

## Olas de Calor en la ciudad de Barcelona. 1971-2020

Blanca Arellano-Ramos <sup>1</sup> | Josep Roca-Cladera <sup>2</sup> | Carina Serra <sup>3</sup> | Maria Dolors Martínez,<sup>4</sup> | Xavier Lana <sup>5</sup> | Rolando Biere-Arenas <sup>6</sup>

Recibido: 26-05-2022 | Versión final: 01-09-2022

### Resumen

Los eventos extremos asociados con altas temperaturas tienen un impacto en la salud, sus ecosistemas y por tanto en la economía. Como parte del proyecto X-ClimPlan, este estudio tiene como objetivo estudiar las olas de calor en la ciudad de Barcelona entre 1971 y 2020, partiendo de la definición de ola de calor según la AEMET. No obstante, dicha definición tiene la limitación de referirse únicamente a temperaturas máximas. Si bien éstas pueden tener graves consecuencias, especialmente por golpe de calor, los efectos sobre la salud son más acusados en el caso del calor nocturno, donde la imposibilidad de descansar puede provocar empeoramiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares que producen muertes prematuras. Por ello, el estudio diferencia entre olas de calor diurnas y nocturnas. Dado que el clima urbano presenta una variación espacial, la investigación parte de la información proporcionada por cuatro estaciones meteorológicas: Observatorio Fabra, CMT, Raval y Aeropuerto, proponiendo un modelo OLS para las cuatro estaciones y considerando el año, el mes y el día del calendario (cd) como variables explicativas. Aun cuando los incrementos de temperatura difieren significativamente dependiendo de la localización de la estación, los resultados explican y confirman que el proceso de calentamiento global por encima de los 2°C tanto en las máximas como en las mínimas es ya una realidad en Barcelona. Asimismo, demuestra una marcada diferencia en los eventos de calor extremo entre diferentes ubicaciones urbanas; la proximidad al mar, la altitud, la diferente densidad urbana y la cantidad y calidad del verde urbano tienen un efecto determinante en la resiliencia a eventos extremos.

**Palabras clave:** Fenómenos meteorológicos extremos, ola de calor nocturna; resiliencia; calentamiento global

### Citación

Arellano-Ramos, B et al. (2022). *Olas de Calor en la ciudad de Barcelona. 1971-2020*. *ACE: Architecture, City and Environment*, 17(50), 2022. <http://dx.doi.org/10.5821/ace.17.50.11684>

## Heat Waves in Barcelona City. 1971-2020

### Abstract

Extreme events associated with high temperatures impact on the people's health and their ecosystem, thus the economy. As part of the X-ClimPlan project, this study aims to study heat waves in the city of Barcelona between 1971 and 2020, using the AEMET definition of a heat wave. However that definition refers only to maximum temperatures. High temperatures can have serious consequences in human health, for example, leading to a heat stroke, but it is during nighttime heat, where the inability to rest can worsen respiratory and cardiovascular diseases that cause premature deaths. For this reason, the study differentiates between daytime and nighttime heat waves. Given that the urban climate presents a spatial variation, the research starts with the information provided by four weather stations: Fabra Observatory, CMT, Raval and Airport, and proposes an OLS model for the four stations, considering the year, month and calendar day (cd) as explanatory variables. Even though the temperature in all stations increase, there are differences depending on the location. The results explain and confirm that the process of global warming above 2°C, both in maximum and in minimums, is already a reality in Barcelona. The results also demonstrate a marked difference in extreme heat events between different urban locations; suggesting sea proximity, altitude, different urban density and the quantity and quality of urban greenery have a determining effect on resilience to extreme events.

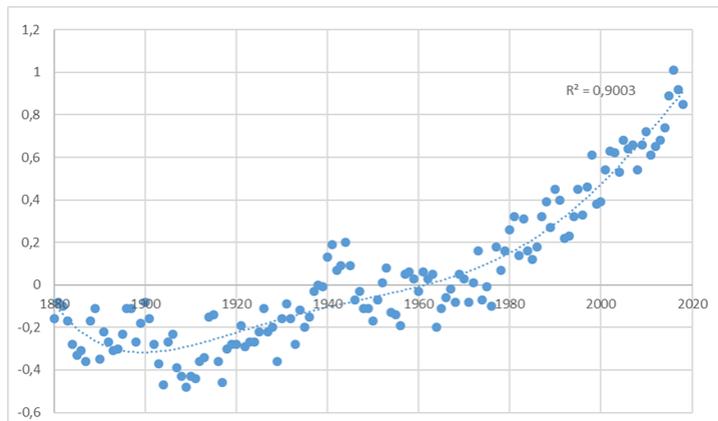
**Keywords:** Extreme climate events, night heat wave; resilience; global warming

