

INFORME DEL ESTUDIO DEL CLIMA DE LA CIUDAD DE ZARAGOZA, AÑOS 2020-2021: EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y MEJORA DE LA RESILIENCIA. (C2.16 PLAN DE RECUPERACIÓN, TRANSFORMACIÓN Y RESILIENCIA DE LA ECONOMÍA ESPAÑOLA, FINANCIADO POR LA UNIÓN EUROPEA – NEXT GENERATION EU)

Saz, M.A. ⁽¹⁻²⁾, Barrao, S. ⁽¹⁻²⁾, Cuadrat, J.M. ⁽¹⁾, Virto, A. ⁽³⁾, López-Marqués, N. ⁽³⁾, De Luis, M. ⁽³⁾, Campillos, M. ⁽³⁾, Serrano-Notivoli, R ⁽⁴⁾ y Tejedor, E ⁽⁵⁾

- (1) Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza.
- (2) Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Ambientales de Aragón.
- (3) Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad. Ayuntamiento de Zaragoza.
- (4) Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid.
- (5) Museo de Ciencias Naturales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Resumen

Las ciudades constituyen la mayor alteración del medio natural por parte del ser humano. Los procesos de urbanización modifican de forma significativa el clima, generando lo que se conoce como islas de calor urbana, caracterizadas por una mayor temperatura en el centro de la ciudad que en la periferia no urbanizada. En el caso de Zaragoza se ha estudiado ampliamente este fenómeno y desde 2015 se está monitorizando la temperatura del aire a través de una red compuesta por 21 sensores localizados en distintos ambientes climáticos de la ciudad. Tras un proceso de depuración de la información y control de errores, estos datos han permitido cuantificar la diferencia de temperatura media anual entre el centro de la ciudad y la periferia en 1,6 °C, siendo en general de una magnitud de 1 °C en todo el entramado urbano. Además, se han identificado los cambios que experimenta la isla de calor a lo largo del día, su distribución espacial a nivel anual y estacional y la influencia sobre ella del viento. El estudio de las islas de calor urbana es considerado de gran interés en el contexto del cambio climático antropogénico ya que ahonda en el incremento térmico provocado por éste, habiéndose demostrado el efecto que las altas temperaturas tienen sobre la salud humana. Su estudio detallado en la ciudad de Zaragoza y su continua monitorización, ha de servir para mejorar las medidas de adaptación a unas nuevas condiciones climáticas y las políticas de mitigación.

Palabras clave: cambio climático, clima urbano, islas de calor, adaptación, Zaragoza

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. Introducción	p 3
2. Área de estudio	p 6
3. Base de datos y metodología	p 7
3.1. Localización y características de la red de sensores	p 7
3.2. Protocolo de control de calidad de las series de registros	p 10
3.3. Resultados del proceso de control de calidad	p 15
3.4. Proceso cartográfico para la obtención de mapas de islas de calor.	p 17
4. Principales características de las temperaturas en el entramado urbano de Zaragoza y caracterización de su isla de calor en el periodo 2020-2021	p 20
4.1. Intensidad media de la isla de calor urbana de Zaragoza en el periodo 2020-2021.	p 20
4.2. Intensidad horaria de la isla de calor urbana de Zaragoza en el periodo 2020-2021	p 22
4.3. Intensidad de la isla de calor urbana de Zaragoza durante el día y la noche	p 23
4.4. Influencia del viento	p 25
4.5. Distribución espacial de la temperatura media anual y de las máximas y mínimas absolutas	p 27
4.6. Distribución espacial de la temperatura media estacional	p 29
4.7. Distribución espacial de la temperatura media a las 12 AM, 6 AM, 12 PM y 6 PM.	p 30
4.8. Número de días de helada, noches tropicales y noches tórridas	p 31
5. Conclusiones	p 34
6. Referencias	p 36

1. INTRODUCCIÓN

Según datos de las Naciones Unidas (2018), en la actualidad los espacios urbanos ocupan aproximadamente el 1% de la superficie mundial, si bien acogen al 55% de la población, porcentaje que las proyecciones futuras llevan a más de un 75% para las próximas dos décadas (Seto et al, 2010). Resulta un hecho bien conocido que estos procesos de urbanización transforman de forma sustancial el medio físico donde se asientan, siendo seguramente los espacios del planeta más profundamente antropizados. Su masa compacta de edificios supone una alteración profunda del paisaje natural. Desaparece la cubierta vegetal y las superficies permeables son sustituidas por sustratos impermeables que modifican la escorrentía, la humedad ambiental y los balances de radiación locales. Las actividades humanas son además una considerable fuente de calor, de emisión de contaminantes y de partículas en suspensión, alterando localmente la composición de la atmósfera y modificando a su vez esos balances de radiación.

Estos cambios afectan a las condiciones ambientales del espacio regional en el que se ubican los entornos urbanos, pero de manera especial al clima (Basset et al, 2016, Chen et al, 2020), siendo la consecuencia más perceptible y seguramente más conocida el desarrollo de las denominadas como islas de calor urbanas (ICU), definidas por una mayor temperatura del aire del centro de la ciudad en relación a la periferia no urbanizada (Oke, 1995). La ICU es un fenómeno de escala local o a lo sumo regional ampliamente documentado (Arnfield, 2003; Masson et al 2020; Oke, 1973, 1982; Stewart, 2011), que puede suponer en grandes ciudades diferencias de temperatura de más de 10 °C, siempre en noches de viento en calma o muy débil y cielos despejados, habiéndose identificado entre otras en Nueva York (Gedzelman et al., 2003), Londres (Kolokotroni y Giridharan, 2008), Moscú (Lokoshchenko, 2014), Lisboa (Lopes et al, 2013; Alcoforado et al, 2014) o Berlín (Fenner, 2014), si bien su intensidad depende del tamaño de la ciudad, la propia estructura urbana, los usos del suelo o el tipo de clima (Nastran et al., 2019; Peng et al., 2018; Yue et al., 2019). Estas diferencias de temperatura ocurren principalmente por la noche, puesto que es en ese momento cuando la energía absorbida por los edificios y otras superficies artificiales es emitida de nuevo a la atmósfera, esta vez en forma de calor.

La ICU es una característica del clima de las ciudades que se viene observando científicamente desde el siglo XIX en los pioneros estudios de Howard (1818) para la ciudad de Londres. La preocupación por el conocimiento del clima de las ciudades no ha hecho desde entonces sino aumentar y en la actualidad ocupa un lugar preferente por la trascendencia económica, territorial y social que tiene el fenómeno urbano y la incidencia del clima sobre el confort de sus habitantes, la salud humana y la calidad de vida (Alcoforado y Matzarakis, 2010; Taylor et al., 2015; Román et al., 2017). Así, por ejemplo, Heaviside et al (2016, 2017) demostraron que los riesgos sobre la salud humana son mayores en la población urbana que en la rural, especialmente durante las olas de calor (Royé et al, 2020, 2021), que pueden verse intensificadas por ese efecto urbano sobre las temperaturas. Se estima que en la ola de calor de 2003 la sobremortalidad en Europa fue de unas 70.000 personas (Díaz Jiménez, et al, 2006; García-Herrera et al, 2010, Garrabou et al, 2009), siendo durante ese periodo la posibilidad de fallecer mayor en entornos urbanos (Laaidi et al, 2012).

Este interés aplicado es el que está en el origen de las primeras investigaciones sobre el clima de Zaragoza, que si en una primera fase se centraron en la relación entre clima y contaminación atmosférica (Ascaso, 1969), ya en la década de los 70 se comenzó a estudiar desde la perspectiva

de sus características bioclimáticas y el confort urbano (Calvo-Palacios, 1976). Posteriormente, los trabajos se orientaron hacia dos niveles de análisis: un primer nivel en el que se trabajaba en la caracterización de la isla de calor y otro que se centraba en la evaluación de los principales factores que influyen en el microclima urbano generado por la ciudad (Cuadrat et al., 1993; De la Riva et al., 1997; López Martín, 2011; Cuadrat et al., 2005, 2014, 2015, Saz et al, 2003, Vicente et al, 2005). Para ello se utilizaron datos procedentes de estaciones meteorológicas gestionadas por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), imágenes de satélite con sensores térmicos y transectos urbanos con vehículos equipados con instrumental de medición.

En referencia a las fuentes instrumentales, ha de tenerse en cuenta que las redes tradicionales de observación del clima están diseñadas para unos análisis a escala regional-sinóptica, lo que hace que en pocas ocasiones sean adecuadas para los estudios de clima urbano. Precisamente, con objeto de evitar la influencia urbana sobre los datos registrados, fue común que las estaciones meteorológicas se trasladasen del interior de la ciudad a su periferia, muchas veces a los recintos de los aeropuertos, siendo discutible asignar a las estaciones ubicadas en ese tipo de instalaciones el calificativo de rurales. En el caso de España tenemos que en las últimas 7 décadas han funcionado más de 5.000 observatorios que hayan registrado temperatura del aire (Serrano-Notivoli et al, 2019), localizados en su mayoría en entornos naturales (el 61%) y el resto (39%) en entornos no naturales, pero con una clara infrarrepresentación de los espacios urbanos y aún menos de su heterogeneidad, resultando en una fuente poco representativa para el análisis del clima urbano.

La posibilidad de estudiar la temperatura superficial de las ciudades y su periferia mediante imágenes de satélite ha sido también ampliamente explorada (Voogt y Oke, 2003; Yue et al., 2019). Pero estos estudios se centran en la temperatura de superficie de los materiales y no en la temperatura del aire, dando lugar a otra línea de investigación que es la de las *Islas de Calor Urbano Superficial* (ICUS) habiéndose incluso desarrollado mediante *Earth Engine* de Google una web en la que podemos observar, tras el procesamiento de imágenes de satélite, la intensidad de la isla de calor de ciudades de todo el mundo (<https://yceo.users.earthengine.app/view/uhimap>). Este tipo de fuente permite una resolución continua y para prácticamente para todo el planeta. Si bien su escala de resolución no se ajusta a las dimensiones de las ciudades medianas y pequeñas, cuya importancia en la organización territorial de Europa hemos subrayado antes, queda desdibujada la heterogeneidad de los espacios urbanos, haciendo difícil la aplicación de los datos a tareas de gestión. Además, la frecuencia de información queda condicionada al paso del satélite y a la no presencia de nubosidad.

En relación a los transectos urbanos, éste ha sido un método tradicional y ampliamente utilizado por investigadores de clima urbano de todo el mundo. Sobre uno o varios vehículos se situaban sensores de temperatura y humedad convenientemente protegidos del viento, la radiación solar o la lluvia, realizándose las mediciones en horario nocturno, cuando la isla de calor estaría mejor configurada. En el caso de Zaragoza se desarrollaron en la década de los años 2000 este tipo de transectos sobre tres vehículos, en recorridos que duraban aproximadamente una hora y que sirvieron para conocer la configuración e intensidad de la isla de calor de la ciudad y su relación con factores estructurales o con la dirección del viento, con resultados publicados en trabajos ya citados anteriormente. La densidad espacial de la información y las posibilidades de cartografiar las ICU para conocer el comportamiento térmico de la ciudad son adecuadas a partir de este tipo de datos. El problema es que el producto que se obtiene a partir de ellos resulta en una imagen de este fenómeno en un momento concreto del día y solo en las situaciones sinópticas en las que se desarrollaban los transectos, que por una lógica cuestión de costes no pueden ser numerosos.

En la última década se está observando una tendencia creciente hacia la instalación de redes de sensores para medir de forma específica las características del clima de los entornos urbanos. (Bassett et al., 2016; Honjo et al., 2015; Smoliak et al., 2015; Vardoulakis et al., 2013; Warren et al., 2016). El desarrollo y progresión de sensores de bajo costo y su calidad comprobada, ofrecen nuevas oportunidades para las redes urbanas (Meier et al., 2017), obteniendo información en o por debajo de la escala horaria, lo cual es clave en los estudios de clima urbano. Este es el caso de Zaragoza, donde desde el año 2015 y gracias a la colaboración entre el Servicio de Medio Ambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza y el Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza, se instaló una red de sensores financiada por el propio Ayuntamiento y mantenida por el Departamento de Geografía, con la que se está monitorizando con una frecuencia horaria la temperatura y humedad relativa del aire en distintos puntos de la ciudad y de su entorno rural, lo que permite un examen más preciso de muchos rasgos del clima urbano todavía poco estudiados y algunos de cuyos principales resultados se presentan en este informe.

Los modelos climáticos a futuro, en un escenario de cambio climático antropogénico, prevén en todos los casos un aumento de las temperaturas en todo el planeta y un incremento en el número e intensidad de las olas de calor y de las noches tropicales. En ese contexto se convierte a nuestro juicio en fundamental, desde la perspectiva de la gestión de las ciudades por parte de los ayuntamientos, un adecuado conocimiento de sus características térmicas y de la configuración de las islas de calor, con objeto de mejorar la calidad de vida de sus habitantes y optimizar las inversiones orientadas a la adaptación al cambio climático y en especial al aumento en el número de días cálidos y muy cálidos. En este sentido, Zaragoza es desde 2005 miembro de la *Red Española de Ciudades por el Clima*, promovida por la Federación Española de Municipios y Provincias, la Oficina Española de Cambio Climático y el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, y que está formada por los Gobiernos Locales que están integrando en sus políticas la mitigación y adaptación al cambio climático. Además, en el año 2019 aprobó su *Estrategia de Cambio Climático, Calidad del Aire y Salud de Zaragoza (ECAZ 3.0) Horizonte 2030*, y ha sido seleccionada por la Comisión Europea como una de las *100 ciudades climáticamente neutras*.

En este informe se presentan algunos de los avances obtenidos en los últimos años en el conocimiento del clima urbano de Zaragoza y de su ICU gracias a la amplia base de datos que, con una cadencia horaria, monitoriza el clima de la ciudad. Parte de los resultados que aquí se muestran han sido ya publicados en congresos internacionales y en revistas científicas de reconocido prestigio incluidas en el sistema JCR, habiéndose adaptado las figuras y las características del discurso a la tipología de este informe. Además, se presentan también algunos avances preliminares de trabajos todavía en ejecución, que pueden aportar información adicional y todavía inédita para el estudio del clima de Zaragoza.

Antes de la presentación de los principales resultados y tras hacer una breve descripción del área de estudio, se expone la naturaleza de la base de datos utilizada, describiéndose también el proceso de control de calidad de los datos. Posteriormente, en el apartado de resultados, i) se analiza la intensidad de la ICU en el periodo 2020-2021 mediante la comparación de los datos medidos dentro de la ciudad con los obtenidos en el sensor que consideramos rural, ii) la distribución horaria de esas diferencias en cada sensor, iii) se compara la intensidad de esa ICU durante el día y la noche en cada uno de los sensores a lo largo de ese bienio y iv) la relación entre la ICU y la intensidad del viento, para finalmente analizar mediante cartografías v) la distribución espacial de la temperatura

media anual así como de las máximas y mínimas absolutas sobre el entramado urbano de Zaragoza y la periferia no urbanizada en el periodo 2020-2021, vi) la distribución espacial de las temperaturas estacionales y vii) los valores promedio a las 00 horas, las 06 h, las 12 h y las 18 h. Asimismo, se presentan datos sobre viii) el número de días de helada, noches tropicales y noches tórridas cuantificadas en cada sensor y por tanto en zonas diferentes de la ciudad.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La ciudad de Zaragoza se encuentra localizada en el noreste de España, en el sector central del valle del Ebro, asentada en ambas márgenes del río sobre sus terrazas Holocenas y Pleistocenas (fig. 1) en la confluencia entre los ríos Gállego y Huerva. Se trata de la quinta ciudad más poblada de España, si bien su número de habitantes ha descendido en los últimos tres años, pasando según los datos del Padrón Municipal (Instituto Nacional de Estadística) de 716.040 en 2020 a 701.102 en 2021 y 684.686 en 2022, con datos actualizados para este año al 31 de marzo.



Fig. 1. Mapa de localización de Zaragoza y rosa de vientos de la ciudad

Según el Ministerio de Transportes de España (2021) el entorno metropolitano de Zaragoza es el octavo a escala nacional, y en el conjunto de Europa estaría entre las 100 principales ciudades dentro de la clasificación jerárquica establecida por Rozenblat y Cicille (2014). Este tipo de ciudades intermedias son de gran importancia en la ordenación del territorio del continente, ya que agrupan al 22% de su población frente al 4% que acogen las ciudades más grandes (Zdanowska et al, 2020), siendo fundamentales en la articulación del territorio y el adecuado desarrollo de las actividades socioeconómicas.

El área urbana ocupa 967 km² de una amplia zona llana, con variaciones topográficas inferiores a los 100 metros entre las zonas de menor altitud, localizadas en el eje del río Ebro y las más elevadas de la ciudad, en el entorno de los Pinares de Venecia, a una altitud de 280 m.s.n.m. La textura urbana es variada, si bien no existen edificios de gran altura. Como muchas ciudades mediterráneas, su crecimiento se ha producido a partir de un casco histórico extenso, de elevada densidad de edificación, calles estrechas y plazas sin forma definida, a partir del cual se han ido desarrollando ensanches durante el primer tercio del siglo XX, con más o menos nivel de planificación, barrios que acogieron el intenso éxodo rural de los años 60 y 70 del siglo XX, de características también compactas, nuevas zonas de expansión en los 80 y 90, con menor densidad y mayor presencia de zonas verdes y nuevos suelos urbanizables en las dos últimas décadas, de tipo residencial de baja y media densidad en las zonas periféricas de la ciudad.

