CONAMA 2026

PROYECTO PAULIA

Herramienta de detección de anomalías climáticas en espacios públicos de pequeñas áreas urbanas

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Marta María Alirangues Nuñez. Investigadora. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción – CSIC.

Otros Autores:

Carmen Alonso Investigadora. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc – CSIC).

Domingo González Galván. Arquitecto del Departamento de Arquitectura Sostenible. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (ITER).

María Delgado. Jefa del Departamento de Arquitectura Sostenible. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (ITER).

José Ricardo Pérez Castillo. Técnico en la Unidad de Robótica y Automatización. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (ITER)

Richard Martín Martín. Técnico en la Unidad de Robótica y Automatización. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (ITER).

Jorge Ballesteros Ruíz-Benítez de Lugo. Responsable Unidad de Robótica y Automatización. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (ITER).

Sofía Piñeiro. Arquitecta. Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S.A. (ITER).

Gloria Pérez Científica Titular. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc – CSIC).

Laura Santamaría. Investigadora. Real Jardín Botánico (RJB - CSIC)

Jesús Muñoz. Investigador Científico. Real Jardín Botánico (RJB – CSIC).

Borja Frutos Científico titular. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc – CSIC).

Fernando Martín-Consuegra Investigadora. Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (IETcc – CSIC).

Índice

1. Resumen 1
2. Introducción 2
3. Selección de poblaciones de estudio 4
4. Detección de puntos calientes y fríos 7
5. Caracterización de poblaciones 10
6. Elaboración de los catálogos de vegetación y materiales de pavimentos 13
7. Proyecto piloto: San Isidro 21
8. Desarrollo del modelo estadístico 22
9. Desarrollo y creación de la herramienta PAULIA 23
10. Conclusiones y futuro 24
11. Agradecimientos 25
12. Bibliografía 25

1. Resumen

Los fenómenos climáticos extremos son cada vez más frecuentes, afectando al microclima urbano y generando disconfort y estrés térmico en los habitantes, impactando especialmente a la población más vulnerable. La previsión es que la frecuencia de estos fenómenos aumente debido al cambio climático. El papel de las ciudades en la lucha contra el cambio climático es clave y el crecimiento de su población hace que deban articular mecanismos que faciliten hacer frente a estos desafíos, reduciendo sus efectos sobre el clima y aumentando su resiliencia. Debido a la variabilidad regional del impacto climático, las medidas de adaptación deben ser tomadas no sólo a escala nacional (o supranacional), sino también regional y local. El clima urbano depende de factores globales, pero factores locales como la estructura urbana edificada, la cobertura del suelo, la vegetación y las fuentes de calor antropogénico crean unas condiciones medioambientales concretas que modifican el clima regional creando un microclima urbano. Este microclima juega un rol importante en el consumo energético de los edificios y en las sensaciones de confort de los espacios urbanos. En el caso de España, resulta especialmente urgente abordar el problema de los episodios de calor, cada vez más frecuentes y prolongados.

En este contexto, el principal objetivo del proyecto PAULIA (CPP2022-009932) es desarrollar una herramienta integrada para evaluar pequeñas zonas urbanas con vulnerabilidad climática, detectar puntos calientes y aportar soluciones de actuación vinculadas al tipo de material de cobertura en los suelos y al índice y tipología de vegetación utilizadas como factores determinantes del microclima de los espacios exteriores, que contribuya a la optimización del confort en los espacios públicos. La herramienta está especializada para poblaciones de la costa andaluza y de Canarias. El grupo de investigación SCHE del Instituto de ciencias de la construcción Eduardo Torroja (CSIC) colabora en su desarrollo con el Instituto Tecnológico y de Energías Renovables (ITER), el Real Jardín Botánico (CSIC) y los Servicios Municipales de Granadilla (SERMUGRAN).

La detección de anomalías climáticas en los núcleos seleccionados se realiza mediante el uso de imágenes aéreas, e información de satélite, que combinadas con datos obtenidos mediante la medición in-situ en las poblaciones seleccionadas, permiten obtener una caracterización más detallada, y validar el sistema de evaluación generado. Estos datos se han utilizado para el entrenamiento de modelos de inteligencia artificial de detección y mitigación de anomalías climáticas. Como propuesta de actuación, la herramienta incorpora dos catálogos con una caracterización avanzada de materiales y vegetación, adecuados para la regeneración del espacio público urbano en las poblaciones de clima cálido. Los modelos de simulación de las mejoras obtenidas con estas soluciones, se validan con una actuación piloto que actualmente está en ejecución. Todo ello permitirá obtener una herramienta esencial de apoyo para la lucha de las ciudades contra el cambio climático, contribuyendo a solucionar un problema cada vez más urgente, con un alto impacto social, ambiental y económico.

Palabras clave: vulnerabilidad climática; morfología urbana; isla de calor, soluciones basadas en la naturaleza, renaturalización urbana, clima cálido

2. Introducción

2.1. Contexto

El Plan Nacional de Adaptación (MITECO, 2020) y la Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático (Moreno y otros, 2005), señalan dos variaciones climáticas que afectarán a España de manera significativa, la variabilidad de la temperatura y la del régimen de las precipitaciones. El papel de las ciudades en la lucha por el cambio climático es clave y existe un elevado consenso científico acerca del protagonismo de las ciudades en el Cambio Climático (Short & Farmer, 2021; Dodman y otros, 2022). El crecimiento de la población hace que las ciudades, a todos los niveles, deban articular mecanismos que faciliten hacer frente a estos desafíos climáticos, reduciendo sus efectos sobre el clima e incrementando su resiliencia (Short & Farmer, 2021).

Estos impactos climáticos crean nuevos riesgos y vulnerabilidades que ponen en riesgo la calidad de vida y la salud de la creciente población asentada en las ciudades. Debido a la variabilidad regional del impacto climático, las medidas de adaptación deben ser tomadas a distintos niveles, no sólo a escala nacional (o supranacional), sino también regional y local.

El clima urbano depende de factores globales, pero factores locales y de micro-escala como la estructura urbana constituida por los edificios, la densidad, la tipología de calles, las superficies de cubierta del suelo, la vegetación y las fuentes de calor antropogénico generadas por el metabolismo urbano crean unas condiciones medioambientales concretas que modifican el clima regional creando un microclima urbano Figura 1. Este microclima urbano juega un rol importante en el consumo energético de los edificios y en las sensaciones de confort y el éxito de los espacios urbanos (Zhu y otros, 2024).

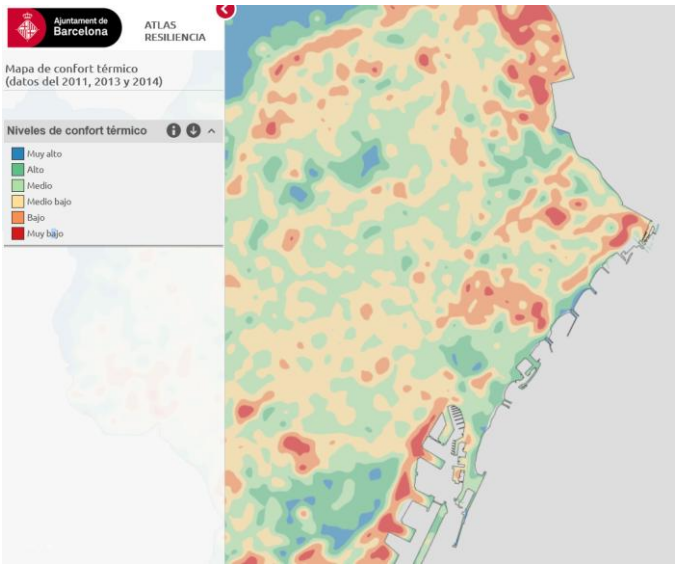


Figura 1 Indicador de avidez térmica y vulnerabilidad al calor urbano.
Fuente: Ayuntamiento de Barcelona. Atlas de Resiliencia.

El efecto de la isla de calor urbana (ICU) describe la influencia de las superficies urbanas en los patrones de temperatura de las áreas urbanas en contraposición a las circundantes (figura 2), debido a los cambios provocados por el ser humano en el uso del suelo, así como en el equilibrio energético. La ICU está presente en todas las ciudades y es la manifestación obvia de la influencia de la urbanización sobre el clima. Los efectos de la isla de calor se manifiestan a diferentes escalas: la capa límite urbana (UBL) y la canopia urbana (UCL) (Ramos & Roca, 2016).

