

Parte IV. Resumen y análisis de resultados

Part IV. Summary and analysis of results

10. Monitorización de la isla de calor urbana de Madrid

Monitoring the urban heat island of Madrid

11. Contextualización de los datos procedentes de la monitorización

Contextualisation of monitoring data

12. Análisis de la evolución horaria e intraurbana de la isla de calor

Analysis of the hourly and intra-urban evolution of the urban heat island

13. Modelización de la isla de calor mediante un enfoque basado en datos

Modelling the urban heat island using a data-driven approach

14. Creación de archivos climáticos urbanos para la ciudad de Madrid

Creation of urban weather files for the city of Madrid

En esta parte del documento se realiza una descripción integrada de la investigación, desde la medición y contextualización de las mediciones hasta la generación y testeo de los archivos climáticos urbanos. Se articula en cinco capítulos, una por cada una de las fases de esta investigación, tal y como se recoge en la metodología. En cada capítulo, además de realizarse un resumen del trabajo de investigación, se destaca el papel de las publicaciones y su contribución a cada una de las etapas, justificándose con ello tanto su relevancia como unidad temática.

This part of the document provides an integrated description of the research, from the measurements and their contextualisation to the generation and testing of the urban weather files. It is divided into five chapters, one for each of the phases of this research, as described in the methodology. In each chapter, along with a summary of the research work, the publications' contribution to each of the stages is highlighted, thereby justifying both their relevance and their thematic unity.

10. Monitoring the urban heat island of Madrid

The first stage of this PhD thesis focuses on the collection of experimental data on temperature and relative humidity in the city of Madrid. It is the starting point of this research, since these data will be used, after processed and analysed, to develop various models to capture the urban heat island effect and transfer it to energy simulation.

It is structured in five sections. The first (10.1) is devoted to the spatial delimitation of the study area, which will delimit the monitoring coverage. The second (10.2) presents a preliminary analysis of the urban heat island, which is necessary to facilitate decision-making during the design of the monitoring campaign at fixed locations. The monitoring protocol is presented in the following three sections, from the design of the network (10.3) to its deployment and maintenance (10.5), and including the design and manufacture of the protection of the measuring equipment (10.4).

10.1. Delimitation of the study area: vertical and horizontal scale

Any monitoring campaign focusing on the study of the urban climate must begin with the delimitation of the study area. This document has already stated that the objective is to monitor the urban heat island of the city of Madrid. However, this first task goes beyond delimiting the region of interest. It is necessary to define the spatial scales, both horizontal and vertical, on which the research is focused.

At the horizontal level, three spatial scales have historically been considered (see Chandler, 1976; Lacy, 1972; Oke, 1984): the *mesoscale*, which captures the interactions between the city and its immediate surroundings, extending over tens of kilometres; the *local scale*, reflecting the climatic conditions of a part of the urban fabric, and typically ranging from a few hundred metres to a few kilometres; and the *microscale*, which captures the climatic singularities of the urban elements that shape the city, and where temperatures can vary over just a few metres.

Although temperature variations at the microscale certainly condition the energy performance of buildings, this monitoring campaign focused on capturing climatic variations at the local scale. The primary motivation of this research is to generate a set of weather files for the city of Madrid as a whole. The large variability of the microclimate would not only increase up to infinity the number of weather files needed for this purpose, but its validity would be compromised wherever there is any urban alteration, regardless of how small it may be.

10. Monitorización de la isla de calor urbana de Madrid

La primera etapa de esta tesis doctoral se centra en la recogida experimental de datos de temperatura y humedad relativa en la ciudad de Madrid. Supone el punto de partida de esta investigación, ya que serán estos datos los que, tras ser convenientemente procesados y analizados, se utilizarán para el desarrollo de diversos modelos con los que capturar el efecto de la isla de calor y trasladarlo a la simulación energética.

Se estructura en cinco apartados. El primero (10.1) está dedicado a la delimitación espacial del área de estudio, lo que servirá para acotar la cobertura de la monitorización. En el segundo (10.2) se presenta un análisis previo de la isla de calor, necesario para facilitar la toma de decisiones durante el diseño de la campaña de monitorización a través de puntos fijos. El protocolo de monitorización se recoge en los siguientes tres apartados, desde el diseño de la red (10.3) hasta su despliegue y mantenimiento (10.5), y pasando antes por el diseño y fabricación de la protección de los equipos de medición (10.4).

10.1. Delimitación del ámbito de estudio: escala vertical y horizontal

Todo trabajo de monitorización orientado al estudio del clima urbano debe comenzar por la delimitación del ámbito de actuación. En este documento ya se ha indicado que el objetivo es la monitorización de la isla de calor urbana de la ciudad de Madrid. Sin embargo, esta tarea va más allá de acotar la región de interés. En concreto, es necesario definir las escalas espaciales, tanto horizontal como vertical, en las que se centra la investigación.

En el plano horizontal, históricamente se han considerado tres escalas espaciales (véanse Chandler, 1976; Lacy, 1972; Oke, 1984): la *mesoescala*, que recoge las interacciones entre la ciudad y su entorno inmediato, y cuya extensión abarca decenas de kilómetros; la *escala local*, reflejo de las condiciones climáticas de una parte del tejido urbano, y que normalmente se sitúa entre unos centenares de metros y pocos kilómetros; y la *microescala*, que registra las singularidades climáticas de los elementos que dan forma a la ciudad, y donde las temperaturas pueden variar en apenas unos pocos metros.

Aunque las variaciones de temperatura en la microescala ciertamente condicionan el comportamiento energético de los edificios, esta campaña de monitorización se ha centrado en capturar las variaciones climáticas producidas en la escala local. Esto se debe, fundamentalmente, a que la motivación última de este trabajo de investigación es la generación de una batería de archivos climáticos para el conjunto de la ciudad de Madrid. La enorme variabilidad de la escala microclimática no sólo llevaría hasta el infinito el número de archivos climáticos necesarios, sino que su validez quedaría com-

prometida allá donde se produjera cualquier alteración urbana, por pequeña que fuera. En cuanto a las recomendaciones de organismos internacionales, la Organización Mundial de la Meteorología (WMO) define la escala local como aquella en la que *deberán operar las estaciones climáticas normalizadas*, recomendando explícitamente evitar la microescala (WMO, 2017a, capítulo 9 *Observaciones urbanas*).

En cuanto al plano vertical, la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera libre genera una zona de fricción donde el movimiento del aire se ve alterado. Esta región, que comúnmente se conoce como *capa límite atmosférica* o *capa límite planetaria* (ABL, por sus siglas en inglés), se ve modificada cuando la superficie terrestre está ocupada por ciudades. En estos casos recibe el nombre de *capa límite urbana* (UBL), y queda a su vez definida por un conjunto de capas cuyo espesor y presencia es función de las condiciones meteorológicas y del momento del día (véase la **Figura 10.1**).

In terms of recommendations from international institutions, the World Meteorological Organization (WMO) defines the local scale as the scale at which *standardised climate stations should operate*, and explicitly recommends avoiding the microscale (WMO, 2017a, chapter 9 *Urban Observations*).

In the vertical plane, the interaction between the Earth's surface and the free atmosphere generates a friction zone where air motion is altered. This region, commonly referred to as the *atmospheric boundary layer* or *planetary boundary layer* (ABL), is modified when the Earth's surface is occupied by cities. In these cases it is known as the urban boundary layer (UBL), and is in turn defined by a set of layers whose thickness and presence is a function of meteorological conditions and time of day (see **Figure 10.1**).

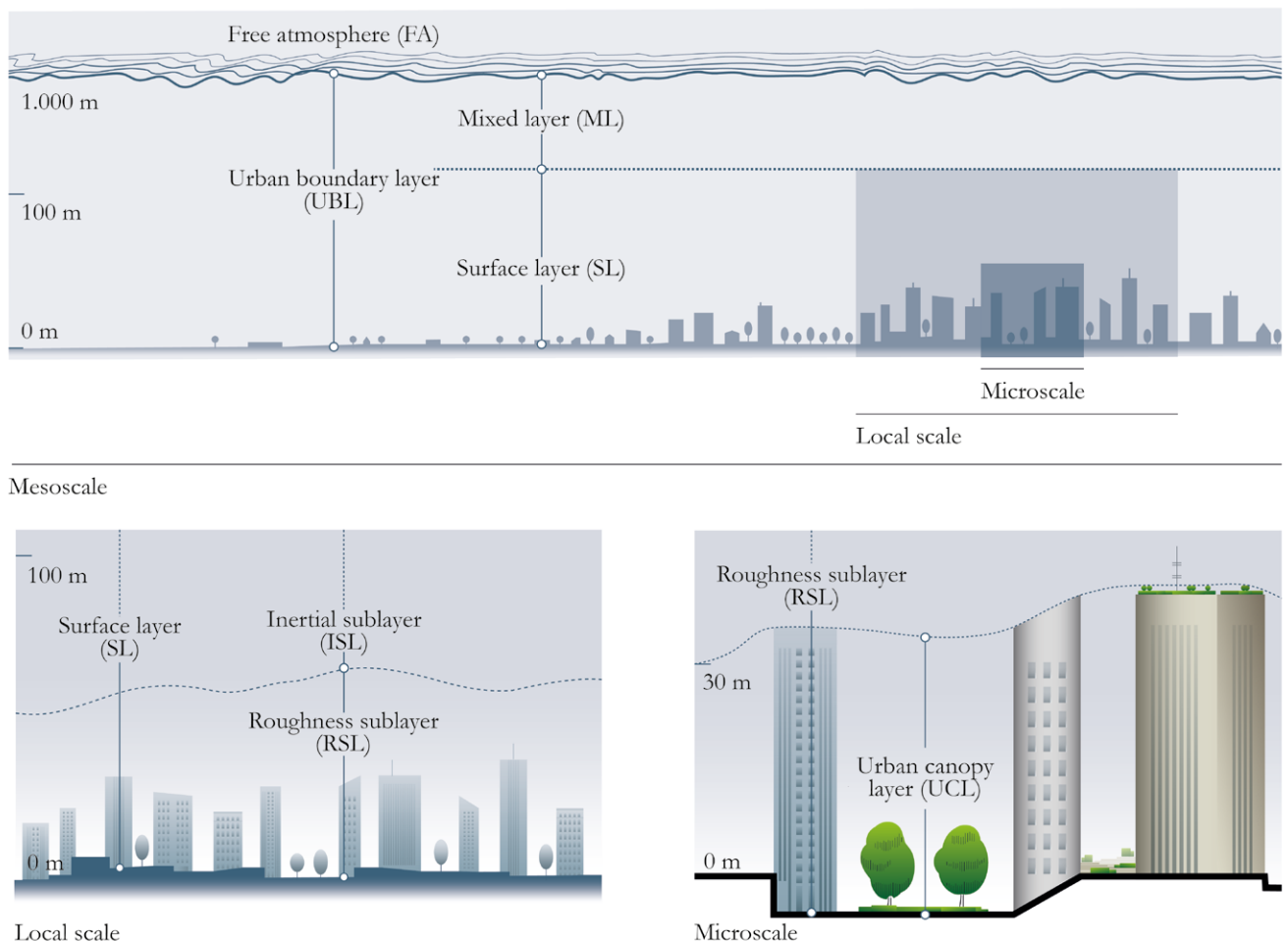


Figura 10.1 Capas atmosféricas contenidas en la capa límite urbana, durante el día.

Figure 10.1 Atmospheric layers contained in the urban boundary layer, during the day.

A brief analysis of the most relevant layers for the study of urban climate is included in Núñez Peiró et al. (2019): the inertial sublayer (ISL), the roughness sublayer (RSL), and the urban canopy layer (UCL), an extract of which is given below:

The ISL develops in the upper part of the surface layer, from the upper limit of the RSL, the so-called blending height, to the top of the SL. This part of the atmosphere links both the regional and the local scale, therefore reflecting the effects that the surface introduces in the atmospheric boundary layer structure [164]. Within this layer, and under neutral conditions, turbulent fluxes are mostly constant with height, so it can be assumed as a constant-flux layer with a homogeneous flow where the logarithmic wind laws apply [177]. With non-neutral condition, Monin-Obukhov Similarity theory might be used to explain turbulent fluxes near the ground (M-O theory, Monin & Obukhov, 1954). (...)

Uncertainties increase when approaching the theoretical limit of the blending height (z_R). Under it, the roughness sublayer (RSL) develops in two different scales: the bottom part, which in urban contexts is usually referred as the urban canopy layer (UCL), and the upper part, which is normally denoted as the RSL (...). The last one could be considered as a transition layer between the UCL, the microclimatic scale where most of the urban activities take place, and the ISL, where the effects of the land surface are already well mixed and representative of the local scale. In that sense, and contrary to the ISL, Monin-Obukhov Similarity theory does not apply at the RSL level. Within this layer, turbulence dominates the flow and depends on the spatial characteristics underneath, which introduces many doubts about the source of the energy flux (Leclerc and Foken, 2014).

(Núñez Peiró et al., 2019, p. 266)

In this sense, the location of monitoring equipment on building roofs should be avoided because it is located in the SLR, a transition zone between the UCL and the ISL, and especially influenced by the surfaces of nearby roofs. It would be advisable, as stated by WMO (2017), to locate the equipment in the ISL, at a height between two and five times the average height of the buildings. However, there are technical, financial and even regulatory constraints that prevent, or at least make it extremely difficult, to deploy a monitoring network at a height of several tens of metres. Furthermore, depending on the height, the sensor source area may be larger than the area of interest to be monitored (see **section 11.3**). Instead, it is common to place the equipment in the UCL, at a height and position that minimises the influence of microclimatic scale perturbations (e.g. Fenner et al., 2014; Skarbit et al., 2017; Watkins et al., 2002; Yang et al., 2018). This is the preferred option for studies aimed at measuring urban temperatures and is, consequently, the scale selected for this monitoring campaign.

En Núñez Peiró et al. (2019) se incluye un breve análisis de las capas más relevantes para el estudio del clima urbano: la *subcapa inercial* (ISL), la *subcapa de rugosidad* (RSL), y el *palio urbano* (UCL), recogiendo a continuación un extracto:

La ISL se desarrolla en la parte superior de la capa superficial, desde el límite superior de la RSL, la llamada altura de mezcla, hasta la parte superior de la capa superficial (SL). Esta parte de la atmósfera sirve de enlace entre la escala regional y la local, reflejando así los efectos que la superficie introduce en la estructura de la capa límite atmosférica (Barlow, 2014). Dentro de esta capa, y en condiciones neutras, los flujos turbulentos son en su mayoría constantes con la altura, por lo que puede asumirse como una capa de flujo constante y homogéneo donde se aplican la ley logarítmica del viento (Tennekes, 1973). Con condiciones no neutrales, la teoría de similitud de Monin-Obukhov puede utilizarse para explicar los flujos turbulentos cerca del suelo (teoría M-O, Monin & Obukhov, 1954). (...)

Las incertidumbres aumentan al acercarse al límite teórico de la altura de mezcla (z_R). Por debajo de ella, la subcapa de rugosidad (RSL) se desarrolla en dos escalas diferentes: la parte inferior, que en contextos urbanos suele denominarse palio urbano (UCL), y la parte superior, que suele denominarse RSL (...). Esta última podría considerarse como una capa de transición entre la UCL, la escala microclimática en la que se desarrollan la mayor parte de las actividades urbanas, y la ISL, en la que los efectos de la superficie del suelo ya están bien entremezclados y son representativos de la escala local. En este sentido, y al contrario que en la ISL, la teoría de la similitud de Monin-Obukhov no se aplica en el nivel de la RSL. Dentro de esta capa, la turbulencia domina el flujo y depende de las características espaciales subyacentes, lo que introduce muchas dudas sobre el origen del flujo de energía (Leclerc and Foken, 2014).

(Núñez Peiró et al., 2019, pág. 266. Texto traducido de la versión original en inglés)

En este sentido, la localización de equipos de monitorización en cubiertas de edificios debe evitarse por situarse en la RSL, zona de transición entre la UCL y la ISL, y especialmente influenciada por las superficies de las azoteas o tejados próximos. Lo recomendable, y así lo recoge la WMO (2017), sería situar los equipos en la ISL, a una altura de dos y cinco veces la altura media de los edificios. Sin embargo, existen limitaciones técnicas, presupuestarias e incluso normativas que impiden o, al menos, dificultan enormemente la tarea de desplegar una red de monitorización a varias decenas de metros. Además, dependiendo de la altura, el área fuente del sensor podría llegar a tener un tamaño superior al área de interés que se pretende monitorizar (véase **apartado 11.3**). En su lugar, es habitual situar los equipos en la UCL, a una altura y posición que minimice la influencia de las alteraciones ocurridas en la escala microclimática (p. ej., Fenner et al., 2014; Skarbit et al., 2017; Watkins et al., 2002; Yang et al., 2018). Esta es la opción preferida por los estudios orientados a la medición de temperaturas urbanas y es, en consecuencia, la escala seleccionada para desarrollar esta campaña de monitorización.

10.2. Análisis previo de la distribución espacial de la isla de calor

Tanto por su tamaño, como por su localización y características climáticas, la ciudad de Madrid cuenta con una isla de calor de elevada intensidad. Este punto ha sido confirmado durante las últimas décadas por diversos estudios y a través de diferentes medios, y que incluyen desde las primeras mediciones llevadas a cabo mediante transectos urbanos (Almendros Coca, 1992; Almendros and López Gómez, 1995; Fernández García et al., 1996; López Gómez et al., 1988), observaciones meteorológicas fijas (Yagüe et al., 1991), y teledetección (Fernández García et al., 2016; López Gómez et al., 1993; Sobrino et al., 2013, 2009), hasta las recientes modelizaciones numéricas desarrolladas en los últimos años (Krpó et al., 2010; Salamanca, 2010; Salamanca et al., 2011).

La gran heterogeneidad espacial de la isla de calor de Madrid convierte en compleja la tarea de determinar tanto la ubicación como el número de equipos fijos necesarios para dar forma a la red de monitorización, especialmente si, como es el caso, se van a situar en el palio urbano. Con el fin de facilitar esta toma de decisiones, el diseño de la red fija de monitorización se apoya en un primer análisis de la distribución espacial de la isla de calor.

Para este análisis previo se ha trabajado con los datos recogidos a través de transectos urbanos, técnica de muestreo consistente en el desarrollo de recorridos transversales a la ciudad a través de los cuales se recogen los datos. El uso de transectos está ampliamente documentado en la literatura relacionada con la isla de calor, y acostumbra a ser uno de los primeros pasos en la investigación del clima urbano de las ciudades (en Madrid, por ejemplo, con López Gómez et al., 1988). Es, además, una técnica que puede proporcionar una gran resolución espacial, ya que durante su desarrollo pueden tomarse datos en cientos de puntos, lo que la convierte en una técnica óptima para el desarrollo de esta primera etapa de la investigación. Otras técnicas, como la utilización de imágenes satelitales o modelos numéricos, no resultan tan convenientes por contar, precisamente, con una resolución espacial más limitada y una menor precisión a la hora de estimar la temperatura del aire.

En total, se han ejecutado 3 transectos simultáneos en 4 momentos del año, aproximadamente un mes después de los solsticios y equinoccios, y en condiciones de gran estabilidad atmosférica, propicias para la formación de la isla de calor (véase **Figura 10.2**). Todos los detalles relativos a los medios y métodos empleados para su desarrollo pueden consultarse en Nuñez Peiró et al. (2017), basados a su vez en los empleados por López Gómez et al. (1988). Replicar la aproximación del estudio de 1988 ha permitido estudiar la evolución de la isla de calor a lo largo de un amplio periodo temporal. Sin embargo, la técnica empleada fue mejorada y adaptada a las nuevas tecnologías disponibles, automatizando la recogida, geolocalización y procesamiento de los datos, aumentando la resolución de la toma de datos, y reduciendo los medios necesarios para su ejecución.

10.2. Preliminary analysis of the spatial distribution of the ICU

Due to its size, location and climatic characteristics, the city of Madrid has a high UHI intensity. This point has been confirmed during the last decades by several studies and by different means, including the first measurements carried out by urban transects (Almendros Coca, 1992; Almendros and López Gómez, 1995; Fernández García et al., 1996; López Gómez et al., 1988), fixed meteorological observations (Yagüe et al., 1991) and remote sensing (Fernández García et al., 2016; López Gómez et al., 1993; Sobrino et al., 2013, 2009), to the recent numerical modelling developed in recent years (Krpó et al., 2010; Salamanca, 2010; Salamanca et al., 2011).

The great spatial heterogeneity of Madrid's urban heat island makes it a complex task to determine both the location and the number of fixed equipment necessary to shape the monitoring network, especially if, as is the case, they are to be located in the urban area. In order to facilitate this decision making, the design of the fixed monitoring network is supported by a first analysis of the spatial distribution of the urban heat island.

For this preliminary analysis, the data collected through urban transects, a sampling technique consisting of the development of transversal routes through the city through which data is collected, was used. The transects sampling technique is widely documented in the literature related to the urban heat island and is usually one of the first steps in the investigation of urban climate in cities (in Madrid, for example, with López Gómez et al., 1988). It is also a technique that can provide a high spatial resolution, since during its development data can be taken at hundreds of points, which makes it an optimal tool for the development of this first stage of the research. Other techniques, such as the use of satellite images or numerical models, are not as convenient, precisely because they have a more limited spatial resolution and a lower accuracy when estimating air temperature.

In total, 3 simultaneous transects were executed at 4 times of the year, approximately one month after the solstices and equinoxes, and in conditions of great atmospheric stability, favourable for the formation of the urban heat island (see **Figure 10.2**). Full details of the means and methods can be found in Nuñez Peiró et al. (2017), based in turn on those used by López Gómez et al. (1988). Replicating the approach of the 1988 study has made it possible to study the evolution of the urban heat island over a long time period. Nonetheless, the technique was improved and adapted to the new technologies now available, automating the collection, geolocation and processing of the data, increasing the resolution of the data collection, and reducing the resources required for its execution.



Figura 10.2a Transectos urbanos desarrollados durante la primera campaña de medición, entre julio 2015 y julio 2016. Se incluyen los puntos de medición fijos de los observatorios de la AEMET y del Sistema de Vigilancia de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid.

Figure 10.2a Urban transects carried out during the first measurement campaign, between July 2015 and July 2016. Available data from AEMET observatories and air quality stations are also included.

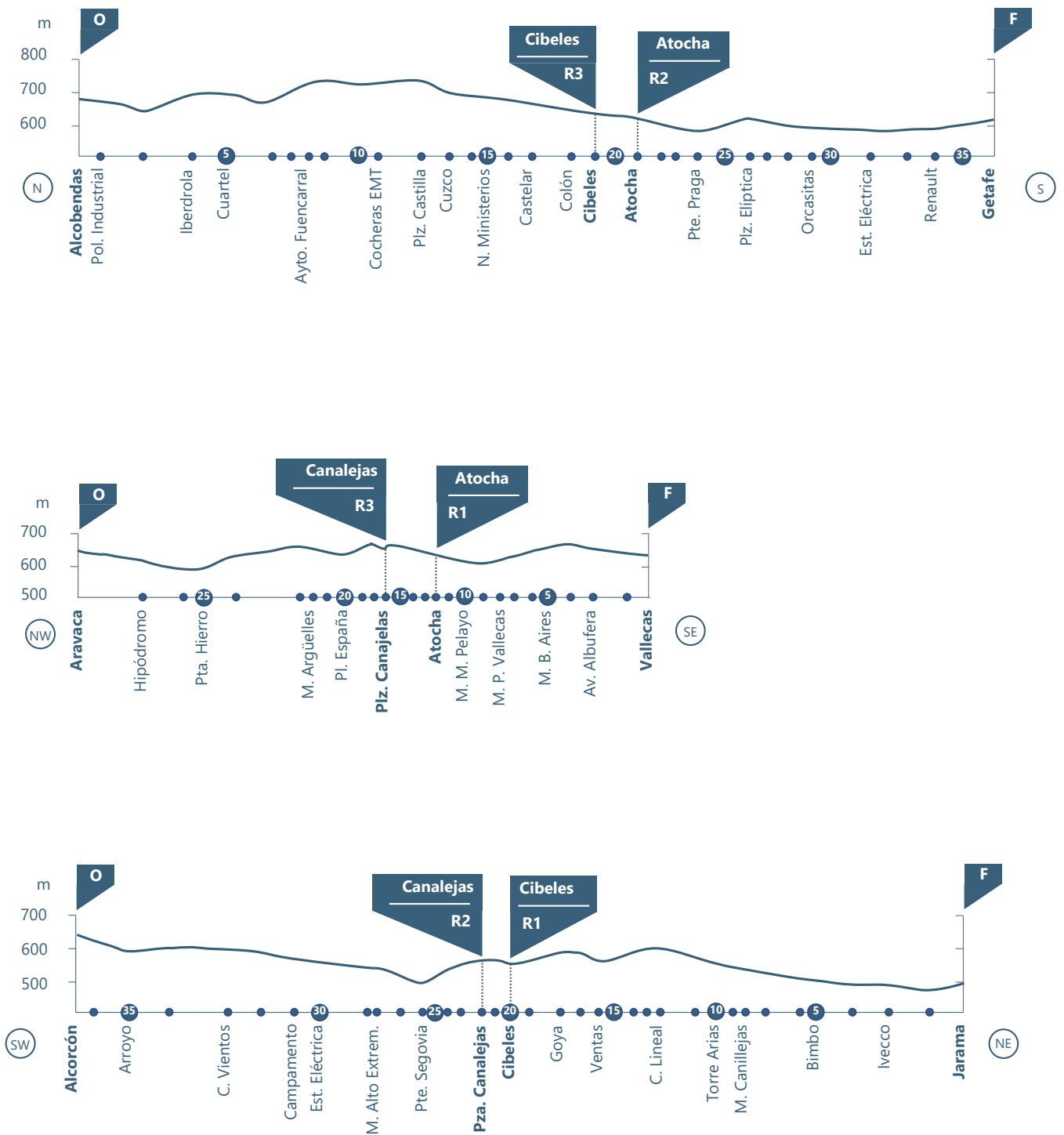


Figura 10.2b Transectos urbanos desarrollados durante la primera campaña de medición, entre julio 2015 y julio 2016. De arriba a abajo, los recorridos norte - sur (Alcobendas - Getafe), noroeste - sureste (Aravaca - Vallecas) y suroeste - noreste (Alcorcón - Jarama). Basados en López Gómez et al. (1988).

Figure 10.2b Urban transects carried out during the first measurement campaign, between July 2015 and July 2016. From top to bottom, the north - south route (Alcobendas - Getafe), northwest - southeast route (Aravaca - Vallecas) and southwest - northeast route (Alcorcón - Jarama). Based on López Gómez et al. (1988).

Results confirm an urban heat island intensity that can exceed 7 °C at midnight. The isotherm maps presented in **Figure 10.4** show a clear concentric distribution, an uncertain seasonality that points to a higher intensity of the urban heat island in the vicinity of the summer solstice, the clear influence of the Manzanares river, and a clear effect of the large green areas of the city. The morphology of the urban heat island is described as follows in Núñez Peiró et al. (2017):

The concentric distribution of the urban heat island is tinged with a more intense development in the NE-SW axis, in line with the urbanization expansion. It is found a repeated pattern in Ciudad Universitaria, as it is in both cases the closest point to the city with the lowest temperature. The surroundings of the park El Retiro, with a cool island, show a similar behaviour too. Results confirm that the villages around the city of Madrid are under the effect of micro-heat islands, with an intensity of one to three degrees Celsius. Confirming that there are some urban fabrics that cause either a rise or a fall in temperatures is worth of interest as well.

(M. Núñez Peiró et al., 2017, p. 346)

Los resultados confirman una intensidad de la isla de calor que llega a superar, a medianoche, los 7 °C. Los mapas de isotermas presentados en la **Figura 10.4** muestran una clara distribución concéntrica, una incierta estacionalidad que apunta a una mayor intensidad de la isla de calor en las proximidades del solsticio de verano, la clara influencia de la vaguada del Manzanares, y un claro efecto de las grandes zonas verdes de la ciudad. La morfología de la isla de calor se describe de la siguiente manera en Núñez Peiró et al. (2017):

La distribución concéntrica de la isla de calor se matiza con un desarrollo más intenso en el eje NE-SW, siguiendo el nivel de urbanización de la zona. Ciudad Universitaria marca la mínima más próxima a la ciudad, y destaca en ambos casos la isla de frescor a la altura del parque de El Retiro. Se observa que, además de la ciudad de Madrid, las ciudades y pueblos situados en sus proximidades cuentan con micro islas de calor de entre 1 y 3°C, y que existen tejidos urbanos que provocan incrementos o descensos de temperatura en ambos casos.

(M. Núñez Peiró et al., 2017, pág. 346.

Texto traducido de la versión original en inglés)

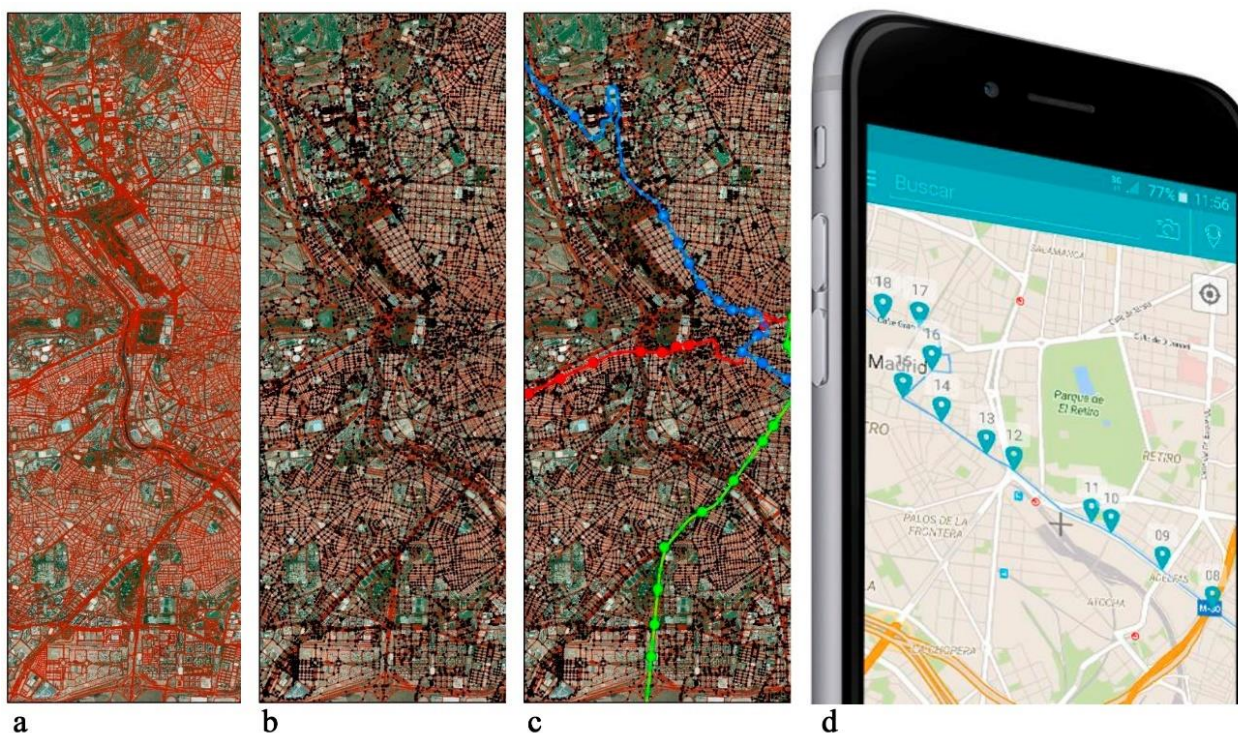


Figura 10.3 Representación de los pasos realizados para adaptar los recorridos desarrollados entre 1984 y 1987 por López Gómez et al. (1988) a la estructura viaria actual. Se recreó la estructura viaria actual en un Sistema de Información Geográfica (GIS) (a), donde se configuró su conectividad y se asignó reglas para la circulación (b). Con ello se generaron nuevos recorridos óptimos, coincidentes con los puntos de medición del estudio previo de 1988 (c), y que se integraron en dispositivos móviles para poder seguir y registrar las rutas por GPS (d).

Figure 10.3 Representation of the steps taken to adapt the routes developed between 1984 and 1987 by López Gómez et al. (1988) to the current road structure. The current road structure was recreated in a Geographic Information System (GIS) (a), where its connectivity was configured and rules for circulation were assigned (b). This generated new optimal routes, coinciding with the measurement points of the previous study of 1988 (c), which were integrated into mobile devices to track and record the routes by GPS (d).

Cuando estos resultados se comparan con los obtenidos a partir de los datos de López Gómez et al. (1988), el resultado muestra un incremento en la extensión, pero no en la intensidad, de la isla de calor de Madrid:

(...) resulta evidente el aumento radial de las zonas más afectadas por la isla de calor, ampliando su área de influencia y multiplicándose los focos más potentes donde la variación de temperatura supera los 4°C. Sin embargo, la isla de calor no parece haber aumentado en intensidad, manteniendo los valores máximos en el entorno de los 5-6 °C. Todo apunta a que el crecimiento de la ciudad ha propiciado que el área de la isla de calor con mayor intensidad (>4°C) se extienda a otras zonas del núcleo urbano, pero esto no parece suficiente para aumentar su intensidad en los puntos en los que ya había alcanzado las cotas más altas, y donde el tejido urbano ya consolidado ha sufrido pocos cambios a lo largo de estas tres décadas.

(M. Núñez Peiró et al., 2017, pág. 346.

Texto traducido de la versión original en inglés)

When these results are compared with those obtained from the data of López Gómez et al. (1988), the result shows an increase in the extent, but not in the intensity, of the Madrid urban heat island:

(...) it seems clear that the UHI has enlarged its size and increased the number of urban areas that bear the hottest temperature records (those where the intensity is over 4°C). However, the UHI intensity does not seem to be increasing itself, as the maximum values are in both cases around 5-6 °C. It appears that the growth of the city has effectively increased the domain of the urban heat island, spreading its higher effect over new areas. However, it does not seem enough to increase its intensity at the points where already had reached the maximum, probably because the urban fabric is consolidated and has changed little or nothing over the last three decades.

(M. Núñez Peiró et al., 2017, p. 346)

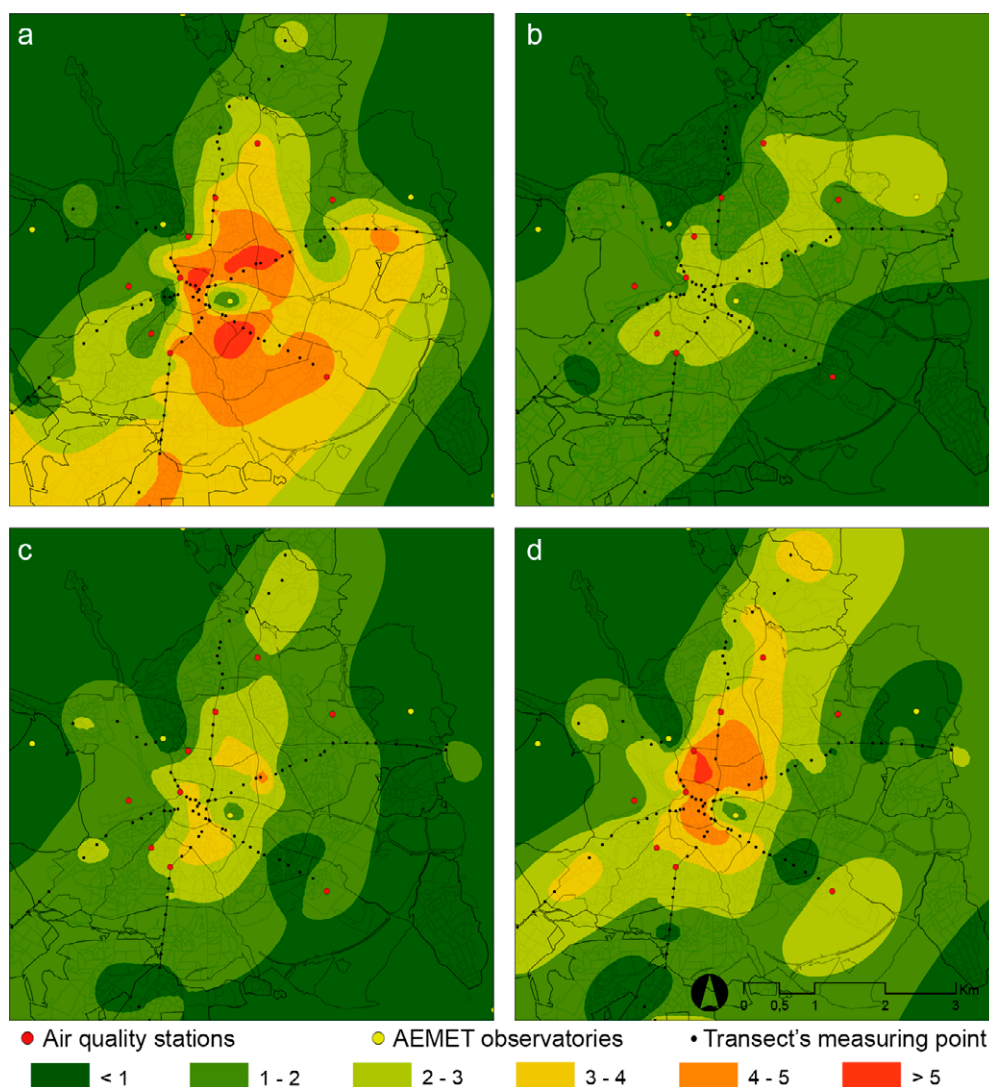


Figura 10.4 Mapas exploratorios de la isla de calor, ordenados por orden cronológico: (a) 15 de julio de 2015, (b) 28 de octubre de 2015, (c) 16 de febrero de 2016 y (d) 25 de abril de 2016.

Figure 10.4 Exploratory maps of the urban heat island, arranged in chronological order: (a) 15 July 2015, (b) 28 October 2015, (c) 16 February 2016 and (d) 25 April 2016.

All these observations have been used as a basis for defining the areas of interest for monitoring through fixed points, the design and implementation of which is described in the following sections.

10.2. Network design and search for complementary data

The design of the monitoring campaign was based on a gradient approach of varying densities (Muller et al., 2013, see **Figure 10.5**). This distribution strategy, visually less ordered than those based on grids or transects (e.g., Watkins et al., 2002), offers instead greater flexibility in the positioning of the monitoring equipment.

In this case, the observations were based on urban transects which, once translated into isotherm maps (see previous section), made it possible to adapt the position of the equipment to the environments of greatest interest. This translates into a concentration of equipment in the central areas of the city, where the intensity of the urban heat island is higher and where it presents greater variability due to the presence of the Manzanares watercourse and El Retiro park.

Todas estas observaciones han servido de base a la hora de acotar las áreas de interés de la monitorización a través de puntos fijos, y cuyo diseño y puesta en funcionamiento se describe en los siguientes apartados.

10.3. Diseño de la red y búsqueda de datos complementarios

El diseño de la campaña de monitorización se ha basado en una aproximación en forma de gradiente de diversas densidades (Muller et al., 2013, véase **Figura 10.5**). Esta estrategia de distribución, visualmente menos ordenada que las basadas en cuadrículas o en transectos (p. ej., Watkins et al., 2002), ofrece sin embargo una mayor flexibilidad a la hora de situar los equipos.

En este caso, se ha partido de las observaciones llevadas a cabo mediante transectos urbanos y que, una vez traducidas en mapas de isotermas (véase sección anterior), han permitido adaptar la posición de los equipos a los entornos de mayor interés. Esto se traduce en una concentración de equipos en las zonas céntricas de la ciudad, donde la intensidad de la isla de calor es más alta y donde presenta una mayor variabilidad debido a la presencia de la vaguada del Manzanares y del parque de El Retiro.

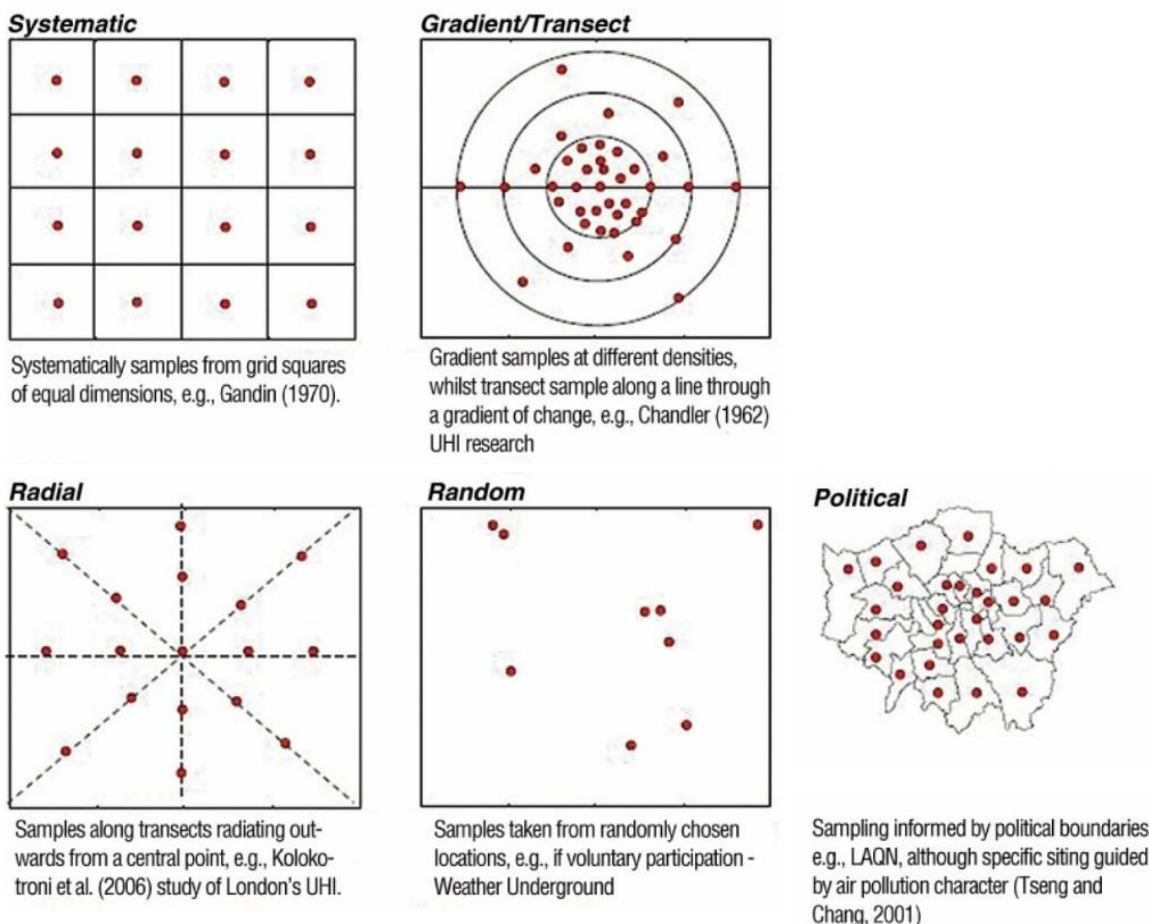


Figura 10.5 Principales aproximaciones a la hora de diseñar una red urbana de medición (Muller et al., 2013; a partir de Robinson, 2010).

Figure 10.5 Main approaches to designing an urban monitoring network (Muller et al., 2013, based on Robinson, 2010).

En total, se distribuyen 20 equipos por todo el municipio de Madrid con el fin de registrar datos de temperatura y humedad relativa en régimen horario. Los equipos se sitúan a una altura de entre 5 y 6 metros con respecto al nivel del suelo, anclados a los postes de alumbrado público, lo que garantiza una medida de las condiciones higrotérmicas lo más centrada posible en el cañón urbano y alejada de las superficies (horizontales y verticales). Esto permite minimizar la influencia de la radiación reflejada y reemitida por los materiales urbanos, aumenta la seguridad de los equipos, y se aleja de la salida de los gases de combustión, entradas y salidas de locales comerciales y garajes. Así lo recoge la WMO en su *Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológica* (WMO, 2017a, extraído a su vez de Oke, 2006):

En estaciones no urbanas, la altura de garita recomendada es de entre 1,25 y 2 m sobre el suelo. Aunque este valor es también aceptable para los emplazamientos urbanos, puede resultar conveniente suavizar este requisito para permitir alturas mayores. En la mayoría de los casos, ello no debería conllevar errores apreciables, especialmente en áreas muy densamente edificadas, ya que las observaciones en cañones urbanos evidencian unos gradientes de temperatura del aire muy poco acentuados en la mayor parte del palio urbano, siempre y cuando la ubicación se halle a más de 1 m de una superficie (Nakamura and Oke, 1988). Las mediciones efectuadas a alturas de 3 o 5 m no son muy diferentes de las realizadas a alturas estándar, tienen algunas áreas fuente ligeramente mayores, y en ellas el sensor está situado a una distancia suficiente para evitar daños y la proximidad de vehículos. Permiten también una mayor dilución del calor emitido por los vehículos, y reducen la contaminación debida al polvo.

(WMO, 2017a, pág. 893)

La **Figura 10.6** muestra la ubicación de estos 20 equipos junto a otras cinco localizaciones, correspondientes a los cinco observatorios meteorológicos situados en la ciudad y pertenecientes a la AEMET. Estos últimos han sido empleados para complementar la información obtenida durante la campaña de monitorización, aportando registros no sólo de temperatura y humedad relativa, sino también de nubosidad, precipitación, radiación solar y viento.

Por el contrario, no han sido incluidos en este trabajo de investigación los datos recogidos por la red de calidad del aire ya que, aunque fueron utilizados en estudios anteriores (Núñez Peiró et al., 2016; 2017; Sanz Fernández et al., 2016), no demostraron tener la precisión suficiente durante las horas diurnas. Tampoco han sido incluidos los registros procedentes de la recientemente estrenada red de observación meteorológica del Ayuntamiento de Madrid, cuyos datos están disponibles únicamente desde enero de 2019 (Ayuntamiento de Madrid, 2019). Del mismo modo, los datos disponibles a través de diversas redes ciudadanas colaborativas, como Meteoclimatic o Netatmo (Netatmo, 2021), han quedado descartados igualmente dado que requieren de sofisticadas técnicas de procesamiento y filtrado todavía en desarrollo (Bell et al., 2015; L. Chapman et al., 2017; Nipen et al., 2020).

In total, 20 devices were distributed throughout the municipality of Madrid to measure the temperature and relative humidity on an hourly basis. The equipment is placed at a height of between 5 and 6 metres above ground level, anchored to public lighting poles, which ensures that the hygrothermal conditions are measured as centrally as possible in the urban canyon, away from any surfaces (horizontal and vertical). This minimises the influence of reflected and re-emitted radiation from urban materials, increases the safety of the equipment, and keeps it away from the exhaust of combustion gases, entrances and exits of commercial premises and garages. This is stated by the WMO in its *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (WMO, 2017a, in turn extracted from Oke, 2006):

At non-urban stations recommended screen height is between 1.25 and 2 m above ground level. While this is also acceptable for urban sites, it may be better to relax this requirement to allow greater heights. This should not lead to significant error in most cases, especially in densely built-up areas, because observations in canyons show very slight air temperature gradients through most of the UCL, provided that the location is more than 1 m from a surface (Nakamura and Oke, 1988). Measurements at heights of 3 or 5 m are not very different from those at the standard height, have slightly greater source areas and place the sensor beyond easy reach, thus preventing damage, and away from the path of vehicles. They also ensure greater dilution of vehicle exhaust heat and reduce contamination from dust.

(WMO, 2017a, p. 813)

Figure 10.6 shows the location of these 20 devices together with five other locations, corresponding to the five meteorological observatories located in the city and belonging to the AEMET. The latter have been used to complement the information obtained during the monitoring campaign, providing records not only of temperature and relative humidity, but also of cloudiness, precipitation, solar radiation and wind.

In contrast, data collected by the air quality network have not been included in this research work because, although they were used in previous studies (Núñez Peiró et al., 2016; 2017; Sanz Fernández et al., 2016), they did not prove to be sufficiently accurate during daytime hours. Records from the recently launched meteorological observation network of the Madrid City Council have not been included either, as data are only available since January 2019 (A. de Madrid, 2019). Similarly, data available through various collaborative citizen networks, such as Meteoclimatic or Netatmo (Netatmo, 2021), have also been discarded as they require sophisticated processing and filtering techniques still under development (Bell et al., 2015; L. Chapman et al., 2017; Nipen et al., 2020).

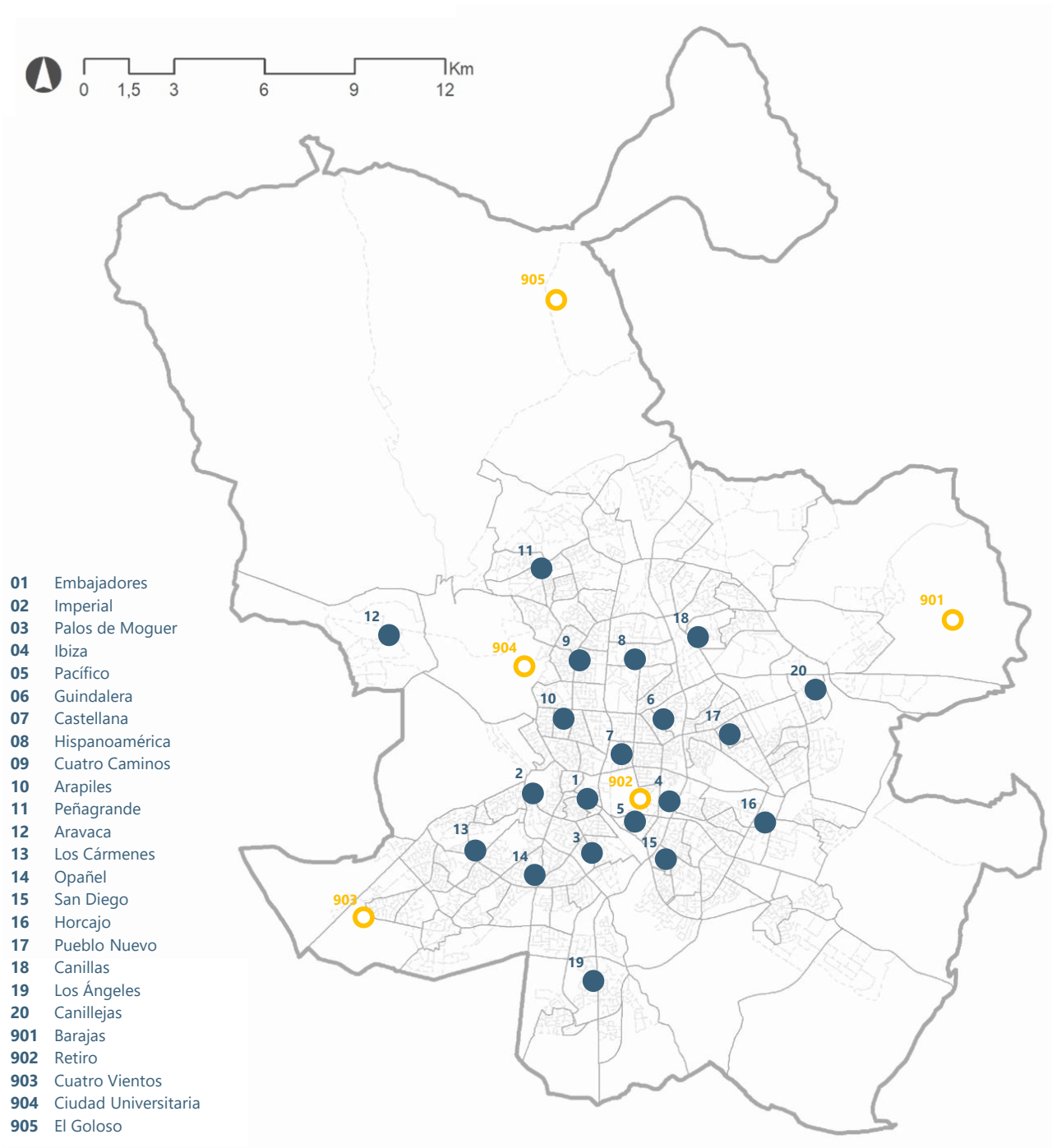


Figura 10.6 Localización de los equipos de monitorización empleados en este estudio. Incluye los equipos desplegados durante la campaña MODIFICA, así como los cinco observatorio meteorológicos de la AEMET situados en el municipio de Madrid.

Figura 10.6 Location of the monitoring equipment used in this study. It includes the equipment deployed during the MODIFICA campaign, as well as the five AEMET meteorological observatories located in the municipality of Madrid.

10.4. Situación y protección de los equipos de medición

En cuanto a los equipos, se han empleado termohigrómetros de exterior HOBO U23-001, con una precisión de $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura) y $\pm 2.5\%$ (humedad relativa). Estos equipos han sido ampliamente utilizados en proyectos de investigación similares, generalmente ubicados dentro de abrigos meteorológicos pasivos (Beck et al., 2018; Borbora and Das, 2014; Coseo and Larsen, 2014; Kourtidis et al., 2015; Richard et al., 2018; Schatz and Kucharik, 2014; Suomi, 2018; Yang et al., 2020a). Sin embargo, el riesgo de sobrecalentamiento debido a la radiación solar directa y reflejada por las superficies, así como a una peor ventilación natural ocasionado por un régimen de vientos alterado por la estructura urbana, desaconsejaba la utilización de este tipo de protecciones pasivas. En su lugar se ha utilizado un abrigo meteorológico equipado con ventilación mecánica, alimentado por una célula fotovoltaica situada en la parte superior, y diseñado específicamente para su utilización en este proyecto.

10.4. Location and protection of monitoring equipment

In terms of equipment, HOBO U23-001 outdoor thermohygrometers have been used, with an accuracy of $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperature) and $\pm 2.5\%$ (relative humidity). This equipment has been widely used in similar research projects, usually located inside passive weather shelters (Beck et al., 2018; Borbora and Das, 2014; Coseo and Larsen, 2014; Kourtidis et al., 2015; Richard et al., 2018; Schatz and Kucharik, 2014; Suomi, 2018; Yang et al., 2020a). However, the risk of overheating due to direct and reflected solar radiation from surfaces, as well as poorer natural ventilation caused by a wind regime altered by the urban structure, discouraged the use of this type of passive protection. Instead, a weather shelter equipped with mechanical ventilation was used, powered by a photovoltaic cell located at the top, and designed specifically for use in this project.

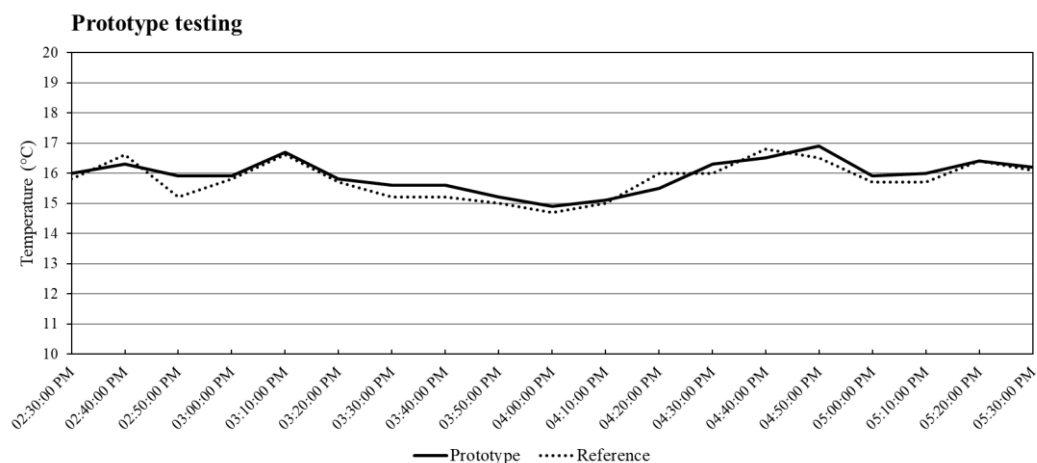


Figura 10.7 Prueba piloto realizada con un prototipo en entorno ventilado. Se comparan las temperaturas obtenidas dentro del prototipo con las de una protección estándar ventilada de forma natural, considerada de referencia.

Figure 10.7 Pilot testing carried out with a prototype in a ventilated environment. The temperatures obtained inside the prototype were compared with those of a standard naturally ventilated protection, considered as a reference.

This solution was first evaluated by means of a prototype that was tested in an open, well-ventilated space. Its recordings were compared with that of a naturally ventilated *Stevenson-type* protection, which was supposed to provide acceptable reference values for a well-ventilated area. Both solutions were equipped with a highly sensitive sensor with a short response time. **Figure 10.7** shows some images of the testing, as well as a graph with the temperature evolution recorded by both solutions during the central hours of the day (12:30 -

Esta solución fue evaluada, en primer lugar, mediante un prototipo que fue puesto a prueba en un espacio abierto y bien ventilado. Sus registros se compararon con el de una protección ventilada naturalmente tipo *Stevenson*, y que se presuponía debía proporcionar unos valores de referencia aceptables por tratarse de una zona bien ventilada. Ambas soluciones fueron equipadas con un sensor de alta sensibilidad y tiempo de respuesta breve. La **Figura 10.7** muestra unas imágenes del momento de la prueba, así como una gráfica con la evolución de las temperaturas registradas por ambas soluciones durante las horas centrales del día (12:30 – 15:30 UTC, 02:30 –



Figura 10.8 Imágenes del proceso de fabricación de la protección de los sensores.

Figure 10.8 Images of the manufacturing process of the sensor protection.

05:30 PM). Tal y como se puede observar, las diferencias registradas entre ambas soluciones fueron mínimas. Se consideró, por tanto, que el prototipo podía ofrecer un nivel de protección aceptable, por lo que se procedió a su fabricación. La **Figura 10.8** muestra algunas imágenes de este proceso.

La solución planteada consta de un contenedor de polietileno de acabado reflectante y opaco, aislado por el interior, y cuya ventilación se produce de forma forzada a través de una apertura en la base y con salida en la parte superior, lo que garantiza una correcta ventilación del interior. La posición de la placa fotovoltaica, situada en el plano horizontal de la cubierta y capaz de accionar la ventilación únicamente con radiación reflejada, otorga gran versatilidad al sistema cuando se sitúa en el cañón urbano. El resultado fue patentado (patente *ES 2642617-B2*, Núñez Peiró et al., 2018) y se encuentra disponible para su consulta en el **capítulo 5**. La **Figura 10.9** muestra una selección de las figuras que describen la solución.

15:30 UTC, 02:30 - 05:30 PM). As can be seen, the differences between the two solutions were minimal. It was therefore considered that the prototype could offer an acceptable level of protection and was therefore manufactured. **Figure 10.8** shows some images of this process.

The proposed solution consists of a polyethylene container with a reflective and opaque finish, insulated on the inside, and whose ventilation is forced through an opening at the base and with an outlet at the top, which ensures proper ventilation of the interior. The position of the photovoltaic panel, located on the horizontal plane of the roof and capable of activating the ventilation with reflected radiation as well, gives great versatility to the system when it is placed in the urban canyon. The result was patented (patent *ES 2642617-B2*, Núñez Peiró et al., 2018) and is available for consultation in **Chapter 5**. **Figure 10.9** shows a selection of the figures describing the solution.

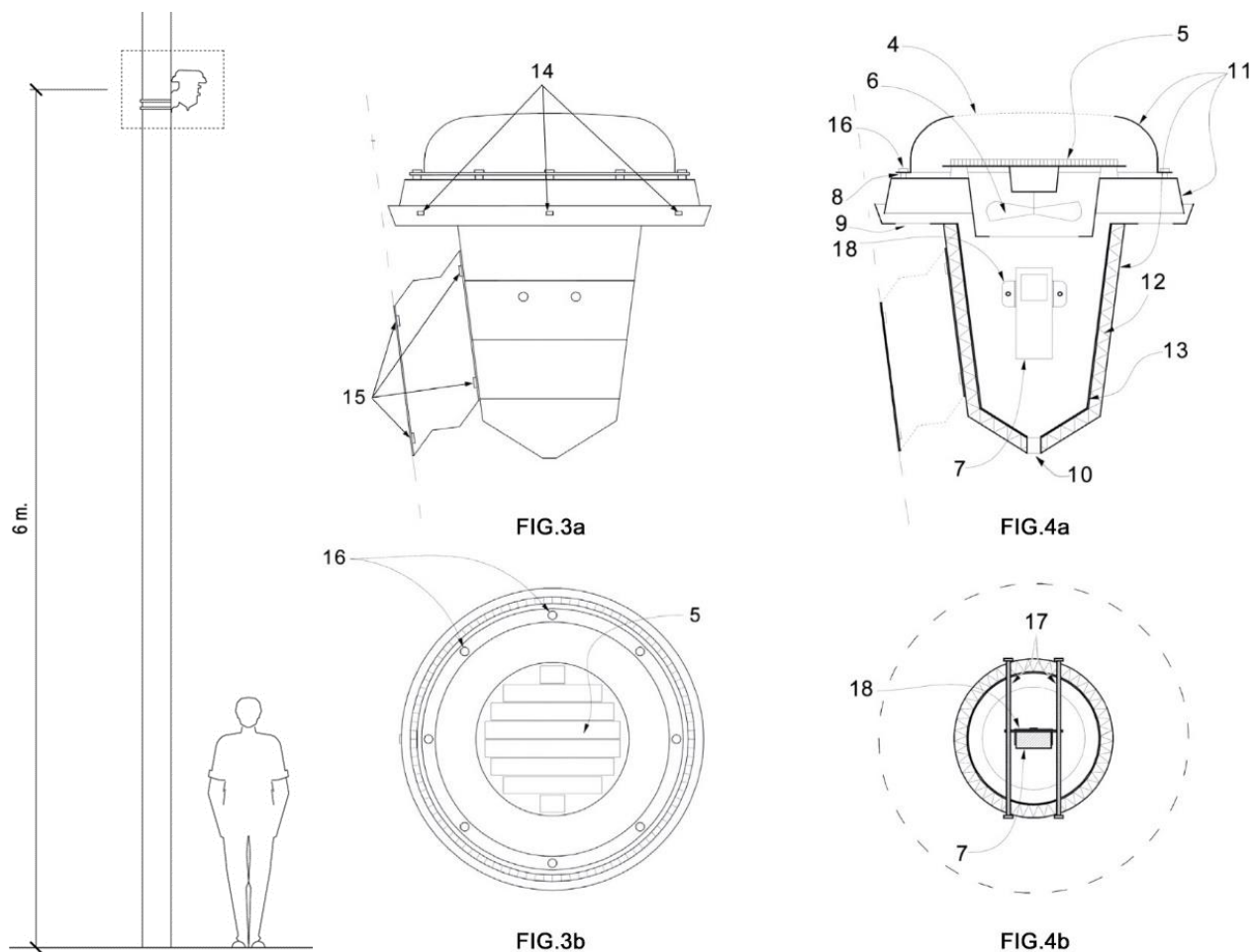


Figura 10.9 A la izquierda, ilustración de la posición de los equipos de medición. A la derecha, extracto de las figuras que forman parte de la patente (ES2642617-B2).

Figure 10.9 On the left, illustration of the position of the measuring equipment. On the right, extract of the figures included in the patent (ES2642617-B2).

10.5. Authorisation, deployment, and maintenance of the network

In order to use the street lighting poles as a mount for the measurement equipment, authorisation had to be sought from the Public Lighting Department of the Madrid City Council. In addition to submitting a document with the details of the monitoring campaign and the detailed location of all the equipment, civil liability insurance had to be taken out to cover possible damage caused by the equipment. All equipment was provided with an identification badge to facilitate tracking during maintenance and removal of equipment (Figure 10.10).

10.5. Autorización, despliegue y mantenimiento de la red

Para poder hacer uso de los postes de alumbrado público como soporte para los equipos de medición hubo que solicitar autorización al Servicio de Instalaciones Urbanas del Ayuntamiento de Madrid. Además de presentar un documento con los detalles de la campaña de monitorización y la ubicación pormenorizada de todos los equipos, también hubo que contratar un seguro de responsabilidad civil con el fin de cubrir posibles daños producidos por los equipos. Todos los equipos contaron con un distintivo identificativo con el fin de facilitar su seguimiento durante las tareas de mantenimiento y retirada de equipos (Figura 10.10).



Figura 10.10 Distintivo identificativo único con el que contaron todos los equipos. Estos facilitaron el seguimiento de los equipos durante las tareas de mantenimiento y su retirada.

Figure 10.10 A unique identification tag was used for all the equipment. These made it easier to track the equipment during maintenance work and its removal.

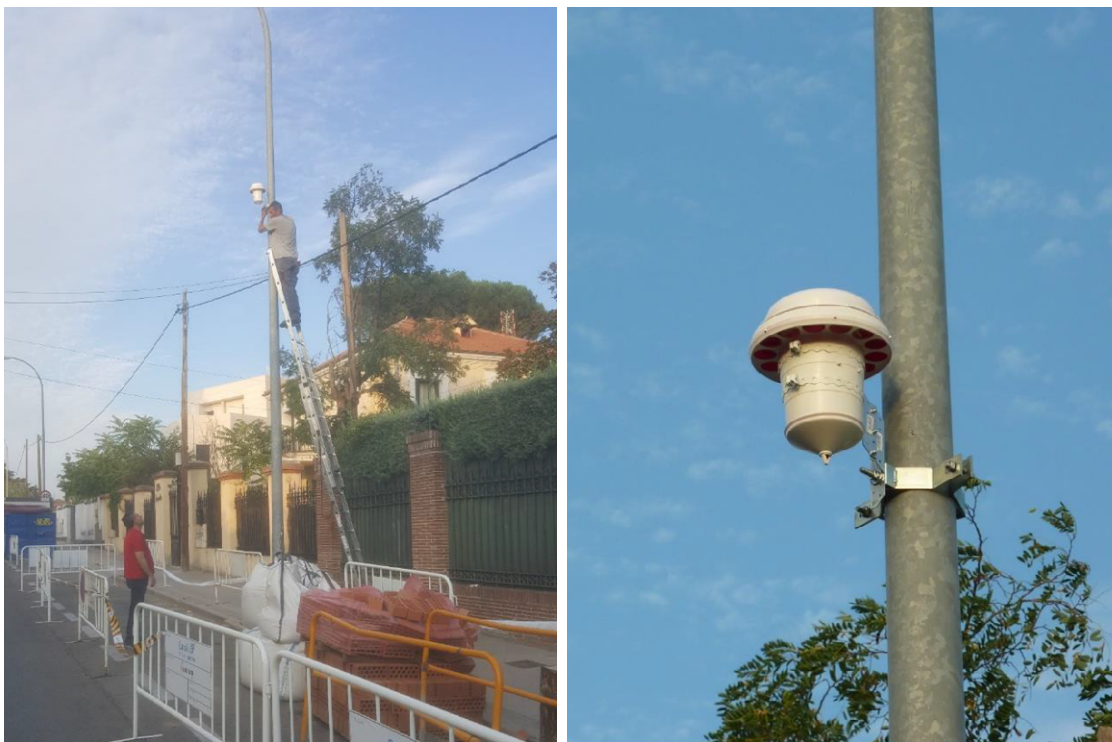


Figura 10.11 Instalación del primer equipo de monitorización en el espacio público. Las imágenes corresponden con la ubicación Aravaca, el punto de medición número 12.

Figure 10.11 Installation of the first monitoring unit in the public space. The images correspond to the Aravaca location, measuring point number 12.

Para la colocación se contó con el apoyo de la Subdirección General de Energía y Cambio Climático del Ayuntamiento de Madrid, quien sufragó parte de los costes. La **Figura 10.11** muestra el momento en el que se instala el primer equipo de la red MODIFICA.

Se planificaron revisiones periódicas para el mantenimiento y descarga de los datos. Se realizó una primera revisión a los tres meses de desplegar la red, y posteriormente una cada 6 meses. Durante estas revisiones se limpiaron los equipos, se revisaron los anclajes y se comprobó el correcto funcionamiento de la unidad de extracción. Todas las revisiones finalizaron satisfactoriamente, sin tener que realizar ninguna reparación.

La campaña de monitorización estuvo activa durante más de tres años, desde el 22 de julio de 2016 hasta el 8 de octubre de 2019. Sin embargo, debido a las obras públicas llevadas a cabo en la calle de Atocha durante el otoño de 2018, el equipo situado en el casco histórico (Embajadores) tuvo que ser retirado prematuramente, reduciendo la longitud de los datos disponibles para este punto hasta el 31 de octubre de 2018 (véase **Figura 10.12**). En cuanto al resto de equipos, tan solo cabe mencionar una discontinuidad de alrededor de 68 horas en el registro de datos, en octubre de 2017, debido a un problema técnico asociado a la memoria de los dispositivos.

The installation was supported by the General Sub-Directorate for Energy and Climate Change of the Madrid City Council, who covered the deployment costs. **Figure 10.11** shows the installation of the first unit of the MODIFICA network.

Periodic maintenance and data download reviews were planned. A first inspection was carried out three months after the network was deployed, and subsequently every 6 months. During these reviews, the equipment was cleaned, the anchorages were checked, and the extraction unit was tested for correct operation. All the maintenance checks were completed satisfactorily, without having to carry out any repairs.

The monitoring campaign was active for more than three years, from July 22nd 2016 to October 8th 2019. However, due to the public works carried out in Atocha street during the autumn of 2018, the equipment located in the historic centre (Embajadores) had to be removed prematurely, reducing the length of data available for this point until October 31st 2018 (see **Figure 10.12**). As for the rest of the equipment, it is only worth mentioning a discontinuity of around 68 hours in data recording in October 2017, due to a technical problem associated with the memory of the devices.



Figura 10.12 Momento en el que se procede a la retirada del equipo de medición de Embajadores, situado en la calle Atocha, por motivo de la sustitución de los postes de alumbrado público. Imagen captada por el servicio Street View de Google.

Figure 10.12 The Embajadores metering equipment, located in Atocha street, is being removed as a result of the replacement of the street lighting poles. Image captured by Google's Street View service.

All hourly records were subjected to data quality control, a process summarised in Núñez-Peiró et al. (2021b) as follows:

Quality Control (QC) procedures were also applied to this dataset. These were derived from the WMO Guidelines for Level II data (WMO, 2017b, 2017a; Zabumensky, 2004), and included plausible value and time consistency checks. Additionally, a test for evaluating spatial consistency was conducted, analysing whether the gap between a specific record and its surrounding data was too large when compared to the average. If it remained within 4 standard deviations, it was not considered suspect data. Records were marked as erroneous when flagged as suspect data twice. Regarding the temperature records provided by the AEMET, these only presented small discontinuities (<2 consecutive hours) and, since these records are subject to regular QC analysis before publishing, they were not included in the QC analysis. Neither erroneous nor missing records were replaced but were removed from the series.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, p. 8)

Table 10.1 summarises the records obtained for each of the measurement points between August 1st 2016 and July 31st 2018, the time range used during Stages 3 and 4 of this research.

