

Un estudio sobre la isla de calor urbana en Córdoba capital, Argentina

A Study on the Variability of the Urban Heat Island in Córdoba, Argentina

 **María Lila Asar**

Universidad Nacional de Córdoba,
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Argentina
maria.lila.asar@unc.edu.ar

 **Elizabet Lilia Estallo**

Universidad Nacional de Córdoba;
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas (IIBYT),
Centro de Investigaciones Entomológicas de Córdoba,
Argentina
elizabet.estallo@mi.unc.edu.ar

 **Elisabet Benítez**

Universidad Nacional de Córdoba,
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas (IIBYT),
Centro de Investigaciones Entomológicas de Córdoba,
Argentina
benitez.elisabet@gmail.com

 **Héctor Miguel Di Bendetto**

Universidad Nacional de Córdoba,
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas (IIBYT),
Centro de Investigaciones Entomológicas de Córdoba,
Argentina
hectordibenedetto@unc.edu.ar

 **Francisco Felipe Ludueña-Almeida**

Universidad Nacional de Córdoba,
Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales,
Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas (IIBYT),
Centro de Investigaciones Entomológicas de Córdoba,
Argentina
francisco.ludueña.almeida@unc.edu.ar

Resumen

Dado el contexto del cambio climático, es imperativo realizar investigaciones sistemáticas sobre la relación entre la Isla de Calor Urbano (ICU) y los factores meteorológicos. En este estudio se analizaron los datos horarios de dos estaciones meteorológicas de la ciudad de Córdoba entre enero de 2018 y diciembre de 2022. Los resultados confirman la presencia de un efecto ICU nocturno, que ocurre pocas horas después del atardecer, con una intensidad de 3,5 a 4 °C en todas las estaciones, y que puede superar los 6 °C en la estación seca. También se detectó el efecto de Isla Fría Urbana diurna, con intensidades que oscilan entre -0,3 y -0,7 °C. La lluvia y el viento desempeñan un papel importante en la mitigación del efecto ICU en la ciudad. Los resultados de este estudio ayudarán a la ciudad de Córdoba a prepararse para el aumento de la demanda energética durante el verano, así como establecer refugios térmicos para períodos de olas de calor o de temperaturas extremas.

Palabras Clave: isla de calor urbana, clima, Cwa, Córdoba.

Abstract

Given the context of climate change, systematic research on the relationship between Urban Heat Island (UHI) and meteorological factors is imperative. This study analyzed hourly data from two meteorological stations in the city of Córdoba between January 2018 and December 2022. The results confirm the presence of a nighttime UHI effect, occurring a few hours after sunset, with an intensity of 3.5 to 4°C in all seasons and potentially exceeding 6°C in the dry season. A daytime Urban Cold Island effect was also detected, with intensities ranging from -0.3 to -0.7°C. Rain and wind play an important role in mitigating the UHI effect in the city. The results of this study will help the city of Córdoba prepare for increased energy demand during the summer and establish thermal shelters for periods of heat waves or extreme temperatures.

Keywords: urban heat island, climate, Cwa, Córdoba.

Introducción

El fenómeno de isla de calor urbana (ICU) refiere a la elevación de la temperatura del aire o de la superficie en áreas urbanas comparadas con las correspondientes a las zonas rurales circundantes. Este fenómeno ha ganado atención a nivel mundial debido a sus efectos adversos tanto sobre la salud humana como sobre el ambiente. Los estudios del efecto ICU se han incrementado en las recientes décadas debido a su impacto en las temperaturas de las ciudades y a su contribución al calentamiento global (EPA, 2016; Wu & Ren, 2019).

Se han establecido tres categorías principales del efecto ICU de acuerdo a la altura a la cual se mide: ICU de canopia, de capa límite y superficial (Deilami, Kamruzzaman & Liu, 2018). Para los estudios de ICU de canopia, se utilizan los datos medidos por estaciones meteorológicas, y ellos tienen en cuenta las condiciones atmosféricas en la microescala. El objetivo de este trabajo es estudiar la ICU de canopia, y nos referiremos a ella como ICU.

La ICU afecta los patrones de precipitación (Bornstein & Lin, 2000; Dixon & Mote, 2003; Liu & Niyogi, 2019; Steensen y col., 2022), incrementa la demanda energética de las ciudades (Santamouris y col., 2015; Santamouris & Vasilakopoulou, 2021), y contribuye al malestar térmico, además de una amplia gama de morbilidades e incluso ocasionar la muerte (Hondula & Barnett, 2014; Macintyre y col., 2021).

Los factores meteorológicos influyen significativamente en el desarrollo del efecto ICU (He, 2018; Abbassi y col., 2022; Chiu y col., 2022). La precipitación reduce las temperaturas urbanas, mitigando el efecto ICU (He, 2018; Chow & Roth, 2006; Arifwido & Tanaka, 2015; Yang y col., 2019). Por otro lado, las estaciones secas podrían intensificar este efecto (Zhao y col., 2014; Ünal y col., 2020; Chen y col., 2020). Existe evidencia de que la velocidad y la dirección del viento tienen un impacto significativo en la intensidad de la isla de calor (Kim & Baik, 2002; Tzavali y col., 2015; Al-Obaidi y col., 2021). En particular, la intensidad de ICU disminuye con el aumento de la velocidad del viento (He, 2018).

En Córdoba, Argentina, un análisis preliminar mediante transectos móviles detectó diferencias de hasta 4 °C entre el centro y sus alrededores (Maristany y col., 2008); otras evidencias obtenidas mediante estaciones meteorológicas mostraron una intensidad de ICU de 1 °C (de la Casa & Nasello, 2014). Sin embargo, se desconoce la estructura espacial y la variabilidad estacional del efecto ICU. Comprender estos patrones es fundamental para mitigar los efectos sobre la calidad del hábitat y la demanda energética.

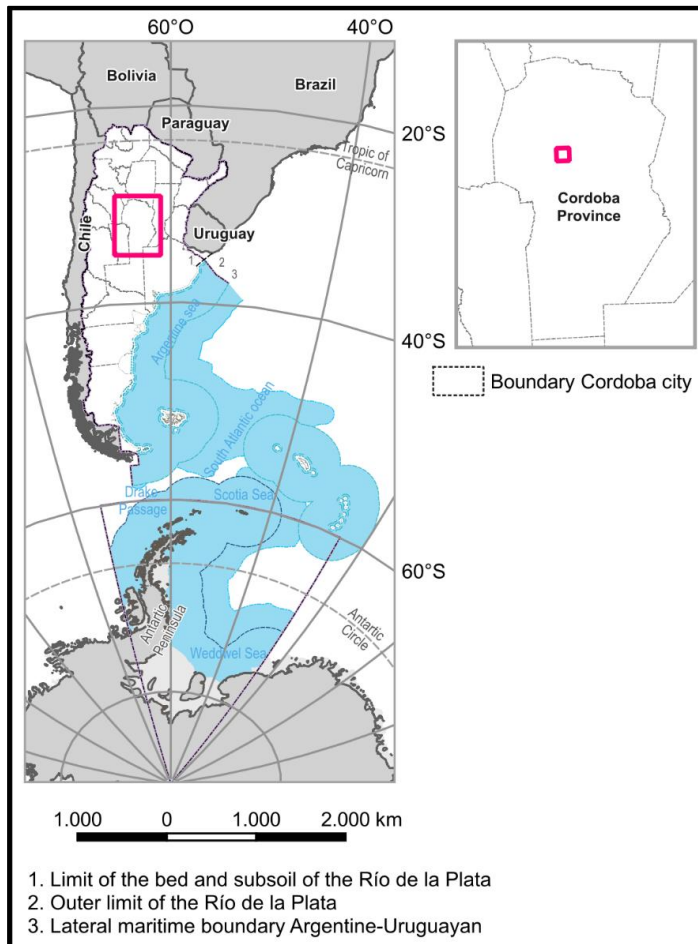
Este estudio analiza las características del ICU de Córdoba durante cinco años (2018-2022), centrándose en su relación con factores meteorológicos como la velocidad del viento y la precipitación. Dada la limitada investigación en la ciudad, estos hallazgos son esenciales para que los urbanistas, los responsables políticos y las partes interesadas desarrollen estrategias de mitigación eficaces.

