FACENA
REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES Y AGRIMENSURA

Articulo original
Original article
36 (2) | Jul - Dic, 2026
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura (UNNE)
Open Access: https://revistas.unne.edu.ar/index.php/fce
E-mail: revistafacena@exa.unne.edu.ar

Isla de calor urbana. Uso de la geomática como herramienta para la identificación de áreas críticas

Urban Heat Island: Identification of critical areas using Geomatics

Colli, María Florencia * [1], Martinez, Cladia F. [1 2] & Correa, Erica N. [1 2]

1. Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE). Centro Científico Tecnológico (CCT-CONICET). Mendoza, Argentina.
2. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina

* Autor de correspodencia: mfcolli@mendoza-conicet.gob.ar

Recibido/Received: 06 de octubre, 2025 | Aceptado/Acepted: 28 de enero, 2026 | Publicado/Published: 19 de noviembre, 2026

Como citar este artículo: Colli, M. F., Martinez, C. F. & Correa, E. N. (2026). IIsla de calor urbana. Uso de la geomática como herramienta para la identificación de áreas críticas. *Revista FACENA* 36(2), 05-30. Doi: https://doi.org/10.30972/fac.3628786

RESUMEN: Generalmente en las ciudades no existe o hay una red muy reducida de estaciones meteorológicas. La baja cobertura espacial y la poca disponibilidad de mediciones históricas ponen en valor la utilidad de las técnicas de teledetección y geoprocesamiento como herramientas para orientar a la sociedad y los gobiernos en el conocimiento y la gestión de los riesgos asociados a los problemas socioambientales. En este marco, la presente investigación busca identificar si existen relaciones causales entre distintas características de la ciudad: la cobertura evaluada mediante índices espectrales, la morfología expresada a través de la definición de las Zonas Climáticas Locales, y la temperatura mínima del aire intraurbana, registrada en el canal vial. Los resultados obtenidos muestran que los índices espectrales seleccionados para caracterizar las zonas- NDVI, LWCI; NDBI y MSI- pueden explicar la ocurrencia de las temperaturas mínimas por encima del 93% y que la carga factorial de cada uno de los índices en la composición del primer factor explicativo es alta y semejante. Es decir que una adecuada combinación de éstos podría funcionar como un buen indicador del desarrollo de la isla de calor de las distintas zonas de la ciudad. Finalmente, la metodología propuesta representa una oportunidad de contar con información de calidad y con buen nivel de accesibilidad.

Palabras claves: ACP; Análisis geoespacial; Índices espectrales; Isla de calor urbana.

ABSTRACT: *In most cities, meteorological stations are either absent or only sparsely distributed. The limited spatial coverage and the scarce availability of historical measurements highlight the value of remote sensing and geoprocessing techniques as tools to support society and governments in understanding and managing risks associated with socio-environmental problems. Within this framework, the present study seeks to determine whether causal relationships exist between various spectral indices that describe the city's land-cover, morphology, and land-use characteristics, and intra-urban minimum air temperature measured along the road network. The results show that the selected spectral indices used to characterize urban zones—NDVI, LWCI, NDBI, and MSI—can explain the occurrence of minimum temperatures by more than 93%, and that the factor loadings of each index in the composition of the first explanatory factor are high and comparable. This indicates that an appropriate combination of these indices could serve as a*

CC BY NC

FACENA
REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES Y AGRIMENSURA

Articulo original
Original article
36 (2) | Jul - Dic, 2026
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura (UNNE)
Open Access: https://revistas.unne.edu.ar/index.php/fce
E-mail: revistafacena@exa.unne.edu.ar

reliable indicator of urban heat-island development across different areas of the city. Finally, the proposed methodology represents an opportunity to generate high-quality information with good accessibility.

.***Keywords:*** *PCA; Geospatial analysis; Spectral indices; Urban heat island.*

CC BY NC

INTRODUCCIÓN

Los efectos del calor extremo suelen ser más intensos en las áreas urbanas, donde se desarrolla el fenómeno conocido como Isla de Calor Urbano (ICU). Este proceso climático se caracteriza por un aumento significativo de las temperaturas en las ciudades respecto de sus entornos rurales y periurbanos, con repercusiones ambientales, sociales y en la salud de la población (Oke 1987, Grimmond, 2007, Li et al., 2025). En el área de estudio –Área Metropolitana de Mendoza (AMM)- como en numerosas ciudades –Bobrowska-Korzeniowska et al., 2024; la intensidad de la ICU se evalúa principalmente mediante la diferencia en las temperaturas mínimas entre áreas urbanas y rurales. Este indicador se considera más consistente que las temperaturas diurnas, ya que el fenómeno de ICU se manifiesta con mayor claridad durante la noche (Correa et al., 2006; Ahmadi Orkomi et al.,). Ello se debe a que los materiales urbanos retienen y liberan lentamente el calor acumulado durante el día, mientras que las superficies rurales experimentan un enfriamiento más rápido. En consecuencia, la temperatura mínima nocturna se ha consolidado como la métrica de referencia en la investigación sobre climatología urbana (Oke, 1987; Grimmond, 2007; Stewart & Oke, 2012).

En el AMM esta problemática fue analizada por Correa (2006), quien comparó las temperaturas urbanas con las periurbanas y rurales durante los años 2004 y 2005. El estudio identificó diferencias térmicas que alcanzan máximos de 10 °C y valores promedio de 6 °C a lo largo de todas las estaciones del año. Estas variaciones generan un incremento aproximado del 20 % en las necesidades de enfriamiento del área metropolitana (considerando una base de 24 °C), además de deteriorar las condiciones de confort térmico en los espacios abiertos de la ciudad. En las ciudades, el cambio en los elementos del clima tiene grandes repercusiones ecológicas ya que afecta de manera inmediata a los habitantes exponiendo a la población a estrés térmico, calidad del aire comprometida y aumento del consumo de energía, entre otros, demandando de forma urgente la redefinición de la planificación urbana. (He et al. 2021). En la actualidad, muchos de los desafíos que impone la urbanización a distintos aspectos relacionados con la sustentabilidad se están abordando con avances en la climatología urbana, donde

se han utilizado modelos numéricos y físicos en combinación con parámetros del dosel urbano (UCP) para estudiar la interacción entre la estructura de la ciudad y el clima local (Chinget al., 2018; Hammerberg et al., 2018).

Los datos existentes de uso y cobertura del suelo suelen ser indispensables para lograr la adecuada parametrización del dosel urbano (UCP). El esquema Zonas Climáticas Locales -Local Climate Zones- (LCZ), como modelo de parametrización, ha ganado notoriedad en la última década en investigaciones sobre la temperatura del aire y su relación con los usos de suelo, la formación de islas de calor y los balances de energía a escala urbana (Demuzere et al., 2019; Lau et al., 2019). En Mendoza, Colli et al. (2020) parametrizaron el dosel urbano del Área Metropolitana de Mendoza, mediante la clasificación de las LCZ.