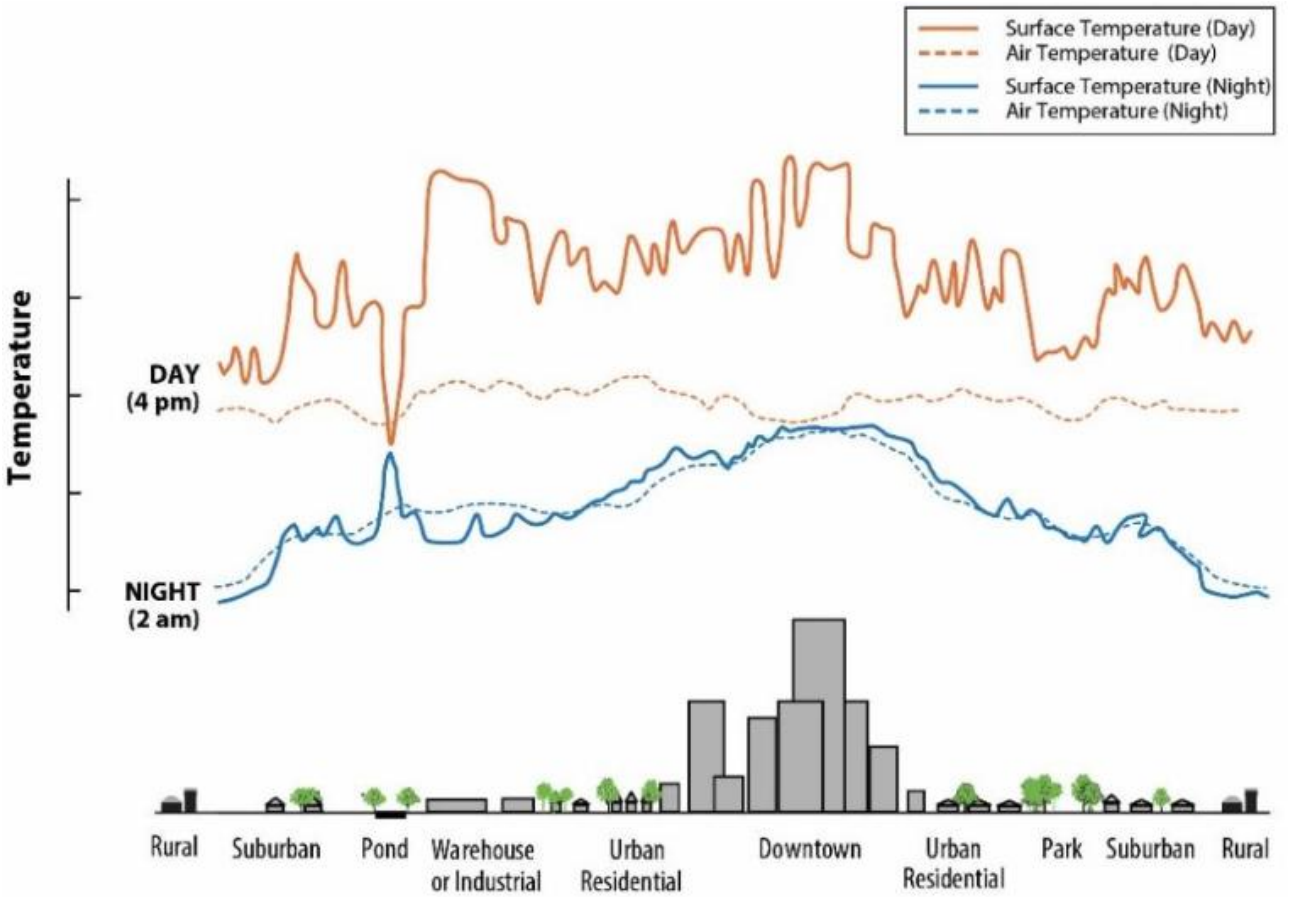


Figura 2 Efecto Isla de Calor Urbana (ICU).
Fuente: United States Environmental Protection Agency (EPA)

2.2. Problemática

El efecto isla de calor, tanto de día como en las noches, es mayor en grandes áreas urbanas que en pequeñas poblaciones (Zhou y otros, 2017; Sobrino & Irakulis, 2020; Tan & Li, 2015). Sin embargo, cada vez hay más datos que sugieren que las anomalías climáticas en pequeñas poblaciones, similares a las experimentadas en las grandes urbes, son cada vez más similares debido a la rápida transformación del uso del suelo (Pandit & Pandit, 2026).

Además, varios estudios muestran cómo el rápido crecimiento de las áreas urbanas está reduciendo, tanto la proporción de áreas verdes con respecto a urbanizadas en las ciudades, como

la probabilidad de exposición de sus habitantes a las zonas verdes (Hu y otros, 2024; Narcizo de Lima y otros, 2023). Zonas verdes cuya vegetación proporciona sombra natural, lo que reduce la exposición directa al sol de las superficies de asfalto y hormigón, reduciendo hasta 12 ªC su temperatura (Ow y otros, 2019), como se puede observar en la Figura 3, o disminuyendo la demanda de electricidad para refrigeración de las ciudades (Ravazdezh & Rivers, 2025).

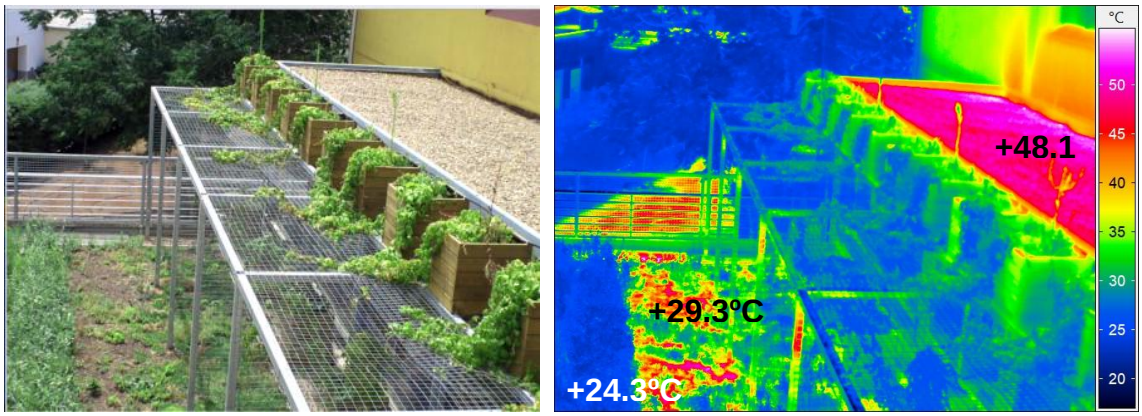


Figura 3 Imágenes térmicas de una cubierta desnuda)48,1 ºC), con vegetación parcheada (29,3 ªC) y con cobertura vegetal completa (24,3 ºC).
Fuente: Proyecto my building is green – LIFE ENV/ES/000088

Las proyecciones climáticas futuras, como sugiere el IPCC (Lee y otros, 2021), indican que esta problemática continuará intensificándose a lo largo del siglo XXI, con un aumento de las temperaturas extremas y una mayor exposición de la población residente en áreas urbanas a condiciones térmicas adversas. En consecuencia, la adopción de medidas de adaptación basadas en evidencia científica se convierte en una necesidad inmediata para reducir los impactos asociados al calor urbano. En este sentido, herramientas como PAULIA pueden desempeñar un papel clave en la planificación y gestión de las ciudades, facilitando la identificación de áreas vulnerables y la evaluación de estrategias capaces de mejorar la resiliencia urbana frente al cambio climático.

2.3. Objetivo

Este estudio trata de profundizar en el análisis de los pequeños núcleos urbanos localizados en climas cálidos, teniendo en cuenta su estado actual y su posible crecimiento a corto plazo. Por lo que aquí se presenta el proceso seguido en el proyecto PAULIA, el cual culmina en el desarrollo de la herramienta del mismo nombre, y con su aplicación en el proyecto piloto de la plaza Pico Teide, en San Isidro (Granadilla de Abona, Santa Cruz de Tenerife).

3. Selección de poblaciones de estudio

En primer lugar, se realizó la selección de poblaciones que servirán de base para PAULIA.

Para la selección de poblaciones se utilizaron una serie de indicadores relevantes para el estudio de puntos calientes seleccionados en base a los objetivos del proyecto.

3.1. Primera selección de poblaciones

En una primera fase, se filtraron las poblaciones de acuerdo con el **número de habitantes** y con la **zona climática cálida** como se contempla en el proyecto. Se ha considerado como poblaciones pequeñas aquellas con entre 5.000 y 50.000 habitantes. Los datos se extrajeron de la capa de Poblaciones del Instituto Geográfico Nacional (Instituto Geográfico Nacional, 2022). La zona climática cálida se estableció en base a la clasificación del Código Técnico de la Edificación (CTE). Según el CTE, las zonas vienen representadas por una letra (A-E), correspondiente a la severidad climática de invierno (de octubre a mayo), y un número (1-4), correspondiente a la severidad climática de verano (de junio a septiembre). Para el estudio, hemos seleccionado aquellas poblaciones pequeñas con severidad climática de invierno baja (A y α) y de verano alta (3 y 4). Todas estas poblaciones se encuentran en Canarias y Andalucía.

Tras este primer filtrado, se obtuvieron un total de **104 poblaciones**, todas ellas situadas en las Comunidades Autónomas de **Andalucía y de las Islas Canarias**.

En una segunda fase, se establecieron **indicadores para la catalogación** de esas poblaciones en base a la presencia de población vulnerable, la cantidad de zonas verdes con respecto a superficies selladas, la dispersión del núcleo urbano y la cantidad de turismo con respecto a habitantes residenciales.

- **Vulnerabilidad**: Se ha decidido utilizar la renta anual neta media por hogar por unidad de consumo como indicador de vulnerabilidad. Los datos se han extraído del INE para el año 2020 a nivel de sección censal tras lo cual se ha hecho la media para las poblaciones preseleccionas en la fase 1. Tras ello, se establecieron 3 niveles de renta (baja, media, alta) diferentes para Canarias y Andalucía, tomando la distancia entre la renta máxima y la renta mínima de cada región y dividiéndolo en tres grupos. El nivel de renta de cada región es diferente por lo que se decidió estudiarlas por separado para obtener una mejor interpretación de la situación de vulnerabilidad de cada zona.

