

Densificación urbana en ciudades intermedias de zonas áridas.

Interacciones forma-temperatura en el área metropolitana de Mendoza

Urban densification in intermediate arid cities.

Interactions of form-temperature in the Mendoza metropolitan area

Densificação urbana em cidades áridas intermediárias.

Interações forma-temperatura em da área metropolitana de Mendoza

Densification urbaine dans les villes intermédiaires arides.

Interactions forme-température de la zone métropolitaine de Mendoza

Fuente: Autoría propia

Autores

PUBLICACIÓN ANTICIPADA EN LÍNEA:

El Comité Editorial de la Revista Bitácora Urbano Territorial aprobó este artículo para publicación según los veredictos emitidos por los pares evaluadores.

Se publica anticipadamente en versión PDF de forma provisional con base en la última versión electrónica del artículo. Siéntase libre de descargar, usar, distribuir y citar esta versión preliminar tal y como lo indicamos, pero recuerde que la versión final puede ser diferente.

Paginación por definir

María Belén Sosa

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET - CCT Mendoza

msosa@mendoza-conicet.gob.ar
<https://orcid.org/0000-0002-0141-442X>

Erica Correa

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) CONICET - CCT Mendoza

ecorrea@mendoza-conicet.gob.ar
<https://orcid.org/0000-0003-1690-076X>

Recibido: 24/07/2025
 Aprobado: 23/10/2025

Cómo citar este artículo:

Sosa, M. B. y Correa, E. (2025).
 Densificación urbana en ciudades intermedias de zonas áridas.
 Interacciones forma-temperatura en el Área Metropolitana de Mendoza. Bitácora Urbano Territorial, 35(III): XX-XX.
<https://doi.org/10.15446/bitacora.v35n3.120142>

Resumen

Un tercio de la población mundial habita en urbes con climas cálidos y áridos, cuyas condiciones para bioclimatizar los espacios exteriores e interiores son demandantes. En este contexto, la evaluación de los efectos de la forma urbana sobre el microclima resulta fundamental para el desarrollo urbano sostenible. El presente estudio persigue analizar y cuantificar las interacciones forma-temperatura del aire exterior, en el contexto de una ciudad árida y cálida en proceso de expansión y densificación. Para ello, se realiza una evaluación del impacto térmico del cambio de la densidad edilicia y la compacidad considerando diversas formas de tramas a escala de barrio. Se modela y ajusta el comportamiento microclimático de 3 barrios utilizando el software ENVI-met. Los resultados muestran que, el aumento de la densidad no necesariamente compromete el desempeño térmico, y que mantener un valor constante de compacidad disminuye el impacto térmico dentro de un barrio. Este estudio busca promover la evaluación y el diagnóstico microclimático en áreas urbanas consolidadas y en desarrollo, como herramienta clave para definir estrategias que reduzcan los efectos de la urbanización sobre el clima, el consumo energético, la salud y calidad de vida de los ciudadanos.

Palabras clave: calor, planificación urbana, urbanización, temperatura

Autores

María Belén Sosa

Doctora en Ciencias por la UNSA Argentina. Magíster en Arquitectura Sostenible y Eficiencia Energética, Universidad Ramón Llull-La Salle, Barcelona. Investigadora Asistente de CONICET en el CCT Mendoza, Argentina. Dirige la Maestría en Ciudad, Urbanismo y Hábitat Sostenible de la Universidad de Congreso.

Erica Correa

Doctora en Ciencias, Área Energías Renovables por la Universidad Nacional de Salta, Argentina. Es Investigadora Principal de CONICET y co-dirige el Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE) en el CCT Mendoza, Argentina. Es docente de posgrado y grado en universidades públicas y privadas.

Abstract

One third of the world's population lives in cities with hot and arid climates, whose conditions for bioclimatizing outdoor and indoor spaces are demanding. In this context, the evaluation of the effects of urban form on the microclimate is fundamental for sustainable urban development. This study aims to analyze and quantify the interactions between form and temperature of outdoor air in the context of a hot, arid city undergoing expansion and densification. For this purpose, an evaluation of the thermal impact of the change in building density and compactness is carried out considering different forms of plots at the neighborhood scale. The microclimatic behavior of 3 neighborhoods is modeled and adjusted using ENVI-met software. The results show that increasing density does not necessarily compromise thermal performance, and that maintaining a constant value of compactness decreases the thermal impact within a neighborhood. This study seeks to promote microclimatic assessment and diagnosis in consolidated and developing urban areas as a key tool to define strategies to reduce the effects of urbanization on climate, energy consumption, health and quality of life of citizens.

Keywords: heat, urban planning, urbanization, temperature

Résumé

Un tiers de la population mondiale vit dans des villes au climat chaud et aride, dont les conditions de bioclimatisation des espaces extérieurs et intérieurs sont exigeantes. L'évaluation des effets de la forme urbaine sur le microclimat est fondamentale pour le développement urbain durable. Cette étude vise à analyser et quantifier les interactions entre forme et température de l'air extérieur dans le contexte d'une ville chaude et aride en pleine expansion et densification. À cette fin, une évaluation de l'impact thermique de l'évolution de la densité et de la compacité des bâtiments est réalisée en considérant différentes formes de grilles à l'échelle du quartier. Le comportement microclimatique de trois est modélisé et ajusté à l'aide du logiciel ENVI-met. Résultats montrent que l'augmentation de la densité ne compromet pas nécessairement la performance thermique, et que le maintien d'une valeur constante de compacité diminue l'impact thermique au sein d'un quartier. Cette étude vise à promouvoir l'évaluation et le diagnostic microclimatique dans les zones urbaines consolidées et en développement en tant qu'outil clé pour définir des stratégies visant à réduire les effets de l'urbanisation sur le climat, la consommation d'énergie, la santé et la qualité de vie.

Resumo

Um terço da população mundial vive em cidades com climas quentes e áridos, cujas condições de bioclimatização dos espaços exteriores e inteiros são exigentes. Neste contexto, a avaliação dos efeitos da forma urbana no microclima é fundamental para o desenvolvimento urbano sustentável. Este estudo tem como objetivo analisar e quantificar as interações entre forma e temperatura do ar externo no contexto de uma cidade quente e árida em expansão e densificação. Para o efeito, é efectuada uma avaliação do impacto térmico da alteração da densidade e compacidade dos edifícios, considerando várias formas de grelha à escala do bairro. O comportamento microclimático de 3 bairros é modelado e ajustado utilizando o software ENVI-met. Os resultados mostram que o aumento da densidade não compromete necessariamente o desempenho térmico, e que a manutenção de um valor constante de compacidade diminui o impacto térmico num bairro. Este estudo pretende promover a avaliação e o diagnóstico microclimático em áreas urbanas consolidadas e em desenvolvimento, como ferramenta fundamental para a definição de estratégias de redução dos efeitos da urbanização no clima, no consumo de energia, na saúde e na qualidade de vida dos cidadãos.