Como señalan Cuadrat et al (2022), la estructura viaria muestra un esquema radial con cuatro cinturones urbanos concéntricos, vías convergentes al núcleo o radiales y ejes transversales mediante los que se realiza la conexión entre los distintos distritos de la ciudad. Toda esta configuración está condicionada por la presencia del río Ebro y la necesidad de puentes para la conexión de ambos márgenes. La circulación de vehículos diaria ronda los 30.000 vehículos/día en las principales avenidas, si bien la configuración radial de la ciudad, la presencia del eje viario del tranvía, así como de grandes ejes peatonales, impide concentraciones de tráfico intensas en el núcleo central.

El clima sobre el espacio regional en el que se asienta la ciudad es mediterráneo con una marcada influencia continental. Atendiendo a la clasificación climática de Köppen, estaríamos ante un clima del tipo BSk, con un volumen escaso de precipitaciones (en torno a los 320 mm año) sometidos a una elevada variabilidad interanual y concentrados en primavera y otoño, unos inviernos fríos, con una temperatura media en enero de 6,2 °C y un verano continuado y cálido, con una media de julio de 24,3 °C. Son frecuentes las situaciones atmosféricas anticiclónicas, en especial en los meses invernales y estivales, de cielos despejados y vientos flojos o en calma que favorecen la formación de islas de calor. El viento es otra componente conocida del clima zaragozano, con velocidades que en ocasiones superan los 100 km/h y que viene propiciado por un claro efecto orográfico, puesto que los diferentes flujos de aire que de cualquier procedencia llegan a la Península Ibérica, se canalizan en el Valle del Ebro entre dos importantes alineaciones montañosas, los Pirineos al Norte y el Sistema Ibérico al Sur, adquiriendo dos claras componentes, NW y SE, reforzadas por la presencia de plataformas estructurales horizontales formadas por materiales Terciarios y Pliocuaternarios que rodean la ciudad y rozan los 800 metros, vientos que son capaces de atenuar e incluso hacer desaparecer la isla de calor.

3. BASE DE DATOS Y METODOLOGÍA

3.1. Localización y características de la red de sensores

Para la realización de este informe se ha utilizado la información horaria de temperaturas registrada a través de la red de sensores termohigrométricos instalados por el Grupo de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales del Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza en colaboración con el Servicio de Medioambiente y Sostenibilidad del Ayuntamiento de Zaragoza, quien en 2015 financió su adquisición.

Los aparatos de medición están colocados sobre postes públicos, en su mayoría dentro de instalaciones municipales y aproximadamente a 3 metros del suelo. En la fig. 2 aparecen algunos

ejemplos de localización. Para su ubicación se buscaron lugares convenientemente alejados de posibles fuentes de calor (aires acondicionados, farolas, etc) o de superficies que pudieran irradiar calor hacia el sensor, en especial durante la noche (paredes, tejados, etc).



Fig. 2. Sensores localizados en la Calle Delicias, Parque del Agua y Barrio de Las Fuentes

Los sensores son de tipo *HOBO Pro v2* y registran temperatura y humedad relativa del aire con una frecuencia horaria desde febrero del año 2015. Su rango de funcionamiento es de los $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a los $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una precisión de $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una resolución de $0,02$ grados. Están equipados con un *data-logger* para la descarga de la información asistida por el software *Onset HOBOWare vs 3.7*. En otros casos se trata de sensores bluetooth cuya descarga se realiza a través de la aplicación *HoboMobile*, disponible para IOS y Android. Para protegerlos de la radiación solar directa y del efecto de la lluvia, los sensores están colocados dentro de un soporte blanco de plástico del tipo M-RSA, que permite asimismo la circulación de aire por su interior (fig. 3).

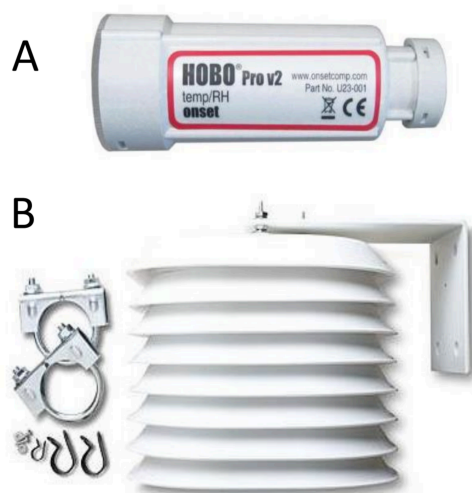


Fig. 3. Sensores tipo HOBO utilizados y elemento de protección frente a la radiación solar directa.

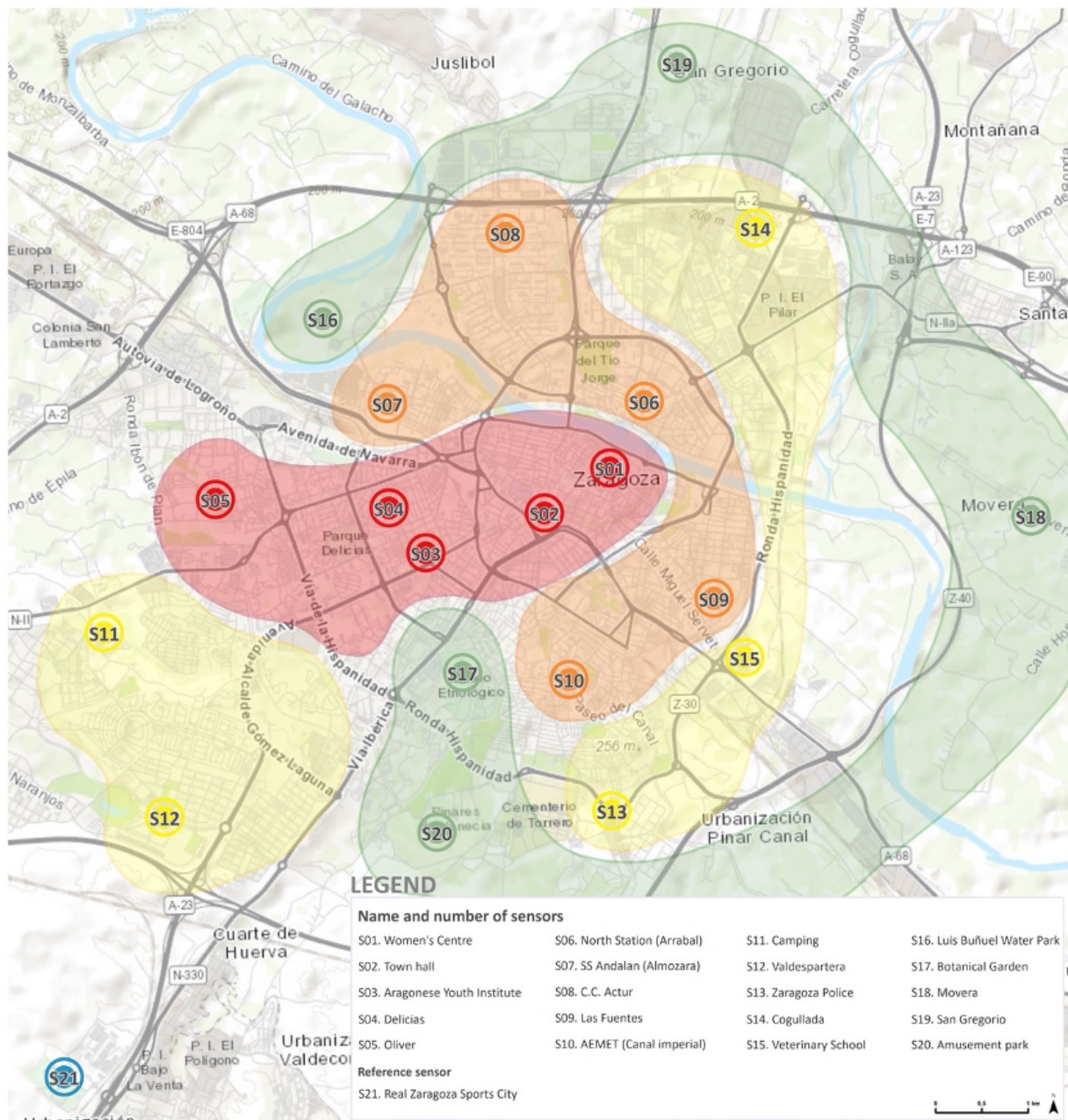


Fig 4. Red de sensores termohigrométricos de Zaragoza. Los colores indican distintas agrupaciones según la distancia al centro urbano. El sensor S21 es considerado como observatorio rural (Fuente: Barrao et al, 2022)

La red está formada por 21 sensores localizados en lugares representativos de distintos ambientes climáticos y de estructura de la edificación de la urbe y su periferia inmediata, siguiendo los criterios definidos por Steward y Oke (2012) que clasifica los espacios urbanos en Zonas Climáticas Locales (*Local Climate Zones - LZCs*). Los 21 sensores cubren un total de 11 LZCs diferentes con 7 clases representativas de áreas edificadas y 4 de otros usos, todas las presentes en la ciudad. Las categorías más representadas corresponden a zonas de edificación compacta con edificios de una altitud baja o media. En relación a su localización, ha de señalarse que para la elección de ubicaciones se tuvieron en cuenta trabajos anteriores sobre la isla de calor urbana de Zaragoza realizados por este mismo grupo de investigación y en colaboración con el Ayuntamiento de

Zaragoza durante la década de los 2000 ya citados en la introducción. Esa experiencia previa que llevó a un conocimiento ya relevante sobre la estructura, intensidad y variabilidad de la isla de calor nocturna, fue muy útil para el proceso de localización de las mejores ubicaciones de la actual red, añadiendo a este conocimiento local los señalados criterios internacionales de Steward y Oke (2012).

En el mapa de la fig 4 se ha representado la red de sensores sobre el plano de la ciudad de Zaragoza. Los sensores se han agrupado en torno a 4 anillos casi concéntricos, de acuerdo a la distancia al centro de la ciudad, que comparten características morfológicas urbanas similares, como se describe en Barrao et al (2022). Los sensores situados más cerca del centro de la ciudad (S01 a S05) son representativos de espacios densamente urbanizados, con prácticamente todas las superficies impermeables y escasa o nula cubierta vegetal. El segundo (S06 a S10) y tercer grupo de sensores (S11 a S15) corresponden a espacios con menor densidad de edificación, que aun pudiéndose considerar plenamente urbanos, disponen de una estructura viaria de calles más amplias y más presencia de suelos permeables y cubierta vegetal, aunque también se incluyen zonas dedicadas a usos comerciales e industriales. Por último, el cuarto de los grupos (S16 a S20) está compuesto por sensores alejados del centro urbano o en zonas de parque, en entornos escasamente urbanizados y con una notable proporción de suelos permeables y cubierta vegetal. Finalmente, el sensor S21 sería representativo de la periferia no urbanizada, pudiendo considerarse como observatorio rural a efectos de comparación con los grupos anteriores localizados en la ciudad como veremos en el apartado de resultados.

3.2. Protocolo de control de calidad de las series de registros

El uso de una red compuesta por 21 sensores que registran datos hora a hora desde el año 2015 resulta en una base de datos de un considerable tamaño en la que, potencialmente, pueden encontrarse lagunas de información, datos ausentes, valores extremos fuera del rango térmico esperable en el entorno climático en el que se encuentra Zaragoza o incluso datos repetidos por fallos en el sensor. Errores que pueden alterar los resultados referidos a las características térmicas de la ciudad. Es por ello que, de manera previa al análisis de la información térmica, se planteó un protocolo de control de calidad de los registros y de depuración de los datos medidos. Este control de calidad, sin antecedentes en la literatura científica que haya podido consultar el grupo de investigación en las principales revistas científicas dedicadas a la climatología aplicado a redes climáticas en entornos urbanos, se diseñó tomando como base las recomendaciones generales de la Organización Meteorológica Mundial para la depuración de datos climáticos (WMO 2017 y 2018) así como criterios de carácter más restrictivo basados en recientes trabajos sobre datos instrumentales (Durre et al., 2008; Menne et al., 2012; Tomas-Burguera et al., 2016) y de otros que tenían en cuenta las particularidades que conlleva el registro de datos climáticos con una frecuencia horaria (Beck et al., 2018; Lott, 2004).

El control de calidad aplicado implica el desarrollo de procesos automatizados aplicables a una base de datos con un número de registros muy elevado, como es la que aquí se maneja, que además pueda posteriormente ser replicado tras la incorporación de nuevos datos. Sin embargo, una vez detectados los datos sospechosos y antes de su eliminación, es en ocasiones imprescindible su revisión y verificación en función del criterio experto del investigador. Es así que, para este proceso de depuración, se ha utilizado un enfoque de control multinivel, que combina un primer paquete de procedimientos de identificación de potenciales errores, desarrollados en el lenguaje de programación R, complementado con controles manuales. En las secciones siguientes se va a detallar este proceso cuyo esquema genérico se ha reflejado en la figura 5 (Barrao et al 2022).

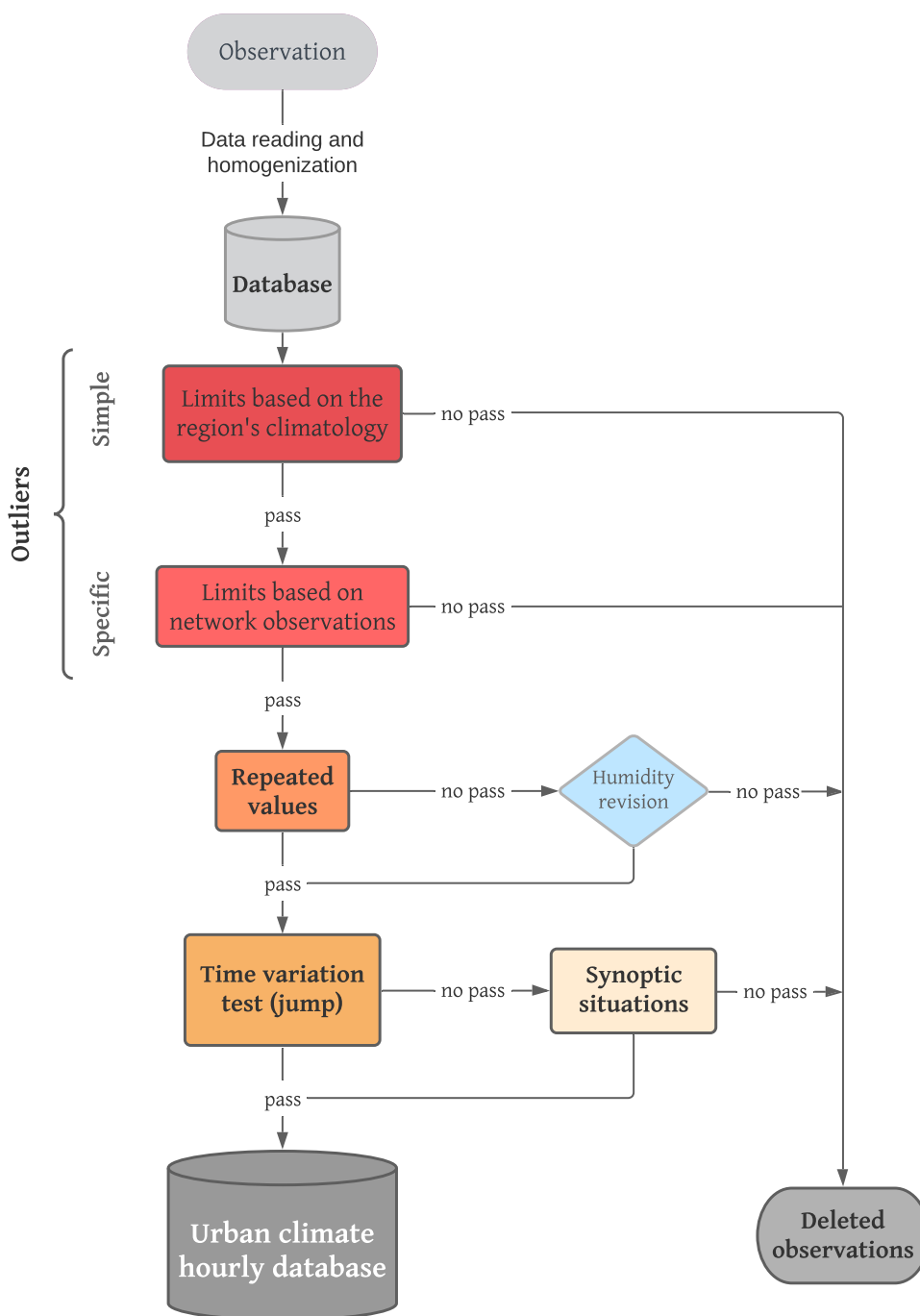


Fig. 5. Flujo de trabajo para el control de calidad de la base de datos de clima urbano de Zaragoza. Fuente Barrao et al 2022

3.2.1. Detección de valores fuera de rango generales

Por valores fuera de rango generales, entendemos aquellos valores registrados por el sensor que excederían de los valores posibles esperables en el entorno climático en el que se localiza Zaragoza. Estos límites se establecieron entre los $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y los $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, valores de temperatura nunca registrados en los observatorios que la Agencia Estatal de Meteorología ha dispuesto históricamente en la ciudad de Zaragoza. Valores fuera de estos límites son eliminados directamente de la base de datos horaria sin revisión posterior.

3.2.2. Detección de valores fuera de rango específicos

En este caso el objetivo era detectar valores fuera de rango a partir de la comparación de los datos registrados por los 21 observatorios en un mismo momento de medición. En caso de que el valor detectado en uno o varios sensores se alejase a partir de unos determinados umbrales de los que registran el resto de los instalados en la ciudad, se consideraría ese dato como sospechoso de ser erróneo. El umbral aplicado para ello es de ± 3 desviaciones estándar. La selección de este límite es frecuente en los protocolos de depuración de datos climáticos (Beck et al., 2018; Velleman y Hoaglin, 1981). Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que la detección de valores fuera de rango en cualquier serie es una tarea compleja y no libre de incertidumbres, en especial cuando estamos utilizando procesos automatizados y umbrales subjetivos que en principio ayuden a identificar esos datos. Los valores identificados como sospechosos en esta fase del proceso de depuración no son eliminados, sino revisados posteriormente para verificar si se trata o no de un valor anómalo en función de la dinámica atmosférica de ese día.