<sup>1</sup> Dra. Arquitecta, Investigadora CPSV, Profesora Asociada TA-UPC (ORCID: [0000-0001-7128-3667](https://orcid.org/0000-0001-7128-3667); Scopus Author ID: [43461129700](https://scopus.org/43461129700), WoS ResearcherID: [1-7710-2016](https://orcid.org/1-7710-2016)), <sup>2</sup> Dr. Arquitecto, Investigador CPSV, Catedrático emérito TA-UPC (ORCID: [0000-0003-3970-6505](https://orcid.org/0000-0003-3970-6505); Scopus Author ID: [57190397450](https://scopus.org/57190397450)), <sup>3</sup> Doctora en Física, Profesora Titular FIS (ORCID: [0000-0003-3803-2414](https://orcid.org/0000-0003-3803-2414); Scopus Author ID: [56095813500](https://scopus.org/56095813500)), <sup>4</sup> Doctora en Física, Investigador CPSV, Profesora Titular FIS (ORCID: [0000-0001-8200-183X](https://orcid.org/0000-0001-8200-183X); Scopus Author ID: [21734833400](https://scopus.org/21734833400), WoS ResearcherID: [H-5017-2015](https://orcid.org/H-5017-2015)), <sup>5</sup> Doctor en Física, Profesor Titular FIS (ORCID: [0000-0002-3298-9234](https://orcid.org/0000-0002-3298-9234); Scopus Author ID: [7003735137](https://scopus.org/7003735137)), <sup>6</sup> M.Sc. Arquitecto, Investigador CPSV, Profesor Asociado TA-UPC (ORCID: [0000-0003-1872-7104](https://orcid.org/0000-0003-1872-7104); Scopus Author ID: [57191882461](https://scopus.org/57191882461), WoS ResearcherID: [1-5766-2015](https://orcid.org/1-5766-2015)). Correo de contacto: [blanca.arellano@upc.edu](mailto:blanca.arellano@upc.edu)

## 1. Introducción

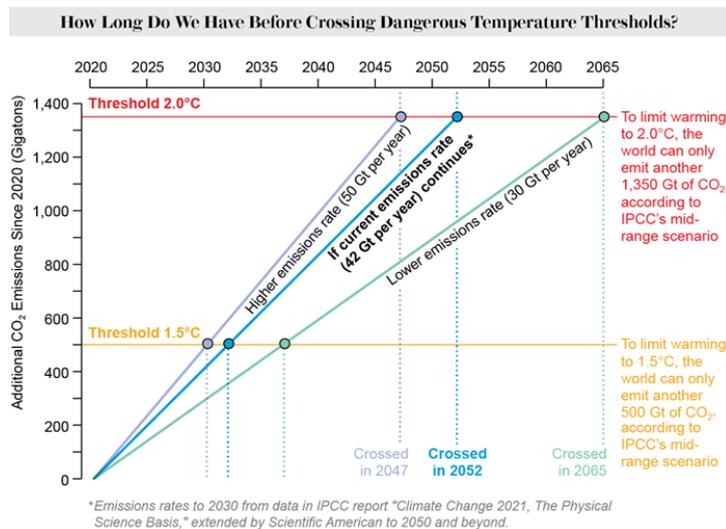
En la conferencia de Glasgow de 2021 (COP26, 2021) se ha anunciado que el calentamiento del planeta ya alcanza los 1,1 grados por encima de la época pre-industrial (Figura 1), estimándose la previsión de alcanzar el horizonte máximo establecido en el Acuerdo de París (COP21, 2015) los 1,5 2032, y el horizonte crítico de los 2 grados en 2050/55, si la generación de emisiones de GHG no alcanza el “zero emissions” esta misma década. La emisión de 500 Gigatoneladas adicionales de CO2 (equivalente) representará cruzar el citado límite de los 1,5 grados. Mientras que el límite de los 2 grados se alcanzará, según el IPCC, con 1.400 Gigatoneladas de CO2 equivalente adicionales (IPCC, 2021) (Figura 2).

