

Adaptación al cambio climático a través del diseño urbano: evaluación de microclimas en l'Eixample y La Mina, Barcelona

Blanca Carolina Sifuentes-Muñoz¹ | Santiago Acosta Salazar² | Yasmina Gil Golobart³ | Blanca Arellano-Ramos⁴

Recibido: 11-12-2023 | Versión final: 29-10-2024

Resumen

Las áreas urbanas enfrentan desafíos crecientes derivados del cambio climático, como el aumento de las temperaturas y la disminución del confort térmico en los espacios públicos. Este estudio investiga cómo el diseño urbano afecta el microclima y contribuye a la resiliencia climática. La investigación se centra en dos barrios contrastantes de Barcelona: l'Antiga Esquerra de l'Eixample, caracterizado por un tejido urbano denso, con pocos espacios públicos y escasa vegetación, y La Mina, que se distingue por sus espacios abiertos, abundante vegetación y edificios dispersos. Se analizaron indicadores urbanísticos y climáticos en ambos casos, utilizando datos de teledetección (Landsat 8 y Sentinel 2) para calcular la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST) y el índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Además, se realizó una simulación microclimática con el software ENVI-met, evaluando parámetros como el albedo, la permeabilidad del suelo y el tipo de vegetación. Los resultados indican que La Mina tiene un mejor desempeño climático gracias a su menor densidad, mayor cobertura vegetal y superficies más permeables, lo que se traduce en temperaturas más bajas y un confort térmico superior. Estos hallazgos destacan la relevancia de la morfología urbana, la vegetación y la permeabilidad en la configuración de los microclimas, subrayando el potencial del diseño urbano como herramienta para fortalecer la resiliencia climática. Las conclusiones de este estudio ofrecen una base para futuras iniciativas de planificación urbana orientadas a la creación de ciudades más sostenibles y resilientes.

Palabras clave: microclima urbano; cambio climático; resiliencia urbana; ENVI-met

Citación

Sifuentes-Muñoz, B.C. *et al.* (2024). Adaptación al cambio climático a través del diseño urbano: Evaluación de microclimas en l'Eixample y La Mina, Barcelona. *ACE: Architecture, City and Environment*, 19(56), 12530. <https://doi.org/10.5821/ace.19.56.12530>

Climate Change Adaptation Through Urban Design: Microclimate Assessment in l'Eixample and La Mina, Barcelona

Abstract

Urban areas face increasing challenges due to climate change, such as rising temperatures and reduced thermal comfort in public spaces. This study examines how urban design affects the microclimate and contributes to climate resilience. The research focuses on two contrasting neighborhoods in Barcelona: l'Antiga Esquerra de l'Eixample, characterized by a dense urban fabric with few public spaces and limited vegetation, and La Mina, characterized by open spaces, abundant vegetation, and dispersed buildings. In both cases, urban and climatic indicators were analyzed using remote sensing data (Landsat 8 and Sentinel 2) to calculate Land Surface Temperature (LST) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). A microclimatic simulation was carried out using the ENVI-met software to evaluate parameters such as albedo, soil permeability, and vegetation type. The results show that La Mina performs better climatically due to its lower density, greater vegetation cover, and more permeable surfaces, resulting in lower temperatures and better thermal comfort. These findings highlight the importance of urban morphology, vegetation, and permeability in shaping microclimates, and underline the potential of urban design as a tool to enhance climate resilience. The conclusions of this study provide a basis for future urban design initiatives aimed at creating more sustainable and resilient cities.

Keywords: urban microclimate; climate change; urban resilience; ENVI-met

¹ Arquitecta, Máster en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica e Investigadora Predoctoral FPU, CPSV-UPC (ORCID: [0000-0002-6343-0097](https://orcid.org/0000-0002-6343-0097)), ² Arquitecto, Máster en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica, UPC, ³ Arquitecta, Máster en Gestión y Valoración Urbana y Arquitectónica, UPC ⁴ Dra. Arquitecta, Profesora Lectora Serra Hunter TA-UPC e Investigadora CPSV-UPC (ORCID: [0000-0001-7128-3667](https://orcid.org/0000-0001-7128-3667), WoS ResearcherID: [I-7710-2016](https://orcid.org/I-7710-2016), Scopus Author ID: [57200179787](https://orcid.org/57200179787)). Correo de contacto: blanca.carolina.sifuentes@upc.edu

1. Introducción

La urbanización y el cambio climático son dos fenómenos de alto impacto que convergen para generar riesgos críticos en las ciudades. Según proyecciones recientes, el calentamiento global alcanzará 1,5 °C entre 2030 y 2052 y podría superar los 3 °C hacia finales del siglo XXI, si se mantienen los compromisos actuales de los gobiernos nacionales. Estos cambios climáticos tendrán efectos profundos en los entornos urbanos, donde las altas densidades y configuraciones espaciales no solo moldean el microclima local, sino que también exacerban los riesgos asociados al cambio climático (UN-HABITAT; IPCC, 2014). En este escenario, las estrategias de adaptación que refuercen la resiliencia urbana son esenciales para garantizar un desarrollo sostenible.

El diseño urbano desempeña un papel fundamental en la configuración del microclima de las ciudades, debido a la interacción entre diversos elementos. El tejido urbano, compuesto por materiales constructivos y naturales, determina propiedades radiativas, térmicas y de humedad de las superficies, influyendo en su capacidad de absorber, reflejar y emitir calor. Los cambios en la cobertura superficial —como suelos vegetales, permeables o impermeables— afectan el balance energético y la humedad. Asimismo, la disposición de edificios y otros elementos arquitectónicos altera los flujos de viento y el enfriamiento convectivo, con un impacto significativo en las condiciones microclimáticas locales (Oke et al., 2017). Si bien los factores climáticos regionales y globales son relevantes, los elementos a escala local o de microescala, como la vegetación, la topografía, las propiedades térmicas de las superficies y la intensidad de las actividades antropogénicas, son determinantes para entender cómo se configuran los microclimas urbanos.