3.2.3. Detección de valores repetidos

La aparición de valores consecutivos repetidos es relativamente común en series procedentes de sensores que, como en el caso de este trabajo, registran datos meteorológicos con una alta frecuencia temporal. No resulta extraño encontrar que durante algunas horas consecutivas y en determinadas situaciones sinópticas de marcada estabilidad atmosférica no exista variación en la temperatura del aire. Sin embargo, si el número de repeticiones es muy elevado esto puede deberse a un fallo en el sensor o en el *data-logger*.

Establecer un número de repeticiones como umbral para identificar estos datos erróneos no está tampoco libre de subjetividad. Serrano-Notivoli et al, (2017, 2019), aplicaron sobre series instrumentales de AEMET un protocolo de identificación de valores repetidos en datos diarios, que se ha utilizado como referencia para su programación en R en este protocolo de depuración de datos, pero obviamente adaptado a las características específicas de los datos horarios, estableciéndose un umbral de 12 repeticiones, es decir, 12 horas consecutivas en la que el sensor hubiera registrado el mismo valor, un periodo de la suficiente amplitud como para que aún en situaciones atmosféricas de gran estabilidad, que impliquen pocos cambios en los valores de temperatura registrados, éstos hayan podido potencialmente variar.

En cualquier caso, las series de datos repetidos detectadas de forma automática son posteriormente analizadas de forma individual como en la fase anterior en función de la situación sinóptica de ese día para decidir sobre su inclusión o eliminación. Días de nieblas o de inversiones térmicas persistentes pueden resultar en la ausencia de cambios durante varias horas en los valores registrados y es por ello que se precisa de esa segunda revisión.

3.2.4. Análisis de variaciones abruptas en las series

A diferencia de en la fase anterior, en este caso el análisis se centraba en la detección de valores horarios consecutivos de temperatura de una magnitud demasiado distinta como para considerarse debidos a un proceso de variación natural de las temperaturas dentro de la atmósfera a una escala local. Para ello se ha utilizado de nuevo ese umbral de las tres desviaciones estándar en relación a la media del conjunto de sensores, de forma que cuando un valor supera en ese umbral al registrado en la hora anterior, se señala como sospechoso de ser un dato anómalo.

Ha de señalarse que, de nuevo, pueden darse situaciones atmosféricas que lleven a cambios importantes en el valor de la temperatura en intervalos inferiores a una hora. Tormentas, reventones cálidos y fríos o la disipación de las nieblas, entre otras situaciones, pueden hacer que la temperatura cambie en incluso más de 10 °C en minutos, por lo que los registros aquí señalados como sospechosos son también revisados en función de la situación sinóptica de ese día.

3.2.5. Evaluación sinóptica

De lo dicho con anterioridad se desprende la necesidad de contar con un registro automatizado de situaciones sinópticas como herramienta auxiliar para la toma de decisiones sobre datos sospechosos. Para ello se ha utilizado el R *package* “*synoptReg*” (Lemus-Canovas, et al 2019) que nos permite obtener una clasificación sinóptica de una región dada a partir de datos de reanálisis de NOAA NCEP/NCAR. Las situaciones sinópticas son calculadas para cada uno de los días en los que aparecen datos sospechosos y de éstos se evalúa su probabilidad de ocurrencia en función de las características de la circulación atmosférica en ese momento.

El conjunto de posibles situaciones sinópticas de todo el periodo analizado se redujo, a partir de un análisis de componentes principales, a 7, representativas de los patrones de circulación atmosférica más relevantes sobre la Península Ibérica (PI) (fig.6).

- El primero de los tipos de situación sinóptica, el ST1 está asociado con situaciones ciclónicas y advección del noroeste. Se trata de situaciones que si bien pueden darse en cualquier época del año son especialmente frecuentes en primavera y otoño. En ellas la posición del anticiclón de las Azores permite la llegada de frentes fríos hasta la PI, provocando situaciones generalizadas de precipitación sobre la mayor parte del país, incluida Zaragoza.
- La segunda tipología, la ST2, es una de las situaciones atmosféricas más características sobre la PI. Su frecuencia es mayor en invierno, cuando una dorsal de aire tropical se asienta sobre nuestras latitudes, dando lugar a temperaturas suaves durante el día, pero noches frías por la pérdida de calor por irradiación. En este tipo de situaciones son frecuentes las inversiones térmicas, con heladas o nieblas en el interior de los valles, bien conocidas en el caso del Valle del Ebro.
- La tercera situación, ST3, frecuente especialmente en los meses de primavera e invierno, muestra algunas de las características de las situaciones de advección del este. Las altas presiones se localizan sobre el continente europeo quedando el anticiclón de la Azores en posición muy meridional, favoreciendo la inestabilidad atmosférica sobre la PI.
- La ST4 se corresponde con situaciones sinópticas conocidas como de advección del oeste y es más frecuente en los meses invernales. Las condiciones meteorológicas asociadas a este tipo de situaciones son de inestabilidad en gran parte de la PI debido a la constante sucesión de frentes que atraviesan todo el territorio en dirección oeste, alcanzando en muchas ocasiones el valle del Ebro. Las temperaturas suelen ser más elevadas de lo que correspondería para la época del año y se alternan momentos de lluvia y/o gran nubosidad con tiempo soleado tras el paso del frente.

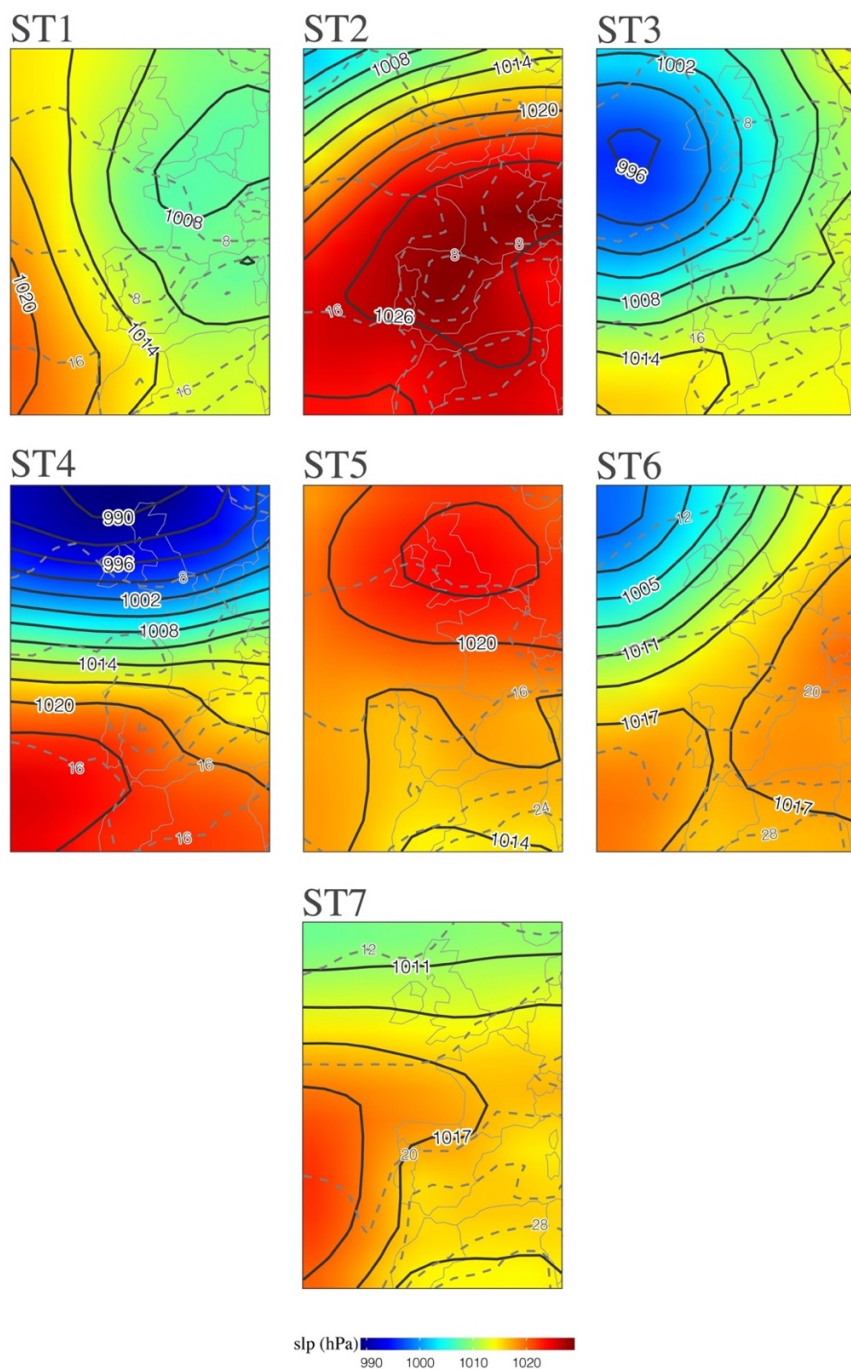


Fig. 6. Clasificación de situaciones sinópticas diarias sobre la Península Ibérica (ST1 a ST7) utilizadas en el control de calidad para la verificación o eliminación de datos sospechosos. Los colores representan la presión atmosférica al nivel del mar (en hPa). Las líneas sólidas son isobaras que representan esa misma variable y las discontinuas la temperatura en superficie. (Fuente Barrao et al, 2022).

- La quinta situación, ST5, se concentra principalmente en primavera y su distribución superficial refleja una situación claramente anticiclónica. El anticiclón de las Azores se extiende hacia Europa produciendo un tiempo soleado y cálido debido a la llegada de aire tropical del continente africano, sobre el que se produce una baja térmica probablemente relacionada con las altas temperaturas del norte de África. En verano este tipo de situaciones suelen dar lugar a olas de calor intensas.

- En el caso de las situaciones del tipo ST6, frecuentes en los meses de verano, estamos ante una situación ciclónica con advección del suroeste. En este tipo de situaciones, la localización de una depresión o borrasca fría aislada genera frentes que atraviesan la PI desde el suroeste provocando precipitaciones importantes que pueden extenderse por todo el territorio, afectando a Zaragoza.
- La última de las situaciones categorizadas, la ST7, es típica de verano y también puede dar lugar a olas de calor. En función de la presencia de aire frío en capas altas pueden generarse también tormentas importantes, en especial en zonas de montaña.

Como señalábamos anteriormente, una vez calculadas e identificadas todas las tipologías, estas situaciones sinópticas se relacionaron con las observaciones catalogadas como sospechosas en el control de calidad con objeto de descartar la medición sospechosa o bien mantenerla en la base de datos.

3.3. Resultados del proceso de control de calidad

Si bien este estudio se refiere a los resultados del clima de Zaragoza del bienio 2020-2021, el proceso de depuración de los registros de temperatura, que puede consultarse de forma más detallada en Barro et al 2022, supone el análisis de casi 600.000 registros de temperatura desde que se instaló la red en marzo de 2015.

El porcentaje de datos ausentes es de solo el 4,3%, problemas que pueden deberse a fallos en el sensor o a periodos en los que el sensor fue retirado temporalmente para su calibración. Aplicado el proceso de control de calidad, los datos señalados como sospechosos fueron de únicamente el 1,6 %. Detallado para cada uno de los pasos, en el referido a la detección de valores fuera de rango generales se identificaron un 24% del total de datos sospechosos detectados, un 0,39% sobre el total de registros. En el paso 2 es en el que se identificaron un mayor número de errores, el 49% de los datos sospechosos y el 0,8% de las observaciones. En el tercer paso se identificaron un 27%, lo que se corresponde con el 0,44% de los registros.

En la figura 7 se detalla el porcentaje de errores detectados en cada estación y el tipo de error. Como podemos ver la mayor parte de los datos sospechosos aparecen en dos estaciones, la S17 (Jardín Botánico) y S21 (Ciudad Deportiva del Real Zaragoza). En ambos casos esos errores son achacables a que los sensores dejaron de funcionar por problemas con las baterías que no fueron identificados hasta que no se procedió a su descarga. Ha de decirse en este sentido que en la actualidad en 14 de los 21 puntos de medición se ha puesto dos sensores para evitar este problema siendo intención del equipo de investigación el mantener dos sensores activos en cada uno de los puntos de medición.

La distribución temporal de los datos sospechosos se ha representado gráficamente en la fig. 8, donde puede verse que la mayor parte de los identificados aparecen en el comienzo de la serie de mediciones, concretamente un 33,73% durante el primer año. También en el año 2018 hubo un incremento importante en el número de datos sospechosos. A escala mensual no se detectan meses en los que el número de errores sea significativamente mayor. Como podemos ver el número de errores detectados desde 2019 es muy bajo.

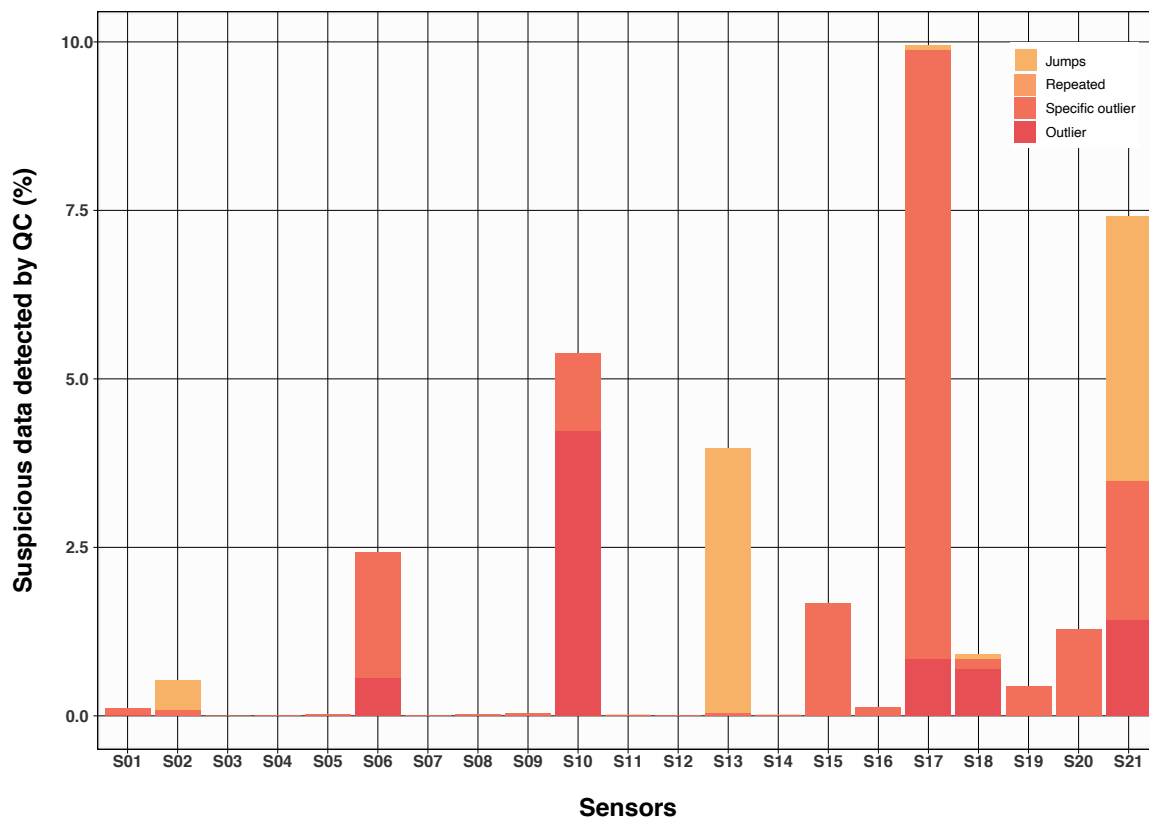


Fig. 7. Porcentaje de observaciones identificadas en las series originales para cada uno de los sensores. (Fuente Barrao et al, 2022).

