al mismo comportamiento del NDVI y LWCI, se suma la condición de estrés indicada por la concentración del MSI en las categorías deficitaria y regular.

Las ZCL 5 y 6 poseen función principalmente residencial, diferenciándose por su tipología edilicia que es de una densidad constructiva media en la ZCL 5 y de baja densidad en la ZCL 6, que se identifican en sus valores de NDBI. Ambas zonas presentan un comportamiento análogo para los índices NDVI, LWCI y MSI que muestran un estado vegetativo deficitario acompañado de condiciones de estrés.

En las zonas 8 y 9, los índices espectrales exhiben un comportamiento diferente. En estas áreas, el NDVI muestra un aumento continuo en la concentración de píxeles a medida que se avanza de la categoría regular a muy buena, con la mayor concentración en esta última. El LWCI presenta una alta concentración en la categoría regular, lo que supone un cambio significativo con respecto a las zonas anteriores. Esta tendencia también se refleja en el MSI, donde predominan las categorías bueno y muy bueno. Finalmente, el NDBI muestra una distribución más equilibrada entre las categorías regular y bueno, en contraste con las zonas de la ciudad analizadas previamente.

Se puede observar que, a mayor lejanía de las zonas con mayor densidad edilicia hacia áreas de menor densidad, los índices espectrales cambian notablemente su distribución. En las zonas 2, 3, 5 y 6 los índices tienden a concentrarse en las categorías muy deficiente a regular, mientras que en las zonas 8 y 9, las categorías regular a muy bueno dominan el comportamiento de los índices.

Figura 3. Distribución de frecuencias de los índices espectrales por ZCL.



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 4 se muestra a modo de síntesis la relación entre los valores de las temperaturas máximas, mínimas y medias representativas de cada zona, y los valores de los índices analizados. Se representan con código de color la condición reflejada por el conjunto de indicadores para cada zona. A partir de su análisis es posible identificar que en todos los casos las zonas 8 y 9 son las que se encuentran con colores referentes a las mejores condiciones de infraestructura verde, azul y gris a través de los índices espectrales calculados.

La distribución de las distintas variables de temperatura evaluadas -T min, T med, T max -muestran estricta relación con las características del territorio agrupadas en las distintas ZCLs identificadas. Las temperaturas máximas se asocian con el mayor acceso al sol y el sellamiento de suelo, en este sentido la zona ZCL 6, residencial de baja altura, zona climática de mayor extensión territorial, es un sector consolidado en la ciudad con un índice de vegetación NDVI que corresponde mayoritariamente al rango “deficitario” y con sellamiento de suelo medio -NDBI- que responde mayoritariamente al rango “regular”. Respecto de las temperaturas mínimas se observa que los

patrones de enfriamiento de la ciudad muestran estricta relación con los sectores de mayor inercia térmica representados por el NDBI, en este caso la ZCL 2, es la que presenta temperaturas mínimas más altas y tiene un valor “muy deficiente” de NDBI, correspondiente al rango de mayores valores.

Tabla 4. Índices espectrales y desempeño térmico en cada ZCL.

LCZ	Temperatura			NDVI			LWCI			MSI			NDBI		
	max	min	med	med	max	min	med	max	min	med	max	min	med	max	min
2	34,01	24,5	29,06	0,24	0,78	-0,08	0,01	0,78	-0,82	1,04	3,42	0,51	0,074	0,54	-0,32
3	35,79	23,02	28,67	0,3	0,82	-0,05	0,02	0,95	-0,88	1,01	3,38	0,47	0,063	0,54	-0,35
5	39,21	22,18	30,2	0,17	0,61	-0,16	0,03	0,8	-0,48	0,99	1,61	0,59	0,026	0,23	-0,25
6	40,01	23,13	29,78	0,22	0,78	-0,07	0,01	0,75	-0,76	1,03	2,26	0,55	0,049	0,38	-0,28
8	37,25	18,69	26,24	0,51	0,88	0,02	0,3	1,32	-0,34	0,81	1,45	0,33	-0,01	0,18	-0,49
9	32,44	19,23	25,56	0,47	0,85	0	0,27	1,47	-0,4	0,81	1,81	0,43	-0,01	0,29	-0,3

Referencia- código de colores:



Fuente: Elaboración propia

3.3. Análisis del comportamiento térmico de las ZCL y su relación con los índices espectrales analizados.

Se realiza un análisis por componentes principales (ACP) con el objetivo de determinar la relación entre el desempeño térmico de cada ZCL evaluada (temperaturas mínima, media y máxima) y el comportamiento de los índices espectrales analizados. Los resultados del ACP para el caso de las temperaturas mínimas, medias y máximas se muestran en las Figura 4.