Palavras-chave: calor, planejamento urbano, urbanização, temperatura



Mots-clés : chaleur, urbanisme, urbanisation, température

Introducción

En 2023, la temperatura global alcanzó su nivel más alto registrado, con un aumento de 1.48°C respecto a la época preindustrial (Copernicus, 2024). Se estima que, para mediados de siglo, la población urbana expuesta a temperaturas extremas —por encima de 35°C en promedio durante el verano— aumentará en un 800% (C40, 2021). Un modelo desarrollado por Zhao et al., (2021) proyecta que, para el año 2100, las ciudades podrían experimentar un incremento de hasta 4°C en su temperatura promedio, superando más del doble del límite establecido por el Acuerdo de París.

El objetivo de este estudio es analizar las interacciones forma–temperatura del aire exterior, generadas en el entorno urbano de una ciudad árida y cálida en desarrollo y expansión. Se busca cuantificar el impacto térmico asociado al aumento de la densidad y la variación de la compacidad a escala de barrio, evaluando distintas formas urbanas y su influencia en las condiciones térmicas locales durante el verano.

Este panorama subraya la importancia del clima urbano, especialmente para las poblaciones que están expuestas a condiciones extremas. Al planificar un entorno urbano, el tipo de clima debe ser una consideración prioritaria, ya que el objetivo principal es crear espacios que respondan a las necesidades del hábitat humano. La planificación urbana es un proceso complejo y multidimensional, en el que, con frecuencia, se priorizan las características socioeconómicas sobre los factores climáticos y ambientales en las políticas y decisiones adoptadas (Dzramado et al., 2024).

A nivel mundial, se calcula que un tercio de la población habita en zonas urbanas con climas cálidos y áridos, donde los efectos del calentamiento global ocasionan problemas de salud cada vez más frecuentes e intensos. En ciudades de zonas áridas resulta crucial estudiar los impactos que la forma urbana tiene sobre las condiciones microclimáticas, dada su demanda de adaptación a un entorno climático riguroso (Mahmoud et al., 2021; Ibrahim et al., 2021; Galal et al., 2020).

Uno de los principales desafíos que enfrentan las áreas urbanas es la limitada capacidad de disipación del calor, debido a las restricciones de su propia expansión sobre el territorio y consumo de suelo (Lemoine-Rodríguez et al., 2022). Los flujos de calor dentro de las ciudades varían espacialmente y son heterogéneos entre diferentes barrios. Por lo tanto, la forma urbana emerge como un factor clave para comprender los sistemas urbanos, ya que refleja la eficiencia con que se configuran el uso del suelo, los recursos, el transporte y la infraestructura, así como el impacto de las actividades humanas sobre el entorno (Ibrahim et al., 2021).

Morganti (2021) sostiene que los efectos de la forma urbana sobre el microclima son cruciales para la adaptación de las ciudades al cambio climático, aunque aún existen desafíos significativos para identificar indicadores confiables de la forma urbana que puedan guiar el diseño de ciudades sensibles al clima. Por ello, la introducción de herramientas de evaluación y diagnóstico microclimático en los procesos de planificación puede ser clave para definir estrategias orientadas a mejorar las condiciones térmicas exteriores y reducir los efectos negativos de la urbanización en el clima, la salud y la calidad de vida de los habitantes.

El objetivo de este estudio es analizar las interacciones forma–temperatura del aire exterior, generadas en el entorno urbano de una ciudad árida y cálida en desarrollo y expansión. Se busca cuantificar el impacto térmico asociado al aumento de la densidad y la variación de la compacidad a escala de barrio, evaluando distintas formas urbanas y su influencia en las condiciones térmicas locales durante el verano.

Marco Teórico

Las ciudades áridas y cálidas, como las que se encuentran en regiones del Medio Oriente, América del Sur y el norte de África, enfrentan retos específicos relacionados con el clima debido a su alta exposición a temperaturas extremas y su limitado acceso a recursos hídricos. La expansión urbana en estos contextos donde aumenta la demanda de espacio y en algunos casos se genera una mayor concentración de edificaciones, impacta de manera directa sobre el microclima urbano. Uno de los elementos centrales en el estudio del microclima es la temperatura del aire exterior, que varía considerablemente dependiendo de la configuración del entorno —forma urbana—.

Se conoce que la forma urbana, como la altura de los edificios, la orientación de las calles y la densidad de las edificaciones, tiene un impacto directo sobre la radiación solar, la circulación del aire y la acumulación de calor (Arque García, 2021; Nieto et al., 2019). En particular, las calles estrechas y las altas concentraciones de edificios pueden generar un efecto de ‘cañón de calor’, donde el aire caliente queda atrapado en los espacios urbanos reduciendo la ventilación natural y elevando las temperaturas (Jurado Camacho, 2023; Mercado Maldonado, 2022).

En la planificación urbana contemporánea, la transformación de áreas urbanas en entornos más sostenibles y habitables se ha convertido en un tema central. En este contexto, parámetros como la densidad y la compacidad urbana son ampliamente discutidos por la comunidad científica (Ávalos, 2022; Vicuña del Río, 2020).

En un contexto de ciudad árida, la densificación puede acentuar la vulnerabilidad al calor extremo, exacerbando las temperaturas nocturnas. De acuerdo con estudios de Park et al. (2021), las áreas urbanas de alta densidad, con poco espacio abierto y muchas superficies impermeables, tienden a generar microclimas más calurosos debido a la limitada capacidad de enfriamiento por evapotranspiración y la mayor acumulación de calor en las superficies. Según estudios de Heris et al. (2023) y Teller (2021), la densificación puede tener efectos duales sobre el microclima: por un lado, puede incrementar la exposición a altas temperaturas como se discutió previamente, pero por otro, una distribución más densa de las edificaciones podría reducir la exposición directa a la radiación solar y mejorar la eficiencia del uso del espacio urbano.

La compacidad urbana hace referencia a la proximidad y disposición de los edificios, según los estudios de Nieto et al., (2019), un diseño compacto y la incorporación de elementos urbanos que favorezcan la ventilación natural, como pasajes abiertos o áreas verdes, puede mitigar el impacto térmico y mejorar las condiciones de confort térmico en ciudades densas.

A escala de barrio, la densidad y la compacidad afectan la distribución de la temperatura del aire exterior, esto, combinado con el impacto térmico de la forma de la trama urbana, representa un desafío a abordar por estudios en diferentes contextos climáticos. Existen investigaciones donde se demuestra que factores como la altura de los edificios, la densidad de vegetación y la orientación de las calles pueden influir en las temperaturas locales, afectar la distribución de la radiación solar, el flujo de aire y las sombras en los barrios, generando zonas de confort o de incomodidad térmica en las áreas urbanas (Costa et al., 2024; Li et al., 2022; Deniz & Terzi, 2021).