Todos los registros horarios fueron sometidos a un control de calidad de datos, proceso resumido en Núñez-Peiró et al. (2021b) de la siguiente forma:

También se aplicaron procedimientos de control de calidad (QC) a este conjunto de datos. Estos se derivaron de las Directrices de la WMO para los datos de nivel II (WMO, 2017a, 2017c; Zabumensky, 2004), e incluyeron comprobaciones de valores plausibles y de coherencia temporal. Además, se realizó una prueba para evaluar la coherencia espacial, analizando si la diferencia entre un registro específico y sus datos circundantes era demasiado grande en comparación con la media. Si se mantenía dentro de 4 desviaciones estándar, no se consideraba como dato sospechoso. Los registros se marcaron como erróneos cuando se señalaban como datos sospechosos por segunda vez. En cuanto a los registros de temperatura proporcionados por la AEMET, éstos sólo presentaron pequeñas discontinuidades (<2 horas consecutivas) y, dado que estos registros se someten a un análisis regular de control de calidad antes de su publicación, no se incluyeron en el análisis de control de calidad. No se sustituyeron los registros erróneos ni los que faltaban, sino que se eliminaron de la serie.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, pág. 8.

Texto traducido de la versión original en inglés)

La **Tabla 10.1** resume los registros válidos obtenidos para cada uno de los puntos de medición entre el 1 de agosto de 2016 y el 31 de julio de 2018, rango temporal empleado durante las etapas 3 y 4 de esta investigación.

Tabla 10.1 Resumen de los datos obtenidos a partir de la campaña de monitorización MODIFICA y de los observatorios de la AEMET. Los registros fueron señalados como correctos (correct), erróneos (erroneous), sospechosos (suspect) o perdidos (missing) de acuerdo con el protocolo de control de calidad de datos empleado.

Table 10.1 Summary of the data obtained from the MODIFICA monitoring campaign and the AEMET observatories. Records were marked as correct, erroneous, suspect or missing according to the data quality control protocol.

Sensors		Flagged as suspect						
ID	Site name	Total data	Missing values	Plausible value	Time consist.	Spatial consist.	Flagged as erroneous	Flagged as correct
MODIFICA campaign								
01	Embajadores	17452	68	0	40	24	3	17449
02	Imperial	17452	68	0	851	69	10	17442
03	La Chopera	17452	68	0	252	30	5	17447
04	Estrella	17452	68	0	56	22	5	17447
05	Pacífico	17453	67	0	29	13	2	17450
06	Guindalera	17452	68	0	40	24	3	17449
07	Recoletos	17452	68	0	36	18	2	17450
08	Hispanoamérica	17452	68	0	45	22	3	17449
09	Cuatro Caminos	17452	68	0	36	22	2	17450
10	Arapiles	17452	68	0	31	15	2	17450
11	Peñagrande	17451	69	0	53	14	2	17450
12	Aravaca	17452	68	0	771	71	18	17434
13	Los Cármenes	17452	68	0	380	56	8	17444
14	Opañel	17452	68	0	101	40	7	17445
15	San Diego	17452	68	0	42	26	4	17448
16	Horcajo	17452	68	0	59	12	3	17449
17	Pueblo Nuevo	17452	68	0	34	27	5	17447
18	Canillas	17452	68	0	124	35	7	17445
19	Los Ángeles	17452	68	0	71	25	9	17443
20	Canillejas	17452	68	0	39	11	2	17450
AEMET network								
901	Barajas (reference)	17516	4	-	-	-	-	-
902	Retiro	17428	92	-	-	-	-	-
903	Cuatro Vientos	17507	13	-	-	-	-	-
904	C. Universitaria	17132	388	-	-	-	-	-
905	El Goloso	16983	537	-	-	-	-	-

11. Contextualisation of monitoring data

The high variability of urban environments can lead to significant differences in temperature and humidity between relatively close urban locations, so it is essential to correctly contextualise the measurement points in order to be able to analyse and understand the data obtained from the measurements.

The second stage of this research focuses on this task, and for this it is necessary to distinguish two key elements: on the one hand, the selection of a battery of metadata that allows linking the measurements with the physical reality in which they are inserted. This task is carried out in **sections 11.1** and **11.2**, where the metadata are described and a system for the climatic classification of the measurements is selected, respectively.

On the other hand, the delimitation of the sensor source area (i.e., the area that affects the sensor measurement) is essential to define the urban context of each observation point. **Section 11.3** introduces the concept of the source area and elaborates on its relevance for contextualisation. **Section 11.4** describes the results obtained from a systematic review of the application of the source area in urban environments, where the difficulty of defining the source area at the scale of the urban canopy layer is highlighted. **Section 11.5**, then, proposes an approximation to the measurements' source area used in this research work.

Finally, **section 11.6** includes the results of the contextualisation that will be used in the following stages.

11.1. Description of the metadata

In recent years, with the rise of Big Data and the increasing availability of data through electronic means, there has been a renewed interest in metadata. The aim is to have information that correctly describes both the origin of this data, its location and the way it is accessed, as well as the way it is collected, processed or generated. Not having this information can greatly affect the proper course of research, as it makes it difficult to standardise data collection and reporting, as well as to compare results. This is illustrated by the studies of Stewart et al. (2011) and Peterson et al. (2003, 2005), who demonstrate the importance of the correct provision of metadata in urban climate studies.

This work has adopted an approach based on the recommendations of the World Meteorological Organization for the provision of metadata in urban environments (WMO, 2017a). These are primarily based on the provision of contextual metadata, relating to the location and instrumentation used, and describing the environment at both

11. Contextualización de los datos procedentes de la monitorización

La gran variabilidad de los entornos urbanos puede generar diferencias de temperatura y humedad significativas entre puntos urbanos relativamente cercanos, por lo que resulta fundamental contextualizar correctamente los puntos de medición para poder analizar y comprender los datos obtenidos a través de las mediciones.

La segunda etapa de esta investigación se centra en esta tarea, y para ello es necesario distinguir dos elementos clave: por un lado, la selección de una batería de metadatos que permita vincular las mediciones con la realidad física en la que se insertan. Esta tarea se lleva a cabo en los **apartados 11.1** y **11.2**, donde se describen los metadatos empleados y se selecciona un sistema para la clasificación climática de las mediciones, respectivamente.

Por otro lado, la delimitación del área fuente del sensor (es decir, el área que *afecta* a la medición del sensor) resulta fundamental para poder definir el contexto urbano de cada punto de observación. El **apartado 11.3** introduce el concepto del área fuente y ahonda en su relevancia para la contextualización. En el **apartado 11.4** se describen los resultados obtenidos a raíz de una revisión sistemática sobre la aplicación del área fuente en entornos urbanos, y donde se pone de manifiesto la dificultad para definirla en la escala del palio urbano. No obstante, en el **apartado 11.5** se propone una aproximación al área fuente de las mediciones empleadas en este trabajo de investigación.

Finalmente, en el **apartado 11.6**, se incluyen los resultados de la contextualización que serán empleados en las siguientes etapas.

11.1. Descripción de los metadatos empleados

En los últimos años, con el auge del *Big Data* y la creciente disponibilidad de datos a través de medios electrónicos, ha surgido un renovado interés por los metadatos. El objetivo es disponer de información que describa correctamente tanto el origen de estos datos, su localización y el modo de acceder a ellos, así como la forma de recoger, procesar o generarlos. No disponer de esta información puede afectar enormemente al buen desarrollo de la investigación, ya que dificulta la estandarización de la toma y reporte de datos, así como la comparación de resultados. Así lo atestiguan los estudios de Stewart et al. (2011) o Peterson et al. (2003, 2005), quienes demuestran la importancia de una correcta provisión de los metadatos en los estudios del clima urbano.

En este trabajo se ha adoptado un enfoque basado en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Meteorología para la provisión de metadatos en entornos urbanos (WMO, 2017a). Estos se basan fundamentalmente en la provisión de metadatos contextuales, relativos a la ubicación y la instrumentación empleada,

y donde se describe el entorno tanto en la escala local como en la microescala (véase **apartado 10.1**). También se ha utilizado como referencia el trabajo de Müller et al. (2013), donde se propone un protocolo para la recogida sistematizada de los metadatos de redes urbanas. La **Tabla 11.1** detalla los metadatos recopilados.

Esta tarea se ha realizado únicamente para los equipos desplegados durante la campaña de monitorización, ya que los observatorios de la AEMET cuentan con sus propias bases de datos para la provisión de metadatos. En concreto, esta información puede consultarse en el repositorio de metadatos OSCAR, perteneciente al *Sistema mundial integrado de observación — WIGOS* (WMO, 2020). Aunque los datos recogidos son todavía limitados, parece que estos serán actualizados próximamente, en cuanto la AEMET complete la revisión de su protocolo para la provisión de metadatos en la que se encuentra actualmente inmersa (J.M. Gallardo Fernández, comunicación personal, 28 de abril de 2021).

the local and micro- scales (see **section 10.1**). The work of Müller et al. (2013), where a protocol for the systematised collection of urban network metadata is proposed, has also been used as a reference. **Table 11.1** details the metadata collected.

This task has been carried out only for the equipment deployed during the monitoring campaign, since the AEMET observatories have their own databases for the provision of metadata. Specifically, this information can be consulted in the OSCAR metadata repository, belonging to the *World Integrated Global Observing System - WIGOS* (WMO, 2020). **Although the data collected are still limited, it seems that they will be updated soon, as soon as AEMET completes the revision of its protocol for the provision of metadata in which it is currently immersed (J.M. Gallardo Fernández, personal communication, 28 April 2021).**

Tabla 11.1 Metadatos empleados para describir las mediciones de este trabajo de investigación.

Table 11.1 Metadata used to describe the measurements in this research work.

Metadata		
ID	Element	Description
Basic information		
001	Identifier	Reference code of the measurement point
002	Name	Name assigned to the measurement point
Location description		
101	Address	Postal address nearest to the measurement location
102	District	District where the measurement point is located
103	Neighbourhood	Neighbourhood where the measuring point is located
104	Latitude	Latitude (in °, to at least three decimals)
105	Longitude	Longitude (in degrees, to at least three decimals)
106	Elevation	Elevation (in m a.s.l., no decimals)
107	Aerial image	Aerial image of the urban context at the mesoscale (1:50.000)
108	Source area planimetry	Descriptive planimetry of the sensor source area at the local scale (1:25.000)
109	Detailed planimetry	Descriptive planimetry of the urban environment at the micro scale (1:10.000)
110	Site photograph	Street level image showing the location of the measuring equipment
111	Fisheye photograph	Photograph of the nadir plane of the urban canyon, fisheye type
112	Sky view factor	Proportion of sky visible within the urban canyon from ground level
113	Urban canyon ratio	Ratio of average height to average width of the urban canyon
114	Average building height	Geometric mean of the height of the buildings included in the sensor source area (in m, no decimals)
115	Average vegetation height	Geometric mean of the height of the vegetation included in the sensor source area (in m, no decimals)
116	Roughness class	Terrain roughness class according to Davenport scale ¹
117	Built-up area	% of the horizontal cover contained in the sensor source area occupied by buildings
118	Impervious area	% of the horizontal cover contained in the sensor source area occupied by impervious surfaces
119	Pervious area	% of the horizontal cover contained in the sensor source area occupied by permeable surfaces
120	Material horizontal plane	Predominant material in the horizontal plane of the urban canyon
121	Material vertical plane	Predominant material in the vertical plane of the urban canyon
122	Traffic density	Estimation of traffic density, on a scale of 1 to 10
123	Air-conditioning equipment	Ratio of number of air-conditioning equipment to total number of dwellings within the urban canyon
Instrumentation description		
201	Model	Brand and model of measuring equipment
202	Parameter(s)	Parameter(s) recorded by the measuring equipment
203	Accuracy	Accuracy of the measuring equipment
204	Power supply	Type of power supply used by the measuring equipment, if needed
205	Solar protection	“YES” if any type of solar protection is provided, “NO” otherwise.
206	Mechanical ventilation	“YES” if the solar protection forces the ventilation of the container through mechanical means, “NO” otherwise. “N/A” if there is no solar protection.
207	Sensor height	Height above the ground at which the measuring equipment is located (in m., one decimal)
208	Distance to vertical plane	Distance to the nearest vertical plane from the measuring equipment (in m., one decimal)
209	Mounting type	Type of mounting to which the sensor is fixed

¹ Davenport et al. (2000)

11.2. Selección de un sistema para la clasificación climática de las mediciones en entornos urbanos

Además de recopilar los metadatos anteriormente mencionados, este trabajo también ha hecho uso de un sistema de clasificación climática para entornos urbanos. Estos sistemas facilitan el análisis y la comparación de los resultados obtenidos a través de distintas campañas de monitorización. La **Tabla 11.2** resume las características de los sistemas más relevantes de las últimas décadas. En todos ellos se objetiviza la asignación de un determinado perfil térmico al tejido urbano, para lo cual se asocia una batería de indicadores relacionados con la formación de la isla de calor a una serie de tejidos urbanos, también llamados *clases*.

De entre ellos, las LCZs se han convertido en el estándar para comparar mediciones de temperatura realizadas en entornos urbanos, convirtiéndose en menos de una década en uno de los diez trabajos de investigación más citados de todos los tiempos en el campo de la isla de calor. Su aplicación ha acabado extendiéndose, incluso, a otros parámetros atmosféricos, como son los gases contaminantes CO₂ (p.ej., Christen, 2014; Roth et al., 2016) o CH₄ (Pawlak and Fortuniak, 2016), los compuestos orgánicos volátiles (Shi et al., 2019), las partículas en suspensión (Valach et al., 2015) o, directamente, para contextualizar las mediciones de flujos energéticos urbanos (Ando and Ueyama, 2017; Kotthaus and Grimmond, 2014). En Núñez Peiró et al. (2019) se recogen dos de las diferencias más claras entre este sistema y los anteriores, y que podrían explicar parte de su éxito:

El esquema LCZ se diferencia de los demás sistemas en dos ideas. En primer lugar, este esquema se basa en dos principios extraídos de la teoría de la clasificación: la generalización inductiva y la división lógica. Estos son importantes porque dan la estructura al sistema y contribuyen a mantener su sencillez: un conjunto de indicadores cuantitativos se relaciona con un conjunto de clases urbanas cualitativas (generalización inductiva), que al mismo tiempo mantienen una relación subclase-superclase (división lógica). La segunda idea es que la clasificación incluye tanto las zonas urbanas como las rurales, en lo que se denomina el paisaje. En este esquema, el gradiente de lo urbano a lo rural puede ser fácilmente caracterizado y, por tanto, fácilmente comparado con otras ciudades o contextos.

(Núñez Peiró et al., 2019, pág. 258.

Texto traducido de la versión original en inglés)

La ciudad se define entonces como un continuo entre el espacio urbano y el rural, englobándose todas las clases en *el paisaje (landscape)*. Las LCZs dividen el paisaje en 17 clases (10 urbanas y 7 no urbanas) a partir de 4 indicadores de morfología urbana (factor de visión de cielo, proporción del cañón urbano, altura de los edificios y/o vegetación, clase de rugosidad del terreno), 3 indicadores asociados al tipo de superficie (porcentaje de superficies permeables, impermeables y edificadas), y otros 3 indicadores relacionados con las propiedades térmicas, radiantes y metabólicas del tejido (medidas a través de la admitancia de la superficie, su albedo, y el calor antropogénico emitido). Las **Tabla 11.3**, **Tabla 11.4** y **Tabla 11.5** muestran la descripción de cada una de estas clases y los rangos para cada indicador traducidos al español.

11.2. Selection of a climatic classification system for urban environments

In addition to collecting the metadata, this work has also made use of a climate classification system for urban environments. These systems facilitate the analysis and comparison of the results obtained through different monitoring campaigns. **Table 11.2** summarises the characteristics of the most relevant systems of the last decades. In all of them, the assignment of a certain thermal profile to the urban fabric is objectified, for which a battery of indicators related to the formation of the UHI is associated with a series of urban fabrics, also called *classes*.

Among them, LCZs have become the standard for comparing temperature measurements in urban environments, becoming in less than a decade one of the ten most cited research papers of all time in the field of the urban heat island. Its application has even been extended to other atmospheric parameters, such as pollutant gases CO₂ (e.g. Christen, 2014; Roth et al., 2016) or CH₄ (Pawlak and Fortuniak, 2016), volatile organic compounds (Shi et al., 2019), particulate matter (Valach et al., 2015) or, directly, to contextualise measurements of urban energy fluxes (Ando and Ueyama, 2017; Kotthaus and Grimmond, 2014). Núñez Peiró et al. (2019) report two of the clearest differences between this system and previous ones, which may explain part of its success:

The LCZ scheme differentiates itself from the other systems in two ideas. In the first place, this scheme relies on two principles extracted from the classification theory: the inductive generalisation and the logic division. These are important as they give the structure to the system and contribute to keep it simple: a set of quantitative indicators relate to a set of qualitative urban classes (inductive generalisation), which at the same time keep a subclass-superclass relationship (logic division). The second idea is that the classification includes both urban and rural areas, in what is called the landscape. In this scheme, the gradient from urban to rural can be easily characterised and, therefore, easily compared with other cities or contexts.

(Núñez Peiró et al., 2019, p. 258)

The city is then defined as a continuum between urban and rural space, with all classes belonging to *the landscape*. The LCZs divide the landscape into 17 classes (10 urban and 7 non-urban) on the basis of 4 indicators of urban morphology (sky view factor, urban canyon proportion, buildings and/or vegetation height, terrain roughness class), 3 indicators associated with surface type (percentage of pervious, impervious and built-up surfaces), and 3 indicators related to the thermal, radiant and metabolic properties of the fabric (measured through surface admittance, albedo, and anthropogenic heat output). **Table 11.3**, **Table 11.4** and **Table 11.5** show the description of each of these classes and the ranges for each indicator translated into Spanish.

Tabla 11.2 Principales sistemas de clasificación climática para entornos urbanos.
Tabla 11.2 Main climate classification systems for urban environments.

Tabla 11.2 Principales sistemas de clasificación climática para entornos urbanos.

Scheme	Acronym	Authors	Indicators		Classification		Citations ¹	Standard level ²
			Type	Number of indicators	Type	Number of classes		
Urban Climatic Maps	UCMap	Knoch (1963)	Qualitative	12	Undefined	-	60 ^a (40)	●○○○
Urban Terrain Zones	UTZ	Ellefsen (1991)	Qualitative	7	Discrete	17	59 (7)	●●○○
Urban Climate Zones	UCZ	Oke (2004)	Qualitative	4 (10)	Discrete	7	- ^b (6)	●●○○
Thermal Climate Zones	TCZ	Stewart & Oke (2009)	Quantitative	6	Discrete	20	15 (6)	●●○○
Urban Zones for Energy partitioning	UZE	Loridan y Grimmond (2012)	Quantitative	2 (5)	Continuous	Not applicable	42 (7)	●●●●
Local Climate Zones	LCZ	Stewart y Oke (2012)	Quantitative	10	Discrete	17	359 (91)	●●○○

¹The metrics have been extracted with the Scopus search engine, looking for the direct citations of each document. In parenthesis appears the number of publications that have cited in their title, abstract or keywords the complete name of each system. Acronyms were not considered.

²The standardisation level is associated with the following description: *Low* (qualitative indicators without a specific classification system); *Medium* (qualitative indicators associated to discrete a classification); *High* (quantitative indicators associated to a discrete classification); *Complete* (quantitative indicators associated to a continuous classification).

^aThe UCMap classification was first suggested by Knoch (Knoch, 1963), but the most cited document regarding this classification system is Ren et al. (Ren et al., 2011).

^bThe UCZ classification appears in a WMO report with a whole set of recommendations for carrying out precise measurements in an urban context. As the UCZ classification system represents only a small fraction of this document, the author has decided not to include the number of direct citations.

Tabla 11.3 Definición de las clases que componen las Local Climate Zones. Traducido de la versión original de Stewart y Oke (2012).

Table 11.3 Definition of the classes that comprise the Local Climate Zones. Translated into Spanish from the original version by Stewart and Oke (2012).

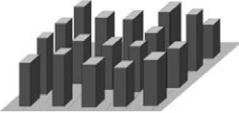
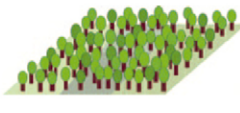
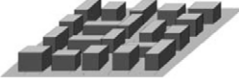


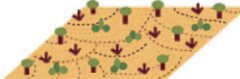



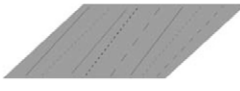
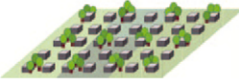
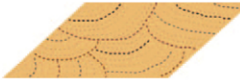
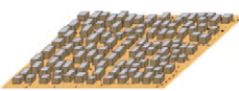
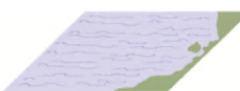



Paisaje construido	Definición	Paisaje no construido	Descripción
<p>1. Compacto gran altura</p> 	Mezcla densa de edificios de gran altura (>10 plantas). Escasa vegetación. Superficies mayoritariamente pavimentadas. Materiales predominantes: Hormigón, acero, piedra y vidrio.	<p>A. Arboleda densa</p> 	Paisaje boscoso de árboles de hoja perenne y/o caduca. Superficies mayoritariamente permeables. Correspondencia con bosque natural, cultivo de árboles o parque urbano.
<p>2. Compacto media altura</p> 	Mezcla densa de edificios de media altura (3-9 plantas). Escasa vegetación. Superficies mayoritariamente pavimentadas. Materiales predominantes: Hormigón, ladrillo y piedra.	<p>B. Árboles dispersos</p> 	Paisaje ligeramente arbolado de hoja perenne y/o caduca. Superficies mayoritariamente permeables. Correspondencia con bosque natural, cultivo de árboles o parque urbano.
<p>3. Compacto poca altura</p> 	Mezcla densa de edificios de poca altura (1-3 plantas). Escasa vegetación. Superficies mayoritariamente pavimentadas. Materiales predominantes: Hormigón, ladrillo y piedra.	<p>C. Arbustos, matorrales</p> 	Configuración abierta de matorrales, arbustos y pequeños árboles. Superficie mayoritariamente permeable (terreno desnudo o arena). Correspondencia con zona de monte bajo o agricultura.
<p>4. Abierto gran altura</p> 	Configuración abierta de edificios de gran altura (>10 plantas). Abundantes superficies permeables (vegetación de poca altura). Materiales predominantes: Hormigón, acero, piedra y vidrio.	<p>D. Vegetación rastrera</p> 	Paisaje sin obstáculos de hierba o plantas herbáceas/cultivos. Pocos o ningún árbol. Correspondencia con zona de pasto natural, agrícola o parque urbano.
<p>5. Abierto media altura</p> 	Configuración abierta de edificios de media altura (3-9 plantas). Abundantes superficies permeables (vegetación de poca altura). Materiales predominantes: Hormigón, acero, piedra y vidrio.	<p>E. Roca o pavimento</p> 	Paisaje sin obstáculos de roca o superficie pavimentada. Pocos o ningún árbol. Correspondencia con desierto natural o transporte urbano.
<p>6. Abierto poca altura</p> 	Configuración abierta de edificios de poca altura (1-3 plantas). Abundantes superficies permeables (vegetación de poca altura). Materiales predominantes: Hormigón, acero, piedra y vidrio.	<p>F. Terreno desnudo o arena</p> 	Paisaje sin obstáculos de tierra o arena. Pocos o ningún árbol o planta. Correspondencia con desierto natural o zona agrícola.
<p>7. Construcciones ligeras</p> 	Mezcla densa de edificios de una planta. Escasa vegetación. Superficies compactadas. Materiales de construcción ligeros (madera, paja, metales corrugados, etc.)	<p>G. Agua</p> 	Masas de agua grandes y abiertas, como mares y lagos, o pequeñas masas de agua como ríos, embalses y lagunas.
<p>8. Grandes superficies</p> 	Configuración abierta de edificios de poca altura (1-3 plantas). Escasa vegetación. Superficies mayoritariamente pavimentadas. Materiales constructivos: acero, hormigón, piedra y otros metales.	PROPIEDADES VARIABLES DE LA SUPERFICIE	
<p>9. Edificación dispersa</p> 	Edificación dispersa de poca o media altura en entorno natural. Predominancia de superficies permeables (vegetación de poca altura, árboles dispersos)	<p>b. árboles desnudos</p>	Árboles caducos sin hojas. Incrementa el factor de visión de cielo. Reduce el albedo.
<p>10. Industria pesada</p> 	Estructuras industriales de media y poca altura. Escasa vegetación. Superficies pavimentadas o compactadas. Materiales constructivos: hormigón, acero y otros metales.	<p>s. capa de nieve</p>	Capa de nieve de profundidad >10cm. Baja admitancia térmica. Alto albedo.
		<p>d. suelo seco</p>	Suelo arenoso o arcilloso reseco. Baja admitancia térmica. Aumenta el albedo.
		<p>w. suelo húmedo</p>	Superficie anegada. Alta admitancia térmica. Reduce el albedo.

Tabla 11.4 Valores de los indicadores geométricos y superficiales asociados a las Local Climate Zones. Traducido de la versión original de Stewart y Oke (2012).

Table 11.4 Geometric and surface parameter values associated with the Local Climate Zones. Translated into Spanish from the original version by Stewart and Oke (2012).

Local Climate Zone (LCZ)	Factor de visión de cielo ^a	Proporción cañón urbano ^b	Porcentaje de suelo construido ^c	Porcentaje de suelo impermeable ^d	Porcentaje de suelo permeable ^e	Altura media de edificación o vegetación ^f	Índice de rugosidad del terreno ^g
LCZ 1 Compacto gran altura	0.2–0.4	> 2	40–60	40–60	< 10	> 25	8
LCZ 2 Compacto media altura	0.3–0.6	0.75–2	40–70	30–50	< 20	10–25	6–7
LCZ 3 Compacto poca altura	0.2–0.6	0.75–1.5	40–70	20–50	< 30	3–10	6
LCZ 4 Abierto gran altura	0.5–0.7	0.75–1.25	20–40	30–40	30–40	>25	7–8
LCZ 5 Abierto media altura	0.5–0.8	0.3–0.75	20–40	30–50	20–40	10–25	5–6
LCZ 6 Abierto poca altura	0.6–0.9	0.3–0.75	20–40	20–50	30–60	3–10	5–6
LCZ 7 Construcciones ligeras	0.2–0.5	1–2	60–90	< 20	<30	2–4	4–5
LCZ 8 Grandes superficies	>0.7	0.1–0.3	30–50	40–50	<20	3–10	5
LCZ 9 Edificación dispersa	> 0.8	0.1–0.25	10–20	< 20	60–80	3–10	5–6
LCZ 10 Edificación dispersa	0.6–0.9	0.2–0.5	20–30	20–40	40–50	5–15	5–6
LCZ A Arboleda densa	<0.4	>1	<10	<10	>90	3–30	8
LCZ B Árboles dispersos	0.5–0.8	0.25–0.75	<10	<10	>90	3–15	5–6
LCZ C Arbustos, matorrales	0.7–0.9	0.25–1.0	<10	<10	>90	<2	4–5
LCZ D Vegetación rastrera	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	<1	3–4
LCZ E Roca o pavimento	>0.9	<0.1	<10	>90	<10	<0.25	1–2
LCZ F Terreno desnudo o arena	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	< 0.25	1–2
LCZ G Agua	>0.9	<0.1	<10	<10	>90	–	1

^a Índice de la cantidad de cielo visible desde el nivel del suelo, respecto al hemisferio

^b Proporción alto-ancho del cañón urbano (LCZ 1-7), espaciado entre edificación (LCZ 8-10), y espaciado entre vegetación (LCZ A-G)

^c Porcentaje de superficie construida respecto al total del planeamiento (%)

^d Porcentaje de superficie impermeable respecto al total del planeamiento (%)

^e Porcentaje de superficie permeable respecto al total del planeamiento (%)

^f Altura media de la edificación (LCZ 1-10) o de la vegetación (LCZ A-F) (m)

^g Índice de rugosidad del terreno (z_v) según Davenport et al. (2000) para paisajes urbanos y rurales.

Tabla 11.5 Valores de los indicadores térmicos, metabólicos y de radiación asociados a las Local Climate Zones. Traducido de la versión original de Stewart y Oke (2012).

Table 11.5 Thermal, metabolic and radiation parameter values associated with the Local Climate Zones. Translated into Spanish from the original version by Stewart and Oke (2012).

Local Climate Zone (LCZ)	Admitancia del suelo ^a	Albedo del suelo ^b	Producción de calor antropogénico ^c
LCZ 1 Compacto gran altura	1,500–1,800	0.10–0.20	50–300
LCZ 2 Compacto media altura	1,500–2,200	0.10–0.20	<75
LCZ 3 Compacto poca altura	1,200–1,800	0.10–0.20	<75
LCZ 4 Abierto gran altura	1,400–1,800	0.12–0.25	<50
LCZ 5 Abierto media altura	1,400–2,000	0.12–0.25	<25
LCZ 6 Abierto poca altura	1,200–1,800	0.12–0.25	<25
LCZ 7 Construcciones ligeras	800–1,500	0.15–0.35	<35
LCZ 8 Grandes superficies	1,200–1,800	0.15–0.25	<50
LCZ 9 Edificación dispersa	1,000–1,800	0.12–0.25	<10
LCZ 10 Edificación dispersa	1,000–2,500	0.12–0.20	>300
LCZ A Arboleda densa	<i>desconocida</i>	0.10–0.20	0
LCZ B Árboles dispersos	1,000–1,800	0.15–0.25	0
LCZ C Arbustos, matorrales	700–1,500	0.15–0.30	0
LCZ D Vegetación rastrera	1,200–1,600	0.15–0.25	0
LCZ E Roca o pavimento	1,200–2,500	0.15–0.30	0
LCZ F Terreno desnudo o arena	600–1,400	0.20–0.35	0
LCZ G Agua	1,500	0.02–0.10	0

^a Capacidad de la superficie para aceptar o liberar calor ($J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$). Varía con la humedad del suelo y la densidad del material. Existen pocas estimaciones de la admitancia a escala local en la literatura; los valores dados aquí son subjetivos y deben utilizarse con precaución. Hay que tener en cuenta que la "superficie" en la LCZ A no está definida y su admitancia es desconocida.

^b Relación entre la cantidad de radiación solar reflejada por una superficie y la que recibe. Varía con el color, la humedad y la rugosidad de la superficie.

^c Densidad de flujo de calor media anual ($W m^{-2}$) procedente de la quema de combustibles y de la actividad humana (transporte, refrigeración/calefacción de espacios, procesos industriales, metabolismo humano). Varía significativamente con la latitud, la estación y la densidad de población.

11.3. Definition and relevance of the sensor source area

Although the rapid adoption of LCZs by the scientific community has led to their intensive study and development in recent years, one of the most overlooked elements is the use of the sensor source area to contextualise the measurements. The source area (or *footprint*) delimits the emissions area that affects the sensor measurement. When measuring turbulent flux parameters, such as temperature or air pollutants, the source area is usually located upwind, as shown in **Figure 11.1** and described in the following extract from Núñez Peiró et al. (2019):

(...) the extension of the source area usually spreads upwind, where its location and size depend on the sum of several factors. The source area increases its size and distance from the sensor while rising the height of the observation (z_m), the surface roughness, or weather stability. The footprint function represents the contribution that each point of the source area has to the total measurement. Over homogeneous surfaces, it reaches its peak (f_{max}) at certain distance, and then decreases logarithmically to the infinite (Schmid, 1994) (Schmid, 1994). Uncertainties arise when addressing near-the-ground measurements within a heterogeneous context, where surface properties might vary within few hundred meters. This turns to be crucial in almost any urban context, where the source area might be very sensible to surface properties variations.

(Núñez Peiró et al., 2019, págs. 259 – 260)

The source area is therefore an essential part of the contextualisation of measurements, and this is reflected in the classification system devised by Stewart and Oke (2012). However, this has been a scarcely explored topic in studies focusing on the thermal behaviour of urban areas. In order to contribute to a better contextualisation of measurements in studies that, like this research work, focus on urban climate, a literature review of the estimation of the source area of sensors in urban environments has been carried out. This has focused on those studies that used the LCZs scheme and corresponds to the first of the articles that shape this thesis by publications.

11.4. Literature review on the application of the source area in urban settings

The literature review conducted in this research follows a systematic approach. This means that it is conducted according to a specific, pre-established protocol aimed at finding, extracting and analysing relevant information as efficiently as possible (see, e.g., Grant & Booth, 2009; Haddaway et al., 2015). Such reviews are very common in other research areas, such as medicine or ecology (Crowther et al., 2010; Pullin and Stewart, 2006), and there is currently a growing interest in their development in the field of urban climate and architecture (Bar-

11.3. Definición y relevancia del área fuente de los sensores

Aunque la rápida adopción de las LCZs por parte de la comunidad científica ha llevado a su estudio y desarrollo de forma intensiva durante los últimos años, uno de los elementos que ha pasado más desapercibido es la utilización del área fuente del sensor para contextualizar las mediciones. El área fuente (*source area* o *footprint* en inglés) delimita la zona de emisiones que afecta a la medida del sensor. Cuando se miden parámetros de flujos turbulentos, como la temperatura o los contaminantes del aire, el área fuente suele situarse a barlovento, tal y como muestra la **Figura 11.1** y describe el siguiente extracto incluido en Núñez Peiró et al. (2019):

(...) el área fuente suele extenderse a barlovento, donde su ubicación y tamaño dependen de la suma de varios factores. El área fuente aumenta su tamaño y distancia desde el sensor conforme aumenta la altura de la observación (z_m), la rugosidad de la superficie, o la estabilidad meteorológica. La función de huella representa la contribución que tiene cada punto del área fuente a la medición total. Sobre superficies homogéneas alcanza su pico (f_{max}) a cierta distancia, y luego disminuye logarítmicamente hasta el infinito (Schmid, 1994). Las incertidumbres surgen cuando se abordan las mediciones cerca del suelo en un contexto heterogéneo, donde las propiedades de la superficie pueden variar en pocos cientos de metros. Esto resulta crucial en casi cualquier contexto urbano, donde el área fuente puede ser muy sensible a las variaciones de las propiedades de la superficie.

(Núñez Peiró et al., 2019, págs. 259 – 260.
Texto traducido de la versión original en inglés)

El área fuente es, por tanto, parte esencial de la contextualización de las mediciones, y así lo recoge el sistema de clasificación ideado por Stewart y Oke (2012). Sin embargo, este ha sido un tema escasamente explorado por los estudios centrados en el comportamiento térmico de las áreas urbanas. Con el fin de contribuir a una mejor contextualización de las mediciones en los estudios que, como este trabajo de investigación, se enfocan en el clima urbano, se ha llevado a cabo una revisión bibliográfica de la estimación del área fuente de los sensores en entornos urbanos. Esta se ha enfocado, de forma particular, en aquellos estudios que, además, emplearon el esquema de las LCZs, y se corresponde con el primero de los artículos que da forma a esta tesis por compendio.

11.4. Revisión bibliográfica sobre la aplicación del área fuente en entornos urbanos

La revisión bibliográfica que se desarrolla en este trabajo de investigación es de tipo sistemática. Eso significa que sigue un protocolo concreto y preestablecido orientado a encontrar, extraer y analizar la información relevante de la forma más eficiente posible (véase, p.ej., Grant & Booth, 2009; Haddaway et al., 2015). Este tipo de revisiones son muy frecuentes en otras áreas de investigación, como la medicina o la ecología (Crowther et al., 2010; Pullin and Stewart, 2006), y actualmente existe un creciente interés por su desarrollo en el campo del clima urbano y la arquitectura (Bartessaghi Koc et al.,

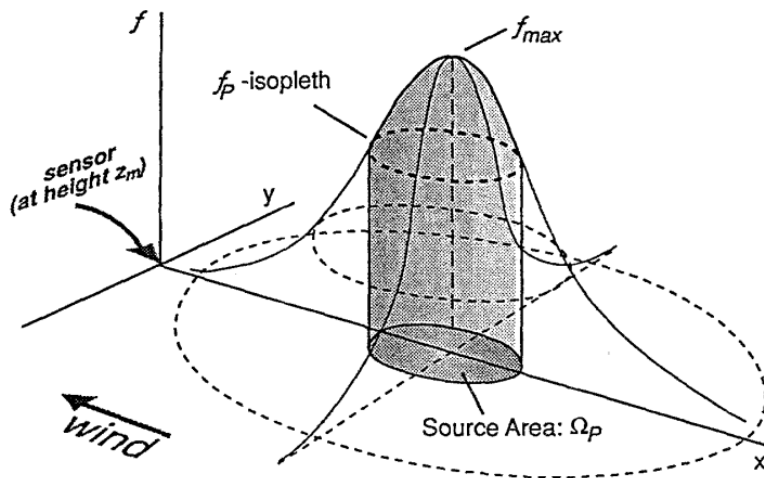


Figura 11.1 Esquema en perspectiva que ilustra el concepto del área fuente y de la función de huella de flujos turbulentos. Nótese que el área fuente tiende a distribuirse en forma de elipse, con una contribución máxima a cierta distancia del sensor, en dirección contraria al viento. Representación en perspectiva realizada por Schmid (1994).

Figure 11.1 Diagrams illustrating the concept of a turbulent source area and its footprint function. Notice that the source area tends to an ellipse, with a maximum contribution at a certain distance from the sensor, upwind. Representation in perspective by Schmid (1994).

2018; S. Chapman et al., 2017; Costa-Carrapiço et al., 2020; Francis and Jensen, 2017).

Esta revisión sistemática se planteó siguiendo la metodología PRISMA (Moher et al., 2009), la cual se estructura en cuatro fases: (1) identificación de publicaciones potencialmente útiles; (2) filtrado por temática; (3) clasificación de publicaciones elegibles por relevancia; y (4) análisis de los resultados. En la **Figura 11.2** se detalla el organigrama seguido para llevar a cabo esta revisión sistemática, y en Núñez Peiró et al. (2019) se puede consultar el detalle de todo el proceso, incluyendo la selección de palabras clave.

Los resultados se obtuvieron de tres de las bases de datos científicas más prestigiosas, ScienceDirect, Scopus y Web of Science. Se incluyó en la búsqueda toda la bibliografía existente hasta el año 2017 inclusive, último año completo en el momento de desarrollo de esta parte de la investigación. Se identificaron 3244 publicaciones potencialmente útiles, de las cuales 500 fueron clasificadas con una relevancia baja, 95 con una relevancia media y 135 con una relevancia alta. Los resultados obtenidos para cada una de las bases de datos se detallan en la **Tabla 11.6**.

Sólo los resultados con un nivel alto de relevancia fueron analizados en profundidad. Primero, se agruparon en tres familias: (a) aproximaciones metodológicas, con el fin de obtener una perspectiva sobre las diferentes técnicas existentes para estimar el área fuente de los sensores (Tabla 6 de Núñez Peiró et al., 2019); (b) casos de estudio, donde las aproximaciones metodológicas se ponen en

tesaghi Koc et al., 2018; S. Chapman et al., 2017; Costa-Carrapiço et al., 2020; Francis and Jensen, 2017).

This systematic review was approached following the PRISMA methodology (Moher et al., 2009), which is structured in four phases: (1) identification of potentially useful publications; (2) filtering by subject field; (3) ranking of eligible publications by relevance; and (4) analysis of the results. **Figure 11.2** details the flowchart followed to carry out this systematic review, and Núñez Peiró et al. (2019) provides details of the entire process, including the selection of keywords.

The results were obtained from three of the most prestigious scientific databases, ScienceDirect, Scopus and Web of Science. The search included all existing literature up to and including 2017, the last complete year at the time this research was carried out. A total of 3244 potentially useful publications were identified, of which 500 were classified as low relevance, 95 as medium relevance and 135 as high relevance. The results obtained for each of the databases are detailed in **Table 11.6**.

Only results with a high level of relevance were analysed in depth. First, they were grouped into three families: (a) methodological approaches, in order to gain insight into the different existing techniques for estimating the sensors' source area (Table 6 of Núñez Peiró et al., 2019); (b) case studies, where the methodological approaches are put into prac-

tice in different urban environments, either real or digitally modelled (Appendix A.1 of Núñez Peiró et al., 2019); and (c) literature reviews, which were used to obtain information on the challenges and opportunities faced in the field, and which helped to structure the narrative (Table 7 of Núñez Peiró et al., 2019). The following section presents the most relevant results obtained from this systematic literature review.

práctica en diferentes entornos urbanos, ya sean reales o modelados digitalmente (Apéndice A.1 de Núñez Peiró et al., 2019); y (c) revisiones bibliográficas, que fueron empleadas para obtener información sobre los retos y oportunidades a las que se enfrenta este campo, y que ayudaron a estructurar el discurso (Tabla 7 de Núñez Peiró et al., 2019). En el siguiente apartado se presentan los resultados más relevantes obtenidos a raíz de esta revisión sistemática de la bibliografía.

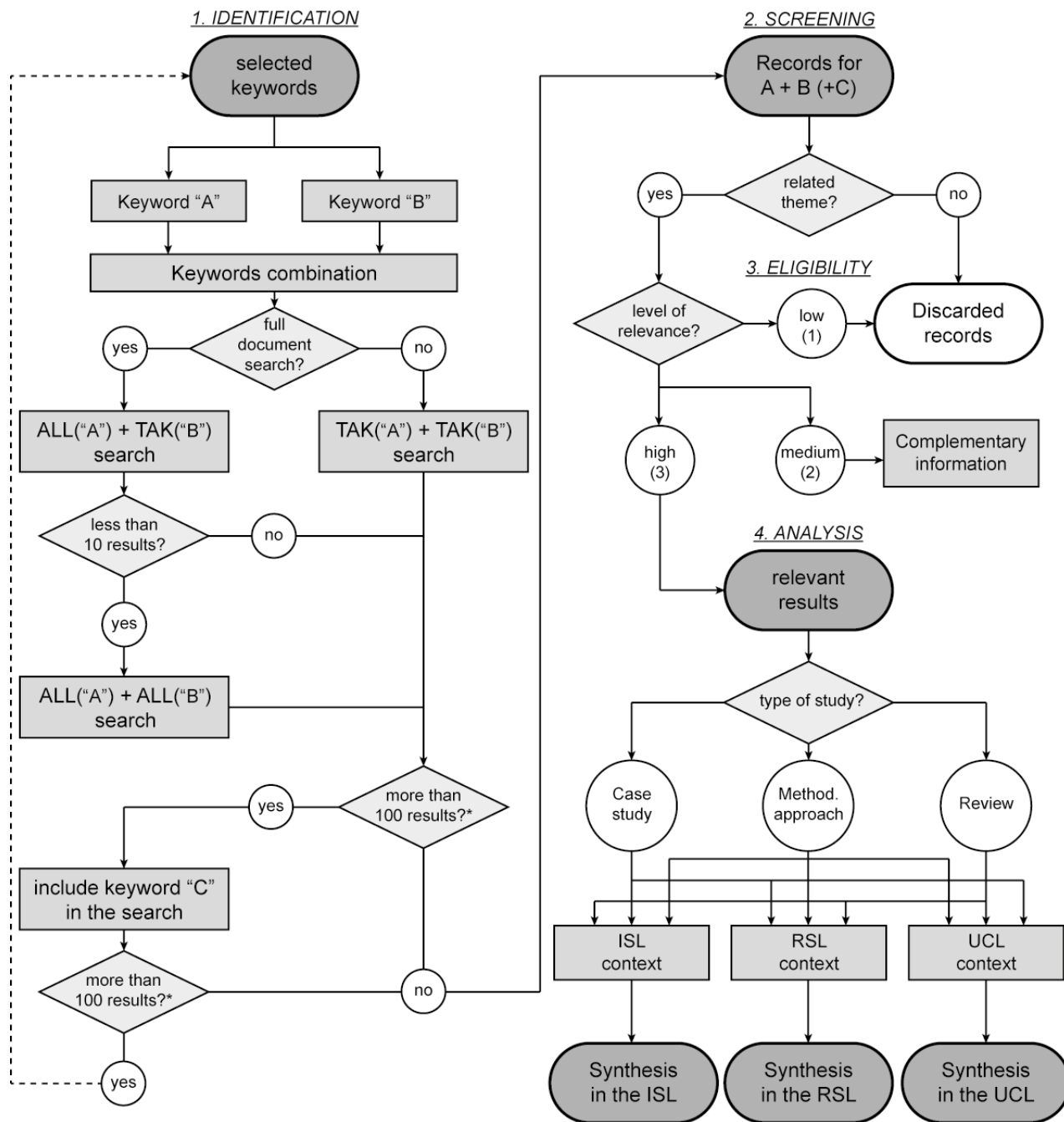


Figura 11.2 Organigrama del proceso llevado a cabo para realizar la revisión sistemática de la bibliografía.

Figure 11.2 Flowchart of the process carried out for the systematic literature review.

Tabla 11.6 Relevancia de los resultados obtenidos durante la revisión sistemática de la bibliografía sobre el área fuente de sensores en entornos urbanos.
 Table 11.6 Relevance of the obtained results during the systematic literature review on the sensors source area in urban environments.

Level	Relevance	ScienceDirect	Scopus	Web of Science	Unique results
1	High	51 (37.8%)	75 (55.6%)	65 (48.1%)	135
2	Medium	71 (74.7%)	18 (18.9%)	17 (17.9%)	95
3	Low	307 (61.4%)	177 (35.4%)	200 (40%)	500
-	Not relevant	1399 (56.3%)	902 (36.3%)	689 (12.2%)	2487
-	No Access/other	0 (0%)	27 (90%)	16 (53.3%)	30
TOTAL		1828 (56.4%)	1189 (36.7%)	987 (30.4%)	3244

11.5. Estimación del área fuente de acuerdo con la escala de monitorización

Cada una de las capas atmosféricas tiene un comportamiento diferenciado. Estas diferencias son especialmente relevantes cuando se trata de estimar el área fuente de los sensores dentro de cada una de las capas atmosféricas pertenecientes a la capa superficial (SL, véase apartado 10.1). Por ello la revisión bibliográfica descrita en el apartado anterior agrupa sus resultados en las tres escalas de la SL: la subcapa inercial (ISL), la subcapa rugosa (RSL) y el palio urbano (UCL).

Situarse por encima de la altura de mezcla, esto es, en la ISL, facilita en gran medida la estimación del área fuente de los sensores. Esto se debe a que allí los flujos de aire se encuentran bien entremezclados, lo que permite realizar ciertas simplificaciones. Por ello no es de extrañar que, de entre todos los estudios identificados que clasifican climáticamente sus mediciones utilizando la LCZs, la mayoría de los que estiman el área fuente han realizado sus mediciones en la ISL (véase la Figura 11.3). Allí, las técnicas analíticas para el cálculo del área fuente son las más populares, existiendo una amplia gama de soluciones disponibles (Horst and Weil, 1994, 1992; Hsieh et al., 2000; Kljun et al., 2015, 2004; Kormann and Meixner, 2001; Schmid, 1997, 1994; Schmid and Oke, 1990; Schuepp et al., 1990).

La RSL, siendo una capa de transición entre la UCL y la ISL, tiende a evitarse a la hora de realizar mediciones y, por lo tanto, las experiencias estimando el área fuente del sensor en esta escala son limitadas. Y en cuanto a la UCL, la heterogeneidad del entorno hace necesario la utilización de enfoques alternativos a las técnicas analíticas empleadas en la ISL. Las más precisas se basan en CFD (Hellsten et al., 2015), pero su coste computacional limita su viabilidad en la actualidad, especialmente cuando se trata de contextualizar mediciones a lo largo de un largo periodo temporal.

11.5. Source area estimation according to monitoring scale

Each of the atmospheric layers behaves differently. These differences are especially relevant when it comes to estimating the sensors' source area within each of the atmospheric layers belonging to the surface layer (SL, see section 10.1). Therefore, the literature review described in the previous section groups its results in the three scales of the SL: the inertial sublayer (ISL), the rough sublayer (RSL) and the urban canopy (UCL).

Being above the mixing height, i.e. at the ISL, makes it much easier to estimate the sensors' source area. This is because the airflows are well intermixed there, which allows for certain simplifications. It is therefore not surprising that, among all the identified studies that classify their measurements climatically using the LCZs, most of those estimating the source area have made their measurements at the ISL (see Figure 11.3). There, analytical techniques for the calculation of the source area are the most popular, with a wide range of solutions available (Horst and Weil, 1994, 1992; Hsieh et al., 2000; Kljun et al., 2015, 2004; Kormann and Meixner, 2001; Schmid, 1997, 1994; Schmid and Oke, 1990; Schuepp et al., 1990).

The SLR, being a transition layer between the UCL and the ISL, tends to be avoided for measurements and therefore experiences estimating the sensor source area at this scale are limited. As for the UCL, the heterogeneity of the environment makes it necessary to use alternative approaches to the analytical techniques used in the ISL. The most accurate ones are based on CFD (Hellsten et al., 2015), but their computational cost limits their feasibility at present, especially when contextualising measurements over a long time period.

Alternatively, empirical-qualitative approaches have emerged. The idea is that if a sufficiently large zone of influence around the sensor is defined and studied to be homogeneous, the exact definition of the source area for each instant of the measurement campaign could be avoided (Alexander et al., 2016; see **Figure 11.4**). Thus, by studying the correlations between temperatures and urban indicators, the area around the sensor that best *describes* its thermal behaviour is defined (Mizuno et al., 1991; Szymanski and Kryza, 2012; Tsang et al., 2012; Tse et al., 2017; Unger et al., 2010; van Hove et al., 2015).

Most of these studies agree in situating this zone of influence between 100 and 1000 metres. This point was confirmed by a small study of the correlations between the temperature recorded and its immediate surroundings at dozens of points taken from one of the urban transects developed during the first stage of this research (**section 10.2**). **Figure 11.5** shows that the highest correlations are generally found when a radius between 500 and 1000 metres is used.

It should be noted that these results are limited to a few days (with high atmospheric stability) and to a specific time of day (midnight). On windier days, these zones would theoretically be larger. However, it should be remembered that the urban heat island is mitigated as the wind speed increases until

Como alternativa, han surgido enfoques empírico-cualitativos cuya idea es que, si se define una zona de influencia alrededor del sensor lo suficientemente grande y se estudia que ésta sea homogénea, la definición exacta del área fuente para cada instante de la campaña de medición podría evitarse (Alexander et al., 2016; véase **Figura 11.4**). Así, mediante el estudio de las correlaciones existentes entre temperaturas e indicadores urbanos, se define el área alrededor del sensor que mejor *describe* su comportamiento térmico (Mizuno et al., 1991; Szymanski and Kryza, 2012; Tsang et al., 2012; Tse et al., 2017; Unger et al., 2010; van Hove et al., 2015).

La mayoría de estos estudios coincide en situar esta zona de influencia entre los 100 y los 1000 metros. Este punto pudo constatare al realizar un pequeño estudio de las correlaciones existentes entre la temperatura registrada y su entorno inmediato en decenas de puntos extraídos de uno de los transectos urbanos desarrollados durante la primera etapa de esta investigación (**apartado 10.2**). La **Figura 11.5** muestra que las correlaciones más altas se dan, de forma general, cuando se utiliza un radio de entre 500 y 1000 metros.

Debe señalarse que estos resultados se circunscriben a unos días (de gran estabilidad atmosférica) y a un momento del día concreto (medianoche). Los días de más viento estas zonas serían, teóricamente, más amplias. Sin embargo, cabe recordar que la isla de calor se mitiga a medida que aumenta la velocidad de viento. En esas circunstancias,

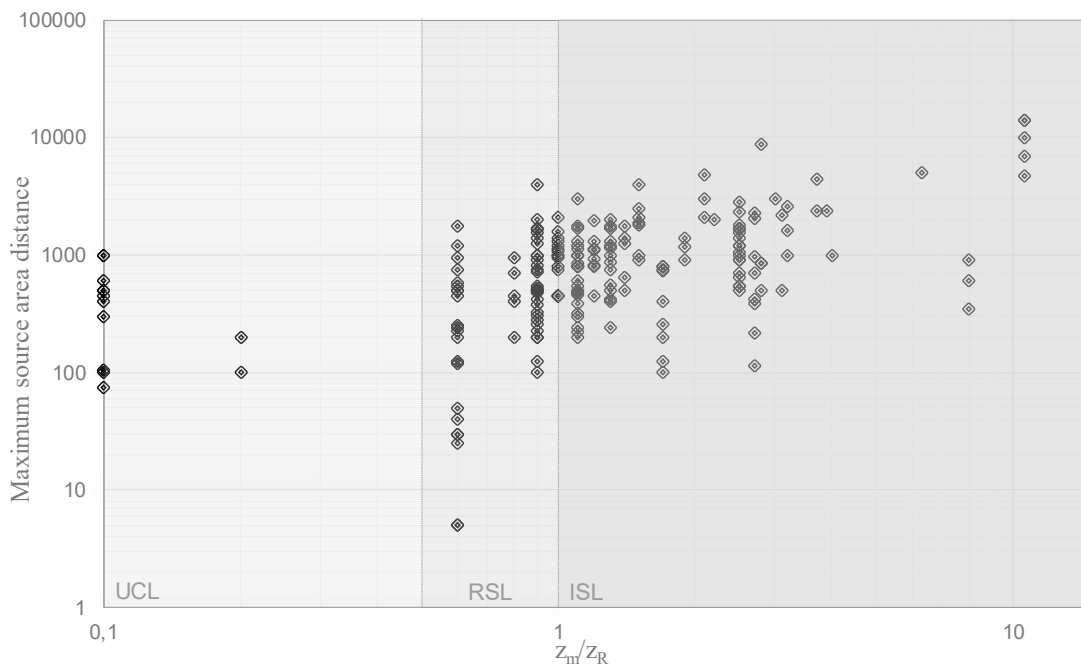


Figura 11.3 Distancia máxima desde el sensor hasta el límite exterior del área fuente. Incluye todos los estudios de relevancia alta. Se emplea la relación entre la altura de la medición (z_m) y la altura de mezcla (z_R) para delimitar las tres capas atmosféricas: el palio urbano (UCL), la subcapa de rugosidad (RSL) y la subcapa inercial (ISL). Nótese que ambos ejes presentan una escala logarítmica.

Figure 11.3 Maximum distance from the sensor to the outer boundary of the source area. Includes all studies of high relevance. The ratio of the measurement height (z_m) to the mixing height (z_R) is used to delimit the three atmospheric layers: the urban canopy (UCL), the roughness sublayer (RSL) and the inertial sublayer (ISL). Note that both axes are presented on a logarithmic scale.

la definición del área fuente de los sensores urbanos pierde valor contextual, ya que todos ellos estarían registrando valores muy similares de temperatura y humedad.

Teniendo todo esto en cuenta, se ha decidido delimitar el equivalente al área fuente como una circunferencia de 500 metros de radio, donde cada sensor ocupa su centro. Este área circular se divide, a su vez, en 12 sectores, con el fin de estudiar si todos ellos son homogéneos entre sí. Esta circunferencia delimita, además, el cálculo de los indicadores LCZ, descritos en el siguiente apartado, y con lo que se dará por finalizada esta etapa dedicada a la contextualización de las mediciones.

the temperature differences between urban areas disappear. In these circumstances, the definition of the sensors' source area loses contextual value, as all urban sensors would be recording very similar values of temperature and humidity.

Taking all this into account, it was decided to delimit the equivalent of the source area as a circumference of 500 metres in diameter, where each sensor occupies its centre. This circular area is in turn divided into 12 sectors, in order to study whether all of them are homogeneous with respect to each other. This circumference also delimits the calculation of the LCZ indicators, described in the following section, which will conclude this stage dedicated to the contextualisation of the measurements.

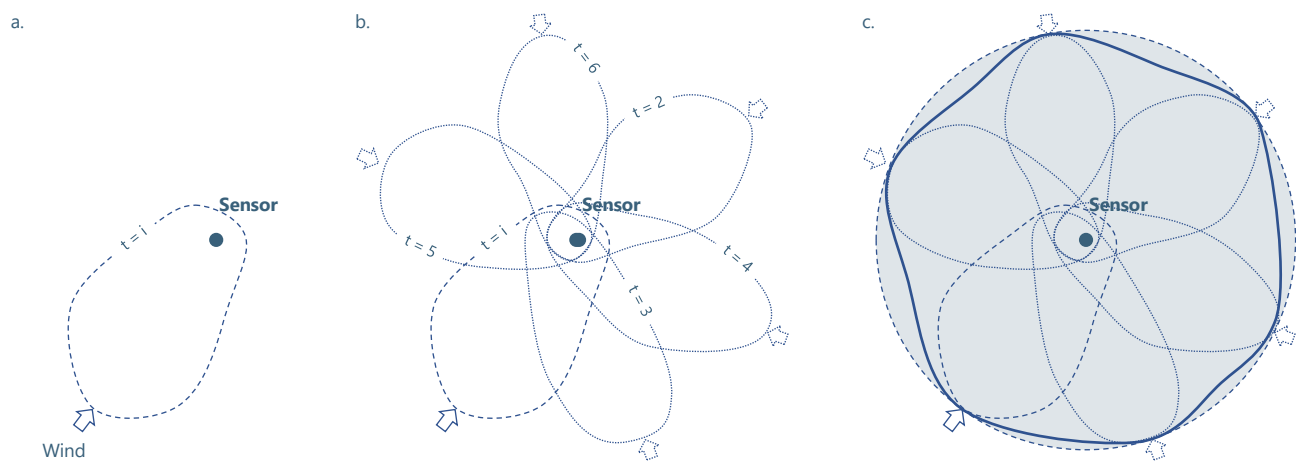


Figura 11.4 Ilustración en planta mostrando la superposición del área fuente en diferentes instantes. (a) Para un instante i , el área fuente tendería a una elipse. (b) Sin embargo, la dirección del viento es cambiante para cada instante y, por lo tanto, el área fuente podría situarse en cualquier punto alrededor del sensor. (c) La superposición de áreas fuentes muestra, entonces, una tendencia teórica hacia la distribución concéntrica en forma de circunferencia, y donde el sensor se situaría en el centro.

Figure 11.4 Illustration in plan showing the superposition of the source area for different instants. (a) For instant i , the source area would tend to an ellipse. (b) However, the wind direction varies for each instant and, therefore, the source area could be located at any point around the sensor. (c) The superposition of source areas shows, then, a theoretical tendency towards concentric distribution in the form of a circumference, and where the sensor would be located at the centre.

11.6. Contextualización climática mediante LCZ y generación de fichas descriptivas

Con una definición clara del área fuente de los sensores ya es posible contextualizar climáticamente las mediciones mediante el sistema LCZ (apartado 11.2). El proyecto WUDAPT, una iniciativa internacional para la caracterización de las ciudades siguiendo las LCZs, cuenta con una cartografía ya elaborada para el área metropolitana de Madrid (Brousse et al., 2016). Como muestra la Figura 11.6, esta podría emplearse para describir el contexto climático de cada punto de medición. No obstante, en este estudio se han clasificado cada uno de los puntos de forma manual, lo que ha permitido comparar ambas aproximaciones.

11.6. Climatic contextualisation by LCZ and generation of descriptive data sheets

With a clear definition of the sensors' source area, it is already possible to contextualise the measurements climatically using the LCZ system (section 11.2). The WUDAPT project, an international initiative for the characterisation of cities using LCZs, has already developed a mapping for the metropolitan area of Madrid (Brousse et al., 2016). As Figure 11.6 shows, this could be used to describe the climate context of each measurement point. However, in this study, each point has been classified manually, allowing a comparison between the two approaches.

The calculation of each of these indicators was carried out within the sensors' source areas and was mainly based on the use of GIS (ESRI, 2016). Núñez Peiró et al. (2021) summarises the databases and procedures used to calculate each of the indicators:

The surface cover and geometric parameters for the source area of the sensors were determined using the municipal cartography (Ayuntamiento de Madrid, 2015) and the national land registry (Ministerio de Hacienda, 2019). The aspect ratio (AR) was established for the street in which the sensor was located. The sky view factor (SVF) was calculated

El cálculo de cada uno de estos indicadores se realizó dentro de las áreas fuente de los sensores y se apoyó, fundamentalmente, en la utilización de un GIS (ESRI, 2016). Núñez Peiró et al. (2021) resume las bases de datos y procedimientos llevados a cabo para cada uno de los indicadores:

La cobertura superficial y los parámetros geométricos del área fuente de los sensores se determinaron utilizando la cartografía municipal (Ayuntamiento de Madrid, 2015) y el catastro nacional (Ministerio de Hacienda, 2019). La relación de aspecto (AR) se estableció para la calle en la que se encontraba el sensor. El factor de vista del cielo (SVF) se calculó en la ubicación de cada sensor utilizando imágenes panorámicas de Google Street View (X. Li et al., 2017; Miao et al., 2020).

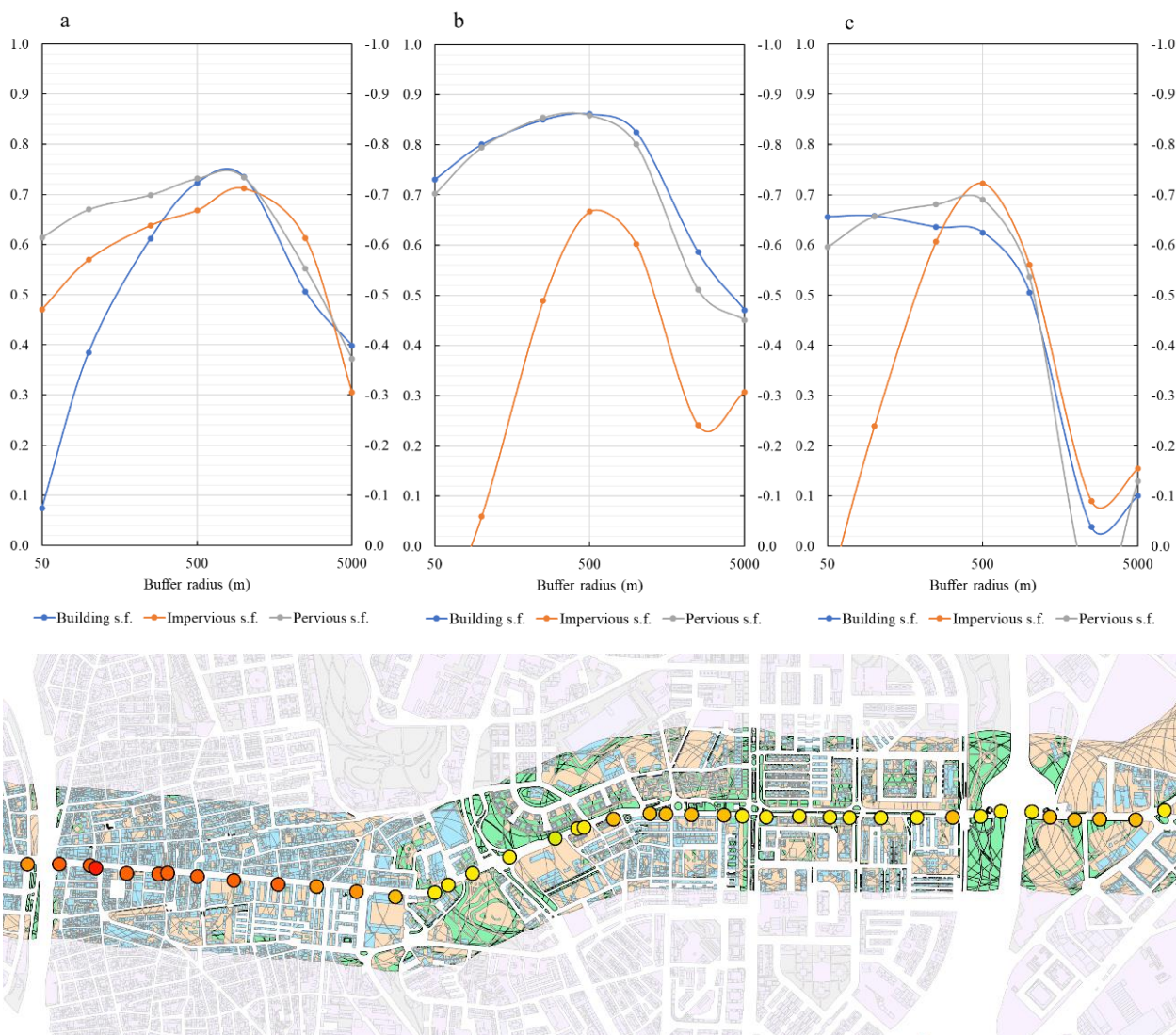


Figura 11.5 Correlación entre la temperatura del aire y tres indicadores de cobertura superficial durante el día 16 de abril de 2016. Incluye todos los puntos de medición contenidos dentro de un radio de 5 kilómetros desde el centro de la ciudad. Arriba, la figura (a) hace referencia al recorrido de ida del Transecto 1, (b) al recorrido de ida del transecto 2, y (c) al recorrido de ida del transecto 3. Se representan los ejes horizontales de forma logarítmica para facilitar la visualización de los datos. Abajo, un extracto de los puntos de medición del transecto 2 asociados a sus temperaturas y a su contexto urbano.

Figure 11.5 Correlation between air temperature and three indicators of surface coverage on 16 April 2016. Includes all measurement points contained within a radius of 5 kilometres from the city centre. Above, figure (a) refers to the outgoing path of Transect 1, (b) to the outgoing path of Transect 2, and (c) to the outgoing path of Transect 3. The horizontal axes are plotted logarithmically to facilitate the visualisation of the data. Below, an extract of the measurement points of transect 2 associated with their temperatures and urban context.

Dado que los cambios en el follaje eran significativos en la mayoría de las calles, los SVF se calcularon tanto para el verano (SVF_s) como para el invierno (SVF_w). Los valores de las propiedades térmicas, radiativas y metabólicas no pudieron extraerse debido a la falta de fuentes de datos disponibles y fiables. En su lugar, se incluyeron en los metadatos los valores de la densidad de tráfico (Ayuntamiento de Madrid, 2013), el ratio de bombas de calor por vivienda que da a la calle, que se estableció como el número de bombas de calor que dan a la calle sobre el número total de viviendas, y los datos de los materiales típicos de las calles y las paredes.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, pág. 8.
Texto traducido de la versión original en inglés)

ted at the location of each sensor using Google Street View panorama images (Li et al., 2017; Miao et al., 2020). Since the changes in foliage were meaningful in most streets, SVFs were computed for both summer (SVF_s) and winter (SVF_w). The values for thermal, radiative, and metabolic properties could not be drawn due to the lack of available and reliable data sources. Instead, values for traffic density (Ayuntamiento de Madrid, 2013), the ratio of heat pumps per dwelling overlooking the street, which was established as the number of heat pumps overlooking the street over the total number of dwellings, and the typical road and wall materials data were included in the metadata.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, p. 8)

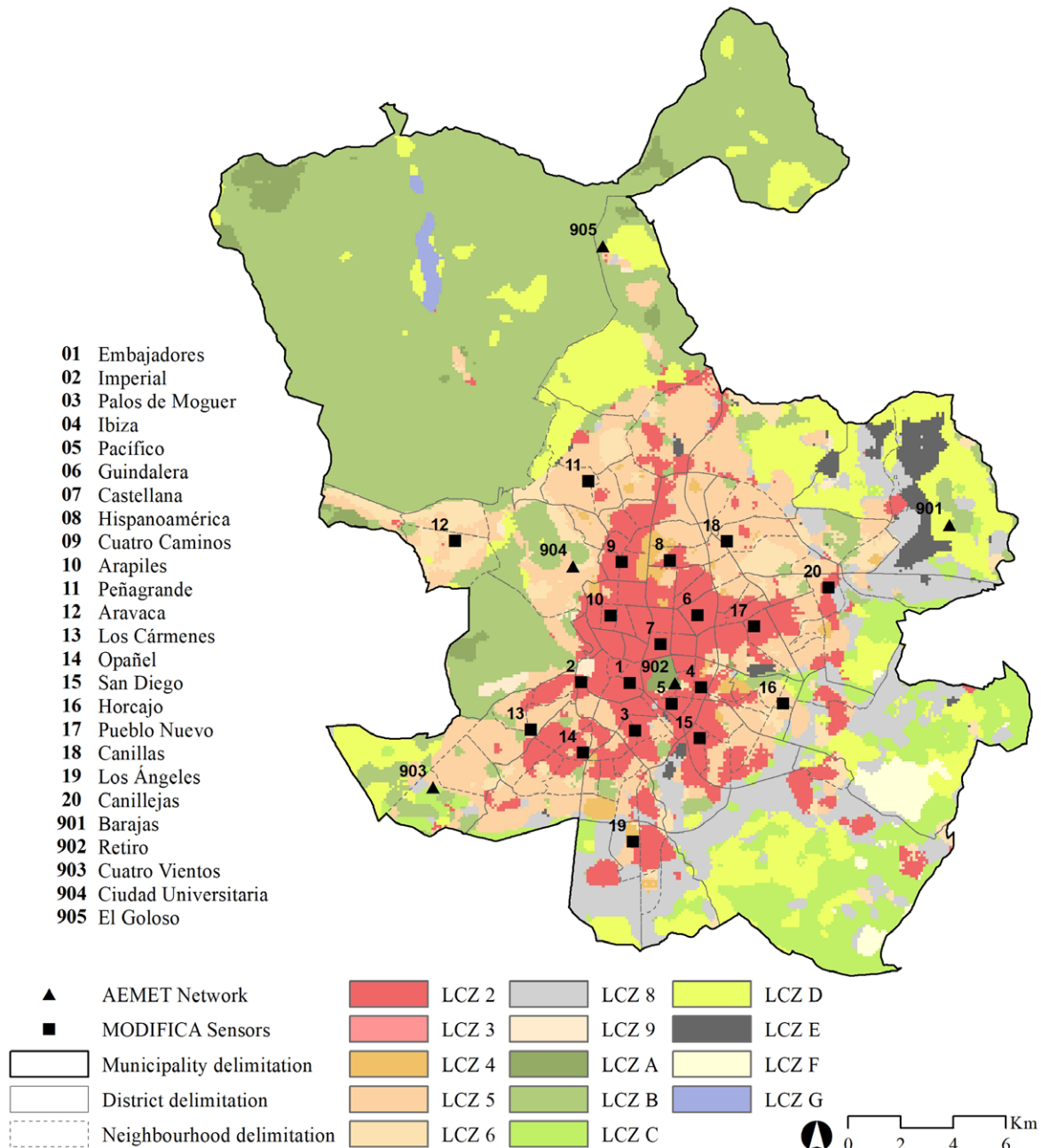


Figura 11.6 Situación de los puntos de medición del proyecto MODIFICA y de la AEMET, superimpresos sobre la clasificación del tejido urbano de Madrid según LCZ obtenido a partir del proyecto WUDAPT (Brousse et al., 2016)

Figure 11.6 Location of the MODIFICA and AEMET measurement sites, superimposed on the classification of the Madrid urban fabric according to LCZ and obtained from the WUDAPT project (Brousse et al., 2016).

The classification results are summarised in **Table 11.7**. There is a high correspondence between the manually defined LCZs and those that can be extracted through the WUDAPT project planimetry. The differences tend to be between neighbouring classes, although the classes obtained through the manual classification seem to have more diversity between them.

Los resultados de la clasificación se resumen en la **Tabla 11.7**. Se observa una elevada correspondencia entre las LCZs definidas manualmente y las que se pueden extraer a través de la planimetría del proyecto WUDAPT. Las diferencias suelen ser entre clases colindantes, aunque las clases obtenidas mediante la clasificación manual parecen tener mayor diversidad entre ellas.