Figura 1. Evolución de las temperaturas mundiales (1880-2020)



Fuente: Global Carbon Atlas. Elaboración propia.

Figura 2. ¿Cuánto tiempo nos queda?



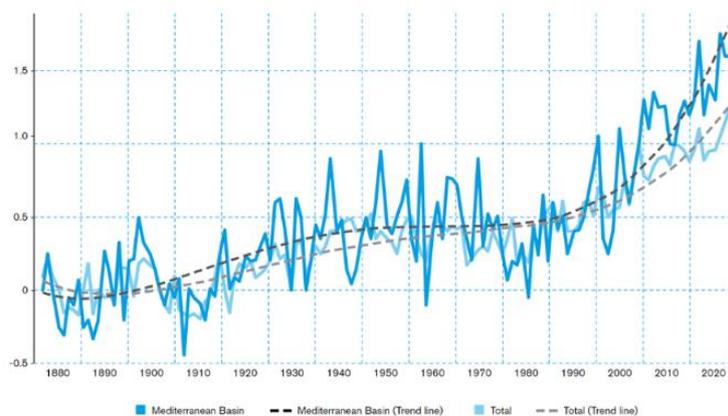
Fuente: Fischetti, 2021.

Para evitar alcanzar el umbral de 1,5 grados de Calentamiento Global (GW), el planeta sólo puede emitir una cantidad determinada de CO<sub>2</sub> de ahora en adelante. Esta cantidad se conoce como Presupuesto de Carbono. Las naciones tienen alrededor de 10 años más con las tasas de emisiones actuales -2032- antes de agotar el presupuesto.

El GW está causando eventos climáticos cada vez más extremos en todo el planeta, que afectan la salud humana (IPCC 2012), y muy especialmente fenómenos meteorológicos, como las olas de calor (HW). En este sentido está constatada la tendencia al incremento en la frecuencia y duración de las olas de calor en la mayor parte del mundo desde la década de 1960, como Europa (IPCC 2012), Estados Unidos (EPA 2014, USGCRP 2017) o China (Ding *et al.*, 2010, Wu *et al.*, 2020). Estas mismas tendencias se producen en el área mediterránea (Lange, 2020), donde el GW se manifiesta con especial fuerza. Las tendencias muestran que, en el futuro, con un clima más cálido y temperaturas medias más altas, las olas de calor serán más intensas, más duraderas y/o más frecuentes (Meehl & Tebaldi, 2004). Como dice el IPCC (2021): “Es prácticamente seguro que la frecuencia y la intensidad de los calores extremos y la intensidad y la duración de las olas de calor han aumentado desde 1950 y seguirán aumentando en el futuro incluso si el calentamiento global se estabiliza en 1,5 °C”. Por lo tanto, es muy probable que el CC provoque un aumento de las HWs, que afectan negativamente a la salud humana.

Se espera que el Mediterráneo sea uno de los “puntos críticos” del cambio climático, con incrementos de temperatura más prominentes a lo largo de los siglos XX y XXI debido a sus costas y topografía complejas (Giorgi 2006). Desde mediados del siglo XX, la temperatura media sobre el Mediterráneo está aumentando por encima de la media mundial. El registro de temperatura reciente revela una temperatura media anual para toda la cuenca que se encuentra aproximadamente 1,5 °C por encima de los niveles de finales del siglo XIX y aprox. 0,4 °C por encima de la media mundial, con una importante variabilidad interanual (Lange, 2020) (Figura 3).

Figura 3. Evolución de las temperaturas de la cuenca mediterránea (1880-2020)



Fuente: Lange, 2020.

La región mediterránea es, por tanto, una de las áreas más afectadas por el cambio climático y por el aumento en la frecuencia, duración e intensidad de las olas de calor (Della-Marta *et al.*, 2007, Lorenzo *et al.*, 2021). Como indica el IPCC (2021): “The Mediterranean region has experienced significant climate variability over recent decades and has been affected in particular by severe heatwaves and droughts (Sections 8.3, 11.3, 11.6 and 12.4; Hoegh-Guldberg *et al.*, 2018). Increasing summer temperatures will enhance the frequency and intensity of such extreme events and will cause additional environmental and socio-economic pressure on the región” (pág. 1449).