Métodos

Área de estudio

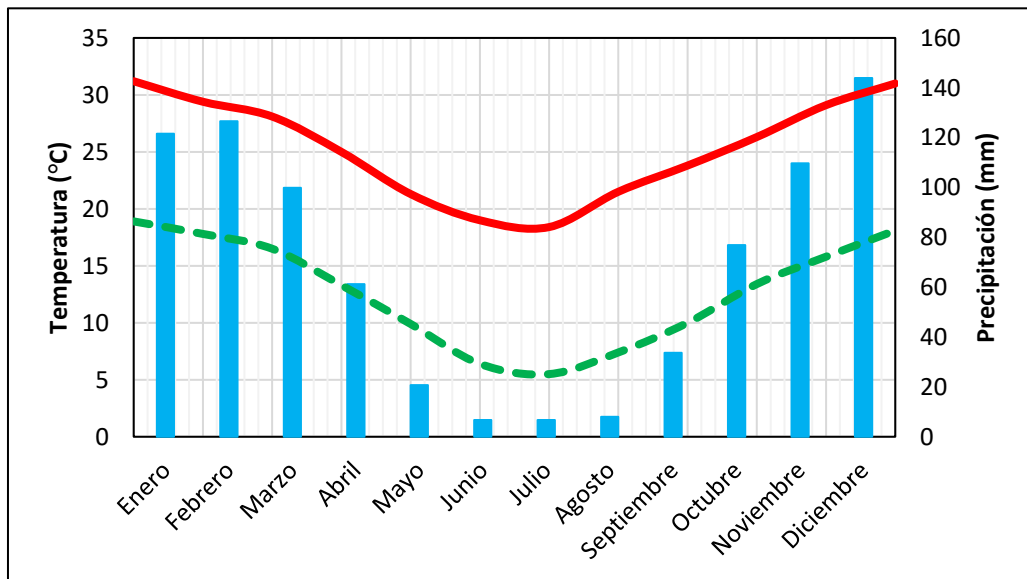
La ciudad de Córdoba, con una superficie de 576 km², es la segunda ciudad más poblada de Argentina, con 1.565.112 habitantes (INDEC, 2023). La ciudad se encuentra en la provincia de Córdoba (31°24' S, 64°11' O, Figura 1). El clima de Córdoba corresponde a la clasificación Cwa en el sistema Köppen-Geiger (Peel y col., 2007), que es un clima templado. La ciudad experimenta una estación seca de mayo a septiembre, con la mayor precipitación entre octubre y abril. Las temperaturas medias anuales oscilan entre 10,8 °C como mínima y 24,7 °C como máxima (Figura 2). La precipitación media anual es de 815 mm (todos los promedios corresponden al período 1991-2020) (SMN, 2023).

Figura 1. Mapa de Argentina y de la provincia de Córdoba.



Fuente: elaboración por el Dr. Insaurralde, usado con permiso.

Figura 2. Climograma de la ciudad de Córdoba. Temperatura máxima es la línea roja; T min es la línea verde punteada. Las barras azules corresponden a la precipitación mensual.



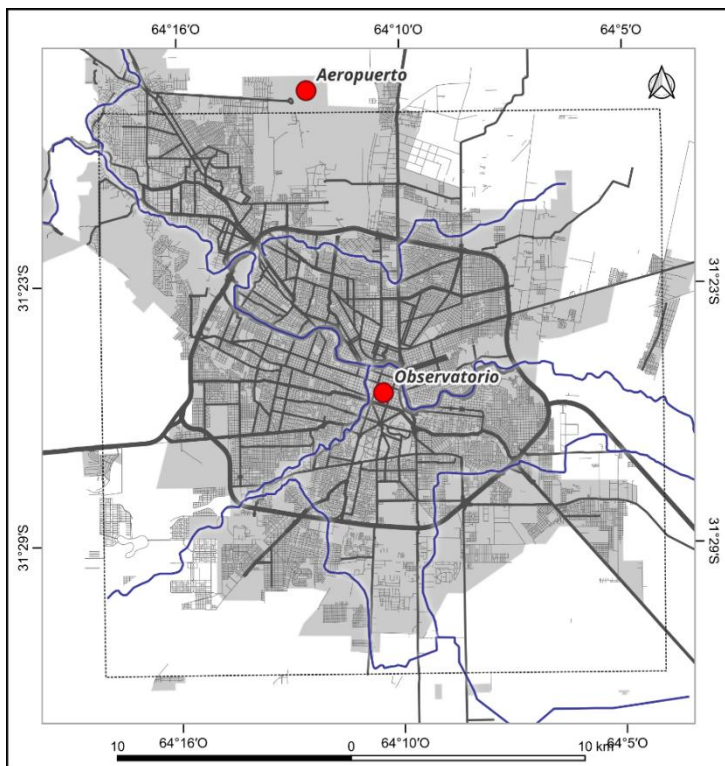
Fuente: elaboración propia, con datos del Servicio Meteorológico Nacional.

Datos meteorológicos

Se seleccionaron dos estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional para estudiar la estructura temporal del efecto ICU (véase la Figura 3). Se obtuvieron datos horarios de temperatura (T), velocidad del viento (W) y precipitación diaria para el período de 2018 a 2022. La estación del Observatorio, ubicada en el centro de la ciudad, se seleccionó como estación urbana (Urb). En contraste, la otra estación (Aeropuerto) se consideró rural (Rur).

Trabajamos con temperaturas registradas cada hora, calculando promedios mensuales para cada año (2018 a 2022). Córdoba se encuentra en el Tiempo Universal Coordinado +4 (UTC 4), pero oficialmente adopta UTC 3 como hora local (LT), que es la que se usará en el presente trabajo.

Figura 3. Mapa de la ciudad de Córdoba y sus alrededores. Se presentan las ubicaciones de las dos estaciones meteorológicas usadas en este estudio.



Fuente: elaboración por el Dr. Insaurrealde, usado con permiso.

Temperaturas promedio

Se calcularon promedios mensuales por hora durante el período de 5 años (2018-2022) para las dos estaciones meteorológicas (Urb y Rur). La diferencia entre las estaciones urbanas y rurales fue: $T_{Urb} - T_{Rur}$. Posteriormente, se calculó el promedio por estación para facilitar la interpretación temporal de los resultados. Las estaciones extraídas fueron: verano (diciembre-enero-febrero), otoño (marzo-abril-mayo), invierno (junio-julio-agosto) y primavera (septiembre-octubre-noviembre).

Tasa de cambio de la temperatura

La tasa de cambio de la temperatura (ROC, por sus siglas en inglés) fue calculada para cada hora. Esta tasa permite identificar los momentos de mayor cambio de temperatura durante la transición día-noche. La ROC se define para cada hora «h» según la ecuación 1 (Milelli y col., 2023):

$$ROC = (T_{h+1} - T_h) / \Delta t \quad (1)$$

donde T_h representa la temperatura en la hora h, T_{h+1} representa la temperatura en la hora siguiente y Δt representa el tiempo transcurrido entre las dos temperaturas.

Intensidad de la isla de calor urbana

La intensidad de isla de calor urbana (IICU) se estimó como la diferencia entre las temperaturas registradas en las estaciones meteorológicas urbana (T_{Urb}) y rural (T_{Rur}) (Chow & Roth, 2006; Yang y col., 2013), según la ecuación 2:

$$IICU = T_{Urb} - T_{Rur} \quad (2)$$

Este análisis se realizó con datos horarios, promediados mensualmente, durante los 5 años del estudio. Los valores de IICU se analizaron mensual y estacionalmente.

Cuando los valores de IICU son negativos, se presenta el fenómeno de Isla Fría Urbana (IFU) (Oke y col., 2017). La IICU se clasificó en cinco rangos según García y Álvarez (2008), como se puede observar en la Tabla 1. Para estimar la frecuencia de cada clase, se calculó la IICU por hora. Este análisis se realizó para todo el año y para cada estación, así como su frecuencia. Para obtener un valor mensual estimado de IICU, se calcularon los valores diarios, promediados por hora y por mes, durante el período de estudio.

Tabla 1. Clasificación del efecto ICU por su intensidad

NOMBRE	IICU (°C)
Isla Fría Urbana	< 0
ICU débil	0 – 2
ICU moderada	2,1 – 4
ICU fuerte	4,1 – 6
ICU muy fuerte	> 6

Fuente: García & Álvarez, 2008.

Efecto del viento

Las altas velocidades del viento contribuyen a la mezcla y homogeneización de las masas de aire urbanas y rurales, mientras que las bajas velocidades restringen estos procesos (He, 2018; Papanastasiou & Kittas, 2012). Por lo tanto, a medida que aumenta la velocidad del viento, se espera que las diferencias de temperatura entre las zonas urbanas y rurales disminuyan, reduciendo así la IICU. Además, se ha demostrado que existe un umbral de velocidad del viento por encima del cual se puede eliminar el fenómeno ICU en una ciudad específica (He, 2018; He y col., 2020).

Para analizar el efecto del viento en IICU, se calcularon los valores promedio horarios mensuales del viento, medidos en la estación Rural para el período de estudio de 5 años.

Efecto de la precipitación

La precipitación en la ciudad de Córdoba se concentra principalmente en los meses de verano (diciembre-enero-febrero), representando el 48% del total. Por otro lado, la precipitación invernal (junio-julio-agosto) representa el 3% del total (SMN, 2023).

Se crearon tablas dinámicas para comparar la IICU y sus valores medios con los datos de precipitación diaria (Amorim, 2020). Estas tablas contienen la IICU obtenida para horas seleccionadas (00:00, 03:00, 06:00, 09:00, 12:00, 15:00, 18:00 y 21:00). Además, se presentan la IICU media horaria y diaria, la precipitación total de cada día y la precipitación total acumulada de cada mes.

Los años 2019 y 2022 presentaron mayor precipitación y aridez que otros, respectivamente, lo que los convierte en buenos casos de estudio para evaluar el efecto de la lluvia en la IICU. Los meses seleccionados fueron enero (verano), abril (otoño) y octubre (primavera). Dado que los meses de invierno fueron extremadamente secos, no se pudo realizar un análisis similar para esa temporada.

Finalmente, se graficaron los valores promedio de la IICU anual y la precipitación total acumulada de cada año para visualizar la relación entre ambas variables.