Por otra parte, generalmente en las ciudades no existe o hay una red muy reducida de estaciones meteorológicas. La baja cobertura espacial de los equipos, la falta de articulación entre ellos, los errores en las mediciones históricas debido a métodos de instalación inadecuados y la poca disponibilidad de profesionales especializados ponen en valor la utilidad de las técnicas de teledetección y geoprocesamiento como herramientas para asistir la toma de decisiones, de utilidad para orientar a la sociedad y los gobiernos en el conocimiento y la gestión de los riesgos asociados a los problemas socioambientales (Agopyan et al., 2011). Sumado, la correlación establecida entre la temperatura de la superficie terrestre y la temperatura del aire ayuda a comprender los procesos relacionados con el clima de cada localidad y su urbanización (Salata et al, 2016; Zhan, et al., 2025). Sin embargo, en Mendoza, a pesar de la mayor disponibilidad y acceso a la información de los satélites Landsat y Sentinel, sus horarios de pasada corresponden aproximadamente a la 10.30 AM. De acuerdo a los estudios de Correa et al (2006) y Sosa et al (2015), el horario de máxima magnitud del fenómeno de Isla de Calor Urbana se registra entre las 6 AM y las 8AM en el AMM. En el horario de pasada de los satélites la información que puede extraerse del análisis del comportamiento de la LST (Land Surface Temperature) por sus siglas en inglés, brinda una información insuficiente para caracterizar el desarrollo de la isla de calor en la ciudad. En este marco,

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

la identificación de técnicas adecuadas para analizar y sistematizar la información provista por sensores remotos y el análisis espacial de los datos, pueden contribuir no sólo al monitoreo del clima en áreas sin estaciones terrestres (Martins et al., 2019) sino también a la visualización de tendencias en la distribución espacial de variables climatológicas. Esto implica que mediante el tratamiento de la información será posible simular diversos procesos y predecir sus efectos en el tiempo (Christofoletti, 2000).

La hipótesis de esta investigación plantea que existe una relación causal entre la distribución de las temperaturas de la ciudad, el perfil del clima local y las características de su urbanización; analizar, representar y sistematizar mediante distintas herramientas metodológicas esta relación, posibilitará generar información estratégica para sostener y agilizar la gobernanza climática de la ciudad.

Por ello el objetivo de la presente investigación es identificar si existen relaciones causales entre distintos índices espectrales que describen las características de cobertura, estado de la vegetación urbana y la temperatura mínima del aire registrada a nivel intraurbano en canales viales representativos de las LCZ - identificadas en la ciudad.

METODOLOGÍA

El desarrollo de la investigación presenta la siguiente estructuración en etapas: 1- Zona geográfica del caso de estudio, 2- Descripción de las zonas climáticas locales (LCZs). 3- Monitoreo microclimático; 4- Obtención de índices espectrales 5- Análisis de componentes principales a fin de identificar en qué medida, la temperatura mínima del aire en las distintas zonas climáticas identificadas puede ser explicada por los índices espectrales analizados.

Zona de estudio

El espacio geográfico de estudio es el Área Metropolitana de Mendoza (32°52’37.08”S;68°50’28.03”O; Fig. 1-A y 1-B), localizada en el Oasis Norte de la Provincia homónima (790msnm) 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 e importantes amplitudes térmicas diarias y estacionales. La cantidad e intensidad de radiación solar es elevada en verano (1022.0 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: 11 km/h con dirección 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, las características de 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, 2006).

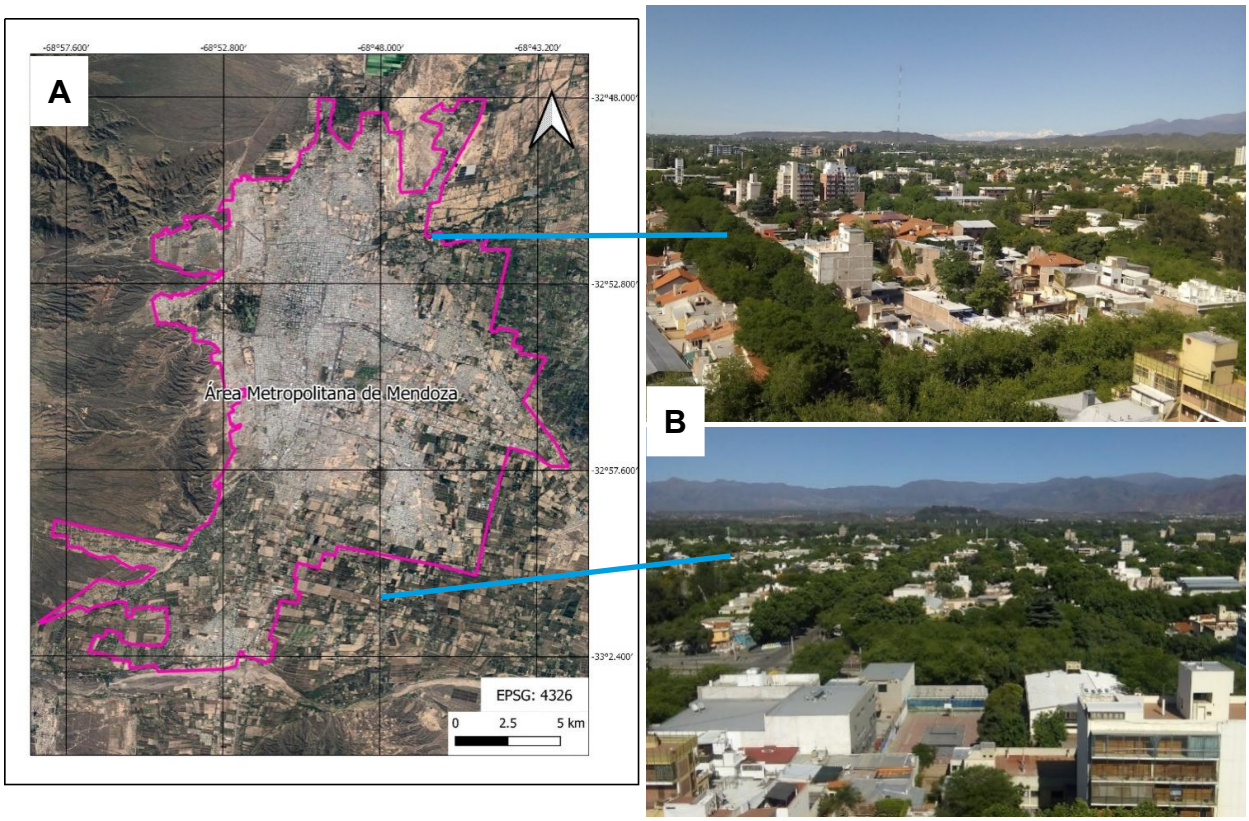


Fig. 1. A- Zona de estudio. 1.B Fotografías de la Ciudad de Mendoza. Fuente:1.A Elaboración propia.1.B. Fotografías del archivo personal de las autoras

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

Zonas Climáticas Locales

Se identificaron a partir de la aplicación del método WUDAPT (Colli et al., 2020) a través de una Clasificación Supervisada con el Plugin de Clasificación Semiautomática (SCP) de Qgis. Para ello, se seleccionaron muestras representativas de cada clase definida, en este caso, las LCZ desarrolladas por Stewart y Oke (2012). Como resultado en el ámbito del AMM, se obtuvo la Zonificación Climática Local (Figura 2). Si se analizan los resultados en términos de "tipología construida" se observa que la zona con mayor representación es la LCZ-6 que corresponde a la tipología "Abierto de baja altura". Esta tipología representa el 30,14% del AMM; seguida por LCZ-8, tipología que corresponde a "Grandes construcciones bajas" con un 24,85% de representatividad. En tercer lugar, está la tipología LCZ-3 "Compacto de baja altura" (23,43%) y le siguen las tipologías LCZ-9 "Construcciones dispersas" (16,27%), LCZ-2 "Compacto de media altura" (5,01%) y LCZ-5 "Abierto de mediana altura" (0.28%). Al oeste de la ciudad se observa un importante sector con las clases A "Bosque arbolado denso" y B "Árboles dispersos". La distribución porcentual de la zonificación generada es coherente con las características del desarrollo urbano de la ciudad, donde los patrones de ocupación están caracterizados por la baja densidad edilicia con distintos grados de compacidad.