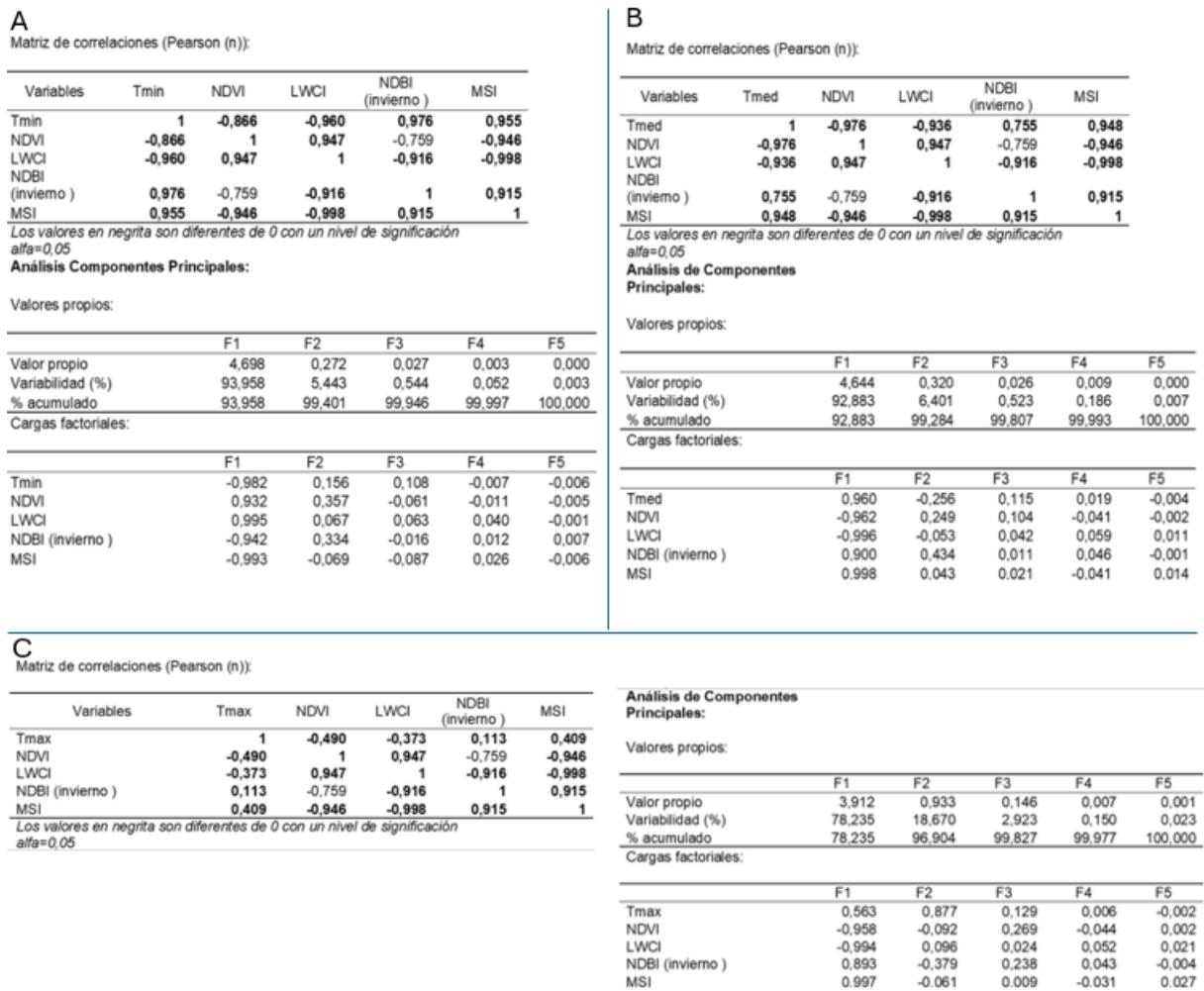
Para evaluar si existe colinealidad entre las variables analizadas se utilizó la prueba de esfericidad de Bartlett, que evalúa la aplicabilidad del análisis factorial de las variables estudiadas. El modelo es significativo cuando se acepta la hipótesis nula, H0. Con el objeto de verificar si el modelo factorial en su conjunto es significativo se utilizó el test Kaiser, Meyer y Olkin (KMO). Cuanto más cerca del valor 1 esté el resultado obtenido del test KMO, la relación entre las variables es más alta. Se recomienda no aplicar ACP para valores de KMO < 0,5. En este caso, las tres variables analizadas, T Min, T Med y T Max, arrojaron valores de test KMO superiores al 0,587; lo que indica que es viable realizar un análisis factorial.

Del análisis de la matriz de correlaciones de la Figura 4 se observa que existe alta correlación entre los índices evaluados y las temperaturas mínimas y medias de las LCZs, mientras que para el caso de la temperatura máxima si bien existe correlación, es de fortaleza media para los casos del NDVI, LWCI y MSI y baja para el caso del NDBI, indicando que sólo para el caso de las temperaturas máximas de cada zona es menos evidente la correlación entre la temperatura del aire y los índices espectrales que caracterizan el estado de las infraestructuras.