Por ello la densificación debe ser cuidadosamente planificada, ya que, aunque la concentración de edificaciones puede optimizar el uso del espacio, también puede generar efectos térmicos negativos si no se integra adecuadamente la ventilación y las sombras en el diseño urbano.

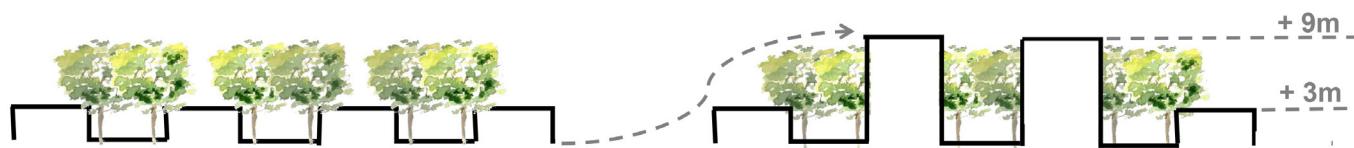
A pesar de los avances, aún existen pocas investigaciones que comparan los efectos de distintas configuraciones de densificación de zonas urbanas de ciudades intermedias con climas áridos y cálidos. Este estudio busca aportar a ese vacío, explorando cuantitativamente, mediante simulaciones, cómo la combinación de diversas densidades, compacidades y tramas urbanas influye en el microclima a escala de barrio. El objetivo final es generar evidencia científica que se traduzca luego en estrategias de planificación urbana sostenible.

Metodología

Este estudio se basa en investigaciones previas en las que se caracterizaron y monitorearon térmicamente tres barrios de baja densidad durante un periodo estival. Posteriormente, se modeló y ajustó su comportamiento microclimático utilizando el software ENVI-met (Sosa et al., 2018). Estos estudios preliminares permiten avanzar y profundizar la investigación, con el objetivo de detectar cómo y en qué medida la temperatura del aire exterior se ve alterada al incrementar la densidad edificatoria y modificar la compacidad construida en áreas urbanas consolidadas, como los barrios de baja densidad. La Figura 1 resume el proceso descrito.

Descripción del Área de Estudio

El estudio se lleva a cabo en el Área Metropolitana de Mendoza (AMM), una ciudad intermedia ubicada en la



Caso base

Barrio baja densidad
Viviendas de un nivel

Figura 1. Proceso metodológico de generación de escenarios.

Fuente: Elaboración propia.

Nuevos escenarios

Barrio media densidad
Viviendas de 1 nivel + Edificios de 3 niveles

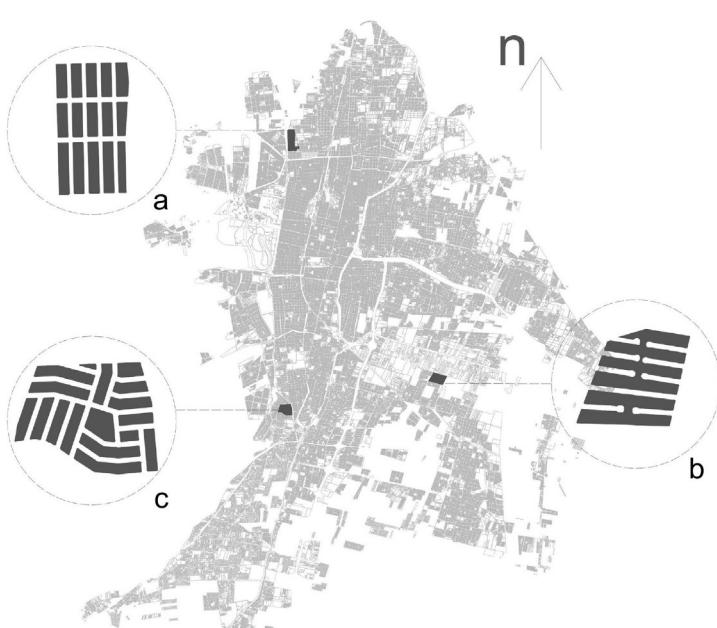


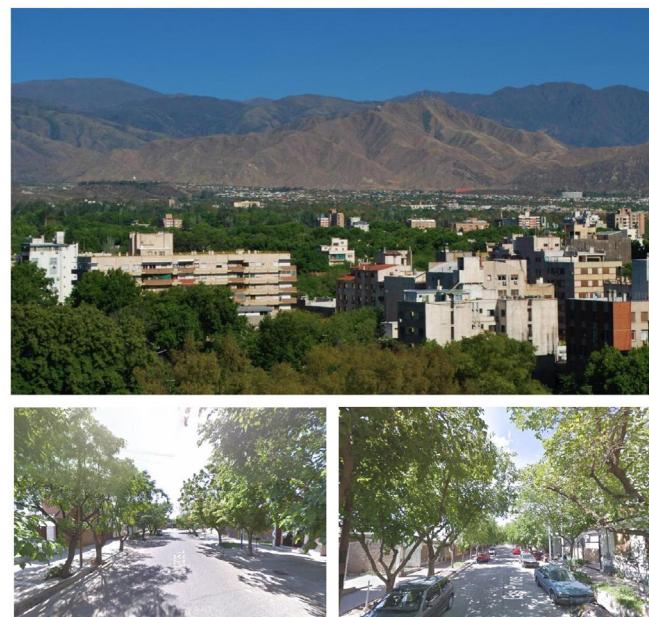
Figura 2. Imágenes de Mendoza, plano AMM y planimetría de los barrios monitoreados (a. racional, b. cul-de-sac, c. orgánica)

Fuente: Elaboración propia.

región centro-oeste de Argentina, a una latitud de 32° 40'S, longitud 68° 51'W y a 750 metros sobre el nivel del mar. Su clima es árido, caracterizado por escasas precipitaciones y una alta heliofanía, clasificado BWk. El 69% de la superficie total es árida. Las zonas de oasis irrigados cubren el 5% del territorio y concentran el 98% de los núcleos urbanos.

Desde el punto de vista urbano el AMM presenta un modelo de tipo 'abierto', que resulta de la superposición y coordinación de tres elementos: manzanas regulares, calles forestadas de 16 m, 20 m y 30 m de ancho, y áreas verdes –plazas y parques– integradas en la trama. La Figura 2 muestra una imagen aérea del AMM.