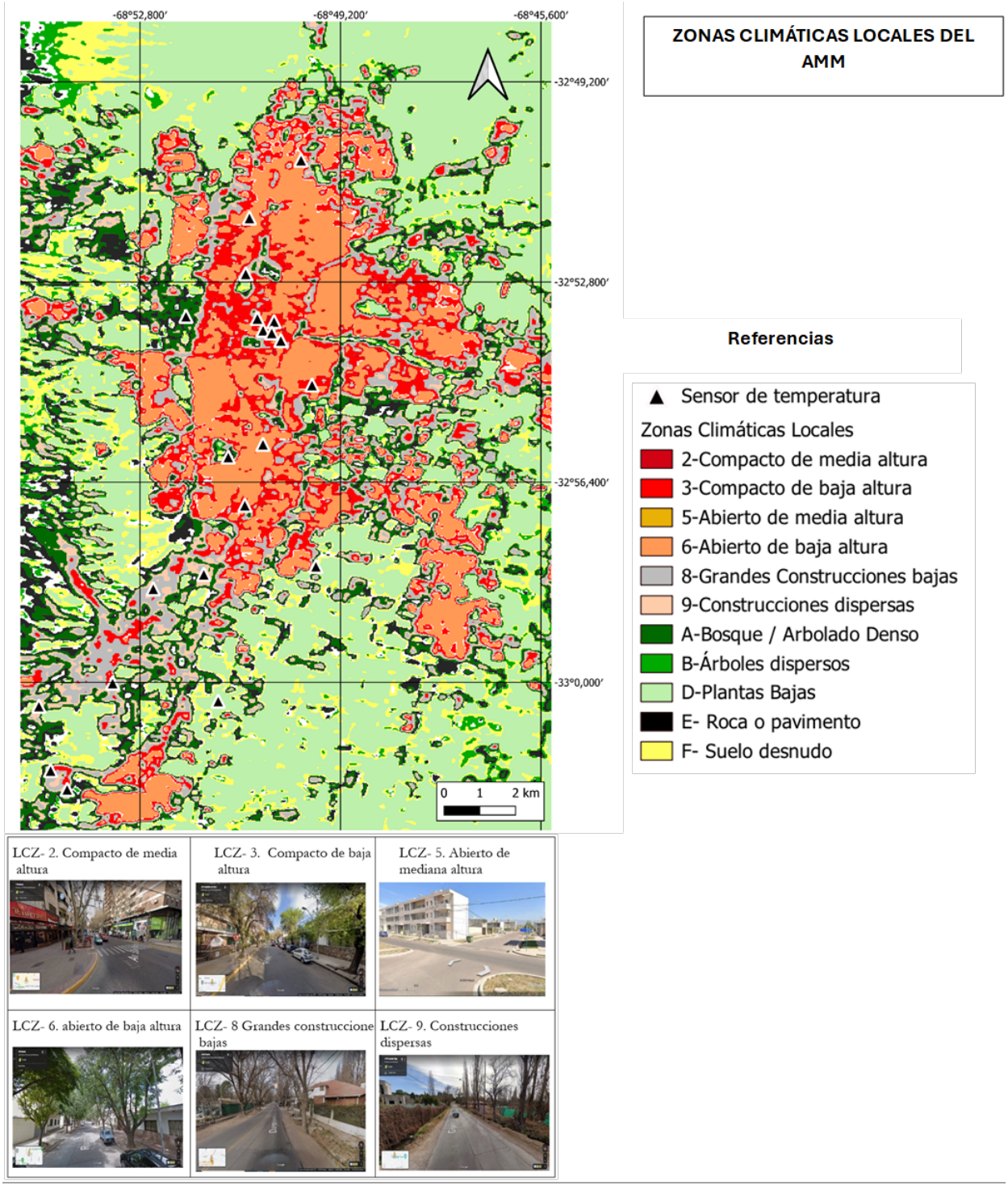


Fig. 2. Zonas Climáticas Locales del AMM- localización de sensores de temperatura. Fuente: Elaboración propia.

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

Monitoreo microclimático

Entre el 15 de febrero y 14 de marzo de 2021, se desarrolló la campaña de monitoreo microclimático en el AMM. Se utilizaron 23 sensores 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 se han colocado a una altura de 2,5 m de altura 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).

Selección de zonas representativas para el análisis

Para estudiar la relación entre el desempeño térmico de cada LCZ edificada y el comportamiento de los índices espectrales analizados, en cada Zona Climática se realizó la instalación de sensores fijos de temperatura y humedad. El área de alcance de cada sensor, que delimita la zona dónde los índices espectrales serán determinados, se estableció de acuerdo con el criterio de la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (WMO, 2014). De su aplicación a cada una de las zonas monitoreadas, resulta que para las zonas 2 y 3, el alcance es de 133 m de radio y para el resto de las zonas identificadas es de 218,75 m de radio (Figura 3).

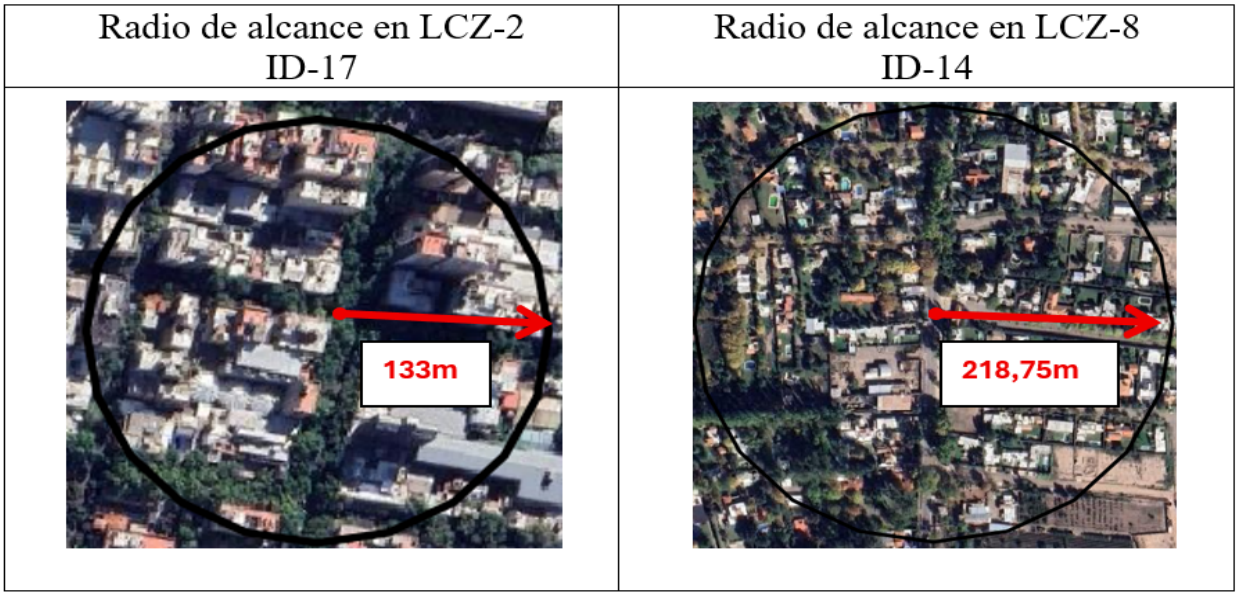


Fig. 3. Zona representativa de análisis según radio de alcance de sensor. Fuente: Elaboración propia.