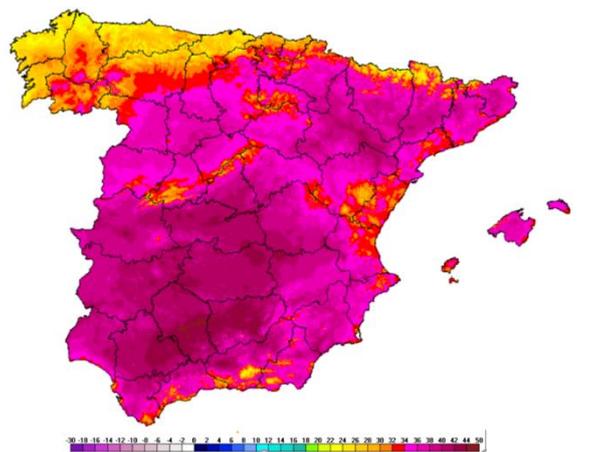
Sin embargo, y a pesar de que los modelos regionales confirman de forma generalizada la fragilidad y falta de resiliencia de la cuenca mediterránea al calentamiento global, pocos estudios han bajado el análisis de las olas de calor y de los eventos climáticos extremos a la escala local. Hasta el presente los estudios para la península ibérica más detallados utilizan una resolución espacial de 12 km/píxel (Lorenzo *et al.* 2021, Lorenzo *et al.* 2022).

Las investigaciones realizadas para el área de Barcelona relacionadas con la identificación de la *isla de calor urbana (UHI)* han permitido bajar de escala el análisis de la distribución espacial de las temperaturas (Martín-Vide *et al.*, 2015; Martín-Vide & Moreno-García, 2020). El conocimiento detallado, a escala urbana, de la UHI (Arellano & Roca, 2019; Arellano & Roca, 2021) se ha limitado, normalmente, a nivel de la *temperatura de superficie (LST)*, gracias a la información suministrada por las bandas térmicas de los sensores satelitales (Landsat 8, por ejemplo). La distribución espacial de la *temperatura de aire (LSAT)*, en cambio, es complejo reducirla de escala, dada la significativa limitación de estaciones meteorológicas oficiales en el área de estudio<sup>1</sup>. El trabajo realizado en nuestro anterior proyecto de investigación<sup>2</sup> permitió reducir la escala de la temperatura de aire, gracias a la información suministrada por MODIS, a 1 km/píxel (Serra *et al.* 2020), mientras que en el que aquí se presenta, X-ClimPlan<sup>3</sup> se ha logrado bajar la resolución a 30 metros / píxel, combinando los sensores satelitales de MODIS y Landsat8 (Arellano *et al.*, 2021).

Las anteriores aportaciones han permitido conocer en detalle la distribución espacial de la LST y la LSAT. Sin embargo, se han limitado a modelar las temperaturas en un periodo determinado<sup>4</sup> y, aunque permiten potencialmente su extrapolación temporal, la falta de información de los sensores satelitales en que se apoyan dificulta enormemente la tarea de determinar las HWs, debido a los requerimientos temporales en que las olas de calor deben ser estimadas.

No existe una definición universal de ola de calor, pero se sabe que tales eventos extremos, asociados con temperaturas sostenidas particularmente altas, producen impactos notables en la mortalidad humana, las economías regionales y los ecosistemas. A pesar de no existir un consenso unánime, las diferentes definiciones suelen considerar que el principal elemento para definir una HW es la presencia de periodos prolongados de calor extremo, en los que no se produce un alivio significativo de las temperaturas máximas, mínimas, o ambas, lo que representa que pueden tener impactos significativos en la salud de las personas. La Figura 4 muestra la ola de calor que asoló a la península ibérica en 2015.

Figura 4. Temperaturas máximas registradas en la ola de calor de 2015



Fuente: AEMET, 2015.

<sup>1</sup> 33 a escala de la Región Metropolitana de Barcelona (RMB), y tan sólo 15 a nivel del Área Metropolitana (AMB). Barcelona ciudad tan sólo dispone de 5 estaciones, aunque dos de ellas (Zona Universitaria y Zoo) no son realmente representativas del clima urbano real de la ciudad.

<sup>2</sup> Urban-CLIMPLAN. La isla de calor urbana: Efectos en el cambio climático y modelado para estrategias de planeamiento territorial y urbano. Aplicación a la región metropolitana de Barcelona. 2016-2019. BIA2015-68623-R.

<sup>3</sup> X-ClimPlan. Herramienta de planificación espacial y urbana extrema para episodios de olas de calor e inundaciones repentinas. Construyendo la resiliencia para ciudades y regiones. 2020-2022. PID2019-105976RB-I00.