Actualmente, la estructura original está siendo modificada por los procesos de desarrollo y crecimiento expansivo



de la mancha urbana, el incremento de procesos de segregación residencial, la reconversión de fincas productivas del oasis irrigado en barrios cerrados, y la densificación de las áreas consolidadas. Como resultado, la ocupación del territorio se presenta de manera heterogénea, con marcadas variaciones en la forma de la trama, la orientación, la densidad y la compacidad (CIPPEC, 2019).

Escenarios Urbanos y Aplicación de Estrategias de Enfriamiento

Este trabajo se enfoca en identificar y cuantificar el impacto térmico que genera densificar áreas urbanas consolidadas. Para diseñar los escenarios urbanos se mantuvieron constantes variables y parámetros de tipo morfológicos, materiales y forestales. Esta condición resulta indispensable a fin de poder contrastar el comportamiento térmico entre los diferentes escenarios.

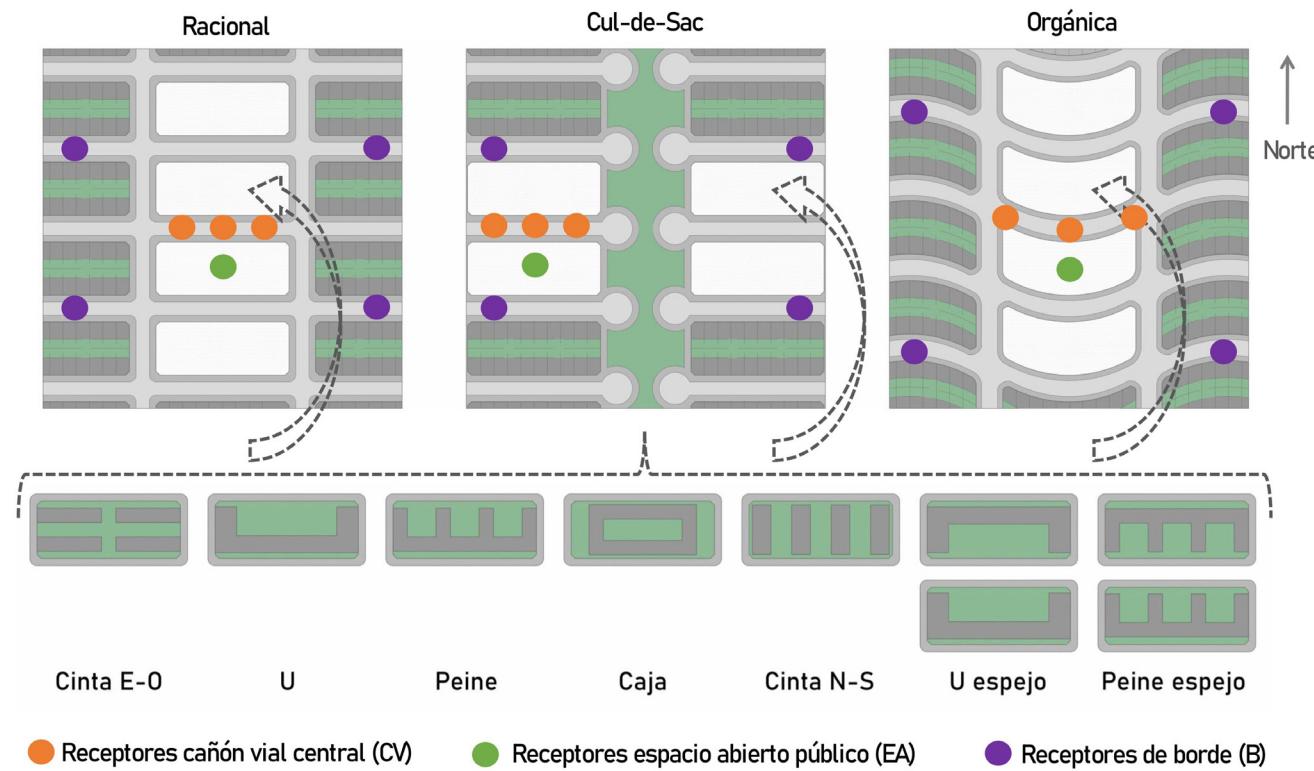


Figura 3. Diseño de los escenarios urbanos.

Fuente: Elaboración propia.

tamiento térmico resultante. Los valores utilizados se rigen dentro del marco de la Ley de Loteo de Mendoza (4341/78).

Desde los aspectos morfológicos se dispuso un área de 250 m x 250 m donde se combinan tres formas de trama —racional, cul-de-sac y orgánica—, que fueron anteriormente identificadas y monitoreadas en el territorio del AMM. En cada trama los diseños poseen los siguientes parámetros: ancho de calle de 20 m, manzana de 110 x 50 m, orientación principal de las manzanas Este-Oeste. Desde los aspectos materiales, se fijaron valores de albedos de las superficies expuestas, siendo 0.7 en techos, 0.3 en paredes y 0.5 en calles. En cuanto a los aspectos forestales se dispusieron árboles de alineación de segunda magnitud (*Morus alba*), implantados de manera regular —cada 6 m— en ambos lados de cada calle, esta magnitud resulta apropiada para coexistir con el ancho de calle de 20 m de acuerdo a las investigaciones locales.

Dentro de cada escenario se disponen y combinan dos densidades de viviendas: un nivel (3 m de altura), y edificios residenciales de 3 niveles (9 m de altura). En términos de compacidad, o distribución de las viviendas y edificios, se ubicaron dentro de cada una de las 3 tramas, 4 manzanas centrales donde se implantan los edificios, las manzanas con viviendas de un nivel se mantuvieron

en los bordes de cada escenario. Los valores de compacidad —relación entre llenos y vacíos— en las manzanas de baja densidad (viviendas) tienen un valor de 0.65, y en las manzanas de media densidad (edificios) es de 0.45.

En cuanto al diseño de las formas de huella de los edificios, se desarrollaron cuatro alternativas que generan un total de siete combinaciones: cinta orientada este-oeste y norte-sur, forma de 'U', forma de 'U' en espejo, peine, peine en espejo y caja. Los criterios para la selección de estas formas se basan en ofrecer una diversidad de opciones, manteniendo al mismo tiempo constantes los valores de densidad y compacidad tanto dentro de cada manzana como en el conjunto del barrio. Esta variedad de formas también permite evaluar el impacto de la orientación de los edificios y cuantificar cómo estas variaciones afectan el comportamiento térmico exterior a escala barrial, sin modificar la densidad. Los escenarios generados facilitan la comparación efectiva de los resultados de las simulaciones térmicas; por ello, se eligieron configuraciones que conservan estos parámetros, variando únicamente en su distribución y agrupamiento. La Figura 3 presenta los diseños de los escenarios según tipo de trama, junto con la identificación de las manzanas de media densidad, las diferentes huellas de edificios a analizar, así como la ubicación de los receptores de simulación, que serán explicados en el siguiente apartado.