- **Zonas verdes**: Para calcular la proporción de zonas verdes con respecto a las zonas selladas se tomaron los datos del SIOSE de Alta Resolución 2017 (IGN), capa de usos del suelo. Dentro de las zonas verdes se incluyó 'Parque urbano', 'Áreas naturales acuáticas', 'Áreas naturales terrestres', 'Camping', y el resto de categorías para zonas selladas. Se calcularon las áreas para cada tipo de zona por cada población y se calculó la ratio.

- **Compacidad**: La dispersión de las poblaciones, es decir, cuán compactas son, se estudiará en base a los datos extraídos de la cartografía INSPIRE de Catastro. Mediante la capa de parcelas, podemos obtener la información de superficie construida por parcela por cada sección censal de la localidad. El indicador de dispersión consiste en la proporción de superficie construida frente a superficie total de la sección censal. Para obtener la dispersión para cada población, se hace la media de las secciones censales correspondientes a dicha población.

- **Turismo**: En cuanto al indicador de turismo se utilizó en número de establecimientos turísticos presentes en cada población (Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía, 2021;

Observatorio de Turismo de Canarias, 2019) ya que el número de pernoctaciones no estaba disponible para todas las regiones.

3.2. Segunda selección de poblaciones

En base a esos indicadores, se hizo una segunda selección de poblaciones escogiendo un número representativo de las mismas que permitiera hacer una caracterización y estudio más pormenorizado de las mismas. Para ello, se ha realizado el análisis de clústeres K-medias. Este método trata de agrupar conjuntos de casos relativamente homogéneos basándose en las características seleccionadas, en este caso los indicadores mencionados en el apartado anterior. Es necesario seleccionar previamente el número de grupos (k) en los que se quieren dividir los casos. Para ello, se utiliza el Método del Codo (en el que se toma el valor para k en el que la pendiente de la curva ya no es tan pronunciada) y el análisis de Silhouette (se toma el valor más alto del "Silhouette Score"). Basándose en los resultados de estos análisis, se determinó que el número óptimo de grupos (clústeres) es k=8.

Una vez establecidos los grupos, se procede al análisis de cada uno de los indicadores. De esta manera se ha podido determinar de qué manera se encuentran representados en cada grupo y así poder hacer una selección que aporte la mayor representatividad posible de los indicadores seleccionados. Además, a la hora de hacer la selección, se ha tenido en cuenta el que hubiera al menos una población por provincia de las 7 a las que pertenecen las 104 poblaciones. Asimismo, en las Islas Canarias, se ha considerado también que hubiera al menos una población en cada provincia que no estuviera en las islas donde está la capital (Tenerife y Gran Canaria).

Las 12 poblaciones seleccionadas son las siguientes:

Nombre	Provincia
Rincón de la Victoria – La Cala del Moral – Torre de Benagalbón	Málaga
El Ejido	Almería
El Fraile	Santa Cruz de Tenerife
Lepe	Huelva
Playa del Inglés	Las Palmas
Salobreña	Granada
San Isidro	Santa Cruz de Tenerife
San Roque	Cádiz
San Sebastián de la Gomera	Santa Cruz de Tenerife
Carboneras	Almería
Costa Teguise	Las Palmas
Bornos	Cádiz

Tabla 1: Poblaciones seleccionadas para el estudio más detallado y como base para el modelo estadístico.

Como se puede observar, se decidió unificar las poblaciones de Rincón de la Victoria, La Cala del Moral y Torre de Benagalbón, por ser poblaciones limítrofes y, por lo tanto, a efectos de comportamiento frente al efecto isla de calor urbana (ICU), actúan como una única población, y el

número de habitantes total sigue estando por debajo de los 50.000 establecido por el proyecto. En el mapa de la figura 4 se puede observar la localización de las 12 poblaciones seleccionadas.



Figura 4. Mapas de localización de las 12 poblaciones de estudio en Andalucía y Canarias.
Fuente: Elaboración propia.

4. Detección de puntos calientes y fríos

El proceso para la detección de puntos calientes y fríos en las 12 pequeñas áreas urbanas del proyecto PAULIA, parte de la obtención y análisis de imágenes con datos de la temperatura

superficial del suelo (LST) y su procesado a través de información cartográfica del Instituto Geográfico Nacional.

Este análisis nos permite detectar aquellas plazas de las poblaciones de estudio sobre las que es necesario actuar, y compararlas con las frías. Además, se obtiene el valor de la temperatura superficial de las mismas que se utiliza más adelante, en el desarrollo del modelo estadístico.

4.1. Descarga de imágenes térmicas

Para el análisis térmico, se ha tomado como criterio emplear imágenes de las bases de datos de los satelitales Landsat correspondientes a fechas con históricos de temperaturas máximas y mínimas de los años 2022, 2023 y 2024. Las imágenes tomadas por el satélite para cada población coinciden siempre en la misma hora del día, con pocos minutos de diferencia entre ellas.

Dado que la definición de las citadas imágenes es de 30 m/píxel se decide utilizar la aplicación de Google Earth Engine denominada *Landsat Land Surface Temperature downscaling using Sentinel-2* (Onačillová y otros, 2022). Esta aplicación automatiza el cálculo de los valores LST a partir de imágenes de los satélites Landsat 8 y 9 y reescala los resultados por medio de un proceso matemático que utiliza imágenes del Sentinel-2, obteniendo como resultado un archivo ráster con información térmica a una resolución de aproximadamente 10 m/píxel. La imagen que se obtiene de la aplicación, descargable en formato GeoTIFF, posee una única banda que asigna a cada uno de sus píxeles un valor de LST en ºC. Estas imágenes se pueden cargar en cualquier programa SIG para el manejo y análisis de datos espaciales, permitiéndonos operar con ellas.

4.2. Procesado para detección de puntos calientes y fríos.

Para la detección de los puntos fríos y calientes de cada núcleo se ha utilizado la herramienta QGIS (3.40 Bratislava), un software de sistema de información geográfica (SIG) de código abierto que permite la visualización, edición y análisis de datos geoespaciales (Dawson y otros). El proceso comienza con la carga de dos capas provenientes de las bases de datos del Instituto Geográfico Nacional, una con el perímetro de la población a analizar, obtenida de la capa de Poblaciones (Instituto Geográfico Nacional, 2022) y otra con la capa de Polígonos del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España de Alta Resolución del año 2017, SIOSE-AR 2017 (IGN, 2017)

Realizando un primer análisis de las tramas urbanas delimitadas por la capa de Poblaciones se puede observar que los perímetros delimitados no incluyen elementos significativos del espacio urbano que pueden influenciar en la aparición de puntos térmicos extremos. Es por ello que, a través de fotointerpretación, se ha corregido la delimitación de las poblaciones, generando una nueva capa vectorial, denominada Área de Estudio, con un polígono ampliado que incluye todas las superficies de interés. Esta nueva capa se utiliza para recortar la cartografía de polígonos de SIOSE AR 2017 y, junto con información obtenida de ortofotos, del Catastro y otra cartografía WMS, se actualizan sus geometrías y coberturas. A partir de esta nueva información, se extraen las plazas y parques de la trama urbana de las poblaciones de estudio, a las cuales se une la información de calles

obteniendo una capa resultante con todo el espacio público. Partiendo de esta capa y mediante el uso de las imágenes ráster obtenidas para cada año, o mediante el uso de la calculadora ráster, se obtiene una imagen con valores LST medios en cada píxel. Como criterio general, en PAULIA se ha decidido trabajar con dos imágenes, correspondientes a la media de los valores máximos y a la media de los valores mínimos de los años 2022, 2023 y 2024.

Cada una de estas dos imágenes se vectoriza, asignando los valores de la banda original a un campo de temperatura. Se obtiene así una capa vectorial con temperaturas asignadas a unos polígonos de aproximadamente 10x10m, o teselas, que son equivalentes a los píxeles de la imagen original.

Para identificar los puntos calientes y fríos en el espacio público, se realiza un primer recorte de la capa poligonizada con la capa definida previamente para el espacio público. Ordenando los valores de temperatura de la tabla de atributos de esta nueva capa se pueden identificar inmediatamente superficies de 10x10m aproximadamente que se corresponden con áreas de extremos térmicos, que se señalan posteriormente con una capa vectorial de puntos que indica su ubicación y temperatura. Siguiendo el mismo proceso se recorta la capa LST del espacio público con la capa con la geometría de las plazas del inicio, obteniendo así únicamente las teselas con información térmica del interior de estos espacios urbanos. Posteriormente se le añade a esta nueva capa un atributo con la superficie de cada tesela y, mediante la unión de atributos por localización, se asocia a cada una de ellas el nombre de la plaza a la que pertenece. La tabla de atributos obtenida se puede exportar a un programa de hojas de cálculo para obtener el valor máximo y mínimo de temperatura en cada plaza, los valores medios, la mediana y la temperatura media ponderada por su superficie.

Al finalizar el proceso se habrán identificado los puntos más cálidos y fríos del espacio público de la población analizada, donde cada punto corresponde a una tesela de 10x10m, según la resolución de píxeles de la imagen original. Además, se obtiene una clasificación de sus plazas en base a sus datos térmicos.