Entre las variables más relevantes para el estudio del microclima urbano destaca la Land Surface Temperature (LST), un indicador clave para comprender el ambiente térmico urbano y sus variaciones. Este parámetro está directamente influenciado por la composición de las cubiertas del suelo, como áreas edificadas, superficies impermeables y vegetación. La vegetación, en particular, juega un papel crítico en la regulación del microclima, y su influencia puede cuantificarse mediante el Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), índice que mide la cantidad y calidad de la vegetación (Arellano y Roca, 2015). Los avances en tecnologías de teledetección han facilitado el análisis de estas variables, utilizando sensores como Landsat y MODIS para LST, y Sentinel para NDVI, permitiendo un nivel de detalle suficiente para estudios urbanos (Arellano et al., 2018). Estas herramientas han demostrado ser eficaces para evaluar cómo la estructura urbana, los materiales de superficie y la cobertura vegetal influyen en la distribución del calor en entornos urbanos.

Esta investigación tiene como objetivo analizar la influencia del diseño urbano en la configuración del microclima y su impacto en el confort térmico, tomando como casos de estudio dos barrios contrastantes de Barcelona: l'Antiga Esquerra de l'Eixample y La Mina. Estos espacios representan contextos urbanos opuestos en términos de densidad, vegetación y estructura morfológica, lo que permite explorar cómo dichas características influyen en las condiciones térmicas locales. A diferencia de estudios anteriores que se han centrado en variables individuales o en áreas específicas, este trabajo adopta un enfoque integral que combina análisis de teledetección y simulaciones en ENVI-met. Este enfoque no solo permite validar las diferencias en la regulación térmica entre los dos barrios, sino también identificar estrategias que puedan fortalecer la resiliencia climática en ciudades mediterráneas. Por ejemplo, investigaciones recientes han demostrado que el uso combinado de infraestructuras verdes y azules puede mejorar significativamente el confort térmico en áreas residenciales, especialmente bajo condiciones de calor extremo (Cao et al., 2022).

El avance de herramientas como ENVI-met ha transformado las posibilidades de modelar el microclima urbano, proporcionando simulaciones detalladas sobre el impacto del diseño urbano en el confort térmico. Este software ha sido ampliamente utilizado para evaluar estrategias como la disposición estratégica de vegetación, el uso de materiales con alto albedo y la creación de corredores verdes, que ayudan a mitigar las islas de calor urbanas y mejoran el flujo de aire en entornos densamente urbanizados (Ali-Toudert y Mayer, 2007; Huttner y Bruse, 2009). Además, estudios han validado la eficacia de incorporar elementos como techos verdes y pavimentos permeables para

reducir la temperatura superficial y mejorar las condiciones térmicas en el espacio público (Shashua-Bar et al., 2011). Por otro lado, las simulaciones también han demostrado cómo la configuración de la vegetación y los materiales de superficie contribuyen a modificar significativamente las dinámicas térmicas urbanas, alineándose con estrategias de adaptación basadas en evidencia científica (Fariña Tojo, 2007; Givoni, 1998).

La combinación de herramientas de teledetección con modelos interactivos como ENVI-met ofrece un marco metodológico integral para analizar las interacciones entre diseño urbano y regulación microclimática. Este enfoque no solo amplía la comprensión científica de los procesos térmicos urbanos, sino que también aporta soluciones prácticas para fomentar ciudades más sostenibles y resilientes frente al cambio climático. De esta manera, esta investigación proporciona bases teóricas y metodológicas que integran la planificación urbana con estrategias adaptativas, reforzando la capacidad de las ciudades para enfrentar los desafíos climáticos actuales y futuros.

2. Datos y métodos

La investigación combinó técnicas de teledetección, simulación microclimática y análisis de indicadores urbanísticos para evaluar cómo el diseño urbano y la vegetación influyen en el microclima de los barrios de l'Antiga Esquerra de l'Eixample y La Mina. Este enfoque metodológico se estructuró en tres etapas principales: adquisición y procesamiento de datos, cálculo de indicadores urbanísticos y modelado microclimático, detallados a continuación.

2.1 Fuentes de datos y adquisición

Se utilizaron imágenes satelitales y datos climáticos para analizar la LST y el NDVI:

- *LST*

Las imágenes satelitales fueron obtenidas del sensor Landsat 8 OLI/TIRS desde el portal del USGS (US Geological Survey). Corresponden al 4 de agosto de 2018, el día más caluroso registrado ese año según la estación meteorológica de El Raval. Se utilizaron las bandas térmicas 10 y 11, aplicando el algoritmo de conversión de radiancia a temperatura superficial corregido por emisividad. La resolución espacial resultante fue de 30 m, tras interpolar las bandas térmicas, permitiendo un análisis detallado de las áreas urbanas.

- *NDVI*

Las imágenes provinieron del satélite Sentinel 2 MSI, descargadas desde el portal Copernicus Open Access Hub (European Space Agency) del día 4 de agosto de 2018 y a una resolución de 10 m (mejor resolución que Landsat 8). El NDVI se calculó utilizando las bandas NIR (banda 8) y Red (banda 4) mediante la fórmula estándar:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Estos datos permitieron identificar la cantidad y calidad de vegetación en cada área.

Para los datos meteorológicos necesarios para la simulación microclimática, se utilizaron las mediciones de la estación meteorológica de El Raval (Servicio meteorológico de Cataluña, METEOCAT), incluyendo temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa.

No se realizaron mediciones de campo debido a las restricciones de movilidad impuestas durante el confinamiento por la pandemia de COVID-19. Ambos conjuntos de datos fueron procesados y analizados con el software ArcGIS Pro, generando mapas temáticos que describen la distribución espacial de las variables en las áreas de estudio.