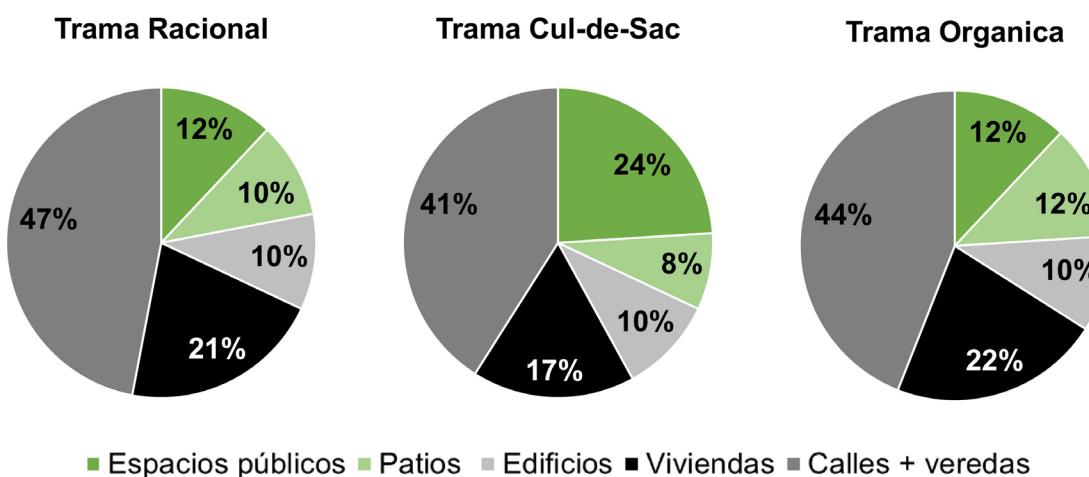


Figura 4. Superficies de las áreas diferenciadas por forma de trama

Fuente: Elaboración propia.

Escenarios Urbanos y Simulación en ENVI-met

Los escenarios urbanos fueron modelados en el software microclimático tridimensional ENVI-met. La forma de funcionamiento de ENVI-met está basada en las leyes fundamentales de la mecánica de fluidos, la termodinámica y la física atmosférica general, trabaja a escala urbana dentro de un ciclo diario. Su propósito es simular las interacciones entre el aire y las superficies de un entorno urbano. Los límites del modelo —horizontal superior y el límite vertical a barlovento— actúan como una interfaz entre el modelo 1D y el modelo 3D. El área núcleo a simular es un volumen en tres dimensiones (X, Y, Z) representado gráficamente mediante 'n' módulos dentro de una grilla. Cada módulo (ΔX , ΔY , ΔZ) es parte de una edificación, vegetación, o espacio abierto. Las áreas de anidación conforman una 'zona de amortiguación', que actualiza los valores iniciales de las variables en el borde del área del núcleo del modelo 3D, con el fin de evitar perturbaciones numéricas. Las áreas de anidación se extienden al doble de los obstáculos más altos en el área del modelo.

De manera particular, este estudio validó cada escenario de acuerdo a un ajuste previo contrastando los datos microclimáticos obtenidos *in situ* en los 3 casos base (Sosa et al., 2018). Cada archivo de área de trabajo se generó con grillas de 86 x 86 y celdas de 3 x 3 m, dejando cuatro celdas vacías perimetrales como áreas de anidamiento, conformando así un área horizontal total de simulación de 258 m x 258 m. Dentro de esta área de simulación, se dispusieron un total de ocho receptores en cada escena-

rio, siendo su distribución del siguiente modo: tres a lo largo del cañón vial central de media densidad; uno en el centro del espacio público abierto alrededor de los edificios, y cuatro en las áreas de baja densidad. La Figura 3 indica la ubicación de los receptores dentro de cada forma de trama simulada.

Resultados y Discusión

Comportamiento Térmico de los Escenarios Urbanos

En cuanto a la combinación de las siete formas de huella de edificio con los tres tipos de trama, se generaron un total de 21 escenarios. La Figura 4 detalla las superficies y los porcentajes correspondientes a cada tipo de trama, clasificados en cinco categorías: espacios públicos, patios, edificios, viviendas, y calles + veredas.

Al analizar los valores, se observa que el porcentaje de edificios dentro de cada tipo de trama permanece homogéneo (10%). Las diferencias se hacen más evidentes en la categoría de espacios públicos abiertos, donde la trama cul-de-sac posee el doble de superficie en comparación con las tramas racional y orgánica (24% frente a 12%). Otro aspecto relevante es que el porcentaje de patios varía entre el 8% y el 12%, dependiendo de la cantidad de manzanas de baja densidad presentes en cada escenario, siendo mayor en la trama orgánica y menor en la trama cul-de-sac. Finalmente, al comparar las categorías de vi-

Forma de trama	Cinta E-O °C	Cinta N-S °C	"U" °C	"U" espejo °C	Peine °C	Peine espejo °C	Caja °C	Caso base °C	Temp. del aire	
Racional	38.0	38.1*	38.0	38.1	37.8*	38.0	37.9	38.2	Máx.	CV
	25.8	25.6*	25.9	25.8	25.9*	25.8	25.8	25.7	Mín.	
	31.3	31.3*	31.4	31.3	31.2*	31.3	31.2	31.4	Prom.	
	38.2	38.3*	37.9	38.4	37.7*	38.4	37.8	-	Máx.	EA
	25.8	25.6*	26.0	25.9	26.0*	25.9	26.0	-	Mín.	
	31.4	31.3*	31.4	31.5	31.3*	31.5	31.4	-	Prom.	
	38.5	38.2*	38.5	38.5	38.3*	38.5	38.3	38.5	Máx.	B
	25.8	25.7*	25.9	25.9	25.7*	25.9	26.0	25.7	Mín.	
	31.4	31.3*	31.5	31.5	31.4*	31.5	31.4	31.5	Prom.	
Cul-de-sac	39.7•	39.3	39.5•	39.3	39.3	39.2	39.5	38.6	Máx.	CV
	26.1•	26.1	26.3•	26.3	26.2	26.2	26.1	25.5	Mín.	
	32.3•	32.1	32.3•	32.2	32.2	32.1	32.2	31.3	Prom.	
	40.0•	39.3	39.1•	39.0	38.9	38.9	38.9	-	Máx.	EA
	26.1•	26.1	26.4•	26.4	26.3	26.3	26.3	-	Mín.	
	32.5•	32.1	32.2•	32.2	32.1	32.1	32.1	-	Prom.	
	39.4•	39.3	39.5•	39.5	39.3	39.3	39.3	38.3	Máx.	B
	26.2•	26.2	26.3•	26.3	26.3	26.3	26.2	25.5	Mín.	
	32.3•	32.1	32.3•	32.3	32.2	32.2	32.2	31.2	Prom.	
Orgánica	37.9	38.4	38.2	38.2	37.9	38.1	38.0	38.2	Máx.	CV
	25.9	25.7	25.9	25.9	25.9	25.8	25.8	25.7	Mín.	
	31.4	31.4	31.5	31.5	31.3	31.4	31.3	31.5	Prom.	
	37.9	38.4	38.1	38.4	37.9	38.2	37.9	-	Máx.	EA
	26.0	25.6	26.0	26.0	26.0	25.9	26.0	-	Mín.	
	31.4	31.4	31.5	31.6	31.3	31.5	31.4	-	Prom.	
	37.9	38.2	38.2	38.2	38.0	38.0	38.0	38.0	Máx.	B
	26.0	25.8	25.9	26.0	25.9	25.9	25.9	25.8	Mín.	
	31.4	31.4	31.5	31.5	31.4	31.4	31.4	31.4	Prom.	