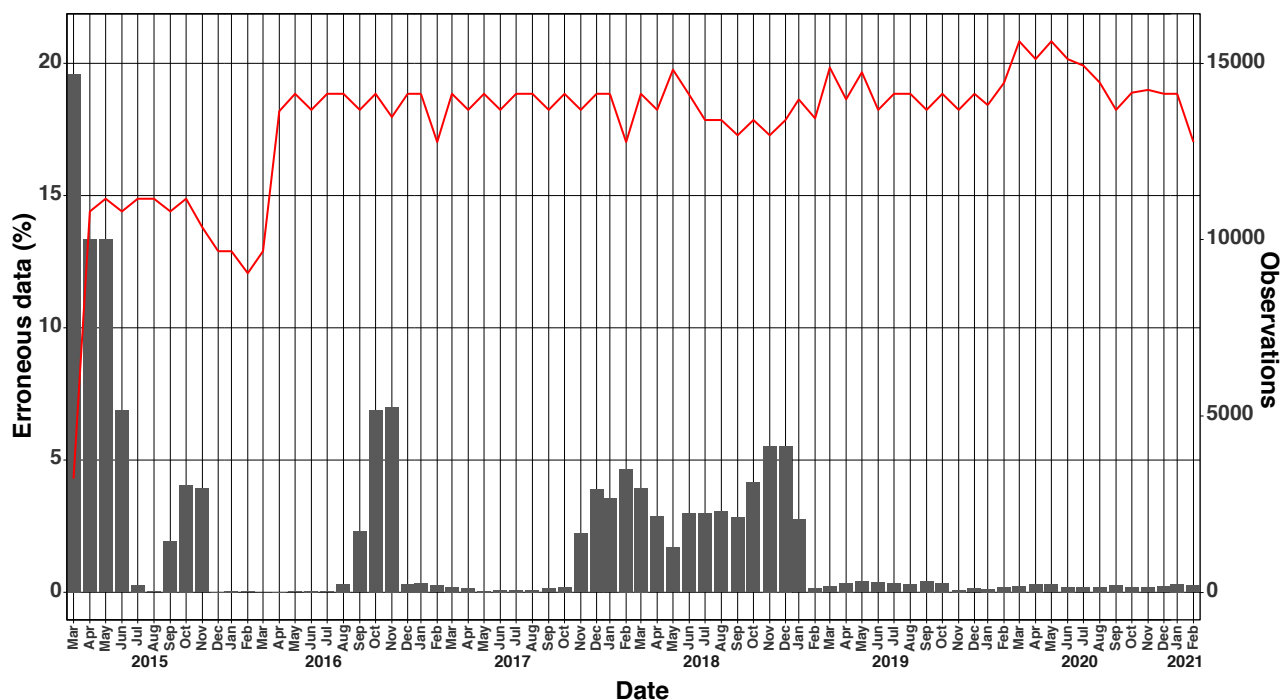


Fig. 8. Evolución mensual del porcentaje de datos eliminados mes a mes y número total de datos disponibles para cada mes (Fuente Barrao et al, 2022).

Como hemos señalado, los datos sospechosos son puestos en relación con la situación sinóptica caracterizada de forma automática para el día de la medición. Sin entrar a detallar demasiado este proceso, la mayor parte de los datos sospechosos relacionados con valores repetidos durante 12 horas o con saltos abruptos en el registro de temperatura entre horas consecutivas están relacionados con situaciones anticiclónicas del tipo ST5 en las que han podido generarse nieblas. Durante el periodo en que éstas son persistentes la temperatura puede permanecer estable varias horas produciéndose un aumento de los valores térmicos tras su disipación. Es frecuente además que en algunos sensores la niebla se disipe antes que en los situados en las zonas más bajas de la ciudad aumentando rápidamente la temperatura en ese punto. En este tipo de situaciones los valores sospechosos no eran eliminados de la base de datos.

Con la llegada de un frente o tras una tormenta es también habitual que se registren cambios bruscos de temperatura. De esta forma cuando los datos sospechosos se localizan en días en los que hay probabilidad desde el punto de vista sinóptico de que se produzcan estas situaciones, los datos identificados como sospechosos tampoco eran eliminados.

Sin embargo, algunas de las anomalías detectadas en las observaciones no podían explicarse por la situación atmosférica. Por lo tanto, fueron identificados como errores y eliminados de la base de datos. Una vez desarrollado este proceso se obtuvo una base de datos horaria filtrada con la que desarrollar de forma más fiable análisis sobre el comportamiento térmico de la ciudad de Zaragoza.

3.4. Proceso cartográfico para la obtención de mapas de islas de calor

El proceso de interpolación utilizado para la cartografía de este informe consistió en la técnica geoestadística denominada *kriging*. Existen diferentes tipos y modelos de este método de inferencia espacial, como puede ser el ordinario o el simple, cada uno de ellos con sus correspondientes particularidades. Esto resultó decisivo en la elección del *kriging* universal como método de interpolación ya que se caracteriza por analizar la variación entre observaciones y las características geográficas de su entorno. Además, permite que la distribución espacial incluya una tendencia subyacente que puede describirse mediante una función lineal de predictores y asume la estacionalidad intrínseca solo después de tener en cuenta esta tendencia subyacente (Pebesma, 2006). De este modo, la temperatura urbana tiene un patrón espacial que puede ser explicado mediante covariables, o lo que es lo mismo, mediante variables predictoras correlacionadas con la temperatura. De manera que puede mejorar el rendimiento de la interpolación y permitir la estimación del error del valor estimado. Por todo ello se optó por este método para calcular la distribución espacial de la temperatura a en el entorno urbano de Zaragoza en el periodo 2020 y 2021.

En cuanto a las variables predictoras del *kriging*, se buscó variables que permitieran ajustar la interpolación y explicar la distribución de la temperatura en el entorno urbano de Zaragoza. Finalmente se analizaron nueve variables: Modelo Digital de Superficies (MDS), Modelo Digital de Terreno (MDT), Zonas climáticas locales (LCZ), *Sky View Factor* (SVF), Radiación solar total (RAD), Índice de rugosidad del terreno (TRI), Densidad de suelo impermeable (IMD), Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y distancia a masas de agua. Para la interpolación todos los predictores se reescalaron a una cuadrícula de 100 m, ya que se consideró una resolución adecuada para representar la información de una ciudad media. El remuestreo espacial de los datos se realizó en R aplicando el paquete raster y la opción "bilineal". Además, los predictores fueron centrados y

escalados.

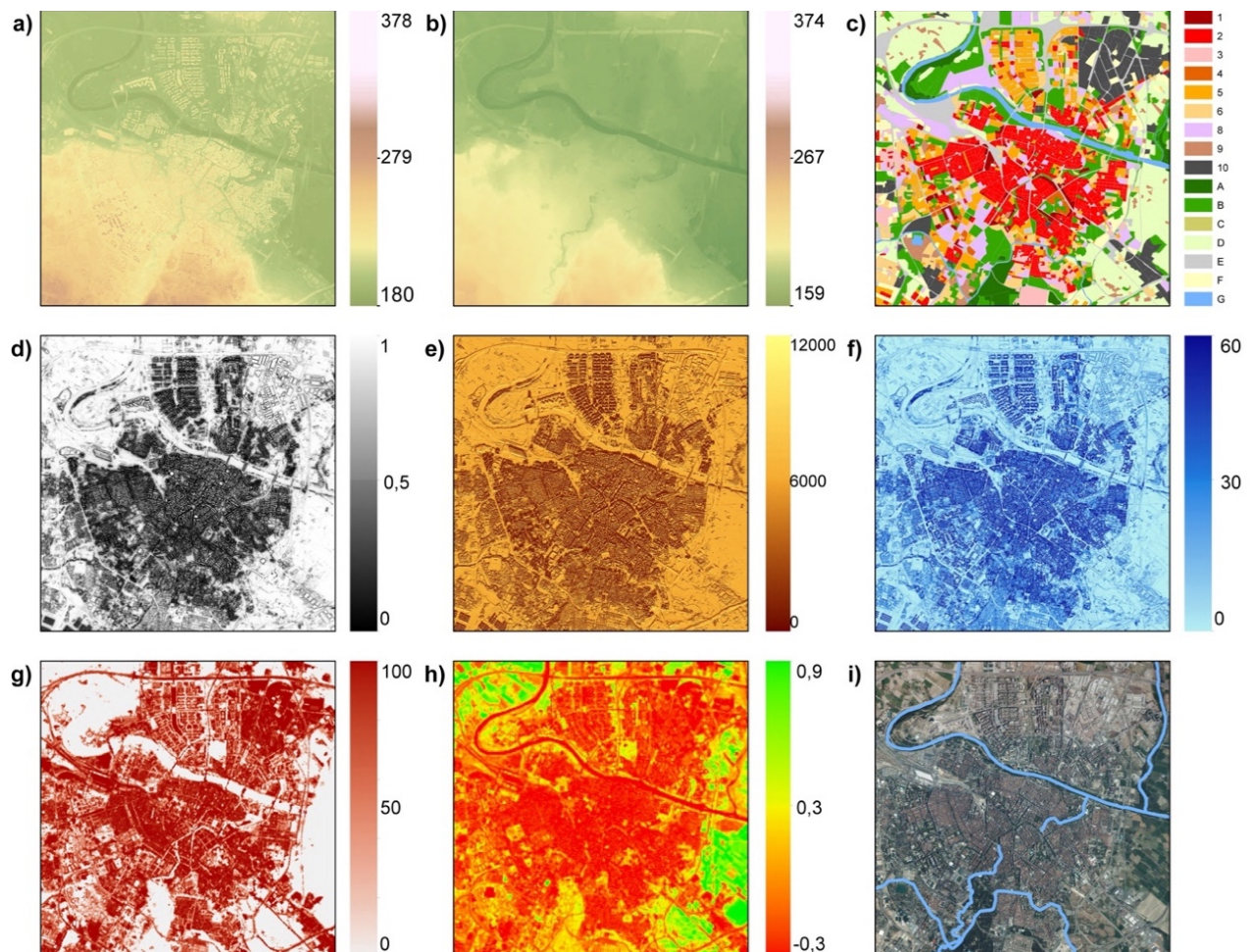


Figura 9. Variables predictorias utilizadas en el modelo de interpolación. Modelo Digital de Superficies (a), Modelo Digital de Terreno (b), Zonas climáticas locales (c), Sky View Factor (d), Radiación solar total (e), Índice de rugosidad del terreno (f), Densidad de suelo impermeable (g), Índice de vegetación de diferencia normalizada (h) y distancia a masas de agua (i).

Modelo Digital de Superficies (MDS)

El MDS representa la superficie más elevada sobre el terreno ya sea de origen natural o artificial, como las edificaciones. Los datos de partida para la generación de esta variable son los ficheros de puntos LiDAR. Los datos se obtuvieron del portal del Instituto Geográfico Nacional, concretamente se utilizó el modelo digital de superficies 1ª Cobertura con paso de malla de 5 m (MDS05) del año 2010.

Modelo Digital del Terreno (MDT)

El MDT es un modelo digital referido a las elevaciones del terreno de un espacio concreto, desestimando elementos como bosques o edificaciones. Al igual que en el caso del MDS parte de los ficheros LiDAR y también se obtuvo la información del Instituto Geográfico Nacional. Se utilizó el modelo digital del terreno 2ª Cobertura con paso de malla de 2 m (MDT02) del año 2016.

Zonas climáticas locales (LCZ)

Las LCZ o *Local Climate Zones* es una variable temática basada en la clasificación de los usos del suelo en relación a al comportamiento térmico de la ICU y a escala de ciudad. Se desarrolló originalmente para cuantificar la relación entre la isla de calor urbana (ICU) y el patrón morfológico urbano por Stewart y Oke (2012). En esta ocasión se optó por utilizar la clasificación desarrollada por Oliveira (2020) adaptándola a nuestra zona de estudio y utilizando ArcGIS como software.

Sky View Factor (SVF)

El SVF muestra el porcentaje de cielo que puede ser visto desde una localización. Para calcularlo se utilizó el software de información geográfica SAGA GIS, en particular el módulo *Sky View Factor* dentro de *Terrain Analysis*. Se aplicó como base al MDS de 5m previamente descargado y el método de “sectores” con un valor predeterminado de 8.

Radiación solar total (RAD)

Se calculó la radiación solar potencial total que incide sobre la ciudad, una variable muy relacionada con la SVF y la temperatura debido a la insolación. De nuevo se utilizó SAGA GIS pero en esta ocasión el módulo *Potential Incoming Solar Radiation*. Fue necesario incluir el MDS a 5m y el SVF. Se obtuvo la insolación total para todo el periodo de estudio, teniendo en cuenta las sombras y obteniendo los resultados en kWh/m².

Índice de rugosidad del terreno (TRI)

El TRI es un índice sencillo que tiene como objetivo cuantificar la heterogeneidad de la topografía en un espacio concreto. De nuevo se utilizó SAGA GIS con el módulo *Terrain Ruggedness Index* dentro de *Terrain Analysis* e incorporando el MDS de 5m.

Densidad de suelo impermeable (IMD)

El IMD o *Imperviousness Density* representa la impermeabilidad del suelo. Es decir, el porcentaje de cambio artificial de la cubierta del suelo o sellado. Los datos utilizados provienen del programa *Copernicus* del servicio *Land Monitoring Service*. Con una resolución de 10m, se descargó el conjunto de datos de 2018 para España, ajustándose posteriormente a la zona de estudio.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI es un indicador simple de la actividad fotosintética de las plantas que informa sobre el vigor de la vegetación. Para su aplicación dentro del modelo se utilizó el promedio del NDVI máximo del periodo de verano. Los datos se obtuvieron a partir de una serie temporal de imágenes con los sensores TM, ETM+ y OLI de Landsat entre 2015 y 2021, a las que se aplicaron una serie de correcciones de reflectividad de la superficie de las imágenes mediante *Google Earth Engine* (GEE),

Distancia a masas de agua

Las masas de agua influyen en las pérdidas o ganancias de temperatura del espacio que las rodea, por ello se calculó la distancia en metros de los sensores a las principales masas de agua de la ciudad. Donde destaca el río Ebro como principal superficie de agua de la ciudad, pero también los tramos descubiertos del río Huerva, Gállego y el Canal Imperial.

Con objeto de conocer cuál de las variables previamente descritas guarda mayor relación con la temperatura y debe incluirse en el modelo de interpolación se realizó un análisis de correlación y regresión lineal. Se optó por comparar la temperatura media total de toda la serie para cada sensor con el valor de cada una de las variables predictoras para el mismo sensor. De este modo se optó por utilizar solo aquellas variables que fueran significativa y que alcanzaran valores de correlación más elevados, superior a 0,6 o inferior a -0,7. Obteniendo un total de cuatro predictores: Zonas climáticas locales (LCZ), *Sky View Factor* (SVF), Densidad de suelo impermeable (IMD) e Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Estas variables se incluyeron en el modelo de interpolación de *kriging* universal mediante diferentes combinaciones. Para cuantificar la precisión del modelo y observar cual de todas estas combinaciones de predictores se ajustaba mejor a la realidad urbana se utilizó la validación cruzada, permitiendo estimar el error cuadrático medio (RMSE) para las diferentes combinaciones de variables. Es decir, para cada observación, se usaron todas las demás observaciones para predecir cuál sería esa observación, luego se consideró la diferencia entre la predicción del modelo y la observación real para representar el error en esa ubicación. Las puntuaciones más bajas de RMSE indican, por lo tanto, una mayor precisión del modelo.

En total, se calcularon cinco medidas de validación cruzada: (1) *kriging* universal con LCZ, (2) *kriging* universal con SVF, (3) *kriging* universal con LCZ junto SVF, (4) *kriging* universal con IMD y NDVI, y (5) *kriging* universal que incorporó todas las variables predictivas correlacionadas significativamente a excepción de las LCZ. Una vez calculado el RMSE de todas las opciones se utilizó el modelo con menor error, el modelo 5 (SVF, IMD y NDVI) con un valor de 0,38, y que contara con la distribución espacial más ajustada a la realidad, para implementarse en un bucle que interpoló todas las variables térmicas que se muestran en los mapas. Los softwares utilizados para el desarrollo de esta metodología son el sistema de información geográfica ArcGIS, SAGA GIS y el entorno de programación R.

4. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS TEMPERATURAS EN EL ENTRAMADO URBANO DE ZARAGOZA Y CARACTERIZACIÓN DE SU ISLA DE CALOR EN EL PERIODO 2020-2021

4.1. Intensidad media de la isla de calor urbana de Zaragoza en el periodo 2020-2021

En la fig. 10 se muestran los *box-plot* representativos de la intensidad de la isla de calor en cada una de las zonas donde hay ubicados sensores de temperatura. Para su obtención se calculó la anomalía entre la temperatura horaria obtenida en cada sensor respecto al S21, recordemos que localizado en el sur de Zaragoza, en la CD del Real Zaragoza y que consideramos como observatorio rural. En la tabla 1 se han señalado la intensidad media de la isla de calor, es decir, la diferencia entre la temperatura media anual registrada en cada sensor frente al rural, la intensidad máxima de la isla de calor registrada en el periodo 2020-2021, entendida como la diferencia máxima de temperatura entre cada sensor y el rural en una hora concreta, y la intensidad mínima, en todos los casos negativa.