2.2 Indicadores urbanísticos

Los indicadores urbanísticos y datos cartográficos se obtuvieron a través de los ayuntamientos de Barcelona y Sant Adrià de Besòs. Se analizaron los siguientes aspectos:

- Superficie y densidad: Se calculó la densidad de población (habitantes por hectárea) utilizando datos censales y mapas catastrales.
- Distribución del suelo: Se clasificaron las áreas como públicas o privadas a partir de información del planeamiento urbanístico local y bases de datos oficiales.
- Cobertura de suelo y permeabilidad: La clasificación de superficies permeables e impermeables se realizó mediante imágenes de alta resolución y trabajo de campo previo.
- Superficies verdes: Se midieron las áreas verdes sobre y bajo rasante¹ a partir de mapas y ortofotos, y se calcularon los porcentajes respecto a la superficie total.

Estos indicadores fueron organizados en tablas comparativas para identificar diferencias entre las áreas de estudio y establecer correlaciones con el desempeño climático.

2.3 Simulación microclimática con ENVI-met

Se utilizó el software ENVI-met (versión 4.4.5) para modelar el comportamiento microclimático de las dos áreas seleccionadas (Bruse & Team ENVI-met, 2022). Los modelos se configuraron en una retícula de 200 x 200 m con celdas de 2 m, utilizando como parámetros iniciales para la simulación:

- Condiciones meteorológicas:
 - Los valores iniciales correspondieron al día 4 de agosto de 2018, incluyendo:
 - Temperatura del aire: 34 °C.
 - Velocidad del viento: 3.6 m/s.
 - Humedad relativa: 38 %
- Propiedades de las superficies:
 - Suelos impermeables: Asfalto y concreto.
 - Suelos permeables: Césped y arena.
 - Albedo: 0.15 para el asfalto y 0.30 para el césped.
- Vegetación: Se incluyeron especies arbóreas y vegetación baja según su ubicación y cobertura en cada área reportada en mapas y ortofotos.

Las simulaciones generaron mapas de temperatura del aire y Predicted Mean Vote (PMV), índice que mide el confort térmico humano en condiciones exteriores que varía entre -4 (muy frío) y +4 (muy cálido). Los resultados fueron procesados con ArcGIS Pro para su visualización y análisis.

3. Casos de estudio

3.1 L'Antiga Esquerra de l'Eixample

Ubicado en el distrito de l'Eixample histórico de Barcelona, este barrio es un ejemplo de alta densidad urbana y planificación tradicional de manzana cerrada. Diseñado por Cerdà en 1855, l'Eixample es conocido por su geometría regular y sus manzanas ortogonales con espacios interiores destinados, originalmente, a jardines o patios comunitarios. Actualmente el barrio se ha desarrollado como una zona predominantemente residencial y comercial, donde los espacios abiertos han sido reemplazados en gran medida por usos privados y superficies impermeables.

¹ La superficie verde sobre rasante se refiere a la vegetación visible y accesible directamente a nivel de terreno o por encima de este, por ejemplo, parques, jardines y árboles ubicados en vía pública. La superficie bajo rasante corresponde a la vegetación plantada en estructuras situadas por debajo del nivel del suelo urbano circundante, por ejemplo, techos ajardinados en edificios subterráneos o aparcamientos.

El área de estudio abarca una retícula de 400x400m y tiene una densidad de población de 343 hab/ha. Está delimitada por las calles Rosselló, Balmes, Valencia y Muntaner (Figura 1). Esta selección incluye nueve manzanas representativas del tejido urbano típico de l'Eixample.

La superficie impermeable (asfalto y concreto) es predominante (99,05%), mientras que las superficies permeables (césped y arena) representan sólo el 0,95%. Las áreas verdes sobre rasante alcanzan 12.300m², lo que representa un 7,7% de la superficie total. La vegetación se concentra en pequeños jardines y aceras arboladas, con poca capacidad para influir en el microclima.

Figura 1. L'Antiga Esquerra de l'Eixample



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales ESRI.

3.2 La Mina

En contraste, La Mina se encuentra en la periferia de Barcelona, en el municipio de Sant Adrià de Besòs. Este barrio fue construido entre 1957 y 1975 y fue destinado a realojar la población residente en barracas y chabolas en el frente litoral de Barcelona. Actualmente está conformado por bloques de edificios aislados, con abundantes espacios abiertos y vegetación. La densidad poblacional es de 140,59 hab/ha. El área de estudio es una retícula de 400x400m, que abarca 12 manzanas y está delimitada por las calles Venezuela, Alfons el Magnànim, Lull y Puigcerdà (Figura 2).

Figura 2. La Mina



Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales ESRI.

Las áreas públicas ocupan el 68,94% del suelo, mientras que el 31,06% corresponde a áreas privadas. Este predominio de espacio público favorece la implementación de estrategias climáticas. Las superficies permeables (césped y arena) representan el 7,03% del total, lo que contribuye a un mejor

drenaje y a la moderación de temperaturas superficiales. Como parte de las superficies impermeables en el área se encuentra el caucho ubicado en zonas de juegos infantiles. Mientras que en L'Eixample predomina el suelo impermeable, en La Mina existe una mezcla entre ambos.

A diferencia de l'Eixample, La Mina tiene una mayor cobertura vegetal, alcanzando $62.500m^2$, equivalente al 39% del área total. La vegetación se encuentra distribuida de manera homogénea, con corredores verdes y una rambla central que actúan como elementos clave para la regulación térmica.

A continuación, se presenta la imagen que muestra la distribución de las coberturas de suelo en l'Antiga Esquerra de l'Eixample y La Mina (Figura 3). Esta imagen ilustra cómo se distribuyen las superficies impermeables, permeables y las zonas verdes en ambos barrios.