Resultados

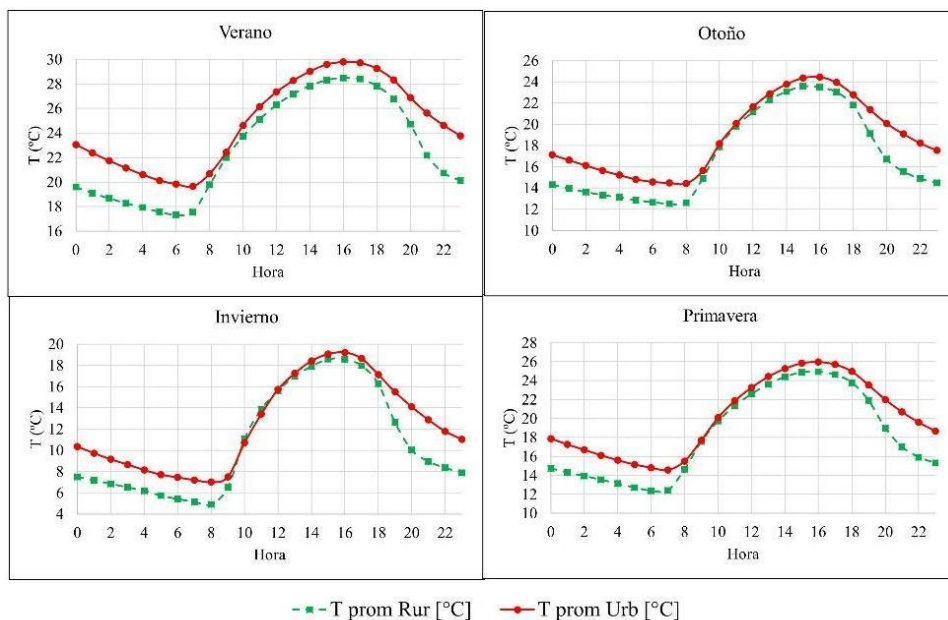
Temperaturas promedio

Observamos temperaturas medias más altas en la estación urbana que en la rural (Fig. 4). La temperatura urbana fue notablemente más alta por la noche. Las diferencias de temperatura entre las zonas urbanas y rurales disminuyeron desde el amanecer (06:00 en verano, 08:00

en invierno) hasta el atardecer (21:00 en verano, 19:00 en invierno) en todas las estaciones. Las diferencias fueron menos pronunciadas durante las primeras horas del amanecer que durante las horas del atardecer. Esto se observó sobre todo en invierno y primavera, mientras que en verano y otoño la temperatura urbana aumentó rápidamente entre las 10:00 y las 11:00.

Considerando las temperaturas entre las 09:00 y las 18:00, las dos estaciones muestran diferencias inferiores a 1 °C. Las diferencias más significativas se registraron durante el período nocturno (de 19:00 a 07:00), cuando las temperaturas urbanas fueron superiores a las rurales, independientemente de la estación. Estas diferencias alcanzaron hasta 4 °C.

Figura 4. Temperaturas medias diarias en las estaciones meteorológicas Urbana (línea roja continua) y Rural (línea verde discontinua) de la ciudad de Córdoba, separadas por estaciones.



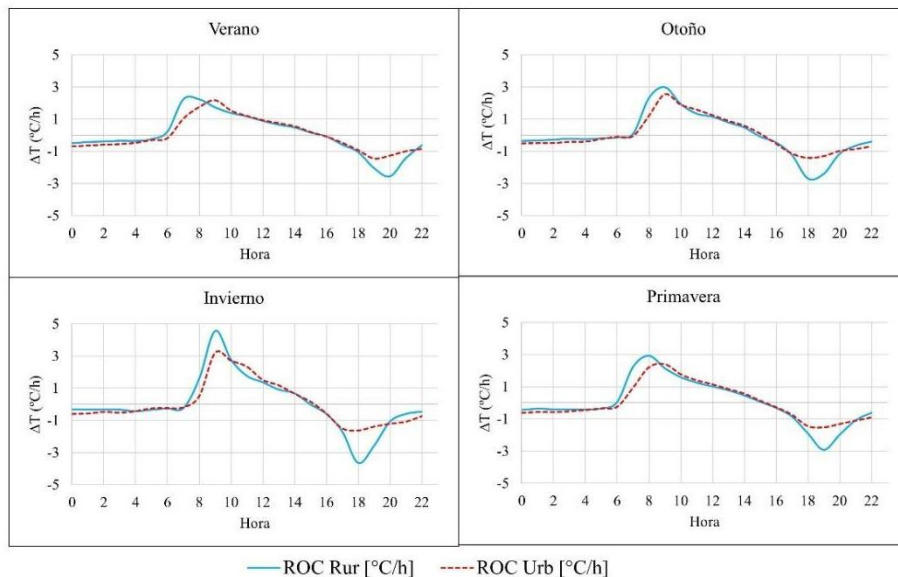
Tasa de cambio de la temperatura

Ambas estaciones meteorológicas presentaron un comportamiento estacionalmente constante (Figura 5). Tras el amanecer, las tasas de calentamiento en la estación rural fueron mayores que en la urbana. En verano, la intensidad máxima se observa dos horas antes en la

estación rural que en la urbana. A media estación, la diferencia fue inferior a una hora, y en invierno no se observó diferencia horaria.

Los valores observados para otoño y primavera fueron muy similares: las tasas de calentamiento en zonas rurales (urbanas) fueron de 3 °C/h (2,5 °C/h) y las de enfriamiento en zonas rurales (urbanas) fueron de 2,8 °C/h (1,4 °C/h). La tasa de calentamiento más baja se observó en verano, con 2,2 °C/h (2,4 °C/h) en la estación rural (urbana), mientras que la más alta se observó en invierno, con 4,6 °C/h (3,2 °C/h) en la estación rural (urbana).

Figura 5. Tasa de cambio de la temperatura (ROC) horaria en las estaciones meteorológicas Urbana (línea azul continua) y Rural (línea roja discontinua), separada por estaciones.

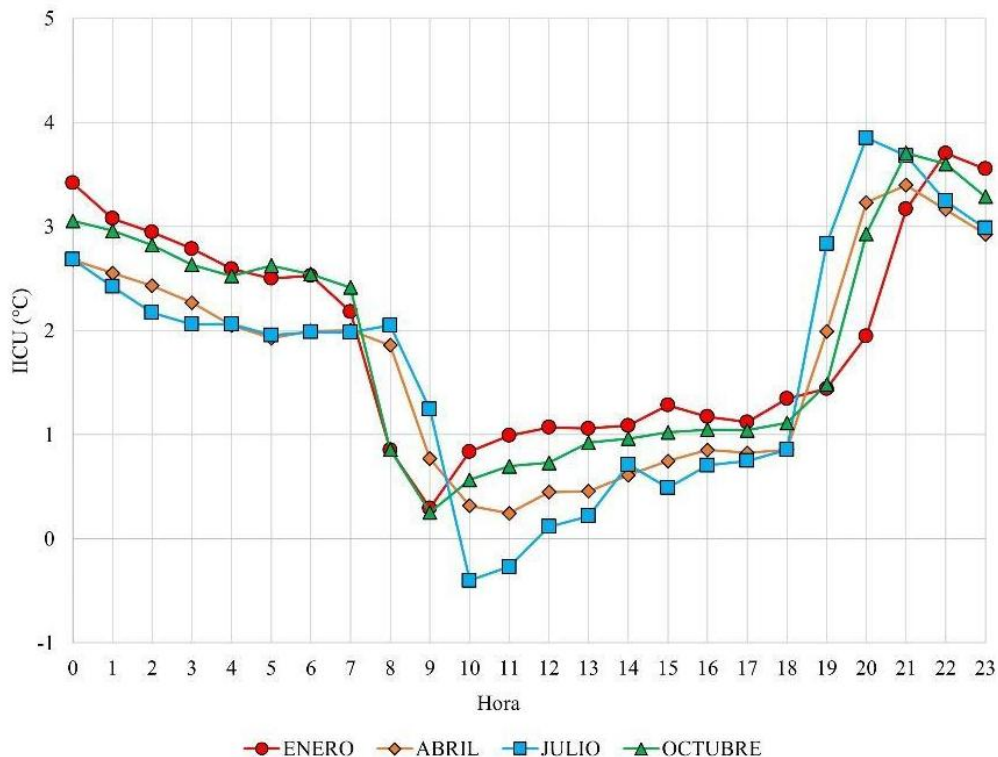


Intensidad de Isla de Calor Urbana

Para mayor claridad, los promedios horarios de la Intensidad de ICU (IICU) se muestran en la Figura 6 para los meses de enero (verano), abril (otoño), julio (invierno) y octubre (primavera). Se observó un comportamiento cíclico diario con un mínimo y un máximo. El mínimo varía de -0,66 °C en invierno a 0,71 °C en verano. Por otro lado, el máximo varía de 3,41 °C en otoño a 4,44 °C en invierno. Además, la hora de los valores extremos varía de una estación a otra. El mínimo se observó a las 09:00 en primavera y verano (aproximadamente 3 horas después del amanecer) y a las 10:00 en otoño e invierno (aproximadamente 2 horas después del amanecer). El máximo también presenta características similares. En invierno,

se observa a las 20:00, mientras que en primavera y otoño, a las 21:00, y en verano, a las 22:00. En todas las estaciones, se observa un desfase del máximo de 1 a 2 horas con respecto a la puesta del sol. Durante el día, la intensidad aumenta suavemente hasta aproximadamente las 18:00, cuando se produce un rápido aumento de la IICU.

Figura 6. Promedio horario de IICU para los meses seleccionados: enero (verano, círculos rojos), abril (otoño, rombos anaranjados), julio (invierno, cuadrados celestes), octubre (primavera, triángulos verdes).