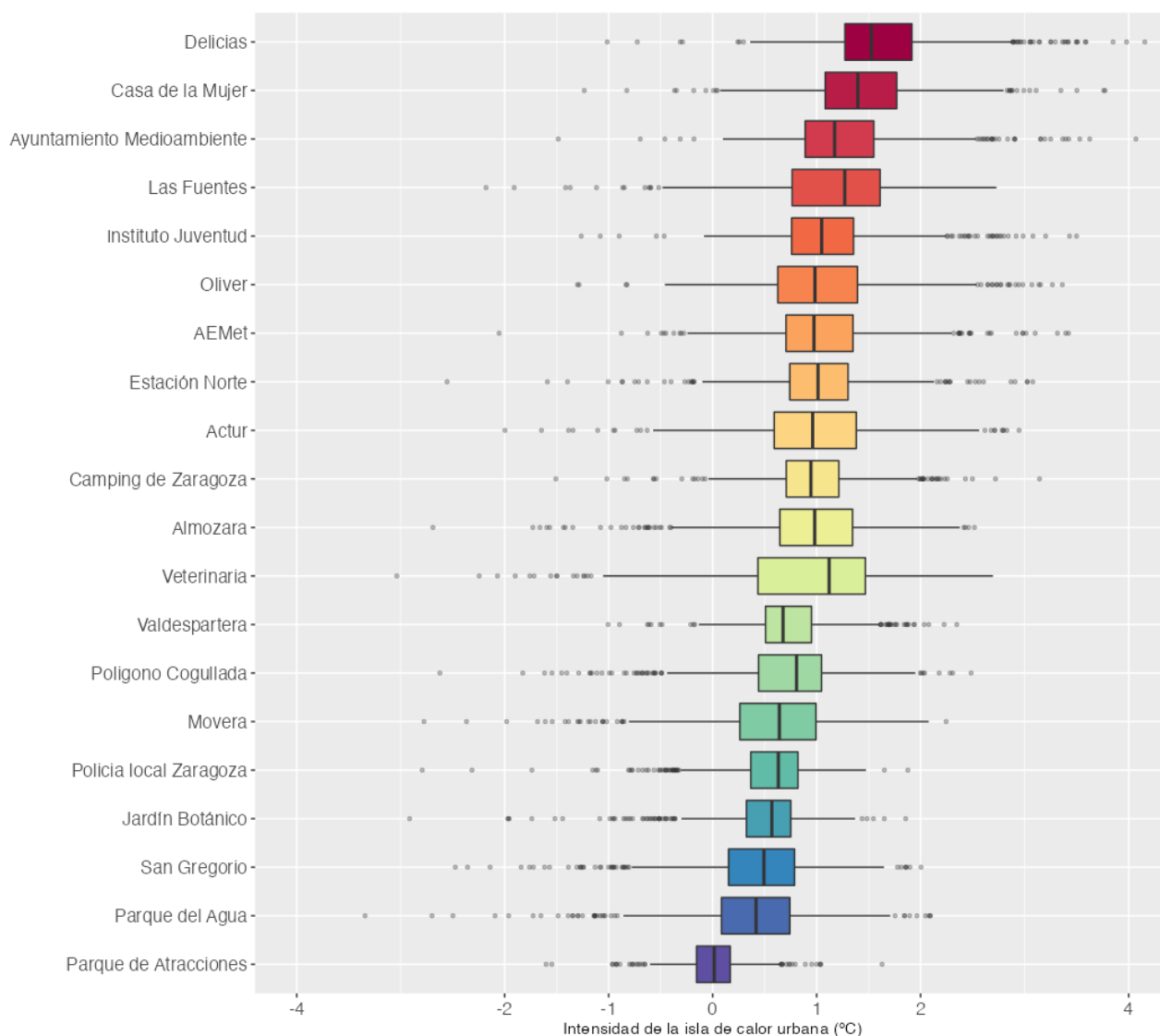


Fig. 10. Box-plot de intensidad de la isla de calor urbana, referida a la diferencia entre el dato registrado en cada uno de los sensores y del sensor S21 Ciudad deportiva del Real Zaragoza. Periodo 2020-2021.

A partir de estos datos podemos observar que los sensores S04 Delicias y S01 Casa de la Mujer registran la temperatura media anual más elevada, con una diferencia de 1,62 °C en el primer caso y de 1,44 °C en el segundo respecto a la temperatura media anual registrada en el S21, valor que sirve para cuantificar la ICU promedio. En general, todos los sensores localizados en las zonas centrales de la ciudad o en barrios con una elevada densidad de edificación, construidos en su mayor parte en los años 60 y 70 del siglo pasado, registran temperaturas medias anuales 1 °C por encima de los de las zonas rurales, siendo éstas las zonas en las que la ICU aparece, a partir de estos datos, más marcada. En el otro extremo, los sensores localizados en la periferia de la ciudad, como el S20 P. de Atracciones o el S19 San Gregorio, al sur y norte de la ciudad respectivamente, registran anomalías positivas más moderadas, inexistentes en el primer caso, ya que ofrece un valor térmico similar al S21, o de solo 0,42 °C en el S19 San Gregorio, un sensor ubicado en un barrio rural pero que todavía podemos considerar urbano. Los sensores localizados en los grandes parques urbanos, como el S16 Parque el Agua o el S17 Jardín Botánico (en el Parque Grande José Antonio Labordeta) ofrecen también valores promedio bajos en relación a otros espacios de la ciudad.

Sensor	Int. Media de la isla de calor en °C
S04_Delicias	1,62
S01_Casa de la mujer	1,44
S02_Ayuntamiento Medio Ambiente	1,27
S09_Las Fuentes	1,14
S03_Instituto Juventud	1,11
S05_Oliver	1,07
S10_AEMET	1,05
S06_Estación del Norte	1,02
S08_ACTUR	0,98
S11_Camping	0,97
S07_Almozara-Andalán	0,94
S15_Veterinaria	0,89
S12_Valdespartera	0,76
S14_Cogullada	0,71
S18_Movera	0,56
S13_Policia Local	0,56
S17_Jardín botánico	0,48
S19_San Gregorio	0,42
S16_Parque del agua	0,37
S20_P. Atracciones	0,00

Tabla 1. Intensidad media de la isla de calor en el periodo 2020*2021

4.2. Intensidad horaria de la isla de calor urbana de Zaragoza en el periodo 2020-2021

En el apartado anterior analizábamos la temperatura media anual obtenida en cada uno de los sensores como diferencia respecto al sensor ubicado en un entorno rural, lo que ya nos da una idea de las características térmicas de la ciudad y de la presencia de zonas en ella donde la temperatura media anual supera hasta en más de 1,6 °C la del espacio regional en el que se asienta Zaragoza. Pero la isla de calor no se mantiene en valores similares a lo largo de todo el día, ya que su intensidad horaria va variando.

En la fig. 11 se muestran los valores medios de la isla de calor en cada sensor hora a hora, de nuevo en forma de anomalía respecto del valor medido en el sensor S21. Aquí podemos ver nuevamente como los sensores ubicados en el centro de la ciudad y en los barrios con una estructura más compacta ofrecen una ICU más acusada. Pero además se observa cómo estos mismos sensores ofrecen un patrón horario para esta isla de calor similar, siendo más marcado durante la noche y el atardecer y llegando prácticamente a desaparecer la ICU en las horas centrales del día en las que la insolación es mayor. En el caso de los sensores ubicados en zonas más frescas estas diferencias en cuanto a la intensidad de la ICU quedan bastante más atenuadas, mostrando el perfil horario un aspecto más plano.

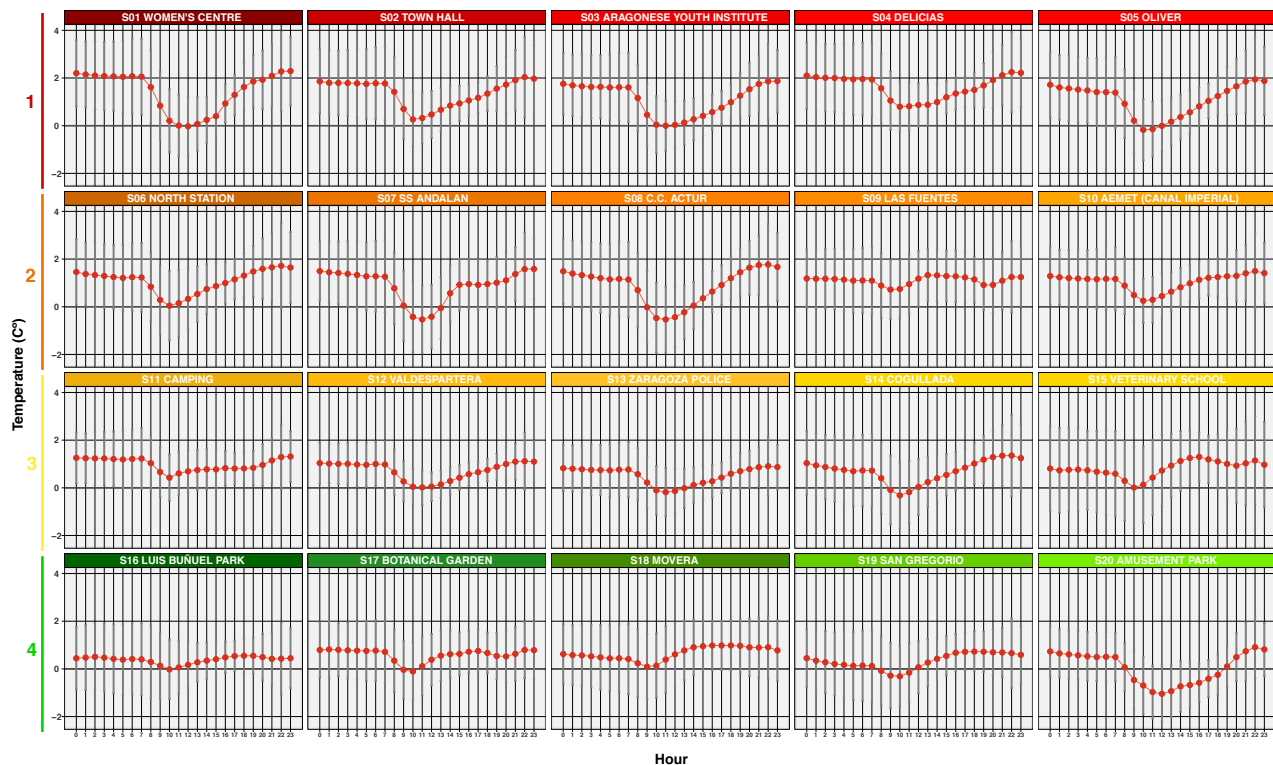


Fig. 11. Intensidad horaria de la ICU por sensor para el periodo 2020-2021. La curva roja muestra el valor de la ICU promedio en cada hora, teniendo en cuenta las diferencias horarias respecto a la GMT en horario de invierno y de verano. En gris se ha representado la desviación estándar de las series para reflejar la mayor o menor variabilidad de la intensidad de la ICU en cada sensor y franja horaria. Para la ubicación de las estaciones se ha respetado la misma gama de color de la figura 4.

Este fenómeno no es exclusivo de Zaragoza, sino que aparece descrito en otras ciudades donde se ha estudiado su isla de calor, relacionándose esta atenuación de la ICU en las horas centrales del día con el juego de sombras que se produce en el interior de la ciudad, al efecto de absorción de la radiación solar por parte de las superficies artificiales y a la presencia de partículas en suspensión que dificultarían la llegada de radiación solar a la superficie. Esto explicaría porqué son precisamente las zonas centrales de Zaragoza donde la ICU es más acusada las que presentan ese perfil más acusado de descenso de la intensidad de la ICU frente a los espacios periféricos con menos edificación y mayor presencia de superficies permeables y zonas verdes donde describíamos esa curva más plana.

4.3. Intensidad de la isla de calor urbana de Zaragoza durante el día y la noche

Casi a modo de ejercicio de síntesis de lo señalado en los puntos 4.1 y 4.2, en este apartado se presentan los datos obtenidos para cada sensor tras evaluar la intensidad de la isla de calor en horario diurno, entendiendo como tal el periodo comprendido entre las 9 y las 18 horas y el nocturno, entre las 21 y las 6 horas, teniendo en cuenta las diferencias horarias respecto a la GMT en invierno y verano.

La figura 12 mostraría que la intensidad de la isla de calor es mayor durante el día que durante la noche en la práctica totalidad de los sensores, con valores que pueden superar en más de 1 °C a los obtenidos durante el día. Durante la noche se puede apreciar también con bastante claridad como existe un gradiente de disminución de la intensidad de la ICU desde los observatorios localizados en

el centro de la ciudad, señalados en el *box-plot* con colores más cálidos, respecto a los de la periferia, en verdes y azules, con la excepción del localizado en la Facultad de Veterinaria cuya ubicación está en revisión en la actualidad. Durante el día el comportamiento es más heterogéneo, quedando mejor marcada, como ya señalábamos, ese gradiente positivo de las temperaturas entre la periferia urbana y el centro de la ciudad en horario nocturno.

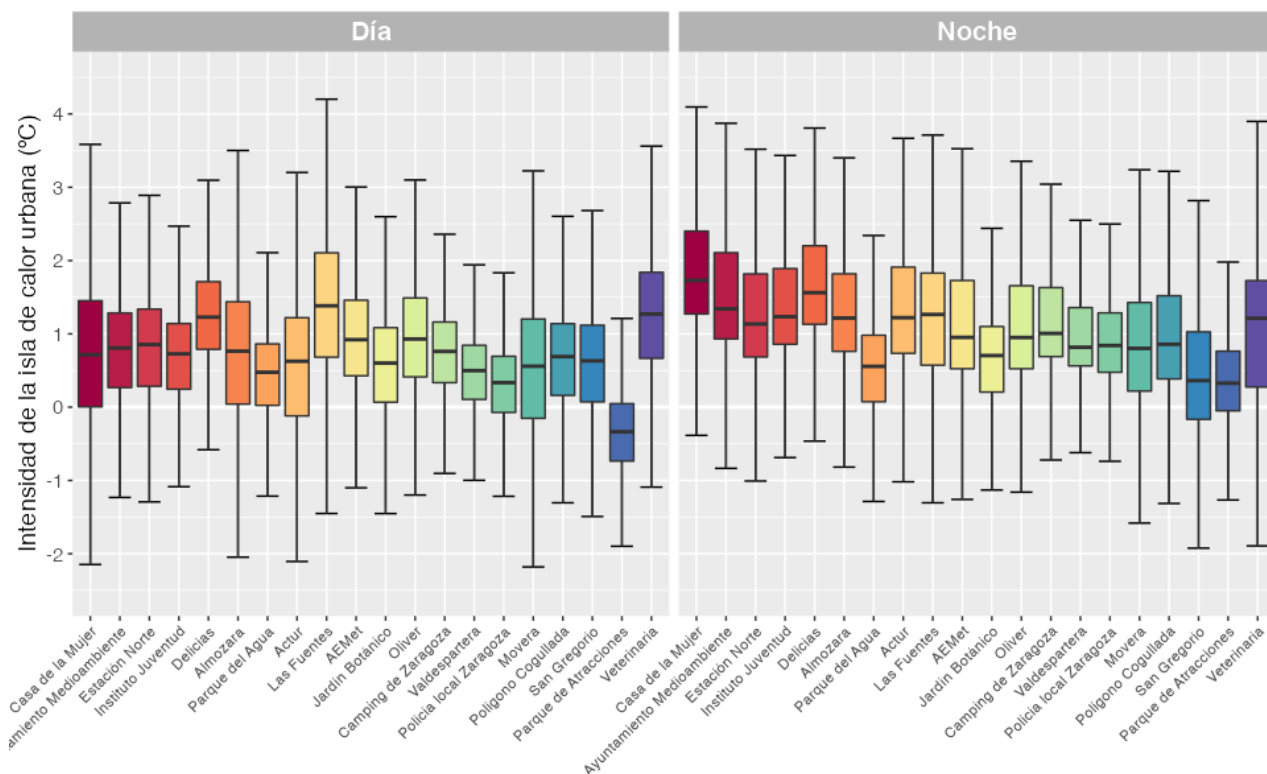


Fig. 12. Intensidad de la ICU por sensor durante el día (entre las 9 y las 18 horas) y la noche (entre las 21 y las 6 horas) para el periodo 2020-2021.

A nivel estacional podemos ver en la figura 13 que esa doble característica de, en primer lugar, una más marcada ICU por la noche y, segundo, de un gradiente centro-periferia en cuanto a la intensidad de ésta, se mantiene durante las 4 estaciones, si bien es más marcado en las noches de la época fría del año, las que podríamos hacer corresponder con la primavera y el invierno. Nótese en el caso de la ICU diurna durante el verano la ausencia de patrones espaciales que vendrían marcados por el color de los *box-plot* en correspondencia con la figura 4 y lo caótico de su distribución, que tendremos oportunidad de analizar mejor a partir de la cartografía.

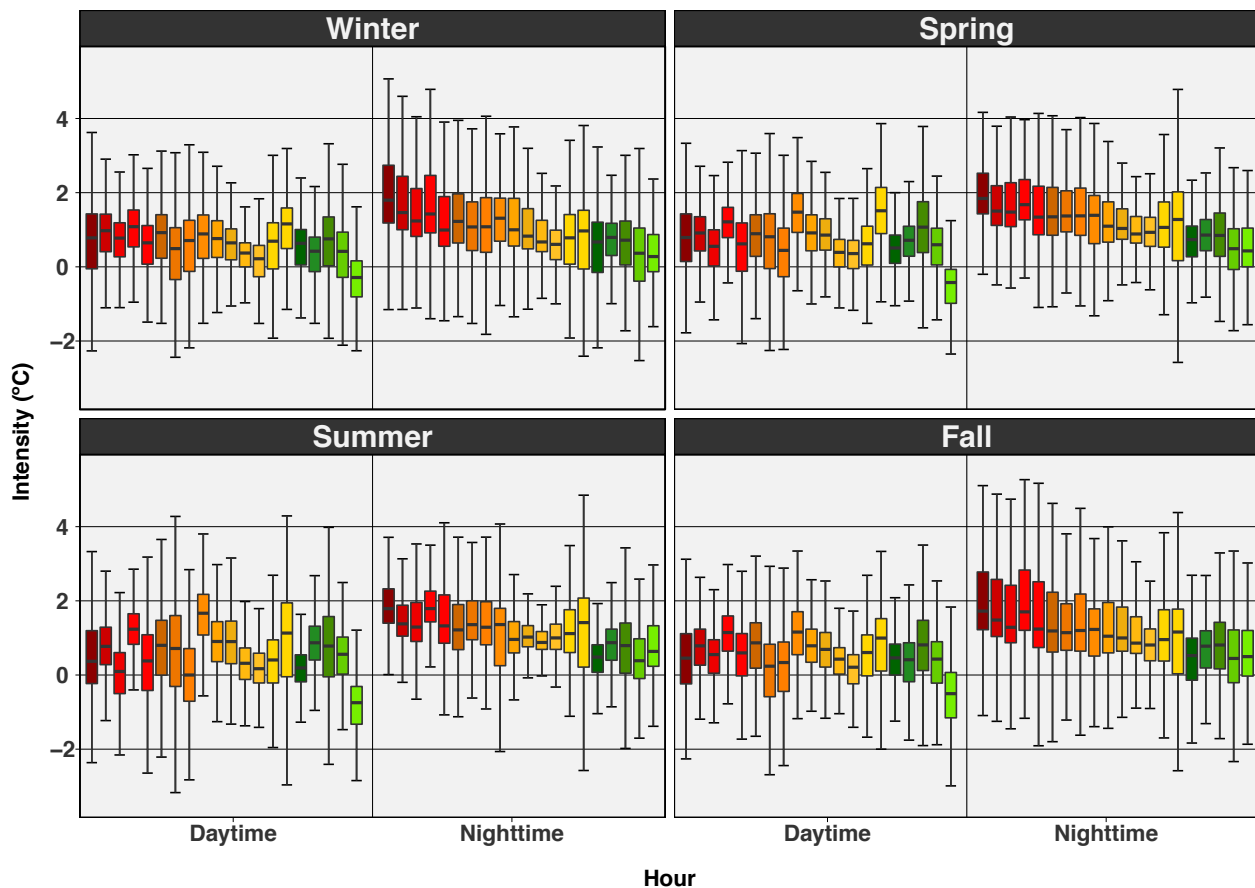


Fig. 13. Intensidad de la ICU por sensor durante el día (entre las 9 y las 18 horas) y la noche (entre las 21 y las 6 horas) a nivel estacional para el periodo 2020-2021

4.4. Influencia del viento

La ICU está condicionada por muchos factores, pero de manera especial por el viento, del que depende una parte importante de sus cambios de magnitud y frecuencia. La intensidad máxima de la isla de calor se alcanza en noches de tiempo estable, viento en calma o flojo y cielo despejado, características que corresponden a situaciones atmosféricas de tipo anticiclónico; en sentido opuesto, el tiempo perturbado, la nubosidad, lluvia y viento son factores negativos que debilitan la isla y pueden hacerla desaparecer.