Tabla 11.7 Clasificación de los puntos de medición a partir del cálculo manual de los indicadores y a través de la cartografía del proyecto WUDAPT.
Table 11.7 Classification of the measurement points based on the manual calculation of the indicators and through the mapping of the WUDAPT project.

Class. method	Site ID																								
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	901	902	903	904	905
Manual	2	4	2	4	2	2	2	2	2	2	4	6	5	5	2	9	2	6	5	5	D	A	D	9	C
WUDAPT	2	?	2	2	2	2	2	2	2	2	5	6	?	2	2	5	2	5	4	2	D	A	C	5	C

The surface cover indicators were also used to study the homogeneity between the different sectors of the source area. Some locations proved to be very homogeneous, such as site 10 *Arapiles*, 15 *San Diego* or 17 *Pueblo Nuevo*. Other locations showed some heterogeneity in some sectors, such as site 20 *Canillejas*. Two locations, 2 *Imperial* and 13 *Los Cármenes*, proved to be too heterogeneous to define a representative LCZ of the entire surrounding fabric, and were therefore excluded at certain stages of the research.

Los indicadores de cobertura superficial fueron utilizados, además, para estudiar la homogeneidad entre los diferentes sectores del área fuente. Algunas localizaciones mostraron ser muy homogéneas, como el emplazamiento 10 *Arapiles*, 15 *San Diego* o 17 *Pueblo Nuevo*. Otras localizaciones mostraron tener cierta heterogeneidad en algún sector, como el emplazamiento 20 *Canillejas*. Dos localizaciones, la 2 *Imperial* y la 13 *Los Cármenes*, mostraron ser demasiado heterogéneos para definir una LCZ que fuera representativa de todo el tejido circundante, por lo que fueron excluidos en determinadas fases de la investigación.

Finally, all these indicators and classifications were included as metadata and summarised in a set of data sheets, one for each measurement site. For this purpose, the WMO includes a proposal for data sheets with the basic information that should be included to characterise measurements in urban environments (WMO, 2017b; see **Figure 11.7**). These were used as a reference for the development of the sheets for this research. All of them are included in *Appendix A* of Núñez Peiró et al. (2021), and an example is shown in **Figure 11.8** and **Figure 11.9**. This information serves as a basis for carrying out the analyses of the hourly and intra-urban evolution of the urban heat island developed in the third stage of this research.

Finalmente, todos estos indicadores y clasificaciones fueron incluidos como metadatos y resumidos en una batería de fichas descriptivas, una por cada punto de medición. En este sentido, la WMO recoge una propuesta de fichas con la información básica que debería incluirse para caracterizar observaciones en entornos urbanos (WMO, 2017a; véase **Figura 11.7**). Éstas fueron tomadas de referencia a la hora de elaborar las propias de esta investigación. Todas ellas se incluyen en el *Apéndice A* de Núñez Peiró et al. (2021), mostrándose en la **Figura 11.8** y en la **Figura 11.9** un ejemplo de ellas. Esta información sirve de base para llevar a cabo los análisis de la evolución horaria e intraurbana de la isla de calor desarrollada en la tercera etapa de esta investigación.

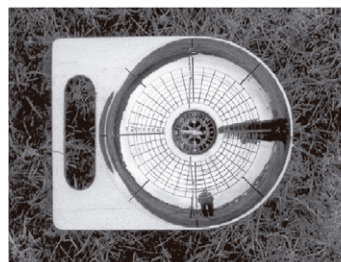
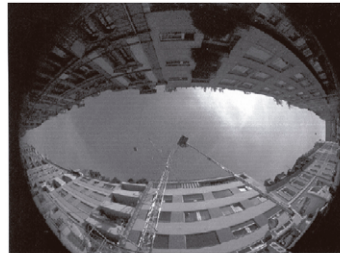
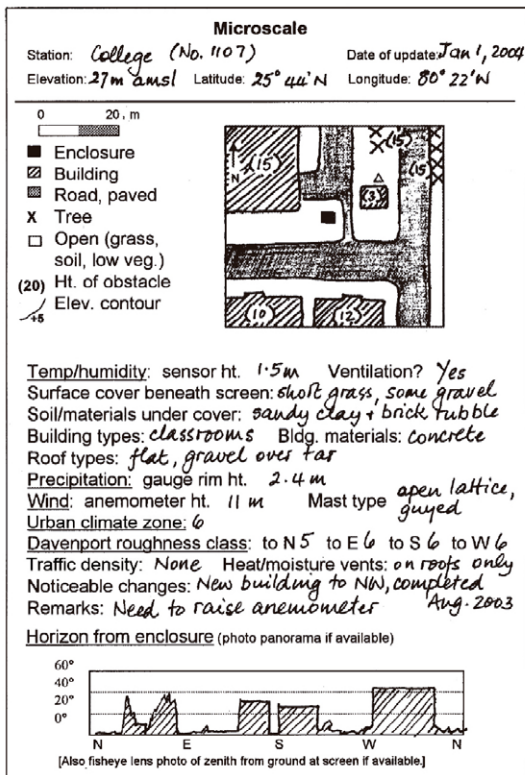
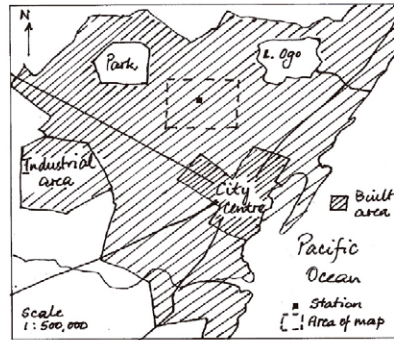
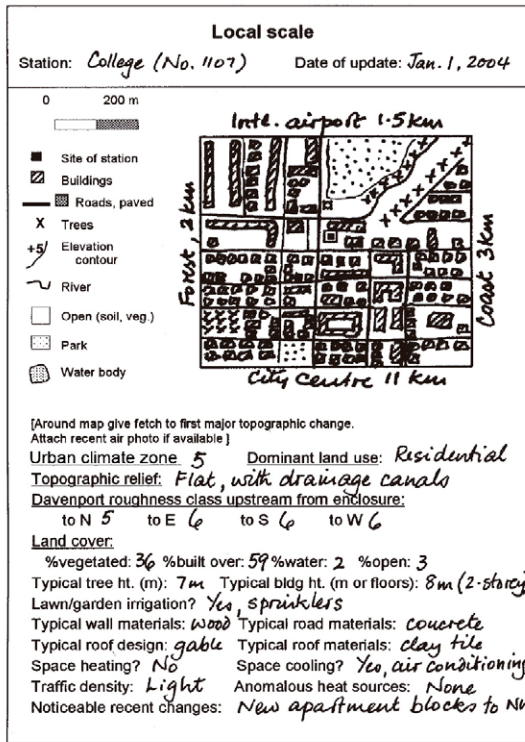


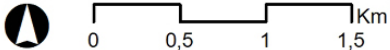
Figura 11.7 Ejemplo de ficha resumen propuesta por la WMO para recopilar los metadatos más relevantes de observaciones desarrolladas en entornos urbanos. Obtenidas de WMO (2017b).

Figure 11.7 Example of a data sheet proposed by WMO to compile the most relevant metadata of observations carried out in urban environments. Retrieved from WMO (2017b).

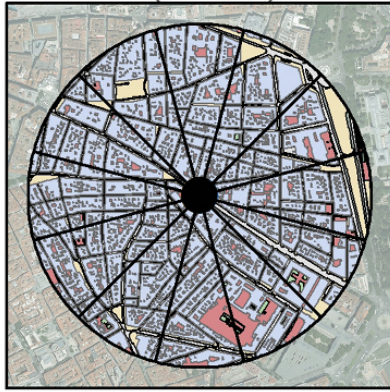
Site 01 EMBAJADORES

Calle de Atocha, 62. 28012 Madrid

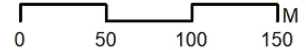
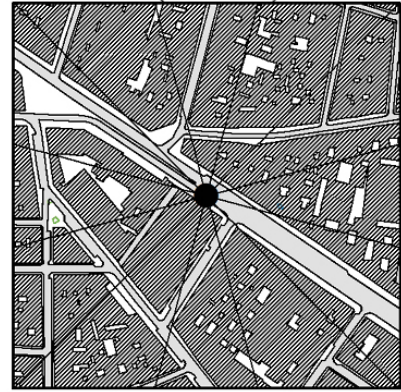
Urban context (1:50.000)



Local scale (1:25.000)



Microscale (1:10.000)



SITE DESCRIPTION

District: **01 - Centro**
Neighbourh.: **012 - Embajadores**
Lat: **40.412** Long: **-3.698**
LCZ: **02 - Compact midrise**
SVF summer/winter: **0.3/0.3**
Aspect ratio: **2.0**

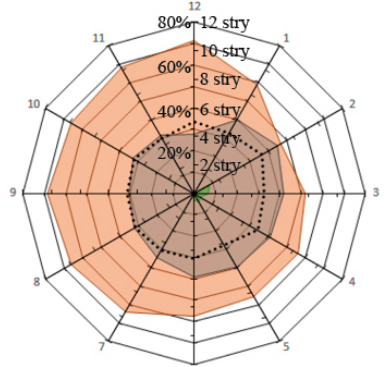
LAND COVER

Building s.f.: **61%**
Impervious s.f.: **36%**
Pervious s.f.: **3%**
Typical buildings height: **15 m**
Typical tree height: **-**
Davenport roughness class: **7**
Traffic density: **8/10**
Heat pumps to street: **0.12**
Typical road materials: **Asphalt**
Typical wall materials: **Bricks**

SENSOR DESCRIPTION

Mast type: **Streetlight**
Sensor height: **6 m**
Radiation shield: **Yes**
Mechanical ventilation: **Yes**
Parameters: **D. b. temperature (°C)**
Relative humidity (%)

Surface cover by sectors



■ Building s.f. ■ Impervious s.f.
■ Pervious s.f. Height (storeys)

Sky View Factor in summer



Sensor location



Sky View Factor in winter



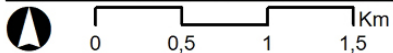
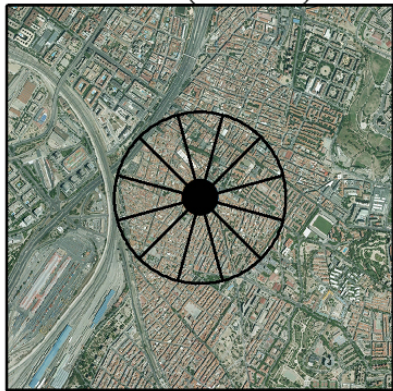
Figura 11.8 Ficha empleada en este estudio para recopilar los metadatos más relevantes asociados a cada punto de medición. En ella se incluye información tanto de la escala local como de la microescala, así como la clase LCZ asignada y el valor de los indicadores que lleva a su determinación. La ubicación se corresponde con el punto de medición 01 Embajadores.

Figure 11.8 Data sheet used to compile the most relevant metadata associated with each measurement point in this study. It includes information on both the local scale and the microscale, as well as the LCZ class assigned and the value of the indicators that lead to its determination. This example corresponds to the site 01 Embajadores.

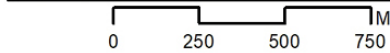
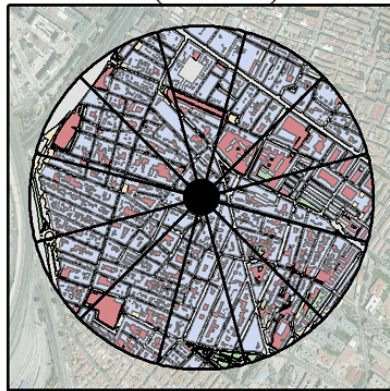
Site 15 SAN DIEGO

Calle del Monte Perdido, 82. 28053 Madrid

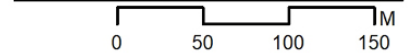
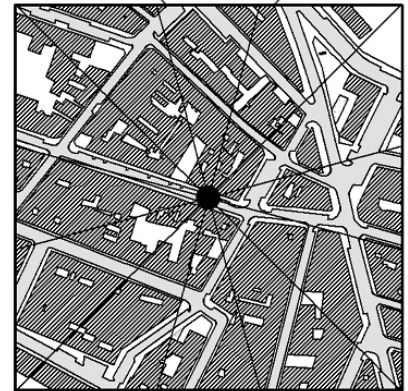
Urban context (1:50.000)



Local scale (1:25.000)



Microscale (1:10.000)



SITE DESCRIPTION

District: **13 - Puente de Vallecas**
 Neighbourh.: **132 - San Diego**
 Lat: **40.393** Long: **-3.667**
 LCZ: **02 - Compact midrise**
 SVF summer/winter: **0.6/0.6**
 Aspect ratio: **1.1**

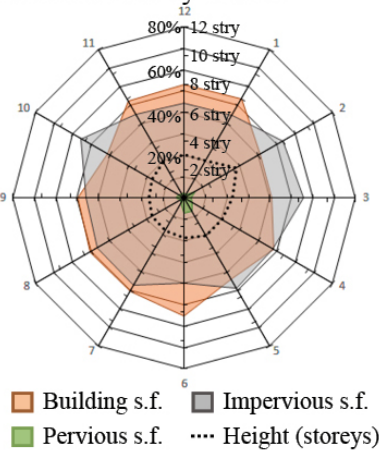
LAND COVER

Building s.f.: **48%**
 Impervious s.f.: **45%**
 Pervious s.f.: **7%**
 Typical buildings height: **11 m**
 Typical tree height: **5 m**
 Davenport roughness class: **7**
 Traffic density: **2/10**
 Heat pumps to street: **0.30**
 Typical road materials: **Asphalt**
 Typical wall materials: **Bricks**

SENSOR DESCRIPTION

Mast type: **Streetlight**
 Sensor height: **6 m**
 Radiation shield: **Yes**
 Mechanical ventilation: **Yes**
 Parameters: **D. b. temperature (°C)**
Relative humidity (%)

Surface cover by sectors



Sky View Factor in summer



Sensor location



Sky View Factor in winter



Figura 11.9 Ficha empleada en este estudio para recopilar los metadatos más relevantes asociados a cada punto de medición. En ella se incluye información tanto de la escala local como de la microescala, así como la clase LCZ asignada y el valor de los indicadores que lleva a su determinación. La ubicación se corresponde con el punto de medición 15 San Diego.

Figure 11.9 Data sheet used to compile the most relevant metadata associated with each measurement point in this study. It includes information on both the local scale and the microscale, as well as the LCZ class assigned and the value of the indicators that lead to its determination. This example corresponds to the site 15 San Diego.

$$dT = \Delta T_{t+1}$$

12. Analysis of the hourly and intra-urban evolution of the urban heat island

The previous two sections have summarised the procedures for data collection and the corresponding metadata. Through these first two stages, monitoring and contextualisation, not only have the data necessary to develop this study been collected, but also two fundamental tasks have been carried out: on the one hand, checking that the data recorded are of sufficient quality (data quality control); on the other hand, ensuring that these data are representative of the urban reality in which they are inserted (definition of the sensors' source area).

This third stage focuses on studying the hourly evolution of the urban heat island. First, the parameters used to carry out the analysis are defined numerically (section 12.1). Subsequently, through the graphical representation of the results, it has been possible to assess the evolution of temperatures in the different urban areas, both from an annual (section 12.2) and an hourly perspective (section 12.3). A statistical analysis has also been carried out to evaluate the significance of the differences between urban areas, and where the *Local Climate Zones*, one of the most relevant urban classification systems for characterising the climatic behaviour of urban environments, have been tested (section 12.4). Finally, a summary of the main implications of this analysis for urban heat island modelling and the subsequent generation of weather files is included in section 12.5.

12.1. Approach to the UHI analysis

The intensity of the urban heat island serves as the backbone of the analysis. It has been calculated as the temperature difference between an urban and a reference site. Following the example of other studies (Budhiraja et al., 2020; Kwok et al., 2019; Skarbit et al., 2017), a location in a LCZ D on the outskirts of the city (in this case, the AEMET Madrid-Barajas observatory) was used as a reference point. The expression used to obtain the urban heat island intensity (UHII) was therefore given by:

Here, LCZ X refers to the LCZ of the measurement point or the average of all measurement points within the same LCZ. Two other parameters to note are the *cooling rate* (dT) and the *weather factor* (Φ_w). The first one explains the rate at which a given area cools (or warms), and has been determined as the difference in temperature between two consecutive hours for each location or LCZ:

12. Análisis de la evolución horaria e intraurbana de la isla de calor

En los dos apartados anteriores se han resumido los procedimientos para la toma de datos y sus correspondientes metadatos. A través de estas dos primeras etapas, la monitorización y la contextualización, no sólo se han recabado los datos necesarios para desarrollar este estudio, sino que también se han llevado a cabo dos tareas fundamentales: por un lado, controlar que los datos registrados tienen la calidad suficiente (control de calidad de los datos); por otro lado, que estos datos son representativos de la realidad urbana en la que están insertos (definición del área fuente del sensor).

Esta tercera etapa se centra en estudiar la evolución horaria de la isla de calor. Primero se definen numéricamente los parámetros empleados para llevar a cabo el análisis (apartado 12.1). Posteriormente, a través de la representación gráfica de los resultados, se ha podido evaluar la evolución de las temperaturas en las distintas zonas urbanas, tanto desde una perspectiva anual (apartado 12.2) como horaria (apartado 12.3). También se ha llevado a cabo un análisis estadístico para evaluar la significancia de las diferencias entre las distintas zonas urbanas, y donde se han puesto a prueba las *Local Climate Zones*, uno de los sistemas de clasificación urbana más relevantes a la hora de caracterizar el comportamiento climático de los entornos urbanos (apartado 12.4). Por último, en el apartado 12.5 se incluye un resumen de las principales implicaciones de este análisis para la modelización de la isla de calor y la posterior generación de archivos climáticos.

12.1. Aproximación al análisis de la isla de calor

La intensidad de la isla de calor sirve de eje vertebrador a lo largo de todo el análisis. Ésta se ha calculado como la diferencia de temperatura existente entre un punto urbano y otro de referencia. Siguiendo el ejemplo de otros estudios (Budhiraja et al., 2020; Kwok et al., 2019; Skarbit et al., 2017), se ha utilizado como punto de referencia una ubicación situada en una LCZ D en las afueras de la ciudad (en este caso, el observatorio de la AEMET Madrid-Barajas). La expresión utilizada para obtener la intensidad de la isla de calor (UHII) vino dada, por tanto, por:

$$UHII = \Delta T_{LCZ X, LCZ D} \quad (1)$$

En ella, LCZ X hace referencia a la LCZ del punto de medición o a la media de todos los puntos de medición dentro de una misma LCZ. Otros dos parámetros que conviene señalar son la tasa de enfriamiento (dT , *cooling rate*) y el factor meteorológico (Φ_w , *weather factor*). El primero explica el ritmo al que se enfría (o calienta) una determinada zona, y se ha determinado como la diferencia de temperatura entre dos horas consecutivas para cada ubicación o LCZ:

$$dT = \Delta T_{t,t-1} \quad (2)$$

El segundo es un indicador adimensional propuesto por Oke (Oke, 1998, tal y como recogen Runnalls & Oke, 2006) y ampliamente utilizado para identificar los llamados *días ideales* (Skarbit et al., 2017; Stewart et al., 2014; Yang et al., 2018), días en los que las condiciones meteorológicas son propicias para la formación de una isla de calor de alta intensidad. Su valor varía entre 0 (condiciones poco propicias para la formación de la isla de calor) y 1 (condiciones muy propicias), siendo mayor cuando se da una menor velocidad de viento (u , en m/s) y una menor nubosidad (n , en décimas, corregido por un factor, k , basado en su altura):

$$\Phi_w = \frac{1 - kn^2}{\sqrt{u}} \quad \text{siendo } u \geq 1 \text{ m/s} \quad (3)$$

La primera parte del análisis se centra en la dinámica estacional (o estacionaria) del fenómeno a lo largo del año. Le sigue el análisis de la evolución horaria, para lo que se tomó como referencia el año 2017 (el único año natural completo de la serie). Los datos de 2016 y 2018, que en conjunto suman otro año, se utilizaron de forma complementaria para contrastar las tendencias observadas en el año 2017. Esta parte del análisis se desarrolló fundamentalmente de forma gráfica, ya que es a través de los gráficos como se pueden detectar más fácilmente las tendencias y las diferencias entre cada LCZ.

A este análisis gráfico le sigue un estudio estadístico. Para comenzar, se estima el grado de correlación existente entre las LCZs y las intensidades de la isla de calor. A continuación, mediante el desarrollo de análisis de varianza (ANOVA, por sus siglas en inglés), se procede a evaluar la significancia estadística de las diferencias de temperatura observadas entre las LCZs. Dado que un ANOVA no ofrece detalles sobre qué pares son los que producen estas diferencias estadísticamente significativas, el análisis ha sido posteriormente complementado con tests *post-hoc*. En Núñez-Peiró et al. (2021b) se describen los detalles de este cálculo:

Cabe mencionar que cada LCZ tenía muestras de igual tamaño con una distribución casi normal, lo que llevó a los autores a considerar enfoques paramétricos. Sin embargo, dado que la prueba de Levene reveló que nuestras LCZs presentaban varianzas diferentes para las intensidades de la isla de calor media y mínima, se utilizó un ANOVA de Welch en lugar del clásico ANOVA. Junto con el ANOVA de Welch, se aplicó la prueba post-hoc de Games-Howell para evaluar si las divergencias entre cada par de LCZs eran estadísticamente significativas. A este respecto, estudios anteriores también han informado del uso de métodos no paramétricos (es decir, Kruskal Wallis) junto con otras pruebas post-hoc, como la de Conover-Iman (Leconte et al., 2017) o la prueba de suma de rangos Wilcoxon (Chapman et al., 2017; Fenner et al., 2017). Aunque estas presentan la ventaja de no tener que cumplir con ninguna distribución específica, su poder estadístico podría verse disminuido en comparación con los enfoques paramétricos.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, pág. 10.

Texto traducido de la versión original en inglés)

The second is a dimensionless indicator proposed by Oke (Oke, 1998, as reported by Runnalls & Oke, 2006) and widely used to identify so-called *ideal days* (Skarbit et al., 2017; Stewart et al., 2014; Yang et al., 2018), days when weather conditions are favourable for the formation of a high-intensity urban heat island. Its value varies between 0 (conditions not very favourable for the formation of the urban heat island) and 1 (very favourable conditions), being higher when there is a lower wind speed (u , in m/s) and lower cloudiness (n , in tenths, corrected by a factor, k , based on its height):

The first part of the analysis focuses on the seasonal (or stationary) dynamics of the phenomenon throughout the year. This is followed by the analysis of the hourly evolution, for which the year 2017 (the only full calendar year in the series) was taken as a reference. Data from 2016 and 2018, which together add up to another year, were used in a complementary way to contrast the trends observed in 2017. This part of the analysis was developed mainly in graphical form, as it is through graphs that trends and differences between each LCZ can be more easily detected.

This graphical analysis is followed by a statistical study. First, the degree of correlation between LCZs and urban heat island intensity is estimated. Then, using analysis of variance (ANOVA), the statistical significance of the observed temperature differences between the LCZs is assessed. Since an ANOVA does not provide details on which pairs produce these statistically significant differences, the analysis has subsequently been supplemented with *post-hoc* tests. Details of this calculation are described in Núñez-Peiró et al. (2021b):

It should be mentioned that each LCZ had equal-sized samples with a quasi-normal distribution, leading the authors to consider parametric approaches. However, since the Levene's variance check revealed that our LCZs presented different variances for the mean and minimum UHI intensities, a Welch ANOVA was used instead of the classical one-way ANOVA. Together with the Welch ANOVA, the Games-Howell post-hoc test was applied to evaluate if the divergences between each LCZ pair were statistically significant. In this respect, previous studies have also reported the use of non-parametric methods (i.e. Kruskal Wallis) together with other post-hoc tests, such as the Conover-Iman (Leconte et al., 2017) or the Wilcoxon Rank-sum (Chapman et al., 2017; Fenner et al., 2017) tests. While these present the advantage of not having to comply with any specific distribution, their statistical power might be diminished compared to parametric approaches.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, p. 10)

Finally, to close this stage of analysis, the degree of correlation between the LCZ indicators and the intensity of the urban heat island is studied, as well as the degree of correlation between the indicators themselves. This study also includes an indicator whose relevance in the measurement of the urban heat island has been widely discussed in previous studies: the distance between the measurement point and the urban centre. The aim of this last section is to identify which of the indicators that define the LCZs might be more relevant, at what times of the day they work best, and whether there are any overlaps between them.

12.2. Overview and annual evolution of the urban heat island according to LCZs

The daily average values obtained throughout 2017 and shown in **Table 12.1** confirm two fundamental aspects. First, that the city has, on average and throughout the year, a warmer environment than its immediate surroundings. The differences are up to 2.2 °C, being even more accentuated when looking at the minimum temperatures, reaching then up to 5.2 °C. The latter serves to confirm the second aspect: the existence of the UHI. Given that it is an eminently nocturnal phenomenon, its maximum intensity should be recognisable through the daily minimums. The results therefore rule out the possibility that these differences are due to microclimatic factors, but rather that they respond to a structural and widely known phenomenon such as the UHI.

These differences correspond to the annual averages. When looking at the daily records, the differences are even more pronounced. **Figure 12.1** shows the average daily intensity of the UHI over the two years of measurements. It shows that the intensity of the UHI can be very variable, with many days below 2 °C, but also with many days above 4 °C.

These values, which refer to the mean daily intensity, actually provide little information about the daily intensity peaks, which is often used to refer to the UHI intensity. For that purpose it is necessary to visualise the maximum daily intensity. In **Figure 12.2** it can be seen that, in Madrid, there are many days in which the UHI intensity reaches peaks above 6 °C, in some cases exceeding 9 °C. In contrast, the minimum daily intensity reveals the existence of a *urban cool island* (when the UHI is negative, see **Figure 12.3**). This urban cool island is of low intensity, with maximum peaks between 0 and 2 °C.

Another remarkable aspect is that the UHI shows a weak seasonal trend. It can be found in the mean daily intensity, (**Figure 12.1**) reaching the highest values in the vicinity of the winter solstice, and the lowest at the summer solstice. This trend is not observed, however, in the minimum and maximum daily intensities (**Figures 12.2** and **12.3**). In the case

Por último, para cerrar esta etapa de análisis, se estudia el grado de correlación entre los indicadores de las LCZs y la intensidad de la isla de calor, así como el grado de correlación entre los propios indicadores. En este estudio se incluye, además, un indicador cuya relevancia en la medida de la isla de calor ha sido ampliamente debatida en estudios previos: la distancia entre el punto de medición y el centro urbano. El objetivo de esta última sección dedicada al análisis de la isla de calor es la de identificar qué indicadores de los que definen las LCZs podrían ser más relevantes, en qué momentos del día funcionan mejor, y si existen solapes entre ellos.

12.2. Visión global y evolución anual de la isla de calor según LCZs

Los valores medios diarios obtenidos a lo largo del año 2017 y recogidos en la **Tabla 12.1** confirman dos aspectos fundamentales. Primero, que la ciudad tiene, de media y a lo largo del año, un entorno más cálido que su entorno inmediato. Las diferencias llegan a ser de hasta 2.2 °C, siendo todavía más acentuadas cuando se atiende a las mínimas, con hasta 5.2 °C de diferencia. Esto último sirve para confirmar el segundo aspecto: la existencia de la isla de calor. Dado que se trata de un fenómeno eminentemente nocturno, su máxima intensidad debe ser reconocible a través de las mínimas diarias. Los resultados descartan, por tanto, que estas diferencias se deban a factores microclimáticos, sino que responden a un fenómeno estructural y ampliamente conocido como es la isla de calor.

Estas diferencias se corresponden con las medias anuales. Si se observan los registros diarios, las diferencias son todavía más acentuadas. Así, en la **Figura 12.1** se representa la intensidad media diaria de la isla de calor a lo largo de los dos años de mediciones. En ella se puede observar que la intensidad de la UHI puede ser muy variable, con muchos días por debajo de los 2 °C, pero también con muchos otros por encima de 4 °C.

Estos valores, que se refieren a la intensidad media diaria, aportan en realidad poca información sobre los picos de intensidad diarios, que es a la que se suele referir cuando se habla de la intensidad de la isla de calor. Para ello es necesario visualizar la intensidad máxima diaria (véase la **Figura 12.2**). En ella se aprecia que, en Madrid, existen muchos días en los que el pico de isla de calor se sitúa por encima de los 6 °C, sobrepasando en algunos casos los 9 °C de intensidad. Por el contrario, la intensidad mínima diaria revela la existencia de una isla de frescor (cuando la isla de calor es negativa, véase la **Figura 12.3**). Esta es de baja intensidad, por lo general de entre 0 y 2 °C.

Otro aspecto destacable es que la isla de calor muestra una tendencia estacional débil. Se observa en la intensidad media diaria, alcanzando los valores más altos en las proximidades del solsticio de invierno, y los más bajos en el solsticio de verano. Esta tendencia no se observa, sin embargo, en las intensidades mínimas y máximas

Tabla 12.1 Valores medios diarios de la temperatura y la intensidad de la isla de calor observada en cada punto de medición. Las cifras destacadas en negrita representan los valores más altos, mientras que los que se encuentran sobreimpresos sobre fondo gris representan los mínimos.

Table 12.1 Daily average values of temperature and urban heat island intensity observed at each measurement point. Figures highlighted in bold represent the highest values, while those overprinted on a grey background represent the lowest values.

Sensor		LCZ	Dist. to centroid ¹ (km)	Temperature (°C)			UHI (°C) ²			Ranking UHI
ID	Site name			Mean	Min.	Max.	Mean	Min.	Max.	
MODIFICA campaign										
01	Embajadores	2	2.0	17.9	13.3	22.5	2.2	-0.7	5.2	1
03	La Chopera	2	3.5	17.5	12.3	22.7	1.8	-0.6	4.3	4
04	Estrella	4	2.1	17.3	12.5	22.1	1.6	-1.0	4.3	7
05	Pacífico	2	2.3	17.6	13.1	22.3	1.9	-1.0	4.9	2
06	Guindalera	2	1.6	17.0	12.4	22.6	1.3	-1.4	4.3	9
07	Recoletos	2	0.3	17.4	12.9	21.9	1.7	-1.3	4.9	5
08	Hispanoamérica	2	3.2	17.0	12.4	21.8	1.3	-1.6	4.4	9
09	Cuatro Caminos	2	3.6	17.4	12.9	21.9	1.7	-1.3	5.0	5
10	Arapiles	2	2.5	17.2	13.0	21.4	1.4	-1.7	4.9	8
11	Peñagrande	4	6.9	16.5	11.7	22.6	0.8	-1.8	3.6	15
12	Aravaca	6	9.0	16.1	9.9	23.1	0.4	-1.7	2.5	18
14	Opañel	5	5.2	17.0	11.7	23.1	1.3	-1.0	3.6	9
15	San Diego	2	3.8	17.6	12.7	22.6	1.9	-0.6	4.7	2
16	Horcajo	9	4.9	16.2	11.1	21.9	0.5	-1.9	3.2	17
17	Pueblo Nuevo	2	3.4	17.0	12.1	22.4	1.3	-1.1	4.0	9
18	Canillas	6	4.5	16.9	11.6	23.0	1.2	-1.0	3.4	13
19	Los Ángeles	5	7.6	16.3	11.1	22.3	0.6	-1.7	3.2	16
20	Canillejas	5	6.5	16.9	11.7	23.0	1.2	-0.9	3.5	13
AEMET network										
901	Barajas (reference)	D	11.6	15.7	8.8	22.6	0.0	0.0	0.0	-

¹ Centroid of the city of Madrid, considering only the built area.

² UHI intensity estimated as the difference of temperature between each site and Barajas, for the average mean, minimum and maximum temperatures.

diarias (Figuras 12.2 y 12.3). En el caso de esta última, la correspondencia es mucho más clara con las condiciones atmosféricas, ya sea la velocidad de viento (Figura 12.4) o las acumulación de precipitaciones (Figura 12.5).

La estacionalidad observada en las medias se puede justificar a través del número de horas nocturnas, el cual es mayor alrededor del solsticio de invierno. En este sentido, el hecho de que los registros medios de la intensidad de la isla de calor sean mayores en invierno no parece producto de unas intensidades de isla de calor más elevadas, sino de la existencia de una mayor cantidad de horas con isla de calor (mayor cantidad de horas nocturnas). La estacionalidad de la isla de calor de Madrid queda, por tanto, matizada, apuntando únicamente a los valores medios y no a los máximos.

Sobre las condiciones meteorológicas, parece que éstas pueden condicionar ampliamente la formación de la isla de calor. Un ejemplo de ello es el mes de marzo de 2018, el más lluvioso en Madrid desde

of the latter, the correspondence is much clearer with atmospheric conditions, such as wind speed (Figure 12.4) or precipitations (Figure 12.5).

The seasonality observed in the mean intensities can be justified by the number of night hours, which is highest around the winter solstice. In that sense, the fact that the mean UHI intensity records are higher in winter does not seem to be due to higher peaks of UHI intensities, but rather to the existence of a higher number of hours with strong UHIs (that is, more nighttime hours). The seasonality of the UHI in Madrid is therefore nuanced, pointing only to average values and not to maximum values.

As for weather conditions, it seems that they can largely determine the formation of the UHI. An example of this is the month of March 2018, the rainiest month in Madrid since 1965, and in which the urban areas recorded, on average, an UHI intensity

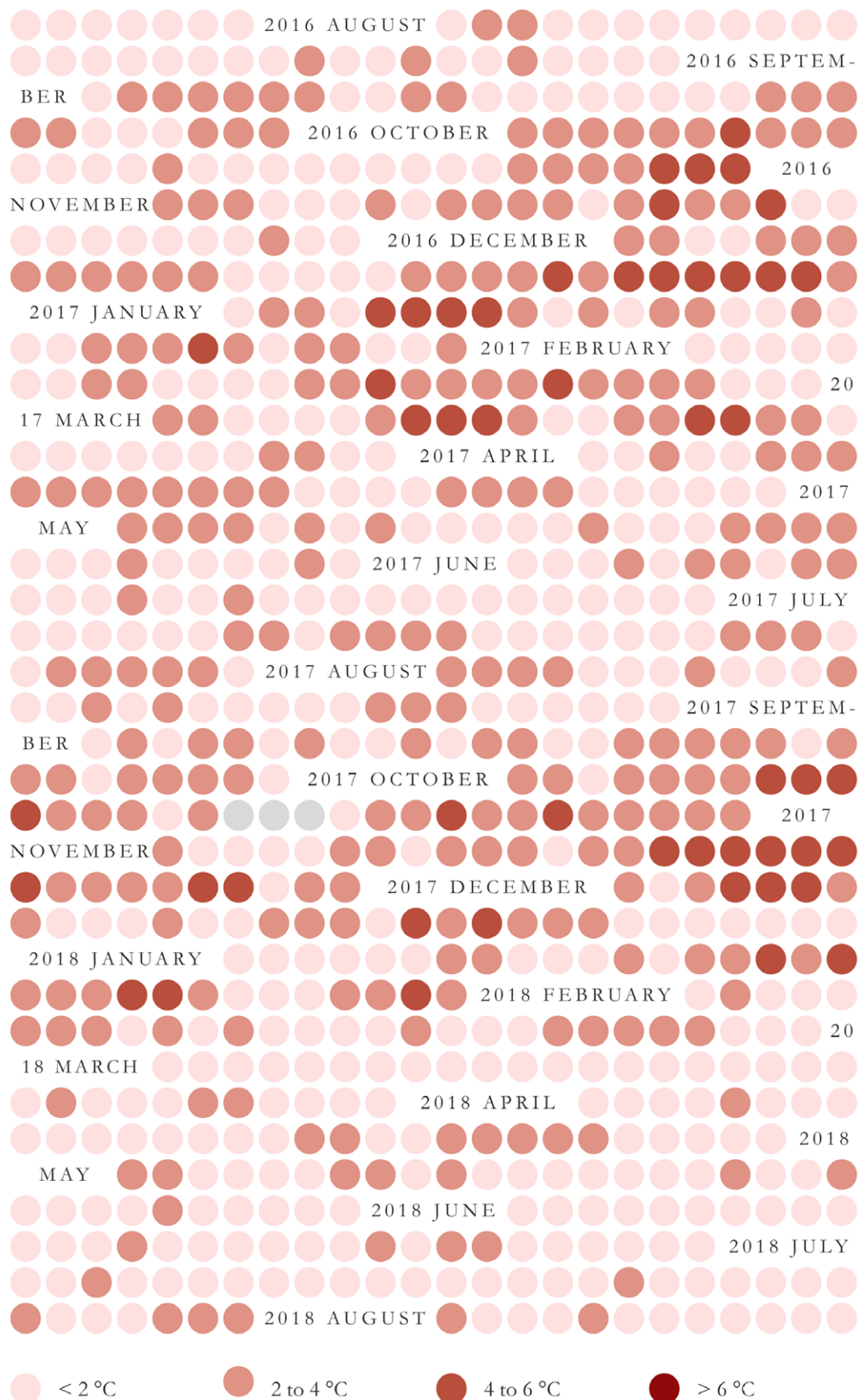


Figura 12.1 Intensidad media diaria de la isla de calor durante la campaña de medición. Los valores se corresponden con el punto de medición 01 Embajadores, siendo este el más céntrico de la campaña de monitorización, y el que registró intensidades de isla de calor más elevadas.

Figure 12.1 Mean daily UHI intensity during the measurement campaign. The values correspond to measurement site 01 Embajadores, being the most centric location of the monitoring campaign, and the one with the highest heat island intensities.

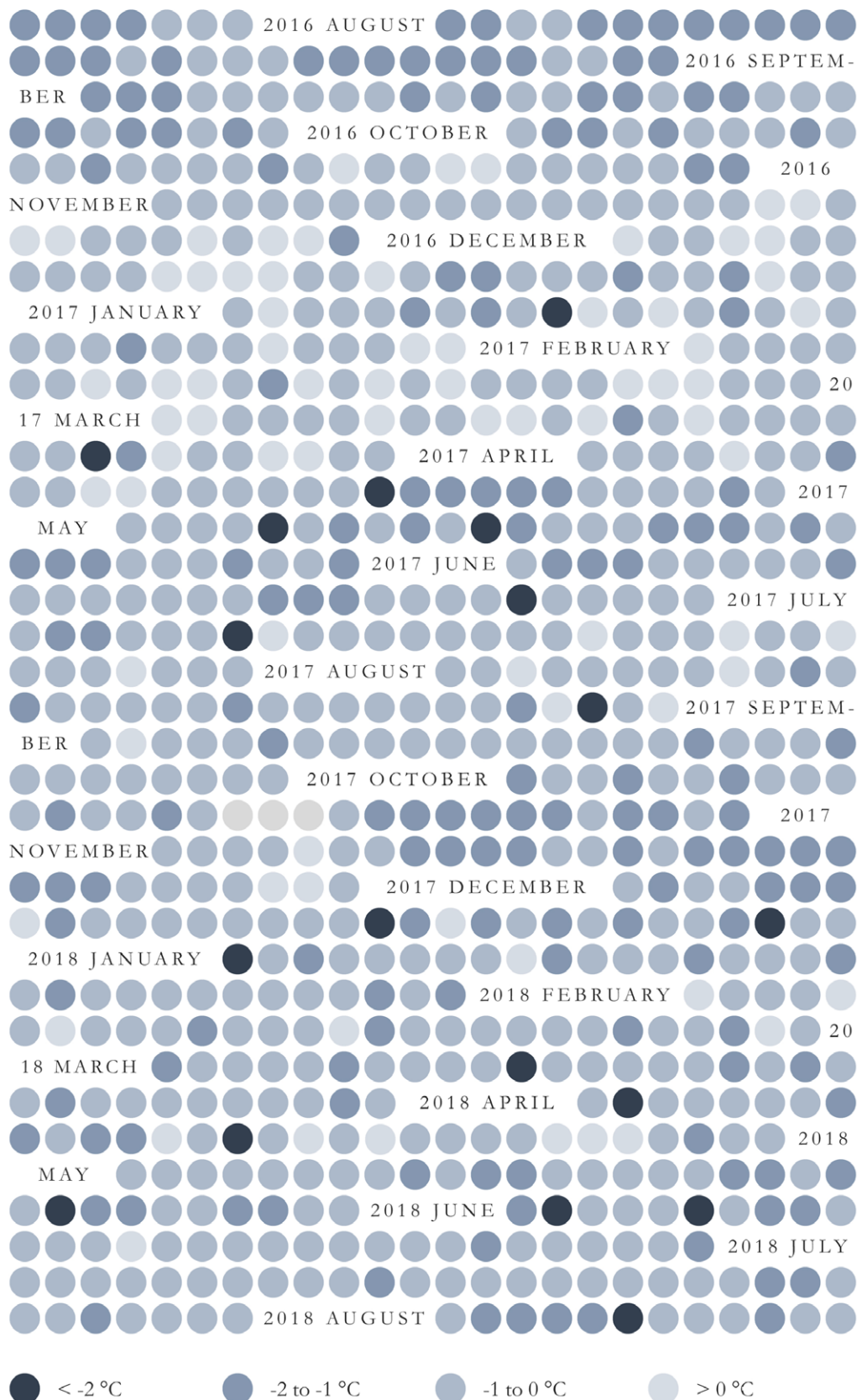


Figura 12.2 Intensidad mínima diaria de la isla de calor durante la campaña de medición. Los valores se corresponden con el punto de medición 01 Embajadores, siendo este el más céntrico de la campaña de monitorización, y el que registró intensidades de isla de calor más elevadas.

Figure 12.2 Minimum daily UHI intensity during the measurement campaign. The values correspond to measurement site 01 Embajadores, being the most centric location of the monitoring campaign, and the one with the highest beat island intensities.

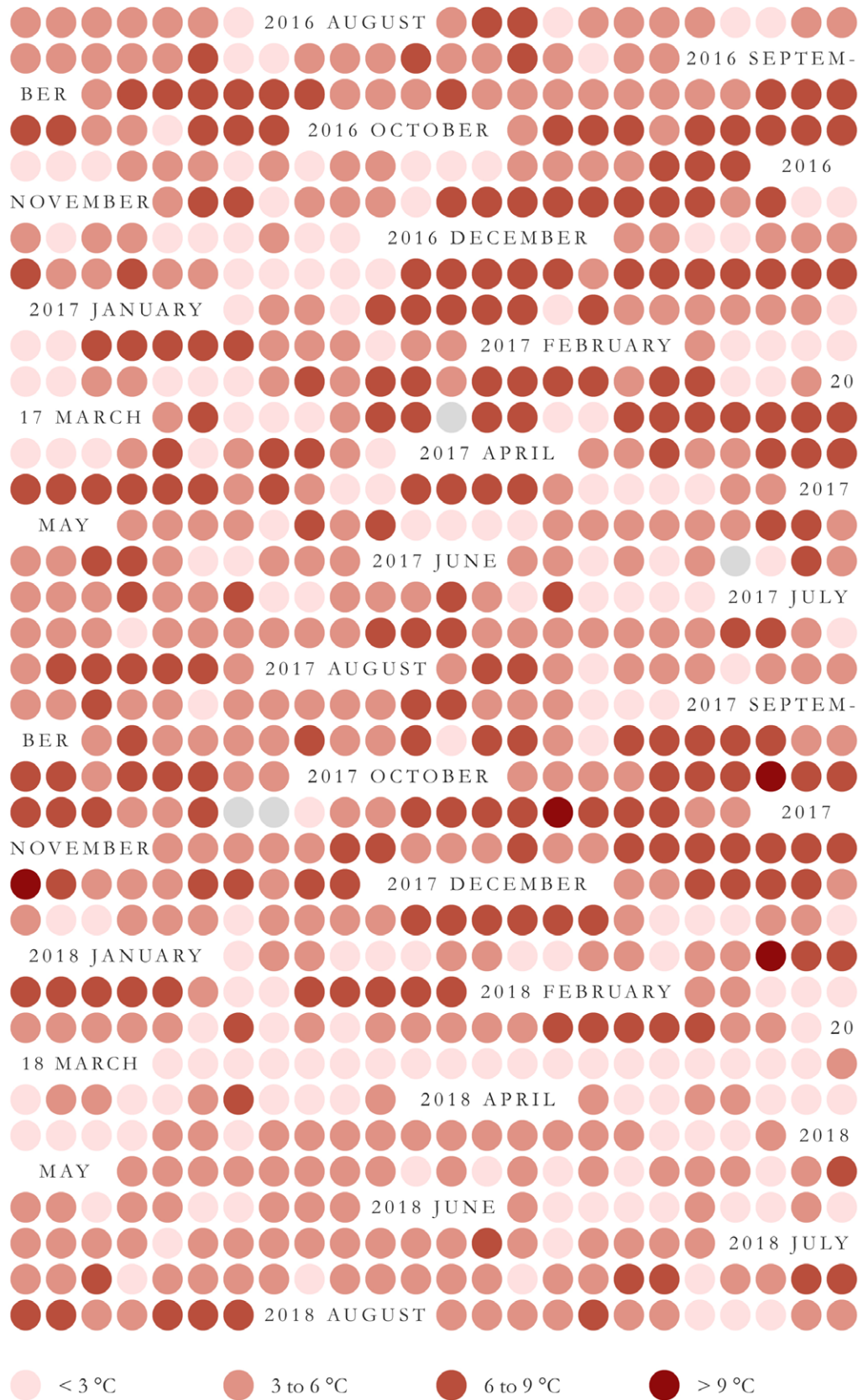


Figura 12.3 Intensidad máxima diaria de la isla de calor durante la campaña de medición. Los valores se corresponden con el punto de medición 01 Embajadores, siendo este el más céntrico de la campaña de monitorización, y el que registró intensidades de isla de calor más elevadas.

Figure 12.3 Maximum daily UHI intensity during the measurement campaign. The values correspond to measurement site 01 Embajadores, being the most centric location of the monitoring campaign, and the one with the highest heat island intensities.

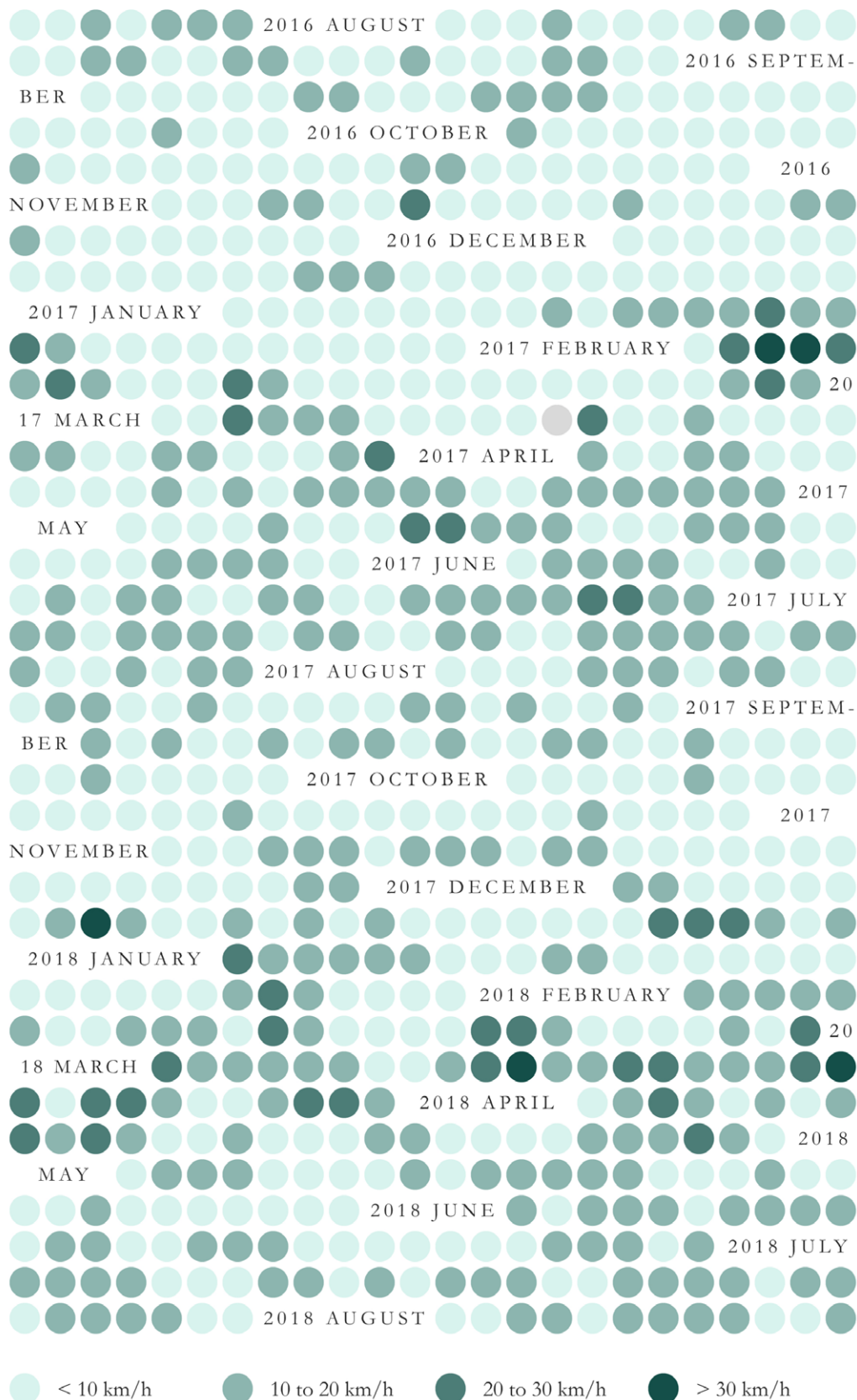


Figura 12.4 Velocidad de viento media diaria. Nótese que los días con mayor velocidad de viento suelen corresponderse con días con picos de intensidad de isla de calor muy bajos (véase Figura 12.3).

Figure 12.4 Mean daily wind speed. Note that days with higher wind speeds tend to correspond with days with very low peaks of UHI intensity (see Figure 12.3)

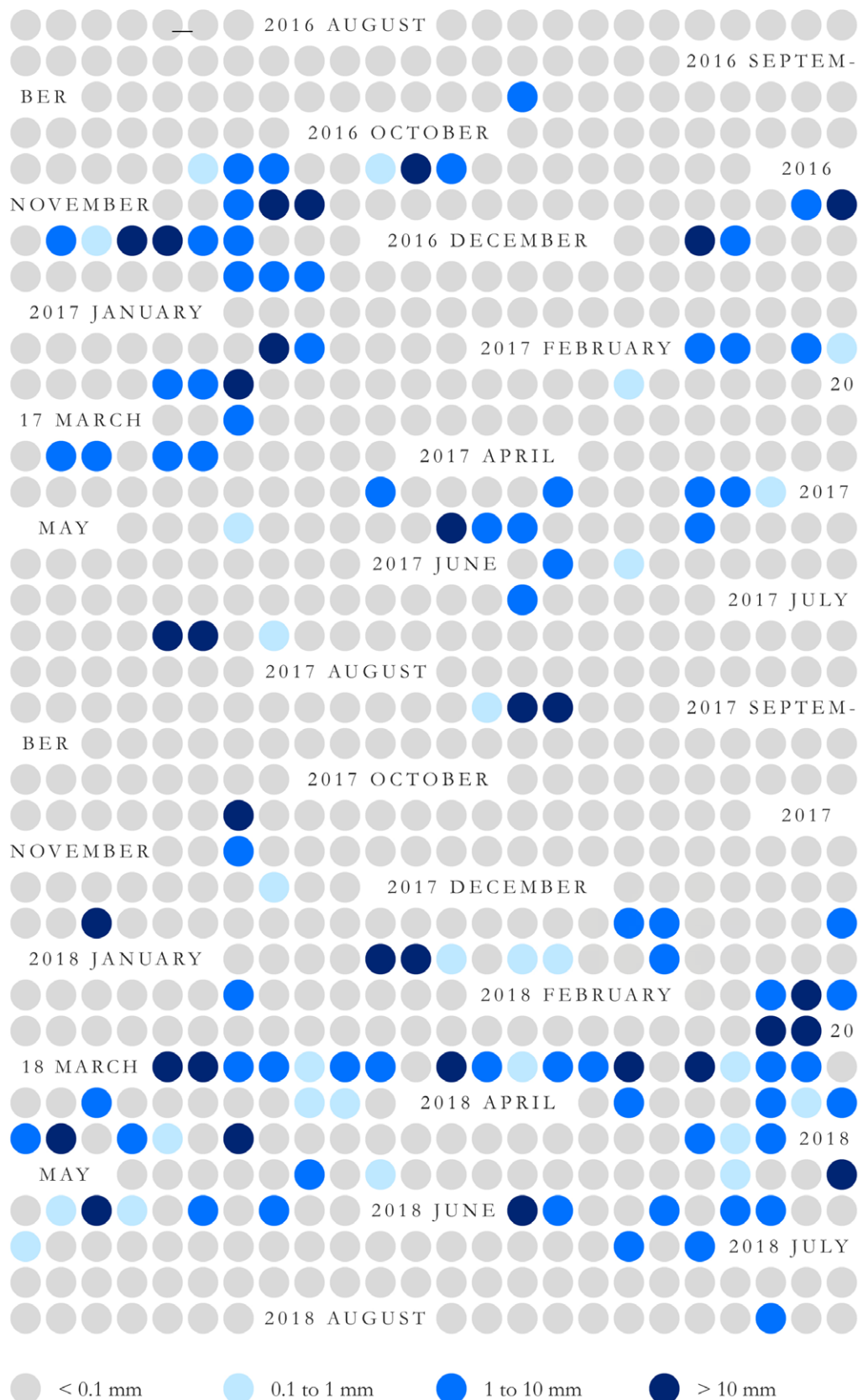


Figura 12.5 Precipitaciones acumuladas durante 24 horas. Nótese que los días con mayor cantidad de precipitaciones suelen corresponderse con días con picos de intensidad de isla de calor muy bajos (véase Figura 12.3).

Figure 12.5 Accumulated precipitations during 24 hours. Note that days with higher accumulated precipitations tend to correspond with days with very low peaks of UHI intensity (see Figure 12.3)

1965, y en el cual los puntos urbanos registraron, de media, una intensidad de isla de calor próxima a cero. De hecho, en la **Figura 12.6** del siguiente apartado, se observa que durante ese mes la isla de calor se desvaneció prácticamente por completo. A este respecto, los resultados muestran que el factor meteorológico Φ_w no parece capturar del todo bien la relación entre las condiciones meteorológicas y los días de mayor intensidad, por lo que debería utilizarse con cautela. Sobre ello se apunta lo siguiente en Núñez-Peiró et al. (2021b):

Esta investigación utilizó el factor meteorológico propuesto por Oke (1998) para identificar los días con las condiciones más favorables para la formación de UHI. Este indicador ha sido ampliamente utilizado en investigaciones anteriores (Eastin et al., 2018; Molnár et al., 2020; Skarbit et al., 2017; Stewart et al., 2014; Theeuwes et al., 2017; Yang et al., 2018) y, dada su simplicidad y legibilidad, parece ser adecuado para promover la comparabilidad cruzada entre los estudios climáticos urbanos. Sin embargo, en este estudio ha mostrado un claro sesgo estacional, concentrando la identificación de días ideales en invierno mientras que deja sin detectar varios de ellos en los meses de verano. A este respecto, podría merecer la pena investigar el uso de otros métodos, como el propuesto por Hidalgo et al. (2018), que podrían ofrecer una forma alternativa de agrupar las condiciones climáticas locales. Estos métodos alternativos, en lugar de utilizar un algoritmo para definir la potencialidad de un determinado día para alcanzar altas intensidades UHI, proponen herramientas estadísticas para definir el número y tipo de clústeres que determinarían las características potenciales UHI de cada día. Estos métodos podrían ser interesantes para futuros estudios debido a su mayor flexibilidad y mejor ajuste a las condiciones locales.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, pág. 18.
 Texto traducido de la versión original en inglés)

Se observan diferencias importantes entre LCZs, las cuales parecen ser más consistentes a lo largo de los meses cuando se atiende a la $UHII_{max}$. Estas diferencias se analizan con más detalle en los siguientes apartados, comenzando por el análisis de su evolución horaria.

12.3. Evolución horaria de la intensidad de la isla de calor según LCZs

El análisis de la evolución horaria de la isla de calor, que se desarrolla fundamentalmente a través de gráficas, apunta a que tanto su intensidad como las diferencias entre LCZs son más acentuadas durante la noche e independientes del mes en el que se producen (véase **Figura 12.6**). Esto último refuerza las ideas planteadas sobre la estacionalidad de la isla de calor del apartado anterior, aunque sí que se observa que la estabilidad de la isla de calor es mayor durante las noches de invierno que durante las de verano. En cuanto a las diferencias entre LCZs, los resultados muestran que todas las LCZs comparten una evolución horaria parecida. No se observan desfasos térmicos relevantes, aunque sí amortiguaciones térmicas.

También en la **Figura 12.6** y, con más detalle, en la **Figura 12.7**, se observa que los valores máximos se producen justo antes del amanecer (entre las 5:00 y las 8:00 UTC), momento a partir del cual comienza a desvanecerse la isla de calor hasta convertirse en

close to zero. In fact, in **Figure 12.6** in the following section, it is observed that during that month the UHI practically vanished completely. In this respect, the results show that the weather factor Φ_w does not seem to capture the relationship between weather conditions and the days of highest intensity very well and should be used with caution. The following is noted in Núñez-Peiró et al. (2021b):

This research used the weather factor proposed by Oke (1998) to identify the days with the most favourable conditions for the UHI formation. This indicator has been widely used in previous research (Eastin et al., 2018; Molnár et al., 2020; Skarbit et al., 2017; Stewart et al., 2014; Theeuwes et al., 2017; Yang et al., 2018) and, given its simplicity and readability, it appears to be adequate for promoting the cross-comparability among urban climate studies. However, in this study it has shown a clear seasonal bias, concentrating the identification of ideal days in winter while leaving undetected several of them in the summer months. To this respect, it might be worth investigating the use of other methods, such as the proposed by Hidalgo et al. (2018), which might offer an alternative way to cluster local weather conditions. These alternative methods, instead of using an algorithm to define the potentiality of a certain day to reach high UHI intensities, statistical methods are proposed to define the number and type of clusters that would determine the UHI potential characteristics of each day. These might be of interest for future studies due to their greater flexibility and better fit to local conditions.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, p. 18)

Significant differences are observed between LCZs, which seem to be more consistent across months when the $UHII_{max}$ is taken into account. These differences are analysed in more detail in the following sections, starting with the analysis of their hourly evolution.

12.3. Hourly evolution of the urban heat island intensity according to LCZs

The analysis of the hourly evolution of the urban heat island, which is mainly developed through graphs, shows that both its intensity and the differences between LCZs are more accentuated during the night and independent of the month in which they occur (see **Figure 12.6**). The latter reinforces the ideas raised about the seasonality of the heat island in the previous section, although it is observed that the stability of the urban heat island is greater during winter nights than during summer nights. Regarding the differences between LCZs, the results show that all LCZs share a similar hourly evolution. No relevant thermal offset is found, although thermal damping is observed.

Also in **Figure 12.6** and, in more detail, in **Figure 12.7**, it can be seen that the maximum values occur just before sunrise (between 5:00 and 8:00 UTC), at which time the urban heat is-

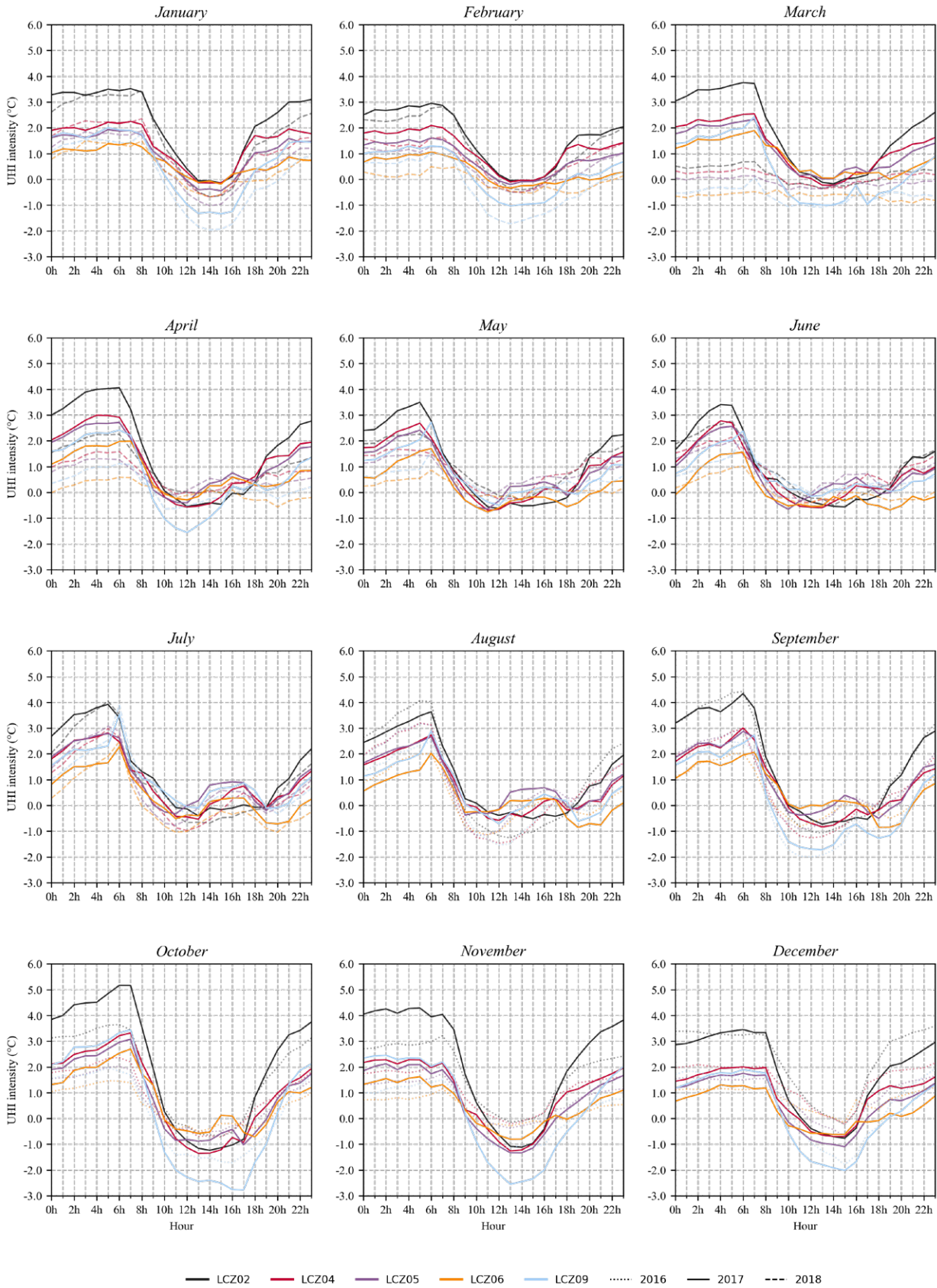


Figura 12.6 Evolución de la intensidad de la isla de calor a lo largo de las horas, en cada LCZ y para cada mes. Los valores se corresponden con la media de los registros horarios.

Figure 12.6 Evolution of the urban heat island intensity over the hours, in each LCZ and for each month. The values correspond to the mean of the hourly records.

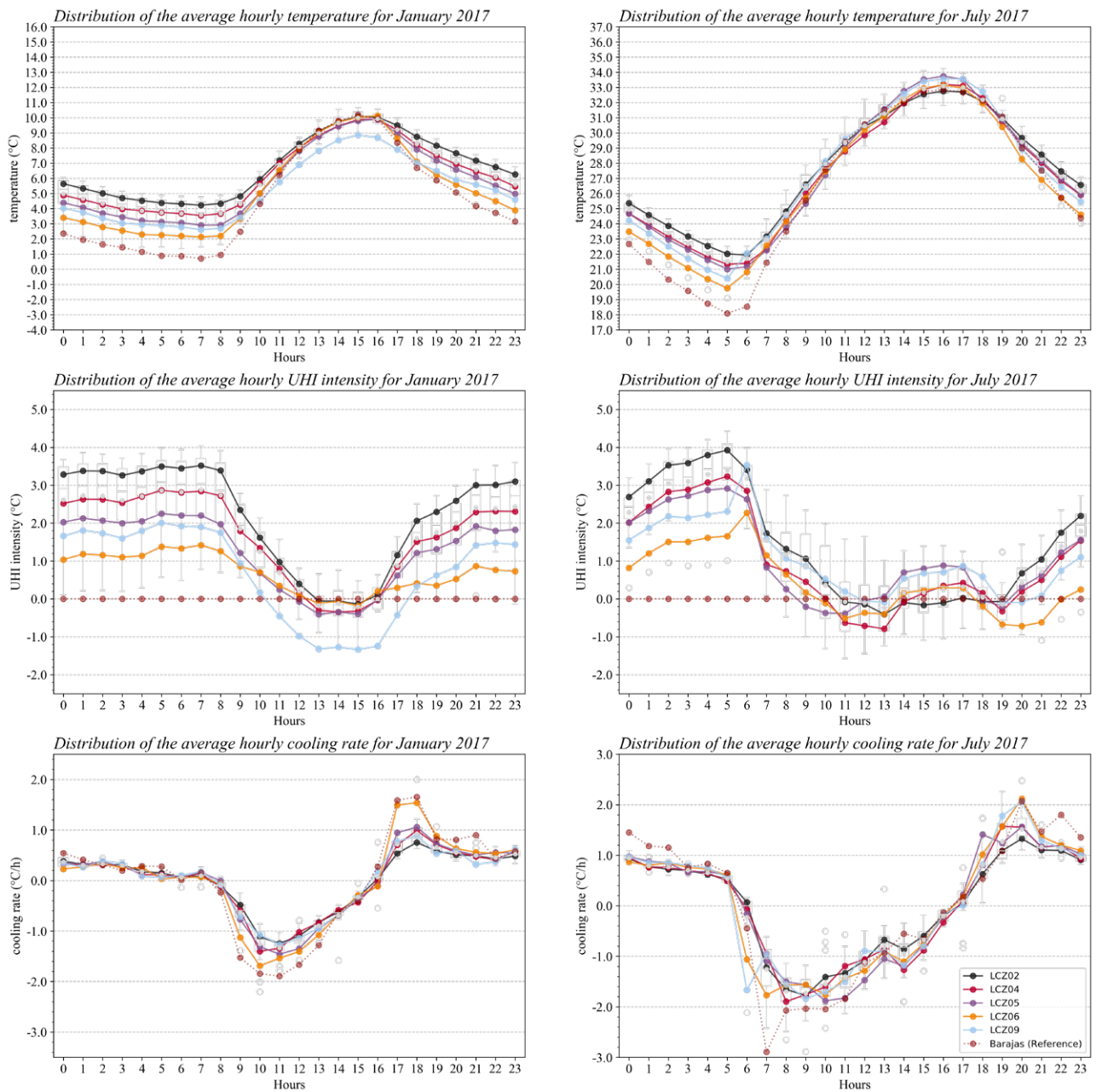


Figura 12.7 Valores medios horarios de la temperatura (arriba), intensidad de la isla de calor (centro) y ratio de enfriamiento (abajo) para dos meses del año: enero de 2017 (izquierda) y julio de 2017 (derecha). De fondo, en gris, se muestran los rangos para todos los puntos de medición, mientras que en color se resaltan las medias para cada LCZ.

Figure 12.7 Hourly mean values of temperature (top), urban heat island intensity (centre) and cooling ratio (bottom) for two months of the year: January 2017 (left) and July 2017 (right). In the background, in grey, the ranges for all measurement points are shown, while in colour the means for each LCZ are highlighted.

land begins to fade into a small cool island. In the months closest to the summer solstice, however, an increase in the intensity of the urban heat island is observed between 14:00 and 18:00 UTC. The discussion in Núñez Peiró et al. (2021) points to several possible reasons, identifying other studies where a similar behaviour can be observed, and finally pointing to a possible overheating of the sensors due to the higher solar radiation.

This seems to occur even though a mechanically ventilated shielding solution is in place for each of the sensors (see **section 10.4**), and despite the fact that the locations were chosen with the intention of minimising the incidence of direct solar radiation. Although this seems to be of little relevance due to its low intensity (<0.5 °C on average in the worst month), it points to the need for better attention to equipment protection as well as better filtering techniques during the quality control of the data.

Finally, the cooling ratios presented in **Figure 12.7** are also of interest for this analysis. The turning points are at dusk and dawn, when the cooling ratio at all points changes sign. It is observed that the cooling ratio is most intense for all points just at dusk (17:00 and 20:00 UTC in January and July, respectively), tending to stabilise after a few hours. Specifically, and in the densest fabrics (LCZ 2, LCZ 4 and LCZ 5), between 40 and 55% of the total urban heat island is formed during the first 3 hours of the night.

12.4. Intra-urban temperature differences between LCZs

The results of the statistical analysis confirm that the observed differences between LCZs are statistically significant, although there are some nuances. First, the ability of LCZs to explain intra-urban differences in temperature does not appear to be constant across hours and days. According to **Table 12.2**, the moments in which the differences between LCZs are most significant concentrate on the nights of days with ideal conditions, just before sunrise. In contrast, it is during daylight hours that the differences are smallest.

It does not seem concerning that the analysis shows few significant differences between pairs of LCZs when looking at the total number of days, since days of ideal and non-ideal conditions are intermixed between them. However, it is relevant to note that the diurnal variability between different zones is not correctly captured, even though differences of several degrees Celsius can occur. The correlation analysis shows that while the LCZs correlate strongly (≈ 0.80) with the $UHII_{max}$, recorded during the night, the correlation with the diurnal $UHII_{min}$ is very weak (≈ 0.25).

una pequeña isla de frescor. En los meses más próximos al solsticio de verano se observa, sin embargo, un incremento de la intensidad de la isla de calor localizado entre las 14:00 y las 18:00 UTC. En la discusión recogida en Núñez Peiró et al. (2021) se apunta a varias posibles razones, identificándose otros estudios donde se puede observar un comportamiento parecido, para finalmente apuntar hacia un posible sobrecalentamiento de los sensores debido a la mayor radiación solar.

Esto parece producirse a pesar de contar con una solución que protege y ventila mecánicamente cada uno de los sensores (véase **apartado 10.4**), y a pesar de que las ubicaciones se escogieron con la intención de minimizar la incidencia de la radiación solar directa. Aunque parece poco relevante debido a su baja intensidad (<0.5 °C de media en el mes más desfavorable), apunta a que se debe mejorar la atención sobre la protección de los equipos y sobre las técnicas de filtrado durante el control de calidad de los datos.

Finalmente, las ratios de enfriamiento presentadas en la **Figura 12.7** también resultan de interés para este análisis. Los puntos de inflexión se dan al anochecer y al amanecer, cuando la ratio de enfriamiento en todos los puntos cambia de signo. Se observa que la ratio de enfriamiento es más intensa para todos los puntos justo al anochecer (17:00 y 20:00 UTC en enero y julio, respectivamente), tendiendo a estabilizarse a las pocas horas. Concretamente, y en los tejidos más densos (LCZ 2, LCZ 4 y LCZ 5), durante las 3 primeras horas nocturnas se forma entre un 40 y un 55% del total de la isla de calor.