4.2.1. Caso de estudio en San Isidro.

Para el caso específico de San Isidro, la población más viable para la ejecución del piloto, se ha ampliado el rango de búsqueda de imágenes hasta el año 2019 y, aparte de generar ráster con valores medios de las temperaturas extremas, se ha realizado también un análisis pormenorizado año a año para poder evaluar cambios entre anualidades.

De los resultados obtenidos se seleccionan por año los tres puntos de 10x10 m más cálidos y los tres puntos de 10x10 más fríos del espacio público de la población, indicando su temperatura y el nombre de la calle o plaza en la que se encuentran.

Asimismo, se realiza una clasificación de sus plazas en función de la temperatura media ponderada por su superficie, con el cual se obtienen las tres plazas más cálidas y las tres plazas más frías del núcleo poblacional.

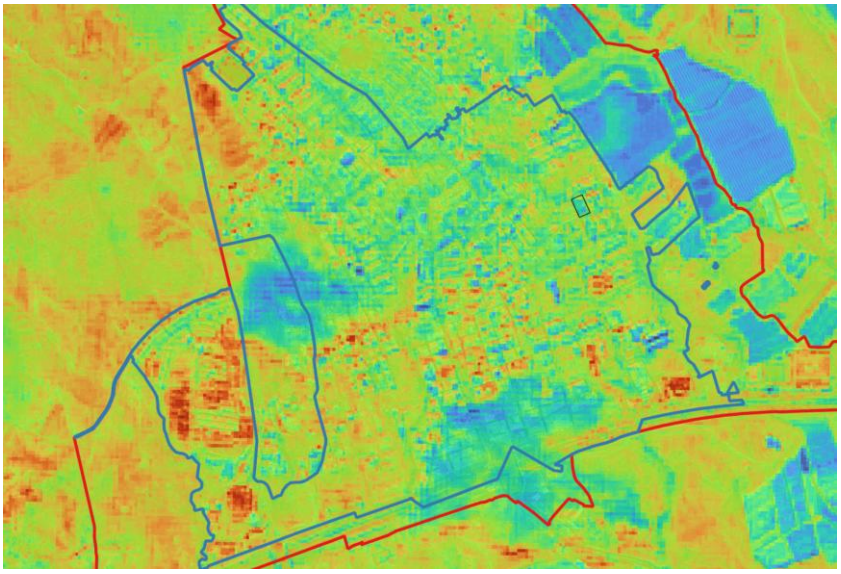


Figura 5. Mapa térmico de San Isidro (Tenerife) para el estudio de puntos calientes (colores más cálidos) y fríos (colores más fríos).
Fuente: Elaboración propia a partir de datos Landsat.

5. Caracterización de poblaciones

Utilizando la herramienta QGIS, se ha estudiado la cartografía del SIOSE y se contrastó con las ortofotos por satélite más actuales, lo que llevó a detectar varias diferencias entre la realidad y lo cartografiado en las 12 poblaciones del proyecto.

Una vez contando con la base corregida mediante el SIOSE AR 2017 y las ortofotos, se ha desarrollado el análisis siguiendo el siguiente índice en cada núcleo:

1. **Superficie del núcleo**: del límite establecido originalmente y del límite expandido para incluir tramas anejas que puedan influir sobre el mismo.

2. **Parques y plazas**: Se detectan por separado, se numeran y se superfician los parques y las plazas de cada núcleo, que supondrán el espacio ideal para la fase de experimentación de las soluciones que se propongan. Los límites de las plazas se utilizan para determinar la superficie de las mismas y delimitar el área de estudio.

3. **Zonas no edificadas y espacios verdes**: Se señalan las superficies que ocupan en relación a la superficie del núcleo.

4. **Áreas de influencia de zonas permeables**: los espacios permeables influyen en la formación y mitigación de las ICU, reduciendo la acumulación térmica de otros materiales de cobertura muy extendidos como el hormigón o el asfalto, donde el agua se acumula y se calienta, y

además facilitan la evaporación, reduciendo las temperaturas del suelo y del aire. El proceso seguido (con la herramienta QGIS) se inició con la localización de los centros de los polígonos (centroides de las masas), y a raíz de los mismos, se generó una geometría formada por el promedio de distancia entre ellos, constituyendo "polígonos de Voronoi". Para obtener este resultado, la herramienta realiza la mediatriz de los segmentos que unen los diferentes centroides y de ahí, la intersección de las diferentes mediatrices genera un polígono equidistante a los grupos de puntos, de tal forma que se delimita el área de influencia de cada uno. Para representar los resultados, la cartografía muestra en gradación de colores de más claro (mayor proximidad de puntos) representando las superficies más permeables, a más oscuro (superficies mayores, con menor densidad de puntos) para superficies menos permeables.

5. **Datos meteorológicos**: temperatura, viento, dirección del viento

   5.1. **Temperatura del aire**: la temperatura del aire de cada núcleo se ha tomado como media de las temperaturas registradas en los días correspondientes a la captura de las imágenes Landsat utilizadas en el análisis térmico, es decir, entre 2019 y 2023 para San Isidro y entre 2022 y 2024 para el resto de los núcleos (sección 4). La serie se ha obtenido del servicio OpenMeteo (https://open-meteo.com), que se ha seleccionado tras compararlo con los datos de la estación de AEMET más próxima a cada núcleo, con los que no se aprecian diferencias significativas y del que se ha preferido el valor porque localiza la lectura en el propio núcleo frente a la situación de la estación.

   5.2. **Velocidad y direccionalidad del viento**: los datos se han extraído de la base de datos del Global Wind Atlas (Davis, y otros, 2023). Hay un valor por población, extraído en el centro de la misma a 10 metros de altura.

6. **Temperatura superficial del suelo**: Se obtiene a partir de los datos generados mediante la herramienta de Google Earth Engine Landsat Land Surface Temperature downscaling using Sentinel-2 (Onačillová et al., 2022). Los ráster resultantes se vectorizan y se recortan a los límites de las áreas de estudio. A partir de las entidades resultantes, se calcula la temperatura superficial media mediante una ponderación en función de la superficie ocupada por cada valor de temperatura, obteniéndose asimismo los valores máximos y mínimos registrados en cada ámbito.

7. **Vegetación**: La caracterización de la cubierta vegetal se realizó a partir del procesamiento de las nubes de puntos LiDAR. Para ello primero se mezclaron y recortaron los puntos al perímetro de los espacios públicos y posteriormente, se derivaron un ráster de vegetación absoluta filtrando las clases 3, 4 y 5 a una resolución de densidad de 0,25 metros y un ráster de cota de suelo mediante interpolación por triangulación de la clase 2. Restando la cota de suelo a la de vegetación, se obtuvo la altura relativa de la vegetación. El ráster resultante se escaló, poligonizó y filtró de valores negativos para ejecutar una unión espacial por localización con la capa de plazas, calculando la superficie vegetada desglosada en tres categorías:

   - Baja: 0.0 a 1.5 metros de altura.

- Media: 1.5 a 2.5 metros de altura.
- Alta: > 2.5 metros de altura.

8. **Reflectancia de los materiales de los pavimentos urbanos**: Para calcular las propiedades termo-ópticas de los pavimentos descartando la distorsión producida por las sombras proyectadas, se extrajo el canal infrarrojo de las clasificaciones de suelo (clase 2) y capa de rodadura (clase 11) de las nubes LiDAR del IGN. Tras analizar el histograma por núcleo para identificar el umbral de sombra (normalmente dentro del rango 12.000 - 40.000), se filtraron y eliminaron los puntos ensombrecidos. Sobre los puntos sin sombra, se ejecutó una unión espacial de atributos por localización con la capa de plazas asignando la mediana de las intensidades de los canales Red, Green y Blue. Siguiendo la metodología de (Ban-Weiss y otros, 2015), se utilizó la caracterización de los 171 materiales de pavimento comerciales para obtener una expresión de la reflectancia visible como combinación lineal de las coordenadas RGB. Y, a partir de ello, se desarrolló otra función lineal para obtener la reflectancia solar como expresión de la reflectancia visible. Combinando las dos expresiones empíricas, se estimó la reflectancia solar de los pavimentos reales a partir de las coordenadas RGB que proporcionan los datos LiDAR.

9. **Obstáculos a la entrada del viento en las plazas**: Para determinar la superficie resguardada a sotavento en los espacios públicos, se realizó un análisis geométrico de obstrucción al viento utilizando la herramienta nativa de mapas de sombras (Hillshade) en QGIS. En ella, se introdujo como acimut el ángulo de procedencia del viento dominante en cada núcleo y se fijó una elevación rasante constante de 15° para todos los emplazamientos, garantizando que la dirección del flujo fuera el único factor variable en el modelado. A partir de la cota Z de las nubes de puntos LiDAR del Instituto Geográfico Nacional (IGN), se generaron y vectorizaron las superficies proyectadas a sotavento, calculando posteriormente su superficie y proporción respecto al área total de cada plaza.