<sup>4</sup> Escogiéndose 2015 como año de referencia, debido a sus elevadas temperaturas.

Los umbrales absolutos, a menudo, han sido utilizados para determinar las HWs. Así, por ejemplo, en Singapur una ola de calor ocurre cuando la temperatura máxima diaria, promediada en estaciones designadas con registros de temperatura a largo plazo, es de al menos 35 grados centígrados en tres días consecutivos, con una temperatura media diaria durante todo el período de al menos 29 grados centígrados (Meteorological Service Singapore 2022). Este mismo estándar de 35°Celsius (95°Fahrenheit) es utilizado por Climate Impact Lab a escala de EEUU, para indicar los días de calor extremo. Sin embargo, y como es natural, un único umbral es insatisfactorio cuando se analiza un área relativamente grande. Por ejemplo 35°C puede representar, en Barcelona, un riesgo para la salud mayor que 40°C en Sevilla, dado que los residentes en esta ciudad están más aclimatados a las elevadas temperaturas.

Los efectos de las olas de calor sobre la población han sido descritos por numerosos autores que han establecido relaciones entre las altas temperaturas y la morbilidad y mortalidad, especialmente en enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Royé, 2017). El organismo humano y la atmósfera se encuentran en un equilibrio físico y químico en constante interacción. Todos los humanos se ven obligados a reaccionar a los elementos atmosféricos para garantizar el correcto y óptimo funcionamiento de sus órganos. En este sentido es importante destacar que el ambiente térmico juega un papel importante en lo que respecta a la salud pública (Parsons, 2014). Las características sociodemográficas y del paisaje urbano están asociadas al riesgo de mortalidad durante las olas de calor (Xu *et al.*, 2013). En las zonas urbanas, las olas de calor también tienen efectos negativos sobre la calidad del aire y el número de días con altos niveles de contaminantes, ozono troposférico y partículas en suspensión.

Por otro lado, cabe destacar que las temperaturas diurnas extremas, a menudo utilizadas como el indicador principal de las olas de calor, no tienen una significación tan importante en la salud como las temperaturas nocturnas. Los estudios muestran que la temperatura mínima diaria es más relevante para la salud, existiendo una relación más directa entre la mortalidad y las temperaturas nocturnas elevadas (Habeeb *et al.*, 2015; Sarofim *et al.*, 2016), ya que las estas últimas evitan que el cuerpo pueda refrescarse después de un día caluroso.

En este contexto, *el objetivo del proyecto X-ClimPlan se ha dirigido a estudiar en detalle las olas de calor de Barcelona y su entorno metropolitano*. Una primera aportación es la realizada por Serra *et al.* 2022, en la que se utilizan datos del Observatorio Fabra para definir los umbrales de HWs, así como una metodología de ventanas móviles entre 1914 y 2020 para los meses de junio a setiembre (Perkins *et al.*2012).

En el presente trabajo se plantea una metodología distinta, y se sugiere el carácter microlocal de las HWs. A pesar de que los fenómenos de calor extremo suelen tener un carácter general, afectando áreas o regiones extensas, repercuten de modo diverso a los distintos tejidos y localizaciones urbanas. *El objetivo, por tanto, de la presente aportación consiste en definir las olas de calor, diurnas y, sobre todo nocturnas, del centro urbano de Barcelona.*

## 2. Metodología y bases de datos

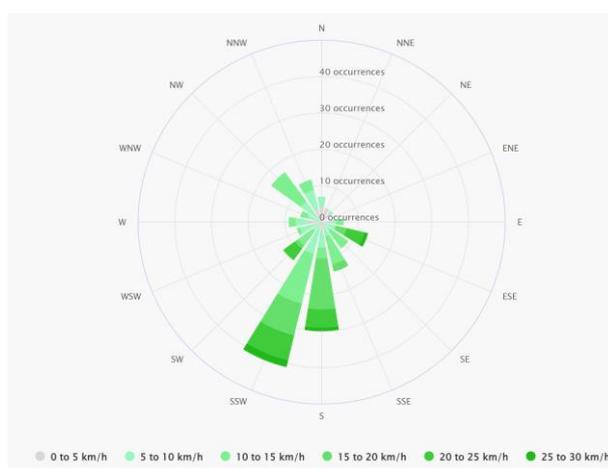
Un primer objetivo del estudio consiste en *conocer el proceso de GW experimentado por la ciudad de Barcelona*, pormenorizando así las estimaciones existentes en relación al área mediterránea (Lange, 2020) así como a España (Lorenzo *et al.* 2022). Las series de temperatura utilizadas para el análisis del proceso de calentamiento en Barcelona han sido las temperaturas máximas (TX) y mínimas (TN) obtenidas del Observatorio Fabra (41.418° N, 2.124° E). Dicho observatorio no es plenamente representativo de la ciudad de Barcelona, al situarse a 6,5 km del mar y a una altitud de 411 metros