El ACP para el caso de la temperatura mínima (Figura 4-A) muestra que el primer factor que relaciona la temperatura y los índices espectrales representativos de las IVAG, puede explicar en un 94% la correlación. La matriz de correlaciones entre la temperatura mínima y los 4 índices evaluados muestra una correlación significativa y alta con coeficientes superiores a 0.86, negativos para el caso del NDVI y LWCI, y positivos para el caso del NDBI y el MSI. De acuerdo con

la relación entre los signos tanto en la matriz de correlaciones como en la matriz de las cargas factoriales, se puede inferir que, a mejor estado en cantidad y calidad de la vegetación, y mayor contenido de agua, la temperatura mínima del espacio es menor. Lo mismo se desprende del análisis de los signos de los dos índices restantes donde a mayor densidad edilicia -NDBI- y estrés hídrico -MSI- la temperatura mínima de la ZCL analizada es mayor. El comportamiento estadístico observado guarda relación con los fenómenos de transferencia de calor y masa que tienen lugar en los espacios analizados y que justifican el comportamiento térmico de los mismos.

Figura 4. Matriz de correlaciones de las variables consideradas y resultados de ACP. Caso Temperatura mínima (A), temperatura media (B) y temperatura máxima (C)



Fuente: Elaboración propia

El ACP aplicado para analizar el comportamiento de las temperaturas medias (Figura 4-B) de la LCZs y los índices espectrales representativos del estado de sus IVAG, muestran un comportamiento semejante al explicado para el caso de las temperaturas mínimas, donde la matriz de correlaciones muestra fuerte correlación entre los índices espectrales y la temperatura, con coeficiente de correlación superiores a 0,755. En este caso el primer factor del ACP es explicativo del 93 % del comportamiento de los datos analizados y nuevamente el análisis de los signos de los coeficientes tanto de la matriz de correlaciones como de la matriz de las cargas factoriales demuestran que a mayor valor del NDVI y LWCI, menor es la temperatura media de la zona y que

a mayor valor de NDBI y MSI mayor es la temperatura media de la zona. Esto indicaría que el análisis estadístico muestra correlación con la explicación del comportamiento térmico del espacio analizado, y los fenómenos transferencia de calor y masa que determinan el balance térmico e hídrico de los mismos, ya que a medida que aumenta la densidad edilicia y el estrés hídrico la temperatura media del espacio aumenta y por el contrario si la cantidad y calidad de la vegetación y su contenido de humedad aumentan, menor es la temperatura media del espacio.

El ACP aplicado al análisis del comportamiento de la temperatura máxima y su relación con los índices espectrales indica que el primer factor cuyo autovalor es mayor que 1 podría explicar hasta el 78,5% del comportamiento del conjunto analizado (Figura 4-C). Si bien en este caso tanto los coeficientes de la matriz de correlaciones como de la matriz de las cargas factoriales son menores que en los casos anteriores, se verifica que existe correlación de fortaleza media entre la temperatura máxima y el NDVI; LWCI y MSI; y baja con el NDBI.

Los resultados muestran que los índices espectrales analizados son fuertemente explicativos de las temperaturas mínimas de las zonas climáticas de la ciudad que se vinculan al efecto de isla de calor de la misma. Y también, de la distribución de las temperaturas medias dentro del área metropolitana que se vinculan con la demanda de energía para acondicionamiento térmico de los espacios interiores, pues mientras mayor es la temperatura media del espacio exterior por encima de la temperatura de confort, mayor es la demanda de refrigeración en verano. Además, indican que el uso de los índices espectrales calculados en combinación con el análisis geoestadístico y de componentes principales permite prever cómo las variaciones en la vegetación y la densidad de construcción afectarían las temperaturas a nivel local.

4. Discusión de resultados

Aunque existen numerosos trabajos sobre el riesgo por calor en las ciudades, muchos de ellos tienden a centrarse en un número limitado de variables para comprender el comportamiento térmico urbano. Por ejemplo: superficie de infraestructura verde vs infraestructura gris; diferencias térmicas entre espacios construidos y áreas verdes; relación de un índice espectral y la temperatura superficial. La perspectiva de este tipo de análisis limita la comprensión integral de la interrelación entre las características del ambiente construido y su desempeño térmico y, por lo tanto, limita la efectividad de las estrategias a proponer para disminuir la carga térmica del entorno urbano.

Las investigaciones de Higuera García (2022), Chakriwat (2024) y Van Oorschot (2024) subrayan la importancia de la planificación territorial y el fortalecimiento de la infraestructura verde-azul para enfrentar los efectos del cambio climático. Estos estudios destacan cómo la integración de espacios verde azul en el entorno urbano puede ser esencial para mitigar y adaptarse a los impactos del cambio climático en las ciudades.

En un enfoque complementario, Vásquez (2016) explora los beneficios ecosistémicos proporcionados por la infraestructura verde, enfatizando su función como mecanismo de adaptación y mitigación frente al cambio climático y el aumento de las temperaturas. Aunque su estudio destaca la importancia de estos beneficios, no ofrece una cuantificación específica de cómo la infraestructura verde impacta sobre la temperatura. En referencia a esto, la presente investigación proporciona datos cuantitativos que verifican la correlación entre la cantidad, calidad y estado hídrico de la vegetación y la temperatura de una determinada zona urbana.