12.4. Diferencias intraurbanas de temperatura entre LCZs

Los resultados del análisis estadístico confirman que las diferencias observadas entre LCZs son estadísticamente significativas, aunque se observan ciertos matices. En primer lugar, la capacidad de las LCZs para explicar las diferencias intraurbanas de temperatura no parece ser constante a lo largo de las horas ni de los días. De acuerdo con la **Tabla 12.2**, los momentos en los que las diferencias entre LCZs son más significativas se concentran en las noches de los días con condiciones ideales, justo antes del amanecer. Por el contrario, es durante las horas diurnas cuando las diferencias son menores.

No parece preocupante que el análisis arroje escasas diferencias significativas entre pares de LCZs cuando se observa el total de los días, ya que entre ellos se entremezclan días de condiciones ideales y no ideales. Sin embargo, sí que resulta relevante el hecho de que no se capture correctamente la variabilidad diurna entre distintas zonas, cuando también llegan a aparecer diferencias de varios grados centígrados. En esta línea se sitúa el análisis de correlaciones: mientras que las LCZs correlacionan fuertemente (≈ 0.80) con la $UHII_{max}$, registrada durante la noche, la correlación con la $UHII_{min}$, diurna, es muy débil (≈ 0.25).

Tabla 12.2 Identificación de horas en las que las diferencias entre pares de LCZs son más significativas. Se muestran los resultados para enero y julio de 2017, analizándose para el conjunto de los días y para la selección de días ideales. La prueba post-hoc de Games Howell evalúa la significancia estadística.
 Table 12.2 Identification of hours where differences between pairs of LCZs are most significant. Results are shown for January and July 2017, analysed for all days and for the selection of ideal days. The Games Howell post-hoc test assesses statistical significance.

LCZ pairs	Significant difference between pairs																								
	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h	
EVERY DAY																									
January 2017 (n = 31 days)																									
2-4																									
2-5	■				■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■	■
2-6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■	■
2-9	■	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4-5																									
4-6	■				■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■	■
4-9											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
5-6																					■	■			
5-9													■	■	■	■	■	■	■	■					
6-9													■	■	■	■	■	■	■						
July 2017 (n = 31 days)																									
2-4								■	■	■		■	■					■							
2-5			■			■		■	■	■	■	■			■	■	■	■							
2-6	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■				■	■				■	■	■	■	■
2-9	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■			■	■	■	■
4-5										■			■		■	■	■								
4-6	■	■	■	■	■	■																■	■	■	■
4-9											■	■	■		■	■		■	■						
5-6	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■			■	■	■	■
5-9								■	■	■	■	■								■					
6-9											■	■	■		■	■	■	■	■	■		■			■
IDEAL DAYS																									
January 2017 (n = 12 - 13 days)																									
2-4	■	■	■	■	■	■																			
2-5	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■
2-6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										■	■	■	■	■
2-9	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
4-5																									
4-6	■	■	■	■	■	■	■	■	■						■		■				■	■	■	■	■
4-9											■	■	■	■	■	■	■	■	■						
5-6	■	■	■	■	■										■						■				■
5-9															■	■	■	■	■						
6-9	■	■	■	■	■									■	■	■	■	■	■						
July 2017 (n = 10 days)																									
2-4	■				■	■	■					■	■												
2-5	■		■		■	■	■	■	■	■	■			■	■	■	■	■	■						
2-6	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■						■					■	■	■	■	■
2-9	■		■	■	■	■	■	■	■	■					■	■	■	■	■	■					■
4-5																									
4-6	■	■	■	■	■	■	■							■											■
4-9											■	■	■	■	■	■				■					
5-6	■	■	■	■	■	■									■	■		■	■				■		■
5-9								■	■	■	■	■	■								■				
6-9		■			■	■	■							■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tabla 12.3 Correlación entre indicadores LCZ y la temperatura del aire, por horas y para dos meses concretos. Se incluye la distancia al centro de la ciudad como indicador adicional. Se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson (r_p).

Table 12.3 Correlation between LCZ indicators and air temperature, on an hourly basis and for two specific months. The distance to the city centre is included as an additional indicator. Pearson's correlation coefficient (r_p) is used.

LCZ indicator	Correlation coefficient (r_p)																							
	0 h	1 h	2 h	3 h	4 h	5 h	6 h	7 h	8 h	9 h	10 h	11 h	12 h	13 h	14 h	15 h	16 h	17 h	18 h	19 h	20 h	21 h	22 h	23 h
January 2017																								
SVFS	-0.43	-0.42	-0.42	-0.40	-0.39	-0.37	-0.41	-0.45	-0.46	-0.48	-0.58	-0.52	-0.42	-0.35	-0.49	-0.49	-0.39	-0.61	-0.63	-0.58	-0.56	-0.52	-0.49	-0.49
SVFW	-0.77	-0.75	-0.76	-0.75	-0.75	-0.74	-0.76	-0.77	-0.78	-0.76	-0.70	-0.58	-0.46	-0.24	-0.11	-0.18	-0.29	-0.67	-0.79	-0.80	-0.80	-0.79	-0.79	-0.79
AR	0.77	0.75	0.75	0.74	0.73	0.73	0.74	0.77	0.78	0.79	0.73	0.64	0.60	0.43	0.32	0.38	0.54	0.81	0.86	0.85	0.84	0.82	0.81	0.81
BSF	0.74	0.72	0.72	0.73	0.73	0.72	0.72	0.75	0.76	0.76	0.69	0.60	0.56	0.42	0.25	0.27	0.35	0.67	0.75	0.77	0.76	0.74	0.74	0.76
ISF	-0.02	-0.02	-0.03	-0.04	-0.05	-0.03	-0.02	-0.08	-0.11	-0.17	-0.25	-0.31	-0.45	-0.50	-0.44	-0.38	-0.29	-0.18	-0.05	-0.02	-0.01	0.03	0.00	-0.02
PSF	-0.85	-0.83	-0.82	-0.82	-0.83	-0.82	-0.82	-0.84	-0.84	-0.82	-0.70	-0.57	-0.47	-0.29	-0.12	-0.17	-0.29	-0.71	-0.85	-0.88	-0.88	-0.87	-0.86	-0.87
HRE	0.27	0.27	0.26	0.26	0.28	0.29	0.29	0.28	0.28	0.25	0.25	0.16	-0.06	-0.18	-0.29	-0.20	-0.01	0.15	0.25	0.27	0.28	0.30	0.31	0.28
DIST	-0.85	-0.84	-0.84	-0.82	-0.82	-0.82	-0.84	-0.85	-0.85	-0.84	-0.66	-0.51	-0.32	-0.12	-0.06	-0.09	-0.13	-0.59	-0.79	-0.83	-0.86	-0.88	-0.88	-0.87
July 2017																								
SVFS	-0.63	-0.65	-0.67	-0.67	-0.69	-0.69	-0.51	-0.28	-0.45	-0.58	-0.54	-0.46	-0.40	-0.10	0.17	0.20	0.24	0.30	-0.02	-0.34	-0.58	-0.61	-0.63	-0.64
SVFW	-0.75	-0.77	-0.80	-0.80	-0.81	-0.81	-0.53	-0.09	-0.16	-0.24	-0.19	-0.05	0.02	0.25	0.36	0.33	0.36	0.38	0.11	-0.26	-0.60	-0.66	-0.68	-0.73
AR	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.82	0.52	0.09	0.15	0.29	0.26	0.21	0.15	-0.07	-0.22	-0.25	-0.26	-0.43	-0.31	0.25	0.65	0.70	0.72	0.74
BSF	0.75	0.78	0.77	0.76	0.76	0.77	0.64	0.38	0.26	0.32	0.13	0.12	0.12	-0.05	-0.25	-0.37	-0.41	-0.48	-0.19	0.29	0.60	0.64	0.68	0.71
ISF	-0.05	-0.07	-0.07	-0.04	-0.03	-0.06	-0.40	-0.64	-0.50	-0.46	-0.24	-0.25	-0.22	-0.16	0.09	0.18	0.28	0.24	0.01	-0.06	0.00	0.03	0.00	0.01
PSF	-0.85	-0.87	-0.87	-0.87	-0.86	-0.86	-0.58	-0.19	-0.11	-0.19	-0.06	-0.04	-0.05	0.12	0.25	0.36	0.36	0.47	0.21	-0.31	-0.69	-0.75	-0.79	-0.83
HRE	0.09	0.11	0.14	0.15	0.15	0.17	-0.03	-0.36	-0.19	-0.06	-0.02	-0.15	-0.25	-0.41	-0.33	-0.25	-0.17	-0.28	-0.20	-0.11	0.03	0.08	0.08	0.11
DIST	-0.78	-0.80	-0.82	-0.82	-0.82	-0.82	-0.67	-0.33	-0.34	-0.39	-0.22	-0.11	-0.01	0.19	0.43	0.51	0.50	0.63	0.32	-0.21	-0.59	-0.67	-0.71	-0.75

Así pues, las LCZs parecen estar diseñadas para capturar las diferencias de temperatura urbanas durante la noche, cuando la isla de calor tiene su mayor desarrollo. Su eficacia parece quedar en entredicho cuando se analiza su comportamiento durante las horas diurnas. A este respecto, en Núñez-Peiró et al. (2021b) se señala lo siguiente:

Las LCZs no logran discernir en gran medida la variabilidad de la temperatura diurna. Los indicadores de las LCZs también mostraron correlaciones mucho mejores con las diferencias de temperatura durante la noche que durante el día, y ninguno proporcionó una buena estimación durante las horas centrales del día. No cabe duda de que las diferencias de temperatura urbanas son considerablemente mayores durante la noche que durante el día, pero estas últimas siguen siendo significativas (>2 °C). También sería interesante considerar si las temperaturas diurnas pueden enmarcarse en un sistema de clasificación como el de las LCZs, o si dependen en gran medida de las características microclimáticas de las zonas urbanas. En cualquier caso, e independientemente de las mayores incertidumbres introducidas por la radiación solar y la variada geometría urbana, es preciso seguir investigando para comprender mejor los factores determinantes de las diferencias térmicas diurnas.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, págs. 17 – 18.

Texto traducido de la versión original en inglés)

Este punto parece confirmarse a través del análisis de la correlación entre indicadores, a nivel horario, de las LCZs. En la **Tabla 12.3** se observa que, mientras la mayoría presenta correlaciones elevadas durante las horas nocturnas, ninguno de los indicadores estudiados correlaciona correctamente con las temperaturas diurnas. Quizás alguno de los indicadores LCZ no incluidos en este estudio, como la admitancia de las superficies, pueda contribuir a explicar el comportamiento diurno. Sin embargo, tampoco debería descartarse la inclusión de algún otro indicador que permita mejorar la precisión de las LCZs en relación con la variabilidad diurna de las temperaturas urbanas, así como la posibilidad de que la diferencias de temperatura diurnas observadas entre tejidos urbanos se deban a cuestiones microclimáticas, y cuyo origen podría estar en una amplia combinación de factores independientes al tipo de tejido urbano analizado en la escala local.

12.5. Implicaciones para la modelización de la isla de calor y la generación de archivos climáticos

No encontrar una tendencia estacional en la máxima intensidad diaria de la isla de calor ($UHII_{max}$) resulta relevante. No sólo porque contradice lo apuntado por estudios anteriores en Madrid (Fernández García et al., 2016; Núñez Peiró et al., 2017; Yagüe et al., 1991), donde sí que se observó un comportamiento estacional. También por las repercusiones que puede tener para la modelización.

En este sentido, los resultados obtenidos de esta campaña de monitorización apuntan a que la $UHII_{max}$ puede producirse en cualquier momento del año, dependiendo de la acumulación de determinados fenómenos atmosféricos. Esto se podría aprovechar, y así

Thus, LCZs seem to be designed to capture urban temperature differences during the night, when the urban heat island reaches its peak. Their effectiveness seems to be questioned during daytime hours. In this regard, Núñez-Peiró et al. (2021b) note the following:

LCZs fail to discern the daytime temperature variability to a large extent. LCZ indicators also exhibited much better correlations with temperature differences during the nighttime than during the daytime, with none providing a good estimate during the central hours of the day. There is no doubt that urban temperature differences are considerably wider during the nighttime than during the daytime, but the latter are still significant (>2 °C). It would also be interesting to consider whether diurnal temperatures could be framed within a classification system like the LCZs, or if they are heavily dependent on the micro-climatic characteristics of urban areas. In either case, and regardless of the higher uncertainties introduced by solar radiation and the varying urban geometry, further research is warranted to better comprehend the determining factors behind the daytime thermal differences.

(Núñez-Peiró et al., 2021b, p. 17 – 18)

This point seems to be confirmed through the analysis of the correlation between indicators, at the hourly level, of the LCZs. **Table 12.3** shows that, while most of them are highly correlated during the night hours, none of the indicators studied correlates well with daytime temperatures. Perhaps some of the LCZ indicators not included in this study, such as surface admittance, may help to explain the diurnal behaviour. However, the inclusion of some other indicator that could improve the accuracy of the LCZs in relation to the diurnal urban temperature variability should not be ruled out, as well as the possibility that the diurnal temperature differences observed between urban fabrics may be due to microclimatic factors, and whose origin could be due to a wide combination of forces independent from the type of urban fabric analysed at the local scale.

12.5. Consequences for urban heat island modelling and the generation of weather files

Not finding a seasonal trend in the maximum urban heat island daily intensity ($UHII_{max}$) is relevant. Not only because it contrasts with previous studies in Madrid (Fernández García et al., 2016; Núñez Peiró et al., 2017; Yagüe et al., 1991), where a seasonal behaviour was observed. Also for the implications it may have for modelling.

In this sense, the results obtained from this monitoring campaign suggest that the $UHII_{max}$ can occur at any time of the year, depending on the accumulation of certain atmospheric phenomena. This could be used, and it is used in the next stage of this research, to reduce the amount of data needed during modelling. The underlying idea

is that, if the urban heat island does not show a seasonal behaviour, there would be no need for a whole year's data to model it; a sufficiently large and varied data sample in terms of meteorological conditions would suffice. This idea is investigated in the next chapter on modelling.

Another relevant element that does have implications for urban heat island modelling is the time of day. This is crucial for adjusting the daily cycle of the urban heat island, which shows a very similar trend in all urban areas. It will be necessary to incorporate it, together with the meteorological variables, in the modelling of the urban heat island. The time of year is also relevant for the daily dynamics of the urban heat island, since although there is no annual seasonality in its intensity, the maximum and minimum values occur around sunrise and sunset, respectively. However, these dynamics are relatively simple and can be effectively captured by global solar radiation.

Finally, the results of this analysis suggest that LCZs are able to capture almost all of the nocturnal dynamics of urban temperatures. However, diurnal temperature differences, although relevant, are not clearly identified with LCZs. It is also not clear that intra-LCZ differences are negligible, especially during the day. The decision has therefore been taken not to link the modelling development to the LCZs, but to the measurement points themselves. This will increase its complexity, as specific models will be developed for each of the 20 measurement points (instead of for each of the 5 LCZs worked on in Madrid). However, it will provide greater flexibility in generating the artificial time series that will ultimately be used to generate the urban weather files. All of this is addressed in the next two phases of this PhD thesis, which concludes this research: the modelling of the urban heat island (**chapter 13**) and the creation of urban weather files (**chapter 14**).

se hace en el siguiente etapa de esta investigación, para reducir la cantidad de datos necesarios durante la modelización. La idea que subyace es que, si la isla de calor no muestra un comportamiento estacional, no existiría la necesidad de contar con datos de todo un año para modelarla; bastaría con contar con una muestra de datos lo suficientemente grande y variada en cuanto a condiciones meteorológicas se refiere. Esta idea se investiga en el siguiente capítulo, dedicado a la modelización.

Otro elemento relevante que sí tiene implicaciones para la modelización de la isla de calor es la hora del día. Ésta resulta determinante para ajustar el ciclo diario de la isla de calor, que muestra una tendencia muy parecida en todas las zonas urbanas. Será necesario incorporarla, junto a las variables meteorológicas, en la modelización de la isla de calor. El momento del año también es relevante para la dinámica diaria de la isla de calor, ya que aunque no exista una estacionalidad anual en su intensidad, los valores máximos y mínimos se producen en los alrededores del amanecer y el atardecer, respectivamente. Sin embargo, esta dinámica es sencilla y puede ser capturada de forma efectiva por la radiación solar global.

Por último, los resultados de este análisis apuntan a que las LCZs son capaces de capturar prácticamente la totalidad de la dinámica nocturna de las temperaturas urbanas. Sin embargo, las diferencias de temperatura diurna, aun siendo relevantes, no se identifican claramente con las LCZs. Tampoco está claro que las diferencias intra-LCZ sean despreciables, especialmente durante el día. Se ha tomado la decisión, por tanto, de no vincular el desarrollo de la modelización a las LCZs, sino a los propios puntos de medición. Esto incrementará su complejidad, ya que se desarrollarán modelos específicos para cada uno de los 20 puntos de medición (en lugar de para cada una de las 5 LCZs sobre las que se ha trabajado en Madrid). Sin embargo, proporcionará mayor flexibilidad a la hora de generar las series temporales artificiales con las que, en última instancia, se generarán los archivos climáticos urbanos. Todo esto se aborda en las siguientes dos fases de esta tesis doctoral, y con las que se concluye esta investigación: la modelización de la isla de calor (**capítulo 13**) y la creación de archivos climáticos urbanos (**capítulo 14**).

13. Modelling the urban heat island using a data-driven approach

So far, the three previous stages have focused on describing the collection of quality data, its correct contextualisation in the urban environment, as well as exploring in detail the intra-urban differences produced by the urban heat island. The results obtained from these stages contribute to a better understanding of Madrid's urban climate, but are insufficient to integrate this phenomenon into building energy simulation. As already mentioned in the introduction and in the methodological description, doing so requires a larger database than the one obtained so far through the monitoring campaign, which is concentrated in a relatively short period of time and is most likely influenced by the concentration of singular meteorological phenomena that are not very representative of the typical conditions of the city.

Obtaining ten, fifteen or twenty years of data through a monitoring campaign in urban space is unrealistic for the objectives of this type of research, which requires a minimum diligence, and therefore waiting a decade to obtain data is not feasible. The usual approach, in the absence of data, is to obtain them through a model, using a technique known as *morphing* (see sections 1.4 and 1.5 of the introduction). This is the approach proposed in this stage of the research: to develop a series of models capable of extending the time series of data obtained during the monitoring campaign. Below, 5 phases are articulated that summarise and analyse the proposed solution.

13.1 Approach to urban temperature modelling

The models proposed at this stage of the research have two starting points. First, they arise from a *data-driven approach*. That is, modelling is developed on the basis of pre-existing statistical correlations in the available data (also called *empirical modelling*), rather than through the formulation of the physical phenomena that govern and determine urban hygrothermal conditions (*numerical modelling*, see section 1.5 of the introduction). Secondly, these models focus on generating time series data from pre-existing time series data obtained from one or more reference points (*morphing*, Belcher et al., 2005; Cox et al., 2015; Evola et al., 2018; Jentsch et al., 2013, 2008; Palme and Salvati, 2021b). It is important to clarify, therefore, that these models have neither the purpose nor the capacity to generate *future* temporal predictions from previous data. In Núñez Peiró et al. (2021a) it is explained as follows:

13. Modelización de la isla de calor mediante un enfoque basado en datos

Hasta ahora, las tres etapas anteriores se han enfocado en describir la obtención de datos de calidad, su correcta contextualización en el entorno urbano, así como en explorar con detalle horario las diferencias intraurbanas producidas por la isla de calor. Los resultados obtenidos a partir de estas etapas contribuyen a un mejor entendimiento del clima urbano de la ciudad de Madrid y, sin embargo, son insuficientes para poder integrar este fenómeno en la simulación energética de edificios. Como ya se ha comentado en la introducción y en la descripción metodológica, hacer esto requiere de una base de datos más amplia que la obtenida hasta ahora mediante la campaña de monitorización, la cual se concentra en un periodo temporal relativamente corto y se encuentra, con toda probabilidad, influenciada por la concentración de fenómenos meteorológicos singulares y poco representativos de las condiciones típicas de la ciudad.

La obtención de diez, quince o veinte años de datos a través de una campaña de monitorización en el espacio urbano resulta poco realista para los objetivos de este tipo de trabajos de investigación, al cual se le exige una mínima diligencia, y por lo que esperar una década para la obtención de datos no resulta viable. Lo habitual, en caso de no existir datos, es obtenerlos a través de un modelo, empleando una técnica conocida como *morphing* (véase los apartados 1.4 y 1.5 de la introducción). Y ese es el enfoque que se plantea en esta etapa de la investigación: desarrollar una serie de modelos capaces de ampliar las series temporales de datos obtenidas durante la campaña de monitorización. A continuación, se articulan 5 fases que resumen y analizan la solución planteada.

13.1. Aproximación a la modelización de temperaturas urbanas

Los modelos planteados en esta etapa de la investigación tienen dos puntos de partida. En primer lugar, surgen de un enfoque basado en datos (*data-driven approach*). Es decir, la modelización se desarrolla a partir de las correlaciones estadísticas preexistentes en los datos disponibles (también llamada *modelización empírica*), y no a través de la formulación de los fenómenos físicos que gobiernan y determinan las condiciones higrotérmicas urbanas (*modelización numérica*, véase apartado 1.5 de la introducción). En segundo lugar, estos modelos se centran en generar series temporales de datos a partir de otras preexistentes, obtenidas de uno o varios puntos de referencia (*morphing*, Belcher et al., 2005; Cox et al., 2015; Evola et al., 2018; Jentsch et al., 2013, 2008; Palme and Salvati, 2021b). Es importante aclarar, por tanto, que estos modelos no tienen la finalidad ni la capacidad de generar predicciones temporales *a futuro* a partir de datos previos. En Núñez Peiró et al. (2021a) se explica de la siguiente manera:

(...) el objetivo es obtener una versión adaptada de una serie temporal de referencia ya existente, siendo esta nueva serie temporal representativa de una determinada zona urbana y cubriendo exactamente el mismo periodo que los datos utilizados como referencia. Esto simplifica el proceso al eliminar la dependencia temporal de las salidas del modelo, lo que justifica trabajar con redes neuronales más sencillas, como las FNN. (...) Aunque los modelos empíricos son específicos de un lugar (las predicciones se realizan siempre para una ubicación urbana concreta), pueden utilizarse para ampliar la cobertura temporal de las campañas de monitorización urbanas, lo que aumenta potencialmente su utilidad entre otras disciplinas. Y a pesar de que los modelos basados en FNNs no serían adecuados para realizar proyecciones futuras, pueden ser ciertamente útiles para adaptar los registros históricos obtenidos fuera de la ciudad a la realidad de las zonas urbanas.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, pág. 4.

Texto traducido de la versión original en inglés)

Los dos puntos de partida arriba enunciados han permitido simplificar el proceso de la modelización, obteniendo modelos bastante precisos a partir de estructuras relativamente sencillas. En este sentido, se ha optado por trabajar con redes neuronales prealimentadas (más comúnmente conocidas por su nombre en inglés *Feed-forward Neural Networks*, o *FNN*), las cuales forman parte de las estructuras de inteligencia artificial menos complejas.

Se han identificado y analizado una gran cantidad de estudios previos que han hecho uso de este tipo de redes neuronales para la modelización de las temperaturas urbanas (véase la **Tabla 13.1**). Y, aunque todos ellos han servido de base para el planteamiento de los modelos desarrollados en este trabajo de investigación, no parece consensuada la cantidad de datos necesarios para desarrollar este tipo de modelos. Además, se ha advertido que, mientras que la elección de los parámetros de entrada en el modelo tiende a ser consistente entre todos los enfoques (parámetros fundamentalmente relacionados con la formación de la isla de calor), el parámetro de salida varía entre ellos, en unos casos utilizándose la temperatura del aire y en otros la intensidad de la isla de calor.

Esto ha llevado a investigar el potencial para reducir los datos de entrada, así como para determinar el mejor parámetro de salida, en este tipo de modelos. Todo ello se recoge en el tercer artículo de investigación que da forma a esta tesis doctoral (Núñez-Peiró et al., 2021a). En él se plantea evaluar el rendimiento de modelos *FNN* bajo diferentes escenarios de disponibilidad de datos y utilizando dos enfoques alternativos para la obtención de temperaturas: uno, dirigiendo la modelización directamente hacia las temperaturas urbanas (*enfoque TEMP*); el segundo, dirigiéndola hacia la intensidad de la isla de calor (*enfoque UHII*). La **Figura 13.1** representa de forma esquemática la aproximación de ambos enfoques, describiéndose de la siguiente forma en Núñez-Peiró et al. (2021a):

(...) the aim of most of these studies is not to make time predictions or forecasts, but to model an urban time series from a preexisting one. In other words, the purpose is to obtain an adapted version of a reference time series that already exists, being this new time series representative of a certain urban area and covering the exact same period as the data used as a reference. This simplifies the process by eliminating the time dependence of the outputs, and which justifies working with simpler neural networks, such as FNNs. (...) Although empirical models are site-specific (predictions are always made for a particular urban location), they can be used to extend the temporal coverage of urban monitoring campaigns, thus potentially increasing their utility among other disciplines. And despite FNN-based models are not suitable for future projections, they are certainly useful to adapt historical records obtained outside the city to the reality of urban areas.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, p. 4)

The two starting points mentioned above have made it possible to simplify the modelling process, obtaining fairly accurate models from relatively simple structures. In this sense, it was decided to work with *Feed-forward Neural Networks* (FNN), which are among the least complex artificial intelligence structures.

A large number of previous studies that have made use of this type of neural networks for modelling urban temperatures were identified and analysed (see **Table 13.1**). Although all of them have served as a basis for the models developed in this research work, it does not seem that there is a consensus on the amount of data necessary to develop this type of models. Furthermore, it has been noted that, while the choice of input parameters in the model tends to be consistent among all the approaches (parameters fundamentally related to the formation of the urban heat island), the output parameter varies among them, in some cases using air temperature and in others the urban heat island intensity.

This has led to investigate the potential to reduce the input data, as well as to determine the best output parameter, in this type of models. All of this is reflected in the third research article that shapes this PhD thesis (Núñez-Peiró et al., 2021a). In it, the performance of FNN models is evaluated under different scenarios of data availability and using two alternative approaches for obtaining temperatures: one, directing the modelling directly towards urban temperatures (*TEMP approach*); the second, directing it towards the intensity of the urban heat island (*UHII approach*). Figure 13.1 schematically represents the approximation of both approaches, described as follows in Núñez-Peiró et al. (2021a):

Tabla 13.1 Estudios previos que han empleado redes neuronales artificiales (ANN) para la modelización de la temperatura del aire exterior.

Table 13.1 Previous studies using artificial neural networks (ANNs) for outdoor air temperature modelling.

Reference	City, Country ^a	Training and Testing Dataset			ANN Target ^b	ANN Type
		Initial Date	Final Date	Duration		
Mihalakakou et al. (1998)	Athens, GR	1986	1995	10 years	TEMP	FNN
Santamouris et al. (1999)	Athens, GR	Jun 1996 Jun 1997	Sep 1996 Sep 1997	8 months	TEMP	FNN
Kim and Baik (2002)	Seoul, KR	1973	1996	24 years	UHII	FNN
Mihalakakou et al. (2004, 2002)	Athens, GR	Jan 1996 Jan 1997	Dec 1997 Dec 1998	2 years	UHII	FNN
Jang et al. (2004)	Québec ¹ , CA	Jun 2000	Sep 2000	4 months	TEMP	FNN
Kolokotroni et al. (2010, 2009, 2007)	London, GB	Jul 1999 2007	Sep 2000 2007	15 months	TEMP	FNN, CNN, ENN
Zhao (2007)	Qinling ¹ , CN	-	-	-	TEMP	FNN
Beccali et al. (2008)	Palermo, IT	-	-	-	TEMP	NNARX, NNARMAX
Cellura et al. (2011)	Athens, GR	Apr 2009	May 2010	13 months	TEMP	FNN, CNN, ENN
Gobakis et al. (2011)	Athens, GR	Apr 2009	May 2010	13 months	TEMP	FNN, CNN, ENN
Shao et al. (2011)	Hangzhou, CN	Jan 1995	Dec 1996	2 years	TEMP	FNN
Heijden et al. (2013)	Rotterdam, NL	Apr 2011	Oct 2012	19 months	UHII	FNN
Lee et al. (2016)	Seoul, KR	Jan 2012	Dec 2012	1 year	UHII	FNN
Papantoniou and Kolokotsa (2016)	Ancona, IT Chania, GR Granada, ES Mollet, ES	Jan ³	Dec ³	1 year	TEMP	FNN, CNN, ENN
Erdemir and Ayata (2017)	Istanbul ² , TR	May ³	Sep ³	5 months	TEMP	FNN
Schuch et al. (2017)	Abu Dhabi, AE	Mar 2016	Dec 2016	10 months	TEMP	FNN
Demirezen et al. (2019, 2020)	Ontario, CA	Feb 2018	Nov 2018	9 months	TEMP	FNN
Han et al. (2021)	Cambridge, USA	Jan, 2019	Jun, 2019	6 months	TEMP	FNN, RNN

^a ISO Country codes (ISO, 2021). ^b Output of the ANN model, as declared or shown by the authors. ¹ Extends further from the limits of the city, covering the surrounding regional areas. ² Includes other cities of the same country. ³ Year not specified.

(Figure 13.1) outlines the two different approaches, based on two different outputs, that were adopted in this study to model urban temperatures. The first one consisted of directly targeting the air temperature at the urban site, validating its outputs with the measurements previously recorded at that location. This approach is aligned with the majority of similar studies found in the literature, and it is referred in this study as the temperature approach (TEMP approach). The second option aims at modelling the urban air temperature indirectly. In this case, the model targets the UHI intensity instead, computed as the temperature difference between the urban site (Embajadores) and the reference location (Barajas Airport, $\Delta T_{LCZ2, LCZD}$). The urban temperature is then derived indirectly by adding the airport temperature to the output of the model. This will be referred to as the UHII approach from this point onwards.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, p. 7)

La (Figura 13.1) describe los dos enfoques adoptados en este estudio para modelar las temperaturas urbanas. El primero consistió en obtener directamente la temperatura del aire en el emplazamiento urbano, validando sus resultados con las mediciones registradas previamente en ese lugar. Este enfoque coincide con el adoptado en la mayoría de los estudios análogos encontrados en la literatura, y en este estudio se denomina enfoque de la temperatura (enfoque TEMP). La segunda opción tiene como objetivo modelizar la temperatura del aire urbano de forma indirecta. En este caso, el modelo se centra en la intensidad de la isla de calor, calculada como la diferencia de temperatura entre el emplazamiento urbano (Embajadores) y la ubicación de referencia (Aeropuerto de Barajas, $\Delta T_{LCZ2, LCZD}$). La temperatura urbana se obtiene indirectamente añadiendo la temperatura del aeropuerto a la salida del modelo. En adelante nos referiremos a este procedimiento como el enfoque de intensidad de la isla de calor (enfoque UHII).

(Núñez-Peiró et al., 2021a, pág. 7.
Texto traducido de la versión original en inglés)

13.2. Búsqueda de un modelo óptimo basado en FNN

La siguiente fase de la investigación comienza con la búsqueda de una configuración y estructura de red neuronal común y óptima para los dos enfoques planteados en el apartado anterior. Se ha seleccionado como caso de estudio el punto de Embajadores, dado que este presenta las mayores diferencias de temperatura con respecto al observatorio de referencia, el aeropuerto de Madrid-Barajas (véase **apartado 12.2**). Esto garantiza que la modelización se lleva a cabo en las condiciones más desfavorables: cuando las diferencias entre el punto de referencia y el punto urbano son más acentuadas. La **Figura 13.2** muestra la ubicación de los puntos de los cuales se extraen los datos para la modelización.

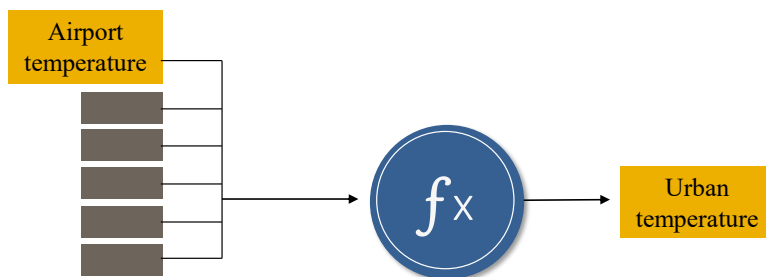
Se ha seguido un proceso iterativo para la identificación de una configuración óptima para los dos enfoques, ensayándose un total de 2739 configuraciones distintas para cada uno de ellos, y dando lugar a un total de 5478 modelos entrenados. De entre todos estos modelos se seleccionó la configuración que, con la menor estructura, lograra minimizar el error cuadrático medio para ambos enfoques. La **Tabla 13.2** resume los parámetros iterados y la selección final, mientras que la **Figura 13.3** muestra un extracto de los resultados de este proceso iterativo. Todos los detalles relativos a los conjuntos de datos empleados, su longitud y técnicas de preprocesamiento, así como los parámetros ensayados, se pueden consultar en los apartados 2.1 – 2.3 de Núñez-Peiró et al. (2021a).

13.2. Finding an optimal model based on FNN

The next phase of the research begins with the identification of a common and optimal neural network configuration and structure for the two approaches proposed in the previous section. The Embajadores point has been selected as a case study, since it has the largest temperature differences with respect to the reference observatory, Madrid-Barajas airport (see **section 12.2**). This ensures that the modelling is carried out under the most unfavourable conditions: when the differences between the reference point and the urban point are most pronounced. **Figure 13.2** shows the location of the points from which data are extracted for modelling.

An iterative process was followed to identify an optimal configuration for the two approaches, testing a total of 2739 different configurations for each approach, and resulting in a total of 5478 trained models. From among all these models, it was selected the configuration that, with the smallest structure, managed to minimise the mean squared error for both approaches. **Table 13.2** summarises the iterated parameters and the final selection, while **Figure 13.3** shows an example of the results of this iterative process. All details regarding the datasets, their length and pre-processing techniques, as well as the tested parameters, can be found in sections 2.1 – 2.3 of Núñez-Peiró et al. (2021a).

Option A — The *TEMP* approach



Option B — The *UHI* approach

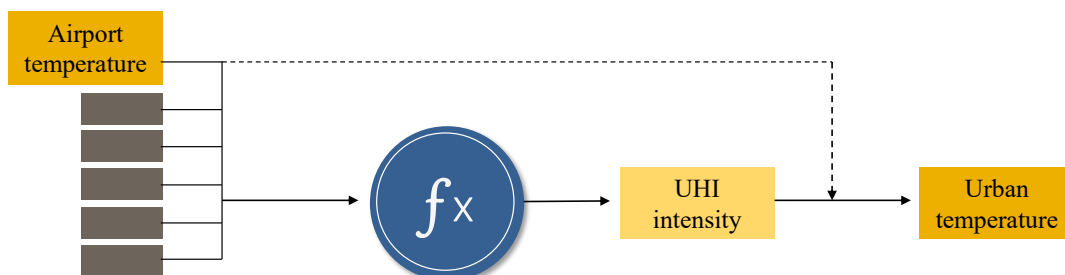


Figura 13.1 Representación esquemática de las dos aproximaciones estudiadas para la modelización de la temperatura del aire exterior.

Figure 13.1 Schematic representation of the two approaches studied for outdoor air temperature modelling.

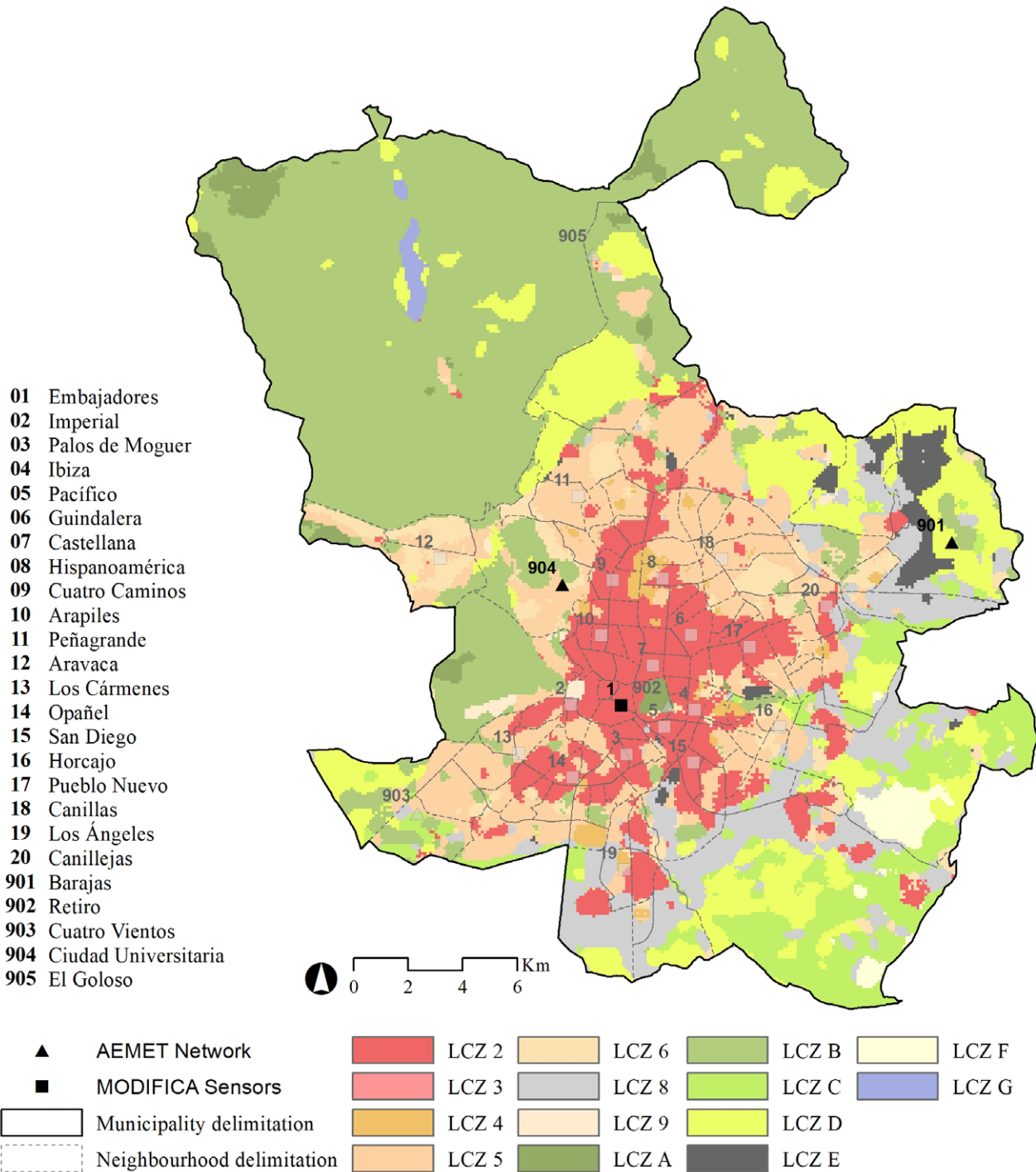


Figura 13.2 Mapa del municipio de Madrid donde se destacan los puntos de medición de los que se extraen los datos para la modelización. En el fondo se muestran las LCZs extraídas del proyecto WUDAPT (Brousse et al., 2016).

Figure 13.2 Map of the municipality of Madrid showing the measurement points from which the data for the modelling are extracted. The LCZs extracted from the WUDAPT project (Brousse et al., 2016) are shown in the background.

Una vez identificada una estructura común y óptima para ambos enfoques se procede a comparar su rendimiento en cada caso. Primero, los resultados de un análisis de sensibilidad sugieren que los modelos más equilibrados podrían estar produciéndose con el *enfoque UHII*, entendiéndose como *equilibrados* los modelos donde no existe una variable con una gran predominancia sobre el resto. En este sentido, en el *enfoque UHII* los parámetros de entrada en el modelo comparten una relevancia parecida entre ellos y variable a lo largo de las horas del día, siendo las más influyentes la velocidad del viento durante la noche (véase **Figura 13.4**) y la radiación solar durante el día.

También se ha estudiado el rendimiento global de los dos enfoques a la hora de modelar las temperaturas horarias durante un año completo previamente desconocido. Las métricas de error arrojan resultados óptimos, donde la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) es próxima a 1 °C. Estos resultados son ligeramente mejores para el enfoque UHII, con una reducción del 6.4% en el RMSE, del 8.6% en el error absoluto medio (MAE),

Having identified a common and optimal structure for both approaches, we proceed to compare their performance in each case. First, the results of a sensitivity analysis suggest that the most balanced models may be produced with the *UHII approach*, where *balanced* models are understood as those where there is not one variable with a high predominance over the rest. In this sense, in the *UHII approach* the input parameters in the model share a similar relevance among them and vary throughout the hours of the day, the most influential being the wind speed during the night (see **Figure 13.4**) and the solar radiation during the day.

The overall performance of the two approaches in modelling hourly temperatures over a previously unknown full year was also studied. The error metrics yield optimal results, where the root mean squared error (RMSE) is close to 1 °C. These results are slightly better for the UHII approach, with a 6.4% reduction in RMSE, an 8.6% reduction in

Tabla 13.2 Parámetros iterados durante la búsqueda de una configuración y estructura óptima para la modelización. Se incluye la selección final de parámetros.

Table 13.2 Iterated parameters during the search for an optimal modelling configuration and structure. The final selection of parameters is included.

Parameters	Tested	Selected
Number of hidden layers	1–5	2
Number of neurons	Input layer	7
	Hidden layers ¹	3–85
	Output layer	1
Activation functions	Hidden layers	Linear, ELU, SELU, ReLU, Sigmoid, Hard sigmoid, Hyperbolic tangent, Exponential, Softmax, Softplus, Softsign
	Output layers	Linear, ELU, SELU, ReLU, Sigmoid, Hard sigmoid, Hyperbolic tangent, Exponential, Softmax, Softplus, Softsign
Optimizer	SGD, Adam, RMSProp, Adagrad, Adadelata, Nadam	Adam
Epochs	100, 200, 500	200
Batch size	2, 5, 10	10
Dataset length	12 months	12 months ²
Training/Validation size	80%/20%	80%/20%

¹ The value here presented corresponds to the number of neurons contained in the first hidden layer. Each subsequent hidden layer adopts half of the value of the previous one. ² Maximum length of the dataset. Results with shorter lengths are also presented.

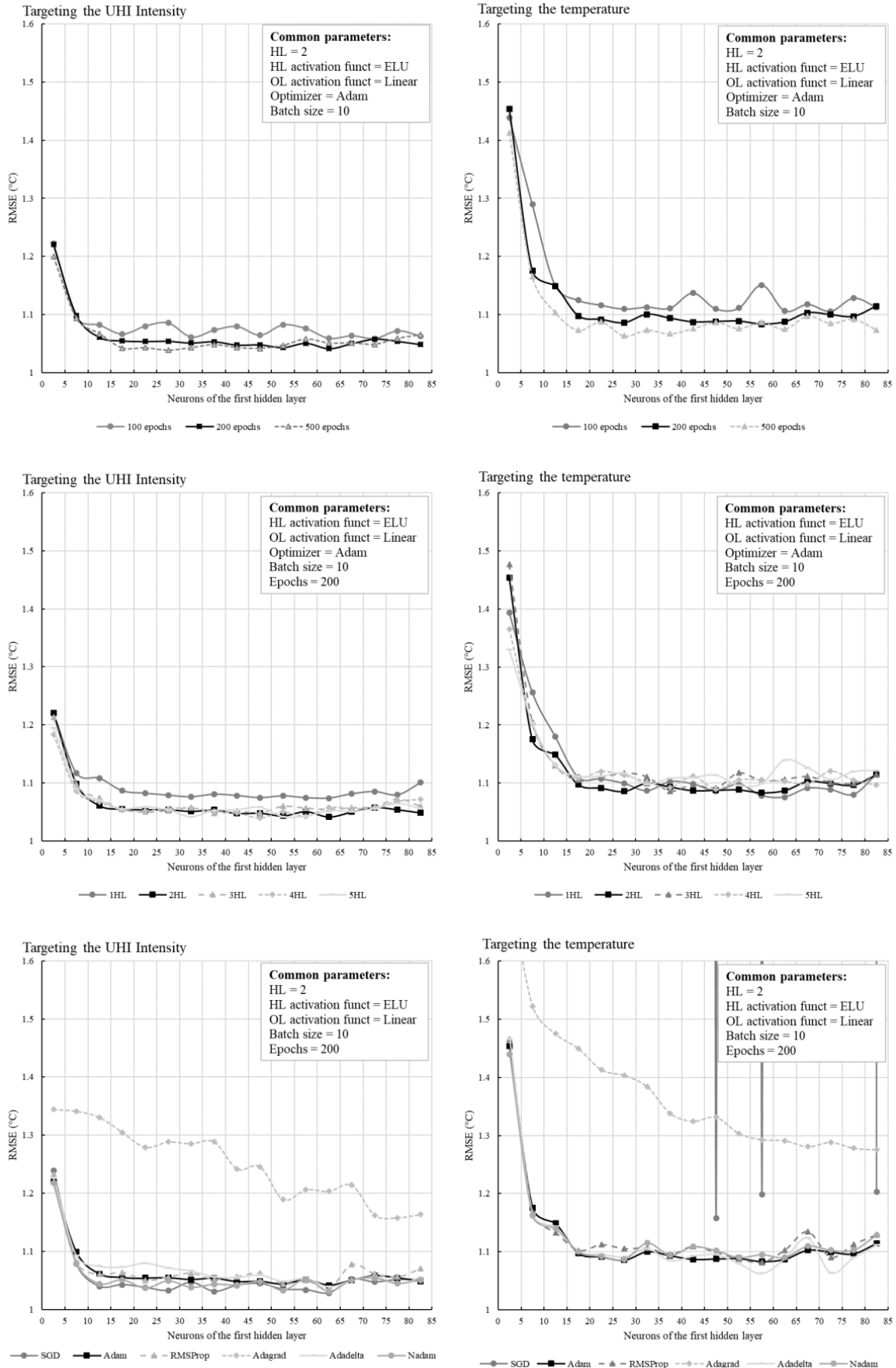


Figura 13.3 Comparativa del error acumulado de diversas configuraciones donde se itera un único parámetro. Se muestran los resultados para el enfoque UHI (izquierda) y el enfoque TEMP (derecha). El error se presenta como la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

Figure 13.3 Comparison of the cumulative error of various configurations where a single parameter is iterated. Results are shown for the UHI approach (left) and the TEMP approach (right). The error is presented as the root mean square error (RMSE).

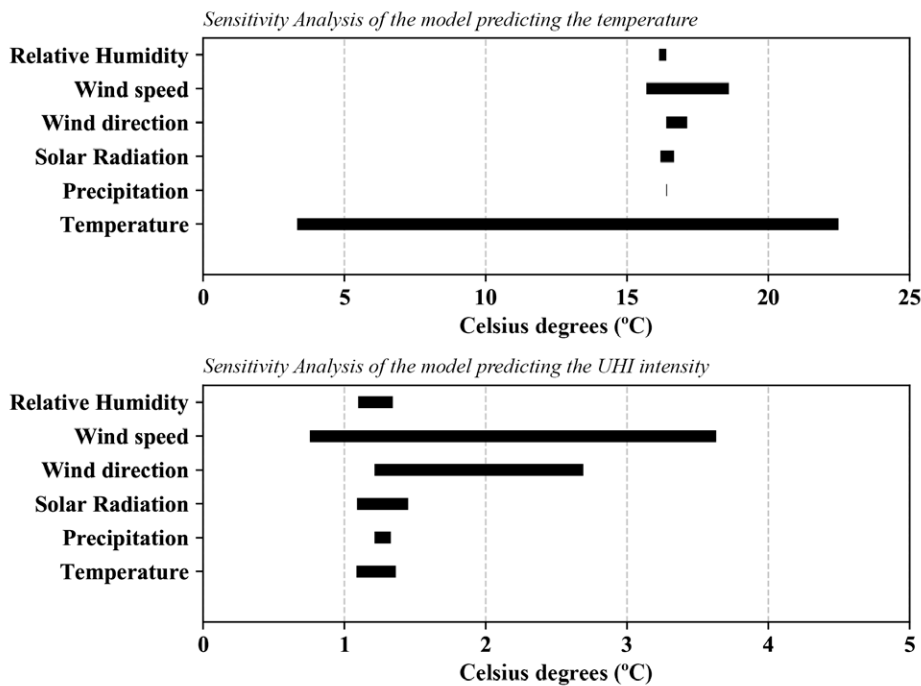


Figura 13.4 Resultados del análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada en los modelos cuando la hora se fija a las 00:00 UTC (medianoche). Se muestran los resultados obtenidos siguiendo el enfoque TEMP (arriba) y el enfoque UHII (abajo).

Figure 13.4 Results of the sensitivity analysis of the input parameters in the models when the time is set at 00:00 UTC (midnight). The results obtained following the TEMP approach (top) and the UHII approach (bottom) are shown.

o del 11.7% en la mediana de la desviación absoluta (MAD). Las diferencias, aparentemente, sitúan al *enfoque UHII* como una mejor opción a la hora de modelar las temperaturas urbanas.

En cualquier caso, ambos enfoques producen resultados óptimos. Así se observa, por ejemplo, en la **Figura 13.5**, donde se compara la temperatura modelizada con la temperatura medida *in-situ* y en diferentes escenarios de estabilidad atmosférica. Tanto los resultados del *enfoque UHII* como del *enfoque TEMP* se ajustan muy satisfactoriamente a la realidad, recreando la evolución de las temperaturas urbanas de forma relativamente suave, sin grandes cambios ni saltos de temperatura, y a pesar de que la modelización no incluye explícitamente la dependencia temporal entre dos horas consecutivas. Los resultados confirman la validez de los modelos basados en FNN para la modelización de series temporales.

13.3. Evaluación de los modelos en contextos de baja disponibilidad de datos

Hasta ahora, los enfoques *TEMP* y *UHII* han arrojado resultados similares y óptimos a la hora de modelar las temperaturas urbanas. El objetivo de esta fase es evaluar su capacidad para adaptarse a contextos de baja disponibilidad de datos, así como estudiar si esta es similar en ambos enfoques. Para ello se ha reducido la longitud de los conjuntos de datos empleados durante el entrenamiento de los modelos, pasando de los 12 meses iniciales a 9, 6 y 3 meses de datos.

mean absolute error (MAE), or an 11.7% reduction in median absolute deviation (MAD). The differences apparently make the *UHII approach* a slightly better choice for modelling urban temperatures.

In either case, both approaches produce optimal results. This can be seen, for example, in **Figure 13.5**, where the modelled temperature is compared with the *in-situ* measured temperature under different atmospheric stability scenarios. Both the results of the *UHII approach* and the *TEMP approach* fit very satisfactorily to reality, recreating the evolution of urban temperatures in a relatively smooth way, without large changes or temperature spikes, and despite the fact that the modelling does not explicitly include the time dependence between two consecutive hours. The results confirm the validity of FNN-based models for time series modelling.

13.3. Evaluating models in contexts of low data availability

So far, the *TEMP* and *UHII* approaches have yielded similar and optimal results in modelling urban temperatures. The aim of this phase is to assess their capacity to adapt to contexts of low data availability, as well as to study whether their capacity to adapt is similar in both approaches. To this end, the length of the datasets used during model training was reduced from the initial 12 months to 9, 6 and 3 months of data.

Predictions of the models targeting both the UHI intensity and the urban temperature

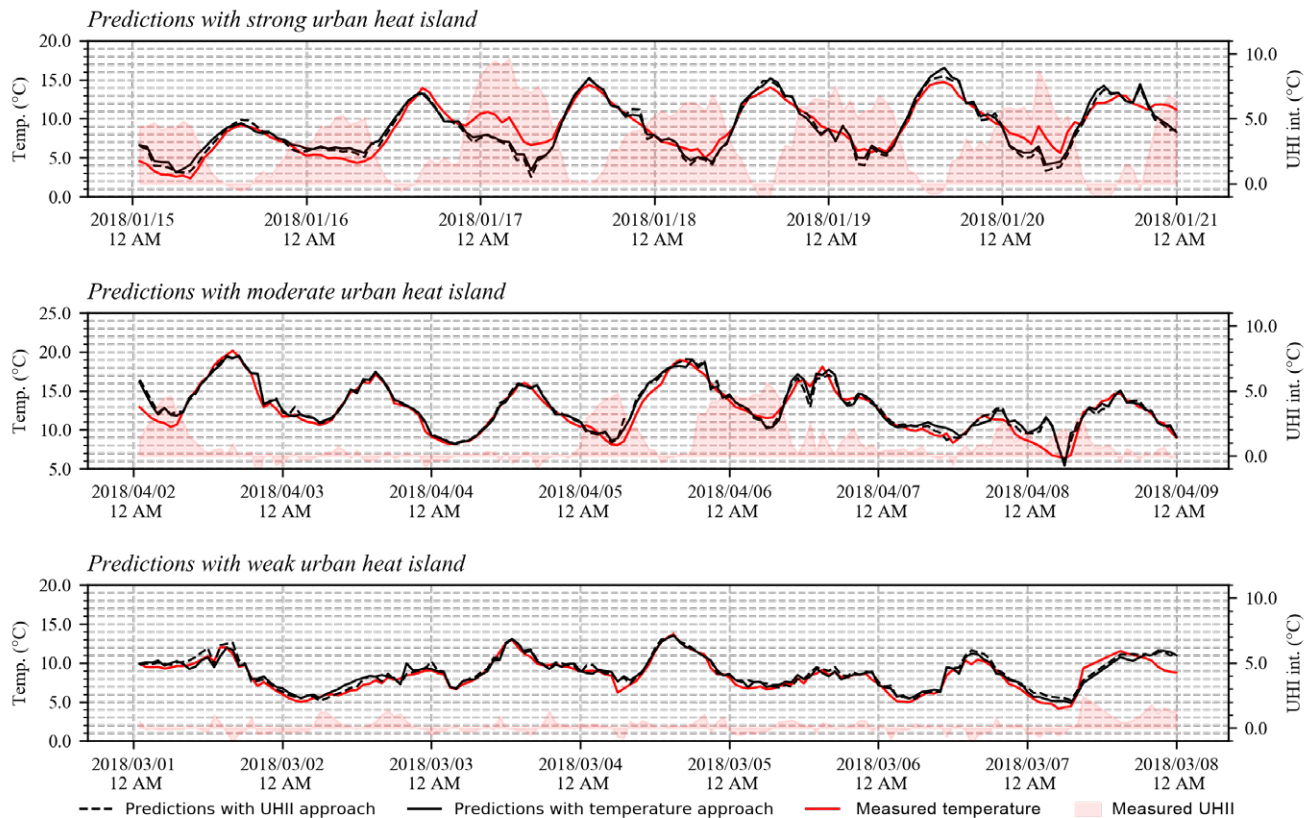


Figura 13.5 Resultados obtenidos de la modelización de las temperaturas urbanas utilizando los enfoques UHII (línea negra discontinua) y TEMP (línea negra continua). Se presentan en tres escenarios de estabilidad atmosférica, lo que se traslada en un escenario con una alta intensidad de isla de calor (arriba), otro con una intensidad moderada (centro) y otro con una intensidad baja (abajo). El sombreado de fondo representa la intensidad de la isla de calor.

Figure 13.5 Results obtained from modelling urban temperatures using the UHII (black dashed line) and TEMP (black solid line) approaches. They are presented in three scenarios of atmospheric stability, which is translated into a scenario with high urban heat island intensity (top), a scenario with moderate intensity (centre) and a scenario with low intensity (bottom). The background shading represents the urban heat island intensity.

The results show that the reduction of available data during the training phase has an exponential effect on the increase in error. Reducing the data available during training to 9 or even 6 months does not seem to increase the error very significantly, especially in the case of the UHII approach (the RMSE increases by 2.4% and 6.2% for 9 and 6 months, respectively). However, the error does increase significantly when the available data is only 3 months, with an RMSE that rises to 1.43 °C (+40%) and 1.78 °C (+63.1%) for the UHII approach and the TEMP approach, respectively. The differences between models are now evident. Figure 13.6 shows graphically how the error is distributed for various models trained on each of these scenarios.

From Figure 13.6 it is also remarkable the dispersion of the error of the models trained with only 3 months of data. A more detailed analysis of the results (see Figure 13.7) shows that the models that accumulate more relative error are those trained during the winter and summer months. It is also observed that this error is not distributed

Los resultados muestran que la reducción de datos disponibles durante la fase del entrenamiento tiene un efecto exponencial en el incremento del error. Reducir los datos disponibles durante el entrenamiento a 9 o incluso 6 meses no parece aumentar de forma muy relevante el error, especialmente en el caso del enfoque UHII (el RMSE se incrementa un 2.4% y un 6.2% para 9 y 6 meses, respectivamente). Sin embargo, el error sí que aumenta de forma muy significativa cuando los datos disponibles son de tan solo 3 meses, con un RMSE que asciende a 1.43 °C (+40%) y a 1.78 °C (+63.1%) para el enfoque UHII y el enfoque TEMP, respectivamente. Las diferencias entre modelos, ahora sí, son palpables. La Figura 13.6 muestra gráficamente cómo se distribuye el error para varios modelos entrenados en cada uno de estos escenarios.

De la Figura 13.6 también es destacable la dispersión del error de los modelos entrenados con sólo 3 meses de datos. Un análisis más detallado de los resultados (véase Figura 13.7) apunta a que los modelos que acumulan más error relativo serían aquellos entrenados durante los meses de invierno y verano. También se observa que este error no se distribuye de forma homogénea a lo largo de

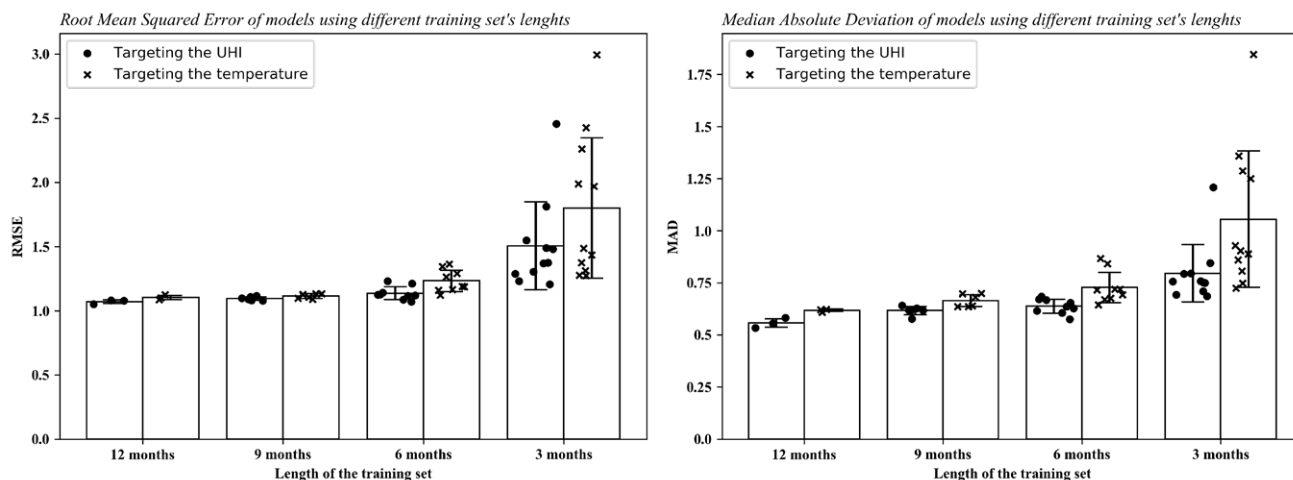


Figura 13.6 Distribución del error acumulado por los modelos cuando estos son entrenados bajo diferentes contextos de disponibilidad de datos. Se presentan los resultados para los dos enfoques (UHI y TEMP) y para dos métricas de error diferentes: la raíz del error cuadrático medio (RMSE, izquierda) y la mediana de la desviación absoluta (MAD, derecha).

Figure 13.6 Distribution of the models' cumulative error when they are trained under different contexts of data availability. Results are given for the two approaches (UHI and TEMP) and for two different error metrics: the root mean square error (RMSE, left) and the median absolute deviation (MAD, right).

todo el año, sino que este se concentra en aquellos meses que no coinciden con los empleados durante la fase de entrenamiento, sobre todo cuando se utiliza el enfoque TEMP. La causa podría estar relacionada con el ciclo anual de las temperaturas, tal y como se señala en Núñez-Peiró et al. (2021a):

Los resultados muestran que los modelos tienden sistemáticamente a minimizar su error dentro de su estación, y que el RMSE aumenta gradualmente a medida que se alejan de ella. Esto se acentúa para los modelos entrenados en invierno y verano. La razón de ello podría residir en el comportamiento cíclico anual de las temperaturas: entre los solsticios y los equinoccios, las temperaturas permanecen en un extremo del ciclo anual, ya sea en el extremo alto de las temperaturas (verano) o en el extremo bajo (invierno). Sin embargo, entre los equinoccios y los solsticios (primavera y otoño) se produce la transición entre los dos extremos. Esto podría favorecer el entrenamiento de las redes neuronales, ya que ampliaría el reconocimiento de patrones a prácticamente todo el rango de temperaturas anuales, y donde sólo los extremos estarían a expensas de la capacidad de la red neuronal para generalizar y extrapolar su capacidad de modelización más allá de lo conocido durante su entrenamiento. Esta dinámica también se observa en el caso del enfoque UHI, aunque parece ser bastante menos pronunciada.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, pág. 14.

Texto traducido de la versión original en inglés)

Al trazar gráficamente los resultados, estas diferencias se aprecian fácilmente. En este sentido, en la **Figura 13.8** se puede observar que los modelos entrenados con sólo 3 meses de datos se comportan de forma parecida a los modelos entrenados con 12 meses cuando el periodo temporal es *conocido* (esto es, cuando se modelan los mismos meses de años diferentes). Cuando esto no es así, los modelos entrenados con 3 meses comienzan a acumular un mayor error, aumentando gradualmente a medida que se alejan del periodo temporal conocido, y siendo este especialmente relevante en el caso del *enfoque TEMP*.

homogeneously throughout the year, but is concentrated in those months that do not correspond to those used during the training phase, especially when the TEMP approach is used. The cause could be related to the annual cycle of temperatures, as reported in Núñez-Peiró et al. (2021a):

The results show that the models systematically tend to minimise their error within their season, with the RMSE gradually increasing as they move away from it. This is accentuated for models trained in winter and summer. The reason behind this could lie in the annual cyclical behaviour of temperatures: between solstices and equinoxes, temperatures remain at one extreme of the annual cycle, either at the high end of temperatures (summer) or at the low end (winter). Between the equinoxes and solstices (spring and autumn), though, the transition between the two extremes takes place. This could favour the training of the ANN, as it would extend pattern recognition to practically the entire annual temperature range, and where only the extremes would be at the expense of the neural network's ability to generalise and extrapolate its modelling capacity beyond what is known during its training. This dynamic is noticeable in the case of the UHI approach as well, although it seems to be rather less pronounced.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, p. 14)

When plotting the results graphically, these differences are easily seen. In this regard, **Figure 13.8** shows that models trained with only 3 months of data behave similarly to models trained with 12 months when the modelled time period is *known* (i.e., modelling same months as when trained, but for a different year). When this is not the case, the models trained with 3 months begin to accumulate a larger error, gradually increasing as they move away from the known time period, and this is especially relevant in the case of the *TEMP approach*.

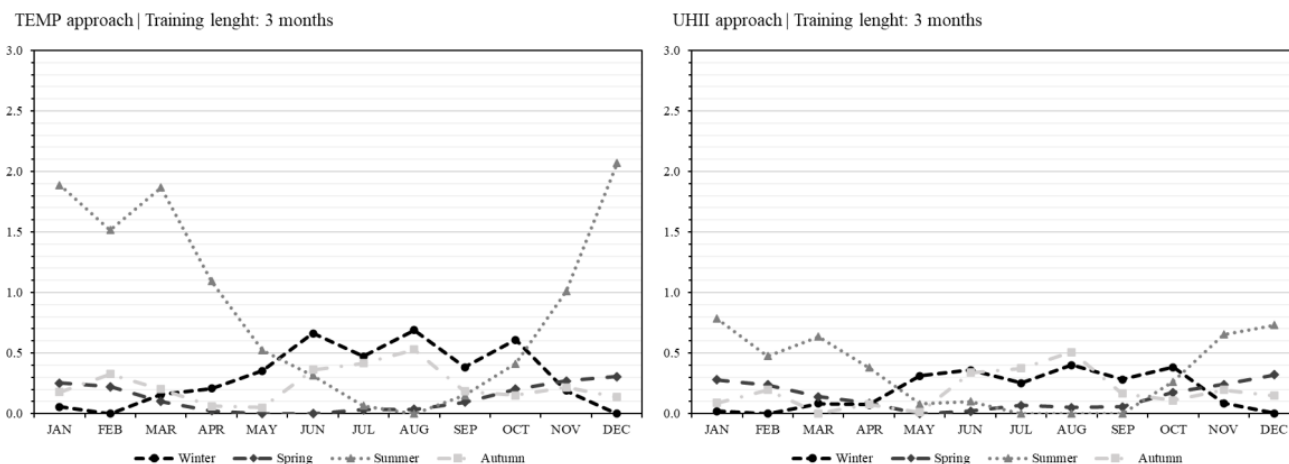


Figura 13.7 Error adicional arrojado por los modelos entrenados con sólo 3 meses de datos. El nivel de referencia lo establecen los mismos modelos, pero entrenados con 12 meses de datos. Se comparan los resultados obtenidos con el enfoque TEMP (izquierda) y el enfoque UHII (derecha).

Figure 13.7 Additional error yielded by models trained with only 3 months of data. The reference level is set by the same models, but trained with 12 months of data. The results obtained with the TEMP approach (left) and the UHII approach (right) are compared.

Reducing the available data to 3 months seems, in view of the results, to be likely to compromise the performance of the models. However, the results obtained for 9 and even 6 months of data do not seem to be very different from those obtained with 12 months. This could lead to the possibility of promoting measurement campaigns with a different perspective, perhaps shorter and simpler, which would facilitate the work of the research community. An extensive discussion of these aspects is included in Núñez-Peiró et al. (2021a), highlighting the following:

Although using large amounts of high-quality data is always desirable, in some cases it is not possible due to varying circumstances, such as budget constraints or human resources limitations. (...) it seems that the selection of days with different meteorological conditions and at different times of the year might be more relevant for the modelling than the continuity of the monitoring campaign. Thus, it may be more appropriate that future studies work with shorter, discontinuous monitoring campaigns covering a wider range of meteorological situations rather than a single, continuous-over-time campaign that might concentrate in a specific time of the year. Results may also support the use of data from sources whose long-term continuity may be compromised (i.e., CWS). In these cases, it would be relevant not only to apply filtering techniques to reduce the risks of introducing outliers, but also to carry out frequency distribution analyses to ensure that all meteorological conditions are being included into the modelling.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, p. 16)

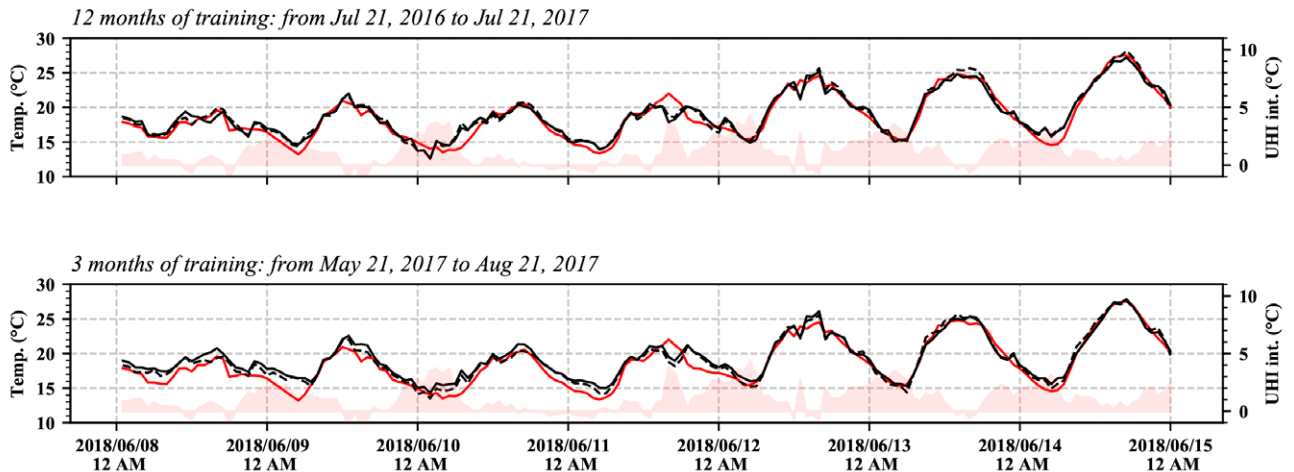
Reducir la cantidad disponible de datos hasta 3 meses parece, a la vista de los resultados, que podría comprometer el rendimiento de los modelos. Sin embargo, los resultados obtenidos para 9 e incluso 6 meses de datos no parecen ser muy distintos a los obtenidos con 12 meses. Esto podría llevar a promover campañas de medición con otra perspectiva, quizás más cortas y sencillas, lo que facilitaría el trabajo de la comunidad investigadora. Sobre estos aspectos se incluye una amplia discusión en Núñez-Peiró et al. (2021a), destacándose lo siguiente:

Aunque el uso de grandes cantidades de datos de alta calidad es siempre deseable, en algunos casos no es posible debido a diversas circunstancias, como las restricciones presupuestarias o las limitaciones de recursos humanos. (...) parece que la selección de días con diferentes condiciones meteorológicas y en diferentes épocas del año podría ser más relevante para la modelización que la continuidad de la campaña de seguimiento. Así, puede ser más adecuado que en futuros estudios se trabaje con campañas de seguimiento más cortas y discontinuas que cubran una gama más amplia de situaciones meteorológicas, en lugar de una única campaña continua en el tiempo que podría concentrarse en una época concreta del año. Los resultados también pueden respaldar el uso de datos procedentes de fuentes cuya continuidad a largo plazo puede verse comprometida (i.e., las CWS). En estos casos, sería pertinente no sólo aplicar técnicas de filtrado para reducir los riesgos de introducir valores atípicos, sino también llevar a cabo análisis de distribución de frecuencias para garantizar que todas las condiciones meteorológicas se están incluyendo en la modelización.

(Núñez-Peiró et al., 2021a, pág. 16.