La mayor diferencia entre la IICU máxima y mínima se observó en invierno (4,97 °C) y la menor en otoño (3,11 °C), como se puede ver en detalle en la Tabla 2.

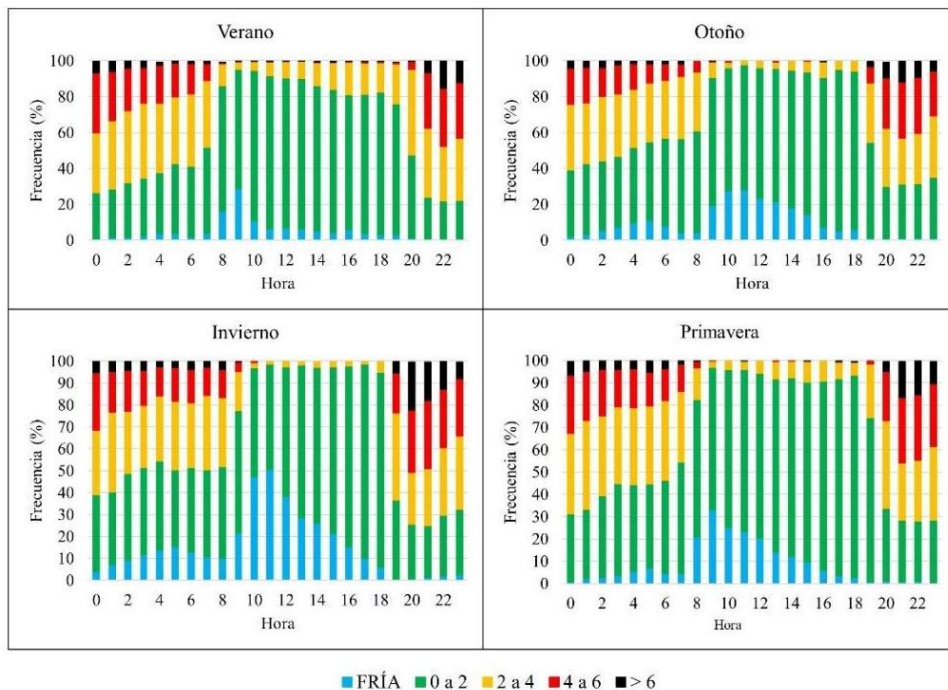
Tabla 2. Valores máximos, mínimos y el rango de IICU obtenidos para cada mes, promediados por hora durante el período de estudio.

	IICU max	IICU min	rango IICU
Enero	3,72	0,29	3,43
Febrero	4,01	0,71	3,30
Marzo	3,70	0,59	3,11
Abril	3,41	0,18	3,23
Mayo	3,82	-0,38	4,19
Junio	4,10	-0,66	4,76
Julio	3,92	-0,49	4,41
Agosto	4,44	-0,52	4,97
Septiembre	4,02	-0,17	4,19
Octubre	3,85	0,21	3,64
Noviembre	3,76	0,02	3,74
Diciembre	4,03	0,25	3,78

Los valores máximos de IICU superaron los 3 °C en todos los meses, alcanzando un máximo de 4,44 °C en agosto (invierno). El rango de IICU, que es la diferencia entre los valores máximo y mínimo, también superó los 3 °C. Entre mayo y septiembre (de otoño a principios de primavera), esta diferencia superó los 4 °C. El promedio anual de IICU máxima e IICU mínima fue de 3,9 °C y 0,0 °C, respectivamente.

La Figura 7 muestra la frecuencia de las clases de IICU por temporada, revelando patrones clave. La Isla Fría Urbana (IFU, IICU < 0) se presentó durante todo el año, principalmente de 00:00 a 18:00, con un pico en invierno (50% de los días entre las 10:00 y las 11:00), seguido de primavera (30% a las 9:00) y otoño (menos del 30% a las 10:00). Un pico secundario de IFU se presentó a las 05:00 en invierno y otoño (15-20% de los días).

El valor de IICU más común osciló entre 0 y 2 °C («débil», véase la Tabla 1), aumentando entre las 19:00 y las 07:00. Las noches de invierno mostraron el efecto ICU más intenso (50 % de los días, con un máximo a las 20:00). La primavera tuvo más días de ICU intensos y muy intensos que el otoño.

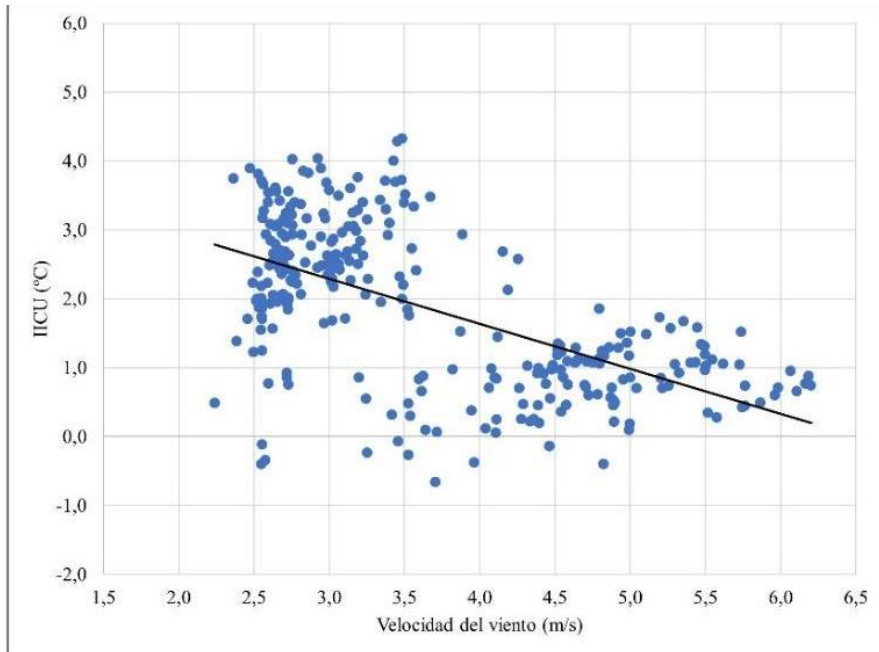
Figura 7. Distribución de frecuencia horaria de la intensidad de ICU, separada por estaciones.

Efecto del viento

La velocidad del viento osciló entre 2,24 y 6,20 m/s durante todo el año, con muy pocos días sin viento. Existe una relación negativa significativa ($p < 0,01$) entre la IICU media y la velocidad media del viento (Figura 8). La ecuación de ajuste obtenida para esta relación es:

$$IICU (^{\circ}C) = -0,6542 W(m/s) + 4,2538 \quad (3)$$

donde W es la velocidad del viento ($r = -0,73$, $R^2_{adj} = 0,5315$). A partir de la regresión lineal, se determinó que la velocidad umbral del viento para la ciudad de Córdoba fue de 6,5 m/s, por encima de la cual no se observaría el efecto ICU.

Figura 8. Comportamiento de IICU con relación a la velocidad del viento medida en la estación rural.

Efecto de las precipitaciones

La intensidad de ICU más alta se registró en días secos, disminuyendo durante los períodos lluviosos consecutivos (Figuras 9-11). Los valores de IICU aumentaron a medida que disminuían las precipitaciones, especialmente por la noche y la madrugada.

Figura 9. Intensidad y evolución horaria de la isla de calor en la ciudad de Córdoba para enero de 2019 y 2022. Además, se muestra la media diaria y horaria de la ICU, y la lluvia total por día y la lluvia total por mes.