Obtención de índices espectrales representativos de cada zona

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. En este caso para analizar el AMM desde diferentes dimensiones se han elegido distintos índices espectrales. Para estudiar la vegetación se seleccionaron: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada -Normalized Difference Vegetation Index-(NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo -Soil Adjusted Vegetation Index-(SAVI), Índice de Humedad en las Hojas- Leaf Water Content Index - (LWCI), e Índice de Estrés Hídrico- Moisture Stress Index -(MSI). Para la dimensión Suelo Construido, se seleccionó el Índice Normalizado de Suelos Construidos - Normalized Difference Built-up Index - (NDBI) (Tabla 1).

En el proceso de geomática se utilizaron imágenes satelitales multiespectrales Sentinel-2A. Se analizaron y procesaron mediante el programa QGIS, imágenes correspondientes al día 24 de febrero de 2021 para el cálculo de NDVI, SAVI, LWCI y MSI. Este día fue seleccionado por encontrarse dentro del período correspondiente a la campaña de medición en campo. Además, la ausencia de nubosidad en la imagen garantiza condiciones óptimas para el análisis, permitiendo un tratamiento adecuado de los datos satelitales y evitando interferencias atmosféricas que podrían afectar el valor de los índices espectrales calculados.. 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 zona que se encuentra debajo de la misma. Los ráster originales fueron calibrados y los valores digitales fueron transformados a reflectancia superficial que es la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA). Las imágenes fueron adquiridas de la página web del Servicio Geológico de EE. UU. Los productos que se utilizaron fueron:

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

. Sentinel-2A _PRODUCT_ID: L1C_T19HED_A029651_20210224T143334

. Sentinel-2A _PRODUCT_ID: L1C_T19HED_A022530_20210629T143800

Tabla 1. Fórmulas de cálculo y descripción de los índices empleados. Fuente: Elaboración propia

Fórmula (Sentinel-2)	Descripción de índice espectral	Referencia
NDVI: B8-B4 / B8+B4	Determina cantidad y calidad de vegetación. Sus valores van de -1 a 1 correspondiendo valores cercanos a -1 vegetación seca o enferma y, cercanos a 1, vegetación sana.	Rouse *et al.*, 1974
SAVI: (B8-B4) / (B8+B8+L) *(1+L)	Permite minimizar la influencia del brillo del suelo de los índices espectrales de vegetación en zonas áridas. Sus valores van de 0 a 1. Valores bajos indican menor vegetación.	Heute, 1988
NDBI: (B11-B8) / (B11+B8)	Permite mapear y estimar superficies urbanas edificadas o en construcción, respecto a áreas con vegetación o sin ella. Sus valores van de -1 y 1. Valores negativos representan áreas con vegetación; valores intermedios, áreas desnudas, cultivos en crecimiento o áreas en construcción, y valores positivos indican suelo edificado.	Zha *et al.*, 2003
LWCI: -log {1-(B8-B11)} / -log {1-(B8FT-B11FT)}	Se basa en la interrelación de las reflectividades de la energía en el infrarrojo cercano y de onda corta, para hojas con máxima turgencia. Los valores bajos o negativos indican estrés hídrico y altos, buen estado hídrico.	Hunt *et al.*, 1987
MSI: B11/B8	Combina las reflectancias del IR cercano e IR medio. A medida que la vegetación se seca, el MSI aumenta. Conforme una hoja se seca, aumenta su reflectancia en el espectro. El secado produce aumentos en la zona del rojo y en el IR medio. Los valores altos indican mayor estrés.	Rock, 1986

Procesamiento estadístico. Análisis de componentes principales

Se realizó un análisis estadístico descriptivo que incluyó la obtención de valores máximos, mínimos, medios y desviaciones estándar de los índices calculados para cada zona. Asimismo, se consideró la temperatura mínima registrada por los sensores fijos el 26 de febrero de 2021, seleccionado como un día representativo del verano en

Mendoza. La elección de esta fecha se fundamentó en el análisis del comportamiento de las curvas de temperatura del aire durante el periodo de medición. El día elegido presenta condiciones de estabilidad atmosférica, con elevados niveles de radiación solar, baja nubosidad, reducida velocidad del viento y baja humedad relativa, características que lo definen como un día típico de verano en Mendoza. Desde el punto de vista estadístico, estas condiciones meteorológicas se replican en aproximadamente el 80% de los días monitoreados, lo que asegura su representatividad dentro del periodo de estudio (Sosa et al., 2017, Colli et al.,2025). Estadísticamente, las condiciones meteorológicas del día seleccionado son coincidente con las temperaturas máximas (máxima, mínima y promedio) representativas del período, según los datos registrados en la estación Meteorológica del Aeropuerto Internacional Gobernador Francisco Gabrielli.

Se confecciona tabla con la estadística de los días más calurosos de todos los meses de febrero de 2001 a 2024, se realiza una 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 (Figura 4).

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				

Fig. 4. ANOVA día de análisis versus la serie 2001-2024. Fuente: Elaboración propia

Se efectuó un Análisis de Componentes Principales (ACP) para establecer si los índices espectrales analizados eran explicativos de la temperatura mínima detectada en las zonas analizadas. El ACP es una técnica multivariante de interdependencia que explica la mayor parte de la variabilidad total de un conjunto de variables observables, con menos componentes o factores comunes no observables. El ACP es una técnica descriptiva, pero también puede usarse con fines de inferencia. Para calcular combinaciones lineales de las variables que maximicen la varianza de las componentes, limitando que distintas combinaciones lineales sean ortogonales.

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

Los primeros componentes principales bastan para describir, en alto porcentaje, la variabilidad total de las variables originales.

RESULTADOS

Dada la importancia de la vegetación como reguladora del microclima de la ciudad, para el análisis de distintos aspectos de la condición ambiental y edilicia de las zonas climáticas identificadas, se seleccionó un conjunto de índices espectrales. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), Índice de Humedad en las Hojas (LWCI) e Índice de Estrés Hídrico (MSI), para describir la condición y el estado de la vegetación; y el Índice Normalizado de Suelos Construidos (NDBI) para caracterizar la dimensión del ambiente edificado. La Tabla 2 presenta los rangos de categorización de cada índice que serán utilizados en la cartografía de los mismos.