- *L'Antiga Esquerra de l'Eixample:*

La imagen evidencia la predominancia de superficies impermeables y construidas, con áreas verdes limitadas a aceras y pequeños vacíos de manzana.

- *La Mina:*

En cambio, la imagen resalta una mayor proporción de superficies permeables y zonas verdes, particularmente en la rambla central y en las áreas públicas.

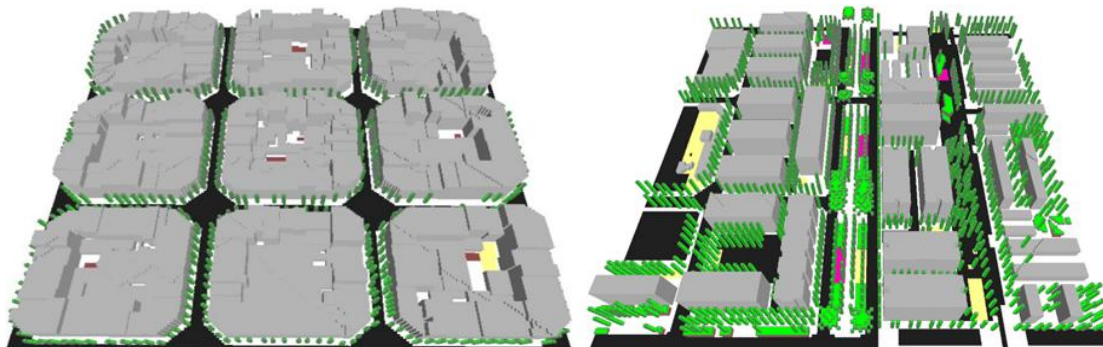
Figura 3. Coberturas de suelo, l'Eixample y La Mina



Fuente: Elaboración propia a partir de Cartografía topográfica del ICGC escala 1:1.000 y Google Street view

Este plano de coberturas de suelo, además de ofrecer una visualización detallada del uso del espacio urbano, sirvió como base para la creación de los modelos 3D utilizados en las simulaciones de ENVI-met (Figura 4). Gracias a estos modelos, fue posible analizar la distribución de las temperaturas superficiales y evaluar cómo el diseño urbano y la vegetación influyen en el microclima local.

Figura 4. Modelo 3D para simulación en ENVI-met, l'Eixample y La Mina



Fuente: Elaboración propia.

4. Análisis

4.1 Indicadores urbanísticos

La evaluación de los indicadores urbanísticos tradicionales (Arellano et al., 2018) ayudó a comprender la morfología de cada tejido a partir de aspectos cuantitativos (Tabla 1, 2) y la comparación entre ambas áreas de estudio proporcionó una mejor perspectiva a considerar en el comportamiento del microclima urbano.

Tabla 1. Indicadores urbanísticos, pt.1

Casos de estudio	Superficie m^2	Densidad hab/ha	Suelo público m^2	Suelo privado m^2	% Público	% Privado	Superficie construida m^2	Edif. Bruta	Edif. Neta
L'Eixample	160.000	343	59.601	100.399	37,25	62,75	732.582	4,58	7,30
La Mina	160.000	140,59	110.306	49.694	68,94	31,06	232.643	1,45	4,68

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Indicadores urbanísticos, pt.2

Casos de estudio	Huella Edif. m^2	Espacio abierto m^2	% Huella	% Espacio abierto	Superficie permeable m^2	% Superficie permeable	Sup. Verde bajo rasante m^2	Sup. Verde sobre rasante m^2	Ratio
L'Eixample	95.141	64.859	59,46	40,54	1.520	0,95	1.080	12.300	11,38
La Mina	41.681	118.319	26,05	73,95	11.247	7,03	4.574	62.500	13,66

Fuente: Elaboración propia

Según estos datos, es posible concluir lo siguiente:

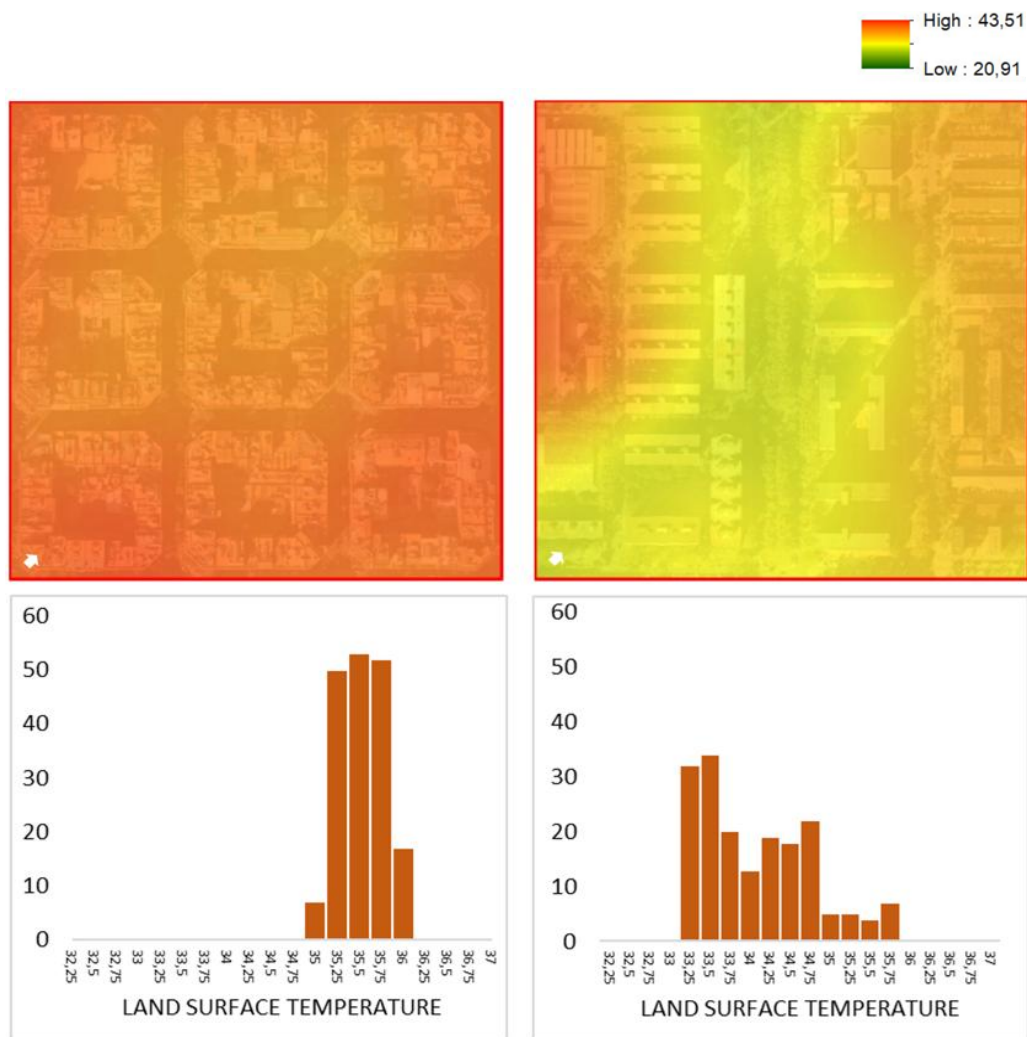
- L'Eixample es un tejido más denso que La Mina (343 hab/ha respecto a 140,59 hab/ha.)
- La edificabilidad bruta en La Mina (1,45) es más baja que en l'Eixample (4,58).
- El suelo público en La Mina ocupa un mayor porcentaje del área (68,94%) respecto a un 37,25% en l'Eixample.
- Los espacios abiertos ocupan un mayor porcentaje en La Mina (73,95%) mientras que en l'Eixample ocupan un 40,54%.
- El porcentaje de superficie permeable en La Mina también es mayor (7,03%) respecto a un 0,95% en l'Eixample
- La superficie verde sobre rasante en La Mina ($62.500m^2$) es mucho mayor que en l'Eixample ($12.300m^2$).
- La superficie verde bajo rasante en La Mina ($4.574m^2$) es mucho mayor que en l'Eixample ($1.080m^2$).

Desde un punto de vista urbanístico, todos los indicadores sugieren un mejor desempeño climático en La Mina: su tejido es menos denso en comparación con l'Eixample, cuenta con una menor área construida, una mayor proporción de espacios públicos abiertos y un porcentaje más elevado de permeabilidad en el suelo. Además, dispone de una mayor cantidad de superficies verdes, tanto sobre como bajo rasante.

4.2 Análisis de teledetección

La temperatura superficial en l'Eixample es bastante homogénea en todo su tejido urbano, con valores que oscilan entre 35 °C y 36 °C, y una media de 35,4 °C. Por el contrario, en La Mina se observa una reducción notable de la temperatura en la rambla central, asociada a la mayor cantidad de espacios abiertos y zonas arbóreas (Figura 5).

Figura 5. Comparación LST diurna L'Eixample vs. La Mina



Fuente: Elaboración propia a partir de Landsat 8.

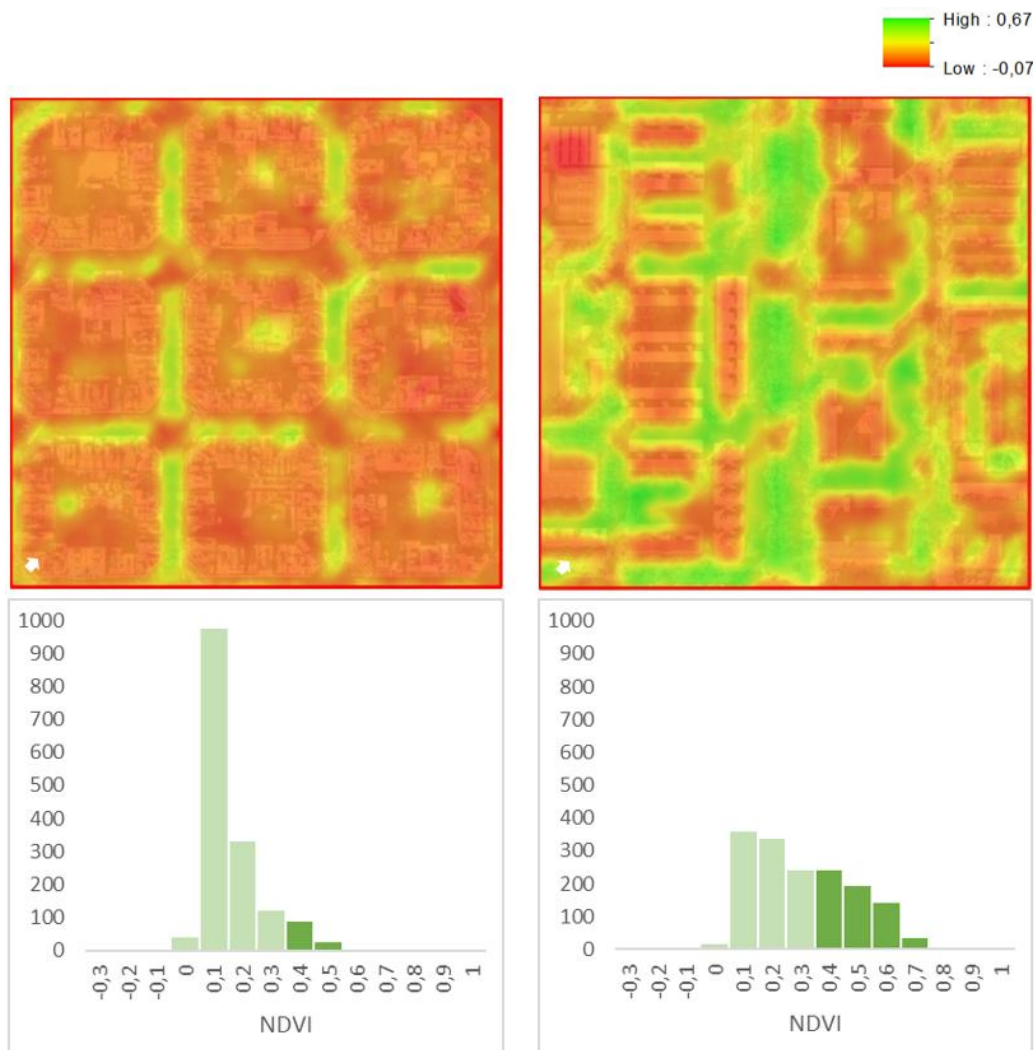
La distribución del histograma, más desplazada hacia la izquierda, evidencia una mayor variación térmica y temperaturas inferiores, que fluctúan entre 33 °C y 36 °C, con una media de 33,93 °C (Figura 5). Esto sugiere que una menor densidad, combinada con una mayor proporción de espacios abiertos y vegetación abundante, mejora significativamente la LST a nivel de microescala.