sobre el nivel del mar. Su localización en el parque de Collserola, fuera del continuo urbano, no permite identificarla con lo propiamente sucedido en el conjunto de la ciudad. Sin embargo, tiene la ventaja de poseer una larga serie de observaciones meteorológicas (desde 1918), las cuales permiten hacer una estimación precisa del *proceso de GW en el área geográfica de Barcelona*, más allá de la UHI de la ciudad.

A fin de contrastar los resultados del análisis anterior, se compararán con los resultantes de la estación del Aeropuerto (41,293° N, 2,07° E, 4 m de altitud, y situada a 1,8 km del mar), de la que se dispone información desde 1944. Tampoco en este caso la estación del Aeropuerto es plenamente representativa de la ciudad de Barcelona, al situarse no sólo fuera del término municipal (a una distancia de 13,6 km del centro urbano), sino también por ubicarse en un territorio que bien pudiera, en origen, ser considerado rural<sup>5</sup>. La evolución de las temperaturas del Aeropuerto, por tanto, tampoco representan de forma fiel el proceso de GW de la ciudad de Barcelona, utilizándose tan sólo de contrapunto del análisis realizado para el Observatorio Fabra.

La información derivada de las dos anteriores estaciones meteorológicas permite estimar con rigor las HWs, dada su larga trayectoria temporal. *En este trabajo se diferencian las olas de calor diurnas (DHW) de las nocturnas (NHW)*. La cercanía al mar de la ciudad de Barcelona implica que las temperaturas máximas, correspondientes a las horas de mayor insolación, se ven relativamente suavizadas por las brisas marinas. La Figura 5 presenta la rosa de vientos de la ciudad condal. Como se puede observar la configuración principal es SSW, correspondiente a la “marinada”. En cambio, el “terral”, brisa nocturna de la tierra al mar es de muy baja intensidad, lo que se traduce en un muy reducido alivio de las temperaturas nocturnas de la ciudad.

Figura 5. Rosa de vientos de Barcelona



Fuente: Meteoblue.

Un factor adicional, pero no menos significativo, para diferenciar las olas de calor durante el día y la noche, se deriva del ya referido mayor impacto de estas últimas en la salud, y muy especialmente en la mortalidad (Royé, 2017; Arellano *et al.*, 2021).

La metodología empleada para la estimación de las HWs es, en este trabajo, se basa en la sugerida por la AEMET, 2021: “Se considera ‘Ola de calor’ un episodio de al menos tres días consecutivos, en

<sup>5</sup> Los trabajos realizados para METROBS (Martín-Vide *et al.*, 2015), del Área Metropolitana de Barcelona, consideraron la estación ubicada en el Aeropuerto como una estación rural, a fin de calcular la UHI de Barcelona. Dicha estación, sin embargo, en 2015 no podía ser considerada rural. Formaba parte, sin duda, del espacio urbanizado del continuo urbano de Barcelona. No obstante, en 1944, bien podía considerarse rural.

que como mínimo el 10 % de las estaciones consideradas registran máximas por encima del percentil del 95 % de su serie de temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto del periodo 1971-2000". Se adopta, por tanto, un periodo de referencia prolongado, de 30 años, entre 1971 y 2000. Asimismo, se adopta que para que pueda hablarse de HW es precisa la concurrencia de un número de días en que las temperaturas se hayan mantenido muy elevadas, por encima del percentil 95% de los meses de julio y agosto. En cambio, se modifica la definición de la AEMET en dos elementos clave:

- Por un lado, la referencia no sólo a las máximas sino también a las mínimas. En este trabajo se identificarán, por tanto, olas de calor de día (DHW) y de noche (NHW) no necesariamente coincidentes.
- Y, por otro, el análisis individualizado para cada estación meteorológica seleccionada, dado que el objetivo final de la investigación es mostrar la gran variabilidad del clima urbano en un área compleja geográficamente como la ciudad de Barcelona.