Tabla 2. Rango y categorización de cada índice espectral. Fuente: Elaboración propia

Rango					Categorización
NDVI	**SAVI**	**LWCI**	**MSI**	**NDBI**	
<=0	<=0,12	<=-0,42	>1,53	>0,37	muy deficiente
>0 -0,2	>0,12-0,25	>-0,42-0,05	1,26-1,53	0,20-0,37	deficiente
0,2-0,4	0,25-0,38	0,05-0,54	0,98-1,26	0,02-0,20	regular
0,4-0,6	0,38-0,51	0,54-1,02	0,70-0,98	0,14-0,02	bueno
0,6-1	>0,51	>1,02	<=0,70	<=-0,14	muy bueno

En la Figura 5 se muestra la respuesta de los Índices espectrales obtenida en cada uno de los sectores monitoreados, que fueron seleccionados como representativos de cada zona climática identificada. Del análisis particular de la respuesta de los índices evaluados en las zonas climáticas, se observa que, respecto del NDVI y el SAVI, en coincidencia con el objetivo común de ambos -orientado a reflejar la calidad y cantidad de la vegetación-, los mapas de distribución en cada zona proyectan patrones semejantes, es decir, muestran comportamientos coincidentes. En relación con el comportamiento

del NDVI, el análisis en la zona climática clasificada como LCZ 2 (compacto de media altura) y LCZ 3 (compacto de baja altura) muestra que el patrón de distribución permite identificar la trama vial, debido a que en la misma se localizan los píxeles con valores más altos (NDVI 0,4 a 1). Hacia el interior de la manzana los valores disminuyen drásticamente, presentando focos críticos de valores negativos, es decir inferiores a 0. En la LCZ 6 (abierto de baja altura) se verifica que el patrón de distribución de los valores de los índices ya no se encuentra definido de modo preponderante por la localización del arbolado en alineación. Si bien, se pueden diferenciar los ejes de calle a partir de la localización de píxeles con valores altos o “muy buenos” del índice -de 0,4 a 0,6- los mismos son escasos y no presentan continuidad, sino que se encuentran intercalados con valores de clasificación del índice “regular” que va de 0,2 a 0,4. En esta zona, hacia el interior de la manzana predominan valores “deficientes” entre 0 y 0,2, y sectores críticos, es decir “muy deficientes” distribuidos en toda la superficie. El índice SAVI muestra la misma tendencia que el NDVI, lo que refuerza la interpretación de que, en esta zona, el arbolado urbano presenta una menor densidad de cobertura vegetal y signos de deterioro en su estado fitosanitario.

En la LCZ 8 (grandes construcciones bajas) y LCZ 9 (construcciones dispersas) caracterizadas en el AMM por una alta densidad de vegetación, espacios abiertos, viviendas aisladas y terrenos extensos, la distribución del indicador no muestra una estricta diferenciación de la trama vial, ya que en toda la superficie analizada predominan píxeles cuya clasificación responde a la condición “muy buena” con valores mayores a 0,6. De modo particular, en el ID 1 (Figura 5) se observan sectores dónde la vegetación disminuye abruptamente, alcanzando valores entre 0 y 0,4, que son áreas que coinciden con la localización de galpones destinados a distintos usos (acopio de supermercado, terminal de ómnibus de corta distancia, etc.). Esto advierte, el daño sobre la condición ambiental de la zona que deriva de las acciones de cambio de uso de suelo.

Si se analiza comparativamente el LWCI y el MSI, se visualizan resultados esperables con valores antagónicos entre ellos. En las LCZ 2 (compacto de media altura) y LCZ 3 (compacto de baja altura) se observa que la cobertura del arbolado vial

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

posee valores “buenos” (0,54-1,02) que indican humedad retenida. Hacia el centro de la trama se localizan abundantes zonas con alto estrés hídrico, alcanzando el rango más alto con valores de MSI mayores a 1,54, es decir que se encuentran en situaciones “muy deficientes”. La LCZ 6 (abierto de baja altura) presenta abundante heterogeneidad con escasos sectores contiguos con valores de LWCI superiores a 0,059, considerada como situación “regular”. El estado deficiente de la vegetación en esta zona se condice con el comportamiento del MSI, que posee mayoritariamente valores considerados “regulares” y “deficientes”, lo cual sería indicativo de predominio de estrés hídrico. En las LCZ 8 (grandes construcciones bajas) y LCZ 9 (construcciones dispersas) predominan valores altos de LWCI (>1,02), indicando muy buen contenido de humedad en las zonas. El MSI presenta valores muy bajos (<=0,70) que corresponde a una valoración “muy buena”, lo cual es indicativo de condiciones de bajo estrés hídrico. Existen también, manchas dispersas de valores elevados correspondientes a los sectores con grandes construcciones, previamente descritos.

El análisis de estos índices refleja que las zonas que poseen mayor densidad de infraestructura gris son las que poseen valores de MSI altos, es decir que indican alto estrés hídrico, contrariamente a lo que sucede con las zonas con mayor masa vegetal, donde los valores de MSI bajan drásticamente y predominan valores altos de LWCI (Ver Fig. 5 LWCI vs. MSI en cada LCZ). El Índice Normalizado de Suelos Construidos -NDBI- es inversamente proporcional a los indicadores de vegetación y humedad. Tal como se espera en las LCZ 2 y 3 donde predomina el suelo impermeable se visualiza el rango de color de NDBI indicativo de los valores más altos (0,2 a 0,37 y superiores), es decir, que su condición es “deficiente y muy deficiente”. La LCZ 6 posee valores que indican una situación mayoritariamente “regular” a “deficitaria’’ (0,02-0,37). No se observa un patrón de distribución definido, ni sectores con valores bajos de dicho índice causados por la vegetación, lo que sería congruente con un estado fitosanitario deficiente de la masa vegetal situada en esta zona.

En las LCZ 8 y 9 el NDBI baja drásticamente, con una distribución de píxeles que poseen valores muy bajos, menores a -0,1 y 0,02. Los valores de dicho índice disminuyen

CC BY NC

desde el casco céntrico hacia la periferia, lo que refleja coherencia con la definición de LCZ desarrollada previamente. También se verifica que posee comportamiento similar con el MSI indicativo de estrés hídrico y contrapuestos con los índices NDVI, SAVI, y LWCI, indicativos de la presencia de masa vegetal y humedad (Ver Fig. 6– Valor medio de los índices espectrales).