2019	0	3	6	9	12	15	18	21	Prom. Diario	Lluvia	ENERO	2022	0	3	6	9	12	15	18	21	Prom. Diario	Lluvia
1	3.10	2.30	2.10	-0.30	1.70	0.20	0.70	3.00	1.60	0.0	< 0	1	4.50	4.20	4.40	-1.40	2.90	1.30	1.30	1.80	2.63	0.0
2	3.50	2.40	3.80	-1.10	0.90	0.70	1.10	1.40	1.59	13.0	0 a 2	2	3.30	4.60	3.80	0.00	0.50	0.80	2.90	2.70	2.33	0.0
3	1.60	1.00	1.10	0.40	1.30	1.40	1.20	2.60	1.33	0.0	2.1 a 4	3	5.70	4.00	1.40	-1.40	1.20	0.40	1.00	5.40	2.21	4.0
4	2.40	1.30	1.00	0.90	1.90	0.80	1.60	1.80	1.46	0.0	4.1 a 6	4	7.00	0.80	2.00	0.90	0.50	1.10	1.20	1.20	1.84	0.0
5	2.50	1.40	1.60	-0.20	0.80	-0.90	-0.40	1.70	0.81	0.7	> 6	5	1.50	2.90	4.40	-1.00	1.40	1.20	0.80	4.50	1.96	0.0
6	2.70	3.40	2.00	0.90	1.00	0.00	0.50	0.70	1.40	20.0		6	5.80	4.20	5.90	0.60	0.70	1.80	1.50	4.40	3.11	0.0
7	0.90	0.90	2.20	0.00	1.40	0.20	1.70	2.80	1.26	0.0		7	4.80	5.20	5.00	-0.90	2.00	1.60	1.80	4.30	2.98	0.0
8	3.70	3.30	1.60	0.40	0.70	0.00	0.70	3.60	1.75	0.0		8	4.10	4.60	4.40	-1.30	0.50	1.30	0.10	3.80	2.19	0.0
9	3.80	3.60	2.70	1.00	0.70	1.00	2.00	0.80	1.95	8.0		9	4.30	5.80	5.20	-0.80	0.70	1.20	2.00	4.60	2.88	0.0
10	0.50	0.20	1.30	0.50	1.70	1.30	1.50	1.80	1.10	0.0		10	5.10	2.10	4.10	-1.40	1.30	1.40	1.90	4.80	2.41	0.0
11	2.20	2.30	1.20	-0.10	0.70	-0.40	0.90	1.10	0.99	0.0		11	4.40	3.90	2.80	-1.40	2.20	1.70	0.90	4.70	2.40	0.0
12	1.50	1.20	1.30	0.70	-0.30	0.50	0.90	1.20	0.88	5.0		12	4.10	4.70	4.50	-2.30	0.50	0.20	1.70	5.70	2.39	0.0
13	1.60	-0.10	0.80	0.90	1.40	1.10	1.50	1.00	1.03	16.0		13	5.60	5.80	1.60	-2.20	0.50	1.40	1.00	4.20	2.49	0.0
14	0.80	0.50	0.80	1.10	0.60	0.40	3.10	2.40	1.21	7.0		14	6.00	1.90	1.90	-0.60	1.50	0.70	1.90	2.90	2.03	0.0
15	1.40	1.00	0.50	1.40	2.10	2.70	1.80	3.10	1.75	0.0		15	4.40	1.30	4.50	-0.80	1.10	3.20	0.70	3.90	2.29	0.0
16	3.30	2.10	-0.70	0.00	0.60	0.50	1.00	2.60	1.18	5.0		16	2.80	4.00	3.60	1.30	1.60	0.80	-1.00	1.20	1.79	27.0
17	4.70	-0.30	-1.10	0.80	0.40	0.80	0.60	0.50	0.80	18.0		17	1.00	1.30	1.00	-0.70	0.80	1.40	1.80	0.60	0.90	38.0
18	0.90	0.80	0.90	0.20	1.30	1.60	1.00	3.20	1.24	0.0		18	0.60	0.60	0.40	0.50	1.10	0.70	0.70	1.60	0.78	5.0
19	3.20	2.50	4.60	-1.70	0.40	1.00	1.00	4.20	1.90	0.0		19	1.60	1.00	1.00	0.10	-0.90	0.60	0.20	1.40	0.63	5.0
20	4.00	3.70	3.30	0.40	0.40	0.30	1.00	2.90	2.00	0.0		20	1.40	1.20	1.00	0.40	0.70	1.20	0.80	2.40	1.14	0.0
21	1.50	1.70	2.90	-0.40	0.60	2.00	1.60	2.40	1.54	0.0		21	1.70	1.50	2.00	-2.00	1.10	1.30	2.00	-0.30	0.91	0.0
22	2.60	2.60	1.60	0.30	-0.40	0.80	2.10	3.00	1.58	0.0		22	0.90	1.90	1.00	0.60	-1.50	1.10	1.50	0.60	0.76	85.0
23	3.90	4.00	2.30	-0.90	-0.10	-0.10	1.50	0.70	1.41	42.0		23	1.00	1.40	1.10	0.70	0.70	0.90	1.50	1.40	1.09	0.5
24	0.90	0.80	0.70	0.30	0.20	-0.70	1.00	1.60	0.60	0.0		24	3.00	2.40	2.30	0.80	1.10	1.50	1.70	2.00	1.85	0.0
25	1.40	1.10	1.20	0.50	1.10	0.50	1.30	0.80	0.99	81.0		25	3.20	2.10	2.50	1.00	1.00	-0.90	1.70	2.80	1.68	7.0
26	0.10	1.40	0.20	0.00	-0.70	1.30	1.90	3.00	0.90	0.0		26	3.30	4.60	0.80	0.80	0.80	1.20	1.00	0.70	1.65	14.0
27	3.10	3.10	1.60	0.40	1.30	0.90	1.20	2.80	1.80	0.0		27	1.20	0.60	0.10	1.30	0.80	1.60	2.40	4.00	1.50	0.0
28	2.50	0.70	2.50	0.70	0.70	0.20	0.50	3.00	1.35	0.0		28	2.80	2.00	1.50	0.10	1.50	0.10	1.60	4.90	1.81	0.0
29	2.80	1.40	1.90	0.10	-0.10	-0.50	-2.00	1.20	0.60	19.0		29	4.90	3.20	3.50	-0.10	1.70	1.30	1.80	5.10	2.68	0.0
30	1.30	1.70	0.70	0.20	-0.80	1.10	1.40	2.50	1.01	0.0		30	4.60	4.90	1.40	-0.20	0.80	0.80	1.50	5.50	2.41	0.0
31	3.80	2.80	3.10	0.80	1.20	2.80	1.60	1.20	2.16	0.5		31	4.20	4.50	2.50	0.10	1.00	1.60	1.10	3.20	2.53	0.0
Prom. Horario	2.33	1.77	1.60	0.26	0.73	0.69	1.15	2.08		235.2		Prom. Horario	3.57	3.07	2.63	-0.30	0.96	1.11	1.32	3.16		185.5

Figura 10. Intensidad y evolución horaria de la isla de calor en la ciudad de Córdoba para abril de 2019 y 2022. Además, se muestra la media diaria y horaria de la ICU, y la lluvia total por día y la lluvia total por mes.

2019	0	3	6	9	12	15	18	21	Prom. Diario	Lluvia	ABRIL	2022	0	3	6	9	12	15	18	21	Prom. Diario	Lluvia
1	-0.20	0.40	0.40	0.60	1.00	0.60	0.60	1.00	0.55	5	<0	1	5.20	0.40	5.20	2.80	1.50	2.00	-0.10	5.60	2.45	0
2	0.50	3.00	-1.30	-1.80	-0.30	1.30	1.30	3.60	0.79	0	0 a 2	2	3.30	3.50	2.70	1.80	1.40	-0.90	0.90	4.60	2.16	0
3	3.20	2.10	2.50	-0.10	1.00	0.80	-0.10	3.20	1.58	0	2.1 a 4	3	4.50	2.00	4.50	1.20	3.20	1.20	0.70	2.40	2.46	0
4	2.00	2.70	1.70	1.00	1.10	0.80	0.80	-0.10	1.25	0	4.1 a 6	4	4.00	5.40	3.80	0.90	0.40	0.90	0.50	5.20	2.76	0
5	3.90	3.00	2.50	0.90	1.00	1.00	0.70	5.30	2.46	0	> 6	5	5.30	1.80	2.00	0.70	-1.00	-1.00	0.60	4.80	1.65	0
6	4.70	3.10	3.30	0.90	0.20	0.40	0.90	5.50	2.38	0		6	3.30	4.20	2.80	1.20	-0.40	0.20	1.10	4.70	2.14	0
7	3.80	1.90	-0.40	-2.30	0.40	1.20	0.80	5.80	1.40	0		7	3.20	4.90	4.00	0.60	0.40	1.40	1.10	5.30	2.61	0
8	4.90	3.50	0.60	2.20	0.20	-0.40	0.60	4.70	2.04	0		8	3.70	3.50	1.10	0.50	0.60	-0.20	0.90	5.00	1.89	0
9	3.30	5.20	1.20	-1.20	0.00	-0.10	1.40	3.70	1.69	0		9	3.90	5.30	5.10	0.80	1.40	0.00	1.00	3.80	2.66	0
10	2.50	2.00	0.40	-1.30	0.10	0.40	0.90	5.60	1.33	0		10	0.00	-1.90	-0.90	0.80	0.70	1.40	0.80	1.70	0.33	0.2
11	2.50	4.20	3.00	1.20	1.60	1.80	2.60	5.20	2.76	0		11	-0.20	1.10	0.90	1.00	1.70	1.10	1.00	2.90	1.19	0
12	5.20	4.50	0.80	-0.20	-0.70	0.60	0.70	2.50	1.68	0		12	1.00	3.70	1.80	1.30	0.60	0.00	1.40	0.50	1.29	7.2
13	1.40	2.10	0.90	0.30	1.30	1.30	0.20	2.80	1.29	0		13	0.80	1.00	2.10	0.90	0.80	1.20	0.40	5.30	1.84	0
14	1.90	2.50	1.90	-0.70	1.00	0.80	1.80	2.90	1.51	0		14	4.80	2.90	3.70	0.20	0.40	0.80	0.60	6.30	2.45	0
15	1.70	2.00	1.70	-0.20	1.00	1.80	1.30	1.90	1.40	0.5		15	5.20	3.80	1.70	0.00	0.20	0.00	1.00	3.90	1.98	0
16	3.00	-1.00	1.50	1.70	0.00	0.90	0.30	2.70	1.14	0		16	3.80	3.60	2.60	0.90	1.00	1.30	1.00	5.70	2.49	0
17	2.50	1.80	2.10	1.80	1.10	0.30	0.60	2.60	1.60	0		17	3.60	2.40	4.00	2.20	1.00	1.00	1.60	5.10	2.61	0
18	2.60	2.60	1.30	-2.00	-0.80	-0.20	0.50	1.10	0.64	0		18	4.50	5.20	1.60	1.00	0.30	2.00	0.20	4.90	2.46	0
19	0.90	0.60	0.40	0.90	0.90	1.70	1.20	2.30	1.11	8		19	2.20	1.10	2.90	0.70	0.30	-0.80	-0.50	2.40	1.04	0
20	0.20	-0.50	0.00	-0.70	1.50	0.80	1.20	1.00	0.44	3		20	5.50	2.60	2.80	0.20	0.30	1.20	-5.10	0.20	0.96	0.4
21	1.30	0.70	0.70	1.60	0.80	-0.40	-0.10	0.90	0.69	12		21	0.50	2.80	4.30	2.00	-0.40	4.40	0.20	5.70	2.44	0
22	0.20	0.80	0.60	0.80	0.60	0.70	1.00	1.50	0.78	1		22	4.40	2.40	1.80	0.30	0.30	1.50	0.80	5.20	2.09	0
23	0.90	0.20	0.60	0.90	0.80	1.00	1.10	1.50	0.88	7		23	4.20	0.90	-0.10	-0.10	-0.40	0.50	0.90	3.50	1.18	0
24	1.60	1.30	0.90	1.10	0.30	0.40	0.70	0.60	0.86	35		24	5.80	3.80	5.70	2.90	-0.60	0.80	1.30	2.40	2.76	0
25	0.70	0.70	0.70	0.20	0.20	0.40	0.70	0.60	0.53	15		25	4.40	-1.20	5.20	0.80	1.10	0.60	0.90	5.00	2.10	0
26	0.60	0.20	-0.40	-1.00	0.60	0.60	0.60	0.30	0.19	0		26	2.50	2.20	3.00	0.40	-0.90	-2.10	1.30	3.20	1.20	0
27	0.40	0.50	0.30	-1.10	0.20	1.90	0.80	3.30	0.79	0		27	-0.50	0.00	0.30	1.20	1.80	1.40	0.20	5.10	1.31	0
28	3.40	4.60	4.50	-0.40	-1.40	-0.30	0.30	4.00	1.84	0		28	1.10	4.30	3.50	0.70	1.50	0.80	1.10	5.10	3.51	0
29	2.50	4.90	3.70	0.60	1.10	1.20	0.70	0.50	1.90	0		29	5.40	2.30	1.90	2.00	0.20	0.40	0.70	3.80	2.09	0
30	1.10	1.60	2.90	1.60	-0.20	0.70	-0.30	3.50	1.36	0		30	2.30	4.00	3.50	0.90	0.40	1.00	0.90	5.40	2.30	0
Prom. Horario	2.11	2.04	1.30	0.18	0.49	0.73	0.79	2.71		86.5		Prom. Horario	3.46	2.63	2.78	1.03	0.49	0.74	0.58	4.39		7.8