La Figura 6 y la Tabla 1 presentan la información de las estaciones seleccionadas para el estudio de las olas de calor de Barcelona.

Figura 6. Estaciones meteorológicas analizadas



Fuente: Esri. Elaboración propia.

Tabla 1. Estaciones meteorológicas analizadas

Estación	Longitud	Latitud	Altitud	Distancia Mar	Orientación	Pendiente
Aeropuerto	2,069722	41,292778	4	1.802,41	-1	0
CMT	2,200016	41,390599	6	185,50	225	1,18
Fabra	2,123885	41,418432	411	6.527,97	230,31	50,89
Raval	2,167751	41,383899	33	1.324,86	0	1,67

Fuente: Elaboración propia.

Dado que el objetivo principal de la investigación consiste en el análisis de las olas de calor y de los eventos de calor extremo en el centro de Barcelona, la estación del Raval aparece como la más significativa. No obstante, tiene un problema fundamental para poder determinar los umbrales mínimos de las olas de calor: la información de dicha estación se inicia en 2006, lo que representa realizar un modelo a fin de estimar las temperaturas con anterioridad a dicha fecha, y, particularmente, para el periodo de referencia 1971-2000. Para ello se incorporan las estaciones CMT

(0201D de AEMET), muy cercana a la de Raval (2,8 km), y con una serie más prolongada (iniciándose en 1997), Observatorio Fabra y Aeropuerto<sup>6</sup>.

A fin de poder estimar las temperaturas diarias, máximas y mínimas, de Raval con anterioridad a 2007, se ajustan un conjunto de modelos OLS del modo que sigue:

$$TX = f(TX^{\text{fabra}}, TX^{\text{aeropuerto}}, TX^{\text{CMT}}, \text{year}, \text{month}, \text{cd}^*)$$

$$TN = f(TN^{\text{fabra}}, TN^{\text{aeropuerto}}, TN^{\text{CMT}}, \text{year}, \text{month}, \text{cd}^*)$$

Siendo, a su vez  $TX^{\text{CMT}}$  y  $TN^{\text{CMT}}$  el resultado de un modelo similar en relación al periodo 1971-1997. Y  $cd^*$  el día del calendario, calendar day (en base 1-365/366), modelado mediante (Serra *et al* 2020):

$$cd^* = \cos \frac{2\pi(cd - cd_{\max})}{365}$$

La extensión de las series de temperaturas máxima y mínima de las estaciones CMY y Raval, permitirá abordar el análisis del calentamiento experimentado por la ciudad de Barcelona en el periodo de estudio: 1971-2020. A tal fin se analizarán los siguientes indicadores:

- *Días de verano*, es decir aquéllos cuya temperatura máxima excede los 25 grados Celsius<sup>7</sup>.
- *Noches tropicales*, es decir aquéllas en que la temperatura mínima excede 20°C<sup>7</sup>.
- *Noches tórridas*, aquéllas cuya temperatura mínima excede los 25°C.
- *Hot days (HD)*, entendiéndose como tales los días con una temperatura superior al percentil 95% de las temperaturas máximas de los meses de julio y agosto del periodo de referencia, 1971-2000.
- *Hot nights (HN)*, entendiéndose como tales las noches con una temperatura superior al percentil 95% de las temperaturas mínimas en el citado periodo.
- *Day Heat Waves (DHW)*, tal como se han definido previamente, es decir aquellos eventos climáticos en los que cómo mínimo se hayan producido 3 días consecutivos con temperatura máxima superior a HD.
- *Night Heat Waves (NHW)*, de forma similar, aquellos eventos extremos con un mínimo de tres noches con temperaturas mínimas superiores a HN.

Finalmente, y por tal de estimar una evolución más robusta de la evolución de las temperaturas de Barcelona, se desarrolla un modelo OLS con las TX y la TN de las cuatro estaciones seleccionadas (Fabra, Aeropuerto, Raval y CMT), y las variables year, month,  $cd^*$ <sup>8</sup>, así como con las variables dummy relativas a cada estación meteorológica. O, de forma alternativa, con la longitud, latitud y altitud de

<sup>6</sup> Se descartan, en cambio, las otras dos estaciones de la red de Meteocat existentes en el término municipal de Barcelona, Zoo y Pistas Universitarias, puesto que su entrada en servicio empezó al unísono con la de Raval, por lo que no aportan información adicional para alimentar el modelo. Además, no son representativas propiamente del clima del centro de Barcelona. Zoo, por estar situada propiamente en una zona verde, exenta de edificación. Y Pistas Universitarias, por encontrarse lejos del centro, en un entorno de débil artificialización.