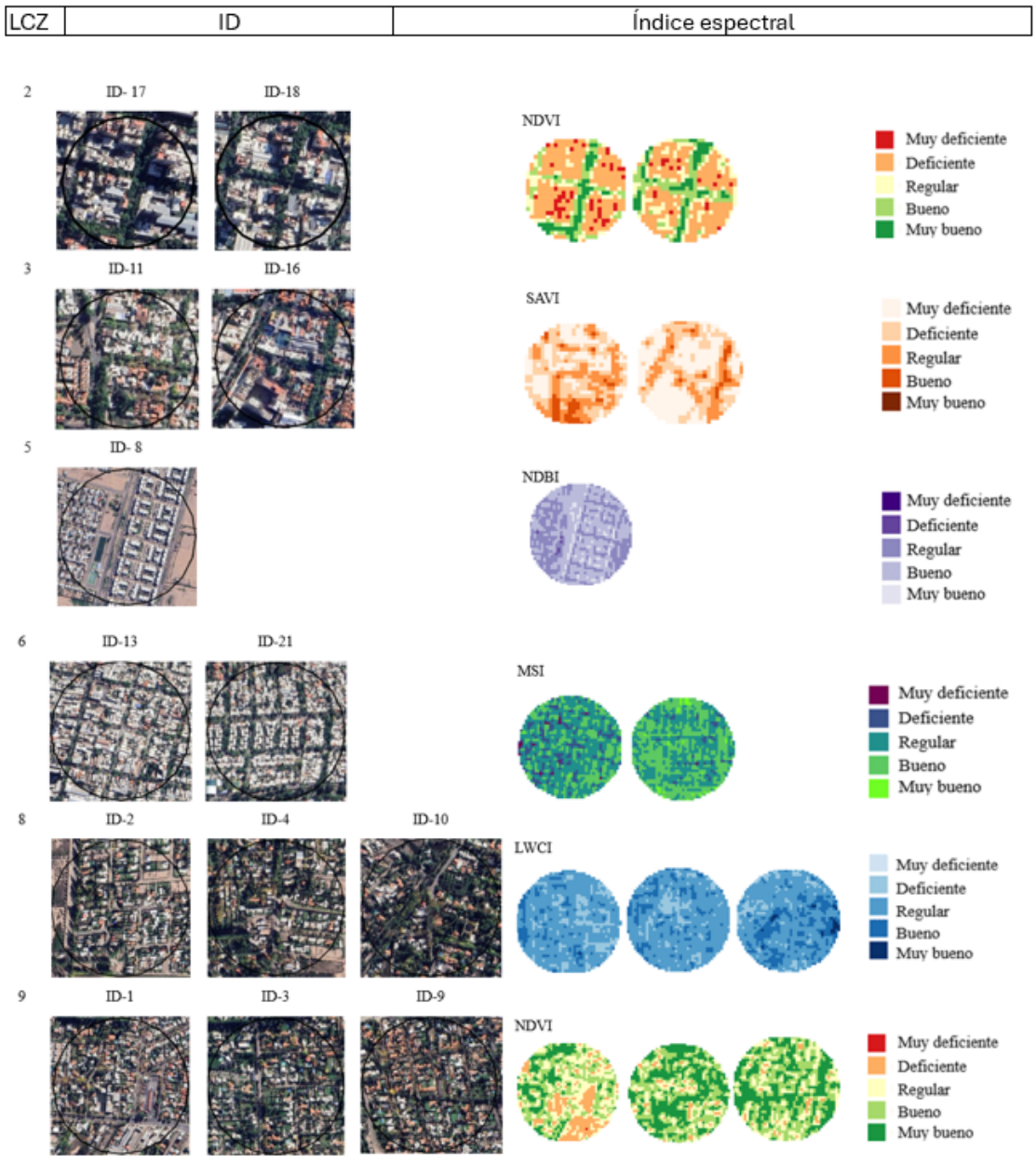


Fig. 5. Índices espectrales ejemplificadores en cada uno de los sectores monitoreados. Fuente: Elaboración propia

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

El comportamiento de la temperatura mínima media registrada por zona y los valores de los índices obtenidos a partir del tratamiento de las imágenes satelitales, se sintetizan en Figura 5. El comportamiento medio de los índices espectrales analizados para cada LCZ indica que, tanto MSI como LWCI, presentan poca variabilidad entre las LCZ 2, 3, 5 y 6 identificando condiciones de estrés hídrico y baja disponibilidad de agua en la vegetación de dichas áreas. Además, se detecta un salto cualitativo de los mismos indicadores para las LCZ 8 y 9. Respecto de NDVI y SAVI, que cuantifican la cantidad de vegetación de cada una de las zonas, se verifica un comportamiento semejante, con pequeñas diferenciaciones entre LCZ 2 y 5, versus las LCZ 3 y 6, y un crecimiento considerable respecto de las LCZ 8 y 9 que a priori se identifican con mejores condiciones tanto en relación con la cantidad de vegetación, como a la condición hídrica de la misma. En relación con el NDBI, que habla del grado de densificación edilicia de las áreas analizadas, el comportamiento es el esperado, sin evidenciarse fluctuaciones tan marcadas como en los otros índices analizados, disminuyendo su valor desde las LCZ 2, 3 y 6 hasta las LCZ 8 y 9.

Con respecto a las temperaturas mínimas, el menor valor dentro de esta categoría corresponde a LCZ 8 (18,7 °C) y el valor más alto de las mínimas, se registra en la LCZ 2 (24,5 °C). La distribución de las temperaturas mínimas se vincula con las características del territorio agrupadas en las distintas zonas. 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 LCZ 2, es la que presenta temperaturas mínimas más altas, y tiene un valor “muy deficiente” de NDBI, correspondiente al rango de mayores valores.

En la figura 6 se representa el comportamiento medio de los índices espectrales analizados para cada una de las zonas de referencia de las LCZ. Se observa que tanto MSI como LWCI, presentan poca variabilidad entre las LCZ 2, 3, 5 y 6 identificando condiciones de estrés hídrico y baja disponibilidad de agua en la vegetación de dichas áreas. Además, se detecta un salto cualitativo de los mismos indicadores para las LCZ 8 y 9.

Respecto de NDVI y SAVI, que cuantifican la cantidad de vegetación de cada una de las zonas, se verifica un comportamiento semejante, con pequeñas diferenciaciones entre LCZ 2 y 5, versus las LCZ 3 y 6, y un crecimiento considerable respecto de las LCZ

8 y 9 que a priori se identifican con mejores condiciones tanto en relación con la cantidad de vegetación, como a la condición hídrica de la misma.

En relación con el NDBI, que habla del grado de densificación edilicia de las áreas analizadas, el comportamiento es el esperado, sin evidenciarse fluctuaciones tan marcadas como en los otros índices analizados, disminuyendo su valor desde las LCZ 2, 3 y 6 hasta las LCZ 8 y 9.

Se realiza un análisis por componentes principales (Fig 7-C) con el objetivo de observar la relación entre el desempeño de la temperatura mínima de cada LCZ identificada en relación al comportamiento de los índices espectrales analizados.

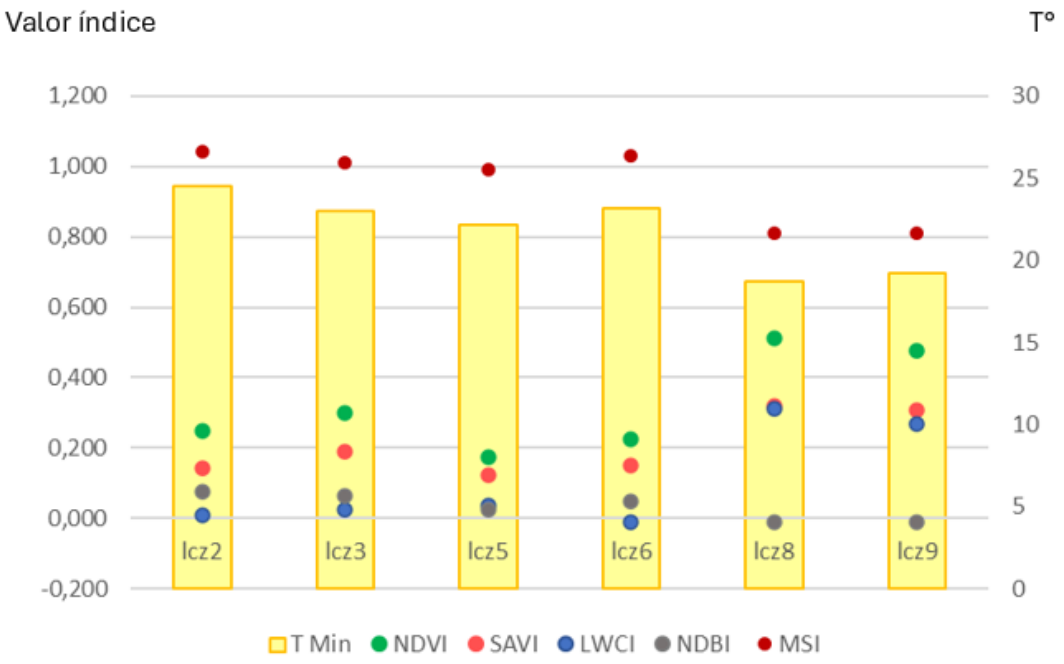


Fig. 6. Comportamiento medio de los índices espectrales analizados para cada una de las zonas y de la temperatura mínima media representativa. Fuente: Elaboración propia.