Texto traducido de la versión original en inglés)

Predictions of the models for one week in June



Predictions of the models for one week in February

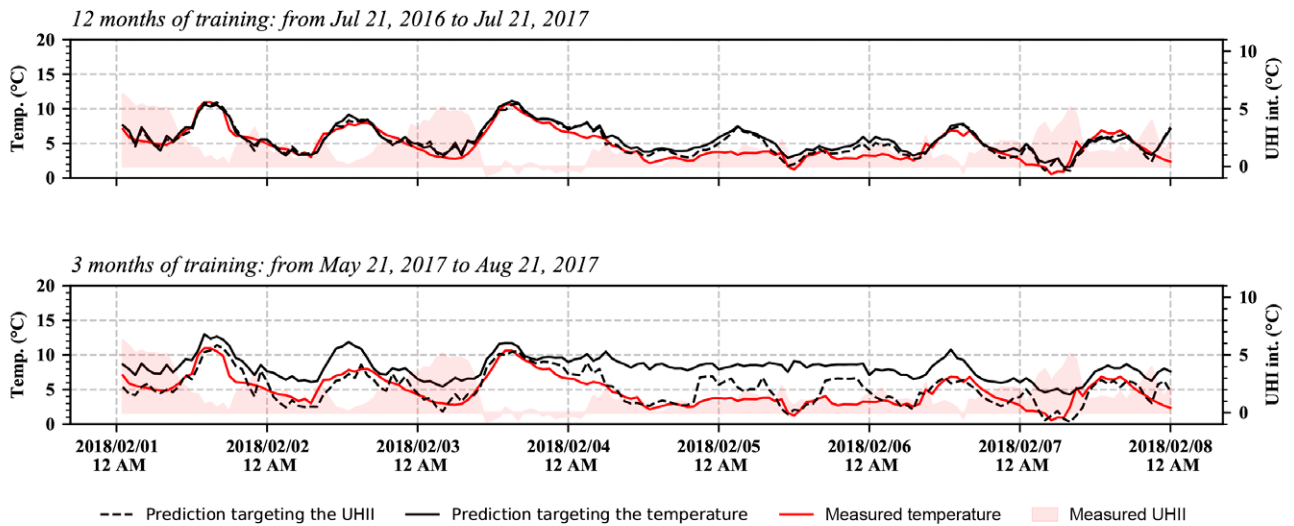


Figura 13.8 Resultados de la modelización para una semana de junio (arriba) y febrero (abajo). Para cada una de estas semanas se presentan los resultados de los modelos entrenados con 12 y 3 meses de datos, tanto con el enfoque UHII (línea negra discontinua) como con el enfoque TEMP (línea negra continua).

Figure 13.8 Modelling results for one week in June (top) and February (bottom). For each of these weeks, results are presented for the models trained with 12 and 3 months of data, both with the UHII approach (dashed black line) and the TEMP approach (solid black line).

13.4. Inclusión de la humedad relativa en la modelización

En esta fase se han realizado una serie de comprobaciones orientadas a extender la modelización a la humedad relativa. Se estudia la conveniencia de desarrollar un modelo de salida múltiple (integrando la modelización de los dos parámetros, temperatura y humedad relativa, en una misma red neuronal) frente a la posibilidad de tener dos modelos de salida única (un modelo independiente para cada parámetro). Estas dos ideas se han ensayado siguiendo, de nuevo, un proceso iterativo en el que se han ido intercambiando diferentes parámetros con el fin de dar con una configuración que minimizara el error cuadrático medio.

13.4. Including relative humidity in modelling

In this phase, a series of tests were carried out with the aim of extending the modelling to relative humidity. The convenience of developing a multiple output model (integrating the modelling of the two parameters, temperature and relative humidity, in the same neural network) versus the possibility of having two single output models (an independent model for each parameter) was studied. These two ideas were tested following, once again, an iterative process in which different parameters were interchanged in order to find a configuration that minimised the mean square error.

Results show that it is possible to model relative humidity with an error close to 5%. The sensors have an accuracy of between 2.5% and 3.5%, thus the error level was considered to be satisfactory. Regarding the choice of model type, there are no significant differences between single and multiple output models. However, these differences are noticeable in the case of temperatures, where single output models seem to perform better (see **Figure 13.9**). There were also no significant differences between the models that focus on modelling relative humidity and those that focus on the difference in humidity between two points.

With this in mind, the approach chosen for the following stages is to develop single output models. Each measurement point will therefore have two models based on artificial neural networks, one to obtain the urban temperature and one to obtain the relative humidity. The neural networks will be oriented towards modelling the difference in temperature and relative humidity between the urban point and the reference point, and they will use the optimal structure highlighted in **section 13.2**.

Los resultados muestran la posibilidad de modelar la humedad relativa con un error próximo al 5%. A modo de referencia, la precisión de los sensores es de entre el 2.5% y el 3.5%, por lo que se ha considerado un nivel de error satisfactorio. En cuanto a la elección del tipo de modelo, no se observan diferencias significativas entre los modelos de salida única y los modelos de salida múltiple. Sin embargo, estas diferencias sí que son apreciables en el caso de las temperaturas, donde parece que los modelos de salida única funcionan mejor (véase **Figura 13.9**). Tampoco se han apreciado diferencias significativas entre los modelos que se enfocan en la modelización de la humedad relativa y los que se enfocan en la diferencia de humedad entre dos puntos.

Teniendo esto en cuenta, el planteamiento por el que se opta para las siguientes etapas consiste en desarrollar modelos de salida única. Cada punto de medición contará, por tanto, con dos modelos basados en redes neuronales artificiales, uno para obtener la temperatura urbana y otro para obtener la humedad relativa. Las redes neuronales se orientarán hacia el modelado de la diferencia de temperatura y humedad relativa entre el punto urbano y el punto de referencia, y contarán con la estructura destacada como óptima en el **apartado 13.2**.

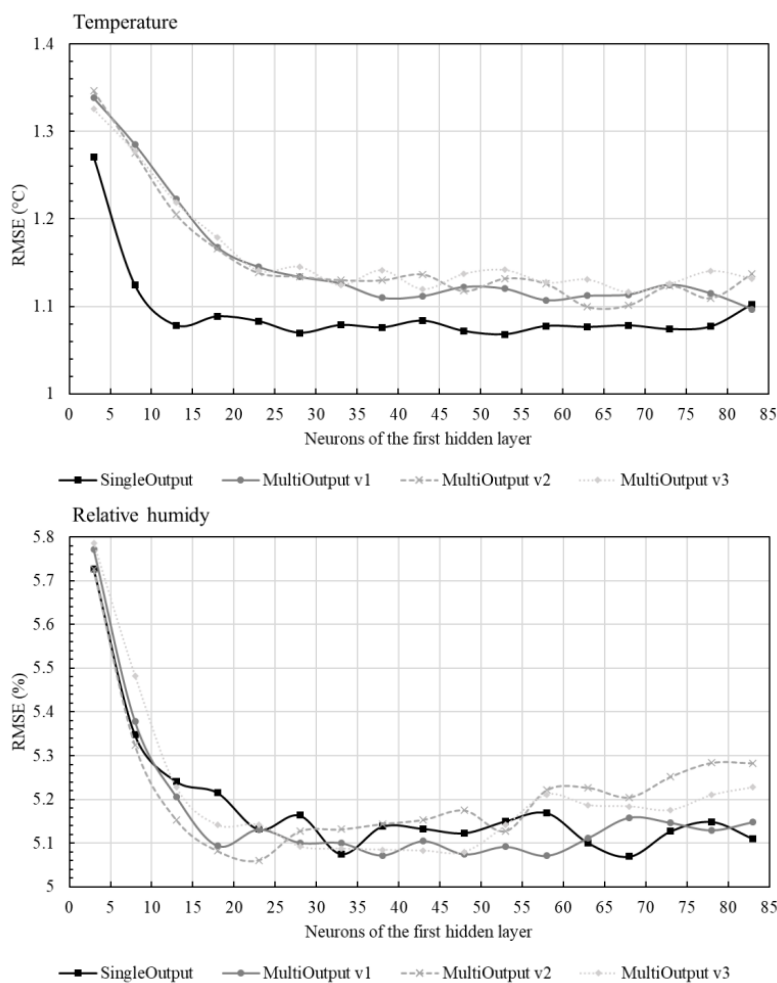


Figura 13.9 Error acumulado por los modelos de salida única (single output) y los modelos de salida múltiple (multi-output). Se muestran los resultados para la modelización de la temperatura (arriba) y la humedad relativa (abajo).

Figure 13.9 Accumulated error for single output and multi-output models. Results are shown for the modelling of temperature (top) and relative humidity (bottom).

13.5. ‘Data morphing’: generación de series temporales artificiales en puntos urbanos.

Una vez obtenida una estructura y configuración óptima para las redes neuronales artificiales, el proceso para extender las series temporales de temperatura y humedad relativa más allá de los límites de la monitorización se divide en dos tareas. En primer lugar, se debe ampliar el desarrollo de estos modelos al resto de puntos urbanos, hasta ahora únicamente aplicado a 01 *Embajadores*. En segundo lugar, es necesario recabar las series históricas de los observatorios de la AEMET, ya que a partir de éstas se modelarán las series artificiales de los puntos urbanos. Esto último se enmarca en lo que se conoce como *data morphing* (Belcher et al., 2005; Evola et al., 2018).

Respecto a la primera tarea, se han generado un total de 20 pares de modelos que permiten obtener la temperatura y humedad relativa en cada uno de los puntos urbanos. Se ha utilizado la configuración de FNN presentada en el apartado 13.2, recogiendo en la **Tabla 13.3** el error arrojado por los modelos en cada ubicación.

13.5. ‘Data morphing’: generation of artificial time series at urban points.

Once an optimal structure and configuration for the artificial neural networks was obtained, the process of extending the temperature and relative humidity time series beyond the limits of monitoring was divided into two tasks. Firstly, the development of these models must be extended to the rest of the urban areas, so far only applied to 01 *Embajadores*. Secondly, it is necessary to collect the historical series of the AEMET observatories, since these will be used to model the artificial series of the urban points. The latter is part of what is known as *data morphing* (Belcher et al., 2005; Evola et al., 2018).

Regarding the first task, a total of 20 pairs of models were generated to obtain the temperature and relative humidity at each of the urban locations. The FNN configuration presented in section 13.2 was used, and in **Table 13.3**, the error yielded by the models at each location is shown.

Tabla 13.3 Medidas del error arrojado por los modelos FNN desarrollados para cada punto de medición. Los valores más altos se resaltan en negrita, mientras que los más bajos se muestran sobre fondo gris.

Table 13.3 FNN models’ error yielded at each measurement site. Higher values are highlighted in bold, while lower values are shown on a grey background.

Sensors		Temperature (°C)			Relative humidity (%)		
ID	Name	MAD ¹	MAE ²	RMSE ³	MAD ¹	MAE ²	RMSE ³
01	Embajadores	0.53	0.74	1.02	2.69	3.72	5.17
02	Imperial	0.61	0.86	1.22	2.79	3.90	5.48
03	La Chopera	0.57	0.73	0.97	2.53	3.46	4.79
04	Estrella	0.55	0.74	1.00	2.67	3.64	5.04
05	Pacífico	0.54	0.72	0.98	2.63	3.57	4.93
06	Guindalera	0.58	0.77	1.03	2.67	3.70	5.14
07	Recoletos	0.60	0.81	1.11	2.82	3.95	5.50
08	Hispanoamérica	0.59	0.80	1.10	2.80	3.84	5.30
09	Cuatro Caminos	0.65	0.87	1.19	2.94	4.06	5.63
10	Arapiles	0.59	0.81	1.12	2.96	4.03	5.56
11	Peñagrande	0.59	0.77	1.03	2.77	3.78	5.21
12	Aravaca	0.56	0.77	1.09	2.68	3.84	5.53
13	Los Cármenes	0.59	0.79	1.09	3.06	4.30	6.03
14	Opañel	0.57	0.73	0.99	2.58	3.58	5.04
15	San Diego	0.56	0.74	1.01	2.62	3.63	5.06
16	Horcajo	0.59	0.78	1.05	2.79	3.86	5.37
17	Pueblo Nuevo	0.53	0.71	0.97	2.56	3.51	4.89
18	Canillas	0.57	0.75	1.02	2.75	3.88	5.49
19	Los Ángeles	0.60	0.78	1.05	2.77	3.80	5.30
20	Canillejas	0.53	0.66	0.87	2.28	3.01	4.09

¹ Median Absolute Deviation (°C / %). ² Mean Absolute Error (°C / %). ³ Root Mean Squared Error (°C / %).

With an RMSE close to 1 °C and 5% for temperature and relative humidity, respectively, all the models show errors similar to those obtained for site 01 *Embajadores*. Site 20 *Canillejas* (RMSE = 0.87 °C) stands out with the lowest error. This is the closest point to the Barajas observatory, the reference point from which the input data for the models are extracted. A closer proximity could favour the accuracy of the modelling, since there is a greater probability that the meteorological conditions collected at the reference point may coincide with those of the urban point. On the other hand, it is also noteworthy that the highest RMSEs have been recorded at site 02 *Imperial* (temperature) and 13 *Los Cármenes* (relative humidity), these being the sites previously excluded from the urban heat island analysis due to their lack of representativeness (see **section 11.6**).

As for the second task, 23 years of AEMET's historical records (1995 – 2017) were accessed. However, not all parameters have hourly data available throughout this period, so the time range was limited to the years after 2006. Finally, a time window of 10 years (2008 – 2017) was selected, which is sufficiently long for the generation of weather files (ISO, 2005, see **sections 14.1** and **14.2**).

As mentioned above, the data provided by AEMET is subjected to several QC procedures, so there is no need for further QC checks. However, the data were checked in order to analyse the existence of discontinuities during this time period. It was found the existence of relevant discontinuities (greater than three consecutive hours), although these are very punctual and, as a whole, the missing data are marginal (less than 0.1% of the total in all cases). **Table 13.4** summarises the availability of hourly data for each parameter for the period 2008 – 2017.

Finally, these data were fed into the already trained models to generate the temperature and relative

Con un RMSE próximo a 1 °C y 5% para la temperatura y la humedad relativa, respectivamente, todos los modelos arrojan errores similares a los obtenidos para *Embajadores*, el caso de estudio. Destaca, con el error más bajo, *Canillejas* (RMSE = 0.87 °C). Éste es el punto más próximo al observatorio de Barajas, el punto de referencia del cual se extraen los datos de entrada para los modelos. Una mayor proximidad podría favorecer la precisión del modelado, ya que existe una mayor probabilidad de que las condiciones meteorológicas recogidas en el punto de referencia coincidan con las del punto urbano. Por otro lado, también es destacable que los RMSE más elevados se hayan registrado en *Imperial* (temperatura) y en *Los Cármenes* (humedad relativa), siendo éstos los puntos previamente excluidos del análisis de la isla de calor por su falta de representatividad (véase **apartado 11.6**).

En cuanto a la segunda tarea, se ha podido acceder a 23 años de los registros históricos de la AEMET (1995 – 2017). Sin embargo, no todos los parámetros disponen de datos horarios a lo largo de todo ese periodo, por lo que se ha acotado el rango temporal a los años posteriores a 2006. Finalmente, se ha seleccionado una ventana temporal de 10 años (2008 – 2017), siendo esta suficientemente amplia para la generación de archivos climáticos (ISO, 2005, véanse **apartados 14.1** y **14.2**).

Como ya se ha señalado anteriormente, los datos proporcionados por la AEMET son previamente sometidos a un control de calidad, por lo que no procede llevarlo a cabo de nuevo. Sí que han sido sometidos a una revisión con el fin de analizar la existencia de discontinuidades durante este periodo temporal. Se ha constatado la existencia de discontinuidades relevantes (superiores a tres horas consecutivas), aunque estas son muy puntuales y, en conjunto, los datos ausentes son marginales (inferiores al 0.1% del total en todos los casos). La **Tabla 13.4** resume la disponibilidad de datos horarios para cada parámetro para el periodo 2008 – 2017.

Parameter	n	%	Missing data	
			Consecutive	Date consecutive ¹
Barajas				
Temperature	43	0.05	24	16/12/2008
Relative humidity	41	0.05	24	16/12/2008 05/05/2016
Precipitation	48	0.05	24	12/05/2016 16/12/2008
Wind – direction	68	0.08	24	09/08/2011 16/12/2008
Wind – speed	68	0.08	24	09/08/2011
Ciudad Universitaria				
Solar radiation – Global	85	0.1	80	01 – 05/09/2017

¹ Format: dd/mm/yyyy

Tabla 13.4 Datos ausentes detectados para cada uno de los parámetros empleados en la generación de las series temporales.

Table 13.4 Missing data detected for each of the parameters used in the generation of the time series.

Por último, estos datos se han introducido en los modelos ya entrenados para generar los datos de temperatura y humedad relativa durante el periodo 2008 – 2017. Estas son, por tanto, las series temporales artificiales de los 20 puntos urbanos que reflejan el efecto de la isla de calor. La **Figura 13.10** y la **Figura 13.11** muestran un extracto, para diferentes puntos urbanos, de las series temporales artificiales de temperatura y humedad relativa, respectivamente. En la próxima y última etapa, estas series temporales se utilizarán para elaborar los archivos climáticos urbanos de la ciudad de Madrid.

humidity data for the period 2008 – 2017. These are therefore the artificial time series for the 20 urban points reflecting the urban heat island effect. **Figure 13.10** and **Figure 13.11** show an extract, for different urban locations, of the artificial time series of temperature and relative humidity, respectively. In the next and final step, these time series will be used to build the urban weather files for the city of Madrid.

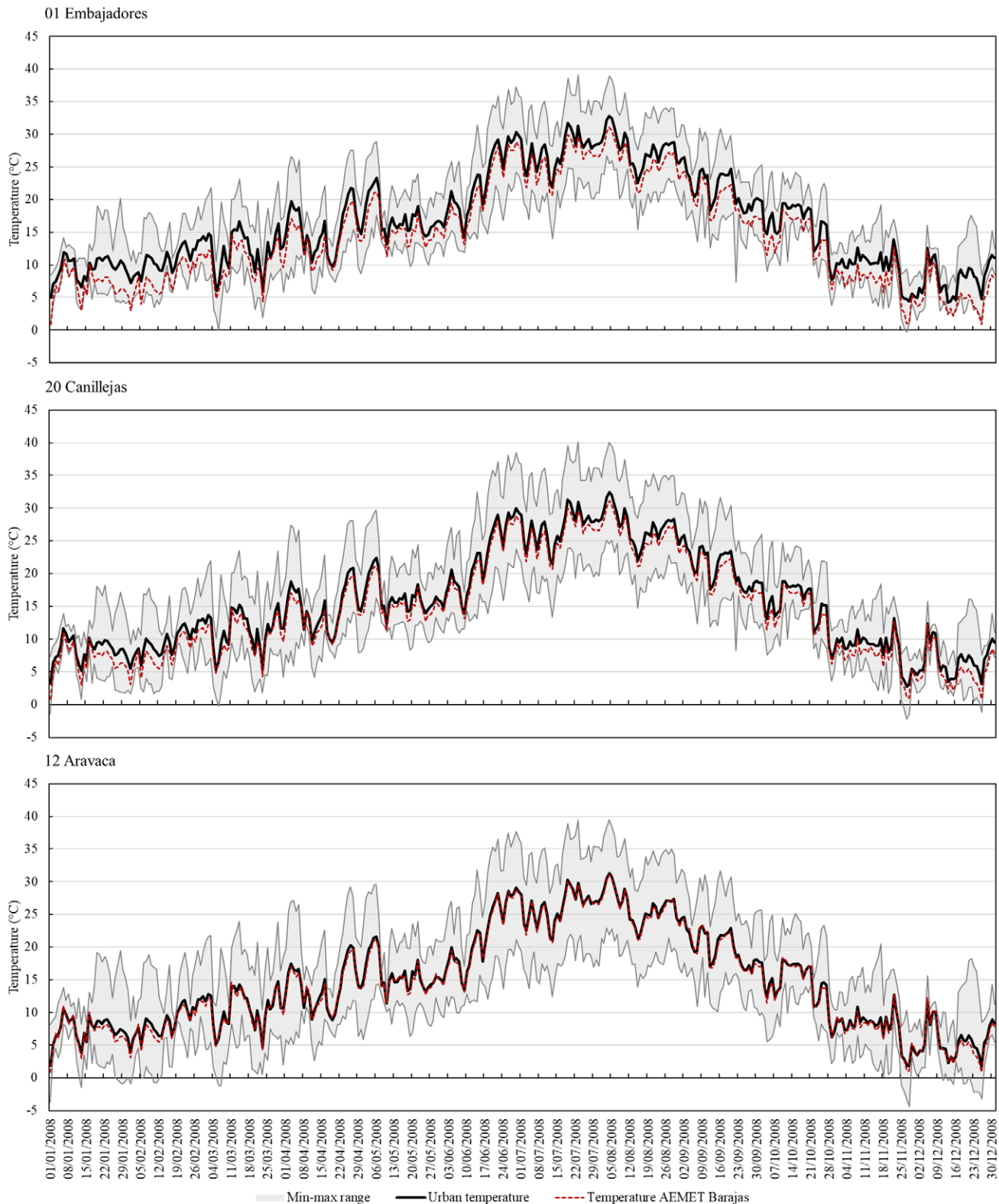
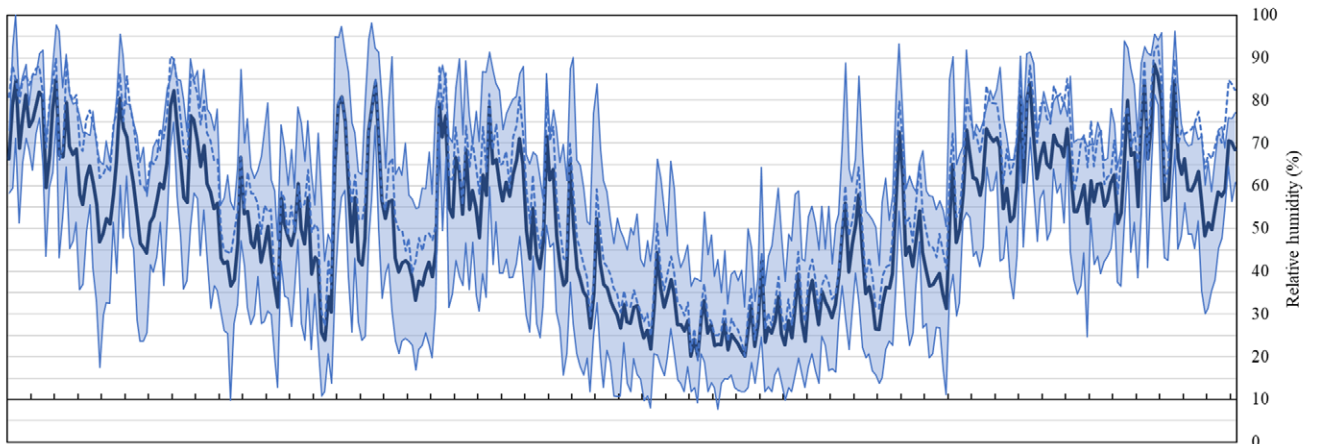


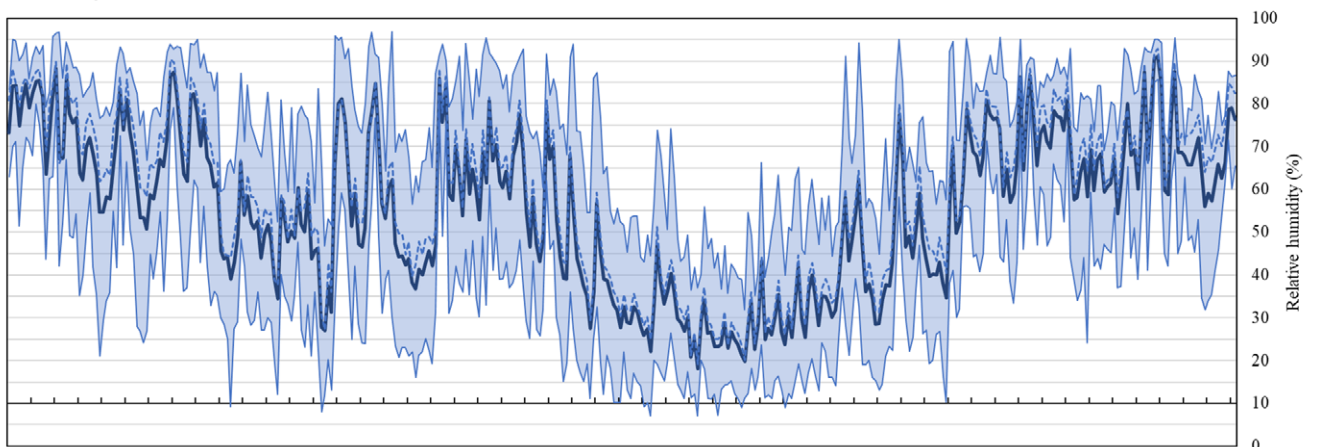
Figura 13.10 Series temporales artificiales de temperatura del aire generadas para el año 2008 en tres puntos urbanos. Nótese que corresponden con ubicaciones caracterizadas por una alta (arriba), media (centro) y baja (abajo) intensidad de isla de calor. En todas ellas se muestran los datos de temperatura del aire del observatorio de Barajas a modo de referencia.

Figure 13.10 Artificial air temperature time series generated for the year 2008 at three urban locations. Note that they correspond to locations characterised by high (top), medium (middle) and low (bottom) urban heat island intensity. In all of them, air temperature data from the Barajas observatory are shown for reference.

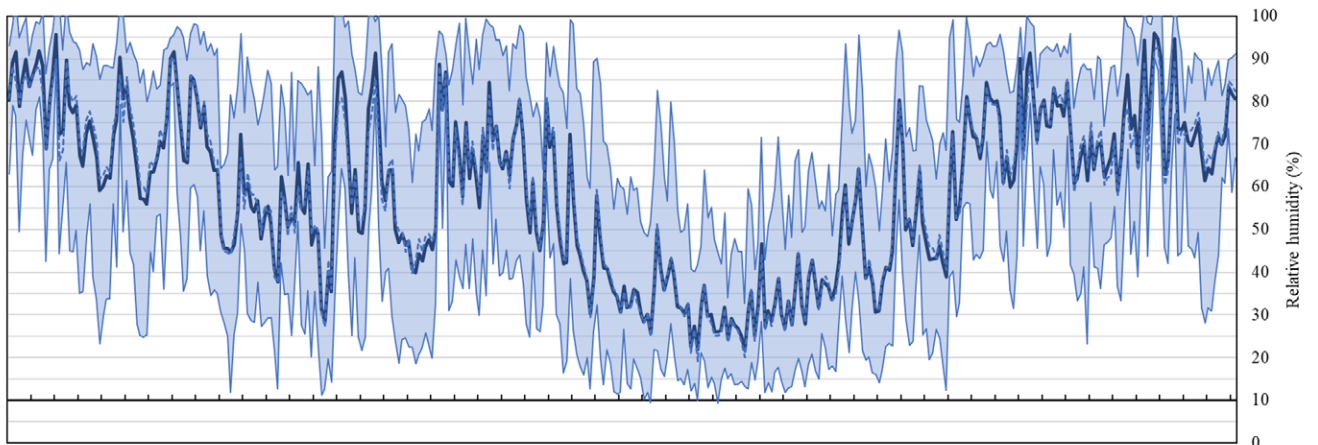
01 Embajadores



20 Canillejas



12 Aravaca



01/01/2008 08/01/2008 15/01/2008 22/01/2008 29/01/2008 05/02/2008 12/02/2008 19/02/2008 26/02/2008 04/03/2008 11/03/2008 18/03/2008 25/03/2008 01/04/2008 08/04/2008 15/04/2008 22/04/2008 29/04/2008 06/05/2008 13/05/2008 20/05/2008 27/05/2008 03/06/2008 10/06/2008 17/06/2008 24/06/2008 01/07/2008 08/07/2008 15/07/2008 22/07/2008 29/07/2008 05/08/2008 12/08/2008 19/08/2008 26/08/2008 02/09/2008 09/09/2008 16/09/2008 23/09/2008 30/09/2008 07/10/2008 14/10/2008 21/10/2008 28/10/2008 04/11/2008 11/11/2008 18/11/2008 25/11/2008 02/12/2008 09/12/2008 16/12/2008 23/12/2008 30/12/2008

— Min-max range — Urban relative humidity - - - Relative humidity AEMET Barajas

Figura 13.11 Series temporales artificiales de humedad relativa generadas para el año 2008 en tres puntos urbanos. Nótese que corresponden con ubicaciones caracterizadas por una alta (arriba), media (centro) y baja (abajo) intensidad de isla de calor. En todas ellas se muestran los datos de humedad relativa del observatorio de Barajas a modo de referencia.

Figure 13.11 Artificial time series of relative humidity generated for the year 2008 at three urban locations. Note that they correspond to locations characterised by high (top), medium (middle) and low (bottom) urban heat island intensity. In all of them, relative humidity data from the Barajas observatory are shown for reference.

14. Creation of urban weather files for the city of Madrid

This last stage contains the final result of the research: a set of weather files associated with the urban reality of Madrid. All these files include, to a greater or lesser extent, the effect of the urban heat island. Together they represent the thermal gradient of the city, and therefore allow its effect to be incorporated into the building energy simulation.

This stage begins with a literature review of the different methods for obtaining a typical meteorological year (**section 14.1**), and from which the most appropriate methodology for selecting the typical meteorological years corresponding to each of the available urban locations will be obtained (**section 14.2**). These typical meteorological years will serve as a basis for delimiting the different urban climatic zones in the municipality of Madrid (**section 14.3**).

Subsequently, in **section 14.4**, the process for creating the weather files will be tested by generating a new reference weather file for the city of Madrid, based on data from the AEMET observatory located in Barajas. This will be checked against the pre-existing weather files for Madrid by developing energy simulations, and using a module provided by the International Energy Agency.

Finally, **section 14.5** includes the creation of the weather files for each of the previously defined urban climatic zones. Although it is not part of the objectives of this PhD thesis to evaluate the impact of the urban heat island on the energy performance of buildings, this section includes some results that allow us to obtain a first approximation of its order of magnitude.

14.1. Selection of a methodology to obtain typical meteorological years.

A typical meteorological year contains representative climate information for a specific location and time period. Its development started during the second half of the 20th century and gained momentum in the early 1970s with the development of the first building energy simulation tools (Kusuda, 1999). Along with the availability and access to quality meteorological data, the methodology for selecting a sufficiently representative year has been widely discussed over the decades (Argiriou et al., 1999; Crawley and Lawrie, 2019, 2015; ERDA, 1977; Herrera et al., 2017; Hosseini et al., 2021; Huang and Crawley, 1996; Kambezidis et al., 2020; Nielsen et al., 2017; Pedersen, 2007).

Table 14.1 lists a selection of the best known and most widely used weather files and the respective methodologies used for their development.

14. Creación de archivos climáticos urbanos para la ciudad de Madrid

En esta última etapa se recoge el resultado final de la investigación: una batería de archivos climáticos asociados a la realidad urbana de Madrid. Todos estos archivos incluyen, en mayor o menor medida, el efecto de la isla de calor. En conjunto representan el gradiente térmico de la ciudad, por lo que permiten incorporar su efecto a la simulación energética de edificios.

Esta etapa comienza con una revisión bibliográfica de los distintos métodos para la obtención de un año meteorológico típico (**apartado 14.1**), y de donde se obtendrá la metodología más adecuada para la seleccionar los años meteorológicos típicos correspondientes a cada una de las ubicaciones urbanas disponibles (**apartado 14.2**). Estos años meteorológicos típicos servirán de base para delimitar las distintas zonas climáticas urbanas del municipio de Madrid (**apartado 14.3**).

Posteriormente, en el **apartado 14.4**, se pondrá a prueba el proceso para crear los archivos climáticos mediante la generación de un nuevo archivo climático de referencia para la ciudad de Madrid, basado en los datos del observatorio de la AEMET situado en Barajas. Este será contrastado con los archivos climáticos preexistentes para Madrid desarrollando simulaciones energéticas, y para lo que se empleará un módulo desarrollado por la Agencia Internacional de la Energía.

Por último, el **apartado 14.5** incluye la creación de los archivos climáticos para cada una de las zonas climáticas urbanas previamente delimitadas. Su funcionamiento se evalúa llevando a cabo simulaciones energéticas sobre un edificio plurifamiliar de viviendas, de tipología *bloque en H*. Aunque no forma parte de los objetivos de esta tesis doctoral evaluar el impacto de la isla de calor en el comportamiento energético de edificios, en este apartado se incluyen unos resultados que permiten obtener una primera aproximación sobre su orden de magnitud.

14.1. Selección de una metodología para obtener años meteorológicos típicos.

Un año meteorológico típico contiene información climática representativa de un lugar y un periodo temporal concreto. Su desarrollo comenzó durante la segunda mitad del siglo XX y tomó impulso a comienzo de los años 70 con el desarrollo de las primeras herramientas de simulación energética de edificios (Kusuda, 1999). Junto a la disponibilidad y acceso a datos meteorológicos de calidad, la metodología para la selección de un año lo suficientemente representativo ha sido ampliamente debatida a lo largo estas décadas (Argiriou et al., 1999; Crawley and Lawrie, 2019, 2015; ERDA, 1977; Herrera et al., 2017; Hosseini et al., 2021; Huang and Crawley, 1996; Kambezidis et al., 2020; Nielsen et al., 2017; Pedersen, 2007).

La **Tabla 14.1** recoge una selección de los archivos climáticos más conocidos y empleados, así como las respectivas metodologías empleadas para su desarrollo. Entre los primeros archivos climáticos publicados por un ente público se encuentran los *Test Reference Years* (US-TRYs) estadounidenses (U.S. National Climatic Center, 1976). Estos, sin embargo, no han gozado de gran popularidad. El método, aparentemente desarrollado por la ASHRAE (según recoge Hatch, 1986), se basaba en la selección de un año natural completo del total de la serie de datos disponible, lo que genera problemas de representatividad en algunos de sus meses.

La mayoría de las aproximaciones han optado por componer un año meteorológico típico de forma artificial, a partir de la selección de meses típicos que posteriormente son concatenados hasta formar un año. Ejemplo de ello son el llamado *método japonés* (Saito and Matsuo, 1974), el *método belga* (Dogniaux and Sneyers, 1977; Sneyers, 1979) o el *método danés* (Andersen et al., 1977, 1974; Lund, 1974). Este último fue especialmente influyente, ya que fue tomado como referencia por los laboratorios *Sandia* para generar unos nuevos archivos climáticos estadounidenses, los llamados *Typical Meteorological Years* (US-TMY; Hall et al., 1978; U.S. National Climatic Center, 1981). Este se conoce comúnmente como el *método Sandia* y, desde entonces, ha sido ampliamente utilizado en diversas partes del mundo. De hecho, aunque la ASHRAE desarrolló un nuevo método para la generación de los *Weather Year for Energy Calculations* (WYEC; Crow, 1984, 1981, 1980) y los WYEC2 (Augustyn, 1998; Stoffel and Rymes, 1998), posteriormente adoptó el *método Sandia* para la generación de los *International Weather for Energy Calculations* (IWEC; Thevenard and Brunger, 2001) y los IWEC2 (Huang et al., 2014), ambos muy populares en el desarrollo de simulaciones energéticas alrededor del mundo. Los US-TMY han continuado desarrollándose en estos años, publicándose su segunda (US-TMY2; Marion and Urban, 1995) y tercera versión (US-TMY3; Wilcox and Marion, 2008).

En Europa, el *método belga* fue escogido inicialmente para generar los *Test Reference Years* europeos (EU-TRY; Lund, 1985; Lund and Eidorff, 1981). Este método podía ser automatizado completamente, no requiriendo de la intervención de ninguna persona experta para el filtrado inicial de la serie de datos (algo que sí precisaba el *método danés*, por lo que resultaba más costoso y fue descartado). Sin embargo, una adaptación del *método danés* fue posteriormente utilizada para elaborar los *Design Reference Years* europeos (EU-DRY; Lund, 1995; Skartveit et al., 1994), aunque su desarrollo se limitó a cuatro países.

En el año 2005, la norma ISO 15927-4 establece un nuevo método para la selección de un año meteorológico tipo (el *método ISO*). Aunque este cita expresamente los EU-DRY, en realidad se fundamenta en el *método sandia*, el ya empleado para desarrollar los *TMY* estadounidenses. Al contrario de lo que propone el *método danés*, donde se utilizan las medias y desviaciones estándar para escoger los meses

Among the first weather files published by a public body are the US *Test Reference Years* (US-TRYs; U.S. National Climatic Center, 1976). These, however, were not very popular. The method, apparently developed by ASHRAE (as reported by Hatch, 1986), was based on the selection of a full calendar year from the total available data series, which leads to problems of representativeness in some of its months.

Most approaches have opted to compose a typical meteorological year artificially, based on the selection of typical months which are then concatenated to form a year. Examples are the so-called *Japanese method* (Saito and Matsuo, 1974), the *Belgian method* (Dogniaux and Sneyers, 1977; Sneyers, 1979) or the *Danish method* (Andersen et al., 1977, 1974; Lund, 1974). The latter was particularly influential, as it was taken as a reference by the Sandia Laboratories to generate new US weather files, the so-called *Typical Meteorological Years* (US-TMY; Hall et al., 1978; U.S. National Climatic Center, 1981). This is commonly known as the *Sandia method* and has since then been widely used in different parts of the world. In fact, although ASHRAE developed a new method for the generation of the *Weather Year for Energy Calculations* (WYEC; Crow, 1984, 1981, 1980) and the WYEC2 (Augustyn, 1998; Stoffel and Rymes, 1998), it subsequently adopted the Sandia method for the generation of the *International Weather for Energy Calculations* (IWEC; Thevenard and Brunger, 2001) and the IWEC2 (Huang et al., 2014), both of which are very popular in the development of energy simulations around the world. The US-TMYs have been further refined over the years, with the publication of the second (US-TMY2; Marion and Urban, 1995) and third versions (US-TMY3; Wilcox and Marion, 2008).

In Europe, the *Belgian method* was initially chosen to generate the European *Test Reference Years* (EU-TRY; Lund, 1985; Lund and Eidorff, 1981). This method could be fully automated, requiring no expert intervention for the initial filtering of the dataset (which the *Danish method* did, and was therefore more costly and discarded). However, an adaptation of the *Danish method* was subsequently used to develop the European *Design Reference Years* (EU-DRY; Lund, 1995; Skartveit et al., 1994), although its development was limited to four countries.

In 2005, the ISO 15927-4 standard established a new method for the selection of a typical meteorological year (the *ISO method*). Although it explicitly references the EU-DRY, it is in fact based on the *Sandia method*, which was already used to develop the US TMYs. Contrary to the *Danish method*, where means and standard deviations are used to choose the months that best correspond to those of the total period considered, the Sandia

Tabla 14.1 Selección de algunos de los archivos climáticos más conocidos a nivel global. Cada uno de ellos se relaciona con la metodología empleada para la selección de un año meteorológico típico, ya sea la original (■) o una modificación de ésta (□).

Table 14.1 A selection of some of the best known global weather files. Each of them is related to the methodology used for the selection of a typical meteorological year, either the original one (■) or a modified version of it (□).

Acronym	Name	Publisher	Year	Temporal range	N Sites	Geographic target	Methodology							
							ASHRAE ¹	Danish ²	Belgian ³	Sandia ⁴	ISO ⁵			
US-TRY	US Test Reference Year	US National Climatic Center (NCC, 1976)	1976	~1948 – 1975	60	US	□							
US-TMY	US Typical Meteorological Year	US National Climatic Center (Hall et al., 1978; NCC, 1981)	1978	1952 – 1975	230 (+4)	US, (CU, PR, MH, PW)					■			
WYEC	Weather Year for Energy Calculations	ASHRAE (Crow, 1980; 1981; 1985)	1980	1939 – 1978	51	US, CA	■							
EU-TRY	European Test Reference Year	Commission of the European Communities (Lund and Eidorff, 1981; Lund, 1985)	1981	1951 – 1980 ⁶	29	BE, DK, FR, IE, IT, NL, UK		□	■					
WYEC2	Weather Year for Energy Calculations v.2	ASHRAE (Augustyn, 1998; Stoffel and Rymes, 1998)	1984	1939 – 1978	77	US, CA	■							
EU-DRY	European Design Reference Year	International Energy Agency (Skarveit et al., 1994; Lund, 1995)	1994	1968 – 1989 ⁶	-	DK, NO, SE, CH				□				
US-TMY2	US Typical Meteorological Year v.2	US National Renewable Energy Laboratory (Marion and Urban, 1995)	1995	1961 – 1990	239	US							□	
IWEC	International Weather for Energy Calculations	ASHRAE (Thevenard and Brunger, 2001)	2001	1982 – 1999	227	Worldwide								□
US-TMY3	US Typical Meteorological Year v.3	US National Renewable Energy Laboratory (Wilcox and Marion, 2008))	2008	1976 – 2005	1020	US								□
IWEC2	International Weather for Energy Calculations	ASHRAE (Huang et al., 2014)	2014	1984 – 2008	3012	Worldwide								□
TMYx	Worldwide Typical Meteorological Year	OneBuilding repository (OneBuilding, 2015)	2015	2004 – 2018 ⁷	13296	Worldwide								□
EU-TMY	European Typical Meteorological Year	European Commission (EU Science Hub, 2017)	2017	2007 – 2016	∞ ⁸	EU-28								□

¹ Crow (1984, 1981, 1980, 1970). ² Andersen (1977, 1974); Lund (Lund, 1974). ³ Dogniaux and Sneyers (1977); Sneyers (Sneyers, 1979), translated to English by Lund and Eidorff (1981). ⁴ Hall et al. (1978). ⁵ ISO 15927-4:2005 (ISO, 2005). ⁶ Each country used a subset of years, usually with a length between 10 and 20 years. ⁷ About 80% of the total locations use this timespan in the last version published in Feb, 2020. There are other TMYx versions for each location that include all the available time period. ⁸ Locations are selected using a graphical interface and are referenced using geographical coordinates, thus it seems (EU)TMYs are not limited to a pre-determined set of locations.

que mejor se corresponden con los del periodo total considerado, el método *Sandia* emplea las funciones de distribución conjunta (CDF, por sus siglas en inglés). Es decir, calcula la frecuencia con la que se da cada valor de un parámetro concreto (p. ej., la temperatura media diaria) en un mes dado (p. ej., enero), y lo compara con las mismas frecuencias obtenidas para ese mismo mes a lo largo de toda la serie (p. ej., todos los meses de enero a lo largo de 30 años). En la **Figura 14.1** se muestra un ejemplo de estas funciones, desarrollada a partir de Hall et al. (1978).

method uses Cumulative Distribution Functions (CDF). That is, it calculates the frequency with which each value of a particular parameter (e.g., mean daily temperature) occurs in a given month (e.g., January), and compares it with the frequencies obtained for the same month over the entire series (e.g., all January months over 30 years). An example of these functions, developed from Hall et al. (1978), is shown in **Figure 14.1**.

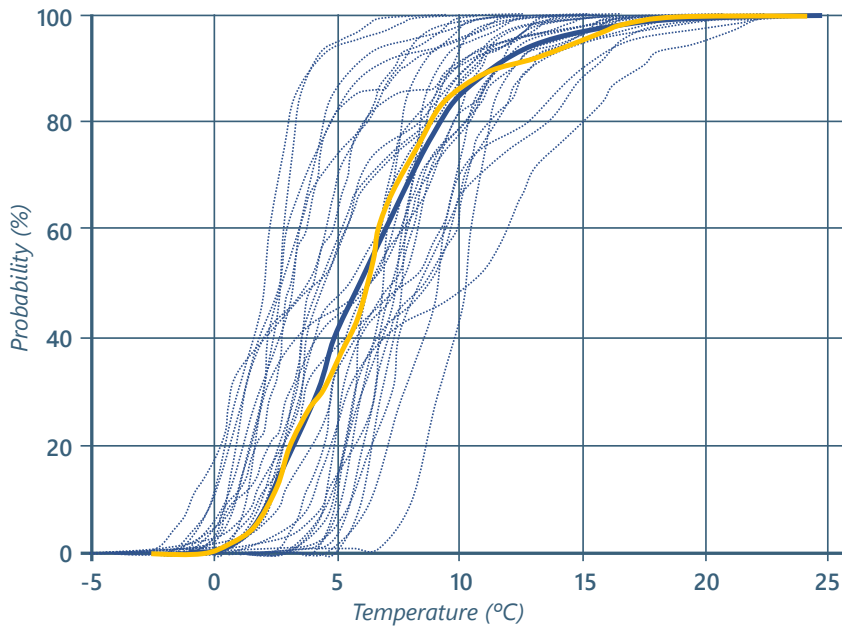


Figura 14.1 Ejemplo de representación de la función de distribución conjunta (CDF, por sus siglas en inglés) para un parámetro dado (p. ej., temperatura) y durante un mes concreto (p. ej., febrero). Las líneas de puntos se corresponden con la CFD de cada uno de los años contenidos en la serie, mientras que la línea continua representa la CFD de todos los años en conjunto. Se destaca en amarillo la CFD del año que mejor se corresponde con la del conjunto de la serie. Elaborada a partir de un ejemplo de Hall et al. (1978).

Figure 14.1 Example of a representation of the Cumulative Distribution Function (CDF) for a given parameter (e.g. temperature) and for a given month (e.g. February). The dotted lines correspond to the CFD for each of the years contained in the series, while the solid line represents the CFD for all years combined. The CFD of the year that best matches the combined CFD of the series is highlighted in yellow. Based on an example found in Hall et al. (1978).

Para valorar cómo de diferentes son dos CDFs, tanto el método *Sandia* como el método *ISO* emplean el estadístico de Finkelstein-Schafer (FS; Finkelstein and Schafer, 1971), el cual se deriva a su vez del estadístico de Kolmogorov-Smirnov (KS; Massey, 1951). Los estadísticos KS y FS calculan, para cada punto de la distribución (i), la diferencia entre las dos CDFs en valor absoluto ($\hat{\partial}$). En el caso del estadístico KS, este es igual al valor máximo de todos los calculados. En el caso del estadístico FS, el resultado es igual al cociente entre la suma de las diferencias entre las dos CDFs registradas en cada punto ($\hat{\partial}$) y el número total de observaciones (n):

To assess how different two CDFs are, both the *Sandia* and *ISO* methods use the Finkelstein-Schafer statistic (FS; Finkelstein and Schafer, 1971), which in turn is derived from the Kolmogorov-Smirnov statistic (KS; Massey, 1951). The KS and FS statistics calculate, for each point of the distribution (i), the difference between the two CDFs in absolute value ($\hat{\partial}$). In the case of the KS statistic, this is equal to the maximum value of all those calculated. In the case of the FS statistic, the result is equal to the quotient between the sum of the differences between the two CDFs recorded at each point ($\hat{\partial}$) and the total number of observations (n):

$$FS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{\partial}_i \quad (4)$$

Each parameter (j) has its own CDF for each month and therefore its own FS_j statistic. In order to compare them as a whole, they must be aggregated into a single indicator, which in the *Sandia method* is called WS . This process is usually done by means of a weighted average, where more weight (w_j) can be given to those parameters that are estimated to be more important:

$$WS = \sum_{j=1}^m w_j FS_j \quad (5)$$

The distribution of these weights has also been discussed, leading to different weightings. **Table 14.2** summarises the weights used for a selection of weather files. In the case of the *ISO method*, the three parameters used (dry bulb temperature, humidity and solar radiation) take the same weight, so the average is not weighted. In this sense, Kalamees et al. (2012) propose adjusting the weights of the *ISO method* according to the importance of each parameter in the energy simulation, and adjusting their value according to geographical location and time of year. However, this procedure requires a rather thorough prior analysis using energy simulation tools, which makes it difficult to apply. The EU-TMY (EU Science Hub, 2017), the latest weather files made available by the European Commission, are adjusted to the original weights proposed by the *ISO method*.

La distribución de estos pesos también ha sido objeto de discusión, dando lugar a diferentes ponderaciones. La **Tabla 14.2** resume los pesos empleados para una selección de archivos climáticos. En el caso del *método ISO*, los tres parámetros empleados (temperatura de bulbo seco, humedad y radiación solar) toman el mismo peso, por lo que el promedio no se pondera. En este sentido, Kalamees et al. (2012) propone ajustar los pesos del *método ISO* atendiendo a la importancia de cada parámetro en la simulación energética, y ajustando su valor en función de la ubicación geográfica y el momento del año. Sin embargo, este procedimiento requiere de un análisis previo bastante minucioso empleando herramientas de simulación energética, lo que dificulta su aplicación. Los EU-TMY (EU Science Hub, 2017), últimos archivos climáticos puestos a disposición por la Comisión Europea, se ajustan a los pesos originales planteados por el *método ISO*.

Tabla 14.2 Distribución de pesos para la suma ponderada de los estadísticos de Finkelstein-Schafer, según distintas adaptaciones del método Sandía y el método ISO.

Table 14.2 Distribution of weights for the weighted sum of the Finkelstein-Schafer statistics, according to different adaptations of the Sandia method and the ISO method.

Weather file	Reference	Weights				Total
		Dry-bulb temperature	Wet bulb temperature	Wind speed	Solar radiation	
US-TMY	Hall et al. (1978)	4	4	4	12	24
US-TMY2	Marion and Urban (1995)	4	4	2	10	20
IWEC	Thevenard and Brunger (2001)	8	2	2	8	20
US-TMY3	Wilcox and Marion (2008)	4	4	2	10	20
IWEC2	Huang et al. (2014)	4	4	2	10	20
EU-TMY	(EU Science Hub, 2017; ISO, 2005)	1	-	1	1	3

The calculation of the WS indicator is used to compare all the candidates and select those that minimise its value. In the case of the *ISO method*, the three candidates with the lowest WS are selected for a final filtering, where the month with a monthly mean wind speed most similar to that of the complete series is selected. In the case of the *Sandia method*, the final selection is made on five candidates based on the dry bulb temperature and global solar radiation, although taking into account the frequency with which very high or low values occur on consecutive days.

El cálculo del indicador WS sirve para comparar todos los candidatos y seleccionar aquellos que minimizan su valor. En el caso del *método ISO*, los tres candidatos con menor WS son seleccionados para un último filtrado, donde se selecciona el mes que presenta una velocidad de viento media mensual más parecida a la de la serie completa. En el caso del *método Sandía*, la selección final se hace sobre cinco candidatos y sobre la temperatura de bulbo seco y la radiación solar global, aunque atendiendo a la frecuencia con la que se dan valores muy altos o bajos en días consecutivos.

Una vez seleccionados los meses más representativos, el año meteorológico típico puede componerse concatenando todos estos meses y suavizando las transiciones a comienzo y a final de mes. Este último paso también varía en función de la metodología consultada, aplicándose diversos métodos de interpolación y considerándose distinto número de horas. En el caso del *método ISO*, se lleva a cabo una interpolación lineal que sustituye los valores de las últimas ocho horas de un mes y las primeras ocho horas del mes siguiente.

Este proceso da como resultado un año meteorológico típico para una ubicación concreta y un periodo temporal determinado. En el siguiente apartado se resumen los detalles y resultados obtenidos durante la creación de un año meteorológico típico para cada punto urbano, y para el cual se ha empleado el *método ISO*.

14.2. Obtención de un año meteorológico típico para cada punto urbano

Una vez determinada la metodología, la confección del año meteorológico típico continúa con la selección de una ventana temporal adecuada. En esta investigación se ha trabajado con las series de datos comprendidas entre 2008 y 2017. Estos 10 años pueden parecer escasos si se comparan con los rangos temporales empleados para la generación de los IWEC2 (25 años) o los TMY3 estadounidenses (30 años). Sin embargo, se encuentran dentro de los límites aceptados por la propia norma ISO (10 años) y en línea con los TMY europeos (10 años) y los TMYx (15 años).

Debe tenerse en cuenta que el clima no se encuentra en un estado estacionario. Aunque históricamente los cambios del clima se han considerado lentos, la actual evidencia científica derivada del estudio del cambio climático destaca que estos cambios se han acelerado. Esto ha suscitado un importante debate sobre la pertinencia de trabajar con series temporales tan largas, a la vez que ha cuestionado la validez de los archivos climáticos basados en series temporales relativamente antiguas (Crawley and Lawrie, 2021; Jentsch et al., 2013, 2008). Incluso se ha planteado el desarrollo de años meteorológicos típicos *con tendencia* (*trended typical meteorological years*; Huang, 2020). Estos en lugar de buscar un año típico en un periodo temporal pasado, buscan *centrar* los archivos climáticos en el presente y futuro próximo (p. ej., 2014 – 2025) para así mejorar las previsiones de demanda energética de sus edificios. Utilizar una ventana temporal más acotada y reciente es, por tanto, una buena estrategia a la hora de desarrollar archivos climáticos representativos de las condiciones climáticas actuales.

Para seleccionar el año meteorológico típico, así como para conformar un archivo climático, es necesario contar con otros parámetros además de la temperatura y humedad relativa, ya modelados en la etapa anterior (**apartado 13.5**). En este sentido, los valores horarios para el periodo 2008 – 2017 de radiación solar (directa y difusa), viento (velocidad y dirección) y nubosidad se han obtenido

Once the most representative months were selected, the typical meteorological year can be compiled by concatenating all these months and smoothing the transitions at the beginning and at the end of the month. This last step also varies according to the methodology used, with different interpolation methods being applied and different numbers of hours being considered. In the case of the *ISO method*, a linear interpolation is carried out, replacing the values of the last eight hours of one month and the first eight hours of the following month.

This process results in a typical meteorological year for a given location and a given time period. The following section summarises the details and results obtained during the creation of a typical meteorological year for each urban location, and for which the *ISO method* was used.

14.2. Obtaining a typical meteorological year for each urban site

Once the methodology was determined, the preparation of the typical meteorological year continues with the selection of a suitable time window. In this research, it was decided to work with the data series from 2008 to 2017. These 10 years may seem short when compared to the time ranges used for the generation of the US IWEC2 (25 years) or TMY3 (30 years). However, they are within the limits accepted by the ISO standard itself (10 years) and in line with European TMYs (10 years) and the TMYx (15 years).

It should be noted that the climate is not stationary. Although climate changes have historically been regarded as slow, current scientific evidence from the study of climate change highlights that these changes have accelerated. This has led to considerable discussion about the appropriateness of working with such long time series, while questioning the validity of weather files based on relatively old time series (Crawley and Lawrie, 2021; Jentsch et al., 2013, 2008). Indeed, the development of *trended typical meteorological years* (Huang, 2020) has been recently proposed. These, instead of looking for a typical year in a past time period, aim to focus the weather files on the present and near future (e.g. 2014 - 2025) in order to improve building energy demand forecasts. Using a narrower and more recent time window is therefore a good strategy when developing representative weather files for current climate conditions.

In order to select the typical meteorological year, as well as to build a weather file, it is necessary to have other parameters in addition to temperature and relative humidity, already modelled in the previous stage (**section 13.5**). In this sense, hourly values for the period 2008 – 2017 for solar radiation (direct and diffuse), wind (speed and direction) and cloudiness have been obtained from the AEMET observatories located in Barajas and

Ciudad Universitaria. The same records have been used for all urban locations, without exception. This is because certain variables, such as solar radiation or cloudiness, vary little at the urban level; others, such as wind speed and direction, are highly dependent on the urban structure at the microscale and it would be very difficult to assign a profile adjusted to the reality of each environment. This practice is, however, not unique to this study. The *Urban Weather Generator* (UWG; Bueno et al., 2013; Mao and Norford, 2021), for example, also takes the solar radiation values from the weather file used as a reference.

Regarding the preparation of the data, it should be noted that all missing records have been generated by linear interpolation, in accordance with the *ISO method*. This interpolation has also been applied to the cloudiness values, which had a frequency of one record every eight hours.

The result is 25 typical meteorological years, of which 20 correspond to the locations of the MODIFICA monitoring campaign, and 5 to the AEMET observatories located in the municipality of Madrid. **Table 14.3** shows the mean values of temperature and relative humidity. It can be seen that these present a very similar dynamic to that of **Table 12.1** (year 2017), with an annual temperature difference near 2 °C between the warmest site (Embajadores) and the reference site (Barajas).

A first analysis of the potential impact on the energy demand of buildings can be made on the basis of typical weather years. For this purpose, Heating Degree Days (HDD) and Cooling Degree Days (CDD) were estimated. For each day, these can be estimated as the daily average of heating degree hours (HDD) and cooling degree hours (CDD):

de los observatorios de la AEMET situados en Barajas y en Ciudad Universitaria. Se han utilizado los mismos registros para todas las ubicaciones urbanas, sin excepción. Esto se debe a que ciertas variables, como la radiación solar o la nubosidad, varían escasamente a nivel urbano; otras, como la velocidad y dirección del viento, son muy dependientes de la estructura urbana en la escala micro y resulta muy complicado asignar un perfil ajustado a la realidad de cada entorno. Esta práctica no es, sin embargo, única de este estudio. El *Urban Weather Generator* (UWG; Bueno et al., 2013; Mao and Norford, 2021), por ejemplo, también toma los valores de radiación solar del archivo climático empleado como referencia.

En cuanto a la preparación de los datos, debe señalarse que todos los registros ausentes han sido generados mediante interpolación lineal, de acuerdo con lo establecido por la norma ISO. Esta interpolación también se ha aplicado a los valores de nubosidad, cuya frecuencia era octohoraria.

El resultado son 25 años meteorológicos típicos, de los cuales 20 se corresponden con las ubicaciones de la campaña de monitorización MODIFICA, y 5 con los observatorios de la AEMET situados en el municipio de Madrid. La **Tabla 14.3** muestra los valores medios de temperatura y humedad relativa. Se puede observar que estos presentan una dinámica muy parecida a la de la **Tabla 12.1** (año 2017), con una diferencia de temperatura anual próxima a los 2 °C entre el punto más cálido (*Embajadores*) y el punto de referencia (*Barajas*).

A partir de los años meteorológicos típicos se puede realizar un primer análisis del potencial impacto sobre la demanda energética de los edificios. Con este fin se han estimado los grados día de calefacción (*Heating Degree Days, HDD*) y de refrigeración (*Cooling Degree Days, CDD*). Para cada día, éstos se pueden estimar como la media diaria de grados hora de calefacción (*HDH*) y refrigeración (*CDH*):

$$HDD = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} (HDH_t) \quad (6)$$

$$CDD = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} (CDH_t) \quad (7)$$

HDH and CDH are calculated as the difference between the temperature at time t (T_t) and a reference temperature for both heating ($T_{ref, H}$) and cooling ($T_{ref, C}$):

Los HDH y CDH se calculan como la diferencia entre la temperatura en el instante t (T_t) y una temperatura de referencia tanto para calefacción ($T_{ref, H}$) como para refrigeración ($T_{ref, C}$):

$$HDH = \begin{cases} T_{ref, H} - T_t & \text{for } T_t \leq T_{ref, H} \\ 0 & \text{for } T_t > T_{ref, H} \end{cases} \quad (8)$$

$$CDH = \begin{cases} T_t - T_{ref, C} & \text{for } T_t \geq T_{ref, C} \\ 0 & \text{for } T_t < T_{ref, C} \end{cases} \quad (9)$$

Site		Temperature average			Relative humidity average		
ID	Name	Year	Jun — Sep	Oct — May	Year	Jun — Sep	Oct — May
MODIFICA							
1	Embajadores	17.2	25.6	13.0	50.1	34.4	57.9
2	Imperial	16.1	24.7	11.7	54.9	37.6	63.6
3	La Chopera	17.1	25.7	12.8	50.6	33.2	59.3
4	Estrella	16.7	25.3	12.4	51.6	34.6	60.1
5	Pacífico	16.9	25.3	12.8	51.4	35.6	59.2
6	Guindalera	16.3	24.8	12.1	51.9	35.4	60.2
7	Recoletos	16.8	25.0	12.7	50.7	35.4	58.4
8	Hispanoamérica	16.4	24.7	12.3	52.1	36.5	60.0
9	Cuatro Caminos	16.9	25.2	12.7	50.8	35.0	58.8
10	Arapiles	16.6	24.9	12.4	50.9	34.8	59.0
11	Peña grande	15.9	24.3	11.7	54.1	37.9	62.1
12	Aravaca	15.5	24.2	11.2	56.8	38.9	65.8
13	Los Cármenes	15.8	24.8	11.3	55.9	36.5	65.6
14	Opañel	16.6	25.3	12.2	52.5	35.3	61.1
15	San Diego	17.1	25.8	12.7	50.3	32.9	59.0
16	Horcajo	15.7	24.6	11.2	54.1	35.7	63.4
17	Pueblo Nuevo	16.4	24.8	12.2	51.1	33.4	60.0
18	Canillas	16.4	25.3	11.9	54.3	35.5	63.7
19	Los Ángeles	15.8	24.4	11.5	53.7	36.3	62.4
20	Canillejas	16.5	25.2	12.1	52.8	35.0	61.7
AEMET							
901	Barajas (reference)	15.3	24.0	11.0	56.7	38.9	65.7
902	Retiro	15.7	24.4	11.4	60.3	47.5	66.8
903	Cuatro Vientos	15.6	23.9	11.4	57.5	41.0	65.7
904	Ciudad Universitaria	14.5	22.8	10.3	58.0	46.3	63.8
905	El Goloso	13.6	21.7	9.6	64.9	47.6	73.6

Tabla 14.3 Valores medios de temperatura y humedad relativa correspondientes al año meteorológico tipo seleccionado para cada ubicación.

Table 14.3 Average values of temperature and relative humidity for the selected typical meteorological year for each location.

En un principio se consideró emplear el estándar de confort adaptativo para determinar la temperatura de referencia, cuya aplicación ha sido recientemente extendida a edificios con aire acondicionado donde éste no está en uso (véase ANSI/ASHRAE, 2021; de Dear and Brager, 1998). Sin embargo, finalmente se ha optado por utilizar la temperatura de referencia empleada por el Código Técnico de la Edificación (CTE) español (véase **Tabla 14.4**, Villar Burke et al., 2020). En él los CDD y HDD se calculan en base 25 y 18 °C, respectivamente. Esto nos permite comparar los resultados obtenidos para Madrid con las zonas climáticas definidas por el CTE para el conjunto del Estado.

La ciudad de Madrid y su entorno inmediato, por su altitud y ubicación, clasifica como D3 (Código Técnico de la Edificación, 2019a). Esto se traduce en 2225 HDD₁₈ y 175 CDD₂₅, los cuales se extraen directamente del archivo climático para la zona climática D3. Sin embargo, los resultados obtenidos para el periodo 2008 – 2017 en Barajas muestran una imagen muy diferente, con unos 1869 HDD₁₈ y 274 CDD₂₅, más próximos a la zona climática C4 (véase la **Tabla 14.5**).

Initially, it was considered to use the adaptive comfort standard to determine the reference temperature, whose application was recently extended to air-conditioned buildings where air conditioning is not in use (see ANSI/ASHRAE, 2021; de Dear and Brager, 1998). However, it was finally decided to use the reference temperature used by the CTE (see **Table 14.4**, Villar Burke et al., 2020). Here the CDD and HDD are calculated based on 25 and 18 °C, respectively. This allows us to compare the results obtained for Madrid with the climatic zones defined by the CTE for the whole of Spain.

The city of Madrid and its immediate surroundings, due to its altitude and location, is classified as D3 (Código Técnico de la Edificación, 2019a). This translates into 2225 HDD₁₈ and 175 CDD₂₅, which are extracted directly from the weather file for climate zone D3. However, the results obtained for the period 2008 – 2017 in Barajas show a very different picture, with 1869 HDD₁₈ and 274 CDD₂₅, closer to climate zone C4 (see **Table 14.5**).

Tabla 14.4 Grados día de calefacción (HDD) y refrigeración (CDD) correspondientes a las distintas zonas climáticas de España, según el CTE (Villar Burke et al., 2020).

Table 14.4 Heating (HDD) and cooling (CDD) degrees days corresponding to the different climatic zones of Spain, according to the CTE (Villar Burke et al., 2020).

Caracterización de los climas de referencia peninsulares, Baleares, Ceuta y Melilla, Grados-día de calefacción					
	ZCI				
	A	B	C	D	E
Grados-día de calefacción (HDD ₁₈)	870	1130	1650	2225	2750

Caracterización de los climas de referencia peninsulares, Baleares, Ceuta y Melilla, Grados-día de refrigeración				
	ZCV			
	1	2	3	4
Grados-día de refrigeración (CDD ₂₅)	30	75	175	250

Tabla 14.5 Grados hora de refrigeración (base 25 °C) y de calefacción (base 18 °C) obtenidos a partir del año meteorológico tipo seleccionado para cada ubicación.

Table 14.5 Cooling (base 25 °C) and heating (base 18 °C) degree hours obtained from the selected typical meteorological year for each location.

Site ID	Name	Total	CDD ₂₅ ¹		Total	HDD ₁₈ ²	
			Daytime	Nighttime		Daytime	Nighttime
MODIFICA							
1	Embajadores	309.3	258.6	50.7	1418.4	549.2	869.2
2	Imperial	281.5	252.2	29.3	1700.4	619.8	1080.7
3	La Chopera	325.9	267.4	58.5	1478.3	556.6	921.7
4	Estrella	295.3	247.2	48.1	1541.0	601.4	939.6
5	Pacífico	287.7	244.5	43.2	1458.7	582.2	876.5
6	Guindalera	272.9	235.2	37.6	1596.1	642.9	953.3
7	Recoletos	259.9	217.9	41.9	1459.7	588.2	871.6
8	Hispanoamérica	249.1	213.2	35.8	1550.0	624.7	925.3
9	Cuatro Caminos	273.1	226.8	46.3	1461.2	592.2	868.9
10	Arapiles	257.2	214.8	42.5	1523.7	616.5	907.2
11	Peñagrande	244.4	217.3	27.1	1673.5	650.8	1022.8
12	Aravaca	267.8	252.8	15.0	1817.1	638.0	1179.1
13	Los Cármenes	293.4	266.0	27.4	1785.5	649.7	1135.8
14	Opañel	305.0	263.4	41.6	1596.0	611.8	984.2
15	San Diego	327.2	272.7	54.5	1476.0	579.1	896.8
16	Horcajo	279.0	250.0	29.0	1789.7	698.7	1091.0
17	Pueblo Nuevo	270.1	228.0	42.1	1590.2	630.2	960.1
18	Canillas	311.3	276.9	34.4	1665.7	615.0	1050.7
19	Los Ángeles	260.9	231.8	29.1	1746.5	686.0	1060.5
20	Canillejas	309.5	268.8	40.7	1611.0	627.6	983.4
AEMET							
901	Barajas	273.8	252.1	21.6	1869.3	673.6	1195.8
902	Retiro	240.9	222.1	18.9	1741.2	677.0	1064.2
903	Cuatro Vientos	225.7	203.3	22.4	1771.1	659.2	1112.0
904	Ciudad Universitaria	186.2	180.8	5.4	2011.3	743.5	1267.9
905	El Goloso	143.7	139.4	4.3	2141.2	797.5	1343.7

¹ Cooling Degree Days, baseline 25 °C. ² Heating Degree Days, baseline 18 °C.

Estos resultados se acentúan todavía más en el caso del centro urbano (*Embajadores*), donde se alcanzan valores de 1418 HDD₁₈ y 309 CDD₂₅, bordeando la zona climática B4. Estos resultados muestran el potencial impacto tanto del cambio climático como de la isla de calor urbana sobre la demanda energética de nuestros edificios, y pone de relieve la necesidad de actualizar y mejorar la localización de los archivos climáticos empleados en la simulación energética.

Como cabría esperar, las necesidades de calefacción son menores en aquellos puntos donde la intensidad de la isla de calor es mayor, con una reducción de hasta el 24.1% con respecto al punto de referencia (Barajas). Las necesidades de refrigeración, por otro lado, parecen ser superiores en los puntos urbanos (+19.5%), aunque en este caso no parecen vincularse tan estrechamente con la intensidad de la isla de calor. Esto se debe a que la mayoría de los CDD se concentran durante el día, momento en el que las temperaturas son más altas. Durante la noche, cuando la isla de calor alcanza su mayor intensidad y muestra una distribución concéntrica más clara, apenas se dan el 10% de los CDD.

En el siguiente apartado se analiza con más detalle la distribución espacial de los CDD y HDD dentro del municipio de Madrid y su relación con las LCZs, además de plantearse una primera delimitación de las zonas climáticas urbanas de Madrid.

14.3. Delimitación de zonas climáticas urbanas y asignación de TMY

Aunque se dispone de datos suficientes para generar hasta 25 archivos climáticos diferentes para el municipio de Madrid, esta opción fue pronto descartada. Primero, sería cuestionable tanto la selección del número de puntos empleados, así como la representatividad de sus ubicaciones en el conjunto del municipio. También es probable que disponer de una cantidad tan elevada de archivos climáticos para un único municipio dificultase la selección del archivo climático más adecuado (a modo de ejemplo, Londres dispone únicamente de tres archivos climáticos urbanos, véase CIBSE, 2014). Pero quizás lo más relevante es que varios de estos puntos muestran dinámicas higrótérmicas muy parecidas entre sí. Es decir, el incremento de complejidad que se introduce al utilizar una gran cantidad de archivos climáticos debería quedar justificado por la obtención de resultados significativamente diferentes, algo que no parece que fuese a ser el caso.

Lo deseable sería contar con una batería de archivos climáticos que respondieran a una lógica común, a un sistema que ordenase y diese sentido a estos nuevos archivos climáticos. Desde el inicio de esta investigación se ha considerado que el sistema de clasificación de las LCZs (Stewart and Oke, 2012) podría ser empleado para este fin. Este sistema ha sido ampliamente estudiado a lo largo de esta tesis doctoral, especialmente durante la contextualización y análisis de las mediciones (capítulos 11 y 12). Con un número acotado de

These results are even more accentuated in the case of the urban centre (*Embajadores*), where values of 1418 HDD₁₈ and 309 CDD₂₅ are reached, bordering climate zone B4. These results show the potential impact of both climate change and the urban heat island on the energy demand of our buildings, and highlight the need to update and improve the location of the weather files used in the energy simulation.

As it might be expected, heating needs are lower at those points where the urban heat island intensity is higher, with a reduction of up to 24.1% with respect to the reference point (Barajas). Cooling needs, on the other hand, seem to be higher in urban locations (+19.5%), although in this case they do not seem to be as closely linked to the urban heat island intensity. This is because most of the CDD concentrates during the day, when temperatures are highest. During the night, when the urban heat island is at its most intense and shows a clearer concentric distribution, only 10% of the CDD occur.

The following section analyses in more detail the spatial distribution of the CDD and HDD within the municipality of Madrid and their relationship with the LCZs, as well as a first delimitation of the urban climatic zones of Madrid.

14.3. Delimitation of urban climatic zones and TMY designation

Although sufficient data is available to generate up to 25 different weather files for the municipality of Madrid, this option was soon discarded. First, both the selection of the number of sites used and the representativeness of their locations in the municipality as a whole could be argued. Having such a large number of weather files for a single municipality would also make it difficult to select the most appropriate weather file (for example, London has only three urban weather files, see CIBSE, 2014). But perhaps most relevant is that several of these sites show very similar hygrothermal dynamics. In other words, the increased complexity introduced by using a large number of weather files should be justified by obtaining significantly different results, which does not seem to be the case.

It would be desirable to have a set of weather files that respond to a common logic, a system that orders and makes sense of these new weather files. From the beginning of this research it was considered that the LCZ classification system (Stewart and Oke, 2012) could be used for this purpose. This system has been extensively studied throughout this PhD thesis, especially during the contextualisation and analysis of the measurements (Chapters 11 and 12). With a limited number of zones (5 in the case of Madrid) and its wide acceptance by the international community (see section 11.2),

this system seemed a reasonable choice that would also facilitate intercomparability with studies developed in other cities.