En cuanto a la relación entre temperatura e infraestructura urbana, muchos estudios han abordado la diferencia de temperatura entre espacios vegetados y construidos. Por ejemplo, Reyes-Rodríguez (2024) y Ruiz *et al.* (2022) analizan las diferencias de áreas verdes con otras zonas urbanas en términos de temperatura. Algunos estudios han avanzado en la correlación de variables complejas para entender mejor el comportamiento térmico urbano. Rojas-Cortorreal (2019) identifican zonas vulnerables basándose en la relación entre la disminución de la infraestructura verde (IV) y el aumento de la temperatura. Pereira dos Santos (2024) examina cómo el tipo de cobertura vegetal, evaluada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada Edificada (NDBI), influye en la Temperatura Superficial (LST) en barrios de Minas Gerais (Brasil). Su investigación revela que la expansión urbana y la reducción de la vegetación están correlacionadas con un aumento en la LST. McDonald (2024) ofrece una perspectiva valiosa al analizar la relación entre la cantidad de cobertura arbórea y los beneficios protectores de los árboles contra el calor, demostrando que el arbolado urbano puede ser crucial para reducir la mortalidad y morbilidad asociadas con el calor, destacando la importancia del arbolado en el estudio del riesgo térmico urbano.

Al comparar los hallazgos con investigaciones previas en ciudades de climas áridos y semiárido se encuentran enfoques variados. En términos de la relación entre la cobertura del suelo y las islas de calor urbano (UHI), los resultados de Abulibdeh (2021) en las ciudades áridas y semiáridas de Doha, Abu Dabi, Dubái, Riad, Yeda, Mascate, Kuwait y Manama muestran que las áreas desnudas y urbanas presentan temperaturas de superficie (LST) significativamente más altas que las áreas verdes. Este hallazgo es consistente con los resultados obtenidos en el Área Metropolitana de Mendoza, donde las zonas con deficiencias en infraestructura verde experimentan temperaturas más elevadas. Sin embargo, lo que distingue al presente estudio es el análisis más detallado de cómo las infraestructuras verdes y azules (como espacios verdes, árboles urbanos y cuerpos de agua) influyen en la mitigación térmica. Abulibdeh también confirma la correlación entre los índices de vegetación (como el NDVI) y la reducción de las temperaturas, algo que es particularmente relevante en el contexto de Mendoza, donde se identificaron áreas críticas que requieren intervención urgente para aumentar la cobertura vegetal.

Shahfahad *et al.* (2023) busca analizar la variación estacional y espacial de la LST y la SUHII en ocho ciudades semiáridas de la India -Udaipur, Jaipur, Kota, Rajkot, Vadodara, Ahmedabad, Nagpur y Pune- en respuesta a las condiciones de humedad del suelo y vegetación. Se obtuvo la LST con datos Landsat y para analizar la asociación del SUHII con el NDVI y el Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI). Esta relación es especialmente relevante para el AMM, donde, al igual que en las ciudades de la India, las estaciones cálidas se caracterizan por un aumento en las temperaturas urbanas. Si bien en el presente trabajo no se aborda directamente la estacionalidad, sí refleja cómo la vegetación y las infraestructuras verdes juegan un papel crucial en la atenuación del calor urbano. Al igual que los hallazgos de Shahfahad *et al.*, los resultados obtenidos indican que las áreas con menor humedad y vegetación experimentan mayores temperaturas, pero, a diferencia de los estudios previos, los análisis geoestadísticos permiten anticipar con mayor precisión cómo las variaciones en la infraestructura urbana podrían modificar estos patrones térmicos a corto y mediano plazo. El estudio realizado por Lu *et al.* (2020), analiza las variaciones espaciotemporales del entorno térmico y su relación con la composición y configuración de la cobertura terrestre en Xi'an, la ciudad más grande del noroeste de China. Se clasificaron mapas de cobertura terrestre y se estimó la LST utilizando imágenes Landsat en seis períodos de tiempo, de 1995 a 2020. Las variaciones de la isla de calor superficial se capturaron utilizando datos multitemporales de LST y un indicador de intensidad de ICU. La relación entre las caracte-

rísticas de la cobertura terrestre y la temperatura superficial terrestre se analizó mediante cuadrículas multirresolución y análisis de correlación. Los resultados mostraron que la SUHII aumentó de 0,68 °C en 1995 a 2,75 °C en 2020. Las densidades de superficies impermeables tuvieron un mayor impacto en el LST que los espacios verdes, con un coeficiente de correlación de Pearson que oscila entre 0,59 y 0,97. Se demuestra que las áreas con mayor densidad de superficies impermeables tienen un impacto más significativo en el aumento de las temperaturas urbanas que las áreas verdes, lo que provoca un incremento en el índice de calor urbano. Este hallazgo es similar a los resultados observados en AMM, donde la densificación urbana y la falta de infraestructura verde contribuyen al aumento térmico.