La figura 7-A muestra la matriz de correlaciones, donde se resalta en negrita las variables que tienen alta correlación con significancia estadística; es decir $p < 0,05$. Respecto a la temperatura mínima de los distintos sectores de la ciudad, que está íntimamente relacionada con el fenómeno de isla de calor en Mendoza, parecería estar comandada prioritariamente por la masa térmica (inercia) asociada a la densidad edilicia de los sectores definidos y analizados.

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

A- Matriz de correlaciones (Pearson (n)):

Variables	Tmin	NDVI	LWCI	NDBI	MSI
Tmin	**1**	**-0,866**	**-0,960**	**0,976**	**0,955**
NDVI	**-0,866**	**1**	**0,947**	-0,759	**-0,946**
LWCI	**-0,960**	**0,947**	**1**	**-0,916**	**-0,998**
NDBI	**0,976**	-0,759	**-0,916**	**1**	**0,915**
MSI	**0,955**	**-0,946**	**-0,998**	**0,915**	**1**

Los valores en negrita son diferentes de 0 con un nivel de significación alfa=0,05

B-Prueba de esf. de Bartlett

Chi-cuadrado (Valor observado)	45,672
Chi-cuadrado (Valor crítico)	18,307
GL	10
valor-p (bilateral)	<0,0001
alfa	0,050

Medida de adecuación de muestreo de Kaiser-Meyer-Olkin:

Tmin	0,547
NDVI	0,519
LWCI	0,900
NDBI	0,522
MSI	0,554
KMO	0,587

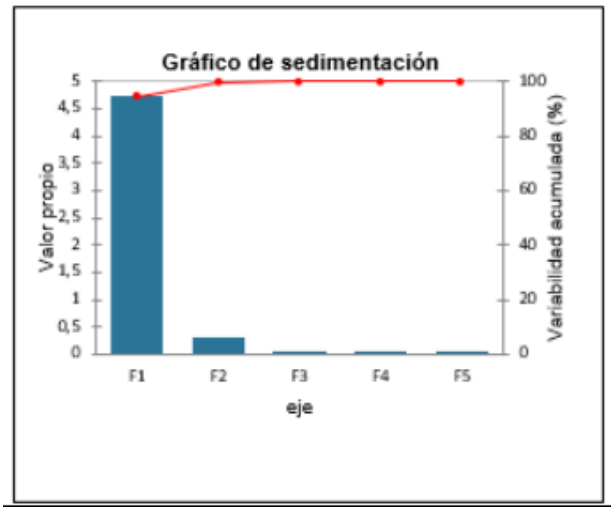
C-Análisis de Componentes Principales:

Valores propios:

	F1	F2	F3	F4	F5
Valor propio	4,698	0,272	0,027	0,003	0,000
Variabilidad (%)	93,958	5,443	0,544	0,052	0,003
% acumulado	93,958	99,401	99,946	99,997	100,000

Cargas factoriales:

	F1	F2	F3	F4	F5
Tmin	-0,982	0,156	0,108	-0,007	-0,006
NDVI	0,932	0,357	-0,061	-0,011	-0,005
LWCI	0,995	0,067	0,063	0,040	-0,001
NDBI	-0,942	0,334	-0,016	0,012	0,007
MSI	-0,993	-0,069	-0,087	0,026	-0,006



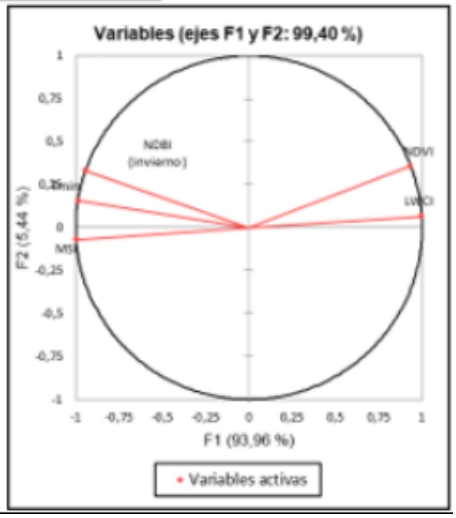


Fig. 7. Caso de la Temperatura mínima A-Matriz de correlaciones. B-Prueba de esfericidad de Bartlett. C-Análisis de componentes principales. Fuente: Colli et al., 2025.

Para evaluar si existe colinealidad entre las variables analizadas se utilizó la prueba de esfericidad de Bartlett (Figura 7-B), 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 KMO (Kaiser, Meyer y Olkin). 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, el valor de test KMO es 0,587, lo que indica que el modelo factorial es significativo, por lo que la relación entre las variables es alta.

En el ACP aplicado a la Tº Min (figura 7-C) el primer autovalor es mayor que uno y valores propios podrían explicar hasta el 93,958%. Tanto en la matriz de correlaciones como en la tabla que representa las cargas factoriales, puede verse que el primer factor que explica gran parte del fenómeno analizado a través de la variables dependientes seleccionadas (temperatura mínima se compone de cuatro de los índices espectrales analizados NDVI, LWCI, NDBI y MSI) y que la relación de temperaturas es inversa con los dos primeros. Es decir, las temperaturas de los sectores son menores cuando la cantidad de vegetación y el contenido hídrico de la misma, aumentan. Mientras que, con los dos índices restantes, la relación de las temperaturas es directa; es decir las temperaturas mínimas de los sectores aumentan cuando mayor es su densidad edilicia (mayor aporte antropogénico) y mayor es su estado de estrés hídrico.

Los resultados obtenidos del análisis estadístico (ACP) muestran que los índices espectrales seleccionados para caracterizar las zonas pueden explicar la ocurrencia de las temperaturas mínimas por encima del 93% y que la carga factorial de cada uno de los índices en la composición del primer factor explicativo es alta y semejante. Es decir que una adecuada combinación de éstos podría funcionar como un buen indicador del desarrollo de la isla de calor de las distintas zonas de la ciudad. En este sentido, la relación observada entre los índices espectrales y las mínimas nocturnas resulta consistente, ya que estos índices influyen directamente en los procesos de retención y liberación de calor, condicionando el enfriamiento diferencial urbano–rural. Por lo tanto, la

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

asociación identificada refleja cómo los patrones de cobertura, infraestructura verde, uso del suelo y rasgos morfológicos explican el fenómeno. Estos resultados coinciden con lo reportado por Núñez-Peiró et al. (2020) y Fenner et al. (2017), quienes demostraron que la clasificación LCZ describe adecuadamente el comportamiento térmico de las zonas en relación con el desarrollo de la isla de calor urbana.

Finalmente, se observa que, aunque fue calculado el SAVI (Índice espectral apropiado para caracterizar la vegetación de zonas áridas); el análisis estadístico que busca relacionar la respuesta térmica de la ciudad con el valor de distintos índices espectrales mostró que la correlación de este índice con la temperatura para el área de estudio no arroja un resultado robusto, por lo tanto, se retira del análisis.

CONCLUSIONES

Se evidencia que la combinación de los índices espectrales identificados como explicativos de la temperatura mínima emerge como una alternativa para el diagnóstico y análisis de la isla del calor del AMM y constituye una herramienta ágil para asistir la definición de políticas públicas, superadora del monitoreo mediante estaciones terrestres intraurbanas.

El análisis del comportamiento de los índices espectrales en cada zona ha permitido identificar en el AMM aquellas que necesitan intervención en torno a mejorar su desempeño térmico, como es el caso de la LCZ 6, que es la zona climática y morfológica de mayor extensión en el AMM, y es donde se identifican los peores indicadores en relación al vigor y estado fitosanitario de la vegetación.