*escenarios más frescos, • escenarios más cálidos

Tabla 1. Comportamiento térmico de los 21 escenarios.

Fuente: Elaboración propia.

viendas, y calles + veredas, no se encuentran diferencias significativas entre los escenarios.

Para analizar y contrastar el comportamiento térmico de cada escenario simulado, se llevaron a cabo tres etapas de análisis: el cañón vial central, que representa el comportamiento promedio de los tres receptores ubicados en la calle central del barrio (CV); el espacio abierto público, que corresponde al espacio abierto central en las manzanas de edificios de media densidad (EA), y los bordes de baja densidad, que reflejan el comportamiento promedio de los cuatro receptores ubicados en los bordes del barrio (B). La Figura 3 muestra la distribución y referencia de los receptores descriptos.

La Tabla 1 presenta los valores de la temperatura del aire en el espacio exterior para los 21 escenarios correspondientes a cada etapa de análisis. Asimismo, se incluyen los comportamientos térmicos de los casos base de baja densidad para facilitar la comparación de los resultados. Es importante aclarar que el caso base no tiene una respuesta térmica que se pueda comparar en el EA, ya que los escenarios de baja densidad originalmente no contemplaban un área común, sino que mantenían la distribución de los patios individuales de cada vivienda.

Los resultados de la Tabla 1 permiten identificar que la forma de trama que presenta las temperaturas más altas en las tres etapas de análisis es la cul-de-sac. Esto puede explicarse por el hecho de que, aunque esta forma tiene el mayor porcentaje de espacio abierto público (24% del total del barrio), carece de la cantidad y distribución adecuada de vegetación para sombrear las superficies expuestas durante las horas de mayor insolación. Como consecuencia, se acumula una gran cantidad de radiación que no se disipa durante la noche. En contraste, los comportamientos térmicos más frescos se observan en la trama racional combinada con los edificios de tipo 'cinta N-S' y 'peine'. Esta forma de trama presenta una distribución más equilibrada entre los espacios abiertos públicos (12%) y los patios de las viviendas (10%), lo que favorece el intercambio radiante nocturno.

Los resultados obtenidos de los análisis de temperatura en los distintos escenarios muestran cómo y en cuánto las diversas formas urbanas simuladas afectan y modifican el microclima a escala de barrio. A continuación, se discuten las implicaciones de estos resultados, con un enfoque particular en los patrones térmicos observados en cada etapa de análisis:

Análisis del Cañón Vial (CV)

En el análisis del cañón vial, se observa que las configuraciones de forma de trama racional (con edificios 'peine'

y 'cinta N-S') presentan temperaturas ligeramente más frescas en comparación con el caso base de baja densidad. Las temperaturas máximas en estos escenarios son más bajas en 0.4°C y 0.1°C, respectivamente, lo que sugiere que la disposición racional de los edificios, con calles más anchas y mayor apertura hacia el flujo de aire, facilita la disipación del calor y mejora la circulación del aire, contribuyendo a generar un leve enfriamiento.

Por otro lado, el escenario de mayor calentamiento corresponde a las formas urbanas tipo cul-de-sac, especialmente con configuraciones de edificios en 'cinta E-O', 'U' y 'U espejo'. Estas configuraciones presentan un aumento en la temperatura máxima y promedio, de hasta +1.4°C y +1.1°C, respectivamente, en comparación con el caso base. Esto se puede atribuir a la geometría cerrada de estos espacios, que limita la circulación del aire y, por lo tanto, favorece la acumulación de calor. La falta de ventilación adecuada y la disposición cerrada de los edificios contribuyen a la creación de un microclima más cálido.

Análisis del Espacio Abierto Público (EA)

En cuanto al análisis del espacio abierto público, los resultados muestran que la trama racional sigue siendo la más favorable en términos térmicos. Los escenarios con edificios tipo 'peine' y 'cinta N-S' mantienen temperaturas relativamente bajas, con un máximo de 37.7°C y 38.3°C, respectivamente, lo que indica que estos tipos de trama permiten una mejor gestión de la radiación solar y una mayor dispersión del calor. La disposición de los edificios en estas configuraciones puede generar sombras más efectivas y una distribución más equilibrada de la radiación, lo que favorece la reducción de las temperaturas.

En contraste, los escenarios con formas urbanas tipo cul-de-sac presentan temperaturas más altas, con máximas que alcanzan hasta los 40°C en el caso de los edificios 'cinta E-O'. Al igual que en el análisis del cañón vial, estos resultados indican que la forma cerrada y la falta de permeabilidad al flujo de aire generan zonas de acumulación de calor, especialmente en los espacios abiertos públicos, donde la exposición directa al sol puede ser más prolongada.

Análisis del Borde (B)

Finalmente, en el análisis de los bordes del barrio, los resultados siguen una tendencia similar. Los escenarios densificados con trama racional, como los edificios 'peine' y 'cinta N-S', son más frescos en comparación con los escenarios de baja densidad. Las diferencias en las temperaturas máximas y promedio son leves (-0.3°C a -0.2°C), pero son indicativas de un ligero efecto positivo de la forma de la trama racional en la reducción de las temperaturas en los bordes.

Por el contrario, los escenarios más cálidos en el borde son los de tipo cul-de-sac, con los edificios 'U' y 'U espejo'. Estos escenarios experimentan un incremento considerable en las temperaturas máximas, mínimas y promedio, con aumentos de hasta +1.2°C, +0.8°C y +1.1°C, respectivamente, en comparación con el caso base de baja densidad. La forma cerrada de estos bordes parece contribuir a un mayor aislamiento térmico, donde el calor se acumula y se disipa con mayor lentitud, lo que incrementa las temperaturas en estas áreas.