En L'Eixample, las imágenes satelitales muestran una vegetación escasa, localizada principalmente en las aceras y pequeños vacíos en los centros de las manzanas. En contraste, en La Mina la vegetación es abundante, destacando en la rambla central, junto con grandes masas arbóreas distribuidas de manera homogénea a lo largo del tejido urbano.

L'Eixample presenta valores de NDVI predominantemente bajos, entre 0 y 0,3, correspondientes a vegetación dispersa, suelos desnudos o vegetación muerta, mientras que los valores superiores a 0,4, asociados con vegetación vigorosa y abundante, son muy escasos. Esto genera un promedio de NDVI de 0,11 para el barrio.

Por su parte, La Mina muestra un promedio de NDVI de 0,25, reflejando una vegetación mucho más abundante, atípica para zonas urbanas. Aunque predominan valores entre 0 y 0,3, La Mina presenta una proporción significativamente mayor de valores superiores a 0,4, evidenciando una notable diferencia en la cantidad y calidad de la vegetación respecto a L'Eixample (Figura 6).

Figura 6. Comparación NDVI verano L'Eixample vs. La Mina



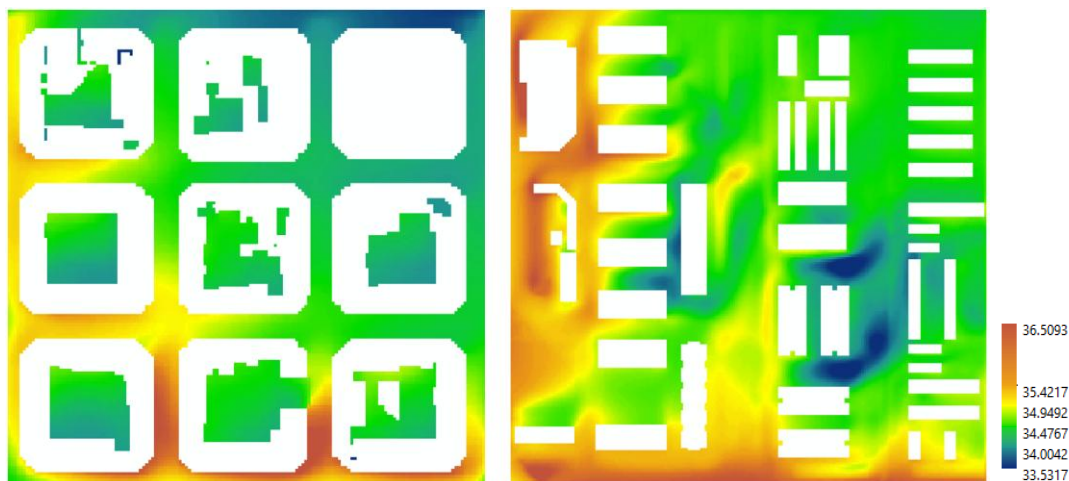
Fuente: Elaboración propia a partir de Sentinel 2.

4.3 Simulación microclimática con ENVI-met

En l'Eixample, las temperaturas del aire oscilan entre 34.47 °C y 35.42 °C. Las zonas interiores de las manzanas presentan temperaturas ligeramente más bajas (34.47 °C) en comparación con las vialidades, que alcanzan valores máximos de hasta 36.5 °C en algunas áreas. Este fenómeno se explica por la predominancia de materiales impermeables con bajo albedo, como el asfalto, especialmente en las vías públicas. Además, la vegetación es insuficiente, tanto sobre como bajo rasante, para generar un efecto significativo de enfriamiento. La configuración densa y cerrada del tejido urbano contribuye a mantener la uniformidad térmica en la mayor parte del área.

Por otro lado, en La Mina predominan temperaturas de aire alrededor de 34.47 °C, y en espacios abiertos centrales se registran valores más bajos, entre 34 °C y 33.53 °C. Esto se debe a la presencia de vegetación abundante y diversa, así como al diseño más abierto del tejido urbano. En zonas como la rambla central y sus vialidades adyacentes, la combinación de superficies impermeables (arena y caucho) y vegetación genera un mejor comportamiento térmico. Sin embargo, en áreas con mayor cantidad de asfalto y menor vegetación, como el extremo izquierdo e inferior, las temperaturas alcanzan hasta 36.5 °C (Figura 7).