En el caso de Zaragoza, el viento es uno de los elementos más genuinos del clima por la frecuencia con la que sopla y por la intensidad que en ocasiones alcanza. Como decíamos en la introducción, sus mecanismos son, especialmente, un efecto topográfico: los diferentes flujos de aire de cualquier procedencia se canalizan y aumentan su velocidad en el corredor abierto entre los Pirineos y el Sistema Ibérico, adquiriendo dos claras componentes oeste-noroeste, al que se denomina cierzo, y este-sureste, llamado bochorno.

Los resultados que aquí se presentan sobre esta influencia del viento pueden ampliarse en Cuadrat et al (2022). Para determinar la influencia de la velocidad del viento sobre la intensidad de la isla de calor Zaragozana se han utilizado los datos sobre la diferencia de temperatura observada en el sensor que consideramos rural, recordemos que el situado en la Ciudad Deportiva del Real Zaragoza

(S21), y el localizado en la Casa de la Mujer (S01), en pleno centro de la ciudad. En promedio la diferencia en la temperatura media anual entre 2015 y 2021 entre estos dos sensores es de 1,42 °C, aunque se han llegado a observar diferencias de hasta más de 7 °C en algunos momentos concretos, lo que da una idea de la magnitud de la ICU.

En la fig. 14 hemos puesto en relación los datos de anomalía de temperatura entre los dos puntos de medición de la red de clima urbano de Zaragoza con los datos horarios de velocidad del viento del observatorio que la AEMET tiene el Aeropuerto de Zaragoza. Allí puede observarse como los valores más altos de la isla de calor, esa anomalía positiva en favor del observatorio urbano S01 y que podemos considerar como ICU, se alcanzan cuando el viento está en calma o es muy suave. En ausencia de viento o con una ligera brisa, las diferencias superan en muchos casos lo 5 °C, llegando a rozar los 7,5 °C. En promedio (tabla 2), en situaciones de calma atmosférica la diferencia de temperatura entre ambos sensores es de 2,7 °C.

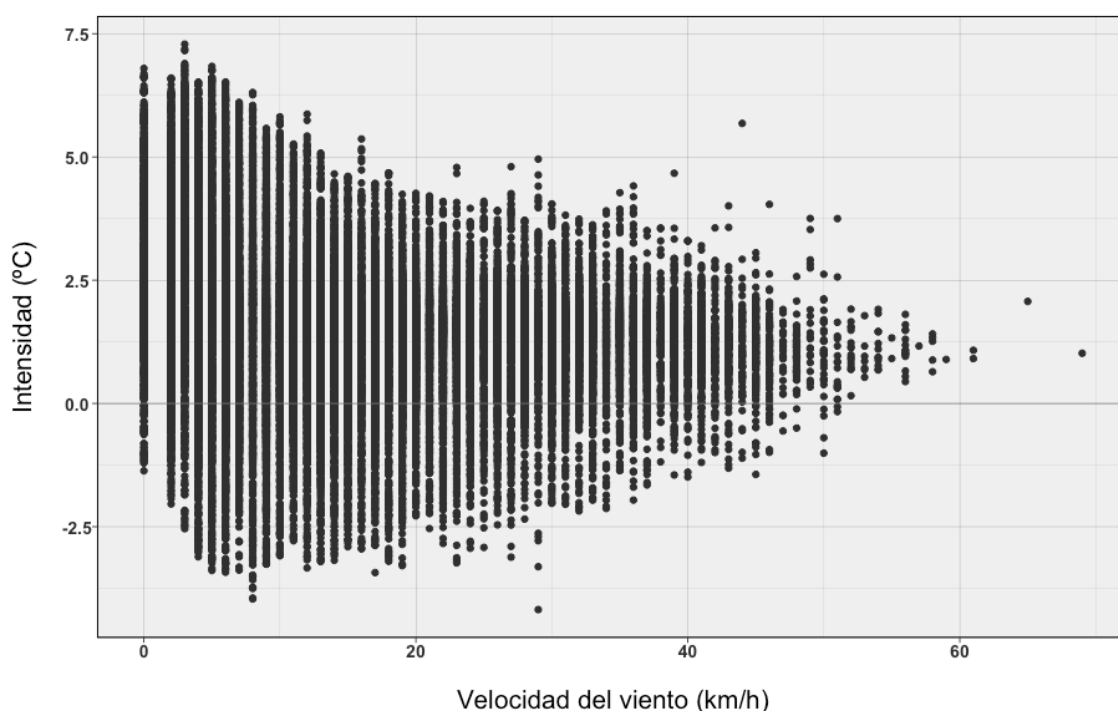


Fig. 14. Intensidad de la isla de calor urbana de Zaragoza y su relación con la velocidad del viento. Fuente: Cuadrat et al, 2022.

Con vientos de 10 km/h se produce una reducción esperada de la intensidad de la ICU, pero aún puede sobrepasar los 4°C y mantiene promedios de 1,57 °C. Con velocidades superiores a 50 km/h la ICU prácticamente desaparece, aunque nunca está cerca de 0 °C, lo que significa que el efecto refugio de la ciudad, con su morfología y sus edificios, es sin duda importante. Algunos autores han sugerido la existencia de una “velocidad límite del viento” a partir de la cual la ICU es nula (Oke y Hannell, 1970). Las velocidades del viento de 35-40 km son valores de referencia de este límite crítico encontrado para ciudades como Seúl (Kim and Baik, 2002) y Salamanca (Alonso et al., 2007). En Zaragoza es superior, y se parece más al límite de 50 Km/h encontrado en otras ciudades, como por ejemplo Buenos Aires (Camilloni and Barrucand, 2012). No obstante, se trata de valores muy dispares, no siempre fáciles de precisar, que están relacionados con las características morfológicas de cada ciudad.

Velocidad del viento km/h	ICU media °C	Desviación estándar	Número de observaciones
0	2,70	1,72	821
2 - 5	2,35	1,96	5113
5 - 10	1,57	1,75	6884
10 - 15	1,27	1,40	5938
15 - 20	1,14	1,27	4659
20 - 25	1,18	1,14	3394
25 - 30	1,22	1,05	3055
30 - 50	1,17	0,85	4573
> 50	1,12	0,42	87

Tabla 2. Velocidades del viento y valores promedio de la isla de calor. (VEL: velocidad del viento en Km/h. MED: intensidad media de la isla de calor entendida como la diferencia entre el dato registrado en el sensor S01 (Casa de la Mujer) y el S21 (Ciudad Deportiva del Real Zaragoza). SD: desviación estándar. OBS: número de observaciones). Modificado de Cuadrat et al, 2022.

4.5. Distribución espacial de la temperatura media anual y de las máximas y mínimas absolutas

En apartados anteriores ya hemos aludido en algún momento a posibles patrones de distribución de las temperaturas en la ciudad que podían observarse simplemente a partir del cálculo de las anomalías y de la localización de los sensores. El desarrollo de métodos cartográficos avanzados, como los que aquí se presentan, fruto de procesos de modelización espacial de datos puntuales con objeto de obtener superficies continuas de información, permite ver con mayor claridad las diferencias térmicas existentes en el interior de la ciudad. Al tratarse de información continua y georreferenciada son datos que potencialmente pueden ser aplicados en la gestión municipal con la perspectiva de identificar aquellas zonas más sensibles al incremento de las temperaturas.

El primer mapa que aquí se presenta en la fig. 15 es el de la temperatura media anual para el bienio 2020-2021 obtenida a partir de los datos de la red de sensores. Acudiendo a los datos de la AEMET (<https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=9434&k=undefined>) la temperatura media anual en el aeropuerto de Zaragoza para el periodo 1981-2010 fue de 15,5 °C, valor que se toma como referencia del clima regional. Según el Atlas Climático de Aragón desarrollado por el Grupo de Clima, Agua, Cambio Global y Sistemas Naturales del que forman parte algunos de los autores de este informe (<https://idearagon.aragon.es/atlas/Clima/info/atlas-climatico-aragon/promedios-1991-2020/promedio-anual-de-temperaturas-medias>) la temperatura media anual modelizada para el T.M de Zaragoza sería similar, de 15,42 °C para el periodo 1991-2020.

En el mapa de la fig. 15 podemos ver como buena parte del entramado urbano de Zaragoza supera esos valores, llegando a rozar en algunos casos medias de 17 °C que estarían en línea con esa anomalía superior a 1,6 °C que mostraban algunos sensores urbanos en relación con el que tenemos como referencia de rural. La ICU aparece bien configurada en el centro de la ciudad, en el eje que iría desde el casco histórico, representado por el sensor S01 de Casa de la Mujer, hasta el S02 Medio Ambiente-Ayuntamiento, extendiéndose hacia el oeste, hacia el populoso barrio de Delicias, donde aparece el sensor S04 que registraba una temperatura media superior. Hacia el este se

observan también temperaturas elevadas en relación a la media, siempre por encima de los 16 °C, en el entorno de los Barrios de San José y Las Fuentes. En la margen izquierda, salvo el caso del Arrabal que comparte patrones térmicos similares a los de los barrios señalados, la estructura más abierta de la edificación coincide con unas anomalías térmicas más bajas, aunque siempre con valores por encima de la media regional. Dentro del entramado urbano puede observarse el descenso de las temperaturas que se produce en zonas en la que existe una mayor proporción de vegetación y superficies permeables, como son el Parque del Agua Luis Buñuel, el parque Grande José Antonio Labordeta y de forma muy evidente también el eje del Ebro y la desembocadura del Gállego. El contraste con la periferia no urbanizada es notable y pueden verse bien marcadas las zonas de huerta, más frescas, como en el entorno de Movera al este, el tramo entre el Galacho de Juslibol y Alfocea al oeste o la zona norte de la ciudad más allá del Barrio de San Gregorio. Hacia el sur las zonas de los pinares de Venecia y los cerros de yesos que bordean esa parte meridional de la ciudad se muestran algo más cálidos que las huertas, pero en valores similares a los de la media regional.

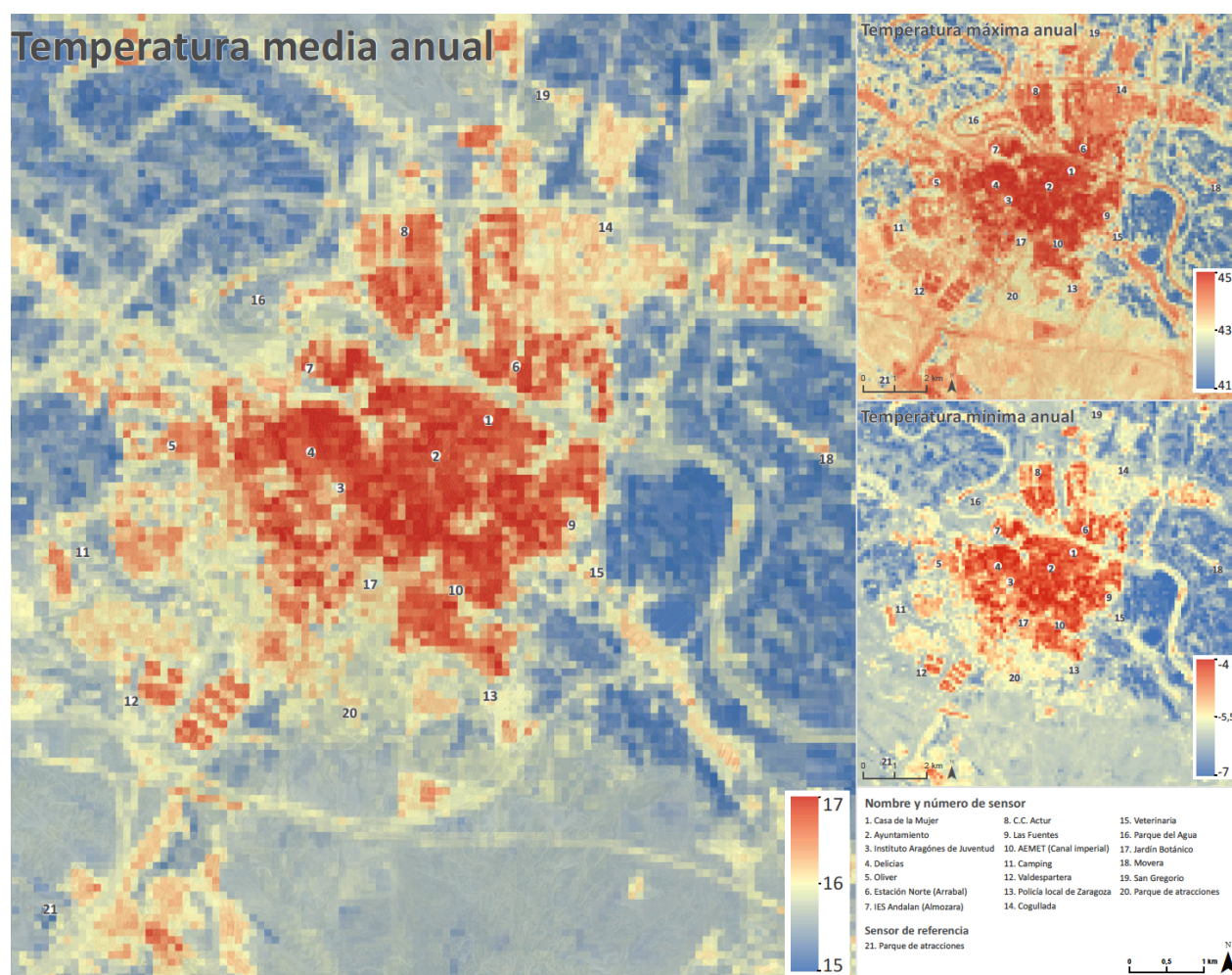


Fig. 15. Distribución espacial de la temperatura media anual del bienio 2020-2021 en Zaragoza y temperaturas máximas y mínimas absolutas.

En el caso de las máximas y mínimas absolutas modelizadas para la ciudad en este bienio, vemos como en ambos casos son esas mismas zonas más cálidas las que presentan los valores más elevados. Especialmente destacable es el caso de las máximas absolutas, en las que vemos que

frente a los 41-42 °C que se registran en las zonas más periféricas, en el centro de la ciudad y en los barrios más compactos la temperatura llegó prácticamente hasta los 45 °C, entre 3 y 4 °C más, agravando la situación de calor extremo para los habitantes de esos espacios. En el caso de las mínimas, muy bajas debido a que corresponden al episodio de Filomena de enero de 2021, las diferencias entre las zonas en las que se registraron las temperaturas más bajas, también en la periferia, y las más elevadas, en las zonas centrales, están entre los 2 y los 3 °C.

4.6. Distribución espacial de la temperatura media estacional

Las temperaturas medias estacionales muestran patrones de distribución espacial similares a los descritos para la temperatura media anual, siendo el centro de la ciudad y los barrios más populosos del este, oeste y sur, los que registran las diferencias de temperatura más elevadas en relación a la periferia no urbanizada (fig. 16). En conjunto las anomalías son inferiores durante otoño e invierno, cuando las diferencias entre las zonas más frescas y las que registran valores más elevados son de 1,5 °C. En primavera y verano la anomalía provocada por la ICU se acerca a los 2 °C.