Se observa que la literatura internacional ha evaluado la relación entre el desempeño térmico urbano y sus infraestructuras contrastando la LST y diversos índices espectrales como el NDVI y el NDBI, entre otros. A diferencia, el presente trabajo analiza esta relación, pero utiliza la temperatura del aire intraurbana por las dificultades que presenta trabajar con la LST en el área de estudio, como se mencionó en la Introducción). No obstante, los resultados discutidos previamente ponen en evidencia la semejanza de los hallazgos.

Como contribución al estado del conocimiento puede inferirse que esta investigación ha avanzado hacia la integración de un conjunto de índices espectrales descriptores del estado de las infraestructuras urbanas verde, azul y gris. Se demuestra su correlación con la respuesta térmica de distintos sectores de la ciudad. Esto permite una evaluación multidimensional y detallada de los factores que influyen en el riesgo por calor y al mismo tiempo ofrece la posibilidad de inferir de forma ágil la calidad térmica del espacio, en función del estado de sus infraestructuras reportado de acuerdo con los rangos de categorización de los índices espectrales analizados. Las relaciones causa-efecto identificadas mediante el método de análisis propuesto, constituyen una herramienta apropiada para identificar debilidades y diseñar estrategias de mitigación efectivas frente al riesgo por calor en zonas urbanas.

5. Conclusiones

Este estudio analiza la relación causal entre la vegetación, las áreas construidas y las temperaturas intraurbanas, permitiendo una comprensión más profunda del comportamiento térmico de la ciudad. Estos hallazgos constituyen una base sólida para el análisis de riesgo por calor y el desarrollo de estrategias de mitigación más eficaces.

A escala local, los resultados obtenidos, ponen de manifiesto la necesidad de incrementar en cantidad y calidad la infraestructura verde-azul en los sectores correspondientes a la ZCL 2 y 3, donde la superficie disponible es escasa, para ello será necesario implementar nuevas tecnologías de infraestructura verde, como techos y fachadas verdes, a fin de reducir la temperatura urbana y mitigar el riesgo por calor en estos sectores de la ciudad analizada.

Los índices espectrales calculados para analizar el estado de las infraestructuras urbanas en el AMM (NDVI, LWCI, MSI y NDBI) permiten identificar áreas específicas dentro de la ciudad donde la combinación de las infraestructuras verde azul y gris es deficitaria, dando como resultado que las temperaturas urbanas sean más elevadas. Esto permite detectar y cartografiar las zonas de mayor vulnerabilidad térmica, facilitando la individualización de sectores que requieren intervenciones como la creación de nuevos espacios verdes, el incremento del arbolado urbano, la mejora en la irrigación de la vegetación o el ordenamiento de la densidad edificatoria.

Además, al identificar una correlación significativa y fuerte entre los índices espectrales y las temperaturas mínimas y medias en el área metropolitana analizada, el estudio ofrece un enfoque cuantitativo que aporta a la evaluación y gestión del riesgo por calor, permitiendo a los planificadores urbanos y a los responsables de la formulación de políticas priorizar las zonas que requieren intervenciones urgentes.

Los índices explicativos del estado de las IVAG y su correlación con las temperaturas del aire en las distintas zonas se agrupan en un solo factor, lo cual sugiere que el desarrollo de un indicador que sintetice la relación de los índices para cada zona sería de suma utilidad para calificar y categorizar el desempeño térmico de los distintos sectores identificados en la ciudad.

A partir del análisis de estas relaciones, se podrán realizar propuestas individualizadas en base a las deficiencias y potencialidades de cada ZCL identificada, optimizar la planificación y generar las estrategias de adaptación y mitigación a las consecuencias del cambio climático con el fin de lograr que el Área Metropolitana de Mendoza sea más inclusiva, segura, resiliente y sostenible. Poder identificar áreas con alta vulnerabilidad térmica permite a los planificadores urbanos y responsables de políticas priorizar intervenciones en zonas críticas. Esta información es fundamental para el diseño de estrategias urbanísticas que se adapten a las realidades térmicas de cada sector, lo que permite una planificación más eficiente y ajustada a las necesidades locales.

La creación de espacios verdes, el incremento del arbolado urbano y la mejora de la infraestructura verde se perfilan como medidas clave para mitigar el riesgo térmico. De este modo, el estudio ofrece un marco claro para que las políticas urbanas integren la infraestructura verde como un componente esencial en el diseño y rediseño de las ciudades. Basadas en los resultados de este estudio, las políticas públicas pueden promover la implementación de techos verdes, jardines urbanos y áreas recreativas con vegetación en zonas donde la escasez de espacios verdes agrava los efectos del calor extremo. Esto no solo contribuye a reducir el riesgo térmico, sino que también promueve un desarrollo urbano más sostenible, con beneficios adicionales para la salud pública, la biodiversidad y la calidad de vida de los habitantes. Sumado, los resultados pueden asistir la toma de decisiones enfocadas a la protección de la salud mediante la implementación de medidas preventivas, como el diseño y gestión de una red de refugios climáticos, la mejora de la accesibilidad a espacios públicos verdes y la promoción de la sensibilización ciudadana sobre los efectos del calor extremo y su relación con el estado de las infraestructuras.