Figura 11. Intensidad y evolución horaria de la isla de calor en la ciudad de Córdoba para octubre de 2019 y 2022. Además, se muestra la media diaria y horaria de la IICU, y la lluvia total por día y la lluvia total por mes.

2019	0	3	6	9	12	15	18	21	Prom. Diario	Lluvia	OCTUBRE	2022	0	3	6	9	12	15	18	21	Prom. Diario	Lluvia
1	2.20	1.70	0.30	0.80	0.10	0.60	1.10	0.70	0.94	0.0	< 0	1	4.20	4.00	2.50	-3.70	-0.90	0.60	0.90	5.50	1.64	0
2	0.20	0.50	3.90	0.70	0.60	0.60	0.90	3.20	1.33	0.6	0 a 2	2	3.50	4.90	5.10	-2.30	-0.10	-0.20	1.70	3.00	2.45	0
3	4.90	1.60	-0.20	0.80	1.30	0.80	0.80	0.80	1.35	2	2.1 a 4	3	1.90	5.80	5.00	-0.20	-0.10	0.00	1.20	5.20	2.60	0
4	0.90	0.90	0.80	0.60	0.70	2.10	0.40	0.20	0.83	0	4.1 a 6	4	2.20	2.90	3.90	0.10	-0.50	0.60	0.20	4.60	1.75	0
5	1.10	2.40	1.30	-1.80	1.50	1.80	0.90	6.00	1.65	0	> 6	5	4.50	5.10	3.10	2.30	0.00	0.20	1.20	0.50	2.11	6
6	3.40	1.80	1.10	-1.90	-0.20	-0.30	1.10	3.60	1.08	0		6	1.80	4.10	1.50	1.60	1.30	1.40	1.90	6.00	2.45	0
7	4.60	2.00	0.60	0.10	1.00	0.40	0.80	3.10	1.58	0		7	4.70	4.00	-5.80	-4.30	-0.60	1.10	0.90	5.00	0.63	0
8	3.50	2.40	2.20	0.30	1.10	1.10	1.80	4.20	2.08	0		8	-3.30	3.60	0.50	0.80	0.00	1.50	1.20	0.60	0.61	0
9	4.00	5.40	5.20	0.80	-2.60	-1.00	1.00	2.60	1.93	0		9	4.60	5.50	5.30	0.10	0.10	1.40	1.80	8.30	3.16	0
10	3.80	1.60	3.30	-0.90	0.60	0.40	0.60	3.90	1.66	0		10	5.50	3.40	3.20	-0.40	0.20	0.80	2.00	8.80	2.69	0
11	1.80	1.70	4.10	0.20	0.90	1.40	1.00	4.20	1.91	0		11	5.20	3.00	4.00	-0.80	0.80	1.80	1.60	4.70	2.54	0
12	1.40	1.30	3.00	-0.40	2.00	-0.50	1.00	0.60	1.05	8		12		1.30	2.60	-3.00	0.20	1.70	1.70	8.10	1.51	0
13	0.30	0.50	1.30	0.80	1.20	1.20	1.90	1.80	1.13	39		13	3.30	4.90	1.10	1.20	2.60	1.00	1.20	8.80	2.76	0
14	0.40	-0.10	0.30	0.60	1.10	1.00	0.90	1.10	0.66	0.5		14	8.80	5.20	5.50	-0.40	1.00	2.70	1.80	0.30	2.84	0
15	-0.80	-1.90	-0.80	2.00	1.30	1.30	1.10	1.00	0.40	0.3		15	1.80	1.70	1.20	0.50	2.10	2.90	2.70	2.10	1.88	0
16	1.40	1.10	1.00	1.10	0.70	0.90	1.10	0.60	0.99	0		16	1.70	0.80	3.60	0.80	1.00	1.80	0.60	3.30	1.70	0
17	0.10	0.30	0.80	0.20	-0.30	2.30	1.50	3.50	1.05	0		17	3.80	8.30	2.30	1.10	1.20	0.60	1.40	2.10	2.35	0
18	2.50	2.80	2.00	0.00	0.80	0.50	1.40	6.10	2.01	0		18	2.20	3.00	2.20	0.40	1.80	2.30	1.70	2.90	2.06	0
19	4.10	1.60	3.90	-0.40	-0.60	1.00	1.70	2.50	1.73	0.3		19	1.80	2.30	3.50	1.40	2.10	2.10	1.80	2.10	2.14	6
20	2.80	2.00	2.60	1.00	2.00	1.30	1.30	1.40	1.80	3		20	1.10	1.90	1.80	1.20	1.30	3.30	0.80	5.60	2.13	0
21	3.00	3.20	4.10	1.00	0.60	0.50	0.90	4.60	2.24	5		21	2.50	1.30	1.30	-0.30	0.90	1.00	1.50	8.30	1.94	0
22	4.80	2.50	1.90	0.40	0.80	-0.10	1.10	2.60	1.75	2		22	0.50	0.70	1.00	0.50	0.60	2.00	2.10	3.70	1.39	0
23	3.70	1.80	3.40	0.90	0.60	1.60	1.70	4.40	2.26	3		23	5.00	2.30	8.30	-0.10	-1.20	1.00	0.10	3.10	2.05	0
24	3.60	1.80	1.20	0.20	0.20	0.60	0.70	4.60	1.61	2		24	4.00	2.80	2.30	-0.20	0.50	0.60	0.90	3.40	1.79	0
25	4.20	1.50	3.20	-1.30	0.20	1.70	1.60	3.10	1.78	23		25	2.00	0.20	1.90	-0.60	-0.40	0.40	0.50	0.40	0.55	4
26	4.20	1.00	1.60	0.50	-0.20	-0.40		3.40	1.44	0		26	1.10	1.00	0.80	2.00	1.30	1.80	1.50	6.70	2.03	0
27	5.20	5.00	4.90	1.40	1.00	0.40	1.20	2.30	2.68	4		27	5.30	2.30	3.40	1.50	1.40	0.60	1.30	4.10	2.49	0
28	3.70	3.10	2.80	2.20	0.50	0.40	1.10	1.00	1.85	0		28	3.80	2.30	4.30	-1.00	1.00	0.90	-0.60	5.00	1.96	4
29	3.00	0.30	0.90	0.40	1.10	1.60	1.20	5.60	1.76	0		29	4.10	5.10	8.70	-0.30	0.10	1.40	1.70	8.10	3.11	0
30	5.30	3.30	0.90	1.40	-0.10	2.00	1.20	0.50	1.81	9		30	4.80	3.90	0.80	0.50	1.40	1.10	1.40	1.10	1.88	0
31	2.30	3.50	3.90	1.30	1.80	1.50	1.20	2.70	2.28	0.0		31	0.80	0.90	1.10	1.20	0.80	1.80	1.80	5.20	1.70	0
Prom. Horario	2.76	1.83	2.11	0.42	0.64	0.86	1.14	2.77		101.7		Prom. Horario	3.03	3.11	2.64	-0.01	0.64	1.30	1.31	4.25		20.0

En 2019, la IICU fue menor que en 2022. Por ejemplo, enero de 2019 (verano, 235,2 mm de lluvia acumulada mensual) tuvo pocos valores de IICU superiores a 4 °C, mientras que enero de 2022 registró una IICU alta durante los primeros 15 días (en que se registraron solo 4 mm de lluvia) (Figura 9). Se observaron tendencias similares en abril (otoño, Figura 10) y octubre (primavera, Figura 11). En 2022, un año más seco, la IICU a menudo superó los 4 °C, incluso superando los 6 °C, con fuertes efectos durante la noche que se atenuaron por la mañana.