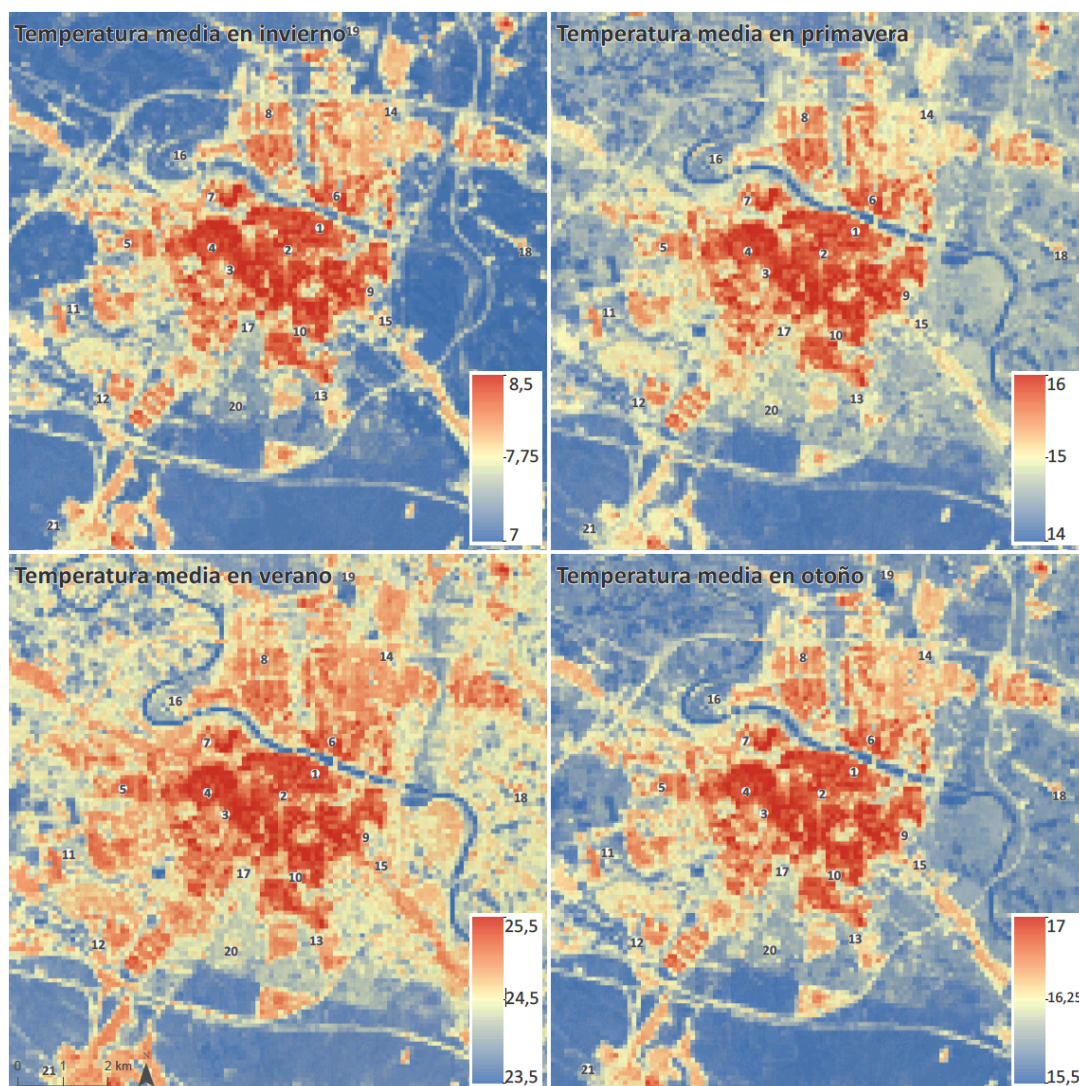


Fig. 16. Distribución espacial de la temperatura media anual estacional del bienio 2020-2021 en Zaragoza

Quizá es interesante referirnos algo más a lo que sucede en verano ya que, como hemos señalado, las olas de calor son señaladas en la bibliografía como un elemento importante para explicar algunos fenómenos de sobremortalidad. Las dos fuentes citadas con anterioridad coinciden en señalar una temperatura media para los tres meses del verano climatológico, junio, julio y agosto, de 24,3 °C. Si acudimos a la cartografía de la temperatura media de verano de la fig.16 podemos observar cómo en prácticamente todo el entramado urbano edificado de la ciudad se supera este valor, con zonas en las que los registros promedio quedan 1,2 °C por encima. Es decir, hay zonas de la ciudad en las que sus habitantes están soportando veranos aún más calurosos de los que marca el clima regional para el solar zaragozano, en valores que en buena parte de la ciudad quedan más de 1 °C por encima de la media regional.

4.7. Distribución espacial de la temperatura media a las 12 AM, 6 AM, 12 PM y 6 PM.

En apartados anteriores ya hemos señalado que el fenómeno de la ICU no es constante. Varía en función de las condiciones atmosféricas, siendo más acusado en situaciones de estabilidad atmosférica llegando incluso a desaparecer con vientos superiores a determinado umbral, pero varía también a lo largo del día y, como ya se ha indicado, en las horas centrales este fenómeno prácticamente desaparece, señalando algunos autores la presencia en el centro de las ciudades de una isla de frescor al ofrecer temperaturas más bajas que algunos espacios de la periferia.

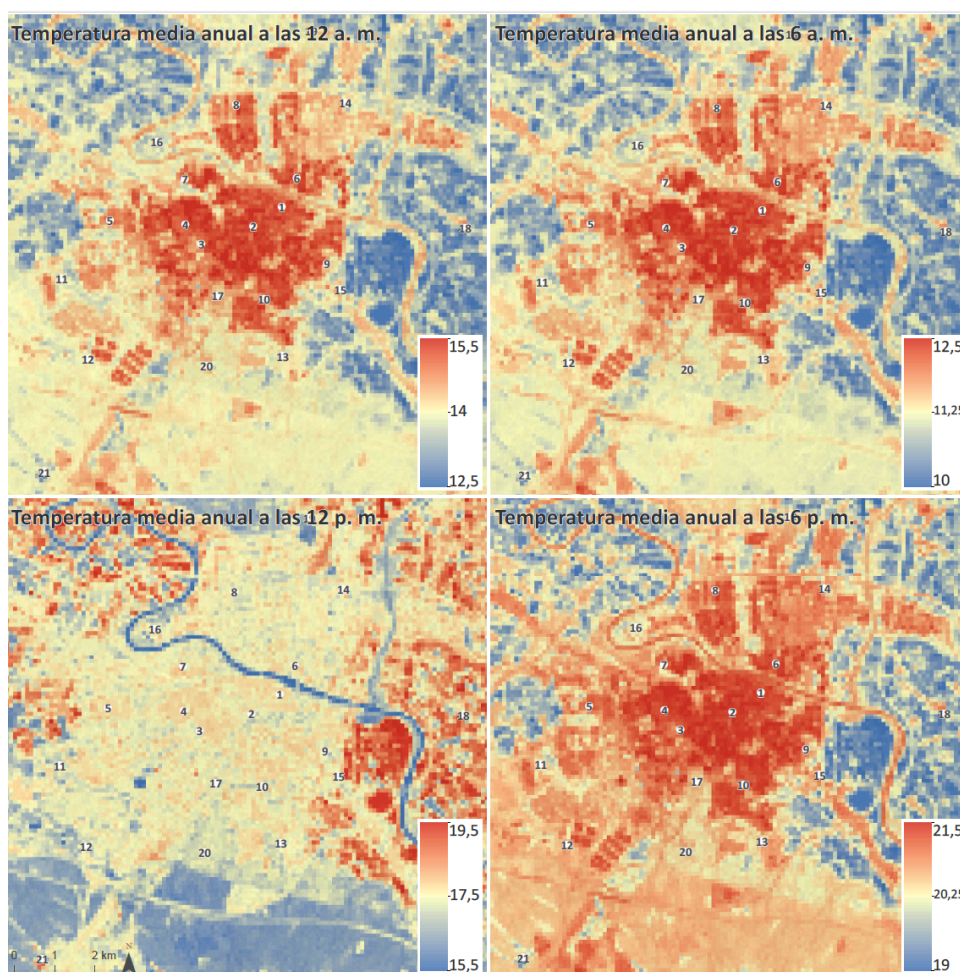


Fig. 17. Distribución espacial de la temperatura a las 12 AM, 6 AM, 12 PM y 6 PM.

Este hecho se ve con claridad si acudimos a la cartografía de los valores promedio obtenidos a las 12 P.M, siempre teniendo en cuenta los cambios de horario de verano en relación a la GMT. En el mapa de la figura 17 puede observarse cómo la ciudad homogeneiza sus valores térmicos, apreciándose escasas diferencias entre los distintos barrios de su entramado urbano. Las temperaturas más elevadas aparecen en cambio en zonas de huerta o espacios con vegetación no arbórea.

En el resto de horas seleccionadas, tanto a las 12 AM (las 0 horas), las 6 AM y las 6 PM (18 horas), la ICU aparece bien configurada sobre la ciudad, siendo las diferencias mayores a las 12 AM, cuando se alcanzan los 3 °C entre las zonas más frescas y las más cálidas, con unos patrones espaciales de distribución de las temperaturas similares a los que hemos descrito en otras cartografías.

4.8. Número de días de helada, noches tropicales y noches tórridas.

El número de días de helada, entendido como aquellos días en los que la temperatura mínima registrada es inferior a 0 °C y el de noches tropicales, en los que la mínima queda por encima de los 20 °C, son indicadores cada vez más utilizados para la evaluación del cambio climático y su efecto sobre las temperaturas. En los últimos años se ha introducido además el de noches tórridas para referirse a aquellas en las que la mínima no llega a quedar por debajo de los 25 °C, un valor mínimo que suele alcanzarse justo antes de la salida del sol.

Estos indicadores, recomendados además por la Organización Meteorológica Mundial como herramientas de monitorización climática, se calculan generalmente con los datos registrados por los observatorios meteorológicos pertenecientes a redes oficiales, bien sean nacionales o regionales o en el caso de España por las gestionadas por las confederaciones hidrográficas. Pero se trata de registros medidos en entornos generalmente naturales y en todo caso no urbanos. En nuestro caso podemos analizar estos indicadores con una perspectiva para el periodo en el que existen datos de nuestra red en los distintos puntos de la ciudad donde existen sensores, generando información interesante desde el punto de vista de la planificación de la ciudad y la adaptación al cambio climático.

En la tabla 3 se han contabilizado el número de días de helada en cada uno de los sensores para los 6 años del periodo 2016-2021. Se ha excluido el año 2015 puesto que como vimos en los resultados del proceso de depuración varios sensores registraron errores de medición y otros ni siquiera se habían instalado. Los sensores se han ordenado de menor a mayor número de días de helada.

Como podría presuponerse de lo visto hasta ahora el menor número de días de helada aparece en aquellos sensores ubicados en el centro de la ciudad o en los barrios de edificación más compacta, frente a un mayor número de eventos en aquellos situados en la periferia de la ciudad. El considerado como rural, el S21, multiplica casi por 5 el número de días de helada que se registran en el centro de la ciudad, S01 Casa de la Mujer, o en el S04 Delicias, donde en algunos años como en el 2019 no se registró ninguna helada. Quizá sorprende el número de días de helada contabilizados en el sensor S20 Parque de Atracciones dada su ubicación. Sin embargo, este dato queda explicado por su localización dentro del pinar que hay situado al sur del parque, en el interior de un bosque no demasiado cerrado, pero lo suficiente como para amortiguar la pérdida de radiación nocturna.

Sensores	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
S01_Casa de la mujer	6	3	4	3	2	2	20
S04_Delicias	6	4	4	0	3	5	22
S02_Ayuntamiento Medio Ambiente	7	6	0	3	3	5	24
S20_P. Atracciones	N/D	N/D	11	9	0	16	36
S03_Instituto Juventud	9	8	5	3	4	10	39
S10_AEMET	8	0	7	7	6	10	38
S06_Estación del Norte	7	11	7	6	6	3	40
S07_Almozara-Andalán	8	9	6	5	4	16	48
S05_Oliver	9	8	5	6	6	14	48
S08_ACTUR	8	10	7	5	4	15	49
S11_Camping	10	9	7	7	7	16	56
S09_Las Fuentes	8	12	8	6	5	16	55
S17_Jardín botánico	9	14	3	2	9	16	53
S12_Valdespartera	10	12	9	9	6	16	62
S14_Cogullada	8	14	8	6	10	17	63
S16_Parque del agua	9	16	10	5	10	16	66
S18_Movera	8	18	2	9	9	17	63
S19_San Gregorio	9	18	10	9	10	17	73
S13_Policia Local	9	17	13	11	9	16	75
S21_CD. RZ	15	18	17	14	12	16	92
TOTAL	163	207	143	125	125	259	1022

Tabla 3. Número de días de helada por sensor. N/D indica los periodos en los que no existían datos al no haber entrado en funcionamiento.

Sensores	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
S01_Casa de la mujer	0	0	0	0	0	0	0
S04_Delicias	0	0	0	0	0	0	0
S17_Jardín botánico	0	0	0	0	1	0	1
S02_Ayuntamiento Medio Ambiente	0	0	0	2	0	0	2
S07_Almozara-Andalán	0	0	1	0	1	0	2
S05_Oliver	0	0	1	0	1	0	2
S03_Instituto Juventud	0	0	1	2	0	0	3
S08_ACTUR	0	0	1	1	1	0	3
S18_Movera	0	0	0	2	1	0	3
S06_Estación del Norte	0	0	1	2	1	0	4
S09_Las Fuentes	0	0	2	2	0	0	4
S11_Camping	0	0	1	2	1	0	4
S16_Parque del agua	0	1	1	2	1	0	5
S10_AEMET	0	0	3	2	0	0	5
S12_Valdespartera	0	0	1	2	2	0	5
S20_P. Atracciones	N/D	N/D	3	2	0	0	5
S14_Cogullada	0	0	3	2	1	0	6
S13_Policia Local	1	0	3	2	1	0	7
S19_San Gregorio	1	0	3	2	3	0	9
S21_CD. RZ	2	3	3	3	2	0	13
TOTAL	4	4	28	30	17	0	83

Tabla 4. Número de días por sensor en los que la temperatura media nocturna, entre las 12 PM y las 7 AM, es inferior a los 0 °C. N/D indica los periodos en los que no existían datos al no haber entrado en funcionamiento.

Más explicativo incluso que el indicador anterior para incidir sobre esa ICU de Zaragoza es el cálculo del número de noches en las que la temperatura media nocturna, en el periodo entre las 12 PM y las 7 AM, es inferior a 0 °C (tabla 4).

Sin ser un hecho muy habitual en el clima zaragozano, sí podemos comprobar cómo en el sensor S21, el considerado como rural, todos los años excepto en el 2021 ha habido entre 2 y 3 noches en las que la temperatura media durante el horario nocturno ha sido inferior a los 0 °C. Ese número va decreciendo conforme observamos sensores ubicados en el interior de la ciudad hasta el extremo de que en los ya conocidos S01 Casa de la Mujer y S04 Delicias no se ha producido este fenómeno al menos en los últimos 6 años

En cuanto al número de noches tropicales, un indicador cada vez más utilizado por las conocidas consecuencias que este tipo de fenómenos tiene sobre el confort climático y la salud humana, la situación se invierte, siendo los sensores situados en el centro de la ciudad los que más número de eventos de este tipo registran (tabla 5) llegando prácticamente a duplicar el sensor situado en el centro de la ciudad S01 Casa de la Mujer a las contabilizadas en el S21. El número contabilizado en el S20 Parque de Atracciones es menor porque dispone de dos años menos de registros. Cabe destacar que en ese punto S01 prácticamente todos los años se registran en torno a 60 noches tropicales.

Sensores	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
S01_Casa de la mujer	62	59	73	56	58	60	368
S03_Instituto Juventud	56	48	71	53	47	47	322
S07_Almozara-Andalán	56	49	69	52	44	48	318
S04_Delicias	63	61	75	0	59	57	315
S05_Oliver	57	45	65	54	45	45	311
S11_Camping	47	48	65	50	45	48	303
S08_ACTUR	52	43	63	51	44	46	299
S09_Las Fuentes	40	48	58	45	45	46	282
S10_AEMET	40	43	64	46	44	44	281
S02_Ayuntamiento Medio Ambiente	51	53	10	54	51	57	276
S14_Cogullada	48	42	55	46	41	42	274
S13_Policia Local	37	48	58	45	42	43	273
S06_Estación del Norte	56	48	57	51	8	52	272
S12_Valdespartera	38	42	55	45	40	44	264
S16_Parque del agua	22	39	43	35	33	34	206
S17_Jardín botánico	35	46	43	0	36	36	196
S19_San Gregorio	19	30	41	37	31	34	192
S18_Movera	23	36	3	40	39	41	182
S21_CD. RZ	20	30	37	31	29	28	175
S20_P. Atracciones	N/D	N/D	44	43	25	34	146
TOTAL	822	858	1049	834	806	886	5255

Tabla 5. Número de noches tropicales por sensor. N/D indica los periodos en los que no existían datos al no haber entrado en funcionamiento.

El acelerado incremento de las temperaturas que se está produciendo en las últimas décadas ha animado a evaluar también el número de noches en las que la temperatura mínima no desciende

por debajo de los 25 °C, lo que se ha venido a denominar como noches tórridas (tabla 00), algo inhabitual en el clima de nuestra ciudad teniendo en cuenta los datos registrados en el observatorios de AEMET del Aeropuerto, pero que por el efecto que genera la ciudad sobre las temperaturas sí se ha podido medir dentro del entramado urbano zaragozano (tabla 6).

En el sensor S21, relativamente cercano al del Aeropuerto y en unas condiciones ambientales parecidas, así como en los de Movera, San Gregorio o en el del Jardín Botánico, no se ha contabilizado hasta el momento ninguna noche con esta característica. Sin embargo en los de Casa de la Mujer, Delicias, Medio Ambiente, entre otros, este tipo de noches pueden contabilizarse prácticamente todos los años, destacando las 8 que en el S01 Casa de la Mujer se dieron en el año 2019.