Finalmente, la metodología empleada, que integra el uso de índices espectrales y geoestadísticas, ofrece un modelo replicable para el monitoreo continuo de la relación entre las temperaturas intraurbanas y el estado de las infraestructuras como insumo para el análisis del riesgo por calor en áreas urbanas.

Bibliografía

- Abulibdeh, A. (2021). Analysis of urban heat island characteristics and mitigation strategies for eight arid and semi-arid gulf region cities. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-26.
- Akinyemi, F. O., Ikanyeng, M., & Muro, J. (2019). Land cover change effects on land surface temperature trends in an African urbanizing dryland region. *City and Environment Interactions*, 4, Article 100029. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2020.100029>
- Aslam A., Rana I. A., & Bhatti S. S. (2021). The spatiotemporal dynamics of urbanisation and local climate: A case study of Islamabad, Pakistan. *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 91, 106666, ISSN 0195-9255. <https://doi:10.1016/j.eiar.2021.106666>

- Aubrecht, C., & Özceylan, D. (2013). Identification of Heat Risk Patterns in the U.S. National Capital Region by Integrating Heat Stress and Related Vulnerability. *Environment International* 56:65–77. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.03.005>
- Banerjee, B., Pal, A., Tiwari, AK, & Kanchan, R. (2024)). Assessing the Land Use Dynamics and Thermal Environment Using Geospatial Techniques in the Industrial City of Chotanagpur Plateau Region, India. *Environmental Monitoring and Assessment* 196(7):609. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12752-6>
- Baxendale, M., Athavale, J., Robertson, S., & Joshi, Y. (2019). “Data center temperature control using PI system and MATLAB” (pp. 897-904). Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). Las Vegas 28, 29, 30 y 31 de mayo de 2019. Recuperado de <https://www.merseyforest.org.uk/files/documents/1365/2002+Green+Infrastructure+Smart+Conservation+for+the+21st+Century..pdf>
- Benedict, M., & McMahon, E. (2002). Green infrastructure: smart conservation for the 21st century. *Renewable Resources Journal*, 20(3), 12-17. Recuperado de <https://www.merseyforest.org.uk/files/documents/1365/2002+Green+Infrastructure+Smart+Conservation+for+the+21st+Century..pdf>
- Cai Z. , Tang Y., & Zhan Q. (2021). A cooled city? Comparing human activity changes on the impact of urban thermal environment before and after city-wide lockdown. *Building and Environment*, Volume 195, 2021, 107729, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107729>.
- Chakriwat, S. (2024). Impact of Urban Green Spaces on Air Quality in Bangkok. *International Journal of Environmental Sciences* 7(2):26–37. <https://doi.org/10.47604/ijes.2736>
- Chavez P. S., 1999. Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, [Falls Church, Va.] American Society of Photogrammetry, 62, 1025-1036.
- Colli, M, Correa, E., & Martinez, C. F. (2020). Aplicación del método WUDAPT En La Ciudad de Mendoza-Argentina para definir Zonas Climáticas Locales. *Revista Urbano* 23(42):18–31. <https://doi.org/10.22320/07183607.2020.23.42.02>
- Correa, E., Ruiz M., Canton, A., & Lesino G. (2012). Thermal Comfort in Forested Urban Canyons of Low Building Density. An Assessment for the City of Mendoza, Argentina. *Building and Environment* 58:219–30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.007>
- Dong J., Peng J., He X., Corcoran J., Qiu S., & Wang X. (2020). Heatwave-induced human health risk assessment in megacities based on heat stress-social vulnerability-human exposure framework. *Landscape and Urban Planning*, Volume 203, 2020, 103907, ISSN 0169-2046. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103907>.
- Dong, J., Peng, J., He, X., Corcoran, J., Qiu, S., & Wang, X. (2020). Heatwave-induced human health risk assessment in megacities based on heat stress-social vulnerability-human exposure framework. *Landscape and Urban Planning*, 203, 103907.
- Escalante, A. & Grande C. (2014). Análisis de La Cobertura Vegetal Del Área Metropolitana de San Salvador y Determinación de Índices de Cobertura Vegetal Del Municipio de Antiguo Cuscatlán.”Actas del III Congreso de Ingeniería y Arquitectura, Antiguo Cuscatlán. El Salvador, 9 y 10 de octubre de 2014. Recuperado de <https://hdl.handle.net/20.500.12032/50179>
- Fernandez-Milan, B., & Creutzig F. (2015). Reducing Urban Heat Wave Risk in the 21st Century. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:221–31. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.08.002>
- Hartinger, S. M., Palmeiro-Silva, Y. K., Llerena-Cayo, C., Blanco-Villafuerte, L., Escobar, L. E., Diaz, A., ... & Romanello, M. (2024). The 2023 Latin America report of the Lancet Countdown on health and climate change: the imperative for health-centred climate-resilient development. *The Lancet Regional Health–Americas*, 33.
- He, B., Wang, J., Liu, H., & Ulpiani, G. (2021). Localized Synergies between Heat Waves and Urban Heat Islands: Implications on Human Thermal Comfort and Urban Heat Management. *Environmental Research* 193:110584. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110584>
- Higuera-García, E., Pozo-Menéndez E., Moneo-Feduchi B., & Jeffrey B., (2022). Ordenación Territorial Desde La Infraestructura y Azul En El Valle de Guatiguará (Colombia). *URBE* 14. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.014>
- Li, X., Yuyu Z., Sha Y., Gensuo J., Huidong L., & Wenliang L. (2019). Urban Heat Island Impacts on Building Energy Consumption: A Review of Approaches and Findings. *Energy* 174:407–19. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.183>
- Magdalena-Mas, F., Cortés-Sánchez F., & Molina Martín B. (2018). Infraestructuras Verdes y Azules: Estrategias de Adaptación y Mitigación Ante El Cambio Climático. *Revista Digital Del Cedex* 191. Recuperado de <https://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2350>