10. **Sombras**: Para determinar la superficie de sombra proyectada sobre los espacios públicos, se recopilaron las fechas y horas exactas de captura de las ortofotografías empleadas en la extracción de las temperaturas superficiales del suelo. Mediante una herramienta de posición solar, se calcularon el Azimuth y la elevación del sol promedios para cada núcleo. Con estos datos astronómicos y la cota Z de las nubes de puntos LiDAR descargadas del Instituto Geográfico Nacional (IGN), se generaron y vectorizaron los mapas de sombras por núcleo en QGIS, lo que permitió cuantificar con precisión la superficie y el porcentaje de sombra contenidos dentro del polígono de cada plaza

La información obtenida será utilizada para el desarrollo del modelo estadístico, como base de datos de la herramienta PAULIA, así como para la simulación de la plaza del caso de estudio.

6. Elaboración de los catálogos de vegetación y materiales de pavimentos

Los catálogos de vegetación y materiales de pavimentos del suelo constituyen la base de datos de soluciones que dará la herramienta PAULIA a los usuarios.

6.1. Catálogo de soluciones de vegetación

El catálogo incluye una amplia variedad de plantas ornamentales, árboles y arbustos que han sido seleccionadas para tolerar las condiciones climáticas de los municipios más cálidos de Andalucía y las Islas Canarias. En el proceso de selección se ha tenido en cuenta su adaptabilidad al entorno urbano, de forma que se ha obtenido una lista de especies vegetales que pueden ser utilizadas en diversas áreas de intervención dentro de los municipios: planificación de zonas verdes urbanas, proyectos de infraestructura verde como jardines verticales o techos verdes, reforestación y restauración urbana, reducción del efecto isla de calor o uso sostenible de los recursos hídricos.

La metodología utilizada para la creación de este catálogo se basa en la recopilación y análisis de información procedente de diversas fuentes especializadas en botánica y horticultura. Para seleccionar las especies más adecuadas para los municipios, y reunir la información necesaria sobre ellas, se ha consultado una amplia variedad de catálogos botánicos, guías de flora, estudios científicos, así como bases de datos botánicas actualizadas. Además, se han tenido en cuenta las experiencias de expertos en jardinería y paisajismo, quienes han evaluado el comportamiento y rendimiento de las especies en condiciones reales de cultivo y mantenimiento.

6.1.1. Criterios de selección de especies

Las especies seleccionadas para el proyecto PAULIA y su correspondiente catálogo se han elegido siguiendo una serie de criterios específicos que garantizan su idoneidad para entornos urbanos. Entre estos criterios se incluyen:

1. **Rusticidad**: selección de especies resistentes a la sequía y a las altas temperaturas.

2. **Toxicidad**: se han elegido, dentro de lo posible plantas no perjudiciales para la salud. A pesar de ello se aconseja evitar la ingesta de cualquier especie vegetal y vigilar a los niños más pequeños.

3. **Alergias**: se han evitado aquellas plantas que generan pólenes con alto potencial alérgeno.

4. **Elementos peligrosos**: aquellas especies que presentan espinas, ganchos o frutos grandes que puedan caer y dañar la integridad física de los viandantes han sido descartadas.

5. **Limpieza**: no se han incluido especies con frutos muy “sucios”, sabia abundante o malos olores.

6. **Termorregulación**: se han priorizado aquellas plantas con elevado potencial para reducir el efecto isla de calor, eliminando plantas que no proporcionan sombra efectiva.

7. **Estética**: se han seleccionado especies con un alto valor paisajístico y que aporten una estética agradable al entorno.

8. **Adaptabilidad**: aquellas especies con requerimientos muy específicos no se han tenido en cuenta ya que se buscan especies generalistas y resistentes que puedan prosperar y perdurar con bajo mantenimiento.

9. **Especies autóctonas**: se ha priorizado el uso de plantas autóctonas o endémicas de cada región, y adicionalmente, aquellas que ya se emplean actualmente de manera segura en jardinería. Además, se ha evitado en todo momento la incorporación de especies exóticas con potencial invasor.

10. **Sostenibilidad**: se ha dado especial atención a aquellas especies con baja demanda hídrica, que son resistentes a plagas y enfermedades, y que promueven la biodiversidad local.

11. **Disponibilidad en viveros**: se ha asegurado que todas las especies seleccionadas están disponibles en viveros locales de las Islas Canarias o la Península Ibérica, facilitando así su adquisición y que su suministro sea constante y fiable a lo largo del tiempo.

6.1.2. Resultados

Este catálogo reúne un total de **163 fichas botánicas informativas** organizadas alfabéticamente, una para cada especie seleccionada para el proyecto PAULIA. Como se puede observar en el ejemplo de la **Figura 6.** Ficha botánica nº34 - *Cistus monspeliensis*. Seleccionada como ejemplo especie adecuada para zonas urbanas de las Islas Canarias.Figura 6, en ellas se proporciona información detallada sobre su biología, características distintivas y cuidados específicos. En primer lugar, se indica el nombre científico y común de la especie, junto con la familia botánica a la que pertenece y su distribución geográfica original. A continuación, se incluye una descripción que resalta los rasgos más relevantes de la planta, como su porte, tamaño, preferencias edáficas y climáticas, morfología, consejos sobre su uso y otras indicaciones o curiosidades. Además, cada ficha está acompañada de imágenes que ilustran tanto la planta en su hábitat natural como detalles de sus estructuras, proporcionando una representación visual que será útil de cara a la selección definitiva de plantas por parte de las autoridades de la zona de intervención.



Figura 6. Ficha botánica nº34 - *Cistus monspeliensis*. Seleccionada como ejemplo especie adecuada para zonas urbanas de las Islas Canarias.
Fuente: Elaboración propia.

6.2. Catálogo de soluciones materiales de pavimentos urbanos

6.2.1. Selección de propiedades de interés

El catálogo se ha desarrollado a partir de una selección de propiedades de los materiales de pavimentación consideradas relevantes para evaluar su influencia sobre el comportamiento térmico de las áreas urbanas. La selección se ha realizado atendiendo a su papel en las principales estrategias de mitigación y adaptación climática, así como a su utilidad para la simulación energética y el análisis mediante técnicas de observación remota.

En primer lugar, se incluyen las propiedades relacionadas con la **gestión de la radiación solar**, concretamente la **reflectancia solar y visible y la emisividad térmica.** Estas propiedades determinan la cantidad de radiación absorbida y emitida por las superficies, por lo que son determinantes para los fenómenos de acumulación de calor urbano y la temperatura superficial de los pavimentos. Además, son parámetros necesarios para la modelización energética urbana y los datos experimentales disponibles son todavía muy limitados.

También se incorporan propiedades relacionadas con la **percepción visual** de los ciudadanos, mediante las **coordenadas de color y coordenadas RGB de 16 bits**. Además de su interés desde el punto de vista estético y urbano, estas variables facilitan la relación entre las características de los materiales y la información obtenida mediante sensores remotos e imágenes de alta resolución.

En relación con la gestión del agua se representa principalmente mediante la **permeabilidad** de los materiales. Esta propiedad condiciona la infiltración y el almacenamiento de agua y, de forma indirecta, los procesos de evaporación que contribuyen a la regulación térmica del entorno urbano.

Por último, se incluyen aspectos relacionados con la **aplicación de los materiales**, distinguiendo entre soluciones **aptas para tráfico rodado** y aquellas destinadas exclusivamente a uso peatonal.

Además de estas propiedades, el diseño de estrategias de mitigación de anomalías climáticas requiere de información sobre las propiedades asociadas a la gestión del calor, como la conductividad térmica, el calor específico, la densidad y, cuando resulta relevante, el espesor de las capas de pavimentación. Sin embargo, estas propiedades no se recogen en el catálogo porque, a diferencia de las propiedades radiativas, existen numerosos valores de referencia en la bibliografía, lo que permite asignar parámetros genéricos para las tipologías más habituales de pavimentos urbanos.

6.2.1.1. Metodología experimental

La elaboración del catálogo se ha realizado a partir de la base de datos generada en el proyecto “Caracterización multidimensional de materiales urbanos: impacto sobre el medio ambiente exterior, la demanda energética y el bienestar de los ciudadanos, mateMad”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2020-114873RB-C31; https://proyectomatemad.ietcc.csic.es/).

El catálogo de mateMad incluía las propiedades termo-ópticas experimentales preliminares de muestras proporcionadas por los propios fabricantes de materiales urbanos comerciales (Pérez Álvarez-Quiñones y otros, 2026). Estas propiedades se obtuvieron mediante la medida de espectros de reflectancia de las muestras en el rango de longitudes de onda de la radiación solar y en el rango térmico. Para las medidas en el rango solar se utilizó un equipo portátil formado por una sonda de reflectancia de Ocean Optics, conectada a dos espectrómetros de Stellarnet, y para el rango térmico, un emisómetro portátil ET-100 de Surface Optics Corporation.

En el ámbito del proyecto PAULIA se han llevado a cabo distintas tareas de revisión, actualización y ampliación sobre la base de datos de mateMad que han proporcionado resultados más completos y fiables para el caso de materiales de pavimentos:

1. Se ha **revisado** la clasificación de los materiales y la denominación de los productos para homogeneizar la estructura del catálogo y adecuarla a la oferta comercial actualizada.

2. Se han **reprocesado los datos ópticos** obtenidos experimentalmente, incorporando las correcciones metrológicas necesarias a los espectros de reflectancia en el rango solar para aumentar la fiabilidad de los resultados.

3. Se han incorporado **nuevos materiales** no incluidos en la base de datos original, ampliando la cobertura de soluciones de pavimentación presentes en el mercado español, especialmente aquellos que pueden estar disponibles en Canarias.