Sensores	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
S01_Casa de la mujer	2	3	5	8	7	3	28
S04_Delicias	1	3	6	0	5	3	18
S08_ACTUR	0	1	3	6	2	3	15
S02_Ayuntamiento Medio Ambiente	1	2	0	5	3	3	14
S03_Instituto Juventud	1	3	4	6	0	3	17
S05_Oliver	1	2	2	8	2	1	16
S07_Almozara-Andalán	0	2	3	3	2	1	11
S11_Camping	0	2	3	2	0	2	9
S10_AEMET	0	2	4	2	0	0	8
S06_Estación del Norte	1	1	1	1	0	1	5
S12_Valdespartera	0	0	2	1	0	1	4
S09_Las Fuentes	0	1	2	0	1	0	4
S13_Policia Local	0	0	2	0	0	1	3
S16_Parque del agua	0	0	1	0	0	1	2
S14_Cogullada	1	1	2	0	0	0	4
S20_P. Atracciones	N/D	N/D	0	1	0	1	2
S17_Jardín botánico	0	0	0	0	0	0	0
S19_San Gregorio	0	0	0	0	0	0	0
S21_CD. RZ	0	0	0	0	0	0	0
S18_Movera	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	8	23	40	43	22	24	160

Tabla 6. Número de noches tórridas por sensor. N/D indica los periodos en los que no existían datos al no haber entrado en funcionamiento.

5. CONCLUSIONES

Al igual que sucede en todos los entornos urbanos del mundo en los que se ha analizado este fenómeno, en el caso de Zaragoza aparece bien configurada una isla de calor urbana que no es sino el reflejo de la influencia que sobre las temperaturas tienen los procesos de urbanización y por tanto la sustitución de un sustrato natural por otro artificial.

Las ciudades son capaces de generar su propio clima. Los edificios, la presencia de superficies impermeables y las actividades antrópicas, modifican los balances de radiación y generan calor, haciendo que la temperatura media en el interior de las ciudades sea superior que en la periferia no urbanizada. En el caso de Zaragoza y para el bienio 2020-2021 la temperatura media anual en el

interior de la ciudad supera en 1,6 °C a la del entorno rural, una anomalía térmica superior al incremento de las temperaturas que debido al cambio climático antropogénico se espera para las próximas tres décadas a escala regional.

Las características de la edificación y de la estructura viaria, así como la presencia o ausencia de vegetación y de superficies permeables, condiciona la intensidad de la isla de calor en el entramado urbano zaragozano. Las zonas del centro de la ciudad y los barrios construidos en los años 60 y 70 del siglo XX son los espacios en los que la temperatura media anual es más elevada, entre 1 y 1,6 °C en relación a ambientes rurales. Estacionalmente se mantienen estos patrones de distribución espacial de las temperaturas, si bien las diferencias son mayores en primavera y verano.

Pero la isla de calor no es permanente a lo largo de cada jornada ya que, como hemos podido ver, en las horas centrales del día, que son las que registran mayor insolación, ésta aparece atenuada e incluso llega a desaparecer, por efecto del juego de sombras que generan los edificios, la absorción de radiación por parte de éstos (precisamente la que liberada por la noche genera la isla de calor) y la presencia de partículas en suspensión, que dificultan la llegada de radiación solar.

En el interior de la ciudad el número de días de helada desciende de forma importante en relación a lo que observamos en las estaciones situadas en la periferia o en el campo. Situación inversa a la que se aprecia en el número de noches tropicales, que llegan a alcanzar las 60 e incluso las 70 al año en alguno de los sensores localizados en el centro de la ciudad, habiéndose ya detectado en las zonas más cálidas de su entramado urbano un número significativo de noches denominadas como tórridas, en las que la temperatura mínima no cae por debajo de los 25 °C, algo inusual todavía en el espacio climático que ocupa Zaragoza.

Asimismo, hemos podido comprobar como el fenómeno de la isla de calor llega a desaparecer con velocidades del viento elevadas. Una isla de calor no es sino una masa de aire con unas características de temperatura y humedad diferentes a las del resto, lo que dificulta su mezcla. El viento es una componente importante del clima de Zaragoza que llega a barrer literalmente esta isla de calor homogeneizando las condiciones de temperatura.

La creciente concentración de población en entornos urbanos, una tendencia que se ha identificado a escala global, unida al progresivo aumento de las temperaturas relacionado con el cambio climático antropogénico y que como vemos se amplifica todavía más en el interior de las ciudades por el efecto de la isla de calor, hace cada vez más necesario el conocimiento de las características climáticas de las ciudades a una escala de detalle suficiente como para poder desarrollar desde las administraciones públicas políticas encaminadas a la mitigación de los efectos del cambio climático sobre los ciudadanos y la adaptación de las estructuras urbanas a unas condiciones de temperatura que no solo vienen marcadas por las variaciones a escala regional sino también por las particularidades locales.

6. REFERENCIAS

- Alcoforado, M.J., Lopes, A., Alves, E., Canário, P., 2014. Lisbon Heat Island. *Finisterra* XLIX, 61–80.
- Alcoforado, M.J., Matzarakis, A. 2010. Planning with urban climate in different climatic zones. *Geographicalia* 57, 5-39. http://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.201057808
- Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* 23, 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Ascaso, A. 1969. Contaminación y contaminadores atmosféricos. El problema en Zaragoza. *Las Ciencias* 1, 22-34.
- Barrao, S., Serrano-Notivoli, R., Cuadrat J.M., Tejedor, E. Saz, M.A. 2022. Characterization of the UHI in Zaragoza (Spain) using a quality-controlled hourly sensor-based urban climate network. *Urban Climate* 44(113):101207. DOI: 10.1016/j.uclim.2022.101207.
- Bassett, R., Cai, X., Chapman, L., Heaviside, C., Thornes, J.E., Muller, C.L., Young, D.T., Warren, E.L., 2016. Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 142, 2434–2441. <https://doi.org/10.1002/qj.2836>
- 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>
- Calvo-Palacios, J.L. 1976. Aportación metodológica al estudio geográfico del microclima urbano. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, 42, 95-110.
- Chen, G., Li, X., Liu, X., Chen, Y., Liang, X., Leng, J., Xu, X., Liao, W., Qiu, Y., Wu, Q., Huang, K., 2020. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. *Nat. Commun.* 11, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14386-x>
- Cuadrat Prats, J.M., De la Riva, J., Lopez, F., Marti, A., 1993. El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la “isla de calor.” *An. Geogr. la Univ. Complut.* 127–138.
- Cuadrat Prats, J.M., Saz Sánchez, M.Á., Serrano-Notivoli, R., Tejedor, E., 2014. El clima del término municipal de Zaragoza en el contexto del cambio global, Ayuntamiento de Zaragoza. *Agenda* 21. Zaragoza.
- Cuadrat Prats, J.M., Vicente Serrano, S., Saz Sánchez, M.Á., 2005. Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín la Asoc. Geógrafos Españoles* 311–327.
- Cuadrat, J.M., De La Riva, J., López, F., Martí, A. 1993. El medio ambiente urbano en Zaragoza. Observaciones sobre la isla de calor. *Anales Universidad Complutense* 13, 127-138. <https://revistas.ucm.es/index.php/AGUC/article/view/AGUC9393110127A>
- Cuadrat, J.M., Vicente-Serrano, S., Saz, M.A. 2005. Los efectos de la urbanización en el clima de Zaragoza (España): la isla de calor y sus factores condicionantes. *Boletín de la AGE.* 40. 311-327 <https://bage.age-geografia.es/ojs/index.php/bage/article/view/2019>
- Cuadrat, J.M., Vicente, S., Saz, M.A. 2015. Influence of different factors on relative air humidity in Zaragoza, Spain. *Frontiers in Earth Science* 3 (10). <https://doi.org/10.3389/feart.2015.00010>
- Cuadrat, JM, Serrano-Notivoli, R, Barrao, S, Saz, MA, Tejedor, E, 2022. Variabilidad temporal de la isla de calor urbana en la ciudad de Zaragoza (España). *Cuadernos de Investigación Geográfica* 48, 97-110. <http://doi.org/10.18172/cig.5022>
- De La Riva, J., Cuadrat, J.M., López, F., Martí A. 1997. Aplicación de las imágenes Landsat TM al estudio de la isla de calor térmica de Zaragoza. *Geographicalia* 35, 24-36. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.1997351701

- Díaz Jiménez, J., García-Herrera, R., Trigo, R.M., Linares Gil, C., Valente, M.A., De Miguel, J.M., Hernández, E., 2006. The impact of the summer 2003 heat wave in Iberia: How should we measure it? *Int. J. Biometeorol.* 50, 159–166. <https://doi.org/10.1007/s00484-005-0005-8>
- Durre, I., Vose, R.S., Wuertz, D.B., 2008. Robust automated quality assurance of radiosonde temperatures. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 47, 2081–2095. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1809.1>
- Fenner, D., Meier, F., Scherer, D., Polze, A. 2014. Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001–2010. *Urban Climate* 10, 308–331. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.02.004>
- García-Herrera, R., Díaz Jiménez, J., Trigo, R.M., Luterbacher, J., Fischer, E.M., 2010. A review of the european summer heat wave of 2003. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* <https://doi.org/10.1080/10643380802238137>
- Garrabou, J., Coma, R., Bensoussan, N., Bally, M., Chevaldonné, P., Cigliano, M., Diaz, D., Harmelin, J.G., Gambi, M.C., Kersting, D.K., Ledoux, J.B., Lejeusne, C., Linares Gil, C., Marschal, C., Pérez, T., Ribes, M., Romano, J.C., Serrano, E., Teixido, N., Torrents, O., Zabala, M., Zuberer, F., Cerrano, C., 2009. Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave. *Glob. Chang. Biol.* 15, 1090–1103. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>
- Gedzelman, S.D., Austin, S., Cermak, R. N., Stefano, R., Partridge, S., Quesenberry, S., Robinson, D.A. 2003. Mesoscale aspects of the Urban Heat Island around New York City. *Theoretical and Applied Climatology* 75, 29–42. <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0724-2>
- Heaviside, C., Macintyre, H., Vardoulakis, S., 2017. The Urban Heat Island: Implications for Health in a Changing Environment. *Curr. Environ. Heal. reports* 4, 296–305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Heaviside, C., Vardoulakis, S., Cai, X., 2016. Attribution of mortality to the urban heat island during heatwaves in the West Midlands, UK. *Environ. Heal.* 2016 151 15, 49–59. <https://doi.org/10.1186/S12940-016-0100-9>
- Honjo, T., Yamato, H., Mikami, T., Grimmond, C.S.B., 2015. Network optimization for enhanced resilience of urban heat island measurements. *Sustain. Cities Soc.* 19, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.02.004>
- Howard, L. 1818. *The Climate of London*. Longman, London., 221 p.
- Kolokotroni, M., Giridharan, R. 2008. Urban heat island intensity in London: an investigation of the impact of physical characteristics on changes in outdoor air temperature during summer. *Solar Energy* 82, 986–998. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.05.004>
- López-Martín, F 2011. *Clima urbano y ciudad. El caso de Zaragoza*. Colegio de Geógrafos. Zaragoza. 118 pp. ISBN 978-84-615-2098-5
- Laaidi, K., Zeghnoun, A., Dousset, B., Bretin, P., Vandentorren, S., Giraudet, E., Beaudou, P., 2012. The Impact of Heat Islands on Mortality in Paris during the August 2003 Heat Wave. *Environ. Health Perspect.* 120, 254. <https://doi.org/10.1289/EHP.1103532>
- Lemus-Canovas, M., Lopez-Bustins, J.A., Martin-Vide, J., Royé, D., 2019. synoptReg: An R package for computing a synoptic climate classification and a spatial regionalization of environmental data. *Environ. Model. Softw.* 118, 114–119. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.006>
- Lokoshchenko, M.A. 2014. Urban heat island in Moscow. *Urban Climate* 10 (3), 550–562. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.01.008>
- Lopes, A., Alves, E., Alcoforado, M.J., Machete, R., 2013. Lisbon urban heat island updated: New highlights about the relationships between thermal patterns and wind regimes. *Adv. Meteorol.* 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/487695>
- Lott, J.N., 2004. The quality control of the integrated surface hourly database. *Proc. Bull. Am. Meteorol. Soc.* 5039–5045.
- Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., Voogt, J., 2020. Urban climates and climate change. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 45, 411–444. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012320-083623>

- 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>
- Menne, M.J., Durre, I., Vose, R.S., Gleason, B.E., Houston, T.G., 2012. An overview of the global historical climatology network-daily database. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 29, 897–910. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00103.1>
- Ministerio de Transporte, M. y A.U., 2021. Áreas urbanas en España 2020. <https://doi.org/796-21-023-3>
- Nastran, M., Kobal, M., Eler, K., 2019. Urban heat islands in relation to green land use in European cities. *Urban For. Urban Green.* 37, 33–41. <https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2018.01.008>
- Oke, T., 1973. City size and the urban heat island. *Atmos. Environ.* 7, 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T., 1982. The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 108, 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T.R. 1995. *The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects*. En: J.E. Cermak, A.G. Davenport, E.J. Plate, D.X., Viegas, (Eds.). *Wind Climate in Cities*. Kluwer-Academic Publ. Norwell, 81-107. ISBN 978-94-017-3686-2
- Peng, J., Jia, J., Liu, Y., Li, H., Wu, J., 2018. Seasonal contrast of the dominant factors for spatial distribution of land surface temperature in urban areas. *Remote Sens. Environ.* 215, 255–267. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.06.010>
- Román, E., Gómez, G., de Luxán, M. 2017. *Urban Heat Island of Madrid and its influence over Urban Thermal Comfort*. En: P. Mercader-Moyano (Ed.). *Sustainable Development and Renovation in Architecture, Urbanism and Engineering*. Springer, Cham, pp 415-425. http://doi.org/10.1007/978-3-319-51442-0_34
- Royé, D., Codesido, R., Tobías, A., Taracido, M., 2020. Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain. *Environ. Res.* 182. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109027>
- Royé, D., Sera, F., Tobías, A., Lowe, R., Gasparrini, A., Pascal, M., De'Donato, F., Nunes, B., Teixeira, J.P., 2021. Effects of Hot Nights on Mortality in Southern Europe. *Epidemiology* 487–498. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000001359>
- Rozenblat, C., Cicille, P., 2004. Les villes européennes: analyse comparative. *W@terfront. Public Art.Urban Des. Particip. Regen.* 0, 1–94.
- Saz, M.A, Vicente, S., Cuadrat, JM., 2003. Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS. 5th Int. Conf. Urban Clim. 4.
- Saz, M.A., Vicente, S. y Cuadrat, J.M. (2003). Spatial patterns estimation of urban heat island of Zaragoza (Spain) using GIS. Fifth International Conference on Urban Climate. Lodz (Poland), pp 409-412.
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., De Luis, M., 2019. STEAD: A high-resolution daily gridded temperature dataset for Spain. *Earth Syst. Sci. Data* 11, 1171–1188. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1171-2019>
- Serrano-Notivoli, R., Beguería, S., Saz Sánchez, M.Á., Longares, L.A., De Luis, M., 2017. SPREAD: a high-resolution daily gridded precipitation dataset for Spain-an extreme events frequency and intensity overview. *Earth Syst. Sci. Data* 9, 721–738. <https://doi.org/10.5194/essd-9-721-2017>
- Seto, K.C., Sánchez-Rodríguez, R., Fragkias, M., 2010. The new geography of contemporary urbanization and the environment. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 35, 167–194. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-100809-125336>
- Smoliak, B. V., Snyder, P.K., Twine, T.E., Mykleyby, P.M., Hertel, W.F., 2015. Dense network observations of the Twin Cities Canopy-Layer urban heat island. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 54, 1899–1917. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0239.1>
- Stewart, I., 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., Oke, T., 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>
- Taylor, J., Wilkinson, P., Davies, M., Armstrong, B., Chalabi, Z., Mavrogianni, A., Symonds, P., Oikonomou, E., Bohnenstengel, S. 2015. Mapping the effects of urban heat island, housing, and age on excess heat-related mortality in London. *Urban Climate* 14, pp.517-528. <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.08.001>
- Tomas-Burguera, M., Jiménez Castañeda, A., Luna Rico, M.Y., Morata, A., Vicente-Serrano, S., González-Hidalgo, J.C., Beguería, S., 2016. Control de calidad de siete variables del banco nacional de datos de AEMET, in: *Clima, Sociedad, Riesgos y Ordenación Del Territorio. Servicio de Publicaciones de la UA*, Sevilla, pp. 407–415. <https://doi.org/10.14198/XCongresoAECALicante2016-38>
- United Nations, 2018. *World Urbanization Prospects, Demographic Research*.
- Vardoulakis, E., Karamanis, D., Fotiadi, A., Mihalakakou, G., 2013. The urban heat island effect in a small Mediterranean city of high summer temperatures and cooling energy demands. *Sol. Energy* 94, 128–144. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.04.016>
- Velleman, P., Hoaglin, D., 1981. *Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis*, Duxbury Press. Duxbury Press, Boston.
- Vicente, S.M., Cuadrat Prats, J.M., Saz Sánchez, M.Á., 2005. Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain). *Clim. Res.* 30, 61–69. <https://doi.org/10.3354/cr030061>
- Voogt, J., Oke, T., 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.* 86, 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
- Warren, E.L., Young, D.T., Chapman, L., Muller, C., Grimmond, C.S.B., Cai, X., 2016. The Birmingham Urban Climate Laboratory-A high density, urban meteorological dataset, from 2012-2014. *Sci. Data* 3, 1–8. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.38>
- WMO, W.M.O., 2017. *Guide to the Global Observing System.*, WMO-No. 488, WMO-No. 488. WMO, Geneva.
- WMO, W.M.O., 2018. *Guide to Instruments and Methods of Observation, Measurement of Meteorological Variables*, WMO-No. 8. WMO, Geneva.
- Yue, W., Liu, X., Zhou, Y., Liu, Y., 2019. Impacts of urban configuration on urban heat island: An empirical study in China mega-cities. *Sci. Total Environ.* 671, 1036–1046. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.03.421>
- Zdanowska, N., Rozenblat, C., Pumain, D., 2020. Evolution of urban hierarchies under globalization in Western and Eastern Europe. *Reg. Stat.* 10, 3–26. <https://doi.org/10.15196/RS100202>