Las relaciones que muestran el análisis por componentes principales explican el desempeño térmico de los distintos sectores de la ciudad durante el periodo de enfriamiento, periodo en donde tiene ocurrencia la mayor magnitud de la isla de calor. Los índices analizados explican en buena medida -superior al 93%- el comportamiento de las temperaturas mínimas. Además, es interesante observar que todos éstos índices se agrupan en un solo factor explicativo, lo cual podría evidenciar que el desarrollo de un indicador que representara una relación o síntesis de los valores de NDVI, LWCI, NDBI

y MSI para cada zona, sería de suma utilidad para calificar y categorizar el desempeño térmico-energético de los distintos sectores identificados en la ciudad.

Si se considera la potencia de la geomática combinada con el análisis geoestadístico, la metodología propuesta en este trabajo representa una oportunidad de contar con información de calidad, a diferentes escalas y con buen nivel de accesibilidad para el manejo y la gestión de las áreas urbanas en relación con los fenómenos de riesgo de isla de calor y la detección de zonas que presentan potencial para su rehabilitación energética y ambiental.

CONFLICTO DE INTERESES

Las autoras declaran no tener conflicto de intereses.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al apoyo financiero del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la Agencia Nacional de Promoción de la Ciencia y Tecnología (ANPCyT) por los fondos recibidos a través de los proyectos de investigación PICT-2020-02444 y PIP 2021-0900.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

María Florencia Colli: Realización de investigación y proceso de investigación. Ideas; formulación y metas generales de la investigación. Redacción – borrador original. Aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales para analizar y sintetizar datos de estudio. Generación de cartografía.

Claudia F. Martinez: Realización de investigación y proceso de investigación. Ideas; formulación y metas generales de la investigación. Aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales para analizar y sintetizar datos de estudio. Preparación del trabajo publicado, específicamente la visualización y presentación de datos.

CC BY NC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura
UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE

Erica N. Correa: Realización de investigación y proceso de investigación. Ideas; formulación y metas generales de la investigación. Aplicación de técnicas estadísticas, matemáticas, computacionales para analizar y sintetizar datos de estudio. Responsabilidad de supervisión y liderazgo en la planificación. Adquisición del apoyo financiero para el proyecto que conduce a esta publicación. Responsable de proyecto.

REFERENCIAS

Agopyan, V., & John, V. M. (2011). *O desafio da sustentabilidade na construção civil*. Blucher.

Ahmadi Orkomi, A., Ameri, M., & Ameri, M. (2024). Investigating the intensity of urban heat island and the impacts of local climate using verified WRF data: A case study of Rasht, Northern Iran. *Sustainable Cities and Society, 106*, 105405. https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105405

Bobrowska-Korzeniowska, M., Jerzyńska, J., Paciorek, M., & Stelmach, W. (2024). Analysis of the urban heat island in Łódź, Poland. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health, 37*(2). https://doi.org/10.13075/ijomeh.1896.02458

Ching, J., Mills, G., Bechtel, B., See, L., Feddema, J., Wang, X., … & Stewart, I. (2018). WUDAPT: An urban weather, climate, and environmental modeling infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society, 99*(9), 1907–1924. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1

Christofoletti, A. (2000). *Modelagem de sistemas ambientais*. Edgard Blücher.

Colli, M. F., Correa, É. N., & Martínez, C. F. (2020). Aplicación del método WUDAPT en la ciudad de Mendoza-Argentina para definir Zonas Climáticas Locales. *Urbano, 23*(42), 18–31. https://doi.org/10.22320/07183607.2020.23.42.02

Colli, M. F., Martínez, C., & Correa, É. N. (2025). Estado de las infraestructuras urbanas y respuesta térmica: Un punto de partida para el análisis del riesgo por calor: Caso Mendoza, Argentina. *Cuadernos Geográficos, 64*(1), 175–194. https://doi.org/10.30827/cuadgeo.v64i1.32130

Correa Cantaloube, E. N., De Rosa, C., & Lesino, G. (2006). Monitoreo de clima urbano: Análisis estadístico de los factores que determinan la isla de calor y su aporte al diseño de los espacios urbanos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 10*, 67–74.

Demuzere, M., Bechtel, B., & Mills, G. (2019). Global transferability of local climate zone models. *Urban Climate, 27*, 46–63. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.11.001

Fenner, D., Meier, F., Bechtel, B., Otto, M., & Scherer, D. (2017). Intra- and inter-'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift, 26*(5), 525–547. https://doi.org/10.1127/metz/2017/0861

Grimmond, C. S. B. (2007). Urbanization and global environmental change: Local effects of urban warming. *The Geographical Journal, 173*(1), 83–88. https://doi.org/10.1111/j.1475-4959.2007.232_3.x

Hammerberg, K., Brousse, O., Martilli, A., & Mahdavi, A. (2018). Implications of employing detailed urban canopy parameters for mesoscale climate modelling: A comparison between WUDAPT and GIS databases over Vienna, Austria. *International Journal of Climatology, 38*(Suppl. 1), e1241–e1257. https://doi.org/10.1002/joc.5438

He, B. J., 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

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment, 25*(3), 295–309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Hunt, E. R., Jr., Rock, B. N., & Nobel, P. S. (1987). Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment, 22*(3), 429–435. https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90095-2

Lau, K. K.-L., Chung, S. C., & Ren, C. (2019). Outdoor thermal comfort in different urban settings of sub-tropical high-density cities: An approach of adopting local climate zone (LCZ) classification. *Building and Environment, 154*, 227–238. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.03.018

CC BY NC

Li, Z., Zhou, D., Wu, S., & Wang, Y. (2025). Modelling urban heat island effects: A global analysis of 216 cities using machine learning techniques. *Discover Sustainability, 6*(1), 178. https://doi.org/10.1007/s43762-025-00178-w

Martins, A. P., Alves, W. S., & Damasceno, C. E. (2019). Avaliação de métodos de interpolação para espacialização de dados de temperatura do ar na bacia do Rio Paranaíba–Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia, 25*, 444–463. https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.63962

Núñez-Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., & Neila González, F. J. (2021). Hourly evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones: The case of Madrid. *Urban Climate, 39*, 100921. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100921

Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.

Oke, T. R. (2004). *Guía inicial para obtener observaciones meteorológicas representativas en sitios urbanos*. World Meteorological Organization.

Rock, B. N. (1986). Remote sensing of forest damage. *BioScience, 36*(7), 439–445. https://doi.org/10.2307/1310339

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *NASA Special Publication, 351*(1), 309–317.

Salata, F., Golasi, I., Vollaro, R. D. L., & Vollaro, A. D. L. (2016). Outdoor thermal comfort in the Mediterranean area: A transversal study in Rome, Italy. *Building and Environment, 96*, 46–61. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.11.033

Sosa Castro, M. B., & Correa Cantaloube, E. N. (2015). Impacto en el clima urbano del avance de la ciudad hacia la periferia: El caso del área metropolitana de Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 19*, 65–72.

Sosa, 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. *Hábitat Sustentable, 7*(1), 44–53. https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.01.04

World Meteorological Organization. (2014). *Guía de instrumentos y métodos de observación meteorológicos* (Vol. 81). Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.

World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT). (s.f.). Recuperado el 6 de junio de 2023, de http://www.wudapt.org/

Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing, 24*(3), 583–594. https://doi.org/10.1080/01431160304987

CC BY NC