4. Se han añadido **propiedades de interés** para los objetivos del proyecto PAULIA, específicamente las coordenadas de color RGB de 16 bits, para facilitar la comparación con información procedente de sensores LiDAR y otras fuentes de teledetección del Instituto Geográfico Nacional (IGN). También se han añadido los datos relativos a la permeabilidad de los materiales y a su capacidad para soportar tráfico rodado.

Con esta metodología se ha elaborado una base de datos de materiales para pavimentos urbanos con las propiedades de interés para las estrategias de mitigación de anomalías climáticas y un catálogo con las fichas recopilatorias de dichas propiedades para cada material.

6.2.2. Resultados

El catálogo se centra en materiales comercialmente **disponibles en el mercado español para su aplicación en pavimentos exteriores**. Estos materiales cumplen los requisitos normativos habituales para este tipo de aplicaciones, incluyendo aspectos relacionados con la seguridad y la durabilidad, como la resistencia al deslizamiento, la resistencia mecánica o el comportamiento frente al impacto.

Asimismo, se ha buscado incluir una **muestra representativa de las distintas soluciones empleadas en el espacio urbano**, abarcando una amplia variedad de propiedades termo-ópticas, características estéticas y composiciones. De este modo, el catálogo permite a la herramienta del proyecto Paulia analizar diferentes estrategias de mitigación climática basadas en los materiales y facilita la comparación entre alternativas habitualmente utilizadas en entornos urbanos.

Base de datos de propiedades de materiales comerciales

La base de datos de materiales para pavimentos urbanos del proyecto PAULIA, recoge la siguiente información, tal y como muestra el recorte de la figura 7:

- **Referencia del material**: asignada de acuerdo con criterios definidos en el proyecto mateMad y que se mantienen puesto que no afectan a la actualización realizada en el proyecto PAULIA.

- **Tipo de material:** según su composición (a base de cemento, de origen orgánico, bituminoso, cerámico o de piedra).

- **r_visible y r_solar**: valores de los parámetros ópticos de reflectancia visible y reflectancia solar definidos en la norma UNE EN 410:2011. Se han calculado a partir de los espectros de reflectancia de las muestras reprocesados para aplicar las correcciones metrológicas necesarias para aumentar la fiabilidad de los resultados.

- **Emisividad**: valores de emitancia hemisférica total proporcionados por el equipo ET-100 de Surface Optics Corporation a partir de la medida de la reflectancia de las muestras en el rango térmico.

- **Coordenadas RGB** de 16 bits: calculadas de acuerdo con la normativa UNE-EN ISO/CIE 11664-4:2020 a partir de los espectros de reflectancia reprocesados.

- **Disponibilidad** de datos en acceso abierto: el valor “Si” indica que la empresa que ha suministrado la muestra de material ha proporcionado autorización por escrito para la difusión de los resultados de sus muestras en el repositorio institucional DIGITAL.CSIC. La autorización permite la difusión bajo la licencia Creative Commons Atribución–No Comercial–Compartir Igual (CC BY-NC-SA), permitiéndose su uso, difusión y generación de obras derivadas únicamente con fines de investigación, docencia y estudio, siempre con reconocimiento de autoría, sin fines comerciales y manteniendo la misma licencia en las obras derivadas.

- **Uso**: Posibilidad de aplicación del material en pavimentos de uso peatonal y con tráfico rodado. El valor “Si” en tráfico rodado indica que el material es apto, al menos, para tráfico ligero en alguno de los formatos posibles del producto.

- **Permeabilidad**: Clasificación del material como poroso. Se asigna el valor “Si” a los productos con una alta permeabilidad asociada al propio material por su porosidad, es decir, no se asigna en el caso de pavimentos que pueden ser drenantes por determinados formatos o sistemas (a través de las juntas, por ejemplo).

En total se han incluido en la base de datos las propiedades de **171 materiales para pavimentos urbanos**, de los cuales el 73.7% (126) son de base cemento, el 12.3% (21) de piedra, el 6.4% (11) cerámicos, el 5.3% (9) son asfaltos y el 2.3% (4) son de base orgánica. Todos los pavimentos recogidos son aptos para uso peatonal y el 91.2% de ellos (156) también lo son para algún tipo de tráfico rodado. Finalmente, se incluyen 13 pavimentos permeables por su alta porosidad, que representan el 7.6% del total.

Catálogo de materiales

La información recopilada en la base de datos se ha estructurado en un catálogo de fichas que recogen los datos relativos a cada uno de los 171 materiales analizados. En la ficha de cada material se indica la siguiente información:

- la referencia y el tipo de material del que se trata
- una gráfica con los espectros de reflectancia medidos en distintos puntos de la muestra de ese material caracterizada y su espectro promedio en el rango de longitudes de onda entre 380 y 1700 nm
- una imagen del aspecto del material
- los valores de todos los parámetros de la base de datos correspondientes al material

Proyecto PAULIA-CPP2022-009932 financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033/ Unión Europea NextGenerationEU/PRTR

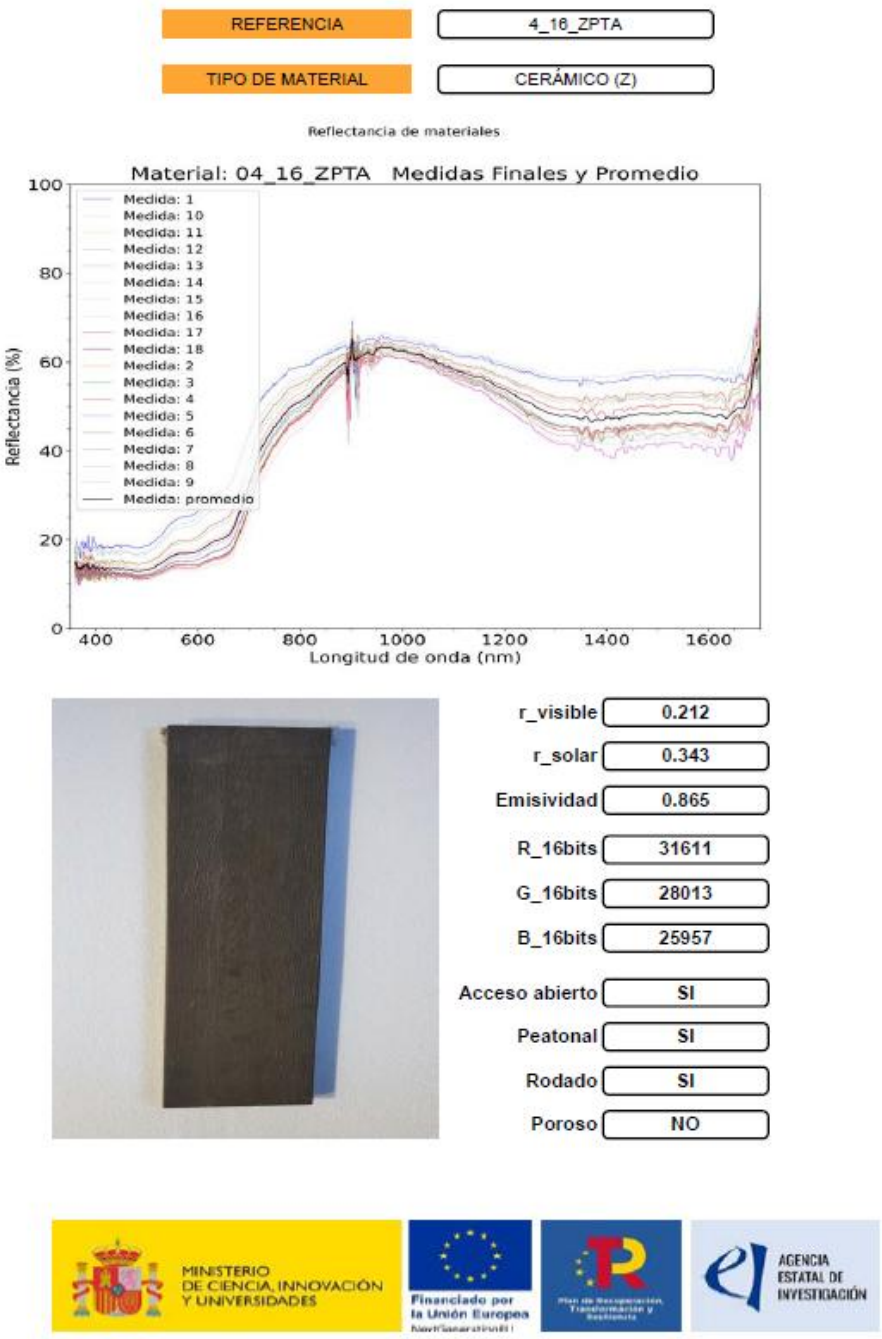


Figura 7. Ficha ejemplo de uno de los materiales de pavimentos urbanos.
Fuente: Elaboración propia.

7. Proyecto piloto: San Isidro

El proyecto piloto se está realizando en la plaza de Pico Teide (N 28° 4' 18.116'', O 16° 33' 26.2''), en el núcleo urbano de San Isidro en Granadilla de Abona (Tenerife). San Isidro tiene una población de 20.405 habitantes (2021) con una renta media por unidad de consumo de 13.341 € y se localiza al sur de la isla de Tenerife.