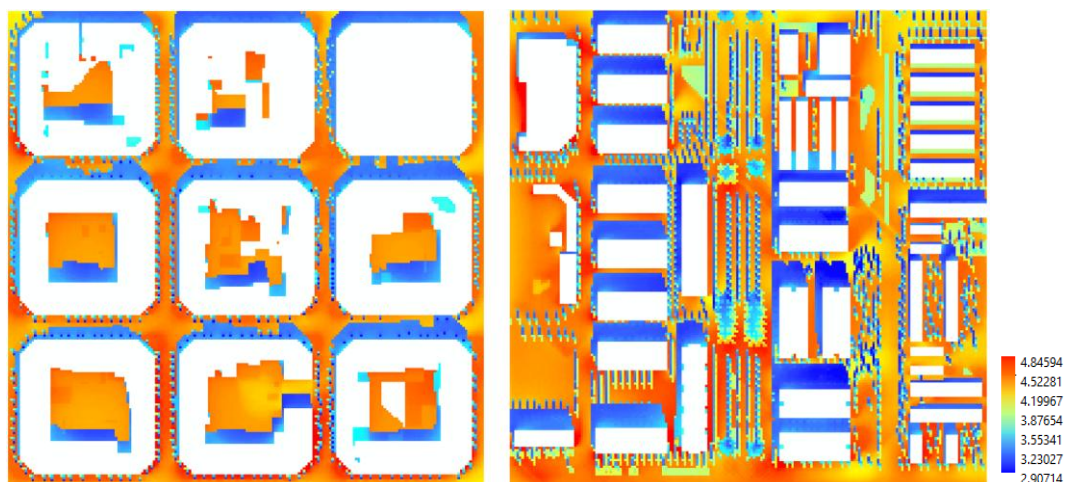
Figura 7. Temperatura de aire L'Eixample vs. La Mina



Fuente: Elaboración propia a partir de ENVI-met.

El confort térmico fue evaluado utilizando el índice Predicted Mean Vote (PMV), que mide la sensación térmica al relacionar el equilibrio energético del cuerpo humano con su percepción térmica. Este índice, desarrollado originalmente por Fanger en 1982, predice una valoración media del entorno térmico en una escala de 7 pasos (de -3 a 3), donde 0 representa neutralidad térmica (citado en Mayer y Höppe, 1987). Aunque fue desarrollado originalmente para interiores, en entornos exteriores las cargas radiativas y velocidades de viento más altas modifican las ecuaciones, ampliando la escala a 9 rangos (de -4 a 4), aunque en situaciones extremas los valores pueden superar este rango.

Figura 8. PMV (Predicted Mean Vote) L'Eixample vs. La Mina



Fuente: Elaboración propia a partir de ENVI-met.

Durante un día de calor extremo, los valores de PMV en L'Eixample sobrepasaron el límite de confort, alcanzando hasta 4.84 y sin bajar de 0. La mayor parte del área presentó valores entre 4.52 y 4.19, con ligeras reducciones en zonas sombreadas por edificaciones (3.55) y vegetación, aunque esta última es insuficiente para generar un cambio significativo. Esto refleja un alto grado de desconfort térmico en los espacios abiertos del barrio, incluso en áreas con sombra (Figura 8).

En La Mina, aunque también se observaron valores elevados de PMV, la vegetación contribuyó a mejorar el confort térmico en las áreas centrales, donde los valores alcanzaron 3.32. Los bloques de edificios aislados generan sombras más efectivas en comparación con las manzanas cerradas de L'Eixample, alcanzando valores de hasta 2.90. Si bien el desconfort general sigue siendo alto, las sombras de las edificaciones y el arbolado proporcionan mejores condiciones térmicas para los usuarios en espacios públicos (Figura 8).

5. Discusión

Los resultados obtenidos en este estudio permiten evidenciar cómo las características del diseño urbano influyen en el comportamiento microclimático, destacando la importancia de los elementos morfológicos, materiales y vegetativos en la configuración térmica de los entornos urbanos. A través de la comparación entre l'Antiga Esquerra de l'Eixample y La Mina, se ha confirmado la hipótesis de que los tejidos urbanos más abiertos, con mayor proporción de vegetación y superficies permeables, son capaces de generar microclimas más resilientes y confortables.

En primer lugar, la morfología urbana demostró ser un factor determinante en las dinámicas térmicas. En l'Eixample, las manzanas cerradas y la alta densidad edificatoria limitaron la capacidad de disipación de calor, resultando en un ambiente térmico homogéneo, pero con temperaturas elevadas. En cambio, la disposición de edificios aislados en La Mina permitió una mayor circulación del viento y un microclima más heterogéneo, con áreas de menor temperatura gracias a la influencia de espacios abiertos y vegetación. Estos hallazgos coinciden con estudios previos que resaltan la influencia de la densidad urbana en la generación de islas de calor (Oke, 2004; UN-HABITAT, 2018).

La vegetación también jugó un papel fundamental en la regulación térmica. El índice NDVI más alto registrado en La Mina reflejó una mayor cantidad y calidad de vegetación, lo que contribuyó a la reducción de temperaturas superficiales y al mejoramiento del confort térmico en áreas clave como la rambla central. Por el contrario, la vegetación escasa y dispersa en l'Eixample resultó insuficiente para mitigar el efecto térmico de las superficies impermeables. Esto coincide con investigaciones que subrayan el papel de la vegetación en la moderación del microclima y la reducción del efecto de isla de calor urbana (Arellano et al., 2018; Shashua-Bar et al., 2011).

Asimismo, los materiales de superficie y la permeabilidad del suelo se identificaron como elementos críticos. En l'Eixample, la predominancia de materiales impermeables con bajo albedo, como el asfalto, contribuyó a la acumulación de calor y a un mayor desconfort térmico. En contraste, en La Mina, la combinación de superficies permeables y materiales de mayor albedo favoreció una moderación térmica significativa. Este hallazgo refuerza la necesidad de incorporar estrategias basadas en el uso de materiales sostenibles y de alto albedo en el diseño urbano (Givoni, 1998; Fariña Tojo, 2007).