Implicancias para la Planificación de Formas Urbanas Sensibles al Clima Árido y Cálido

La planificación urbana constituye un aspecto fundamental en el diseño de entornos urbanos sostenibles y resilientes. Algunos estudios han propuesto directrices morfológicas para el diseño de calles, que incluyen vegetación y los materiales utilizados para pavimentar y sellar superficies (Cárdenas-Jirón et al., 2023).

Los resultados de este estudio subrayan la importancia de abordar a la forma urbana como reguladora del microclima a escala de barrio. Las calles, como componentes fundamentales de la estructura urbana, son elementos que presentan una menor susceptibilidad a cambios dentro de los barrios consolidados. En este sentido, la orientación de las calles desempeña un papel determinante en la configuración de la orientación de las manzanas circundantes, lo que influye directamente en la distribución del espacio urbano (Tojo et al., 2022; Morganti, 2021). A pesar de que la orientación de las calles se mantuvo constante en los 21 escenarios analizados, se evidenció que, bajo condiciones de igual ancho de calle y orientación, las diferencias térmicas son significativas al modificar la disposición de las formas urbanas. Este hallazgo resalta la influencia de la configuración espacial en las condiciones térmicas locales y la necesidad de considerar estos aspectos en el diseño urbano para optimizar la habitabilidad y la eficiencia energética en entornos urbanos áridos a semejanza de lo indicado en Galal et al., (2020).

En lo que respecta a la combinación de tramas y huellas de edificios, los estudios para ciudades en contextos áridos y cálidos planificadas con calles abiertas y forestadas, muestran que las formas urbanas más abiertas y racionales contribuyen a un microclima más fresco. Como es el caso de las tramas con edificios en 'peine' o 'cinta N-S', que ofrecen ventajas térmicas al permitir una mayor circulación del aire y una distribución más uniforme de la radiación solar. En contraste, las configuraciones cerradas, como las tramas cul-de-sac con edificios en 'U' o 'cinta E-O', tienden a generar un microclima más cálido debido a la limitación de la ventilación y la acumulación de calor en espacios más reducidos.

Esto subraya la necesidad de considerar a la combinación entre la forma urbana y la orientación de calles y edificios como factores clave en el diseño urbano para mitigar los efectos del calor en ciudades con procesos de densificación. En coincidencia con Rifat et al. (2024), se observa que, debido al aumento de la urbanización y la expansión de las áreas de asentamiento a lo largo del tiempo, las superficies impermeables han aumentado y los valores de la temperatura de la superficie terrestre también han incrementado. En este sentido, se recomienda implementar estrategias de planificación que promuevan una mejor circulación del aire y la creación de áreas sombreadas, por ser fundamentales para reducir los efectos negativos del aumento de la temperatura en áreas urbanas de zonas áridas.

Aunque los resultados presentados en este estudio se derivan de una metodología basada en enfoques de simulación, estos se alinean con los hallazgos de Manshadi et al., (2024), quienes concluyen que comprender adecuadamente las relaciones causales en la planificación urbana sensible al clima implica adoptar un enfoque integral, apoyada por la modelización dinámica, para poder evaluar de manera precisa las interacciones entre los componentes urbanos y sus efectos en el microclima.

Limitaciones y Replicabilidad del Estudio

Este estudio presenta algunas limitaciones asociadas a las condiciones homogéneas de materialidad y cobertura vegetal, lo que restringe la generalización de los resultados a contextos urbanos más complejos. Pese a ello, la metodología propuesta es replicable en otras ciudades de clima árido o semiárido, siempre que se adapten los parámetros locales. Su aplicación permite comparar configuraciones urbanas bajo criterios estandarizados y avanzar hacia enfoques más integrales, contribuyendo al diseño de formas urbanas sensibles al clima de cada ciudad.

Conclusiones

El presente estudio ha permitido explorar cómo la interacción entre la forma urbana, la densidad, y la compactación, influyen en el microclima de áreas urbanas en climas áridos y cálidos. Lo analizado permite identificar aspectos clave que contribuyen a una mejor comprensión de la relación entre el diseño urbano y las condiciones térmicas exteriores.

La densificación de áreas urbanas de baja densidad no necesariamente conduce a un aumento de las tempera-

turas durante períodos estivales. Por el contrario, ciertos escenarios densificados, particularmente aquellos con formas de trama racional y edificios dispuestos en configuraciones como ‘cinta N-S’ y ‘peine’, mostraron un desempeño térmico similar al caso base de baja densidad. Esto sugiere que, si se implementa de manera controlada, la densificación puede tener efectos neutros o incluso beneficiosos para el microclima urbano, sin generar un deterioro significativo en las temperaturas exteriores.

La forma influye directamente en el comportamiento térmico de las áreas urbanas. Mientras que algunas configuraciones, como las tramas racionales, permiten un flujo de aire adecuado y mejor distribución de la radiación solar, otras formas de tramas, como las de cul-de-sac con edificios en forma de ‘U’ o ‘U espejo’, pueden generar un aumento en las temperaturas máximas, mínimas y promedios. Este hallazgo refuerza la importancia de considerar tanto la densidad como la disposición y la orientación de los edificios al momento de planificar un barrio, ya que estos factores afectan directamente la acumulación de calor y la circulación del aire.

El estudio también demostró que la compacidad, cuando se mantiene constante dentro de cada manzana, tiene un efecto importante en la reducción del impacto térmico. Sin embargo, las diferencias observadas entre las formas de huella de los edificios indicaron que ciertas configuraciones, como la ‘cinta N-S’ y el ‘peine’, fueron más eficaces para mitigar las altas temperaturas, debido a una mayor exposición al flujo de aire y a una mejor distribución de las sombras sobre el espacio exterior. A pesar de esto, la forma ‘cinta N-S’ limita la posibilidad de aprovechar la orientación norte para bioclimatizar los espacios interiores de los edificios, lo cual puede ser un factor a considerar en términos de eficiencia energética a nivel de diseño arquitectónico.

Lo expuesto pone de manifiesto la compleja interacción entre forma y clima en el entorno urbano, donde su comportamiento no se puede representar con una sola variable o indicador. Se subraya la necesidad de adoptar enfoques integrales en la planificación urbana, que no solo considere la densidad y la compacidad, sino que también integre aspectos relacionados con la orientación, la forma de la trama urbana y la disposición de los edificios. Este trabajo plantea la discusión desde la perspectiva de la necesidad de incluir nuevos enfoques y análisis de la forma urbana, y sus indicadores, que contribuyan a sintetizar las variables para comprender los mecanismos de intercambio térmico exterior y el impacto microclimático que generan en una región determinada.