Previa a la toma de decisiones de cara a las mejoras a implantar en la plaza, se amplía la base de datos para la caracterización de poblaciones previamente descrita (ver apartado 5), incluyendo: orientación geográfica del viario, cobertura del suelo (actualizando la base del SIOSE), compacidad urbana, tipologías de manzana, alturas de los edificios, superficie total del viario, áreas de influencia de zonas húmedas, y localización de vegetación en base a Ortofotografía NIR. Además, se incluyen datos tomados mediante vuelos de dron y aquellos obtenidos de la instalación de sensores en la zona. Estos últimos datos, se incluyen también en la herramienta PAULIA.

Partiendo de esta base de datos más exhaustiva, se realizan varias simulaciones utilizando el software ENVI-met (Bruse & Fleer, 1998) sobre la plaza Pico Teide en la localidad de San Isidro (ver figura 8). El objetivo de estas simulaciones es probar las soluciones recogidas, tanto en el catálogo de vegetación, como en el catálogo de pavimentos urbanos, de cara a una reducción de la temperatura media ponderada superficial de la plaza.



Figura 8. Simulación en el software ENVI-met de las mejoras para la plaza Pico Teide (San Isidro)
Fuente: Elaboración propia.

Una vez establecido el escenario deseado (Figura 8), en base a las mejoras propuestas y los objetivos propuestos en el proyecto, se pasa a aplicar dichas mejoras en la plaza. Debido a barreras administrativas, las obras de mejora de este espacio público están siendo acometidas en el momento de escribir el presente texto. Es por ello que no se presentan resultados todavía.

8. Desarrollo del modelo estadístico

El modelo predictivo va a ser la base para estimar las mejoras aportadas por las soluciones tanto de vegetación, como de materiales de pavimentos urbanos, sobre la temperatura superficial de los espacios públicos.

Para analizar los factores que determinan la temperatura superficial de los espacios públicos (variable dependiente), se seleccionaron una serie de elementos clave, entre los que se incluyen factores naturales y antropogénicos.

Se comenzó por un análisis exploratorio de los factores seleccionados, estudiando la relación con la variable dependiente, así como la posible correlación entre las mismas, descartando aquellas con un alto valor VIF (*Variance Inflation Factor*) (> 5), así como alta correlación (Pearson).

En segundo lugar, se comparó el poder predictivo de tres tipos de modelos diferentes: modelo linear de efectos mixtos (ME), *Generalized Additive Model* (GAM) y *Random Forest (RF)*. Siendo este último la mejor opción para el presente estudio. A continuación, se muestran los diferentes modelos, junto con los factores.

Para los modelos ME, se considera la población, es decir, el núcleo urbano como efecto aleatorio, para controlar el efecto que puede existir por el hecho de que varias plazas se encuentren en un mismo núcleo urbano. Por la misma razón, en GAM se incluye núcleo urbano como “factor”.

En la Tabla 2 se muestran tanto los valores de R cuadrado (R^2), o coeficiente de determinación, que mide la proporción de la variabilidad total de la variable dependiente que es explicada por las variables independientes, así como los valores de las métricas de evaluación de los modelos analizados. Las métricas evaluación presentadas en este trabajo son: MAE: Mean Absolute Error, MSE: Mean Square Error, y RMSE: Root Mean Square Error.

Modelo	R^2	MAE	MSE	RMSE
ME1	0.1976	3.1458	14.7139	3.8359
ME2	0.1253	3.2469	16.0400	4.0050
ME3	0.1256	3.2312	16.0344	4.0043
GAM1	0.8686	1.1858	2.4090	1.5521

GAM2	0.8190	1.3523	3.3196	1.8220
GAM3	0.7579	1.4918	4.4401	2.1072
RF1	0.9290	0.9374	1.3012	1.1407
RF2	0.8686	1.2238	2.4646	1.5699
RF3	0.8647	1.2564	2.4820	1.5754
RF4	0.8757	1.2265	2.2795	1.5098
RF5	0.8675	1.2966	2.4292	1.5586
RF6	0.8796	1.2066	2.2046	1.4858

Tabla 2: valores de R2 y de métricas de evaluación (MAE, MSE y RMSE) de los diferentes modelos evaluados. ME: Modelo de efectos mixtos, GAM: Generalized Additive Model, RF: Random Forest.

Aunque el modelo RF1 es el que mejores métricas de evaluación presenta con respecto a los otros modelos, se descarta debido a que es el modelo “inicial” en el que se incluyen todavía factores que representan la misma información (por ejemplo, dos factores de velocidad de viento, pero de fuentes diferentes). Estos factores se han mantenido tras el primer filtrado, para poder evaluar su poder predictivo en cada uno de los modelos estudiados y escoger el más adecuado.

El modelo seleccionado finalmente es el Random Forest 4, con unas métricas similares al RF6 incluye el factor “área” que se decide conservar.

Los factores incluidos en el modelo final son: velocidad del viento, temperatura del aire, porcentaje de obstáculos al viento en la plaza, área de la plaza, porcentaje de superficie de la plaza sombreada, porcentaje de superficie del suelo cubierto por pavimento impermeable, valor de reflectancia solar de los pavimentos urbanos de la plaza, y porcentaje de vegetación (baja, media y alta) con respecto a la superficie de la plaza.

9. Desarrollo y creación de la herramienta PAULIA

Con el fin de que los resultados del proyecto puedan ser aprovechados por ayuntamientos, técnicos y ciudadanía, se ha desarrollado la herramienta PAULIA, una aplicación web diseñada y desarrollada por el ITER junto con el resto de entidades del proyecto. El desarrollo se ha llevado a cabo de forma iterativa, a medida que se iban completando las bases de datos de caracterización (imágenes de LST, nubes de puntos LiDAR, cartografía SIOSE, datos meteorológicos y lecturas in situ) y los dos catálogos de soluciones, con el objetivo de automatizar el proceso de análisis descrito en la sección 5 de manera que los indicadores de cualquier polígono dentro de las áreas de estudio se obtengan de forma inmediata a partir de los datos descargados.

La herramienta se organiza en cuatro módulos. El módulo **Análisis** permite trabajar sobre un mapa satelital interactivo en el que se dibujan polígonos dentro del área de estudio de cada uno de los 12

núcleos; a partir de ellos se calculan los indicadores de caracterización (impermeabilidad del suelo, sombra y sotavento dinámicos, vegetación por clases de altura y reflectancia de los pavimentos) junto con la temperatura superficial estimada mediante el modelo Random Forest, y los resultados pueden exportarse a CSV y PDF. El módulo **Sensores** (figura 9) ofrece mapas de temperatura y humedad basados en la red de 17 sensores instalados en San Isidro, representados como nubes de calor mediante interpolación IDW y con control temporal. El módulo **Recomendaciones** permite simular la mejora de la temperatura superficial ante escenarios de aumento de vegetación o de sombra o de uso de pavimentos más permeables o de mayor reflectancia solar, y vincula cada escenario con las especies y los materiales del catálogo. Por último, el módulo **Ayuda** incluye la guía de uso y la documentación de los datos y los métodos empleados.

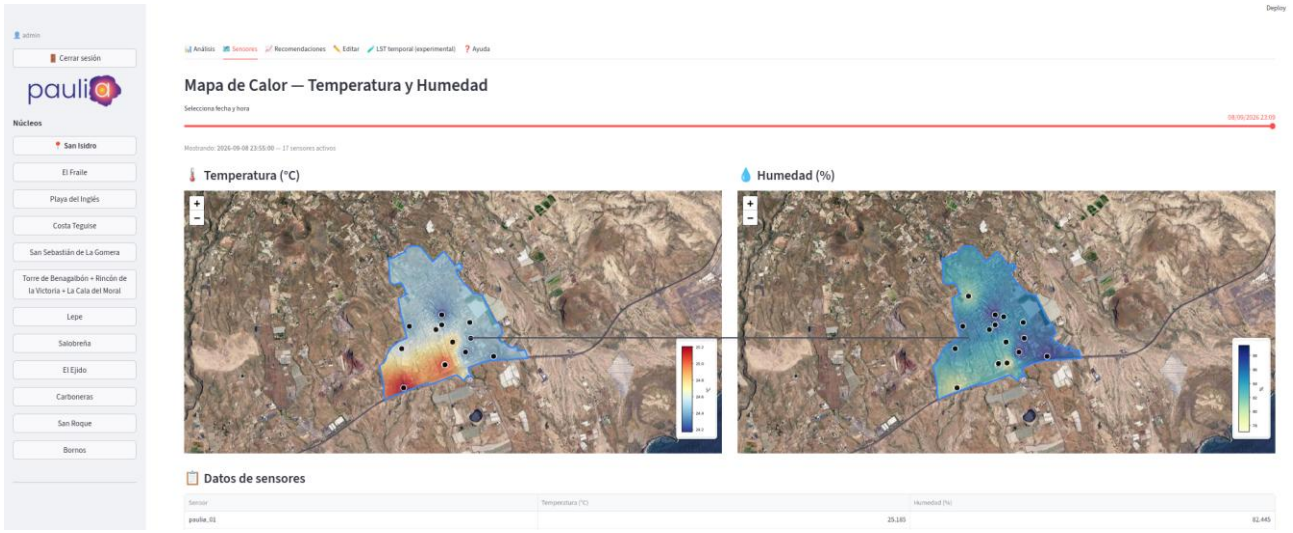


Figura 9. Herramienta PAULIA. En la imagen se muestra el módulo Sensores de San Isidro. A la izquierda, el mapa de temperaturas (ºC) y a la derecha el mapa de humedad (%).
Fuente: Elaboración propia.