Análisis de IICU con la precipitación anual

La IICU y la precipitación presentaron una relación anual negativa significativa ($p < 0,05$) (Tabla 3). Los años con mayor IICU general coincidieron con años de menor precipitación. La IICU aumenta 0,001 °C por cada mm menos de precipitación anual. Con base en esta relación, existe una diferencia de 400 mm entre 2020 y 2019, lo que explica el aumento observado en la IICU de 0,4 °C en 2020.

El ajuste lineal de los datos da como resultado la siguiente ecuación:

$$\text{IICU promedio anual (}^{\circ}\text{C)} = -0,001 \text{ TR (mm)} + 2,5375 \quad (4)$$

donde TR es la lluvia total acumulada en un año ($r = -0,91$, $R^2_{\text{adj}} = 0,7667$).

Tabla 3. IICU promedio anual y precipitación total acumulada por año en la ciudad de Córdoba.

Año	IICU (°C)	Precipitación total (mm)
2018	1,81	724,7
2019	1,59	889,8
2020	2,00	490,9
2021	1,85	794,8
2022	2,01	594

Discusión

Este trabajo tiene como objetivo evaluar las características anuales y estacionales del efecto ICU de la ciudad de Córdoba considerando 5 años de datos horarios (2018-2022). En particular, estudiamos cómo la IICU se asocia con cambios en factores meteorológicos como la velocidad del viento y la precipitación.

De acuerdo a este estudio para evaluar las características anuales y estacionales de Córdoba, se encontraron diferencias de temperatura entre las zonas urbanas y rurales. Estas diferencias se acentuaron en las temperaturas mínimas diarias, como se observa en otras ciudades como Turín (Milelli y col., 2023), Pekín (Liu y col., 2007) y Estambul (Ünal y col., 2020).

Un estudio previo en la ciudad consideró únicamente la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas registradas durante el día en las mismas estaciones meteorológicas que la nuestra, y halló una IICU de 1 °C (de la Casa & Nasello, 2014). Extendimos este análisis a una base horaria y surgieron varias características del efecto ICU de Córdoba:

- 1) La media diaria de IICU varía entre -0,66 °C y 4,44 °C, dependiendo de la hora y la estación.
- 2) Descubrimos que la IICU varía a lo largo del día, con un mínimo aproximadamente 3 horas después del amanecer y un máximo de 1 a 2 horas después del atardecer durante las cuatro estaciones. Según Oke y col. (2017), el ICU es principalmente un fenómeno nocturno. Santamouris y col. (2015) recopilaron información de diversos trabajos y descubrieron que

el fenómeno ICU ocurre unas horas después del atardecer en ciudades como Adelaida (Australia), Songkhla (Tailandia), Mascate (Omán), Delhi (India) o Naning (China).

3) Nuestro estudio revela que el fenómeno de Isla Fría Urbana (IFU) estuvo presente durante todo el año entre las 10:00 y las 18:00, siendo particularmente intenso entre otoño y primavera, con una frecuencia de más del 25% de los días con este efecto. El valor medio obtenido en este trabajo es de $-0,44^{\circ}\text{C}$. La IFU en Córdoba fue detectada por Casadei y col. (2021) mediante el análisis de temperatura superficial derivada de imágenes satelitales, para el período 2011-2015. El valor medio reportado por ellos fue de $-0,38^{\circ}\text{C}$, en buena concordancia con el nuestro.

4) Los mayores valores de IICU se observaron en invierno, con valores diarios superiores a 6°C . Los inviernos en Córdoba son secos y con cielos despejados. Estas condiciones meteorológicas estables tienden a potenciar el efecto ICU (Yang y col., 2019). Según Roth (2007), las ciudades con clima Cwa presentan una variación estacional del efecto ICU nocturno mensual medio, con intensidades más bajas (más altas) durante la estación húmeda (seca).

5) Las tasas de calentamiento matutino y de enfriamiento en la estación rural fueron mayores que en la estación urbana a lo largo del año. Oke y col. (2017) atribuyeron este efecto a la mayor inercia térmica de los materiales urbanos con respecto a los suelos naturales. Los valores máximos de calentamiento y enfriamiento se observaron en la estación seca, mientras que los valores mínimos se observaron en la estación lluviosa. Roth (2007) sugiere que, durante la estación lluviosa en las regiones subtropicales, cuando las superficies rurales se humedecen o saturan, la admitancia térmica aumenta. En consecuencia, la amplitud térmica superficial diaria disminuye, lo que conlleva una disminución del enfriamiento rural.

6) El viento fue un factor importante para moderar el efecto ICU, con un umbral crítico de 24 km/h a partir del cual este efecto no se observaría. Se han detectado valores umbral similares en ciudades como Seúl (Kim & Baik, 2002), Sídney o Adelaida (Al-Obaidi y col., 2021), con diferencias en el número de habitantes y su clasificación climática de Köppen.

7) También se observó que la precipitación atenúa el fenómeno ICU. Existe amplia evidencia que sugiere que las temperaturas urbanas pueden disminuir durante la precipitación, lo que resulta en una reducción de la disparidad de temperatura entre las zonas urbanas y rurales, y posteriormente en una menor intensidad del efecto ICU (He, 2018; Arifwidodo & Tanaka, 2015; Ünal y col., 2020; Chen y col., 2020). En este trabajo, se observó que el efecto de enfriamiento de la lluvia disminuyó con la acumulación de días sin precipitación. Este mismo efecto se observó en Presidente Prudente, Brasil (Amorim, 2020) y en Guangzhou, China (Chen y col., 2020).

La correlación entre el valor medio anual de IICU y la cantidad de precipitación anual fue muy alta, lo que sugiere que la lluvia actúa como un factor importante que controla el efecto ICU. La intensidad de ICU aumenta en $0,001\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada mm de reducción en la precipitación anual, con un alto coeficiente de determinación de 0,82, lo que indica que la influencia de la lluvia en la IICU durante el período de estudio es alta. Se obtuvieron resultados similares en Singapur (Chow & Roth, 2006) y Bangkok (Arifwidodo & Tanaka, 2015). Se observó que las temperaturas medias mensuales más altas correspondían a reducciones en la precipitación media mensual.

Conclusiones

Córdoba es la segunda ciudad más poblada de Argentina. En este trabajo, se analiza el efecto ICU considerando 5 años de datos horarios a escala anual, estacional y diaria. El efecto ICU en Córdoba es principalmente nocturno, con magnitudes que pueden superar los $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la estación seca. Si bien esto podría beneficiar a los residentes de la ciudad en invierno, no ocurre lo mismo en verano.

Durante los meses de verano, las precipitaciones se convierten en un factor crítico para mitigar el efecto de isla de calor urbana. Esta investigación indica que, en días de verano sin precipitaciones, los valores de intensidad de ICU pueden superar significativamente los $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se detectó un efecto de Isla Fría Urbana diurno, durante todo el año, alcanzando su valor máximo de $-0,66\text{ }^{\circ}\text{C}$ en invierno. Además, se encontró que, durante el invierno, la amplitud del ciclo diario de la IICU es máxima.

Los resultados de este trabajo permitirán a la ciudad de Córdoba estar preparada para el aumento de la demanda energética durante las horas punta, por ejemplo, reforzando los sistemas eléctricos. Además, la ciudad puede habilitar refugios térmicos durante los días que se prevén temperaturas extremas debido a los vientos suaves y la falta de precipitaciones. Estos refugios serían esenciales para las poblaciones vulnerables sin acceso a sistemas de refrigeración. Sugerimos que los efectos de la isla de calor en la ciudad de Córdoba sobre el confort térmico, la demanda energética y la salud de sus habitantes se consideren para un estudio futuro.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias a los subsidios otorgados a María Lila Asar, Elizabet Lilia Estallo, Elisabet Benítez, Héctor M. Di Bendetto y Francisco F. Ludueña-Almeida

Los datos meteorológicos fueron proporcionados por cortesía del Servicio Meteorológico Nacional. Los autores agradecen al Dr. Juan Ariel Insaurralde, técnico del CONICET, por el apoyo técnico geográfico.