- Martínez, C. F., Cantón, M. A., & Juñent, F. A. R. (2014). Incidencia del déficit hídrico en el crecimiento de árboles de uso urbano en ciudades de zonas áridas. Caso de Mendoza, Argentina. *Interciencia*, 39(12), 890-897. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33932786010>
- McDonald, R., Biswas T., Chakraborty T, Kroeger Timm., Cook-Patton S., & Fargione J. (2024). Current Inequality and Future Potential of US Urban Tree Cover for Reducing Heat-Related Health Impacts. *Npj Urban Sustainability* 4(1):18. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00150-3>
- Mora, C., Bénédicte D., Iain R., Farrah E., Powell F, Rollan C. Geronimo, R., Bielecki C., ... & Clay T. (2017). Global Risk of Deadly Heat. *Nature Climate Change* 7(7):501-6. <https://doi.org/10.1038/nclimate3322>
- Oke, T. R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (Vol. 81, p. 51). Geneva: World Meteorological Organization. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/T-Oke/publication/265347633_Initial_guidance_to_obtain_representative_meteorological_observations_at_urban_sites/links/567a3b4d08ae361c2f681d5b/Initial-guidance-to-obtain-representative-meteorological-observations-at-urban-sites.pdf
- Papalardo, S. E.; Zanetti, C.; & Todeschi, V. (2023). Mapping urban heat islands and heat-related risk during heat waves from a climate justice perspective: A case study in the municipality of Padua (Italy) for inclusive adaptation policies. *Landscape and Urban Planning*, Volume 238, 2023, 104831, ISSN 0169-2046. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104831>
- Pereira dos Santos, A., Henzo H., Tondato -Arantes L., Santacruz-Salas A., & Da Cunha e Silva D. (2024). Relación Espacio-Temporal de La Temperatura Superficial con el tipo de cobertura y uso del suelo, en los barrios del Municipio de Paracatu, Mina Gerais, Brasil. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense* 44(1):235-49. <https://doi.org/10.5209/aguc.94211>
- Reyes-Rodríguez, C., Chavoya M., López-Serrano M., Ruiz J., Hinojosa-Espinoza F., & Vega-Nieva D. (2024). Análisis de La Temperatura Superficial En Las Áreas Verdes de La Ciudad de Durango, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 15(81):83-109. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1432>
- Rojas-Cortorreal, G., Peña J., Roset-Calzada J., & García A. (2019). La Infraestructura Verde Como Herramienta de Mitigación y Adaptación Urbana En La Ciudad de Santo Domingo, República Dominicana. In XIII CTV 2019 Proceedings: XIII International Conference on Virtual City and Territory: "Challenges and paradigms of the contemporary city": UPC, Barcelona, October 2-4, 2019. Barcelona: Centre de Política de Sol i Valoracions, CPSV / Universitat Politècnica de Catalunya, UPC. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/185581>
- Ruiz, A., Colli, M., Martínez, C. F., & Correa-Cantaloube, E. (2022). Park Cool Island and Built Environment. A Ten-Year Evaluation in Parque Central, Mendoza-Argentina. *Sustainable Cities and Society* 79:103681. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103681>
- Salvo-Tierra, A., El-Bahri, Y., Cortés-Molino, A., Katja A., Vargas-Jiménez M., & Guerrero-Serrano, P. (2021). Anillo Verde de Alborán: Bases Para Una Infraestructura Verde en el arco de Alborán ante la crisis Climática. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8140059>
- Sánchez-Vega, L. (2017). Elaboración de Un Índice de Calidad Ambiental (ICA), Enfocado al Sector Urbano de La Ciudad de Cuenca Utilizando Teledetección y Análisis Espacial (Tesis Doctoral). Universidad de la Cuenca. Recuperado de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27524>
- Shahfahad, Bindajam, A. A., Naikoo, M. W., Horo, J. P., Mallick, J., Rihan, M., ... & Rahman, A. (2023). Response of soil moisture and vegetation conditions in seasonal variation of land surface temperature and surface urban heat island intensity in sub-tropical semi-arid cities. *Theoretical and Applied Climatology*, 153(1), 367-395.
- Sosa-Castro, M. B., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2017). Influencia de la morfología urbana sobre la habitabilidad térmica exterior en una ciudad de clima árido. *Habitat Sustentable*, 7(1), 44-53. <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.01.05>
- Sun, G., Jiao, Z., Zhang, A., Li, F., Fu, H., & Li, Z. (2021). Hyperspectral Image-Based Vegetation Index (HSVI): A New Vegetation Index for Urban Ecological Research. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 103:102529. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102529>
- Van Oorschot, J., Slootweg M., Roy P. Remme, B., & Voet E. (2024). Optimizing Green and Gray Infrastructure Planning for Sustainable Urban Development. *Npj Urban Sustainability* 4(1). <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00178-5>
- Vásquez, A. (2016). Infraestructura Verde, Servicios Ecosistémicos y Sus Aportes Para Enfrentar El Cambio Climático En Ciudades: El Caso Del Corredor Ribereño Del Río Mapocho En Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande* (63):63-86. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000100005>