10. Conclusiones y futuro

Los resultados obtenidos en el proyecto PAULIA ponen de manifiesto que las pequeñas poblaciones situadas en climas cálidos también presentan dinámicas asociadas al efecto isla de calor que requieren ser estudiadas y abordadas mediante estrategias específicas de adaptación climática. La combinación de información procedente de imágenes aéreas, cartografía temática, mediciones in situ y técnicas de modelización ha permitido desarrollar una metodología capaz de identificar puntos calientes y fríos, caracterizar los factores urbanos que condicionan el comportamiento térmico y evaluar posibles medidas de actuación. En este contexto, la disponibilidad de datos abiertos y de calidad se revela como un elemento fundamental para avanzar en el conocimiento científico, garantizar la reproducibilidad de los análisis y facilitar que administraciones, investigadores y técnicos puedan desarrollar soluciones basadas en evidencia para la adaptación urbana al cambio climático.

Asimismo, el proyecto evidencia el valor de herramientas de apoyo a la toma de decisiones como PAULIA, capaces de integrar grandes volúmenes de información heterogénea y transformarla en

conocimiento útil para la planificación urbana. La incorporación de modelos predictivos junto con catálogos de soluciones de vegetación y materiales permite no solo diagnosticar situaciones de vulnerabilidad climática, sino también estimar el potencial de diferentes medidas de mitigación antes de su implementación. Este enfoque facilita la priorización de actuaciones, optimiza los recursos disponibles y contribuye a aumentar la resiliencia de los espacios públicos frente a eventos de calor cada vez más frecuentes e intensos. Aunque el número de poblaciones, y por ende espacios públicos, utilizadas para el desarrollo de la herramienta no sea tan extenso como sería deseable, sienta una base que evidencia el potencial que este tipo de herramientas tienen.

Como línea de trabajo futura, el desarrollo de herramientas como PAULIA debería incorporar explícitamente escenarios futuros de cambio climático que permitan anticipar la aparición de nuevas zonas vulnerables al calor extremo. Esto implica ampliar el análisis a poblaciones que, aunque actualmente no se encuentren en las áreas climáticas más cálidas, podrían hacerlo a medio y largo plazo según las proyecciones climáticas del IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, por sus siglas en inglés). La capacidad de identificar de forma temprana estas poblaciones permitiría planificar medidas de adaptación antes de que los impactos se manifiesten con toda su intensidad, aumentando la eficacia de las inversiones públicas y la resiliencia urbana.

La adaptación climática de las ciudades y de las pequeñas poblaciones no debe centrarse únicamente en la reducción de temperaturas, sino también en la disminución de las desigualdades asociadas a la exposición y capacidad de respuesta de distintos grupos sociales. Por lo que, será fundamental reforzar la integración de variables sociales relacionadas con los sectores más vulnerables de la sociedad (mayores y niños, migrantes, personas con rentas bajas o en paro, etc.) y su acceso a espacios de refugio climático, y a zonas verdes en general. La combinación de proyecciones climáticas, datos abiertos e indicadores de vulnerabilidad social constituye una de las principales oportunidades para avanzar hacia ciudades y poblaciones más sostenibles, resilientes y socialmente justas.

11. Agradecimientos

Las autoras/es agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación y a la Comisión Europea, por la financiación del proyecto PAULIA (CPP2022-009932) a través del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación.

12. Bibliografía

[1] Ban-Weiss, G. A., Woods, J., Millstein, D., & Levinson, R. (2015). Using remote sensing to quantify albedo of roofs in seven California cities, Part 2: Results and application to climate modeling. Solar Energy, 115, 791-805. https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.10.041

[2] Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software, 13(3-4), 373-384. https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5

[3] Davis, N. N., Badger, J., Hahmann, A. N., Hansen, B. O., Mortensen, N. G., Kelly, M., . . . Drummond, R. (2023, Agosto). The Global Wind Atlas: A high-resolution dataset of climatologies and associated web-based application. Bulletin of the American Meteorological Society, 104(8), E1507-E1525. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0075.1

[4] Dawson, N., Fischer, J., Kuhn, M., Pasotti, A., mhugent, Rouzaud, D., . . . Jurgiel, B. (n.d.). QGIS Geographic Information System (3.44 Bratislava). https://doi.org/10.5281/zenodo.15705458

[5] Dodman, D., Hayward, B., Pelling, M., Castán Broto, V., Chow, W., Chu, E., . . . Ziervogel, G. (2022). Cities, Settlements and Key Infrastructure. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.

[6] Hu, J., Zhang, F., Qiu, B., Zhang, X., Yu, Z., Mao, Y., . . . Zhang, J. (2024, July 10). Green-gray imbalance: Rapid urbanization reduces the probability of green space exposure in early 21st century China. Science of The Total Environment, 933. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173168

[7] Instituto de Estadística y Cartografía de Andalucía. (2021). Portal de Datos Estadísticos y Geoespaciales de Andalucía. Retrieved from https://www.juntadeandalucia.es/institutodeestadisticaycartografia/badea/datos-por-temas

[8] Instituto Geográfico Nacional. (2022). Información Geográfica de Referencia de Poblaciones. Retrieved from http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=POBLA

[9] Lee, J.-Y., Marotzke, J., Bala, G., Cao, L., Corti, S., Dunne, J. P., . . . Zhou, T. (2021). Future global climate: Scenario-based projections and near-term information. Climate change 2021: The physical science basis, 553-672. https://doi.org/10.1017/9781009157896.006

[10] MITECO, M. p. (2020). Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático 2021-2030. Madrid: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). Retrieved from https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/plan-nacional-adaptacion-cambio-climatico.html

[11] Moreno, J. M., Aguiló, E., Alonso, S., Álvarez Cobelas, M., Anadón, R., Ballester, F., . . . Zazo, C. (2005). Evaluación preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático. Madrid: Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente.

[12] Narcizo de Lima, G., Fonseca-Salazr, M., & Campo, J. (2023). Urban growth and loss of green spaces in the metropolitan areasof São Paulo and Mexico City: effects of land-cover changes on climateand water flow regulation. Urban Ecosystems, 1739-1752. https://doi.org/0.1007/s11252-023-01394-0

[13] Observatorio de Turismo de Canarias. (2019). Informes del Observatorio Turístico de Canarias a la Red de Desarrollo Sostenible (red INSTO) de la OMT. Retrieved from https://www.gobiernodecanarias.org/turismo/estadisticas_y_estudios

[14] Onačillová, K., Gallay, M., Paluba, D., Péliová, A., Tokarčík, O., & Laubertová, D. (2022). Combining Landsat 8 and Sentinel-2 Data in Google Earth Engine to Derive Higher Resolution Land Surface Temperature Maps in Urban Environment. Remote Sensing. https://doi.org/0.3390/rs14164076

[15] Ow, L. F., Ghosh, S., & Yusof, M. L. (2019, July). The benefits of tree shade and turf on globe and surface temperatures in an urban tropical environment. Arboriculture & Urban Fprestry, 46(3), 228-244. https://doi.org/10.48044/jauf.2020.017

[16] Pandit, S., & Pandit, T. K. (2026). Urban Heat Island Effect in Small Towns: A Case Study of Jhargram in Jungle Mahal, West Bengal, India, with Reference to Sustainable Development Goals. International Journal of Technology & Emerging Research, 199-204. https://doi.org/10.64823/ijter.2604022

[17] Pérez Álvarez-Quiñones, G. C., Herrera Serrano, L., Alonso Rodríguez, P., Martínez, A. C., Montero, I., Alonso, C. C., . . . Martín-Consuegra, F. (2026). Database of visible reflectance, solar reflectance and emissivity of urban materials (Version 2). DIGITAL.CSIC. https://doi.org/10.20350/DIGITALCSIC/22640

[18] Ravazdezh, F., & Rivers, N. (2025, October 1). Quasi-experimental evidence that the urban tree canopy reduces residential energy consumption. Energy and Buildings, 344. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115992

[19] Short, J. R., & Farmer, A. (2021). Cities and Climate Change. Earth, 2(4), 1038-1045. https://doi.org/10.3390/earth2040061

[20] Sobrino, J. A., & Irakulis, I. (2020). A Methodology for Comparing the Surface Urban Heat Island in Selected Urban Agglomerations Around the World from Sentinel-3 SLSTR Data. Remote Sensing, 12. https://doi.org/10.3390/rs12122052

[21] Tan, M., & Li, X. (2015). Quantifying the effects of settlement size on urban heat islands in fairly uniform geographic areas. Habitat International, 100-106. https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2015.05.013

[22] Zhou, B., Rybski, D., & Kropp, J. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. Scientific Reports, 4791. https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2

[23] Zhu, S., Ma, C., Wu, Z., Huang, Y., & Liu, X. (2024). Exploring the Impact of Urban Morphology on Building Energy Consumption and Outdoor Comfort: A Comparative Study in Hot-Humid Climates. Buildings, 14-19. https://doi.org/10.3390/buildings14051381

CONAMA 2026