However, the analysis of the hourly and intra-urban evolution of the urban heat island showed that the LCZs are hardly able to reflect the diurnal temperature differences between urban locations. This is relevant, because although the urban heat island is a mainly nocturnal phenomenon, temperature differences occurring during the day are also relevant and should not be ignored when creating the weather files. In fact, it has already been shown in the previous section how the accumulation of cooling degree hours (CDD) during the day accounts, on average, for about 90% of the total.

This decoupling between CDDs and LCZs is evident in **Figure 14.2**. While the relationship between HDDs and LCZs seems quite clear, with a very marked concentric distribution (right image), this is not the case when analysing CDDs. In this case, the same LCZ can accumulate a very different number of CDDs (see sites 1, 7 and 9 in the image on the left). The criterion that denser LCZs should have higher temperatures (and thus more CDD) seems to be overturned, as well as the centrality criterion. Even if this relationship were

zonas (5 en el caso de Madrid) y su gran aceptación por parte de la comunidad internacional (véase **apartado 11.2**), este sistema parecía una elección razonable que, además, facilitaría la intercomparabilidad con estudios desarrollados en otras ciudades.

Sin embargo, el análisis de la evolución horaria e intraurbana de la isla de calor mostraron que las LCZs apenas son capaces de reflejar las diferencias de temperatura diurnas entre puntos urbanos. Esto es relevante, ya que aunque la isla de calor es un fenómeno fundamentalmente nocturno, las diferencias de temperatura que se producen durante el día también son relevantes y no deberían obviarse al crear los archivos climáticos. De hecho, ya se ha mostrado en el apartado anterior cómo la acumulación de grados hora de refrigeración (CDD) durante el día suponen, de media, cerca del 90% del total.

Este desacople entre CDD y LCZs queda patente en la **Figura 14.2**. Mientras que la relación entre HDD y LCZs parece bastante clara, con una distribución concéntrica muy marcada (imagen de la derecha), no ocurre lo mismo al analizar los CDD. En este caso, una misma LCZ puede acumular una cantidad muy diferente de CDD (véanse los puntos 1, 7 y 9 de la imagen de la izquierda). El criterio de que las LCZs más densas deberían contar con temperaturas más elevadas (y, por tanto, con más CDD) parece saltar por los aires, al

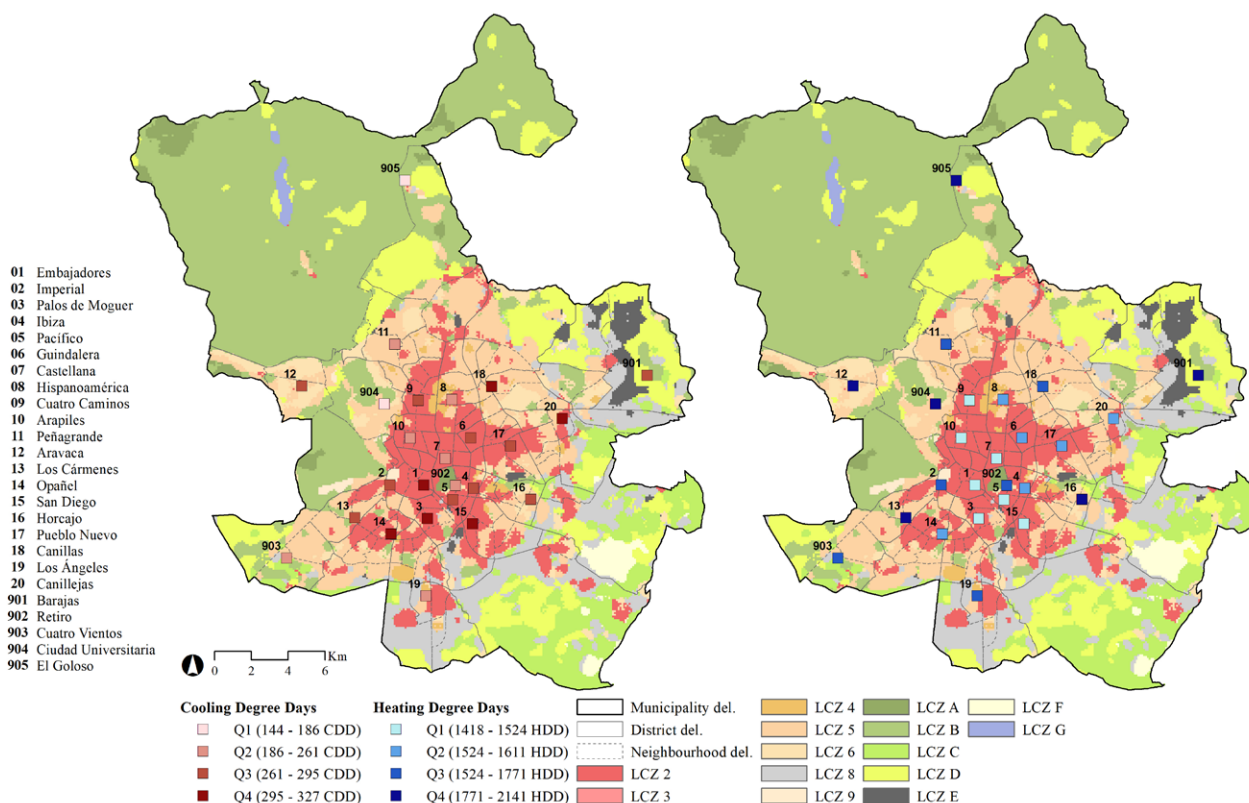


Figura 14.2 Grados día de refrigeración (CDD, izquierda) y de calefacción (HDD, derecha) obtenidos para cada ubicación. De fondo se muestran las LCZs de WUDAPT (Brousse et al., 2016). Nótese cómo los HDD siguen una distribución concéntrica y asociada a las LCZs, mientras que los CDD no tienen un patrón tan claro (p.ej., puntos 18 Canillas y 20 Canillejas).

Figure 14.2 Cooling degree days (CDD, left) and heating degree days (HDD, right) obtained for each location. WUDAPT LCZs are shown in the background (Brousse et al., 2016). Note how the HDDs follow a concentric distribution associated to the LCZs, while the CDDs do not have such a clear pattern (e.g., points 18 Canillas and 20 Canillejas).

igual que el criterio de centralidad. Incluso aunque esta relación fuese inversa por la influencia de la isla de frescor en las horas centrales del día, esta no parece verse asociada a las LCZs.

A la espera de que este u otro sistema de clasificación climática sea refinado para reflejar las diferencias diurnas de temperatura en entornos urbanos, esta investigación adopta un enfoque alternativo para definir las zonas climáticas. En concreto, se propone trabajar con la relación geostatística existente entre puntos urbanos. Es conocida la primera ley de la geografía enunciada por Tobler: *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things* (Tobler, 1970). Esta ley también se conoce como el *principio de autocorrelación espacial*, y se encuentra en el origen del desarrollo de diversas técnicas de interpolación espacial como la *interpolación mediante distancia inversa* (IDW) o el *kriging*. Instituciones como la AEMET suelen recurrir a ellas para modelar la distribución espacial de diversas variables meteorológicas (Amblar-Francés et al., 2020; Peral García et al., 2017).

Esta aproximación metodológica tiene sus limitaciones, ya que es total o parcialmente independiente del tejido subyacente. No obstante, gracias tanto a la densidad de puntos disponible como a la representatividad espacial de gran parte de las mediciones, en este estudio se puede disponer de una zonificación de HDD y CDD con un nivel de detalle bastante elevado. De hecho, esta metodología ya fue puesta a prueba satisfactoriamente por el autor de esta tesis en otro estudio sobre la vulnerabilidad asociada a la pobreza energética de verano en las ciudades de Madrid y Londres (Sánchez-Guevara et al., 2019).

En la **Figura 14.3** se muestra el proceso llevado a cabo para zonificar la ciudad de Madrid en función de los HDD y los CDD. Comienza con una interpolación espacial, tanto de los HDD como de los CDD, mediante un *cokriging*. Al igual que en Núñez Peiró et al. (2017), se utiliza un *kriging* de tipo ordinario. Este tipo de interpolación se realiza siguiendo la siguiente expresión:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (10)$$

Donde $\hat{Z}(s_0)$ es la predicción en un punto dado, $Z(s_i)$ el valor real en un punto i de un conjunto de puntos n , y λ_i un peso asociado a dicho punto. Este último valor, el peso, depende del tipo de modelo (*semivariograma*) que se emplee para describir la autocorrelación espacial de la variable. En este caso se ha optado por un semivariograma exponencial, el cual asume que la autocorrelación espacial se reduce exponencialmente con la distancia.

El resultado de la interpolación se ha utilizado, a su vez, para calcular y asociar un valor medio de HDD y CDD a cada unidad de una delimitación administrativa concreta. En este caso se ha optado por emplear la delimitación de barrio por dos motivos. Primero, porque es una delimitación administrativa fija (al contrario que las

reversed by the influence of the cool island in the central hours of the day, it does not seem to be associated with LCZs.

While waiting for this or another climate classification system to be refined to reflect diurnal temperature differences in urban environments, this research adopts an alternative approach to defining climate zones. In particular, it is proposed to work with the geostatistical relationship between urban points. Tobler's first law of geography is well known: *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things* (Tobler, 1970). This law is also known as the *spatial autocorrelation principle*, and it is at the origin of the development of various spatial interpolation techniques such as *inverse distance interpolation* (IDW) or *kriging*. Institutions such as AEMET often use them to model the spatial distribution of various meteorological variables (Amblar-Francés et al., 2020; Peral García et al., 2017).

This methodological approach has its limitations, as it is totally or partially independent from the underlying fabric. Nevertheless, thanks to both the density of available sites and the spatial representativeness of most of the measurements, a fairly detailed zoning of HDD and CDD is available in this study. In fact, this methodology has already been successfully tested by the author of this thesis in another study on the vulnerability associated with summer energy poverty in the cities of Madrid and London (Sánchez-Guevara et al., 2019).

Figure 14.3 shows the process carried out to zonify the city of Madrid in terms of HDDs and CDDs. It starts with a spatial interpolation of both HDDs and CDDs by means of *cokriging*. As in Núñez Peiró et al. (2017), ordinary *kriging* is used. This type of interpolation is performed according to the following expression:

Where $\hat{Z}(s_0)$ is the prediction at a given point, $Z(s_i)$ is the actual value at point i of a set of n points, and λ_i is a weight associated with that point. This last value, the weight, depends on the type of model (*semi-variogram*) used to describe the spatial autocorrelation of the variable. In this case we have chosen an exponential semi-variogram, which assumes that the spatial autocorrelation decreases exponentially with distance.

The result of the interpolation was in turn used to calculate and associate an average value of HDD and CDD to each unit in a specific administrative scale. In this case, the neighbourhood boundaries were selected for two reasons. First, because it is

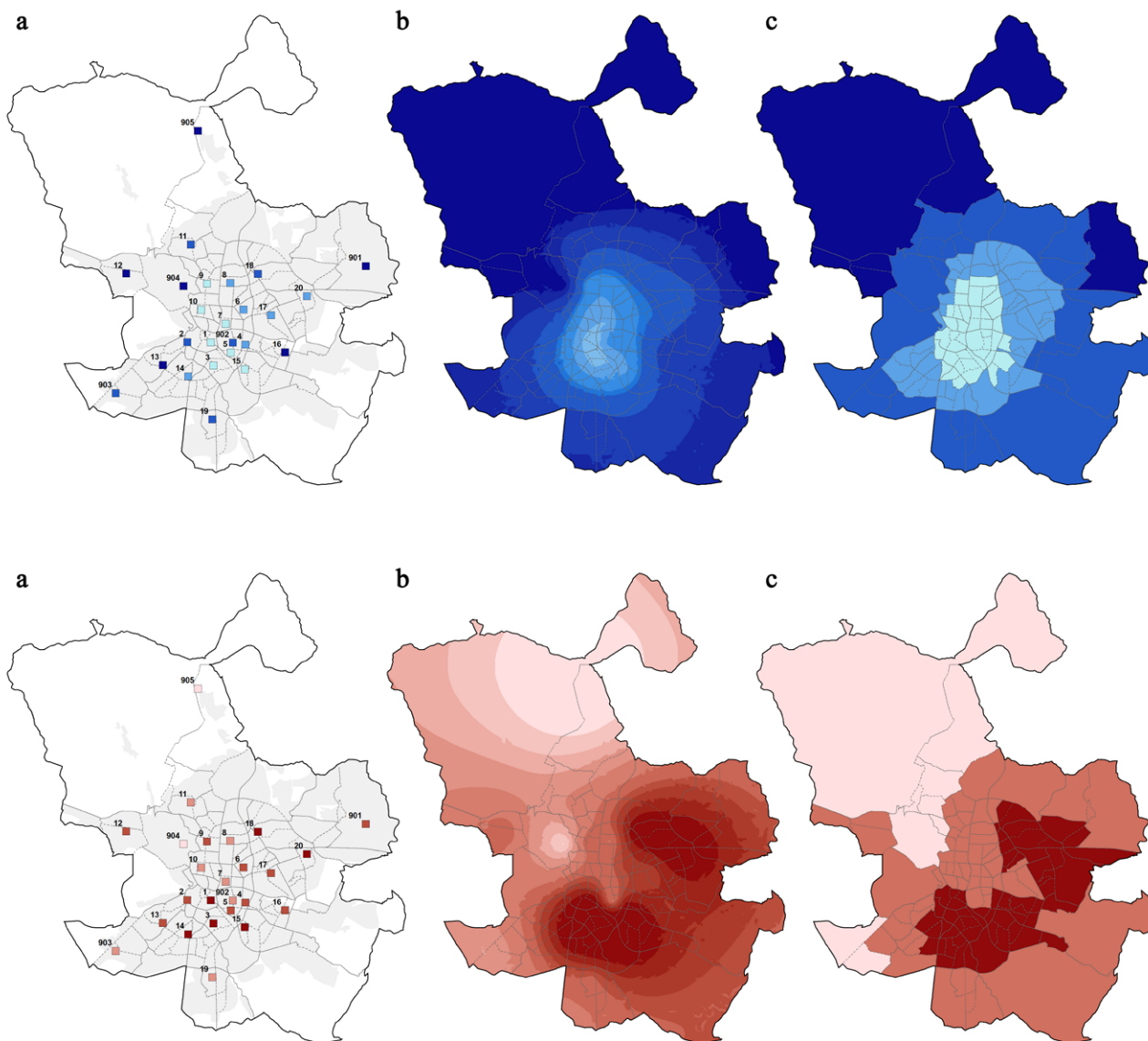


Figura 14.3 Procedimiento para delimitar las zonas climáticas de invierno (arriba) y verano (abajo) a partir de los grados día de calefacción (HDD) y de refrigeración (CDD), respectivamente. Primero (a) se geocalizan los HDD y los CDD para, posteriormente, (b) realizar una interpolación espacial dentro del municipio de Madrid. Por último, (c) se estiman los valores medios dentro de la delimitación administrativa barrio y se agrupan mediante el método de optimización de Jenks (Jenks, 1967).

Figure 14.3 Procedure to delimit winter (top) and summer (bottom) climate zones based on heating degree days (HDD) and cooling degree days (CDD), respectively. First (a) the HDD and CDD are geolocated and then (b) a spatial interpolation is performed within the municipality of Madrid. Finally, (c) the mean values within the administrative delimitation of the neighbourhood are estimated and clustered using the Jenks optimisation method (Jenks, 1967).

a fixed administrative delimitation (as opposed to census sections, which are adjusted according to their population, and can vary over time). Secondly, because its dimension corresponds correctly to that of the local climate scale (see section 10.1).

Finally, the neighbourhoods were clustered using the Jenks method (Jenks, 1967). This is an iterative method that optimises the clustering of one-dimensional variables, where the standard deviation within each class is minimised. For this, the number of clusters to be used must be predefined beforehand. After a trial-and-error process by testing different numbers of clusters, four class-

secciones censales, que se ajustan en función de su población, y pueden ser variables en el tiempo). En segundo lugar, porque su dimensión responde correctamente a la de la escala climática local (véase apartado 10.1).

Finalmente, los barrios se han agrupado (*clusterizado*) utilizando el método *Jenks*, o de cortes naturales (Jenks, 1967). Se trata de un método iterativo que optimiza la clusterización de variables unidimensionales, donde se minimiza la desviación típica dentro de cada clase. Para ello, debe predefinirse de antemano el número de clústeres que se quieren emplear. Tras un proceso de prueba y error ensayando diferentes números de clústeres, se han definido cuatro

clases para los HDD y tres clases para CDD. Se han nombrado siguiendo la nomenclatura del CTE para facilitar su interpretación (letras para las zonas climáticas de invierno y números para las de verano), pero empleando letras minúsculas y números romanos para poder diferenciarlas correctamente.

Los resultados de la clusterización se recogen en la **Tabla 14.6**. En ella se incluyen los valores límite de cada una de las clases, redondeadas a la decena más próxima. También se muestran las intersecciones entre los clústeres de verano y de invierno existentes para el municipio de Madrid, mostrado a su vez en la **Figura 14.4**. Estas intersecciones han dado lugar a 9 zonas climáticas urbanas (UCZ): *aII, aIII, bII, bIII, cI, cII, cIII, dI, dII*.

Cada una de estas UCZs lleva asociado un año meteorológico típico. Estos se han escogido de entre los puntos de medición contenidos en el interior de cada UCZ atendiendo a su nivel de concordancia con los rangos de HDD y CDD representados por cada UCZ. El nivel de concordancia se ha medido en función del error relativo medio (ε_i) de cada ubicación (i) con respecto al valor medio de la zona climática (UCZ):

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \left(\frac{|HDD_i - HDD_{UCZ}|}{HDD_{UCZ}} + \frac{|CDD_i - CDD_{UCZ}|}{CDD_{UCZ}} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

La **Tabla 14.7** recoge la selección de años meteorológicos típicos por UCZ, así como los valores de error relativo. Se han considerado tres niveles de concordancia: elevada ($\varepsilon < 5\%$), media ($\varepsilon < 10\%$) y reducida ($\varepsilon \geq 10\%$). Aunque estos valores son en cierto modo subjetivos, si se comparan los valores de HDD y CDD de cada año meteorológico típico con respecto a los rangos de cada UCZ, se observará que son relativamente conservadores, ya que todas las ubicaciones señaladas con una elevada correspondencia se encuentran dentro de los rangos de sus respectivas UCZ, tanto para los HDD como los CDD. Incluso en el único caso en el que la correspondencia es reducida, este se encuentra *dentro* de los rangos de la zona (en este caso particular, arroja un elevado error relativo por ser demasiado extremo).

Este procedimiento difiere del empleado por el CTE, donde los años meteorológicos típicos de cada zona climática se generan de forma sintética para que todas las zonas climáticas pertenecientes a un mismo clúster (p. ej., de invierno) compartan exactamente el mismo perfil de temperatura durante los meses pertenecientes a dicho clúster (octubre – mayo). No se ha seguido este procedimiento al considerar que zonas climáticas pertenecientes a un mismo clúster de invierno o de verano no tenían por qué compartir un mismo perfil de temperaturas. Por ejemplo, comparemos la zona *aIII* y la zona *cIII*. Aunque estas comparten un número parecido de CDD, es muy probable que en el caso de la zona *aIII* (zona centro)

es have been defined for HDDs and three classes for CDDs. They have been named following the nomenclature of the CTE to facilitate their interpretation (letters for winter climate zones and numbers for summer climate zones), but using lower case letters and Roman numerals to be able to differentiate them correctly.

The results of the clustering are shown in **Table 14.6**. It includes the limit values for each of the classes, rounded to the nearest ten. The intersections between the existing summer and winter clusters for the municipality of Madrid, shown in **Figure 14.4**, are also given. These intersections have resulted in 9 urban climatic zones (UCZ): *aII, aIII, bII, bIII, cI, cII, cIII, dI, dII*.

Each of these UCZs is associated with a typical meteorological year. These were chosen from the measurement sites contained within each UCZ based on their level of agreement with the HDD and CDD ranges represented by each UCZ. The level of agreement was measured as a function of the mean relative error (ε_i) of each location (i) with respect to the mean value of the climate zone (UCZ):

Table 14.7 lists the selection of typical meteorological years per UCZ, as well as the relative error values. Three levels of agreement were considered: high ($\varepsilon < 5\%$), medium ($\varepsilon < 10\%$) and low ($\varepsilon \geq 10\%$). Although these values are somewhat subjective, a comparison of the HDD and CDD values for each typical meteorological year with respect to the ranges of each UCZ shows that they are relatively conservative, as all locations marked with high agreement are within the ranges of their respective UCZs for both HDD and CDD. Even in the one case where the correspondence is low, it is *within* the zone ranges (in this particular case, it yields a high relative error because it is too extreme).

This procedure differs from the one used by the Technical Building Code, where the typical weather years for each climate zone are generated synthetically so that all climate zones belonging to the same cluster (e.g., winter) share exactly the same temperature profile during the months belonging to that cluster (October – May). This procedure has not been followed because climatic zones belonging to the same winter or summer cluster did not necessarily share the same temperature profile. For example, let us compare zone *aIII* and zone *cIII*. Although they share a similar number of CDDs, it is very likely that in the case of zone *aIII* (central zone) CDDs

Tabla 14.6 Clústeres de invierno y verano definidas para la ciudad de Madrid. Se recogen sus límites en grados día de calefacción (HDD) y de refrigeración (CDD). En la matriz se señalan los cruces entre clústeres, y que dan lugar a las zonas climáticas existentes en el municipio.

Table 14.6 Winter and summer clusters defined for the city of Madrid. Their limits are shown in heating degree days (HDD) and cooling degree days (CDD). The matrix shows the crossings between clusters, which lead to the existing climatic zones in the municipality.

		Summer clusters		
		I (< 240 CDD)	II (240 – 280 CDD)	III (> 280 CDD)
Winter clusters	a (< 1600 HDD)		■	■
	b (1600 – 1700 HDD)		■	■
	c (1700 – 1800 HDD)	■	■	■
	d (> 1800 HDD)	■	■	

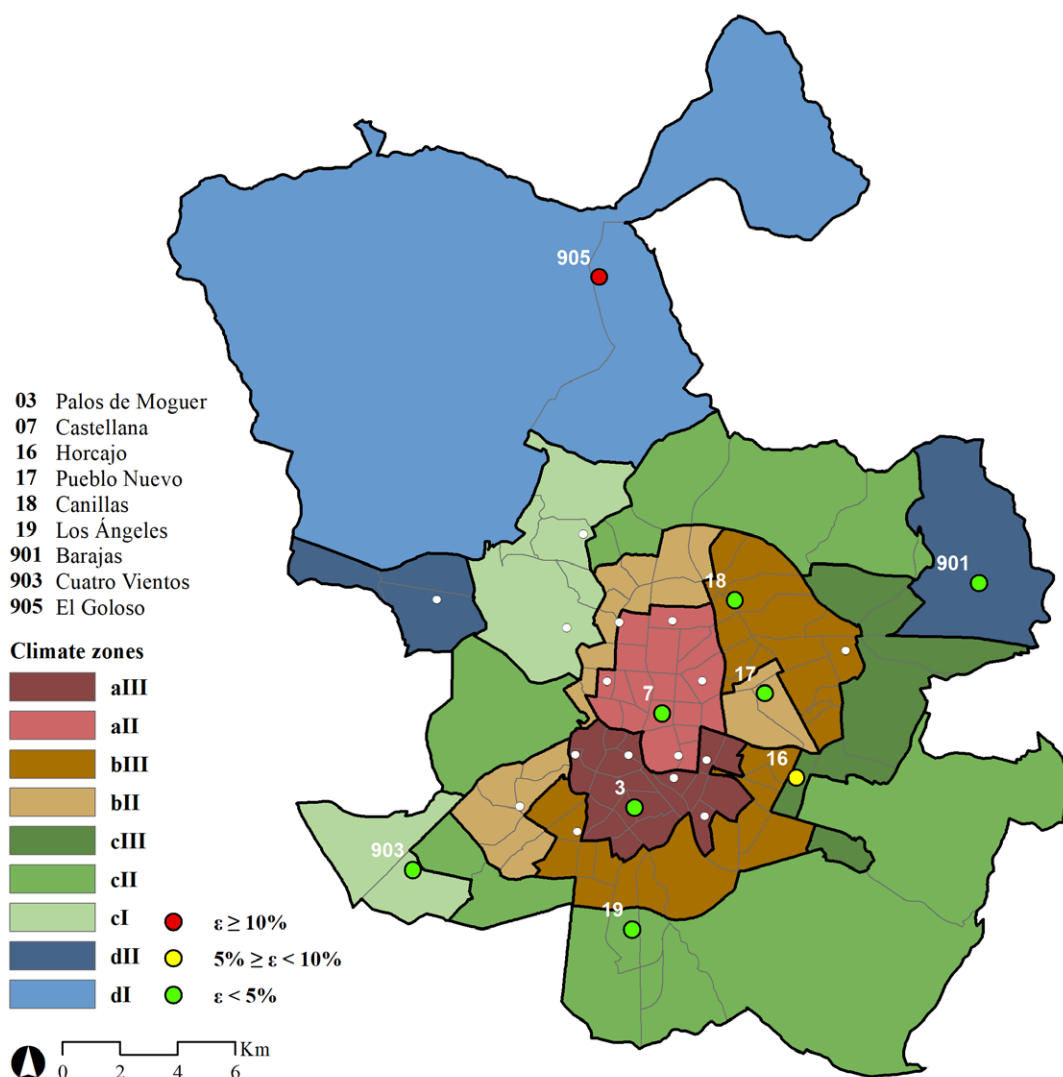


Figura 14.4 Propuesta de zonificación climática para la ciudad de Madrid. Se divide a la ciudad en función de la severidad climática de invierno (a – d) y la severidad climática de verano (I – III). El resultado son 9 zonas climáticas urbanas (UCZ). Cada UCZ lleva asociado un año meteorológico típico procedente de un punto de medición.

Figure 14.4 Proposed climate zoning for the city of Madrid. The city is divided according to winter climate severity (a - d) and summer climate severity (I - III). This results in 9 urban climatic zones (UCZ). Each UCZ is associated with a typical meteorological year from a measurement site.

Tabla 14.7 Selección de año meteorológico típico correspondiente con un punto de medición dentro de cada zona climática urbana (UCZ). Se incluyen los rangos de grados día de calefacción (HDD_{18}) y refrigeración (CDD_{25}), así como sus valores correspondientes para cada punto de ubicación. También se incluye el error relativo medio (ϵ).

Table 14.7 Typical meteorological year selection corresponding to a measurement point within each urban climatic zone (UCZ). Heating (HDD_{18}) and cooling (CDD_{25}) degree day ranges and their corresponding values for each location point are included. The mean relative error (ϵ) is also included.

Site					
ID	Name	LCZ	CDD ₂₅	HDD ₁₈	ϵ
UCZ aIII			(> 280)	(< 1600)	
1	Embajadores	2	309.3	1418.4	2.83%
2	Imperial	-	281.5	1700.4	11.28%
3	Palos de Moguer	2	325.9	1478.3	3.29%
4	Ibiza	4	295.3	1541.0	3.74%
5	Pacífico	2	287.7	1458.7	4.97%
15	San Diego	2	327.2	1476.0	3.58%
UCZ aII			(240 – 280)	(< 1600)	
6	Guindalera	2	272.9	1596.1	5.68%
7	Castellana	2	259.9	1459.7	1.37%
8	Hispanoamérica	2	249.1	1550.0	3.77%
9	Cuatro Caminos	2	273.1	1461.2	3.81%
10	Arapiles	2	257.2	1523.7	1.32%
902	Retiro	A	240.9	1741.2	11.71%
UCZ bIII			(> 280)	(1600 – 1700)	
14	Opañel	5	305.0	1596.0	2.44%
18	Canillas	6	311.3	1665.7	0.68%
20	Canillejas	5	309.5	1611.0	1.27%
UCZ bII			(240 – 280)	(1600 – 1700)	
13	Los Cármenes	-	293.4	1785.5	10.54%
17	Pueblo Nuevo	2	270.1	1590.2	3.75%
UCZ cIII			(> 280)	(1700 – 1800)	
16	Horcajo	9	279.0	1789.7	6.13%
UCZ cII			(240 – 280)	(1700 – 1800)	
19	Los Ángeles	5	260.9	1746.5	0.27%
UCZ cI			(< 240)	(1700 – 1800)	
11	Peñagrande	4	244.4	1673.5	10.37%
903	Cuatro Vientos	D	225.7	1771.1	4.35%
904	Ciudad Universitaria	9	186.2	2011.3	18.67%
UCZ dII			(240 – 280)	(> 1800)	
12	Aravaca	6	267.8	1817.1	3.68%
901	Barajas	D	273.8	1869.3	3.45%
UCZ dI			(< 240)	(> 1800)	
905	El Goloso	C	143.7	2141.2	22.14%

accumulate more during the night due to the urban heat island effect, while in zone *cIII* they tend to accumulate more during the day and enjoy cooler nights. These differences may be relevant, among other things, for determining the best passive retrofitting strategies for buildings, so it has been considered more appropriate to allocate different typical meteorological years per climate zone. **Figure 14.5** summarises this allocation.

los CDD se acumulen más durante la noche debido al efecto de la isla de calor, mientras que en la zona *cIII* tienden a acumularse más durante el día y disfruten de noches más frescas. Estas diferencias pueden ser relevantes, entre otras cosas, de cara a determinar las mejores estrategias de acondicionamiento pasivo de los edificios, por lo que se ha considerado más apropiado hacer una asignación de años meteorológicos típicos distintos por zona climática. La **Figura 14.5** resume esta selección.

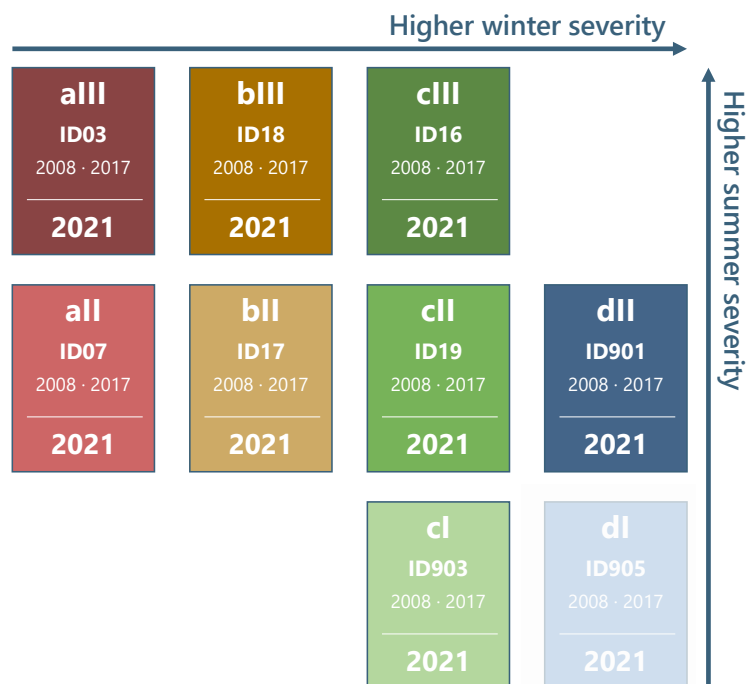


Figura 14.5 Archivos climáticos urbanos para la ciudad de Madrid, ordenados de acuerdo a su severidad climática de invierno (a - d) y de verano (I - III). Nótese que el archivo climático asignado a la zona dI no se considera suficientemente representativo de su zona climática.

Figure 14.5 Urban weather files for the city of Madrid, ordered according to their winter (a - d) and summer (I - III) climate severity. Note that the weather file assigned to zone dI is not considered sufficiently representative of its climate zone.

Tabla 14.8 Archivos climáticos preexistentes para la ciudad de Madrid. Únicamente se incluyen aquellos específicos para la ciudad o región de Madrid, excluyéndose específicamente los archivos de los climas de referencia del CTE (2014).

Table 14.8 Pre-existing weather files for the city of Madrid. Only those specific to the city or region of Madrid are included, specifically excluding the reference climate files of the CTE (2014).

ID	Period of record	First published	Publisher	Source
IWEC	1982 – 1993	2001	ASHRAE	(U.S. Department of Energy, 2003)
SWEC ¹	1961 – 1990	2002	EnergyPlus	(U.S. Department of Energy, 2003)
LIDER ²	1961 – 1990	2003	CTE	(CTE, 2007)
MITECO ²	1961 – 1990	2006	MITECO	(MITECO, 2021)
IWEC2	1984 – 2008	2014	ASHRAE	(ASHRAE, 2014)
EU-TMY	2007 – 2016	2017	EC – PVGIS	(EU Science Hub, 2017)
TMYx	1973 – 2017	2018	OneBuilding	(OneBuilding, 2018)
TMYx15	2003 – 2017	2018	OneBuilding	(OneBuilding, 2018)

¹ Period of record as found in (Herrera et al., 2017). ² Modified from SWEC.

14.4. Generación de un nuevo archivo climático de referencia para Madrid

Con el fin de poder evaluar la metodología de selección de años meteorológicos de referencia, así como el procedimiento para la creación de los archivos climáticos, se ha procedido a la generación de un nuevo archivo climático de referencia. Este archivo de referencia se ha comparado con diversos archivos climáticos preexistentes para la ciudad de Madrid, la mayoría de los cuales ya han sido presentados en el apartado 14.1, y se encuentran resumidos en la **Tabla 14.8**.

Tanto este nuevo archivo climático de referencia como los desarrollados en el apartado 14.5 se han generado en formato E/E (EnergyPlus/ESP-r, Crawley et al., 1999), también conocido por su extensión “.EPW”, y empleado por el motor de cálculo EnergyPlus (Crawley et al., 2001). Además de hacer algunos ajustes en las unidades (p. ej., los datos de nubosidad deben pasarse de octavos de cielo a décimas de cielo), también se han tenido que realizar algunas operaciones psicrométricas para estimar algunas variables, como la temperatura de bulbo húmedo y el punto de rocío. Para ello se ha empleado el software de código abierto *Elements* (Bigladder Software, 2016). El dato de presión atmosférica se derivó de la altura sobre el nivel del mar (94 kPa), asumiéndose como un valor constante. Finalmente, se empleó la utilidad *Weather Statistics and Conversions* de EnergyPlus para generar los tres archivos auxiliares necesarios para llevar a cabo la simulación energética con su motor de cálculo: “.audit”, “.ddy” y “.stat”.

El nuevo archivo climático de referencia está basado en el año meteorológico típico obtenido para el observatorio de la AEMET Barajas (denominado en este apartado *ISO10*, por emplear el *método ISO* sobre una serie de 10 años de datos, 2008 – 2017). Este observatorio de la AEMET no sólo es el punto de referencia que se ha utilizado en esta investigación, sino que también fue el empleado por las distintas instituciones para generar los archivos climáticos preexistentes. Partir de un punto común permitirá compararlos entre sí, tanto a nivel descriptivo como a través de una simulación energética.

14.4. Generating a new reference weather file for Madrid

In order to evaluate the methodology for the selection of reference meteorological years, as well as the procedure for the creation of the weather files, a new reference weather file was generated. This reference weather file was compared with several pre-existing weather files for the city of Madrid, most of which have already been presented in **section 14.1**, and are summarised in **Table 14.8**.

Both this new reference weather file and those developed in **section 14.5** were generated in E/E format (EnergyPlus/ESP-r, Crawley et al., 1999), also known by its extension “.EPW”, and used by the EnergyPlus calculation engine (Crawley et al., 2001). In addition to some adjustments in the units (e.g., cloudiness data have to be changed from eighths of sky to tenths of sky), some psychrometric operations had to be performed to estimate some variables, such as wet bulb temperature and dew point. The open-source software *Elements* (Bigladder Software, 2016) was used for this purpose. The atmospheric pressure data was derived from the height above sea level (94 kPa), assumed as a constant value. Finally, the Weather Statistics and Conversions utility from EnergyPlus was used to generate the three auxiliary files needed to carry out the energy simulation with its calculation engine: “.audit”, “.ddy” and “.stat”.

The new reference weather file is based on the Typical meteorological year obtained for the AEMET Barajas observatory (referred to in this section as *ISO10*, as it uses the *ISO method* on a series of 10 years of data, 2008 – 2017). This AEMET observatory is not only the reference point used in this research, but also the one used by the different institutions to generate the pre-existing weather files. Starting from a common point will enable comparisons between them, both at a descriptive level and through an energy simulation.

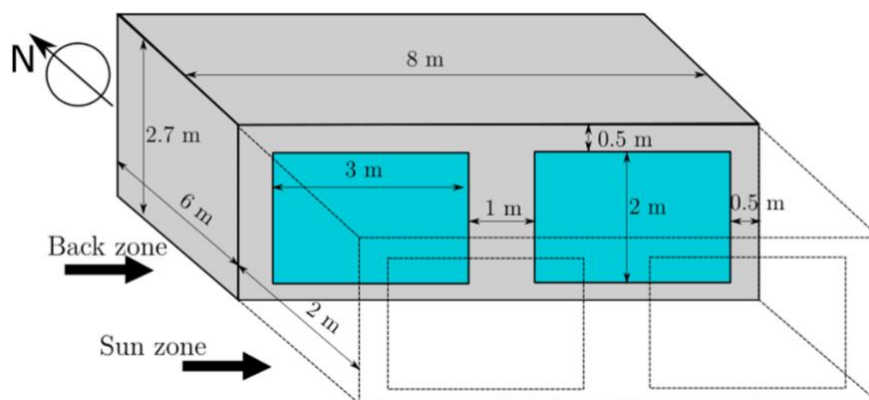


Figura 14.6 Geometría del módulo BESTEST 600 de la Agencia Internacional de la Energía. Fuente: Campana y Morini (2019)

Figure 14.6 Geometry of the International Energy Agency's BESTEST 600 module. Source: Campana and Morini (2019)

For the latter, one of the *BESTEST* modules developed by the International Energy Agency (Judkoff and Neymark, 1995) was used. Figure 14.6 shows the characteristics of the *BESTEST 600* module used in this study. It is the *heavyweight* variant, characterised by concrete block walls (10 cm) insulated on the outside (6 cm) and with a timber finish (1 cm). The lower slab consists of a solid concrete slab (8 cm), heavily insulated on the outside (100 cm), which minimises the energy flow through the floor. The roof is lightweight, with an insulation core of about 11 cm. Full details on thermal resistance, specific heat and other material characteristics can be found in Judkoff and Neymark (1995). The energy simulation was carried out with DesignBuilder (v 6.1) and the EnergyPlus calculation engine (v 8.9), both widely used tools for building energy modelling. Each of the weather files listed in the table above was used to carry out the energy simulation of the *BESTEST* module for a full calendar year.

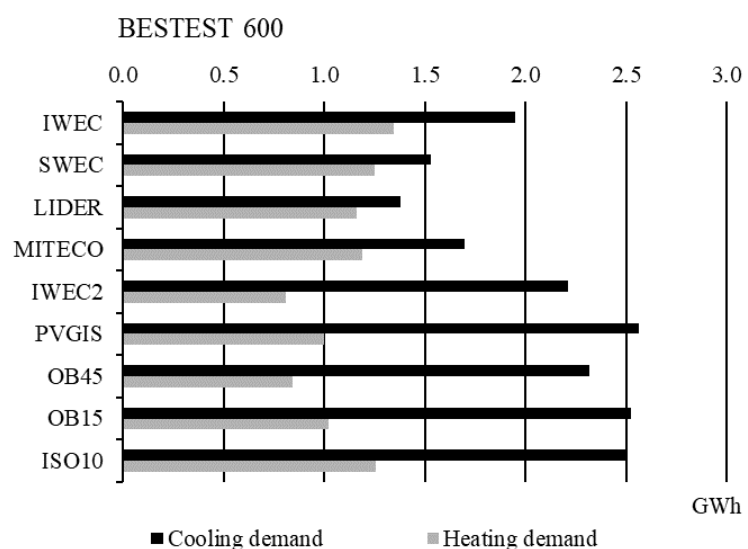
The simulation results are shown in Figure 14.7. The data show a high heterogeneity between weather files. It is noteworthy that those based on time windows closer to the present increase cooling demand significantly while heating demand decreases. The differences seem to be supported by the gradual increase in temperatures over the last decades, as reflected in the average temperatures of the weather files (Table 14.9).

Para esto último se ha empleado uno de los módulos *BESTEST* desarrollados por la Agencia Internacional de la Energía (Judkoff and Neymark, 1995). La **Figura 14.6** muestra las características del módulo *BESTEST 600*, empleado en este estudio. Se trata de la variante *heavyweight* (pesada), caracterizado por unos cerramientos de bloques de hormigón (10 cm) aislado por el exterior (6 cm) y con un acabado de madera (1 cm). El forjado inferior está formado por una losa maciza de hormigón (8 cm) fuertemente aislada por el exterior (100 cm), lo que reduce al mínimo el flujo energético a través del suelo. La cubierta es ligera, donde destaca un núcleo de aislamiento de unos 11 cm. Todos los detalles relativos a la resistencia térmica, calor específico y demás características de los materiales pueden consultarse en Judkoff y Neymark (1995). La simulación energética se ha realizado con DesignBuilder (v 6.1) y el motor de cálculo de EnergyPlus (v 8.9), ambas herramientas ampliamente utilizadas para la evaluación energética de edificios. Cada uno de los archivos climáticos recogidos en la tabla anterior se han empleado para llevar a cabo la simulación energética del módulo *BESTEST* durante un año natural completo.

Los resultados de la simulación se recogen en la **Figura 14.7**. Los datos muestran una elevada heterogeneidad entre archivos climáticos. Resulta destacable que aquellos basados en ventanas temporales más próximas a la actualidad incrementan notablemente la demanda de refrigeración a la par que disminuyen la de calefacción. Las diferencias parecen sustentarse en el incremento paulatino de temperaturas de las últimas décadas, tal y como reflejan las temperaturas medias de los archivos climáticos (Tabla 14.9).

Figura 14.7 Comparación de la demanda energética de calefacción y refrigeración obtenida para el módulo *BESTEST 600* con diferentes archivos climáticos. El archivo ISO10 se corresponde con el archivo climático de referencia desarrollado en este trabajo siguiendo la norma ISO 15927-4 (ISO, 2005).

Figure 14.7 Comparison of the heating and cooling energy demand obtained for the *BESTEST 600* module with different weather files. The ISO10 file corresponds to the reference weather file developed in this work following the ISO 15927-4 standard (ISO, 2005).



También debe destacarse que los archivos climáticos más antiguos presentan valores de radiación solar significativamente más bajos, tanto en los meses infracalentados como sobrecalentados. Estas diferencias no parecen encontrar sustento en un aumento de la radiación solar, sino en el origen de los datos disponibles. En concreto, debe tenerse en cuenta que los primeros archivos climáticos no disponían de datos procedentes de observaciones reales de radiación solar (Hatch, 1986), empleando en su lugar datos procedentes de modelos de radiación solar que han ido perfeccionándose con el tiempo.

En cualquier caso, al comparar el nuevo archivo climático de referencia con los preexistentes, se observa que este se encuentra dentro de los rangos de temperatura, humedad, radiación solar y viento. Como cabría esperar, se alinea con los valores medios de los archivos climáticos TMYx15 y EU-TMY, cuyas ventanas temporales son más recientes. Queda claro que los archivos climáticos con los que se trabaja habitualmente (SWEC e IWEC), al menos en el caso de Madrid, no reflejan las condiciones actuales con suficiente precisión. Es muy probable que esta situación sea extensible a otras ciudades españolas, ya que el problema no parece estar vinculado con la procedencia de los datos, sino con su antigüedad.

Sería recomendable optar por aquellos archivos cuya ventana temporal fuera más reciente. Debe tenerse en cuenta que tanto el diseño como la rehabilitación energética de edificios no deja de ser, en muchos casos, un trabajo de prospección donde se busca anticipar unas demandas que ocurrirán en el futuro. En el presente contexto de cambio climático, y a falta de bases de datos climáticos que incluyan su tendencia (véase **apartado 14.1**), trabajar con archivos climáticos basados en ventanas temporales más recientes parece ser la opción que queda del lado de la seguridad.

It should also be noted that the older weather files show significantly lower solar radiation values in both the underheated and overheated months. These differences do not seem to be supported by an increase in solar radiation, but rather by the origin of the available data. In particular, it should be noted that the earliest weather files did not have data from actual solar radiation observations (Hatch, 1986), using instead data from solar radiation models that have been refined over time.

In any case, a comparison of the new reference weather file with the pre-existing ones shows that it is within the temperature, humidity, solar radiation and wind ranges. As would be expected, it aligns with the mean values of the TMYx15 and EU-TMY weather files, whose time windows are more recent. It is clear that the weather files typically used in BEM (SWEC and IWEC), at least in the case of Madrid, do not reflect the current conditions with sufficient accuracy. It is very likely that this situation can be extended to other Spanish cities, since the problem does not seem to be linked to the origin of the data, but to their age.

It would be advisable to opt for files with a more recent time window. It should be taken into account that both the design and the energy renovation of buildings is, in many cases, a prospective work where the aim is to anticipate demands that will occur in the future. In the present context of climate change, and in the absence of trended climate databases (see **section 14.1**), working with weather files based on more recent time windows seems to be the most reliable option.

Tabla 14.9 Temperaturas medias, máximas y mínimas diarias de cada archivo climático preexistente para Madrid, así como para el nuevo archivo climático de referencia. Se incluyen los datos desagregados para los meses sobrecalentados (junio – septiembre) e infracalentados (octubre – mayo).

Table 14.9 Daily mean, maximum and minimum temperatures for each pre-existing weather file for Madrid, as well as for the new reference weather file. Disaggregated data for the overheated (June – September) and underheated (October – May) months are included.

ID	All year			Daily dry-bulb temperature (°C)					
	Mean	Max	Min	Overheated months (Jun – Sep)			Underheated months (Oct – May)		
				Mean	Max	Min	Mean	Max	Min
Pre-existing weather files									
IWEC	14.3	20.5	8.3	22.8	29.7	15.3	10.1	15.9	4.8
SWEC	14.3	19.7	10.2	22.4	28.8	17.3	10.3	15.2	6.7
LIDER	14.3	19.7	10.2	22.4	28.8	17.3	10.3	15.2	6.7
MITECO	14.4	19.8	10.2	22.4	28.9	17.2	10.3	15.2	6.7
IWEC2	14.5	20.7	8.3	23.3	30.5	15.4	10.0	15.8	4.7
EU-TMY	15.1	20.3	10.3	25.2	31.3	19.1	10.1	14.8	5.9
OB45	14.5	20.9	8.1	23.4	30.6	15.5	10.1	16.0	4.5
OB15	15.3	21.4	9.0	24.6	31.7	16.6	10.7	16.3	5.2
Newly proposed weather file									
ISO10	15.4	21.5	9.2	24.1	31.4	15.8	11.0	16.6	5.8

14.5. Creation of urban weather files and testing with a case study

The previous section has described and validated the procedure and tools used to generate a new reference weather file for the city of Madrid. This corresponds to the urban climatic zone *dII*, thus pending the development of the weather files for the other eight zones. This last task was carried out following the same methodology described in the previous section. Now, however, its operation has not been tested with a theoretical module, but with a real case study.

It should be noted that these simulations are by no means intended to be a detailed study of the impact of the urban heat island on the buildings' energy performance. That task is reserved for future research work. The aim of these simulations is to confirm that the observed urban climatic differences at the local scale can be reflected in the buildings' energy demand. This is expected to provide a first approximation to the order of magnitude of the phenomenon, both in relation to cooling and heating demand.

The case study presented here corresponds to a multi-family residential building, *H-block* type, belonging to the neighbourhood of San Cristóbal de los Ángeles in Madrid. It has a north-south orientation and is attached to other buildings of the same typology. This is a case study already used in previous research (Córdoba Hernández et al., 2020; Neila et al., 2020; Sánchez-Guevara Sánchez, 2015). **Figures 14.8, 14.9 and 14.10** show the planimetry of this residential building block.

14.5. Creación de archivos climáticos urbanos y ensayo sobre caso de estudio

En el apartado anterior se ha descrito y validado el procedimiento y las herramientas utilizadas para la generación de un nuevo archivo climático de referencia para la ciudad de Madrid. Éste se corresponde con la zona climática urbana *dII*, quedando pendiente el desarrollo de los archivos climáticos de las otras ocho zonas. Esta última tarea se ha llevado a cabo siguiendo la misma metodología descrita en el apartado anterior. Ahora, sin embargo, su funcionamiento no se ha puesto a prueba con un módulo teórico, sino con un caso de estudio real.

Debe señalarse que en ningún caso estas últimas simulaciones pretenden ser un estudio minucioso sobre el impacto de la isla de calor en el comportamiento energético de edificios. Esa tarea se reserva para futuros trabajos de investigación. El objetivo de estas simulaciones es el de confirmar que las diferencias climáticas observadas en la escala local pueden tener su reflejo en la demanda energética de la edificación. Se espera que esto permita tener una primera aproximación en cuanto a su orden de magnitud, tanto en relación a la demanda de refrigeración como a la demanda de calefacción.

El caso de estudio que aquí se presenta se corresponde con un edificio plurifamiliar de viviendas, de tipología *bloque en H*, perteneciente al barrio de San Cristóbal de los Ángeles de Madrid. Éste cuenta con orientación norte-sur y se encuentra adosado a otros edificios de la misma tipología. Se trata de un caso de estudio ya utilizado en investigaciones anteriores (Córdoba Hernández et al., 2020; Neila et al., 2020; Sánchez-Guevara Sánchez, 2015). Las Figuras **14.8, 14.9 y 14.10** muestran la planimetría de este bloque de edificios de viviendas.



Figura 14.8 Ubicación del barrio de San Cristóbal de los Ángeles en Madrid, y los bloques en H que forman parte de este análisis.

Figure 14.8 Location of the San Cristóbal de los Ángeles neighbourhood in Madrid, and the H-blocks that form part of this analysis.

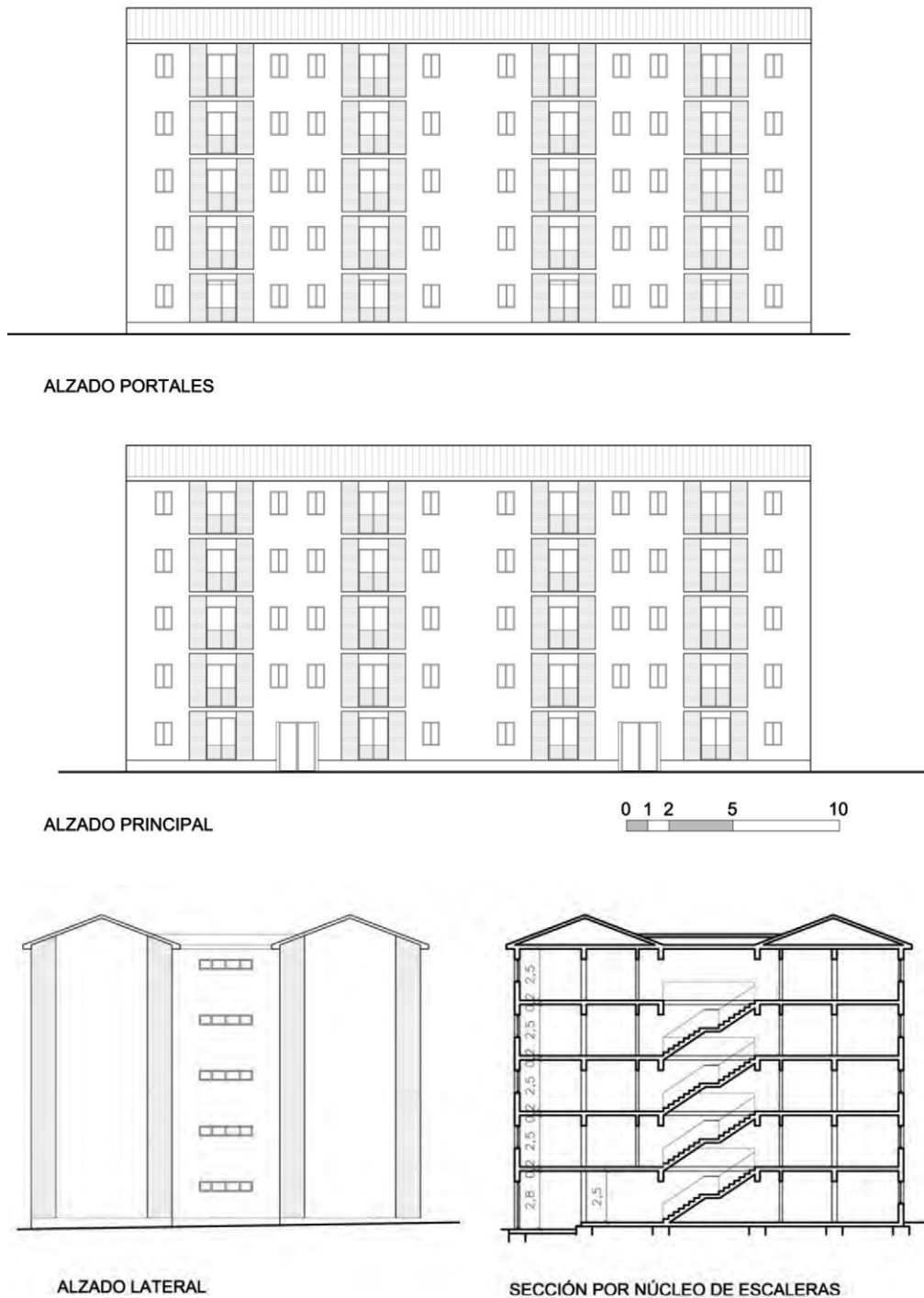
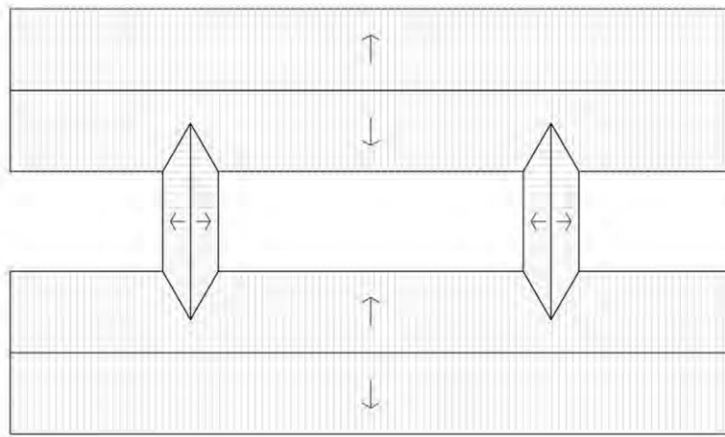


Figura 14.9 Planimetría del bloque en H situado en el barrio de San Cristóbal de los Ángeles de Madrid. Alzado y secciones. Fuente: Sánchez-Guevara (2015)

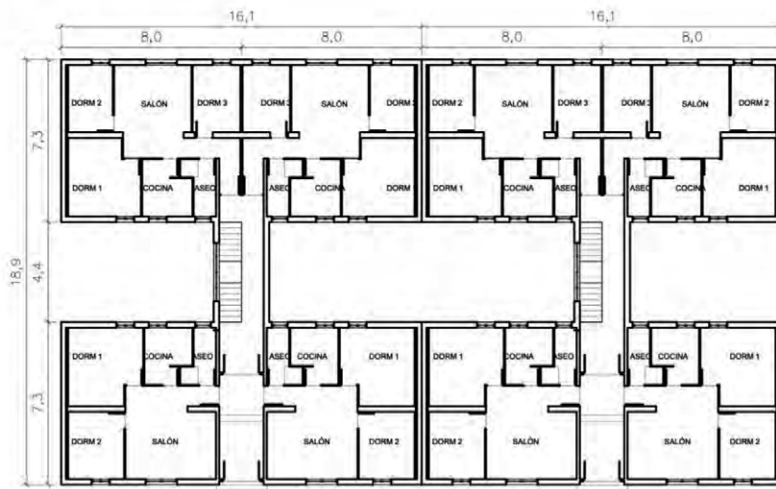
Figure 14.9 Planimetry of the H-block located in the neighbourhood of San Cristóbal de los Ángeles, in Madrid. Elevation and sections. Source: Sánchez-Guevara (2015)



PLANTA DE CUBIERTAS



PLANTA TIPO



PLANTA BAJA

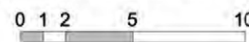


Figura 14.10 Planimetría del bloque en H situado en el barrio de San Cristóbal de los Ángeles de Madrid. Plantas. Fuente: Sánchez-Guevara (2015)

Figure 14.10 Planimetry of the H-block located in the neighbourhood of San Cristóbal de los Ángeles, in Madrid. Floorplans. Source: Sánchez-Guevara (2015)

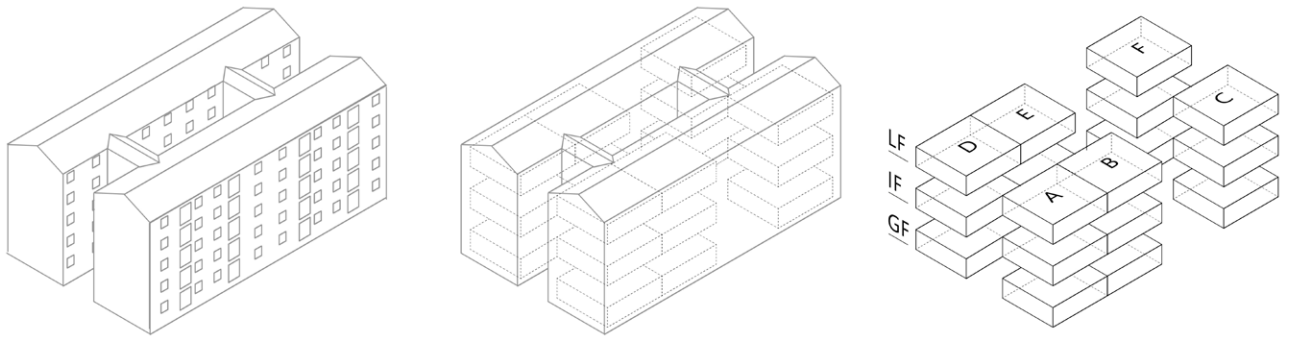


Figura 14.11 Esquema de selección de viviendas tipo dentro de tipología de bloque en H. Fuente: Sánchez-Guevara (2015).

Figure 14.11 Scheme for the selection of typical dwellings within the H-block typology. After Sánchez-Guevara (2015).

Este bloque en H se ha simulado con cada uno de los archivos climáticos urbanos. Todos los detalles constructivos relativos a este caso de estudio pueden consultarse en Sánchez-Guevara et al. (2015). En cuanto al calendario de utilización, se han empleado las condiciones operacionales y perfiles de uso definidos por el CTE (2019b). Si bien estos perfiles pueden ser cuestionables por su falta de precisión y por la existencia de nuevas técnicas que mejorar la definición de estos perfiles (Ding et al., 2021; Jia et al., 2017; Sonta et al., 2018), a día de hoy son los empleados a nivel normativo. De nuevo, esta cuestión no es objeto de este estudio, sino de futuros trabajos de investigación.

This H-block was simulated with each one of the urban weather files. All the construction details related to this case study can be found in Sánchez-Guevara et al. (2015). Regarding the schedule modelling, the operational conditions and user profiles defined by the Spanish CTE (2019b) were used. Although these profiles may be subject to question due to their lack of precision and the existence of new techniques to improve the definition of these schedules (Ding et al., 2021; Jia et al., 2017; Sonta et al., 2018), they are currently the ones used at the regulatory level. Again, this issue is not the subject of this study, but of future research.

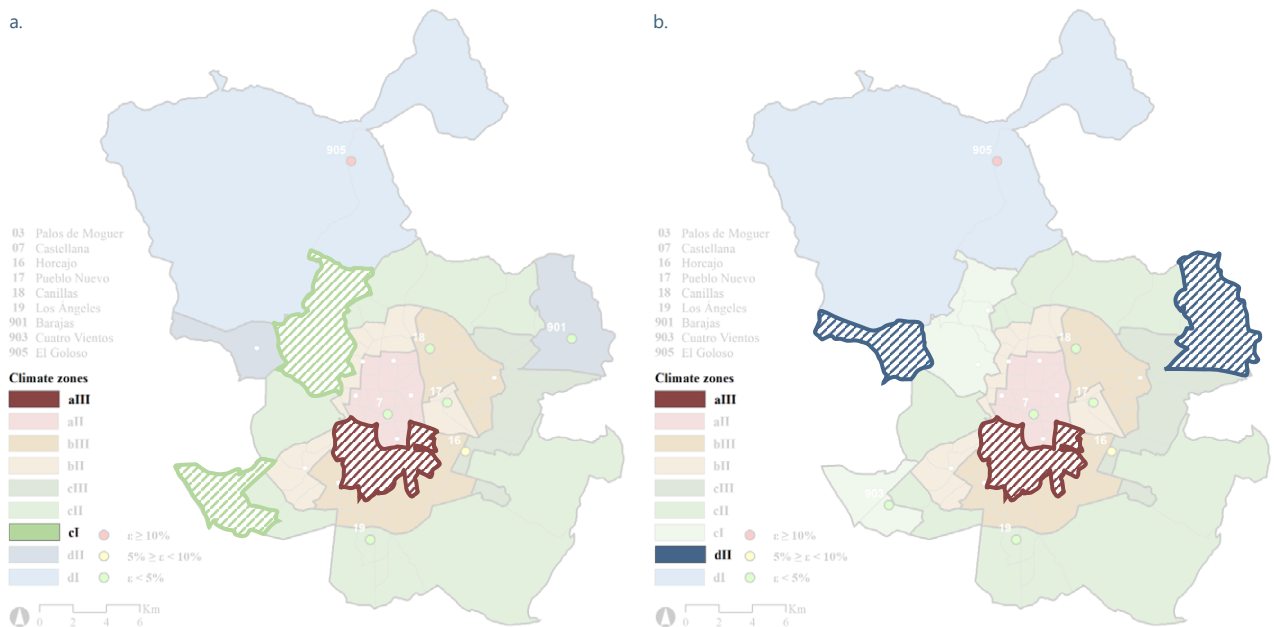


Figura 14.12 Comparativa entre zonas climáticas. En verano (a), las zonas climáticas más extremas se corresponderían con la zona aIII (verano más intenso) y la zona cI (verano menos intenso). En invierno (b), las zonas climáticas más extremas serían la zona dII (invierno más intenso) y la zona aIII (invierno menos intenso).

Figure 14.12 Comparison between urban climate zones. In summer (a), the most extreme climate zones would correspond to zone aIII (most intense summer) and zone cI (least intense summer). In winter (b), the most extreme climate zones would correspond to zone dII (most intense winter) and zone aIII (least intense winter)

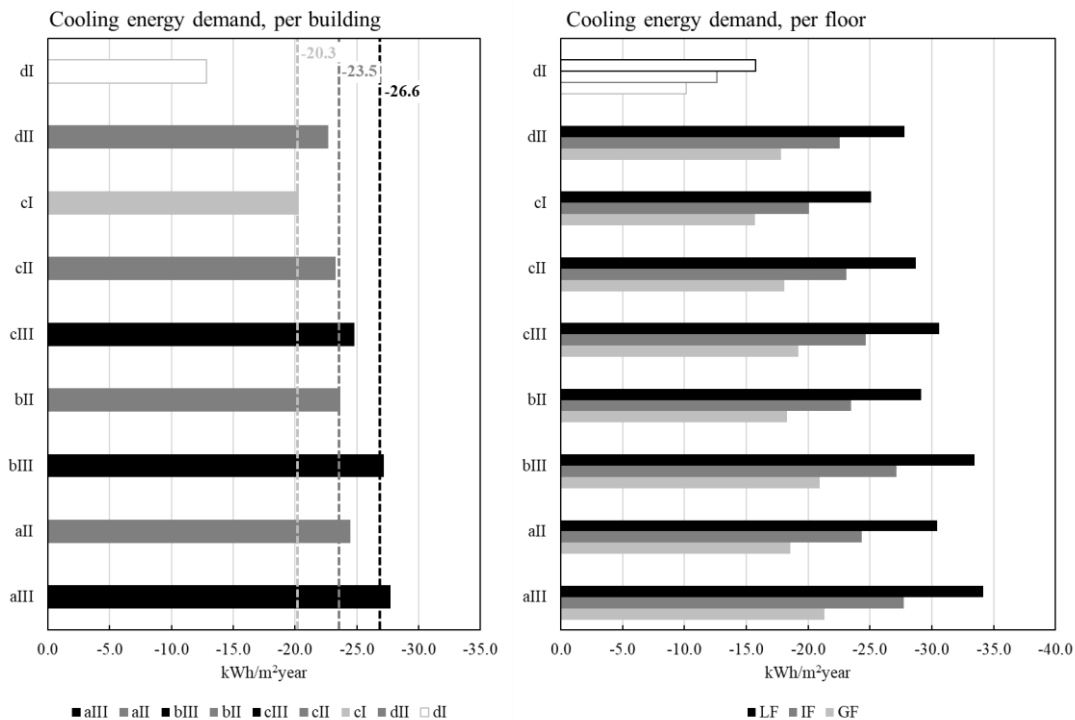


Figura 14.13 Demanda energética de refrigeración para el total del edificio (izquierda) y desagregada por plantas (derecha). Para el total del edificio se incluye el valor medio obtenido para cada clúster de verano (III, II, I). Los valores de la zona climática dI se representan, aunque no se consideran en el cómputo de los valores medios debido a su falta de representatividad.

Figure 14.13 Cooling energy demand for the total building (left) and disaggregated by floors (right). For the total building, the average value obtained for each summer cluster (III, II, I) is included. The values of the climate zone dI are represented, although they are not considered in the computation of the average values due to their lack of representativeness.

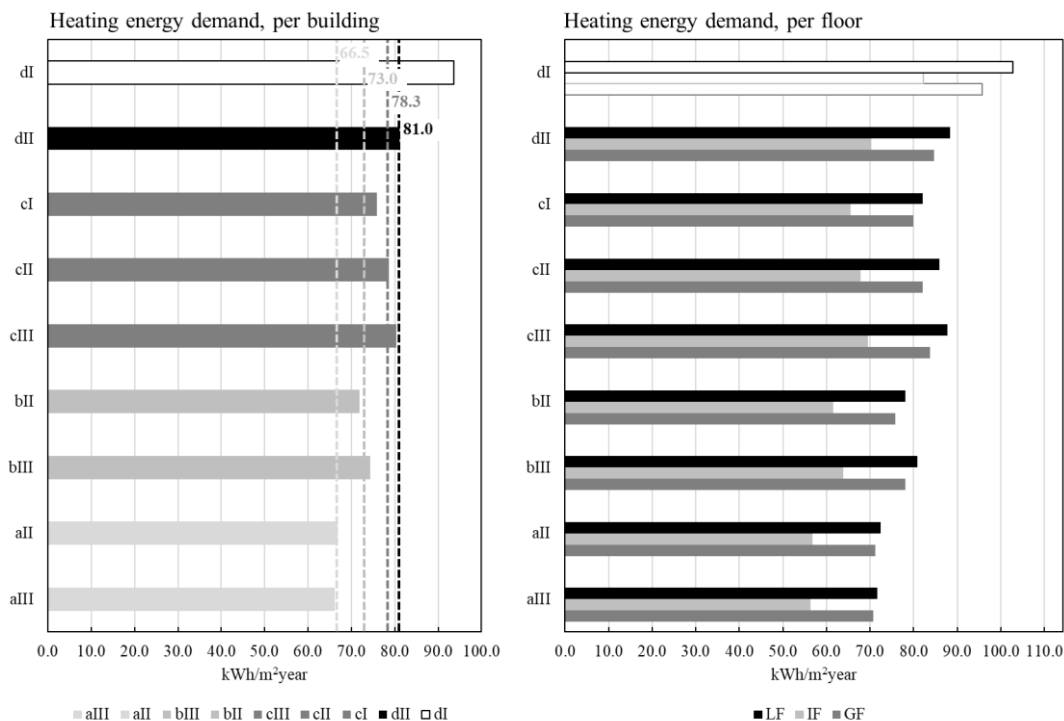


Figura 14.14 Demanda energética de calefacción para el total del edificio (izquierda) y desagregada por plantas (derecha). Para el total del edificio se incluye el valor medio obtenido para cada clúster de invierno (a, b, c, d). Los valores de la zona climática dI se representan, aunque no se consideran en el cómputo de los valores medios debido a su falta de representatividad.

Figure 14.14 Heating energy demand for the total building (left) and disaggregated by storey (right). For the total building the average value obtained for each winter cluster (a, b, c, d) is included. The values of the climate zone dI are represented, although they are not considered in the computation of the average values due to their lack of representativeness.

Las viviendas de estos bloques cuentan con una superficie de entre 42 y 51 m². Dado que estos bloques en H se encuentran adosados entre sí, la simulación incluye tanto el caso de las viviendas que se encuentran entre medianeras como aquellas que se encuentran en esquina. La **Figura 14.11** muestra la codificación de cada una de estas viviendas. El total de casos asciende a 18: seis tipos de viviendas por planta (A – F), diferenciándose entre viviendas situadas en planta baja (GF), en plantas intermedias (IF), y en planta última (LF).

Los resultados se presentan a continuación con distintos niveles de desagregación. Primero, las demandas energéticas medias para el conjunto del edificio permiten visualizar las diferencias entre zonas climáticas tanto durante los meses sobrecalentados como durante los meses infracalentados (**Figura 14.12**). En concreto, cambiar de zona climática “cI” (verano menos intenso) a “aIII” (verano más intenso) supondría, para este caso de estudio, un incremento medio del 37% en la demanda de refrigeración (pasando de 20.3 a 27.7 kWh/m²año). Algo parecido, pero de menor intensidad, ocurre al cambiar de zona climática “aIII” (invierno menos intenso) a “dII” (invierno más intenso), con un incremento medio del 22% (de 66.2 a 81.0 kWh/m²año).

Estas diferencias se mantienen en términos relativos cuando se comparan las demandas energéticas por plantas, tanto para refrigeración (36 – 38%; véase **Figura 14.13**) como para calefacción (20 – 25%; véase **Figura 14.14**). En términos absolutos, sin embargo, estos incrementos pueden llegar a ser de hasta 9.1 kWh/m²año para refrigeración y de 16.7 kWh/m²año para calefacción.

Resultan llamativas, en cualquier caso, las diferencias entre plantas dentro de una misma zona climática. En verano, las viviendas situadas en planta baja registran sistemáticamente los valores más bajos de demanda de refrigeración, incrementándose hasta un 64% al pasar a la última planta (valor que debe tomarse con precaución dada la ausencia total de control solar en estas simulaciones). Estas diferencias son menos relevantes en invierno, aunque no por ello poco importantes. En esta época, las diferencias entre vivir en una planta intermedia y vivir en la última planta suponen un incremento de hasta un 27%.

Dentro de una misma planta, las diferencias entre viviendas también son llamativas. Las viviendas con orientación norte y situadas en esquina, con una mayor envolvente en contacto con el exterior, incrementan su demanda energética de calefacción hasta en un 34% cuando se comparan con viviendas situadas entre medianeras orientadas a sur. En verano son de nuevo las situadas en esquina, pero cuyas fachadas se orientan a sur y a oeste, las que registran una demanda un 18.9% superior al de viviendas entre medianeras orientadas hacia el norte. Las **Tablas 14.10** y **14.11** muestran los resultados para los diferentes tipos de vivienda, por planta y zona climática urbana.