Referencias

- Abbassi, Y., Ahmadikia, H. & Baniasadi, E. (2022). Impact of wind speed on urban heat and pollution islands. *Urban Climate* 44:101200. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101200>
- Al-Obaidi, I., Rayburg, S., Pótrolniczak, M. & Neave, M. (2021). Assessing the impact of wind conditions on urban heat islands in large Australian cities. *Journal of Ecological Engineering*, 22(11):1–15. <https://doi.org/10.12911/22998993/142967>
- Amorim, M.C.D.C.T. (2020). Daily evolution of urban heat islands in a Brazilian tropical continental climate during dry and rainy periods. *Urban Climate*, 34:100715. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100715>
- Arifwidodo, S.D. & Tanaka, T. (2015). The characteristics of urban heat island in Bangkok, Thailand. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195:423–428. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.484>
- Bornstein, R. & Lin, Q. (2000). Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta: three case studies. *Atmospheric Environment*, 34:507–516. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00374-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00374-X)
- Casadei, P., Semmartin, M. & Garbulsky, M.F. (2021). Análisis regional de las islas de calor urbano en la Argentina. *Ecología Austral*, 31(1):190–203. <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.1.0.970>
- Chen, G., He, M., Li, N., He, H., Cai, Y. & Zheng, S. (2020). A method for selecting the typical days with full urban heat island development in hot and humid area, case study in Guangzhou, China. *Sustainability*, 13(1), 320. <https://doi.org/10.3390/su13010320>
- Chiu, C.T.F., Wang, K., Paschalis, A., Erfani, T., Peleg, N., Fatichi, S., Theeuwes, N. & Manoli, G. (2022). An analytical approximation of urban heat and dry islands and their impact on convection triggering. *Urban Climate*, 46:101346. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101346>
- Chow, W.T.L. & Roth, M. (2006). Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore. *International Journal of climatology*, 26:2243–2260. <https://doi.org/10.1002/joc.1364>

- de la Casa, A.C. & Nasello, O.B. (2014). Thermal conditions in Córdoba City, Argentina, during 1960-2010 period. *American Journal of Climate Change*, 3:193-204. DOI:10.4236/ajcc.2014.32018
- Deilami, K., Kamruzzaman, M. & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 67, 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.12.009>
- Dixon, P.G. & Mote, T.L. (2003). Patterns and causes of Atlanta's urban heat island-initiated precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 42:1273-1284. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042<1273:PACOAU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042<1273:PACOAU>2.0.CO;2)
- EPA U.S. Environmental Protection Agency (2016). *Climate change indicators in the United States*. Fourth edition. EPA 430-R-16-004. www.epa.gov/climate-indicators
- García, F.F. & Álvarez, D.R. (2008). Olas de calor e influencia urbana en Madrid y su área metropolitana. *Estudios geográficos*, 69(265), 495-518. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.0440>
- He, B.J. (2018). Potentials of meteorological characteristics and synoptic conditions to mitigate urban heat island effects. *Urban Climate*, 24:26–33. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.004>
- He, B.J., Ding, L. & Prasad, D. (2020). Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102289. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102289>
- Hondula, D.M. & Barnett, A.G. (2014). Heat-related morbidity in Brisbane, Australia: spatial variation and area-level predictors. *Environmental health perspectives*, 122(8). <http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1307496>
- INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina) <https://www.indec.gob.ar/> (acceso el 01/06/2023).
- Kim, Y.H. & Baik, J.J. (2002). Maximum urban heat island intensity in Seoul. *Journal of applied meteorology*, 41(6):651-659. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2)
- Liu, J. & Niyogi, D. (2019). Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Scientific Reports*, 9, 7301. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42494-2>
- Liu, W., Ji, C., Zhong, J., Jiang, X. & Zheng, Z. (2007). Temporal characteristics of the Beijing urban heat island. *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 213-221. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0192-6>
- Macintyre, H.L., Heaviside, C., Cai, X. & Phalkey, R. (2021). The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate. *Environment International*, 154, 106530. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106530>

- Maristany, A., Abadía, L., Angiolini, S., Pacharoni, A. & Pardina, M. (2008). Estudio del fenómeno de la isla de calor en la ciudad de Córdoba – Resultados preliminares. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12:69 – 75. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/94933>
- Milelli, M., Bassani, F., Garbero, V., Poggi, D., von Hardenberg, J. & Ridolfi, L. (2023). Characterization of the urban heat and dry island effects in the Turin metropolitan area. *Urban Climate*, 47:101397. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101397>
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J.A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press (pp. 209-210).
- Papanastasiou, D.K. & Kittas, C. (2012). Maximum urban heat island intensity in a medium-sized coastal Mediterranean city. *Theoretical and Applied Climatology*, 107, 407-416. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0491-z>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L. & McMahon, T.A. (2007). Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11:1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Roth, M. (2007). Review of urban climate research in (sub) tropical regions. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(14), 1859-1873. <https://doi.org/10.1002/joc.1591>
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A. & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings — A review. *Energy and buildings*, 98:119-124. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.052>
- Santamouris, M. & Vasilakopoulou, K. (2021). Present and future energy consumption of buildings: Challenges and opportunities towards decarbonisation. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 1, 100002. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100002>
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional) (2023) <https://www.smn.gob.ar/> (acceso el 30/03/2023).
- Steensen, B.M., Marelle, L., Hodnebrog, Ø. & Myhre, G. (2022). Future urban heat island influence on precipitation. *Climate Dynamics*, 58(11), 3393-3403. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06105-z>
- Tzavali, A., Paravantis, J.P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A. & Stigka, E. (2015). Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(12b), 4537-4554. <https://goo.su/4t9UI8L>
- Ünal, Y.S., Sonuç, C.Y., Incecik, S., Topcu, H.S., Diren-Üstün, D.H. & Temizöz, H.P. (2020). Investigating urban heat island intensity in Istanbul. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 175-190. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02953-2>

Wu, Z. & Ren, Y. (2019). A bibliometric review of past trends and future prospects in urban heat island research from 1990 to 2017. *Environmental Reviews*, 27(2), 241-251. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0029>

Yang, P., Ren, G. & Hou, W. (2019). Impact of daytime precipitation duration on urban heat island intensity over Beijing city. *Urban Climate*, 28:100463. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100463>

Yang, P., Ren, G. & Liu, W. (2013). Spatial and temporal characteristics of Beijing urban heat island intensity. *Journal of applied meteorology and climatology*, 52(8):1803–1816. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-12-0125.1>

Zhao, L., Lee, X., Smith, R.B. & Oleson, K. (2014). Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 511(7508):216–219. <https://www.nature.com/articles/nature13462>

Sobre los autores

María Lila Asar. Licenciada y Doctora en Física, egresada de la Facultad de Matemáticas, Astronomía, Física y Computación de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Es Profesora Adjunta por concurso de Matemática en la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, de la misma universidad. Es docente-investigadora Categoría 5. Ha realizado publicaciones nacionales e internacionales en temáticas referidas a la física del hielo, y procesos físico químicos en partículas de precipitación. Ha participado en diversos proyectos de investigación, en el área de procesos físicos en nubes y en aplicaciones matemáticas en biología. Desde 2019 participa como investigadora en proyectos de investigación dedicados al estudio de la isla de calor urbano en la ciudad de Córdoba, con los que ha realizado diversas presentaciones y ponencias en congresos y reuniones científicas.

Responsable de la idea, planificación, ejecución de la investigación, redacción del manuscrito original.

Elizabet L. Estallo. Bióloga y Doctora en Ciencias Biológicas, egresada de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, investigadora en el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Se enfoca en la ecología y la distribución de insectos, especialmente aquellos relacionados con enfermedades transmitidas por vectores. Trabaja en Instituto de Investigaciones Biológicas y Tecnológicas (IIBYT) dependiente de CONICET- Universidad Nacional de Córdoba y es exploradora de National Geographic. Sus publicaciones en revistas indexadas, congresos, conferencias, extensión, se alinean a temas de Ecología y distribución de insectos, enfermedades transmitidas por vectores, epidemiología y salud pública, uso de tecnologías de observación satelital para monitorear la distribución de insectos, islas de calor urbana, ciencia ciudadana.

Co-Responsable de la idea, edición del manuscrito original, administración de fondos.

Elisabet M. Benítez es Bióloga y Doctora en Ciencias Biológicas, egresada de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Actualmente, es estudiante de la Maestría en Aplicaciones de Información Espacial en el Instituto de Altos Estudios Espaciales "Mario Gulich" de la agencia espacial argentina CONAE y la Universidad Nacional de Córdoba. Su trabajo y publicaciones en revistas se centran en temas como distribución espacio-temporal de mosquitos, ecología urbana, enfermedades transmitidas por vectores, y aplicaciones de teledetección para monitoreo y evaluación ambiental.

Editor, corrector de estilo.

Héctor M. Di Benedetto. Ingeniero Civil, egresado de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEfYN); y Magister en Dirección de Negocios de la Facultad de Ciencias Económicas de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Es Profesor Titular por concurso de Matemática en la FCEfYN de la UNC. Ha participado en diversos proyectos de investigación, en el área de hidrología, demografía, aplicaciones matemáticas en biología y enseñanza de la matemática. Desde 2016 dirige un grupo de investigación dedicado al estudio del proceso de enseñanza-aprendizaje de la matemática y el desarrollo de alternativas didácticas aplicadas a contenidos clave, con el que ha realizado diversas presentaciones y ponencias en congresos y reuniones científicas. En el campo profesional ha trabajado en distintas áreas dentro de las incumbencias de su formación de grado y posgrado.

Editor, corrector de estilo.

Francisco F. Ludueña-Almeida. Profesor en Ciencias Biológicas, Biólogo y Doctor en Ciencias Biológicas por la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). Es Profesor Titular por concurso de Matemática en las Carreras de Ciencias Biológicas y Profesorado en Ciencias Biológicas de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, de la misma universidad. Se desempeña como Director del Departamento de Matemática en dicha Facultad. Es docente-investigador Categoría 1. Ha realizado publicaciones nacionales e internacionales en la temática de ecología de insectos. Dirige un proyecto de investigación interdisciplinario denominado "Aplicaciones matemática a la biología" y participa como investigador en proyectos de la misma temática desarrollados en el Centro de Investigaciones Entomológicas de Córdoba (CIEC) en el IIByT, codependiente del CONICET y de la UNC.

Co-Responsable de la idea, edición del manuscrito original, administración de fondos.