Este estudio contribuye a comprender cómo la forma urbana influye en el microclima y ofrece pautas prácticas para que la planificación de los barrios contemple la

variable climática. La combinación adecuada de forma, densidad y compacidad en los diseños urbanos puede desempeñar un papel clave en la reducción de los efectos del calor y en la mejora de la calidad de vida de sus habitantes en las ciudades del futuro.

Referencias

- ARQUE GARCÍA, J. (2021).** *Guía de rehabilitación climática: Estrategias de adaptación frente al sobrecalentamiento urbano: Caso de estudio barrio Poblenou* [Proyecto final de máster oficial]. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona, Centre de Política del Sòl i Valoracions. <http://hdl.handle.net/2117/357233>
- ÁVALOS, P. (2022).** *Aproximaciones conceptuales sobre densidad y forma urbana* (pp. 1–218). Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/203096/CONICET_Digital_Nro.174269ba-01d3-4a40-abfa-4242424e58de_L.pdf?se-quence=6&isAllowed=y
- C40. (2021).** *Heat resilient cities: Measuring benefits of urban heat adaptation.* <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/HeatResilient-Cities-Measuring-benefits-of-urban-heatadaptation>
- CÁRDENAS-JIRÓN, L., GRAW, K., GANGWISCH, M., & MATZARAKIS, A. (2023).** Influence of street configuration on human thermal comfort and benefits for climate-sensitive urban planning in Santiago de Chile. *Urban Climate*, 47, 10136. <https://doi.org/10.1016/j.ulclim.2022.10136>
- CIPPEC. (2019).** *Hacia el desarrollo urbano integral del área metropolitana de Mendoza (municipio).* <https://www.cippec.org/wp-content/uploads/2019/03/Serie-planificACCI%C3%93N-%C3%81rea-Metropolitana-de-Mendoza-1.pdf>
- COPERNICUS. (2024).** *January climate bulletins.* <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2024-world-experienced-warmest-january-record>
- COSTA, I., WOLLMANN, C., WRITZL, L., IENSSE, A., DA SILVA, A., DE FREITAS BAUMHARDT, O., DENIZ, E., & TERZI, F. (2021).** Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: The case of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*, 73, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103128>
- DZRAMADO, E. D., ASIEDU, R. O., OWUSU-MANU, D. G., EDWARDS, D. J., ADESI, M., & ACHEAMONG, A. (2024).** Exploring the socioeconomic factors affecting green cities development. *Smart and Sustainable Built Environment*. <https://doi.org/10.1108/SASBE-01-2024-0018>
- GALAL, O. M., SAILOR, D. J., & MAHMOUD, H. (2020).** The impact of urban form on outdoor thermal comfort in hot arid environments during daylight hours: Case study New Aswan. *Building and Environment*, 184, 107222. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107222>
- HERIS, M. P., MULLER, B., & WILSON, A. M. (2023).** Why does planning matter in microclimate management and urban heat mitigation? *Journal of Planning Education and Research*, 43(2), 371–387. <https://doi.org/10.1177/0739456X19883000>
- IBRAHIM, Y., KERSHAW, T., SHEPHERD, P., & COLEY, D. (2021).** On the optimisation of urban form design, energy consumption and outdoor thermal comfort using a parametric workflow in a hot arid zone. *Energies*, 14(13), 4026. <https://doi.org/10.3390/en14134026>
- JURADO CAMACHO, C. (2023).** *Caracterización del movimiento de aire en cañones y su impacto térmico en el clima urbano* [Trabajo fin de máster inédito]. Universidad de Sevilla. <https://hdl.handle.net/11441/149847>
- LEMOINE-RODRÍGUEZ, R., INOSTROZA, I., & ZEPP, H. (2022).** Does urban climate follow urban form? Analyzing intraurban LST trajectories versus urban form trends in three cities with different background climates. *Science of The Total Environment*, 830, 154570. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154570>
- LI, J., WANG, Y., & XIA, Y. (2022).** A novel geometric parameter to evaluate the effects of block form on solar radiation towards sustainable urban design. *Sustainable Cities and Society*, 84, 104001. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104001>
- MAHMOUD, H., GHANEM, H., & SODOUDI, S. (2021).** Urban geometry as an adaptation strategy to improve outdoor thermal performance in hot arid regions: Aswan University as a case study. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102965. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102965>
- MANSHADI, Z., PARIVAR, P., SOTOUEH, A., & SHARIFABADI, A. (2024).** Modeling urban growth effects on carrying capacity in arid and semi-arid regions using system dynamics. *Ecological Modelling*, 487, 110565. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110565>
- MORGANTI, M. (2021).** Energia, densità, forma della città compatta mediterranea. *L'Industria delle Costruzioni*, 482, 86–99. <https://www.lindustriadellecotruzioni.it/riviste/energia-densita-forma-della-citta-compatta-mediterranea/>
- NIETO, K., RODRÍGUEZ, L., MOUTHON, S., & MANJARRES DE LEÓN, J. (2019).** Microclima y confort térmico urbano. *Módulo Arquitectura - CUC*, 23(1), 49–88. <https://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.23.1.2019.04>
- PARK, Y., GULDAMM, J., & LIU, D. (2021).** Impacts of tree and building shades on the urban heat island: Combining remote sensing, 3D digital city and spatial regression approaches. *Computers, Environment and Urban Systems*, 88, 101655. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101655>
- RIFAT, O., CHENG, C., & COSEO, P. (2024).** Nature-based solutions scenario planning for climate change adaptation in arid and semi-arid regions. *Land*, 13(9), 1464. <https://doi.org/10.3390/land13091464>
- SOSA, M. B., CORREA, E., & CANTON, M. A. (2018).** Neighborhood designs for low-density social housing energy efficiency: Case study of an arid city in Argentina. *Energy and Buildings*, 168, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.042>
- TELLER, J. (2021).** Regulating urban densification: What factors should be used? *Buildings and Cities*, 2(1), 302–317. <https://doi.org/10.5334/bc.123>
- TOJO, J. E., GARCÍA, E. H., LÓPEZ, E. R., & MENÉNDEZ, E. P. (2022).** *Guía para planificar ciudades saludables*. Federación Española de Municipios y Provincias.
- VICUÑA DEL RÍO, M. (2020).** Densidad y sus efectos en la transformación espacial de la ciudad contemporánea: Cinco tipologías para interpretar la densificación residencial intensiva en el área metropolitana de Santiago. *Revista* 180, 45, 112–126. [https://doi.org/10.32995/rev180.num-45.\(2020\).art-659](https://doi.org/10.32995/rev180.num-45.(2020).art-659)
- ZHAO, L., OLESON, K., BOU-ZEID, E., KRAYENHOFF, E. S., BRAY, A., ZHU, Q., ET AL. (2021).** Global multi-model projections of local urban climates. *Nature Climate Change*, 11, 152–157. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00958-8>