The dwellings in these blocks have a floor area between 42 and 51 m². Since these H-blocks are attached to each other, the energy simulation includes both the case of dwellings between party walls and those on a corner. **Figure 14.11** shows the coding of each of these dwellings. The total number of cases is 18: six dwelling types per floor (A – F), differentiating between dwellings located on the ground floor (GF), on intermediate floors (IF), and on the top floor (LF).

The results are presented below with different levels of disaggregation. First, the average energy demands for the building as a whole allow visualising the differences between climate zones both during the overheated months and during the underheated months (**Figure 14.12**). Specifically, changing from climate zone “cI” (least intense summer) to “aIII” (most intense summer) would mean, for this case study, an average increase of 37% in cooling demand (from 20.3 to 27.7 kWh/m²year). Something similar, but less intense, occurs when changing from climate zone “aIII” (least intense winter) to “dII” (most intense winter), with an average increase of 22% (from 66.2 to 81.0 kWh/m²year).

These differences are maintained in relative terms when comparing the energy demands per floor for both cooling (36 – 38%; see **Figure 14.13**) and heating (20 – 25%; see **Figure 14.14**). In absolute terms, however, these increases can be as high as 9.1 kWh/m²year for cooling and 16.7 kWh/m²year for heating.

In any case, the differences between floors within the same climate zone are remarkable. In summer, ground floor dwellings systematically record the lowest cooling demand values, increasing to 64% when moving to the top floor (a value that should be taken with caution given the total absence of solar control in these simulations). These differences are less relevant in winter, although not negligible. At this time, the differences between living on an intermediate floor and living on the top floor increase by up to 27%.

Within the same storey, the differences between dwellings are also significant. North-facing corner dwellings, with a larger envelope in contact with the outside, increase their heating energy demand by up to 34% when compared to south-facing houses between party walls. In summer, it is again corner dwellings, but with south and west facing facades, which have an 18.9% higher demand than north-facing semi-detached dwellings. **Tables 14.10** and **14.11** show the results for the different dwelling types, by storey and urban climatic zone.

The differences observed between dwellings located in different parts of the building are in line with previous studies where multi-family buildings from similar periods were evaluated, and highlight the complex relationship of factors that determine the energy demand of a building. It is interesting to note, however, that the urban heat island effect impacts on energy demand with an order of magnitude equivalent to that of the orientation of the dwelling or its relative position in the building.

Moreover, for the same floor, the dwelling with the most unfavourable summer orientation (south-west, on the corner) in the climate zone cI has lower energy demands than the dwelling with the most favourable orientation (north, between party walls) in climate zone aIII. This is observed for all floors of the building (LF: 28 vs. 32 kWh/m²year; IF: 23 vs. 25 kWh/m²year; GF: 18 vs. 18.4 kWh/m²year) and can also be observed, although less markedly, when comparing heating demands between the climate zones at the extremes (dII and aIII).

Las diferencias observadas entre viviendas situadas en diferentes partes del edificio se encuentran en línea con estudios anteriores donde se han evaluado edificios plurifamiliares de épocas similares, y ponen de manifiesto la compleja relación de factores que determinan la demanda energética de un edificio. Resulta interesante observar, sin embargo, que el efecto de la isla de calor impacta en la demanda energética con un orden de magnitud equivalente al de la orientación de la vivienda o su posición relativa en el edificio.

Es más, para una misma planta, la vivienda con la orientación más desfavorable en verano (suroeste, esquina) en la zona climática cI arroja unas demandas energéticas menores que la vivienda con la orientación más favorable (norte, entre medianeras) en la zona climática aIII. Esto se observa para todas las plantas del edificio (LF: 28 frente a 32 kWh/m²año; IF: 23 frente a 25 kWh/m²año; GF: 18 frente a 18.4 kWh/m²año) y también puede observarse, aunque de forma menos acentuada, al comparar las demandas de calefacción entre las zonas climáticas situadas en los extremos (dII y aIII).

Tabla 14.10 Demanda energética de refrigeración asociada a cada zona climática urbana, desagregada por vivienda. En negrita se destacan los valores más elevados, mientras que los registros más bajos se sobrepresionan en gris. Los valores de la zona dI aparecen atenuados por su falta de representatividad.

Table 14.10 Cooling energy demand associated with each urban climatic zone, disaggregated by dwelling. Higher values are highlighted in bold, while lower values are overprinted in grey. Values for zone dI are attenuated due to their lack of representativeness.

Type	aIII	aII	bIII	bII	cIII	cII	cI	dII	dI
Last floor									
LF_A	-37.7	-33.8	-36.9	-32.2	-33.8	-31.7	-27.6	-30.5	-17.3
LF_B	-32.6	-29.0	-31.9	-27.8	-29.2	-27.4	-24.0	-26.6	-15.2
LF_C	-37.4	-33.4	-36.5	-32.0	-33.5	-31.4	-27.5	-30.3	-17.3
LF_D	-36.8	-32.9	-36.0	-31.4	-32.9	-30.9	-26.8	-29.7	-16.7
LF_E	-31.7	-28.1	-31.1	-27.0	-28.4	-26.6	-23.3	-25.8	-14.6
LF_F	-36.7	-32.7	-35.9	-31.3	-32.8	-30.8	-26.9	-29.7	-16.8
Intermediate floor									
IF_A	-31.6	-28.0	-30.8	-26.8	-28.1	-26.3	-22.8	-25.4	-14.2
IF_B	-26.2	-23.0	-25.7	-22.2	-23.4	-21.9	-19.1	-21.5	-12.2
IF_C	-31.6	-27.9	-30.8	-26.8	-28.1	-26.3	-22.9	-25.6	-14.4
IF_D	-29.8	-26.2	-29.1	-25.1	-26.4	-24.7	-21.3	-23.9	-13.2
IF_E	-24.5	-21.4	-24.1	-20.7	-21.9	-20.4	-17.7	-20.1	-11.2
IF_F	-30.1	-26.4	-29.4	-25.4	-26.7	-25.0	-21.7	-24.3	-13.6
Ground floor									
GF_A	-25.0	-21.8	-24.3	-21.3	-22.2	-20.9	-18.0	-20.3	-11.5
GF_B	-20.2	-17.7	-19.9	-17.4	-18.3	-17.2	-15.0	-17.1	-9.8
GF_C	-25.1	-22.0	-24.4	-21.5	-22.5	-21.2	-18.4	-20.7	-11.8
GF_D	-22.4	-19.5	-22.0	-19.1	-20.1	-18.9	-16.2	-18.5	-10.3
GF_E	-18.4	-16.0	-18.3	-15.8	-16.8	-15.8	-13.7	-15.8	-8.8
GF_F	-22.8	-19.9	-22.4	-19.5	-20.6	-19.3	-16.8	-19.0	-10.8

Este hecho resulta fundamental a la hora de determinar la importancia del fenómeno. Pone de relieve que no considerar el efecto de la isla de calor en la simulación energética de edificios podría ser equivalente a no considerar la orientación de una vivienda, siendo esta última uno de los elementos descriptivos más básicos en la simulación energética, algo que incluso los métodos simplificados de cálculo tienen en cuenta (véase, por ejemplo, el software CE3X en España).

Los resultados vienen a confirmar, por lo tanto, la necesidad de mejorar la información climática disponible para la simulación energética de edificios en entornos urbanos.

This is crucial in determining the relevance of the phenomenon. It highlights that not considering the urban heat island effect in building energy simulation could be equivalent to not considering the orientation of a dwelling, the latter being one of the most basic descriptive elements in energy simulation, something that even simplified calculation methods take into account (see, for example, the CE3X software in Spain).

Results therefore confirm the need to improve the climate information available for building energy modelling in urban environments.

Tabla 14.11 Demanda energética de calefacción asociada a cada zona climática urbana, desagregada por vivienda. En negrita se destacan los valores más elevados, mientras que los registros más bajos se sobrepunen en gris. Los valores de la zona dI aparecen atenuados por su falta de representatividad.

Table 14.11 Heating energy demand associated with each urban climatic zone, disaggregated by dwelling. Higher values are highlighted in bold, while lower values are overprinted in grey. Values for zone dI are attenuated due to their lack of representativeness.

Type	aIII	aII	bIII	bII	cIII	cII	cI	dII	dI
Last floor									
LF_A	78.5	79.3	88.7	85.6	96.3	94.2	89.8	97.0	112.6
LF_B	62.5	63.3	70.7	68.3	76.9	75.2	71.5	77.3	90.0
LF_C	79.3	80.2	89.7	86.5	97.3	95.2	90.8	97.9	114.1
LF_D	82.0	82.9	92.4	89.3	100.2	98.0	93.9	100.9	117.1
LF_E	67.1	67.9	75.6	73.1	81.9	80.2	76.9	82.4	95.9
LF_F	83.6	84.5	94.2	91.0	102.0	99.8	95.8	102.7	119.6
Intermediate floor									
IF_A	61.5	62.2	70.1	67.4	76.5	74.7	71.7	77.3	90.6
IF_B	44.9	45.5	51.3	49.4	56.2	54.8	52.4	56.6	66.7
IF_C	62.1	62.7	70.7	68.0	77.1	75.3	72.3	77.9	91.6
IF_D	67.3	67.9	75.9	73.2	82.5	80.5	78.3	83.5	97.4
IF_E	52.7	53.3	59.3	57.4	64.5	63.0	61.6	65.2	76.4
IF_F	68.6	69.2	77.4	74.7	84.1	82.1	79.9	85.0	99.7
Ground floor									
GF_A	78.7	79.1	87.5	84.7	94.1	92.1	89.2	95.2	108.0
GF_B	59.4	59.8	65.9	63.9	70.8	69.3	66.9	71.5	80.8
GF_C	78.9	79.4	87.8	85.0	94.4	92.4	89.5	95.4	108.6
GF_D	81.3	81.8	89.6	87.0	96.0	93.9	92.0	97.0	109.6
GF_E	67.8	68.3	74.3	72.4	79.4	77.7	76.5	80.1	90.2
GF_F	82.3	82.8	90.7	88.1	97.2	95.1	93.2	98.2	111.4

Parte V. Discusión, conclusiones y futuras líneas de investigación

Part V. Discussion, conclusions and future research lines

15. Discusión

Discussion

16. Conclusiones

Conclusions

17. Futuras líneas de investigación

Future research lines

En esta quinta y última parte se recogen los tres capítulos que cierran la tesis doctoral. El primero de ellos, la discusión, reflexiona sobre algunas cuestiones transversales al conjunto de esta investigación, y que por ello no se recogen en las discusiones propias de cada una de las publicaciones por separado. El segundo capítulo de esta parte del documento incluye las conclusiones globales más relevantes de esta tesis doctoral y que, al igual que con la discusión, no se mencionan por separado en las conclusiones propias de cada publicación. Por último, se presenta un capítulo con las futuras líneas de investigación de esta tesis doctoral. En ella se relaciona esta investigación con otras áreas de interés y en las que, en muchos casos, el autor de esta tesis ya se encuentra trabajando.

This fifth and final part contains the three chapters that close the PhD thesis. The first of these, the discussion, deals with some transversal issues that cut across the entire research, and which are therefore not included in the discussions of each of the separate publications. The second chapter of this part of the document includes the most relevant global conclusions of this PhD thesis which, as with the discussion, are not mentioned separately in the conclusions of each publication. Finally, a chapter with the future research lines is presented. In that last section, this research is connected with other areas of interest, many of which the author of this thesis is already working on.

15. Discussion

15.1. On the use of urban climate classification systems

Throughout this thesis, a special interest in climate classification systems was shown, in particular for the Local Climate Zones (LCZs) proposed by Stewart and Oke (2012). Their versatility was highlighted, since their use has been taken beyond their initial objective (the contextualisation of measurements in thermal studies), being used both to contextualise measurements of all types of parameters (e.g., CO₂, Christen, 2014; energy fluxes, Kotthaus and Grimmond, 2014; CH₄, Pawlak et al., 2016; PM_{2.5}, Shi et al., 2019; VOCs, Valach et al., 2015) and to map the climate behaviour of cities (Alexander et al., 2016; Perera and Emmanuel, 2016).

In this work, LCZs were central to the first two high-impact papers that were published (Núñez-Peiró et al., 2021b; Núñez Peiró et al., 2019), yet they have not had the same presence in the later stages of the research. In fact, the urban weather files developed in this research were not finally associated to LCZs (as initially expected), but to other urban climatic zones derived just from the spatial interpolation of the winter and summer urban climate severity. These new zones are not related to the physical environment but take advantage of the spatial autocorrelation of temperature and humidity (Tobler's famous first law of geography: *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*. Tobler, 1970)

What has prevented the use of the LCZs as a climate zoning to which to associate weather files is the limitations they have shown in capturing diurnal thermal variability. The results suggest that neither the scheme as a whole nor its individual indicators are capable of reflecting the temperature differences that occur in the city during the daytime. And yet, these differences do exist and appear to be relevant (see section 12.4).

It is true that night-time thermal variability, which is much more intense and apparently more structured, appears to have been much more researched than diurnal variability. And that the indicators traditionally associated with urban thermal variability (of urban morphology and coverage, included in the LCZs) are based on temperature differences recorded during the night. Few studies have focused on the diurnal variability of the phenomenon and, perhaps for this reason, the focus of the LCZs seems to be more on the (nocturnal) urban heat island than on urban heat in general.

15. Discusión

15.1. Sobre los sistemas de clasificación climática del espacio urbano

A lo largo de esta tesis doctoral se ha mostrado un especial interés por los sistemas de clasificación climática, en concreto por las *Local Climate Zones* (LCZs) planteadas por Stewart y Oke (2012). Se ha destacado su versatilidad, ya que su uso se ha llevado más allá de su objetivo inicial (la contextualización de mediciones en estudios térmicos), empleándose tanto para contextualizar mediciones de todo tipo de parámetros (p. ej., CO₂, Christen, 2014; flujos energéticos, Kotthaus and Grimmond, 2014; CH₄, Pawlak et al., 2016; PM_{2.5}, Shi et al., 2019; VOCs, Valach et al., 2015) como para cartografiar el comportamiento climático de las ciudades (Alexander et al., 2016; Perera and Emmanuel, 2016).

En este trabajo, las LCZs han sido parte central de los dos primeros artículos de alto impacto publicados (Núñez-Peiró et al., 2021b; Núñez Peiró et al., 2019) y, sin embargo, no han tenido esa misma presencia en las últimas etapas de la investigación. De hecho, los archivos climáticos urbanos desarrollados en este trabajo de investigación no han sido finalmente asociados a las LCZs (como se esperaba en un inicio), sino a unas zonas climáticas urbanas producto de la interpolación espacial de la severidad climática de invierno y de verano. Estas nuevas zonas no tienen relación con el entorno físico, sino que se aprovechan de la autocorrelación espacial de la temperatura y la humedad (la famosa primera ley de la geografía de Tobler: *Everything is related to everything else, but near things are more related than distant things*. Tobler, 1970)

Lo que ha impedido la utilización de las LCZs como zonificación climática a la que asociar los archivos climáticos son los problemas que han mostrado para capturar la variabilidad térmica diurna. Los resultados obtenidos apuntan a que ni el esquema en su conjunto ni los indicadores empleados de forma individual son capaces de reflejar las diferencias de temperatura que se producen en la ciudad durante el día. Y, sin embargo, estas diferencias existen y parece que son relevantes (véase apartado 12.4).

Es cierto que la variabilidad térmica nocturna, mucho más intensa y aparentemente más estructurada, parece que ha sido mucho más investigada que la variabilidad diurna. Y que los indicadores que tradicionalmente se asocian a la variabilidad térmica urbana (de morfología y cobertura urbana, incluidos en las LCZs) se fundamentan en diferencias de temperatura registradas durante la noche. Existen pocos estudios que se hayan enfocado en la variabilidad diurna del fenómeno y, quizás por esto, el enfoque de las LCZs parezca estar más centrado en la isla de calor urbana (nocturna) que en el calor urbano en general.

Debe destacarse, sin embargo, que las LCZs incluyen otros indicadores relacionados con las propiedades térmicas de los materiales urbanos (admitancia térmica y albedo) y con las fuentes artificiales de calor urbano (emisión de calor antropogénico) que rara vez se incluyen al aplicar esta clasificación. Dada la dificultad para acceder a datos de esta naturaleza, la mayoría de los estudios (entre los que se incluye esta trabajo de investigación) a menudo los omiten, y quizás esto esté introduciendo un sesgo en la clasificación. No obstante, las LCZs no incluyen ningún sistema de ponderación que aplique a los indicadores, que otorgue una mayor relevancia a unos indicadores que a otros, y, por lo tanto, que prevenga la omisión de ciertos parámetros. Y, otro aspecto que quizás pueda ser más relevante: las propias clases de las LCZs, definidas cualitativamente (véase, desde “Compacto gran altura” hasta “Edificación dispersa”), quizás no reflejen adecuadamente la importancia de estos otros indicadores, como los asociados a los materiales. Un ejemplo de ello es que prácticamente todas las LCZs urbanas se definen como zonas donde los materiales predominantes son “el hormigón, acero, piedra y vidrio”.

En cualquier caso, y aunque las diferencias térmicas urbanas diurnas sean relevantes, tampoco queda claro en qué grado se deben a un fenómeno estructural climático de fondo (equivalente a la isla de calor) o, por el contrario, a aspectos más vinculados con la escala microclimática. En este estudio, al igual que en muchos otros antes, se ha identificado una suave isla de frescor. Por otro lado, a menudo se observa que su distribución no es tan claramente concéntrica ni ocurre en las zonas donde la isla de calor nocturna es más intensa. A esto se le suma el problema del posible sobrecalentamiento de los sensores en los meses próximos al solsticio de verano (debido a una radiación solar más intensa y continuada), lo que añade más incertidumbre precisamente en los momentos del año en los que el impacto de las temperaturas diurnas puede ser más relevante para el confort térmico y la demanda energética de los edificios.

Todo ello nos demuestra la necesidad de desarrollar más y mejores campañas de monitorización con las que seguir investigando el fenómeno y relacionándolo con indicadores. Nos sirve para destacar la importancia de la contextualización y de los metadatos, así como del propio control de calidad de los datos. Y apunta a la necesidad de la estandarización y sistematización de estas campañas con el fin de disponer de información precisa y fiable, ya no sólo para observar y analizar el fenómeno, sino para poder desarrollar modelos que nos ayuden a comprenderlo mejor. Tal y como Velasco (2018) titulaba recientemente en uno de sus trabajos: *Go to field, look around, measure and then run models* (Ve al terreno, mira alrededor, mide, y luego ejecuta modelos).

It should be noted, however, that LCZs include other indicators related to the thermal properties of urban materials (thermal admittance and albedo) and to artificial sources of urban heat (anthropogenic heat release) that are rarely included when applying this classification. Given the difficulty in accessing data of this nature, most studies (including this research) often omit them, and perhaps this is introducing a bias in the classification. However, the LCZs do not include any weighting system that applies to the indicators, which gives greater relevance to some indicators than others, and therefore prevents the omission of certain parameters. And, perhaps more importantly, the qualitatively defined LCZ classes themselves (see from “Compact High-rise” to “Sprawling”) may not adequately reflect the importance of these other indicators, such as those associated with materials. An example of this is that virtually all urban LCZs are defined as zones where the predominant materials are “concrete, steel, stone and glass”.

In any case, and although the diurnal urban thermal differences are relevant, it is also unclear to what extent they are due to a structural climatic background phenomenon (equivalent to the heat island) or, on the contrary, to aspects more linked to the microclimatic scale. In this study, as in many others before, a mild cool island has been identified. On the other hand, it is often observed that its distribution is not so clearly concentric, nor does it occur in the areas where the nocturnal heat island is most intense. Added to this is the problem of possible overheating of the sensors in the months close to the summer solstice (due to more intense and continuous solar radiation), which adds further uncertainty precisely at the times of the year when the impact of daytime temperatures may be most relevant for the thermal comfort and energy demand of buildings.

All of this demonstrates the need to develop more and better monitoring campaigns to further investigate the phenomenon and relate it to indicators. It serves to highlight the importance of contextualisation and metadata, as well as data quality control. And it points to the need for standardisation and systematisation of these campaigns in order to have accurate and reliable information, not only to observe and analyse the phenomenon, but also to be able to develop models that help us to understand it better. As Velasco (2018) recently titled one of his papers: *Go to field, look around, measure and then run models*.

15.2. On the urban weather files and the local scale

One of the consequences of not being able to use a classification system such as the LCZs is the definition of alternative urban climatic zones, just delimited on the basis of winter and summer urban climate severity. The limits of these zones are therefore not directly related to the physical characteristics of the urban environment, but only indirectly related through the link established between the measurements and the physical context in which they are carried out.

This, which could be seen as a limitation of this study, does not seem so relevant if we take into account the scale on which the study is focused. It should be remembered that, although the monitoring was carried out within the urban canyon, in the urban canopy layer (see **section 10.1**), its purpose is to represent climatic conditions on a local scale, not on a microclimatic scale. To this end, a major effort was made to ensure the correct contextualisation and study of the representativeness of the measurements (**chapter 11**). This made it possible to work with locations that showed, during the analysis stage and with a high degree of correspondence, the expected behaviour of the fabric in which they were inserted. In other words, it was possible to minimise the influence of the microclimatic variations inherent to the scale at which the measurements were taken.

At the local scale, the differences between urban fabrics are blurred to a certain degree. For example, if one looks at the LCZs, one can observe that in the city of Madrid there are only 6 major types of urban LCZs: compact midrise (LCZ 2), open high-rise, midrise and low-rise (LCZs 4, 5 and 6), large low-rise (LCZ 8) and dispersed building (LCZ 9). These classes may seem insufficient, but the results show otherwise: sometimes it is even difficult to distinguish the thermal behaviour between them (e.g. between LCZs 4 and 5).

Studying the phenomenon on the local scale implies an abstraction of the physical reality, the influence of which can be observed in detail on the microclimatic scale. It is in this abstraction that the development of urban weather files seems to have a better place. These files improve the climatic contextualisation of buildings with respect to the information available hitherto (focused on the regional scale of climate), but they cannot be understood as a full representation of the microclimatic conditions of the urban environment.

However, this does not imply that these weather files are of no use in microclimatic studies. On the contrary, they can be used to define the boundary conditions of detailed microclimatic models. Software such as ENVI-met (ENVI-met, 2021), used

15.2. Sobre los archivos climáticos urbanos y la escala local

Una de las consecuencias de no haber podido emplear un sistema como las LCZs es la definición de unas zonas climáticas urbanas alternativas, únicamente delimitadas a partir de la severidad climática urbana de invierno y de verano. Los límites de estas zonas no están, por tanto, directamente relacionados con las características físicas del entorno urbano; únicamente lo están de forma indirecta, a través de la vinculación que se establece entre las mediciones y el contexto físico en el que se llevan a cabo.

Esto, que podría entenderse como una limitación de este estudio, no parece tan relevante si se atiende a la escala en la cual se enfoca el estudio. Conviene recordar que, aunque la monitorización se ha llevado a cabo dentro del cañón urbano, en el palio urbano (véase **apartado 10.1**), su vocación es la de representar las condiciones climáticas en la escala local, no en la escala microclimática. Para ello se ha llevado a cabo un importante esfuerzo orientado hacia la correcta contextualización y el estudio de la representatividad de las mediciones (**capítulo 11**). Esto ha permitido trabajar con ubicaciones que han mostrado, durante la etapa de análisis y con una elevada correspondencia, el comportamiento esperable al tejido en el que se insertaban. Es decir, se ha podido minimizar la influencia de las variaciones microclimáticas propias de la escala en la que se producían las mediciones.

En la escala local, las diferencias entre tejidos se difuminan hasta cierto grado. Por ejemplo, si se atiende a las LCZs, se observará que en la ciudad de Madrid apenas se diferencian 6 tipos de LCZs urbanas: tejidos compactos de media altura (LCZ 2), abiertos de gran, media y pequeña altura (LCZs 4, 5 y 6), edificación de gran formato y baja altura (LCZ 8), y edificación dispersa (LCZ 9). Estas clases pueden parecer insuficientes, pero los resultados muestran lo contrario. Incluso hay veces que es difícil distinguir el comportamiento térmico entre ellas (p. ej., entre las LCZs 4 y 5).

Estudiar el fenómeno en la escala local supone una abstracción sobre la realidad física, cuya influencia sí que se observa en detalle en la escala microclimática. Es en esta abstracción donde parece que puede tener mejor cabida el desarrollo de los archivos climáticos urbanos. Éstos actúan mejorando la contextualización climática de los edificios con respecto a la información disponible hasta ahora (enfocados en la escala regional del clima), pero no pueden entenderse como una perfecta representación de las condiciones microclimáticas del entorno urbano.

De todas formas, esto no significa que los archivos climáticos desarrollados durante este trabajo de investigación no sean de utilidad en estudios microclimáticos. Al contrario, éstos pueden servir para definir las condiciones de contorno de modelos microclimáticos detallados. De hecho, programas informáticos como ENVI-met (ENVI-met, 2021), *software* empleado para modelar el intercambio

energético en la microescala mediante dinámica de fluidos y mencionado anteriormente en la introducción de este documento, emplean habitualmente un archivo climático para poder contextualizar correctamente el modelo; es decir, para poder tener un punto de referencia a partir del cual ajustar las condiciones climáticas (véase, por ejemplo, el reciente trabajo desarrollado por Detommaso et al., 2021). De hecho, conviene recordar que de entre las propuestas de modelización numéricas, es habitual encontrar propuestas donde unos modelos se *acoplan* a otros, generando una aproximación a través de distintas escalas, y donde cada modelo resuelve los intercambios energéticos propios de su escala (Best and Grimmond, 2015; Grimmond et al., 2011, 2010; Lauzet et al., 2019).

Adoptar una aproximación a través de escalas parece una estrategia adecuada, ya que permite ajustar el nivel de detalle al problema que se pretende analizar. En este sentido, el modelo empírico que aquí se presenta se sitúa entre los observatorios meteorológicos, enfocados en la escala regional y de los cuales se alimenta, y los programas de simulación que modelizan las condiciones microclimáticas de entornos urbanos, a los que puede alimentar.

15.3. Sobre el modelo empírico de la isla de calor urbana de Madrid

El modelo empírico planteado se basa en múltiples redes neuronales artificiales que permiten reconstruir series temporales de temperatura y humedad relativa, en una serie de puntos urbanos, y a partir de las series temporales de un punto de referencia (en este caso, el observatorio de la AEMET de Barajas). Estas series temporales, generadas de forma artificial, son las que permiten obtener un año meteorológico típico característico de cada ubicación, necesarios a su vez para la creación de su respectivo archivo climático urbano.

Este modelo se fundamenta en un total de 40 redes neuronales artificiales, divididas en partes iguales entre las que modelan los datos de temperatura y las que modelan la humedad relativa, para cada uno de los 20 puntos urbanos utilizados durante la monitorización. Se trata, por tanto, de un *modelo de modelos*, o de una agrupación de modelos si se prefiere, pero que en cualquier caso debe entenderse como una única entidad. Esto responde no sólo al objetivo de este trabajo de investigación por desarrollar una solución integral (que considere el conjunto del municipio), sino a la forma en la que esta solución se ha aplicado para trasladar a los archivos climáticos el efecto de la isla de calor.

Es cierto que las redes neuronales que forman parte de este modelo se han entrenado de forma independiente entre sí, y que éstas generan un resultado completo y útil para muchos objetivos. De hecho, esto ha permitido ensayar centenares de alternativas con un único punto de medición antes de seleccionar el enfoque óptimo de la modelización (véase **apartado 13.2**). Sin embargo, este resultado, de forma independiente, no permite completar los objetivos de este

for modelling energy exchange at the microscale using computer fluid dynamics and already mentioned in the introduction of this document, typically uses a weather file in order to correctly contextualise the model; that is, to have a reference point from which to adjust the climatic conditions (see, for example, the recent work by Detommaso et al., 2021). In fact, it is worth noting that, among the numerical modelling proposals, it is common to find approaches where some models are coupled to others, generating an approximation across different scales, and where each model solves the energy exchanges specific to its scale (Best and Grimmond, 2015; Grimmond et al., 2011, 2010; Lauzet et al., 2019).

Adopting a multi-scale approach seems to be an appropriate strategy, since it allows the level of detail to be adjusted to the problem to be analysed. In this sense, the empirical model presented here is situated between the meteorological observatories, which focus on the regional scale and from which it is fed, and the simulation programmes that model the microclimatic conditions of urban environments, to which it can help contextualise.

15.3. On the empirical model of the urban heat island of Madrid

The proposed empirical model is based on multiple artificial neural networks that enable the reconstruction of temperature and relative humidity time series in a number of urban points. These time series, generated artificially from a reference point (the AEMET observatory in Barajas airport), are the ones that make it possible to obtain a typical meteorological year characteristic of each location, and which are in turn necessary for the creation of their respective urban weather file.

This model is based on a total of 40 artificial neural networks, divided equally between those modelling temperature data and those modelling relative humidity, and corresponding to each of the 20 measurement urban points. It is therefore a *model of models*, or a grouping of models, but which should in any case be regarded as a single entity. This not only reflects the objective of this research for developing an integral solution (that considers the municipality as a whole), but also the way in which this solution was applied to include the urban heat island effect into the weather files.

It is certain that the neural networks that are part of this model were trained independently of each other, and that they generate a complete and useful output for many purposes. Indeed, this made it possible to test hundreds of alternatives with a single measurement point before selecting the optimal modelling approach (see **section 13.2**). However, this result, on its own, does not fulfil the objectives of this research work. That is, with the independent results of each neural network it

would not be possible to obtain a battery of representative weather files for the whole municipality. It is required to provide a common framework in which the results of these neural networks can be jointly produced and analysed, and this is therefore why this solution is conceived as a single unit.

It should also be noted that the neural networks are connected both by their own structure and configuration, which is common to all of them, and by the data that feed them, including the same parameters and covering the same time period. Their results are used to obtain the heating and cooling degree days (HDD and CDD) with which their spatial distribution is modelled and the climate severity clusters are generated, both for winter and summer. From there, the most suitable typical meteorological years were selected to represent the climatic characteristics of the municipality as a whole. If any of these neural networks did not exist, the final result would be altered.

The decision to work with independent neural networks to model each parameter at each point was not motivated by the impossibility of developing a single large neural network where all the necessary outputs would be produced, but by the interest of maintaining a simple and scalable structure. Indeed, it was found that the combined modelling of the two variables (temperature and relative humidity) did not lead to an improvement in the accuracy of the models (section 13.4). Thus, a structure based on independent neural networks was considered scalable, so that new points could be included in the modelling while not affecting the modelling already carried out for the other variables. This allows, for example, the development of monitoring campaigns in different phases. So, as more measurement points are available, more networks are trained with which to reconstruct the time series and complement the available information.

15.4. On the effect of the urban heat island on buildings' energy demand

According to the results from the case study presented in section 14.5, the reduction in heating demand in the urban centre is, in absolute terms, twice as large as the increase in cooling (14.5 kWh/m²/year versus -6.3 kWh/m²/year). Based on these figures, it appears that the increase in the cooling energy demand is compensated by the reduction in the heating. One could interpret the UHI as a net-positive effect on the energy performance of buildings. It is worth making a brief note on this idea.

Firstly, the results presented here are limited to a specific case study, located in the city of Madrid, where winters are more severe than summers. It should be noted that these results should not be

trabajo de investigación. Es decir, con los resultados independientes de cada red neuronal no se podría obtener una batería de archivos climáticos representativos de todo el municipio. Es necesario proporcionar un marco común donde los resultados de estas redes neuronales se produzcan y analicen de forma conjunta, y por ello se entiende esta solución como un único modelo.

También debe señalarse que las redes neuronales se encuentran conectadas tanto por su propia estructura y configuración, común a todas ellas, como por los datos que las alimentan, que incluyen los mismos parámetros y cubren el mismo periodo temporal. Sus resultados se emplean para obtener los grados día de calefacción y refrigeración (HDD y CDD) con los que se modela su distribución espacial y se generan clústeres de severidad climática, tanto en invierno como en verano. Y es a partir de ahí cuando se seleccionan los años meteorológicos típicos más adecuados para representar las características climáticas del conjunto del municipio. Si alguna de estas redes neuronales no existiese, el resultado final se vería alterado.

Conviene señalar que la decisión de trabajar con redes neuronales independientes para modelar cada parámetro en cada punto no viene motivada por la imposibilidad de desarrollar una única gran red neuronal donde se produjeran todas las salidas necesarias, sino por el interés de mantener una estructura sencilla y escalable, y tras haber constatado que la modelización conjunta de las dos variables (temperatura y humedad relativa) no conducía a una mejora en la precisión de los modelos (apartado 13.4). Se considera que esta estructura es escalable en tanto en cuanto podrían incluirse nuevos puntos a la modelización mediante nuevas redes neuronales y ello no afectaría a la modelización ya realizada del resto de variables. Esto permite, por ejemplo, el desarrollo de campañas de monitorización por etapas y donde, a medida que se dispone de más puntos de medición, se van entrenando más redes con las que reconstruir las series temporales y complementar la información disponible.

15.4. Sobre el efecto de la isla de calor en la demanda energética de edificios

De acuerdo con los resultados obtenidos, podría interpretarse que la reducción de la demanda de calefacción debida al efecto de la isla de calor compensa el aumento de la demanda de refrigeración. En el caso de estudio presentado en el apartado 14.5, la reducción en la demanda de calefacción en la zona centro es, en términos absolutos, el doble que el aumento registrado con la refrigeración (14.5 kWh/m²año frente a -6.3 kWh/m²año). De este modo, podría hacerse la lectura de que la isla de calor produce un efecto positivo en cuanto al comportamiento energético de edificios se refiere. Conviene realizar un breve apunte sobre esta idea.

En primer lugar, los resultados aquí presentados se limitan a un caso de estudio concreto, situado en la ciudad de Madrid, y donde los inviernos son más severos que los veranos. Aunque resulta evi-

dente, debe señalarse que estos resultados no deben extrapolarse a otros contextos ni a otras situaciones. También conviene recordar que el objetivo de estas simulaciones se limita a mostrar que los archivos climáticos urbanos generados funcionan correctamente, así como a apuntar al orden de magnitud del impacto en la demanda energética derivado de la variabilidad climática urbana. Los resultados de la simulación son, por lo tanto, orientativos y, en ningún caso, definitivos.

Pero, incluso limitándolo al contexto de este caso de estudio y la ciudad de Madrid, sería cuestionable afirmar que el efecto de la isla de calor produce un efecto positivo en el comportamiento energético de edificios. Conviene señalar que las demandas de calefacción y refrigeración no deben considerarse en ningún caso como intercambiables o equivalentes. No debe olvidarse que demanda energética no equivale a consumo energético, ni éste a esfuerzo económico.

Los edificios *dialogan* con su entorno de forma distinta en función del momento del año. Muestra de ello son las estrategias pasivas, que permiten acondicionar un ambiente interior sin necesidad de utilizar sistemas mecánicos. En invierno, aumentar el espesor del aislamiento del cerramiento podría resolver gran parte del incremento de la demanda de refrigeración sin que necesariamente se produzca un mayor aporte de energía, más allá de la embebida en la fabricación, transporte e instalación de los materiales. En este caso, el edificio se aísla de su entorno, estableciendo una clara barrera entre el ambiente interior y el exterior, por lo que resulta relativamente sencillo adaptarse a ambientes más fríos.

En verano, sin embargo, la ventilación natural es una de las principales estrategias para reducir la temperatura interior, tanto por sí sola como en combinación con otras estrategias, como es el empleo de inercia térmica (Neila González, 2004). El diálogo entre el ambiente interior y el exterior se lleva, en esta época del año, a máximos. Podría ser en este caso cuando el efecto de la isla de calor impacte de forma más significativa, y sin aparente remedio *pasivo*, en el ambiente interior. En estos casos, y salvo que se mejorasen las condiciones ambientales exteriores, podría tornarse imprescindible el uso de la refrigeración por medios mecánicos.

Todo ello sin entrar a valorar los actuales escenarios de cambio climático, ni el posible efecto escalada derivado de las emisiones antropogénicas producidas por los equipos de climatización. En este sentido debe señalarse que, aunque las emisiones antropogénicas de estos sistemas pueden parecer reducidas si se comparan con los flujos energéticos globales, si éstas se concentran en puntos concretos (p. ej., patios de vecinos), su impacto podría ser ciertamente relevante. Esta situación podría ser especialmente delicada para los hogares en situación de pobreza energética, donde no es frecuente disponer de sistemas mecánicos de refrigeración o, si se disponen, el coste de su utilización es difícilmente asumible por los elevados precios de la energía.

extrapolated to other contexts or other situations without a further analysis. It is also worth recalling that the objective of these simulations was limited to demonstrating the workability of the new weather files, as well as to provide an estimation of the order of magnitude of the impact on energy demand derived from urban climate variability. The simulation results are therefore indicative and by no means definitive.

But even limited to the context of this case study and the city of Madrid, it would be arguable to claim that the UHI has a positive impact on the energy performance of buildings. It should be noted that heating and cooling demands should not be considered interchangeable or equivalent in any case. It should not be forgotten that energy demand does not equal energy consumption, nor does energy consumption equal economic effort.

Buildings interact with their surroundings in different ways depending on the time of the year. Passive strategies, which allow an indoor environment to be conditioned without the use of mechanical systems, are an example of this. In winter, increasing the thickness of the insulation of the thermal envelope could solve a large part of the increase in cooling demand without necessarily producing a greater energy input, beyond that embedded in the manufacture, transport and installation of the materials. In this case, the building is isolated from its surroundings, establishing a clear barrier between the indoor and outdoor environment, making it relatively easy to adapt to colder environments.

In summer, however, natural ventilation is one of the main strategies to reduce indoor temperature, both on its own and in combination with other strategies, such as the use of thermal inertia (Neila González, 2004). The dialogue between the indoor and outdoor environment is, at this time of the year, maximised. This may be when the heat island effect impacts most significantly, and without any apparent passive remedy, on the indoor environment. In such cases, and unless outdoor environmental conditions improve, mechanical cooling may become unavoidable.

All of this without taking into account current climate change scenarios or the possible escalation effect of anthropogenic emissions from air-conditioning equipment. In this regard, it should be noted that, although anthropogenic emissions from these systems may seem small when compared to global energy flows, if they are concentrated in specific points (e.g. neighbourhood courtyards), their impact could certainly be significant. This situation could be particularly sensitive for households living in energy poverty, where mechanical cooling systems are often not available or, if available, the cost of using them is difficult to afford due to high energy prices.

16. Conclusions

The results obtained from this research confirm the initial hypothesis, demonstrating that it is possible to characterise the UHI effect empirically and comprehensively by generating weather files in order to improve the building energy performance evaluation in urban environments.

The main objective of this thesis was also fulfilled, having developed an empirical model of Madrid's UHI from which it has been possible to generate urban weather files with which to represent the climatic reality of the different urban areas of Madrid.

The monitoring campaign has proven to be effective in capturing the urban thermal variability of Madrid as a whole, while at the same time providing sufficient data for modelling. Thanks to the effort made during the design and the measurement's contextualisation, the influence of the microclimatic effects typical of urban areas were minimised.

The analysis of the data at the hourly and intra-urban level has further deepened in the representativeness of the measurements, showing the correspondence between the data collected and their urban context. It has also provided a better understanding of the hourly and seasonal evolution of the urban heat island, as well as its correspondence with the LCZ scheme, one of the best known and most widely applied classification systems in the study of urban climate.

The empirical approach of the proposed model, based on artificial neural networks, has proven to be able to morph time series data with high accuracy. The process, consisting of adapting time series from a reference point to a predetermined urban context, has proven to be effective and flexible, allowing for a scalable development.

The accuracy of these artificial time series is no less than that obtained by other models of a numerical nature. The empirical approach adopted in this thesis has also allowed for a high degree of certainty regarding the spatial correspondence of the morphed time series and their urban environment. This guarantees that the developed weather files are linked to the urban reality they represent, something that seems to be more complicated when working with numerical models.

The urban weather files have proven to be fully functional. Their association to urban climatic zones, based on winter and summer urban climate severity, facilitates their interpretation and their widespread use. The results obtained from the

16. Conclusiones

Los resultados obtenidos de este trabajo de investigación permiten confirmar la hipótesis de partida, demostrando que es posible caracterizar empírica e integralmente el efecto de la isla de calor mediante la generación de archivos climáticos con el fin de mejorar la evaluación energética de edificios en entornos urbanos.

También se ha dado cumplimiento al objetivo principal de esta tesis doctoral, habiéndose desarrollado un modelo empírico de la isla de calor urbana de la ciudad de Madrid a partir del cual se han podido generar archivos climáticos urbanos con los que representar la realidad climática de las diferentes zonas urbanas del municipio.

La campaña de monitorización ha demostrado ser capaz de capturar la diversidad térmica urbana de Madrid en su conjunto, a la vez que ha aportado los datos suficientes para la modelización. Gracias al esfuerzo realizado durante la etapa de diseño y contextualización de los equipos, se ha minimizado la influencia de los efectos microclimáticos propios del *palio urbano*, escala donde se ha desarrollado la monitorización.

El análisis de los datos en la escala horaria e intraurbana ha profundizado en la representatividad de las mediciones, mostrando la correspondencia entre los datos recabados y su contexto urbano. También ha aportado un mejor conocimiento sobre la evolución horaria y estacional de la isla de calor, así como su correspondencia con las *Local Climate Zones* (Stewart and Oke, 2012), uno de los sistemas de clasificación climática urbana más conocidos y aplicados en el estudio del clima urbano.

El enfoque empírico del modelo planteado, basado en redes neuronales artificiales, ha demostrado ser capaz de generar series de datos temporales artificiales con una elevada precisión. El proceso, consistente en la adaptación de series temporales desde un punto de referencia a un contexto urbano predeterminado (técnica conocida como *morphing*), ha demostrado ser efectivo y flexible, permitiendo un desarrollo escalable.

La precisión de estas series temporales artificiales es, al menos, equivalente a la obtenida por otros modelos de naturaleza numérica. El enfoque empírico adoptado en esta tesis ha permitido contar, además, con una elevada certeza en cuanto a la correspondencia espacial de las series temporales artificiales y su entorno urbano. Esto garantiza que los archivos climáticos desarrollados se encuentran vinculados con la realidad urbana que representan, algo que parece más complicado cuando se trabaja con modelos numéricos.

Los archivos climáticos urbanos desarrollados han demostrado ser completamente funcionales. Su asociación a zonas climáticas urbanas, basadas en la severidad climática urbana de invierno y verano,

facilita su interpretación y que se generalice su uso. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones energéticas con un edificio plurifamiliar de viviendas, empleado como caso de estudio, apuntan a diferencias significativas en la demanda de los edificios de Madrid, con un incremento medio del 31% en refrigeración y una reducción media del 18% en calefacción.

Estos resultados sugieren un impacto de la isla de calor en el comportamiento energético de los edificios de un orden de magnitud equivalente al efecto que provoca la orientación de una vivienda o su posición relativa en el edificio. Aunque estos resultados se encuadran a un único caso de estudio y a la ciudad de Madrid, confirma la necesidad de mejorar la información climática disponible en entornos urbanos.

energy simulations with a multi-family residential building, used as a case study, point to significant differences in the building's energy demand, with an average increase in Madrid of 31% in cooling and an average reduction of 18% in heating.

These results suggest an impact of the UHI on the energy performance of buildings of an order of magnitude equivalent to the effect of the orientation of a dwelling or its relative position in the building. Although these results are limited to a single case study and to the city of Madrid, it confirms the need to improve the climatic information available in urban environments.

17. Future research lines

The development of this doctoral thesis has enabled the identification of several areas of interest that should be pursued in future research work.

Firstly, it is proposed to give continuity to the evaluation of the impact of the urban heat island on the energy performance of buildings. It is necessary to continue advancing in the knowledge that allows us to approach, with a greater degree of detail, the response of buildings to the urban climatic reality in which they are inserted. This line, initiated in our research group in 2014 with the MODIFICA project (BIA2013-41732-R), now has a battery of urban weather files that will most likely facilitate the development of this task with enough accuracy.

Specifically, the aim is to develop parameterised energy simulations with a wide range of typologies, orientations and urban scenarios. Also, the definition of a set of typologies representative of each urban fabric, where building and environment are linked, and which allow the correspondence between indoor and outdoor environment to be evaluated (e.g., López Moreno et al., 2021). The latter can be of great interest if combined with software based on computational fluid mechanics (CFD; e.g. Detommaso et al., 2021), and where the microclimatic conditions introduced by parks, squares, or neighbours' courtyards can be studied in greater detail.

The data collected during this research work can not only be useful for validating models, but also for validating observations carried out through less regulated procedures. Recent research such as Bell et al. (2015), Muller et al. (2015) or Chapman et al. (2017) point to the possibilities of massive citizen observation networks, and there are now dozens of experiences that have demonstrated their applicability (Chen et al., 2018; Fenner et al., 2017; Meier et al., 2017, 2015; Nipen et al., 2020; Venter et al., 2021, 2020; Zumwald et al., 2021). These need to filter and validate the collected data, for which specific techniques have been designed (Bruns et al., 2018; Meier et al., 2017; Napoly et al., 2018). For the latter, the data from this research work can be of great use. The combination of information from various sources is very likely to contribute to the broadening of knowledge on urban climate at the local and microclimatic scale, as well as to increasing citizen participation and awareness.

Another line of interest is related to the study of air humidity in urban environments. Although there has been no shortage of work on this parameter (Ackerman, 1987; Chandler, 1965; Hage, 1975; Unger, 1999), its study is not as well established or developed as that of temperatures, espe-

17. Futuras líneas de investigación

El desarrollo de esta tesis doctoral ha permitido identificar diversas áreas de interés a las que convendría dar continuidad en futuros trabajos de investigación.

En primer lugar, se plantea dar continuidad a la evaluación del impacto de la isla de calor sobre el comportamiento energético de edificios. Es necesario seguir avanzando en el conocimiento que nos permita aproximar, con mayor grado de detalle, la respuesta de la edificación a la realidad climática urbana en la que se inserta. Esta línea, iniciada en nuestro grupo de investigación en el año 2014 con el proyecto MODIFICA (BIA2013-41732-R), dispone ahora de una batería de archivos climáticos urbanos que muy probablemente podrá facilitar el desarrollo de esta tarea con precisión.

En concreto, se apunta al desarrollo parametrizado de simulaciones energéticas con un amplio abanico de tipologías, orientaciones y escenarios urbanos. También, a la definición de un conjunto de tipologías representativas de cada tejido urbano, donde edificación y entorno se encuentren vinculados, y que permita evaluar la correspondencia entre ambiente interior y exterior (p. ej., (López-Moreno et al., 2022)). Esto último puede resultar de gran interés si se combina con software basado mecánica de fluidos computacional (CFD; p. ej., Detommaso et al., 2021), y donde se pueda estudiar con mayor grado de detalle las condiciones microclimáticas introducidas por parques, plazas, o patios de vecinos.

Los datos recabados durante este trabajo de investigación no solo pueden ser de utilidad para validar modelos, sino también para validar observaciones llevadas a cabo mediante procedimientos menos reglamentados. Investigaciones recientes como las desarrolladas por Bell et al. (2015), Muller et al. (2015) o Chapman et al. (2017) apuntan al potencial de las redes masivas de observación ciudadanas, y a día de hoy existen decenas de experiencias que han demostrado su utilidad (Chen et al., 2018; Fenner et al., 2017; Meier et al., 2017, 2015; Nipen et al., 2020; Venter et al., 2021, 2020; Zumwald et al., 2021). Estas necesitan filtrar y validar los registros obtenidos, para lo que se han diseñado técnicas específicas (Bruns et al., 2018; Meier et al., 2017; Napoly et al., 2018). Para esto último puede ser de gran utilidad los datos procedentes de este trabajo de investigación. La combinación de la información procedente de diversas fuentes es muy probable que contribuya a ampliar el conocimiento sobre el clima urbano en la escala local y microclimática, así como a aumentar la participación y conciencia ciudadana.

Otra línea de interés está relacionada con el estudio de la humedad del aire en entorno urbanos. Aunque no han sido pocos los trabajos orientados a este parámetro (Ackerman, 1987; Chandler, 1965; Hage, 1975; Unger, 1999), su estudio no está tan arraigado ni desarrollado como el de las temperaturas, especialmente en el palio urbano (Oke et al., 2017c). Además, parece que puede ser más com-

pleja de interpretar, ya que el resultado puede diferir si se estudia la humedad específica o la humedad relativa.

Por lo general y en términos relativos, la *isla de sequedad* es una realidad diurna, resultado tanto de la ausencia de zonas permeables y la menor vegetación, como por unas mayores temperaturas. Recientes estudios se han orientado hacia la influencia de zonas verdes y azules (masas de agua, Ampatzidis and Kershaw, 2020), así como en el vínculo entre humedad y LCZs (Yang et al., 2020a). Pero muchas de sus características, tanto relativas a su dinámica temporal como espacial, siguen siendo algo por explorar. A este respecto, se espera que los datos recabados por la campaña de monitorización que se presenta en esta tesis motiven alguna investigación en este sentido.

Los resultados de esta tesis doctoral también pueden tener aplicaciones en otros campos de investigación. Por ejemplo, entre los estudios epidemiológicos es conocido que la limitada disponibilidad de datos meteorológicos en entornos urbanos dificulta el descenso a la escala intraurbana. En estudios anteriores en los que se ha colaborado con investigadores de la Unidad de Cambio Climático, Salud y Medio Ambiente del Instituto de Salud Carlos III, esta aproximación se ha intentado realizar empleando los datos procedentes de las estaciones de calidad del aire (Sanz Fernández et al., 2016) y a través de los observatorios oficiales de la AEMET situadas en el municipio (López-Bueno et al., 2020a, 2020b). Sin embargo, las primeras no demostraron tener la precisión requerida, y los segundos no muestran una imagen detallada del efecto de la isla de calor. En este sentido, las series temporales artificiales generadas por el modelo que se ha desarrollado en esta tesis doctoral podrían ser de utilidad para estudiar el impacto de los extremos térmicos sobre la salud a nivel infra municipal.

Finalmente, en la discusión se ha mencionado que el efecto de la isla de calor puede afectar con una mayor intensidad a los hogares en situación de pobreza energética. Aunque este fenómeno se ha vinculado tradicionalmente con el invierno, en los últimos años la preocupación por la situación de estos hogares durante los meses de verano ha tomado impulso, especialmente entre los países del sur de Europa. En este sentido, varios trabajos de investigación sobre pobreza energética de verano han incorporado los datos y resultados sobre la isla de calor de Madrid, y que se espera continúen desarrollándose en los próximos años (Núñez-Peiró et al., 2021c; Sánchez-Guevara et al., 2019; Sánchez-Guevara Sánchez et al., 2020, 2017; Sanz Fernández et al., 2016).

Del mismo modo, cabe señalar que la campaña de monitorización iniciada en el Proyecto MODIFICA y recogida en esta tesis doctoral está tendiendo continuidad con el desarrollo de la monitorización de la isla de calor de Getafe. Ésta se engloba en el marco del proyecto EPIU (*Energy Poverty Intelligence Unit*, UIA04-212), financiado por el programa *Urban Innovative Actions* de la Unión Europea (UIA, <https://www.uia-initiative.eu/en>). En este proyecto, además,

cialmente en el entorno urbano (Oke et al., 2017c). In addition, it appears that it may be more complex to interpret, as the result may differ whether specific humidity or relative humidity is studied.

Both in general and in relative terms, the urban *dry island* is a diurnal reality, resulting both from the absence of permeable zones and less vegetation, and from higher temperatures. Recent studies have focused on the influence of green and blue zones (water bodies, Ampatzidis and Kershaw, 2020), as well as on the link between humidity and LCZs (Yang et al., 2020a). But many of their characteristics, both regarding their temporal and spatial dynamics, remain to be explored. In this respect, it is hoped that the data collected by the monitoring campaign presented in this thesis will motivate some research in this direction.

The results of this thesis may also have applications in other research fields. For example, among epidemiological studies it is well known that the limited availability of meteorological data in urban settings makes downscaling to the intra-urban level challenging. In previous studies in collaboration with researchers from the Climate Change, Health and Environment Unit of the Instituto de Salud Carlos III, this approach has been attempted using data from air quality stations (Sanz Fernández et al., 2016) and through official AEMET observatories located in the municipality (López-Bueno et al., 2020a, 2020b). However, the former did not prove to have the required accuracy, and the latter did not include a detailed picture of the urban heat island effect. In this sense, the artificial time series generated by the empirical model developed in this thesis could be useful to study the impact of the thermal extremes on health at the infra-municipal level.

Finally, the discussion highlighted that the urban heat island effect may affect households in energy poverty more intensely. Although this phenomenon has traditionally been linked to winter, in recent years concern about the situation of these households during the summer months has gained momentum, especially among southern European countries. In this sense, several research works on summer energy poverty have incorporated the data and results on the urban heat island of Madrid, and which are expected to continue to be developed in the coming years (Núñez-Peiró et al., 2021c; Sánchez-Guevara et al., 2019; Sánchez-Guevara Sánchez et al., 2020, 2017; Sanz Fernández et al., 2016).

Similarly, it should be noted that the monitoring campaign initiated in the MODIFICA project and included in this dissertation will continue with the development of the monitoring of the urban heat island in Getafe. This is part of the EPIU project (*Energy Poverty Intelligence Unit*, UIA04-212), funded

by the Urban Innovative Actions programme of the European Union (UIA, <https://www.uia-initiative.eu/en>). This project also includes two urban interventions in the public space of Getafe. The aim is to improve the interior conditions of dwellings by improving the microclimatic conditions of the urban space.

Funding has also been recently secured from the European Commission through the Horizon 2020 programme to develop a project focusing explicitly on summer energy poverty (COOLTORISE, *Raising summer energy poverty awareness to reduce cooling needs*). In the COOLTORISE project (<https://cordis.europa.eu/project/id/101032823/es>) it is expected to improve the conditions of more than 3000 vulnerable households during the overheated months. These households are distributed in four Mediterranean countries (Spain, Italy, Greece and Bulgaria), mainly in urban areas, where the UHI effect will play a key role in the design of intervention measures, both indoors and outdoors.

se plantean dos intervenciones urbanas en el espacio público de Getafe. Su finalidad es la de mejorar las condiciones interiores de las viviendas a través de las mejoras de las condiciones microclimáticas del espacio urbano.

También se ha conseguido recientemente obtener financiación de la Comisión Europea a través del programa *Horizon 2020* para coordinar un proyecto enfocado explícitamente en la pobreza energética de verano (COOLTORISE, *Raising summer energy poverty awareness to reduce cooling needs*). En el proyecto COOLTORISE (<https://cordis.europa.eu/project/id/101032823/es>) se espera mejorar las condiciones de más de 3000 hogares vulnerables durante los meses sobrecalentados. Estos hogares se encuentran distribuidos en cuatro países del arco mediterráneo (España, Italia, Grecia y Bulgaria), fundamentalmente en áreas urbanas, y donde el efecto de la isla de calor tendrá un protagonismo destacado a la hora de plantear medidas de intervención, tanto en el interior como en el exterior de las viviendas.

Anexo A:

Colección completa de publicaciones y otros trabajos de investigación

Annex A:
Complete collection of publications and other research

Artículos en revistas indexadas

Papers in indexed journals

Capítulos de libro indexados

Indexed book chapters

Proyectos de investigación competitivos

Competitive research projects

Informes para instituciones públicas

Reports for public institutions

Comunicaciones en congresos

Conference communications

Patentes concedidas

Granted patents

Otras publicaciones no indexadas

Other non-indexed publications

Artículos, entrevistas y menciones en medios de comunicación

Articles, interviews and mentions in the media

Artículos en revistas indexadas

Papers in indexed journals

- | | | |
|------|--|--------|
| 2022 | <p>On the identification of Homogeneous Urban Zones for the residential buildings' energy evaluation.</p> <p><i>Building and Environment</i></p> <p>López Moreno, H; <u>Núñez-Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108451</p> | JCR Q1 |
| 2021 | <p>Hourly evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones. The case of Madrid.</p> <p><i>Urban Climate</i></p> <p><u>Núñez-Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>doi: 10.1016/j.uclim.2021.100921</p> | JCR Q1 |
| 2021 | <p>Modelling long-term urban temperatures with less training data: A comparative study using neural networks in the city of Madrid.</p> <p><i>Sustainability</i></p> <p><u>Núñez-Peiró, M</u>; Mavrogianni, A; Symonds, P; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>doi: 10.3390/su13158143</p> | JCR Q2 |
| 2021 | <p>Health in neighbourhoods: impact of extreme temperatures = Salud en los barrios: impacto de las temperaturas extremas.</p> <p><i>Revista de Salud Ambiental</i></p> <p>Sánchez-Guevara, C; López-Bueno, JA; <u>Núñez Peiró, M</u>; Linares, C; Sanz Fernández, A</p> <p>url: https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1092</p> | JCI Q4 |
| 2020 | <p>The effect of cold waves on daily mortality in districts in Madrid considering sociodemographic variables.</p> <p><i>Science of the Total Environment</i></p> <p>López-Bueno, JA; Linares, C; Sánchez-Guevara, C; Sánchez Martínez, G; Mirón, IJ; <u>Núñez-Peiró, M</u>; Valero, I; Diaz, J</p> <p>doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142364</p> | JCR Q1 |
| 2020 | <p>Energy poverty in Madrid: Data exploitation at the city and district level.</p> <p><i>Energy Policy</i></p> <p>Sánchez-Guevara, C; Sanz Fernández, A; <u>Núñez Peiró, M</u>; Gómez Muñoz, G</p> <p>doi: 10.1016/j.enpol.2020.111653</p> | JCR Q1 |

- 2020 **The impact of heat waves on daily mortality in districts in Madrid: The effect of sociodemographic factors.** JCR Q1
Environmental Research
 López-Bueno, JA; Díaz, J; Sánchez-Guevara, C; Sánchez Martínez, G; Franco, M; Gullón, P; Núñez-Peiró, M; Valero, I; Linares, C
 doi: [10.1016/j.envres.2020.109993](https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109993)
- 2020 **Feminisation of energy poverty in the city of Madrid.** JCR Q1
Energy and Buildings
 Sánchez-Guevara Sánchez, C., Sanz Fernández, A., Núñez Peiró, M.
 doi: [10.1016/j.enbuild.2020.110157](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110157)
- 2020 **Municipal and infra-municipal impact of heat waves and cold spells on the health of men and women: The feminisation of poverty in Madrid = Impacto a nivel municipal e inframunicipal de las olas de calor y frío sobre la salud de hombres y mujeres: la feminización de la pobreza en Madrid** JCI Q4
Revista de Salud Ambiental
 López-Bueno, J; Díaz Jiménez, J; Núñez-Peiró, M; Sánchez-Guevara, C; Sanz Fernández, A; Gayoso Heredia, M; Neila, FJ; Gómez Muñoz, G; Valero, I; Linares Gil, C
 url: <https://ojs.diffundit.com/index.php/rsa/article/view/1065>
- 2019 **Source area definition for Local Climate Zones studies. A systematic review.** JCR Q1
Building and Environment
Núñez Peiró, M; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ
 doi: [10.1016/j.buildenv.2018.10.050](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.050)
- 2019 **Assessing population vulnerability towards summer energy poverty: Case studies of Madrid and London.** JCR Q1
Energy and Buildings
 Sánchez-Guevara, C; Núñez Peiró, M; Taylor, J; Mavrogianni, A; Neila González, FJ
 doi: [10.1016/j.enbuild.2019.02.024](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.024)
- 2016 **Towards a Dynamic Model for the Urban Heat Island of Madrid = Hacia un modelo dinámico para la isla de calor urbana de Madrid.** Avery index
Anales de Edificación
Núñez Peiró, M; Román López, E; Sánchez-Guevara, C; Neila González, FJ
 doi: [10.20868/ade.2016.3198](https://doi.org/10.20868/ade.2016.3198)

Capítulos de libro indexados

Indexed book chapters

- | | | |
|------|--|--------|
| 2021 | <p>Exposure and Vulnerability towards Summer Energy Poverty in the City of Madrid: A Gender Perspective</p> <p><i>Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions – Results of SSPCR 2019.</i></p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Sanz Fernández, A; Gayoso Heredia, M; López-Bueno, JA; Neila González, FJ; Linares Gil, C; Díaz Jiménez, J; Gómez Muñoz, G</p> <p>doi: 10.1007/978-3-030-57332-4_34</p> | Scopus |
| 2017 | <p>Update of the Urban Heat Island of Madrid and Its Influence on the Building's Energy Simulation</p> <p><i>Sustainable development and renovation in Architecture, Urbanism and Engineering.</i></p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>doi: 10.1007/978-3-319-51442-0_28</p> | Scopus |
| 2017 | <p>Urban Heat Island and vulnerable population. The case of Madrid</p> <p><i>Sustainable development and renovation in Architecture, Urbanism and Engineering.</i></p> <p>Sánchez-Guevara Sánchez, C; <u>Núñez Peiró, M</u>; Neila González, FJ</p> <p>doi: 10.1007/978-3-319-51442-0_1</p> | Scopus |

Proyectos de investigación competitivos

Competitive research projects

- | | | |
|------------|---|--|
| 2021 – act | <p>Proyecto COOLTORISE <i>Raising summer energy poverty awareness to reduce cooling needs</i></p> <p>Horizon 2020 – H2020. Comisión Europea</p> <p>IPs: Carmen Sánchez-Guevara, F. Javier Neila González</p> | <p>101032823</p> <p>1 515 243 €</p> |
| 2021 – act | <p>Proyecto MATEMAD <i>Materiales urbanos optimizados para ciudades más habitables y sostenibles: caracterización en el caso de Madrid</i></p> <p>Proyectos de I+D+i. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades</p> <p>IP: Beatriz Arranz Arranz</p> | <p>PID2020-114873RB-C32</p> <p>119 790 €</p> |

2020 – act	Proyecto EPIU <i>Energy Poverty Intelligence Unit</i> Urban Innovative Actions – UIA. Comisión Europea. IPs: Carmen Sánchez-Guevara; Agustín Hernández Aja	UIA04-212 6 242 850 €
2018 – 2020	Proyecto FEMENMAD <i>Feminización de la pobreza energética en el municipio de Madrid</i> Proyectos de investigación en materia de ciudadanía global y cooperación internacional para el desarrollo. Ayuntamiento de Madrid IP: F. Javier Neila González	- 49 111 €
2018 – 2019	Proyecto MODIF-HABIT <i>Modificación de los hábitos de uso y consumo de la energía de la vivienda mediante la visualización de datos en función del contexto climático</i> Retos Investigación. Ministerio de Economía y Competitividad IP: F. Javier Neila González	BIA2017-84576-R 112 530 €
2015 – 2017	Proyecto MODIFICA <i>Modelo predictivo del comportamiento energético de edificios de viviendas bajo condiciones de isla de calor</i> Retos Investigación. Ministerio de Economía y Competitividad IP: F. Javier Neila González	BIA2013-41732-R 157 000 €

Informes para instituciones públicas

Reports for public institutions

2017	Estudio de definición y protocolo de monitorización de medidas de adaptación para el cambio climático en el ámbito de la Plaza de Julián Marías, Usera. Neila González, FJ; <u>Núñez Peiró, M</u> ; Román López, E; Sánchez-Guevara, C Ayuntamiento de Madrid
2016	Estudio técnico sobre pobreza energética en la ciudad de Madrid Sanz Fernández, A; Gómez Muñoz, G; Sánchez-Guevara Sánchez, C; <u>Núñez Peiró, M</u> Ayuntamiento de Madrid

Comunicaciones en Congresos

Conference communications

2021	<p>Clustering energy-poor households using machine learning and socio-economic indicators</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Iglesias Martínez, JA; Sanz-Fernández, A; Ledezma Espino, AI; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Gayoso Heredia, M</p> <p>XIX Conferencia de la Asociación Española para la Inteligencia Artificial</p>	Nacional (Málaga)
2021	<p>Two decades of weather files in Spain. A comparison of their reliability for building energy modelling using the BESTEST method</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>6th International Conference on Technological Innovation in Building (CITE)</p>	Internacional (Madrid)
2021	<p>The urban thermal interaction between a metropolitan park and its urban surroundings. A case study in Madrid</p> <p>San Nicolás Vargas, P; <u>Núñez Peiró, M</u></p> <p>6th International Conference on Technological Innovation in Building (CITE)</p>	Internacional (Madrid)
2019	<p>Vulnerability towards summer energy poverty from a gender perspective. The case of Madrid</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Sanz Fernández, A; Gayoso Heredia, M; López-Bueno, JA; Neila González, FJ; Linares Gil, C; Díaz Jiménez, J; Gómez Muñoz, G.</p> <p>3rd International Conference on Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions (SSPCR)</p>	Internacional (Bolzano)
2018	<p>Habitabilidad y salud: variables meteorológicas</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u></p> <p>14^o Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA). Ponencia invitada</p>	Nacional (Madrid)
2017	<p>Update of the urban heat island of Madrid and its influence on the building's energy simulation</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions (CICSE)</p>	Internacional (Sevilla)

- | | | |
|------|--|----------------------------|
| 2017 | <p>Urban Heat Island and vulnerable population. The case of Madrid</p> <p>Sánchez-Guevara Sánchez, C; <u>Núñez Peiró, M</u>; Neila González, FJ</p> <p>3rd International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions (CICSE)</p> | Internacional
(Sevilla) |
| 2015 | <p>Towards a dynamic model for the urban heat island of Madrid</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Román López, E; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>III International Congress on Construction and Building Research (COINVEDI)</p> | Internacional
(Madrid) |

Patentes concedidas

Patentes concedidas

- | | | |
|------|---|----------|
| 2018 | <p>Abrigo meteorológico para sensores ambientales. ES 2642617 B2</p> <p><u>Núñez Peiró, M</u>; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Neila González, FJ</p> <p>Universidad Politécnica de Madrid</p> <p>url: https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/060270006/publication/ES2642617B2?q=pn%3DES2642617B2</p> | Nacional |
|------|---|----------|

Otras publicaciones no indexadas

Other non-indexed publications

- | | | |
|------|---|--|
| 2021 | <p>Vulnerabilidad vinculada a la pobreza energética en la vivienda</p> <p><i>Territorios Segregados y (Des)Gobernanza Urbana. Nápoles/Madrid/Barcelona</i></p> <p>Sánchez-Guevara Sánchez, C; Núñez Peiró, M; Román López, E</p> <p>url: https://oa.upm.es/66998/</p> | |
| 2020 | <p>¿Hace un calor de justicia?</p> <p><i>Tiempo de Transiciones</i></p> <p>Sanz Fernández, A; Núñez Peiró, M; Sánchez-Guevara Sánchez, C</p> <p>url: https://www.miteco.gob.es/es/ceneam/recursos/pag-web/hace-calor-justicia.aspx</p> | |

Artículos, entrevistas y menciones en medios de comunicación

Articles, interviews and mentions in the media

- 2021 **La nueva factura de la luz sigue dejando atrás a los hogares vulnerables**
Gayoso Heredia, M; Sanz Fernández, A; Sánchez-Guevara Sánchez, C; Núñez Peiró, M
The Conversation
url: <https://theconversation.com/la-nueva-factura-de-la-luz-sigue-dejando-atras-a-los-hogares-vulnerables-161232>
- 2019 **El calor va por barrios**
Entrevista concedida a Daniele Grasso
El País
url: https://elpais.com/ccaa/2019/07/31/madrid/1564572109_825565.html
- 2019 **Onda Madrid. Madrid Directo**
Entrevista concedida a Nieves Herrero
url: http://media.telemadrid.es/TMDAUD20190712_0029.mp3 (min 41)
- 2019 **La pobreza energética en Madrid tiene rostro de mujer**
Sánchez-Guevara Sánchez, C; Sanz Fernández, A; Linares Gil, C; Neila González, FJ; López-Bueno, JA; Díaz, J; Gayoso Heredia, M; Núñez Peiró, M
The Conversation
url: <https://theconversation.com/la-pobreza-energetica-en-madrid-tiene-rostro-de-mujer-120128>
- 2019 **El cambio climático acentúa la pobreza energética de verano**
Sánchez-Guevara Sánchez, C; Sanz Fernández, A; Núñez Peiró, M
The Conversation
url: <https://theconversation.com/el-cambio-climatico-acentua-la-pobreza-energetica-de-verano-112978>
- 2017 **El reto de hacer sostenible nuestro parque de viviendas**
Diario de Sevilla
url: https://www.diariodesevilla.es/sevilla/reto-hacer-sostenible-parque-viviendas_0_11_24588173.html



Bibliografía

References

- Ackerman, B., 1987. Climatology of Chicago Area Urban-Rural Differences in Humidity. *J. Clim. Appl. Meteorol.* [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1987\)026<0427:COCAUR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1987)026<0427:COCAUR>2.0.CO;2)
- Akbari, H., Konopacki, S., 2005. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy* 33, 721–756. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.001>
- Alexander, P.J., Bechtel, B., Chow, W.T.L., Fealy, R., Mills, G., 2016. Linking urban climate classification with an urban energy and water budget model: Multi-site and multi-seasonal evaluation. *Urban Clim.* 17, 196–215. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.003>
- Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J., 2012. Influence of the urban microclimate in street canyons on the energy demand for space cooling and heating of buildings. *Energy Build.* 55, 823–832. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.013>
- Almendros Coca, M.Á., 1992. Aspectos climáticos del parque del Retiro (Madrid). *Estud. Geográficos* 53, 217–240.
- Almendros Coca, M.Á., López Gómez, A., 1995. La isla de calor en Madrid y las situaciones sinópticas. *Estud. Geográficos* 56, 207–221.
- Amblar-Francés, M.P., Ramos-Calzado, P., Sanchis-Lladó, J., Hernanz-Lázaro, A., Peral-García, M.C., Navascués, B., Dominguez-Alonso, M., Pastor-Saavedra, M.A., Rodríguez-Camino, E., 2020. High resolution climate change projections for the Pyrenees region. *Adv. Sci. Res.* 17, 191–208. <https://doi.org/10.5194/asr-17-191-2020>
- Ampatzidis, P., Kershaw, T., 2020. A review of the impact of blue space on the urban microclimate. *Sci. Total Environ.* 730, 139068. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139068>
- Andersen, B., Eidorff, S., Lund, H., Pedersen, E., Rosenørn, S., Valbjørn, O., 1977. Meteorological Data for Design of Building and Installation: A Reference Year, Thermal Insulation Laboratory. Report no 66, 2.
- Andersen, B., Eidorff, S., Lund, H., Pedersen, E., Rosenørn, S., Valbjørn, O., 1974. Referenceåret - Vejrdata for VVS beregninger (The Reference Year - Weather data for HVAC-calculations), Report no. 89.
- Ando, T., Ueyama, M., 2017. Surface energy exchange in a dense urban built-up area based on two-year eddy covariance measurements in Sakai, Japan. *Urban Clim.* 19, 155–169. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.005>
- ANSI/ASHRAE, 2021. Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy.
- Argiriou, A., Lykoudis, S., Kontoyiannidis, S., Balaras, C.A., Asimakopoulos, D., Petrakis, M., Kassomenos, P., 1999. Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece. *Sol. Energy* 66, 33–45. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00012-2](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00012-2)
- ASHRAE, 2014. International Weather for Energy Calculations, v2.0.
- Augustyn, J.R., 1998. WYEC2 user's manual and software toolkit, in: ASHRAE Transactions. ASHRAE, San Francisco, p. 9.
- Ayuntamiento de Madrid, 2019. Datos meteorológicos. Datos horarios desde 2019. Portal de datos abiertos.
- Ayuntamiento de Madrid, 2015. Cartografía municipal por distritos a escala 1:1000. Portal de datos abiertos.
- Ayuntamiento de Madrid, 2013. Tráfico. Intensidad media diaria anual por tramos. Portal de datos abiertos.
- Baetens, R., De Coninck, R., Jorissen, F., Picard, D., Helsen, L., Saelens, D., 2015. OpenIDEAS - An open framework for integrated district energy simulations, in: 14th International Conference of IBPSA - Building Simulation 2015, BS 2015, Conference Proceedings. pp. 347–354.
- Barbason, M., Reiter, S., 2014. Coupling building energy simulation and computational fluid dynamics: Application to a two-storey house in a temperate climate. *Build. Environ.* 75, 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.01.012>
- Barlag, A.B., Kuttler, W., 1990. The significance of country breezes for urban planning. *Energy Build.* 15, 291–297. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90001-Y](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90001-Y)
- Barlow, J.F., 2014. Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Clim.* 10, 216–240. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., Peters, A., 2018. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Sol. Energy* 166, 486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Beccali, G., Cellura, M., Culotta, S., Brano, V. Lo, Marvuglia, A., 2008. A Web-Based Autonomous Weather Monitoring System of the Town of Palermo and Its Utilization for Temperature Nowcasting, in: Gervasi, O., Murgante, B., Laganà, A., Taniar, D., Mun, Y., Gavrilova, M.L. (Eds.), *Computational Science and Its Applications – ICCSA 2008*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 65–80. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69839-5_6
- Beck, C., Straub, A., Breitner, S., Cyrus, J., Philipp, A., Rathmann, J., Schneider, A., Wolf, K., Jacobeit, J., 2018. Air temperature characteristics of local climate zones in the Augsburg urban area (Bavaria, southern Germany) under varying synoptic conditions. *Urban Clim.* 25, 152–166. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.007>