- Veerkamp, CJ, Schipper, AM, Hedlund, K., Lazarova, T., Nordin, A. & Hanson, HI (2021). A Review of Studies Assessing Ecosystem Services Provided by Urban Green and Blue Infrastructure. *Ecosystem Services* 52:101367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101367>
- Wang Hui, Liu Yanxu, Wang Yijia, Yao Ying, & Wang Chenxu. (2023). Land cover change in global drylands: A review. *Science of The Total Environment*, Volume 863, 2023, 160943, ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160943>
- World Meteorological Organization (2014). Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos. Recuperado de https://web.directemar.cl/met/jturno/documentos/wmo_8-2014_es.pdf
- Xiang Y., Yuan C., Cen Q., Huang C., Wu C., Teng M., & Zhou Z. (2024). Heat risk assessment and response to green infrastructure based on local climate zones. *Building and Environment*, Volume 248, 2024, 111040, ISSN 0360-1323. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111040>
- Yang, L., Li, Q., Li, Q., Zhao, L., Luo, Z., & Liu, Y. (2024). Different explanations for surface and canopy urban heat island effects in relation to background climate. *Iscience*, 27(3). <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.108863>
- Zeng, P., Sun, F., Shi, D., Liu, Y., Zhang, R., Tian, T., & Che, Y. (2022). Integrating anthropogenic heat emissions and cooling accessibility to explore environmental justice in heat-related health risks in Shanghai, China. *Landscape and Urban Planning*, 226, 104490. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104490>
- Zhou, X., Carmeliet, J., Sulzer, M. & Derome, D. (2020). Energy-Efficient Mitigation Measures for Improving Indoor Thermal Comfort during Heat Waves. *Applied Energy* 278:115620. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115620>
- Zhu W. & Yuan C. (2023). Urban heat health risk assessment in Singapore to support resilient urban design. by integrating urban heat and the distribution of the elderly population. *Cities*, Volume 132, 2023, 104103, ISSN 0264-2751. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.104103>

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina -CONICET- y la Agencia Nacional de Promoción de Ciencia y Técnica -ANPCyT-.

Contribución de autorías

La Dra. Florencia Colli, participó de la redacción del manuscrito original, la construcción teórico-metodológica, la recopilación y análisis de datos, el análisis espacial.

La Dra. Claudia Martínez colaboró en la revisión bibliográfica, la construcción del marco teórico, la propuesta metodológica y la redacción y revisión del manuscrito.

La Dra. Erica Correa, contribuyó con la conceptualización del trabajo, el enfoque metodológico general, el análisis de los datos y los resultados; la redacción y revisión del manuscrito y el financiamiento.

Todos los autores participaron en la elaboración de la discusión y conclusiones, revisaron y aprobaron la versión final del artículo.

Financiación

La presente investigación se ha desarrollado en el marco de los siguientes proyectos; -PIP 2021-2024-GI- POTENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN DE ESTRATEGIAS EFICIENTES DE ENFRIAMIENTO Y APROVECHAMIENTO DE LAS ENERGIAS RENOVABLES EN EL AREA METROPOLITANA DE MENDOZA. Generación de datos espaciales como herramienta para la planificación sustentable de áreas urbanas. -PICT-2020-SERIEA-I-A: POTENCIAL DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE URBANA COMO ESTRATEGIA DE REHABILITACIÓN ENERGÉTICA Y AMBIENTAL DE CIUDADES DE ZONAS ARIDAS. El caso del Área Metropolitana de Mendoza.

Conflicto de intereses

Las autoras de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.