Finalmente, el análisis del confort térmico mediante el índice PMV destacó la importancia de integrar elementos de sombra, tanto por vegetación como por edificaciones, en el diseño de espacios públicos. Aunque ambos barrios presentaron niveles elevados de desconfort durante un día de calor extremo, La Mina mostró valores de PMV más bajos en áreas centrales con vegetación y sombras efectivas. Esto respalda la utilidad de herramientas como ENVI-met para modelar escenarios y proponer soluciones de diseño basadas en la evidencia (Ali-Toudert y Mayer, 2007; Huttner y Bruse, 2009).

En síntesis, este estudio reafirma la relevancia del diseño urbano como estrategia clave para la adaptación climática, proponiendo un enfoque integral que priorice la incorporación de vegetación, superficies permeables y materiales de alto albedo en la planificación urbana.

6. Conclusiones

A partir de los análisis realizados, se concluye lo siguiente:

- 1) Relevancia de la morfología urbana:
 - La alta densidad y las manzanas cerradas de l'Eixample limitan la capacidad de disipación térmica, generando un ambiente homogéneo, pero con elevadas temperaturas.
 - En contraste, el diseño abierto y los edificios aislados en La Mina permiten una mayor variación microclimática y mejores condiciones de confort térmico.

- 2) Impacto de la vegetación:
 - En La Mina, el índice NDVI más elevado evidencia el papel crucial de la vegetación abundante y bien distribuida en la regulación térmica, disminuyendo temperaturas superficiales y mejorando el confort.
 - En l'Eixample, la vegetación limitada y dispersa no logra mitigar de manera efectiva las altas temperaturas, acentuando el disconfort térmico.
- 3) Influencia de los materiales y la permeabilidad:
 - Las superficies impermeables con bajo albedo predominantes en l'Eixample agravan el efecto térmico. Por el contrario, en La Mina, las superficies permeables y materiales de mayor reflectancia contribuyen a moderar el impacto térmico.
- 4) Importancia del confort térmico:
 - El análisis del PMV demostró que las sombras generadas por vegetación y edificaciones en La Mina proporcionan condiciones de mayor confort en comparación con l'Eixample, donde el disconfort térmico es elevado incluso en áreas sombreadas.

Estos hallazgos destacan la importancia de integrar estrategias de diseño urbano orientadas a la adaptación climática, con especial énfasis en la vegetación, la permeabilidad del suelo y el uso de materiales sostenibles.

Este enfoque no solo mejora las condiciones microclimáticas locales, sino que también contribuye a construir ciudades más resilientes frente a los desafíos del cambio climático.

Autoría

La primera autora conceptualizó y diseñó la investigación, además de encargarse de gran parte de la redacción del artículo. Junto con el segundo y el tercer autor, recopiló información y realizó el modelado de los casos de estudio para las simulaciones. El segundo y el tercer autor contribuyeron al diseño de la investigación, así como al análisis gráfico y textual de los casos de estudio. La cuarta autora supervisó todo el proceso, proporcionando orientación metodológica y revisiones críticas.

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

Bibliografía

Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81(6), 742–754. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.10.007>

Arellano, B.; Roca, J. & Battle, E. (2018) "Green areas and urban heat island: combining remote sensed data with ground observations", Proc. SPIE 10767, *Remote Sensing and Modeling of Ecosystems for Sustainability XV*, 1076705; <https://doi.org/10.1117/12.2320999>

Arellano, B.; Roca, J. (2015). Planificación urbana y cambio climático. *Internacional Conference on Regional Science: Innovation and Geographical Spillovers: New Approaches and Evidence*, 18.

Ayuntamiento de Barcelona (2018). Anuario Estadístico. <https://ajuntament.barcelona.cat/estadistica/castella/Anuaris/Anuaris/anuari19/cap01/C0101050.htm>

Ayuntamiento de Sant Adrià de Besòs (2018). Sant Adrià en Xifres. <https://www.sant-adria.cat/la-ciutat/sant-adria-en-xifres>

Bruse, M., & Team ENVI-met. (2022). ENVI-met 4.4.5: A holistic microclimate model for urban environments. Retrieved from <https://www.envi-met.com>

- Cao, S., Wang, Y., Ni, Z. & Xia, B. (2022). Effects of blue-green infrastructures on the microclimate in an urban residential area under hot weather. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.824779>
- European Space Agency. (n.d.). *Copernicus Open Access Hub*. Imágenes satelitales Sentinel 2. <https://scihub.copernicus.eu>
- Fariña Tojo, J. (2007) La ciudad y el medio natural. Akal ed., 3ra ed. Madrid, España: Akal
- Givoni, B. (1998). Climate considerations in building and urban design. New York, USA: Van Nostrand Reinhold
- Huttner, S., & Bruse, M. (2009). Numerical modelling of the urban climate – A preview on ENVI-met 4.0. *7th International Conference on Urban Climate (ICUC-7)*, Yokohama, Japan. <https://www.envi-met.com>
- Intergovernmental Panel On Climate Change [IPCC]. (2014). Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. http://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf
- Mayer, H., & Höpfe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- Oke, T. R. (2004). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (Vol. 81, p. 51). Geneva: World Meteorological Organization.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge university press.
- Servicio Meteorológico de Cataluña (METEOCAT). (s. f.). Datos meteorológicos de la estación del Raval. <https://www.meteo.cat/observacions/xema/dades?codi=X4>
- Shashua-Bar, L., Tzamir, Y., & Hoffman, M. E. (2004). Thermal effects of building geometry and spacing on the urban canopy layer microclimate in a hot-humid climate in summer. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(13), 1729–1742. <https://doi.org/10.1002/joc.1092>
- UN-HABITAT (2018). Climate Change. <https://unhabitat.org/topic/climate-change>
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *Earth Explorer*. Imágenes satelitales Landsat 8. <https://earthexplorer.usgs.gov>