- Belcher, S.E., Hacker, J.N., Powell, D.S., 2005. Constructing design weather data for future climates. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 26, 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>
- Bell, S., Cornford, D., Bastin, L., 2015. How good are citizen weather stations? Addressing a biased opinion. *Weather* 70, 75–84. <https://doi.org/10.1002/wea.2316>
- Best, M.J., Grimmermond, C.S.B., 2015. Key conclusions of the first international urban land surface model comparison project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, 805–819. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00122.1>
- Bigladder Software, 2016. Elements. <https://bigladdersoftware.com/projects/elements/> (accessed 8.31.21)
- Borbora, J., Das, A.K., 2014. Summertime Urban Heat Island study for Guwahati City, India. *Sustain. Cities Soc.* 11, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2013.12.001>
- Boysan, F., Ayers, W.H., Swithenbank, J., 1982. A Fundamental Mathematical Modeling Approach to Cyclone Design. *Trans. Inst. Chem. Eng.* 60, 222–230.
- Brake, W.H. Te, 1975. Air Pollution and Fuel Crises in Preindustrial London, 1250-1650. *Technol. Cult.* 16, 337–359.
- Brimblecombe, P., 1987. The Big Smoke. A history of air pollution in London since medieval times. <https://doi.org/10.4324/9780203813898>
- Brousse, O., Martilli, A., Foley, M., Mills, G., Bechtel, B., 2016. WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale models? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Clim.* 17, 116–134. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001>
- Brown, G., 1990. The BRIS simulation program for thermal design of buildings and their services. *Energy Build.* 14, 385–400. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90100-W](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90100-W)
- Bruns, J., Riesterer, J., Wang, B., Riedel, T., Beigl, M., 2018. Automated quality assessment of (citizen) weather stations. *GI_Forum* 6, 65–81. https://doi.org/10.1553/GISCIENCE2018_01_S65
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ. Model. Softw.* 13, 373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Budhiraja, B., Agrawal, G., Pathak, P., 2020. Urban heat island effect of a polynuclear megacity Delhi – Compactness and thermal evaluation of four sub-cities. *Urban Clim.* 32, 100634. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100634>
- Bueno, B., Norford, L., Hidalgo, J., Pigeon, G., 2013. The urban weather generator. *J. Build. Perform. Simul.* 6, 269–281. <https://doi.org/10.1080/19401493.2012.718797>
- Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., Britter, R., 2011. Combining a Detailed Building Energy Model with a Physically-Based Urban Canopy Model. *Boundary-Layer Meteorol.* 140, 471–489. <https://doi.org/10.1007/s10546-011-9620-6>
- Campana, J.P., Morini, G.L., 2019. BESTEST and EN ISO 52016 Benchmarking of ALMABuild, a New Open-Source Simulink Tool for Dynamic Energy Modelling of Buildings. *Energies* 12, 2938. <https://doi.org/10.3390/en12152938>
- Cartalis, C., 2014. Toward resilient cities – a review of definitions, challenges and prospects. *Adv. Build. Energy Res.* 8, 259–266. <https://doi.org/10.1080/17512549.2014.890533>
- Cellura, M., Culotta, S., Brano, V. Lo, Marvuglia, A., Energetiche, R., 2011. Nonlinear Black-Box Models for Short-Term Forecasting of Air Temperature in the Town of Palermo, in: Murgante, B., Borruso, G., Lapucci, A. (Eds.), *Geocomputation, Sustainability and Environmental Planning*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 183–204. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19733-8_11
- Chandler, T.J., 1976. *Urban Climatology and its relevance to urban design*. World Meteorological Organization.
- Chandler, T.J., 1965. *The climate of London*. Hutchinson of London, London.
- Chapman, L., Bell, C., Bell, S., 2017. Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *Int. J. Climatol.* 37, 3597–3605. <https://doi.org/10.1002/joc.4940>
- Chapman, S., Watson, J.E.M., Salazar, A., Thatcher, M., McAlpine, C.A., 2017. The impact of urbanization and climate change on urban temperatures: a systematic review. *Landsc. Ecol.* 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0561-4>
- Chen, A.B., Behl, M., Goodall, J.L., 2018. Trust me, my neighbors say it's raining outside 25–28. <https://doi.org/10.1145/3276774.3276792>
- Childe, V.G., 1950. The urban revolution. *Town Plan. Rev.* 21, 3–17. https://www.jstor.org/stable/40102108?seq=1#metadata_info_tab_contents (accessed 7.22.21)
- Christen, A., 2014. Atmospheric measurement techniques to quantify greenhouse gas emissions from cities. *Urban Clim.* 10, 241–260. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.04.006>

- Chwalczyk, F., 2020. Around the anthropocene in eighty names-considering the urbanocene proposition. *Sustain.* 12, 1–33. <https://doi.org/10.3390/su12114458>
- CIBSE, 2014. Design Summer Years for London, CIBSE TM49: 2014. London, UK.
- Coakley, D., Raftery, P., Keane, M., 2014. A review of methods to match building energy simulation models to measured data. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 37, 123–141. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.007>
- Código Técnico de la Edificación, 2019a. Documento Básico de Ahorro de Energía. Anejo B. Zonas climáticas.
- Código Técnico de la Edificación, 2019b. Documento Básico de Ahorro de Energía. Anejo D. Condiciones operaciones y perfiles de uso.
- Córdoba Hernández, R., Carmona-Mateos, F., Morcillo-Álvarez, D., Román-López, E., Sánchez-Guevara, C., 2020. Área de Regeneración Urbana. Ciudad de los Ángeles de Madrid. Ciudad y Territ. *Estud. Territ.* 52, 349–356. <https://doi.org/10.37230/CyTET.2020.204.11>
- Coseo, P., Larsen, L., 2014. How factors of land use/land cover, building configuration, and adjacent heat sources and sinks explain Urban Heat Islands in Chicago. *Landsc. Urban Plan.* 125, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.019>
- Costa-Carrapiço, I., Raslan, R., González, J.N., 2020. A systematic review of genetic algorithm-based multi-objective optimisation for building retrofitting strategies towards energy efficiency. *Energy Build.* 210. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109690>
- Cox, R.A., Drews, M., Rode, C., Nielsen, S.B., 2015. Simple future weather files for estimating heating and cooling demand. *Build. Environ.* 83, 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.006>
- Cozza, S., Chambers, J., Brambilla, A., Patel, M.K., 2021. In search of optimal consumption: A review of causes and solutions to the Energy Performance Gap in residential buildings. *Energy Build.* 249, 111253. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111253>
- Crawley, D.B., Hand, J.W., Lawrie, L.K., 1999a. Improving the Weather Information Available to Simulation Programs. Sixth Int. IBPSA Conf. 529–536.
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., 2021. Our climate conditions are already changing – Should we care? *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 1–10. <https://doi.org/10.1177/01436244211004279>
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., 2019. Should we be using just “typical” weather data in building performance simulation? *Build. Simul. Conf. Proc.* 7, 4801–4808. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210594>
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., 2015. Rethinking the tmy: Is the “typical” meteorological year best for building performance simulation? 14th Int. Conf. IBPSA - Build. Simul. 2015, BS 2015, Conf. Proc. 2655–2662.
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Pedersen, C.O., Strand, R.K., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Witte, M.J., Glazer, J., 2001. EnergyPlus: Creating a new-generation building energy simulation program. *Energy Build.* 33, 319–331. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00114-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00114-6)
- Crawley, D.B., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Lawrie, L., 1998. EnergyPlus: The New Generation Energy Simulation Program Beyond BLAST and DOE-2, in: *Proceedings of the 23rd National Passive Solar Conference*. Albuquerque, NM, USA, pp. 243–248.
- Crawley, D.B., Pedersen, C.O., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., 2000. Energy plus: Energy simulation program. *ASHRAE J.* 42, 49–56.
- Crawley, D.B., Pedersen, C.O., Liesen, R.J., Fisher, D.E., Strand, R.K., Taylor, R.D., Lawrie, L.K., Engineering, U.S.A.C., Winkelmann, F.C., Buhl, W.F., Erdem, A.E., Huang, Y.J., Berkeley, L., 1999b. EnergyPlus, a new-generation building energy simulation program. *Build. Simul. I*, 81–88.
- Crow, L.W., 1984. Weather year for energy calculations. *ASHRAE J.* 26.
- Crow, L.W., 1981. Development of hourly data for weather year for energy calculations (WYEC). *ASHRAE J.* 23, 37–41.
- Crow, L.W., 1980. Development of hourly data for Weather Year for Energy Calculations (WYEC), including solar data, at 21 stations throughout the United States (RP 239).
- Crow, L.W., 1970. Summary Description of Typical Weather Data, Chicago Midway Airport (RP-100). Atlanta.
- Crowther, M., Lim, W., Crowther, M.A., 2010. Systematic review and meta-analysis methodology. *Blood* 116, 3140–3146. <https://doi.org/10.1182/blood-2010-05-280883>
- Crutzen, P.J., 2002. Geology of mankind. *Nature* 415, 23.
- CTE, 2014. Climas de referencia. <https://www.codigotecnico.org/DocumentosCTE/AhorroEnergia.html> (accessed 8.17.21).
- CTE, 2007. Herramienta unificada LIDER-CALENER (HULC), versiones anteriores.
- Cuerda, E., Guerra-Santin, O., Sendra, J.J., Neila, F.J., 2020. Understanding the performance gap in energy retrofitting: Measured input data for adjusting building simulation models. *Energy Build.* 209, 109688. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109688>

- Davenport, A.G., Grimmond, C.S.D., Oke, T.R., Wieringa, J., 2000. Estimating the roughness of cities and sheltered country, in: 12th Conf. on Applied Climatology. Asheville, pp. 96–99. https://www.researchgate.net/publication/224001525_Estimating_the_roughness_of_cities_and_sheltered_country (accessed 6.21.21)
- de Dear, R.J., Brager, G.S., 1998. ASHRAE RP-884: Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference.
- De Ridder, K., Lauwaet, D., Maiheu, B., 2015. UrbClim - A fast urban boundary layer climate model. *Urban Clim.* 12, 21–48. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.01.001>
- De Schiller, S., Evans, J.M., 1996. Training architects and planners to design with urban microclimates. *Atmos. Environ.* 30, 449–454. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00139-1](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00139-1)
- De Wilde, P., 2014. The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation. *Autom. Constr.* 41, 40–49. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>
- Demirezen, G., Fung, A.S., 2019. Application of artificial neural network in the prediction of ambient temperature for a cloud-based smart dual fuel switching system. *Energy Procedia* 158, 3070–3075. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.992>
- Demirezen, G., Fung, A.S., Deprez, M., 2020. Development and optimization of artificial neural network algorithms for the prediction of building specific local temperature for HVAC control. *Int. J. Energy Res.* 44, 8513–8531. <https://doi.org/10.1002/er.5537>
- Deng, J.-Y., Wong, N.H., Zheng, X., 2016. The Study of the Effects of Building Arrangement on Microclimate and Energy Demand of CBD in Nanjing, China. *Procedia Eng.* 169, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.006>
- Detommaso, M., Costanzo, V., Nocera, F., 2021. Application of weather data morphing for calibration of urban ENVI-met microclimate models. Results and critical issues. *Urban Clim.* 38, 100895. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100895>
- Ding, Y., Han, S., Tian, Z., Yao, J., Chen, W., Zhang, Q., 2021. Review on occupancy detection and prediction in building simulation. *Build. Simul.* <https://doi.org/10.1007/s12273-021-0813-8>
- Dogniaux, R., Sneyers, R., 1977. Méthodologie d'analyse statistique des données météorologiques en vue de la constitution de “périodes-types” pour l'application a des problèmes spécifiques. *Inst. R. Météorologique Belgique*.
- Eames, M.E., 2016. An update of the UK's design summer years: Probabilistic design summer years for enhanced overheating risk analysis in building design. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 37, 503–522. <https://doi.org/10.1177/0143624416631131>
- Eastin, M.D., Baber, M., Boucher, A., Di Bari, S., Hubler, R., Stimac-Spalding, B., Winesett, T., 2018. Temporal variability of the Charlotte (sub)urban heat Island. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 57, 81–102. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0099.1>
- Eliasson, I., 2000. The use of climate knowledge in urban planning. *Landsc. Urban Plan.* 48, 31–44. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00034-7)
- Ellefsen, R., 1991. Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy Build.* 15–16, 1025–1049.
- ENVI-met, 2021. A holistic Microclimate Modelling System.
- Erba, S., Causone, F., Armani, R., 2017. The effect of weather datasets on building energy simulation outputs. *Energy Procedia* 134, 545–554. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.561>
- ERDA, 1977. Test Reference Year (TRY). Final report. NATO/CCMS-60. Washington, DC, United States. <https://doi.org/10.2172/7218948>
- Erdemir, D., Ayata, T., 2017. Prediction of temperature decreasing on a green roof by using artificial neural network. *Appl. Therm. Eng.* 112, 1317–1325. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.145>
- Erell, E., 2008. The application of urban climate research in the design of cities. *Adv. Build. Energy Res.* 2, 95–121. <https://doi.org/10.3763/aber.2008.0204>
- Erell, E., Williamson, T., 2006. Simulating air temperature in an urban street canyon in all weather conditions using measured data at a reference meteorological station. *Int. J. Climatol.* 26, 1671–1694. <https://doi.org/10.1002/joc>
- ESRI, 2016. ArcGIS Geostatistical Analyst Toolbox for ArcMap.
- EU Science Hub, 2017. TMY generator. PVGIS 5. <https://ec.europa.eu/jrc/en/PVGIS/tools/tmy> (accessed 8.23.21).
- Evelyn, J., 1661. *Fumifugium*. W. Godbid, London, UK.
- Evola, G., Marletta, L., Cimino, D., 2018. Weather data morphing to improve building energy modeling in an urban context. *Math. Model. Eng. Probl.* 5, 211–216. <https://doi.org/10.18280/mmep.050312>
- Fenner, D., Meier, F., Bechtel, B., Otto, M., Scherer, D., 2017. Intra and inter “local climate zone” variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorol. Zeitschrift* 26, 525–547. <https://doi.org/10.1127/metz/2017/0861>

- Fenner, D., Meier, F., Scherer, D., Polze, A., 2014. Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001-2010. *Urban Clim.* 10, 308–331. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.02.004>
- Fernández García, F., Allende Álvarez, F., Rasilla Álvarez, D., Martilli, A., Alcaide Muñoz, J., 2016. Estudio de detalle del clima urbano de Madrid. Madrid.
- Fernández García, F., Almendros Coca, M.Á., López Gómez, A., 1996. The influence of the relief in the urban heat island in Madrid. The thalwegs of the Manzanares and the Abroñigal [La influencia del relieve en la isla de calor de Madrid: las vaguadas del Manzanares y del Abroñigal]. *Estud. Geográficos* 57, 473–494.
- Finkelstein, J.M., Schafer, R.E., 1971. Improved goodness-of-fit tests. *Biometrika* 58, 641–645. <https://doi.org/10.1093/biomet/58.3.641>
- Fouquier, A., Robert, S., Suard, F., Stéphan, L., Jay, A., 2013. State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23, 272–288. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.004>
- Francis, L.F.M., Jensen, M.B., 2017. Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services. *Urban For. Urban Green.* 28, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.10.015>
- Fumo, N., 2014. A review on the basics of building energy estimation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 31, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.11.040>
- Geiger, R., 1954. Klassifikation der Klimate nach W. Köppen, in: *Landolt-Börnstein - Zahlenwerte Und Funktionen Aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik Und Technik, Alte Serie Vol. 3.* Springer, Berlin, pp. 603–607.
- Geiger, R., 1950. *The climate near the ground*, 1st ed. Blue Hill Meteorological Observatory, Harvard University, Cambridge.
- Gobakis, K., Kolokotsa, D., Synnefa, A., Saliari, M., Giannopoulou, K., Santamouris, M., 2011. Development of a model for urban heat island prediction using neural network techniques. *Sustain. Cities Soc.* 1, 104–115. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2011.05.001>
- Gram-Hanssen, K., Georg, S., 2018. Energy performance gaps: promises, people, practices. *Build. Res. Inf.* 46, 1–9. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1356127>
- Grant, M.J., Booth, A., 2009. A typology of reviews: An analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Info. Libr. J.* 26, 91–108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Grimmond, C.S.D., Blackett, M., Best, M.J., Baik, J.-J., Belcher, S.E., Beringer, J., Bohnenstengel, S.I., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M.L., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E.S., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Ooka, R., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Steeneveld, G.-J., Tombrou, M., Voogt, J.A., Young, D.T., Zhang, N., 2011. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. *Int. J. Climatol.* 31, 244–272. <https://doi.org/10.1002/joc.2227>
- Grimmond, C.S.D., Blackett, M., Best, M.J., Barlow, J., Baik, J.-J., Belcher, S.E., Bohnenstengel, S.I., Calmet, I., Chen, F., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M.L., Hamdi, R., Hendry, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E.S., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Shashua-Bar, L., Steeneveld, G.-J., Tombrou, M., Voogt, J., Young, D., Zhang, N., 2010. The International Urban Energy Balance Models Comparison Project: First Results from Phase 1. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 49, 1268–1292. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2354.1>
- Haddaway, N.R., Woodcock, P., Macura, B., Collins, A., 2015. Making literature reviews more reliable through application of lessons from systematic reviews. *Conserv. Biol.* 29, 1596–1605. <https://doi.org/10.1111/cobi.12541>
- Hage, K.D., 1975. Urban-Rural Humidity Differences. *J. Appl. Meteorol.* 14, 1277–1283. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1975\)014<1277:URHD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1975)014<1277:URHD>2.0.CO;2)
- Hall, I.J., Prairie, R.R., Anderson, H.E., Boes, E.C., 1978. Generation of Typical Meteorological Years for 26 SOLMET Stations (SAND78-1601). Albuquerque, NM, US.
- Han, J.M., Ang, Y.Q., Malkawi, A., Samuelson, H.W., 2021. Using recurrent neural networks for localized weather prediction with combined use of public airport data and on-site measurements. *Build. Environ.* 192, 107601. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107601>
- Hann, J., 1898. Temperaturen von Graz und Umgebung. *Meteorol. Zeitschrift* 15, 394–400.
- Hann, J., 1885. Über den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Land. *Österreichische Gesellschaft für Meteorol. Zeitschrift* 20, 457–462.
- Hatch, W.L., 1986. *Selective Guide to Climatic Data Sources.* Asheville, NC, US.
- Heijden, M.G.M. van der, Blocken, B., Hensen, J.L.M., 2013. Towards the integration of the urban heat island in building energy simulations, in: *Proceedings of Building Simulation 2013: 13th Conference of the International Building Performance Simulation Association IBPSA.* Chamberry, pp. 1006–1013.

- Hellsten, A., Luukkonen, S.M., Steinfeld, G., Kanani-Sühring, F., Markkanen, T., Järvi, L., Lento, J., Vesala, T., Raasch, S., 2015. Footprint Evaluation for Flux and Concentration Measurements for an Urban-Like Canopy with Coupled Lagrangian Stochastic and Large-Eddy Simulation Models. *Boundary-Layer Meteorol.* 157, 191–217. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0062-4>
- Herrera, M., Natarajan, S., Coley, D.A., Kershaw, T., Ramallo-González, A.P., Eames, M., Fosas, D., Wood, M., 2017. A review of current and future weather data for building simulation. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 38, 602–627. <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>
- Hittle, D.C., 1979. *The Building Loads Analysis Thermodynamics (BLAST) Program, Users Manual.*
- Hong, T., Chen, Y., Lee, S.H., Piette, M.A., 2016. CityBES: A web-based platform to support city-scale building energy efficiency, in: 5th International Urban Computing Workshop, At San Francisco. p. 10.
- Hong, T., Chen, Y., Luo, X., Luo, N., Lee, S.H., 2020. Ten questions on urban building energy modeling. *Build. Environ.* 168, 106508. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106508>
- Horst, T.W., Weil, J.C., 1994. How Far is Far Enough?: The Fetch Requirements for Micrometeorological Measurement of Surface Fluxes. *J. Atmos. Ocean. Technol.* [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1994\)011<1018:HFIFET>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1994)011<1018:HFIFET>2.0.CO;2)
- Horst, T.W., Weil, J.C., 1992. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. *Boundary-Layer Meteorol.* 59, 279–296. <https://doi.org/10.1007/BF00119817>
- Hosseini, M., Bigtashi, A., Lee, B., 2021. Evaluating the applicability of Typical Meteorological Year under different building designs and climate conditions. *Urban Clim.* 38, 100870. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100870>
- Howard, L., 1833. *The Climate of London.* Harvey and Darton, London.
- Hsieh, C.I., Katul, G., Chi, T.W., 2000. An approximate analytical model for footprint estimation of scalar fluxes in thermally stratified atmospheric flows. *Adv. Water Resour.* 23, 765–772. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(99\)00042-1](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(99)00042-1)
- Huang, J., 2020. Update of California Weather Files for Use in Utility Energy Efficiency Programs and Building Energy Standard Compliance Calculations.
- Huang, Y.J., Crawley, D.B., 1996. Does It Matter Which Weather Data You Use in Energy Simulations?, in: American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE). pp. 25–31.
- Huang, Y.J., Seo, D., Krarti, M., 2014. Development of 3012 IWEC2 weather files for international locations (RP-1477), in: ASHRAE Transactions. ASHRAE, pp. 340–355.
- IPCC, 2021. Climate change 2021: The physical science basis summary for policymakers. <https://doi.org/10.1260/095830507781076194>
- ISO, 2021. Online Browsing Platform. <https://www.iso.org/obp/ui/#search> (accessed 1.14.21).
- ISO, 2005. Hygrothermal performance of buildings. Calculation and presentation of climatic data. Part 4: Hourly data for assessing the annual energy use for heating and cooling (ISO 15927-4:2005).
- Jang, J., Viau, A.A., Ancil, F., 2004. Neural network estimation of air temperatures from AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 25, 4541–4554. <https://doi.org/10.1080/01431160310001657533>
- Jenks, G.F., 1967. The data model in statistical mapping. *Int. Yearb. Cartogr.* 7, 186–190.
- Jentsch, M.F., Bahaj, A.B.S., James, P.A.B., 2008. Climate change future proofing of buildings-Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy Build.* 40, 2148–2168. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- Jentsch, M.F., James, P.A.B., Bourikas, L., Bahaj, A.B.S., 2013. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renew. Energy* 55, 514–524. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.049>
- Jia, M., Srinivasan, R.S., Raheem, A.A., 2017. From occupancy to occupant behavior: An analytical survey of data acquisition technologies, modeling methodologies and simulation coupling mechanisms for building energy efficiency. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, 525–540. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.011>
- Jin, L., Schubert, S., Fenner, D., Meier, F., Schneider, C., 2021. Integration of a Building Energy Model in an Urban Climate Model and its Application. *Boundary-Layer Meteorol.* 178, 249–281. <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00569-y>
- Johnston, D., Miles-Shenton, D., Farmer, D., 2015. Quantifying the domestic building fabric “performance gap.” *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 36, 614–627. <https://doi.org/10.1177/0143624415570344>
- Judkoff, R., Neymark, J., 1995. International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method.

- Kalamees, T., Jylhä, K., Tietäväinen, H., Jokisalo, J., Ilomets, S., Hyvönen, R., Saku, S., 2012. Development of weighting factors for climate variables for selecting the energy reference year according to the en ISO 15927-4 standard. *Energy Build.* 47, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.11.031>
- Kambezidis, H.D., Psiloglou, B.E., Kaskaoutis, D.G., Karagiannis, D., Petrinoli, K., Gavriil, A., Kavadias, K., 2020. Generation of typical meteorological years for 33 locations in Greece: adaptation to the needs of various applications. *Theor. Appl. Climatol.* 141, 1313–1330. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03264-7>
- Kellett, R., Christen, A., Coops, N.C., van der Laan, M., Crawford, B., Tooke, T.R., Olchovski, I., 2013. A systems approach to carbon cycling and emissions modeling at an urban neighborhood scale. *Landsc. Urban Plan.* 110, 48–58. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.002>
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, H., Kondo, H., 2003. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Appl. Energy* 76, 449–466. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(03\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(03)00009-6)
- Kim, Y.-H., Baik, J.-J., 2002. Maximum Urban Heat Island Intensity in Seoul. *J. Appl. Meteorol.* 41, 651–659. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0651:MUHIII>2.0.CO;2)
- Kleerekoper, L., van Esch, M., Salcedo, T.B., 2012. How to make a city climate-proof, addressing the urban heat island effect. *Resour. Conserv. Recycl.* 64, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.004>
- Klein, S.A., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1976. Design Procedure for Solar Air Heating Systems. 18, 113–127.
- Klein, S.A., Cooper, P.I., Freeman, T.L., Beckman, D.M., Beckman, W.A., Duffie, J.A., 1975. A method of simulation of solar processes and its application. *Sol. Energy* 17, 29–37. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90014-6](https://doi.org/10.1016/0038-092X(75)90014-6)
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev.* 8, 3695–3713. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-3695-2015>
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2004. A Simple Parameterisation for Flux Footprint Predictions. *Boundary-Layer Meteorol.* 112, 503–523. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/B:BOUN.0000030653.71031.96>
- Knoch, K., 1963. Die Landesklimaaufnahme, Wesen und Methodik, Berichte der Deutschen Wetterdienst. Bad Kissinger.
- Kočí, J., Kočí, V., Maděra, J., Černý, R., 2019. Effect of applied weather data sets in simulation of building energy demands: Comparison of design years with recent weather data. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 100, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.10.022>
- Kolokotroni, M., Davies, M., Croxford, B., Bhuiyan, S., Mavrogianni, A., 2010. A validated methodology for the prediction of heating and cooling energy demand for buildings within the Urban Heat Island: Case-study of London. *Sol. Energy* 84, 2246–2255. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.08.002>
- Kolokotroni, M., Ren, X., Davies, M., Mavrogianni, A., 2012. London's urban heat island: Impact on current and future energy consumption in office buildings. *Energy Build.* 47, 302–311. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.12.019>
- Kolokotroni, M., Zhang, Y., Giridharan, R., 2009. Heating and cooling degree day prediction within the London urban heat island area. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 30, 183–202. <https://doi.org/10.1177/0143624409104733>
- Kolokotroni, M., Zhang, Y., Watkins, R., 2007. The London Heat Island and building cooling design. *Sol. Energy* 81, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.06.005>
- Kondo, H., 1995. The Thermally Induced Local Wind and Surface Inversion over the Kanto Plain on Calm Winter Nights. *J. Appl. Meteorol.* 34, 1439–1448.
- Kondo, H., Liu, F.-H., 1998. A Study on the Urban Thermal Environment Obtained through One-Dimensional Urban Canopy Model. *J. Japan Soc. Atmos. Environ.* 33, 179–192. https://doi.org/10.11298/taiki1995.33.3_179
- Köppen, W., 1936. Das geographische System der Klimate, in: Köppen, W., Geiger, R. (Eds.), *Handbuch Der Klimatologie*. Gebrüder Borntraeger, Berlin, pp. 1–44.
- Kormann, R., Meixner, F.X., 2001. An analytical footprint model for non-neutral stratification. *Boundary-Layer Meteorol.* 99, 207–224. <https://doi.org/10.1023/A:1018991015119>
- Kotthaus, S., Grimmond, C.S.B., 2014. Energy exchange in a dense urban environment - Part I: Temporal variability of long-term observations in central London. *Urban Clim.* 10, 261–280. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.002>
- Kourtidis, K., Georgoulas, A.K., Rapsomanikis, S., Amiridis, V., Keramitsoglou, I., Hooyberghs, H., Maiheu, B., Melas, D., 2015. A study of the hourly variability of the urban heat island effect in the Greater Athens Area during summer. *Sci. Total Environ.* 517, 162–177. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.062>
- Kratzer, A., 1937. *Das Stadtklima*. Friedr. Vieweg and Sohn Braunschweig, Braunschweig.

- Krpo, A., Salamanca, F., Martilli, A., Clappier, A., 2010. On the impact of anthropogenic heat fluxes on the urban boundary layer: A two-dimensional numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 136, 105–127. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9491-2>
- Kusuda, T., 1999. Early History and Future Prospects of Building System Simulation. *IBPSA Conf. Proc.* 13.
- Kwok, Y.T., Schoetter, R., Lau, K.K.L., Hidalgo, J., Ren, C., Pigeon, G., Masson, V., 2019. How well does the local climate zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *Int. J. Climatol.* 39, 5292–5315. <https://doi.org/10.1002/joc.6140>
- Lac, C., Chaboureau, J.P., Masson, V., Pinty, J.P., Tulet, P., Escobar, J., Leriche, M., Barthe, C., Aouizerats, B., Augros, C., Aumond, P., Auguste, F., Bechtold, P., Berthet, S., Bielli, S., Bosseur, F., Caumont, O., Cohard, J.M., Colin, J., Couvreur, F., Cuxart, J., Delautier, G., Dauhut, T., Ducrocq, V., Filippi, J.B., Gazen, D., Geoffroy, O., Gheusi, F., Honnert, R., Lafore, J.P., Brossier, C.L., Libois, Q., Lunet, T., Mari, C., Maric, T., Mascart, P., Mogé, M., Molinié, G., Nuisser, O., Pantillon, F., Peyrillé, P., Pergaud, J., Perraud, E., Pianezze, J., Redelsperger, J.L., Ricard, D., Richard, E., Riette, S., Rodier, Q., Schoetter, R., Seyfried, L., Stein, J., Suhre, K., Taufour, M., Thouron, O., Turner, S., Verrelle, A., Vié, B., Visentin, F., Vionnet, V., Wautelet, P., 2018. Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications, *Geoscientific Model Development*. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1929-2018>
- Lacy, R.E., 1972. Survey of meteorological information for architecture and building.
- Lafore, J.-P.P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fischer, C., Hérelil, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J. p. P., Redelsperger, J.-L.L., Richard, E., Vilà-Guerau De Arellano, J., Hereil, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J. p. P., Redelsperger, J.-L.L., Richard, E., Vilà-Guerau De Arellano, J., 1998. The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophys.* 109, 90–109. <https://doi.org/10.1007/s00585-997-0090-6>
- Landsberg, H.E., 1981. *The Urban Climate*, International Geophysics Series. Academic Press, London, UK.
- Landsberg, H.E., 1976. *Special Environmental Report: Weather, climate and human settlements*. Geneva, Switzerland.
- Landsberg, H.E., 1973. The meteorologically utopian city. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 54, 86–89.
- Lauzet, N., Rodler, A., Musy, M., Azam, M.H., Guernouti, S., Mauree, D., Colinart, T., 2019. How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 116, 109390. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109390>
- Leclerc, M.Y., Foken, T., 2014. *Footprints in Micrometeorology and Ecology*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54545-0>
- Lee, Y.Y., Kim, J.T., Yun, G.Y., 2016. The neural network predictive model for heat island intensity in Seoul. *Energy Build.* 110, 353–361. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.013>
- Lenzholzer, S., Carsjens, G.J., Brown, R.D., Tavares, S., Vanos, J., Kim, Y.J., Lee, K., 2020. Awareness of urban climate adaptation strategies –an international overview. *Urban Clim.* 34, 100705. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100705>
- Lewis, P.T., Alexander, D.K., 1990. HTB2: A flexible model for dynamic building simulation. *Build. Environ.* 25, 7–16. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90035-P](https://doi.org/10.1016/0360-1323(90)90035-P)
- Li, W., Zhou, Y., Cetin, K., Eom, J., Wang, Y., Chen, G., Zhang, X., 2017. Modeling urban building energy use: A review of modeling approaches and procedures. *Energy* 141, 2445–2457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.071>
- Li, X., Ratti, C., Seiferling, I., 2017. Mapping Urban Landscapes Along Streets Using Google Street View. *Adv. Cartogr. GIScience* 341–356. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57336-6_24
- López-Bueno, J.A., Díaz, J., Sánchez-Guevara, C., Sánchez-Martínez, G., Franco, M., Gullón, P., Núñez Peiró, M., Valero, I., Linares, C., 2020a. The impact of heat waves on daily mortality in districts in Madrid: The effect of sociodemographic factors. *Environ. Res.* 190, 109993. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109993>
- López-Bueno, J.A., Linares, C., Sánchez-Guevara, C., Sánchez-Martínez, G., Mirón, I.J., Núñez Peiró, M., Valero, I., Díaz, J., 2020b. The effect of cold waves on daily mortality in districts in Madrid considering sociodemographic variables. *Sci. Total Environ.* 749, 142364. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142364>
- López-Moreno, H., Núñez-Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2022. On the identification of Homogeneous Urban Zones for the residential buildings' energy evaluation. *Build. Environ.* 207, 108451. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108451>
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., Arroyo Ilera, F., 1988. *El Clima urbano de Madrid: La isla de calor*. CSIC, Madrid.
- López Gómez, A., López Gómez, J., Fernández García, F., Moreno Jiménez, A., 1993. *El Clima urbano: teledetección de la isla de calor en Madrid*. MOPT, Madrid.
- Loridan, T., Grimmond, C.S.B., 2012. Characterization of energy flux partitioning in urban environments: Links with surface seasonal properties. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 51, 219–241. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-038.1>
- Lund, H., 1995. *The Design Reference Year - User Manual: A Report of Task 9: Solar Radiation and Pyranometer Studies*. Lyngby, Denmark.

- Lund, H., 1985. Test Reference Years TRY. Weather Data Sets for Computer Simulations of Solar Energy Systems and Energy Consumption in Buildings.
- Lund, H., 1974. The “Reference Year”: A Set of Climatic Data for Environmental Engineering, in: Second Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings.
- Lund, H., Eidorff, S., 1981. Selection method for production of test reference years. Final report, short version.
- Manley, G., 1958. On the frequency of snowfall in metropolitan England. Q. J. R. Meteorol. Soc. 42, 70–72. <https://doi.org/10.1002/qj.49708435910>
- Mao, J., Norford, L.K., 2021. Urban Weather Generator: Physics-Based Microclimate Simulation for Performance-Oriented Urban Planning, in: Palme, M., Salvati, A. (Eds.), Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies. Springer, Cham, pp. 241–263. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_12
- Marion, W., Urban, K., 1995. User’s Manual for TMY2.
- Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M.W., 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. Boundary-Layer Meteorol. 104, 261–304. <https://doi.org/10.1023/A:1016099921195>
- Massey, F.J., 1951. The Kolmogorov-Smirnov Test for Goodness of Fit. J. Am. Stat. Assoc. 46, 68–78. <https://doi.org/10.1080/01621459.1951.10500769>
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Boundary-Layer Meteorol. 94, 357–397. <https://doi.org/10.1023/A:1002463829265>
- Matthews, H.A., 1937. Reality in Climate: The results of recent microclimatological studies, with special reference to temperatures. Geography 22, 87–100.
- Mavrogrianni, A., Davies, M., Batty, M., Belcher, S.E., Bohnenstengel, S.I., Carruthers, D., Chalabi, Z., Croxford, B., Demanuele, C., Evans, S., Giridharan, R., Hacker, J.N., Hamilton, I., Hogg, C., Hunt, J., Kolokotroni, M., Martin, C., Milner, J., Rajapaksha, I., Ridley, I., Steadman, J.P., Stocker, J., Wilkinson, P., Ye, Z., 2011. The comfort, energy and health implications of London’s urban heat island. Build. Serv. Eng. Res. Technol. 32, 35–52. <https://doi.org/10.1177/0143624410394530>
- McBoyle, G.R., 1968. A review of urban climatology. Earth Sci. J. 2, 88–95.
- Meier, F., Fenner, D., Grassmann, T., Jänicke, B., Otto, M., Scherer, D., 2015. Challenges and benefits from crowdsourced atmospheric data for urban climate research using Berlin, Germany, as testbed. ICUC9 - 9th Int. Conf. Urban Clim. jointly with 12th Symp. Urban Environ. Challenges 6p.
- Meier, F., Fenner, D., Grassmann, T., Otto, M., Scherer, D., 2017. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. Urban Clim. 19, 170–191. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.006>
- Merlier, L., Frayssinet, L., Johannes, K., Kuznik, F., 2019a. On the impact of local microclimate on building performance simulation. Part II: Effect of external conditions on the dynamic thermal behavior of buildings. Build. Simul. 12, 747–757. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0508-6>
- Merlier, L., Frayssinet, L., Johannes, K., Kuznik, F., 2019b. On the impact of local microclimate on building performance simulation. Part I: Prediction of building external conditions. Build. Simul. 12, 735–746. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0508-6>
- Miao, C., Yu, S., Hu, Y., Zhang, H., He, X., Chen, W., 2020. Review of methods used to estimate the sky view factor in urban street canyons. Build. Environ. 168, 106497. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106497>
- Mihalakakou, G., Flocas, H. a., Santamouris, M., Helmis, C.G., 2002. Application of Neural Networks to the Simulation of the Heat Island over Athens, Greece, Using Synoptic Types as a Predictor. J. Appl. Meteorol. 41, 519–527. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2002\)041<0519:AONNTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0519:AONNTT>2.0.CO;2)
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., 1998. Modeling ambient air temperature time series using neural networks. J. Geophys. Res. 103, 19509–19517. <https://doi.org/10.1029/98JD02002>
- Mihalakakou, G., Santamouris, M., Papanikolaou, N., Cartalis, C., Tsangrassoulis, A., 2004. Simulation of the Urban Heat Island Phenomenon in Mediterranean Climates. Pure Appl. Geophys. 161, 429–451. <https://doi.org/10.1007/s00024-003-2447-4>
- Ministerio de Hacienda, 2019. Catastro inmobiliario. Dir. Gen. del Catastro. <https://www.sedecatastro.gob.es/> (accessed 12.06.21)
- MITECO, 2021. Documentos reconocidos. <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentosreconocidos.aspx> (accessed 12.06.21)
- Mizuno, M., Nakamura, Y., Murakami, H., Yamamoto, S., 1991. Effects of Land Use on Urban Horizontal Atmospheric Temperature Distributions. Energy Build. 16, 165–176.

- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D.G., Altman, D., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J.A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J.J., Devereaux, P.J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P.C., Grimshaw, J., Guyatt, G., Higgins, J., Ioannidis, J.P.A., Kleijnen, J., Lang, T., Magrini, N., McNamee, D., Moja, L., Mulrow, C., Napoli, M., Oxman, A., Pham, B., Rennie, D., Sampson, M., Schulz, K.F., Shekelle, P.G., Tovey, D., Tugwell, P., 2009. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Med.* 6. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Molnár, G., Kovács, A., Gál, T., 2020. How does anthropogenic heating affect the thermal environment in a medium-sized Central European city? A case study in Szeged, Hungary. *Urban Clim.* 34, 100673. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100673>
- Monin, A.S., Obukhov, A.M., 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contrib. Geophys. Inst. Acad. Sci. USSR* 24, 163–187.
- Moran, D., Kanemoto, K., Jiborn, M., Wood, R., Többen, J., Seto, K.C., 2018. Carbon footprints of 13 000 cities. *Environ. Res. Lett.* 13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac72a>
- Muller, C.L., Chapman, L., Grimmond, C.S.B., Young, D.T., Cai, X.M., 2013. Toward a standardized metadata protocol for urban meteorological networks. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 94, 1161–1185. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-12-00096.1>
- Muller, C.L., Chapman, L., Johnston, S., Kidd, C., Illingworth, S., Foody, G., Overeem, A., Leigh, R.R., 2015. Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: Current status and future potential. *Int. J. Climatol.* 35, 3185–3203. <https://doi.org/10.1002/joc.4210>
- Musy, M., Malys, L., Morille, B., Inard, C., 2015. The use of SOLENE-microclimat model to assess adaptation strategies at the district scale. *Urban Clim.* 14, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.07.004>
- Nakamura, Y., Oke, T.R., 1988. Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmos. Environ.* 22, 2691–2700. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90437-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90437-4)
- Napoly, A., Grassmann, T., Meier, F., Fenner, D., 2018. Development and Application of a Statistically-Based Quality Control for Crowdsourced Air Temperature Data. *Front. Earth Sci.* 6, 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00118>
- Neila, F.J., Sánchez-Guevara, C., Núñez, M., Román, E., López, H., Gómez, G., de Luxán, M., 2020. Urban heat island, urban climate and building energy consumption. Modifica project / Isla de calor, clima urbano y consumo energético de los edificios. Proyecto MODIFICA. García-Maroto Editores, Madrid, Spain.
- Neila González, F.J., 2004. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Editorial Munilla-Lería, Madrid, Spain.
- Netatmo, 2021. *Weather API Documentation*.
- Nielsen, K.P., Blanc, P., Vignola, F., Ramírez, L., Blanco, M., Meyer, R., 2017. Discussion of currently used practices for: “Creation of Meteorological Data Sets for CSP/STE Performance Simulations”, *SolarPaces Report*.
- Nipen, T.N., Seierstad, I.A., Lussana, C., Kristiansen, J., Hov, Ø., 2020. Adopting citizen observations in operational weather prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 101, E43–E57. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0237.1>
- Nouvel, R., Brassel, K.-H., Bruse, M., Duminil, E., Coors, V., Eicker, U., Robinson, D., 2015. SimStadt, a new workflow-driven urban energy simulation platform for CityGML city models, in: *CISBAT International Conference*. pp. 889–894.
- Núñez-Peiró, M., Mavrogianni, A., Symonds, P., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2021a. Modelling Long-Term Urban Temperatures with Less Training Data: A Comparative Study Using Neural Networks in the City of Madrid. *Sustain.* 13, 8143. <https://doi.org/10.3390/su13158143>
- Núñez-Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2021b. Hourly evolution of intra-urban temperature variability across the local climate zones. The case of Madrid. *Urban Clim.* 39, 100921. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100921>
- Núñez-Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Sanz-Fernández, A., Gayoso Heredia, M., López-Bueno, J., Neila González, F.J., Linares, C., Díaz, J., Gómez Muñoz, G., 2021c. Exposure and Vulnerability towards Summer Energy Poverty in the City of Madrid: A Gender Perspective, in: Bisello, A., Vettorato, D., Ludlow, D., Baranzelli, C. (Eds.), *Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions*. Springer, pp. 481–495. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57332-4_34
- Núñez Peiró, M., Román López, E., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2016. Towards a Dynamic Model for the Urban Heat Island of Madrid = Hacia un modelo dinámico para la isla de calor urbana de Madrid. *An. Edif.* 2, 49–58. <https://doi.org/10.20868/ade.2016.3198>
- Núñez Peiró, Miguel, Sánchez-Guevara, C., Neila González, F.J., 2017a. Update of the Urban Heat Island of Madrid and Its Influence on the Building's Energy Simulation, in: *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*. pp. 339–350. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_28
- Núñez Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2021. Two decades of weather files in Spain. A comparison of their reliability for building energy modelling using the BESTEST method, in: *VI International Conference on Technological Innovation in Building*. pp. 62–64.

- Núñez Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2019. Source area definition for local climate zones studies. A systematic review. *Build. Environ.* 148, 258–285. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.050>
- Núñez Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2018. Abrigo meteorológico para sensores ambientales. ES-2642617-B2.
- Núñez Peiró, Miguel, Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2017b. Actualización de la isla de calor urbana de Madrid y su influencia en la simulación energética de edificios, in: Mercader-Moyano, P. (Ed.), *Proceedings of the III International Congress on Sustainable Construction and Eco-Efficient Solutions*. High Technical School of Architecture of Seville, Seville, pp. 890–901.
- Núñez Peiró, M., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Neila González, F.J., 2017. Update of the urban heat island of Madrid and its influence on the building's energy simulation, *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_28
- O'Riordan, J.L.H., 2006. Rickets in the 17th century. *J. Bone Miner. Res.* 21, 1506–1510. <https://doi.org/10.1359/jbmr.060703>
- Oke, T.R., 2006. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites (WMO/TD No. 1250), *Instruments and Observing Methods*. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9286
- Oke, T.R., 2004. Siting and exposure of meteorological instrument at urban sites. 27th NATO/CCMS Int. Tech. Meet. *Air Pollut. Model. its Appl.* 1, 615–631. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_66
- Oke, T.R., 1998. An algorithm scheme to estimate hourly heat island magnitude, in: *The Second Symposium on Urban Environment*. American Meteorological Society, Albuquerque.
- Oke, T.R., 1988. The urban energy balance. *Prog. Phys. Geogr.* 12, 471–508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oke, T.R., 1984. Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy Build.* 7, 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(84\)90040-9](https://doi.org/10.1016/0378-7788(84)90040-9)
- Oke, T.R., 1979. Review of Urban Climatology 1973-1976, WMO Technical Note No. 169. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=880
- Oke, T.R., 1974. Review of urban climatology 1968-1973. Geneva, Switzerland. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=874
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A., 2017a. Cities and Global Climate Change, in: *Urban Climates*. Cambridge University Press, pp. 360–384. <https://doi.org/10.1017/9781139016476.014>
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A., 2017b. Concepts, in: *Urban Climates*. Cambridge University Press, pp. 14–43. <https://doi.org/10.1017/9781139016476.003>
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., Voogt, J.A., 2017c. Atmospheric Moisture, in: *Urban Climates*. Cambridge University Press, pp. 254–269. <https://doi.org/10.1017/9781139016476.010>
- OneBuilding, 2018. Repository of free climate data for building performance simulation. <https://climate.onebuilding.org/> (accessed 21.06.21)
- Page, J.K., 1980. Climate considerations and energy conservation, in: Bach, W., Pankrath, J., Williams, J. (Eds.), *Interactions of Energy and Climate. Proceedings of an International Workshop in Münster, Germany*. D. Reidel Publishing Company, pp. 73–88. https://doi.org/10.1007/978-94-009-9111-8_4
- Page, J.K., 1976. Application of building climatology to the problems of housing and building for human settlements (WMO No. 441). https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=878
- Palma, P., Gouveia, J.P., Simoes, S.G., 2019. Mapping the energy performance gap of dwelling stock at high-resolution scale: Implications for thermal comfort in Portuguese households. *Energy Build.* 190, 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.03.002>
- Palme, M., Inostroza, L., Villacreses, G., Lobato-Cordero, A., Carrasco, C., 2017. From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect. *Energy Build.* 145. <https://doi.org/http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.069>
- Palme, M., Salvati, A., 2021a. Introduction: Anthropocene or Urbanocene?, in: Palme, M., Salvati, A. (Eds.), *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Springer International Publishing, Cham, pp. 1–9. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_1
- Palme, M., Salvati, A., 2021b. Including weather data morphing and other urban effects in energy simulations, in: Costanzo, V., Evola, G., Marletta, L. (Eds.), *Urban Heat Stress and Mitigation Solutions*. Routledge, p. 21. <https://doi.org/10.1201/9781003045922>
- Papantoniou, S., Kolokotsa, D., 2016. Prediction of outdoor air temperature using neural networks: Application in 4 European cities. *Energy Build.* 114, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.054>
- Pawlak, W., Fortuniak, K., 2016. Eddy covariance measurements of the net turbulent methane flux in the city centre-results of 2-year campaign in Lodz, Poland. *Atmos. Chem. Phys.* 16, 8281–8294. <https://doi.org/10.5194/acp-16-8281-2016>

- Pawlak, W., Fortuniak, K., Siedlecki, M., Zieliński, M., 2016. Urban – Wetland contrast in turbulent exchange of methane. *Atmos. Environ.* 145, 176–191. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.036>
- Pedersen, L., 2007. Use of different methodologies for thermal load and energy estimations in buildings including meteorological and sociological input parameters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 11, 998–1007. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.08.005>
- Peppler, A., 1929. Das Auto als Hilfsmittel der meteorologischen Forschung. *Zeitschrift für Angew. Meteorol.* 46, 305–308.
- Peral García, C., Navascués Fernández-Victorio, B., Ramos Calzado, P., 2017. Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos (Nota técnica 24 de AEMET), Serie de precipitación diaria en rejilla con fines climáticos. Madrid, Spain. <https://doi.org/10.31978/014-17-009-5>
- Perera, N.G., Emmanuel, R., 2016. A “Local Climate Zone” based approach to urban planning in Colombo, Sri Lanka. *Urban Clim.* <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.006>
- Peuportier, B., Sommereux, I.B., 1990. Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings. *Int. J. Sol. Energy* 8, 109–120. <https://doi.org/10.1080/01425919008909714>
- Plessis, G., Kaemmerlen, A., Lindsay, A., 2014. BuildSysPro: a Modelica library for modelling buildings and energy systems. *Proc. 10th Int. Model. Conf. March 10-12, 2014, Lund, Sweden* 96, 1161–1169. <https://doi.org/10.3384/ecp140961161>
- Polly, B., Kutscher, C., Macumber, D., Schott, M., 2016. From Zero Energy Buildings to Zero Energy Districts, in: 2016 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings. American Council for an Energy-Efficient Economy, pp. 1–16.
- Pullin, A.S., Stewart, G.B., 2006. Guidelines for systematic review in conservation and environmental management. *Conserv. Biol.* 20, 1647–1656. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00485.x>
- Reinhart, C., Dogan, T., Jakubiec, A., Rakha, T., Sang, A., 2013. Umi - an urban simulation environment for building energy use, daylighting and walkability. 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc. Chambéry, Fr. August 26-28 - 476 476–483.
- Reinhart, C.F., Cerezo Davila, C., 2016. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Build. Environ.* 97, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.001>
- Remmen, P., Lauster, M., Mans, M., Fuchs, M., Osterhage, T., Müller, D., 2018. TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks. *J. Build. Perform. Simul.* 11, 84–98. <https://doi.org/10.1080/19401493.2017.1283539>
- Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Graf, P., Cattin, R., 2020a. *Meteonorm v 8.x Handbook part I: Software*. https://meteonorm.com/assets/downloads/mn81_software.pdf (accessed 12.06.21)
- Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Graf, P., Cattin, R., 2020b. *Meteonorm v 8.x Handbook part II: Theory*. https://meteonorm.com/assets/downloads/mn81_theory.pdf (accessed 12.06.21)
- Ren, C., Ng, E.Y.Y., Katschner, L., 2011. Urban climatic map studies: A review. *Int. J. Climatol.* 31, 2213–2233. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>
- Renou, M.E., 1868. Differences de temperature entre la ville et la campagne. *Annu. Société Météorologie Fr.* 83–97.
- Renou, M.E., 1855. Anomalies de température observées dans quelques vallées. *Annu. Société Météorologie Fr.* 3, 55–58.
- Richard, Y., Emery, J., Dudek, J., Pergaud, J., Chateau-Smith, C., Zito, S., Rega, M., Vairet, T., Castel, T., Thévenin, T., Pohl, B., 2018. How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Clim.* 26, 258–274. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.10.002>
- Richards, M.P., 2002. A brief review of the archaeological evidence for Palaeolithic and Neolithic subsistence. *Eur. J. Clin. Nutr.* 56, 1270–1278. <https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601646>
- Robinson, P., 2010. *The London Meteorological Monitoring Network*. King’s College London.
- Rodler, A., Guernouti, S., Musy, M., Bouyer, J., 2018. Thermal behaviour of a building in its environment: Modelling, experimentation, and comparison. *Energy Build.* 168, 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.008>
- Rodler, A., Lauzet, N., Musy, M., Azam, M.-H., Guernouti, S., Mauree, D., Colinart, T., 2021. Urban Microclimate and Building Energy Simulation Coupling Techniques, in: *Palme, M., Salvati, A. (Eds.), Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Springer International Publishing, Cham, pp. 317–337. https://doi.org/10.1007/978-3-030-65421-4_15
- Roth, M., Jansson, C., Velasco, E., 2016. Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighbourhood in a tropical city. *Int. J. Climatol.* 37, 2679–2698. <https://doi.org/10.1002/joc.4873>
- Runnalls, K.E., Oke, T.R., 2006. A technique to detect microclimatic inhomogeneities in historical records of screen-level air temperature. *J. Clim.* 19, 959–978. <https://doi.org/10.1175/JCLI3663.1>

- Saito, H., Matsuo, Y., 1974. Standard Weather Data for SHASE Computer Program of Annual Energy Requirements and Example Results of Hourly Load for Ten Years in Tokyo, in: Second Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings¹. Paris, France.
- Salamanca, F., 2010. Desarrollo de modelos numéricos para investigar la isla de calor en ciudades y estudio de la sensibilidad de distintos parámetros urbanos. Universidad Complutense de Madrid.
- Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., Clappier, A., 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parameterization for urban climate simulations-part I. formulation, verification, and sensitivity analysis of the model. *Theor. Appl. Climatol.* 99, 331–344. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0142-9>
- Salamanca, F., Martilli, A., 2010. A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations-part II. Validation with one dimension off-line simulations. *Theor. Appl. Climatol.* 99, 345–356. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0143-8>
- Salamanca, F., Martilli, A., Yagüe, C., 2011. A numerical study of the Urban Heat Island over Madrid during the DESIREX (2008) campaign with WRF and an evaluation of simple mitigation strategies. *Int. J. Climatol.* 32, 2372–2386. <https://doi.org/10.1002/joc.3398>
- Salvati, A., Coch Roura, H., Morganti, M., 2017. Effects of urban compactness on the building energy performance in Mediterranean climate. *Energy Procedia* 122, 499–504. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.303>
- Salvati, A., Coch Roura, H., Cecere, C., 2017. Assessing the urban heat island and its energy impact on residential buildings in Mediterranean climate: Barcelona case study. *Energy Build.* 146, 38–54. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.025>
- Sánchez-Guevara, C., Núñez Peiró, M., Taylor, J., Mavrogiani, A., Neila González, J., 2019. Assessing population vulnerability towards summer energy poverty: Case studies of Madrid and London. *Energy Build.* 190, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.024>
- Sánchez-Guevara Sánchez, C., 2015. Propuesta metodológica de evaluación de la pobreza energética en España. Indicadores para la rehabilitación de viviendas. Universidad Politécnica de Madrid. https://oa.upm.es/39928/1/MARIA_DEL_CARMEN_SANCHEZ_GUEVARA_SANCHEZ.pdf (accessed 12.06.21)
- Sánchez-Guevara Sánchez, C., Núñez Peiró, M., Neila González, F.J., 2017. Urban Heat Island and Vulnerable Population. The Case of Madrid, in: Mercader-Moyano, P. (Ed.), *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*. Springer International Publishing, Seville, pp. 3–13. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_1
- Sánchez-Guevara Sánchez, C., Sanz Fernández, A., Núñez Peiró, M., Gómez Muñoz, G., 2020. Energy poverty in Madrid: Data exploitation at the city and district level. *Energy Policy* 144. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111653>
- Santamouris, M., Mihalakakou, G., Papanikolaou, N., Asimakopoulos, D.N., 1999. A neural network approach for modeling the Heat Island phenomenon in urban areas during the summer period. *Geophys. Res. Lett.* 26, 337. <https://doi.org/10.1029/1998GL900316>
- Sanz Fernández, A., Gómez Muñoz, G., Sánchez-Guevara Sánchez, C., Núñez Peiró, M., 2016. Estudio técnico sobre pobreza energética en la ciudad de Madrid. Ayuntamiento de Madrid, Madrid.
- Schatz, J., Kucharik, C.J., 2014. Seasonality of the Urban Heat Island Effect in Madison, Wisconsin. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 53, 2371–2386. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0107.1>
- Schmid, H.P., 1997. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes. *Agric. For. Meteorol.* 87, 179–200. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00011-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00011-7)
- Schmid, H.P., 1994. Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* 67, 293–318. <https://doi.org/10.1007/BF00713146>
- Schmid, H.P., Oke, T.R., 1990. A model to estimate the source area contributing to turbulent exchange in the surface layer over patchy terrain. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 116, 965–988. <https://doi.org/10.1002/qj.49711649409>
- Schmidt, W., 1927. Die Verteilung der Minimumtemperaturen in der Frostnacht des 12.5.1927 im Gemeindegebiet von Wien. *Fortschritte der Landwirtschaft* 2, 681–686.
- Schuch, F., Marpu, P., Masri, D., Afshari, A., 2017. Estimation of Urban Air Temperature From a Rural Station Using Remotely Sensed Thermal Infrared Data. *Energy Procedia* 143, 519–525. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.720>
- Schuepp, P.H., Leclerc, M.Y., MacPherson, J.I., Desjardins, R.L., 1990. Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorol.* 50, 355–373. <https://doi.org/10.1007/BF00120530>
- Serra, R., 1999. *Arquitectura Y Climas*. Gustavo Gili. ISBN: 9788425217678
- Shao, B., Zhang, M., Mi, Q., Xiang, N., 2011. Prediction and Visualization for Urban Heat Island, in: *Transactions on Edutainment VI. Lecture Notes in Computer Science*, Vol 6758. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 1–11. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22639-7_1
- Shearer, D.S., Bromberg, S.M., 1977. The status of indoor air pollution research 1976 (EPA-600/4-77-029).

- Shi, Y., Ren, C., Lau, K.K.L., Ng, E., 2019. Investigating the influence of urban land use and landscape pattern on PM2.5 spatial variation using mobile monitoring and WUDAPT. *Landsc. Urban Plan.* 189, 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.04.004>
- Silva, C.M., Arbilla, G., Soares, R., Machado, W., 2018. The new Meghalayan Age: What does it imply for the Anthropocene Age? *Rev. Virtual Quim.* 10, 1648–1658. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180112>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Wang, W., Powers, J.G., 2005. A description of the advanced research WRF version 2 (NCAR/TN-468+STR). <https://doi.org/10.5065/D6DZ069T>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Zhiquan, L., Berner, J., Wang, W., Powers, J.G., Duda, M.G., Barker, D.M., Huang, X.-Y., 2019. A description of the Advanced Research WRF Version 4 (NCAR/TN-556+STR).
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J.B., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G., 2008. A description of the Advanced Research WRF Version 3 (NCAR/TN-475+STR). Boulder, Colorado, USA. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Skarbit, N., Stewart, I.D., Unger, J., Gál, T., 2017. Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the “local climate zones” of Szeged, Hungary. *Int. J. Climatol.* <https://doi.org/10.1002/joc.5023>
- Skartveit, A., Lund, H., Olseth, J.A., 1994. The Design Reference Year (Report 11/94 KLIMA), DNMI Det Norske Meteorologiske institutt.
- Skelhorn, C.P., Levermore, G., Lindley, S.J., 2016. Impacts on cooling energy consumption due to the UHI and vegetation changes in Manchester, UK. *Energy Build.* 122, 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.035>
- Sneyers, R., 1979. Sur un critère de sélection de séries multidimensionnelles types à usage normalisé. *Rev. Stat. Appliquée* 27, 69–74.
- Sobriño, J.A., Oltra-Carrió, R., Sòria, G., Jiménez-Muñoz, J.C., Franch, B., Hidalgo, V., Mattar, C., Julien, Y., Cuenca, J., Romaguera, M., Gómez, J.A., De Miguel, E., Bianchi, R., Paganini, M., 2013. Evaluation of the surface urban heat island effect in the city of Madrid by thermal remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 34, 1–16. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.716548>
- Sobriño, J.A., Sòria, G., Romaguera, M., Cuenca, J., 2009. Desirex 2008 : Estudio de la isla de calor en la Ciudad de Madrid. *Rev. Teledetección* 31, 80–92.
- Sonta, A.J., Simmons, P.E., Jain, R.K., 2018. Understanding building occupant activities at scale: An integrated knowledge-based and data-driven approach. *Adv. Eng. Informatics* 37, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.04.009>
- Stewart, I.D., 2019. Why should urban heat island researchers study history? *Urban Clim.* 30, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100484>
- Stewart, I.D., 2011. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Int. J. Climatol.* 31, 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2009. Newly developed “Thermal Climate Zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer, in: Eighth Symposium on Urban Environment. Phoenix, AZ, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1534/g3.114.014308>
- Stewart, I.D., Oke, T.R., Krayenhoff, E.S., 2014. Evaluation of the “local climate zone” scheme using temperature observations and model simulations. *Int. J. Climatol.* 34, 1062–1080. <https://doi.org/10.1002/joc.3746>
- Stoffel, T.L., Rymes, M.D., 1998. Production of the Weather Year for Energy Calculations Version 2 (WYEC2) Data Sets, in: ASHRAE Transactions. ASHRAE, Toronto, ON, p. 12.
- Suomi, J., 2018. Extreme temperature differences in the city of Lahti, southern Finland: Intensity, seasonality and environmental drivers. *Weather Clim. Extrem.* 19, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2017.12.001>
- Syvitski, J., Waters, C.N., Day, J., Milliman, J.D., Summerhayes, C., Steffen, W., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Galuszka, A., Hajdas, I., Head, M.J., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Poirier, C., Rose, N.L., Shotyk, W., Wagreich, M., Williams, M., 2020. Extraordinary human energy consumption and resultant geological impacts beginning around 1950 CE initiated the proposed Anthropocene Epoch. *Commun. Earth Environ.* 1, 1–13. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00029-y>
- Szymanowski, M., Kryza, M., 2012. Local regression models for spatial interpolation of urban heat island—an example from Wrocław, SW Poland. *Theor. Appl. Climatol.* 108, 53–71. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0517-6>
- Tennekes, H., 1973. The Logarithmic Wind Profile. *J. Atmos. Sci.* [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1973\)030<0234:TLWP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1973)030<0234:TLWP>2.0.CO;2)
- Theeuwes, N.E., Steeneveld, G.J., Ronda, R.J., Holtslag, A.A.M., 2017. A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *Int. J. Climatol.* 37, 443–454. <https://doi.org/10.1002/joc.4717>
- Thevenard, D.J., Brunger, A., 2001. Typical Weather Years for International Locations (RP-1015).

- Tobler, W.R., 1970. A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Econ. Geogr.* 46, 234–240. <https://doi.org/10.2307/143141>
- Tsang, C.W., Kwok, K.C.S., Hitchcock, P.A., 2012. Wind tunnel study of pedestrian level wind environment around tall buildings: Effects of building dimensions, separation and podium. *Build. Environ.* 49, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.08.014>
- Tse, K.T., Weerasuriya, A.U., Zhang, X., Li, S., Kwok, K.C.S., 2017. Pedestrian-level wind environment around isolated buildings under the influence of twisted wind flows. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 162, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.01.002>
- U.S. Department of Energy, 2003. EnergyPlus Weather Data Sources. <https://energyplus.net/weather> (accessed 12.06.21)
- U.S. National Climatic Center, 1981. Typical Meteorological Year user's manual TD-9734: Hourly Solar Radiation - Surface Meteorological Observations.
- U.S. National Climatic Center, 1976. Test Reference Year (TRY), Tape Reference Manual (TD-9706). Asheville, NC, US.
- Unger, J., 1999. Urban-rural air humidity differences in Szeged, Hungary. *Int. J. Climatol.* 19, 1509–1515. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19991115\)19:13<1509::AID-JOC453>3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19991115)19:13<1509::AID-JOC453>3.0.CO;2-P)
- Unger, J., Gál, T., Rakonczai, J., Mucsi, L., Szatmári, J., Tobak, Z., van Leeuwen, B., Fiala, K., 2010. Modeling of the urban heat island pattern based on the relationship between surface and air temperatures. *Idojaras* 114, 287–302.
- Universidad Politécnica de Madrid, 2014. Proyecto MODIFICA: Modelo predictivo del comportamiento energético de edificios de viviendas bajo condiciones de isla de calor urbana. Minist. Econ. y Compet. BIA2013-41732-R
- Valach, A.C., Langford, B., Nemitz, E., Mackenzie, A.R., Hewitt, C.N., 2015. Seasonal and diurnal trends in concentrations and fluxes of volatile organic compounds in central London. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 7777–7796. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7777-2015>
- van den Brom, P., Meijer, A., Visscher, H., 2018. Performance gaps in energy consumption: household groups and building characteristics. *Build. Res. Inf.* 46, 54–70. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1312897>
- van Hove, L.W.A., Jacobs, C.M.J., Heusinkveld, B.G., Elbers, J.A., van Driel, B.L., Holtslag, A.A.M., 2015. Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Build. Environ.* 83, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>
- Velasco, E., 2018. Go to field, look around, measure and then run models. *Urban Clim.* 24, 231–236. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.04.001>
- Venter, Z.S., Brousse, O., Esau, I., Meier, F., 2020. Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. *Remote Sens. Environ.* 242, 111791. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111791>
- Venter, Z.S., Chakraborty, T., Lee, X., 2021. Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms. *Sci. Adv.* 7, 1–10. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abb9569>
- Villar Burke, R., Sorribe Gil, M., Jiménez González, D., Sobaler Rodríguez, J., 2020. Guía de aplicación DB HE, Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado. Madrid, Spain.
- Walker, M., Gibbard, P., Head, M.J., Berkelhammer, M., Björck, S., Cheng, H., Cwynar, L.C., Fisher, D., Gkinis, V., Long, A., Lowe, J., Newnham, R., Rasmussen, S.O., Weiss, H., 2019. Formal Subdivision of the Holocene Series/Epoch: A Summary. *J. Geol. Soc. India* 93, 135–141. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1141-9>
- Waters, C.N., Syvitski, J.P.M., Galuszka, A., Hancock, G.J., Zalasiewicz, J., Cearreta, A., Grinevald, J., Jeandel, C., McNeill, J.R., Summerhayes, C., Barnosky, A., 2015. Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch. *Bull. At. Sci.* 71, 46–57. <https://doi.org/10.1177/0096340215581357>
- Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A.D., Poirier, C., Galuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Ellis, M., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J.R., Richter, D.D.B., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Wägreich, M., Williams, M., Zhisheng, A., Grinevald, J., Odada, E., Oreskes, N., Wolfe, A.P., 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science (80-.)*. 351. <https://doi.org/10.1126/science.aad2622>
- Watkins, R., Palmer, J., Kolokotroni, M., Littlefair, P., 2002. The London Heat Island: results from summertime monitoring. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 23, 97–106. <https://doi.org/10.1191/0143624402bt031oa>
- Wilcox, S., Marion, W., 2008. Users Manual for TMY3 Data Sets (NREL/TP-581-43156).
- WMO, 2020. OSCAR - Observing Systems Capability Analysis and Review Tool.
- WMO, 2017a. Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos (OMM No. 8). Geneva, Switzerland.
- WMO, 2017b. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (WMO No. 8). Geneva, Switzerland.

- WMO, 2017c. Guide to the Global Observing System (WMO No. 488). Geneva, Switzerland.
- WMO, 1970a. Building Climatology. WMO Technical Note No. 108. Geneva, Switzerland.
- WMO, 1970b. Urban climates. WMO Technical Note No. 109. Geneva, Switzerland.
- Yagüe, C., Zurita, E., Martínez, A., 1991. Statistical analysis of the Madrid urban heat island. *Atmos. Environ.* 25, 327–332. [https://doi.org/10.1016/0957-1272\(91\)90004-X](https://doi.org/10.1016/0957-1272(91)90004-X)
- Yang, X., Peng, L.L.H., Chen, Y., Yao, L., Wang, Q., 2020a. Air humidity characteristics of local climate zones: A three-year observational study in Nanjing. *Build. Environ.* 171, 106661. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106661>
- Yang, X., Peng, L.L.H., Jiang, Z., Chen, Y., Yao, L., He, Y., Xu, T., 2020b. Impact of urban heat island on energy demand in buildings: Local climate zones in Nanjing. *Appl. Energy* 260, 114279. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114279>
- Yang, X., Yao, L., Jin, T., Peng, L.L.H., Jiang, Z., Hu, Z., Ye, Y., 2018. Assessing the thermal behavior of different local climate zones in the Nanjing metropolis, China. *Build. Environ.* 137, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.04.009>
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., Meng, Q., 2012. An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy Build.* 54, 243–251. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.042>
- York, D.A., Tucker, E.F., 1980. DOE-2 Reference Manual, Part 1 (Version 2.1A). Berkeley, CA, USA.
- Yoshino, M., 1990. Development of urban climatology and problems today. *Energy Build.* 15, 1–10. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90109-V](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90109-V)
- Zahumensky, I., 2004. Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations. Geneva, Switzerland.
- Zalasiewicz, J., Waters, C.N., Williams, M., Barnosky, A.D., Cearreta, A., Crutzen, P., Ellis, E., Ellis, M.A., Fairchild, I.J., Grinevald, J., Haff, P.K., Hajdas, I., Leinfelder, R., McNeill, J., Odada, E.O., Poirier, C., Richter, D., Steffen, W., Summerhayes, C., Syvitski, J.P.M., Vidas, D., Wagemann, M., Wing, S.L., Wolfe, A.P., An, Z., Oreskes, N., 2015. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quat. Int.* 383, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.11.045>
- ZAMG, 1901. Jubelband zur Feier des Fünfzigjährigen Bestandes der K. K., Denkschriften der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. K.K. Hof- und Staatsdruckerei, Vienna, Switzerland.
- Zhang, R., Lam, K.P., Yao, S. chune, Zhang, Y., 2013. Coupled EnergyPlus and computational fluid dynamics simulation for natural ventilation. *Build. Environ.* 68, 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.04.002>
- Zhao, D., 2007. Analysis of thermal environment and urban heat island using remotely sensed imagery over the north and south slope of the Qinling Mountain, China, in: 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. pp. 655–658. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4422881>
- Zumwald, M., Knüsel, B., Bresch, D.N., Knutti, R., 2021. Mapping urban temperature using crowd-sensing data and machine learning. *Urban Clim.* 35, 100739. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100739>