<sup>7</sup> Tanto los días de verano como las noches tropicales son indicadores climáticos oficiales para Copernicus. Véase <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-extreme-indices-cmip6?tab=overview>.

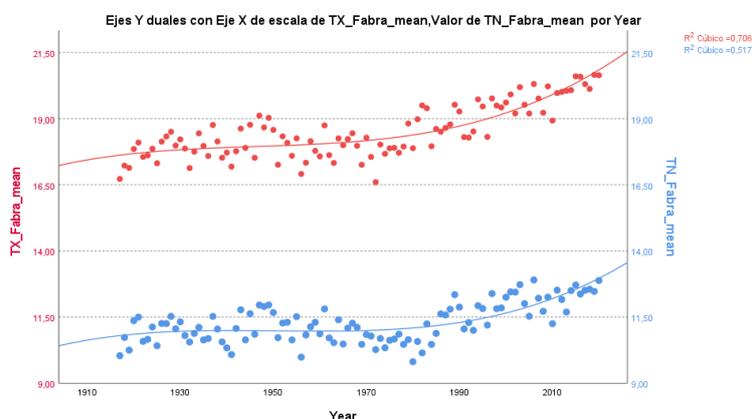
<sup>8</sup> Como la variable  $cd^*$  es propia de cada estación, al ser distinto el día del año en que se producen las temperaturas máximas diurnas y nocturnas, dicha se utiliza en función a la transformación de cada estación.

las referidas estaciones. Modelo conjunto que permite realizar una estimación del calentamiento experimentado por la ciudad de Barcelona, más allá de una localización o estación concreta.

### 3. Resultados

La larga serie de datos del *Observatorio Fabra* permite estimar el proceso de calentamiento experimentado por el *área de Barcelona* entre 1917 y 2020<sup>9</sup> (figura 7). En este sentido las temperaturas máximas habrían aumentado 2,58°C<sup>10</sup> en ese periodo, frente a las mínimas, que se habrían incrementado en 1,50°C<sup>10</sup>. En promedio las temperaturas medias se habrían incrementado en el orden de 2 grados Celsius, más que las medias mundiales (1,31°C para ese mismo periodo)<sup>11</sup>.

Figura 7. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas medias anuales (2017-2020)



Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya. Elaboración propia.

El ajuste de una regresión spline, permite detectar los cambios experimentados en el periodo 1917-2020:

- Lejos de experimentar una evolución positiva constante, se advierte, primero, un leve aumento de las temperaturas máximas (TX) entre 1917 hasta 1939 (de 17,34°C a 18,02°C), que se reduce ligeramente desde esa fecha hasta 1958 (de 18,02°C a 17,95°C), para subir a continuación hasta los 20,5°C de 2020.
- En lo que respecta a las temperaturas mínimas (TN), la evolución es algo diferente, puesto que crecen desde 1917 hasta 1936 (de 10,41°C a 11,17°C), para decrecer desde esta fecha hasta 1964 (11,17°C → 10,82°C) y subir desde entonces hasta 12,55°C (2020).

Las temperaturas del Fabra observan una evolución no muy diferente respecto las temperaturas mundiales, especialmente en lo que respecta a las máximas. La correlación de Pearson es entre las temperaturas máximas del Observatorio Fabra y las anomalías (suavizadas) experimentadas por las temperaturas medias mundiales en relación al periodo de referencia 1951-1980, es  $R = 0,980$ .

<sup>9</sup> Distinguimos, en este trabajo, el *área Barcelona*, de la *ciudad de Barcelona*. El ámbito geográfico e histórico de Barcelona, el territorio del Consell de Cent, abarca el conjunto del llamado Pla de Barcelona, es decir el territorio situado entre los deltas de los ríos Llobregat y Besòs, y flaqueado por la Sierra de Collserola. El tejido urbanizado de la ciudad de Barcelona, en cambio, se extiende tan sólo sobre unos 70 km<sup>2</sup> de este territorio, que en su conjunto alcanza unos 345,6 km<sup>2</sup>, y que se reparte en 20 municipios.

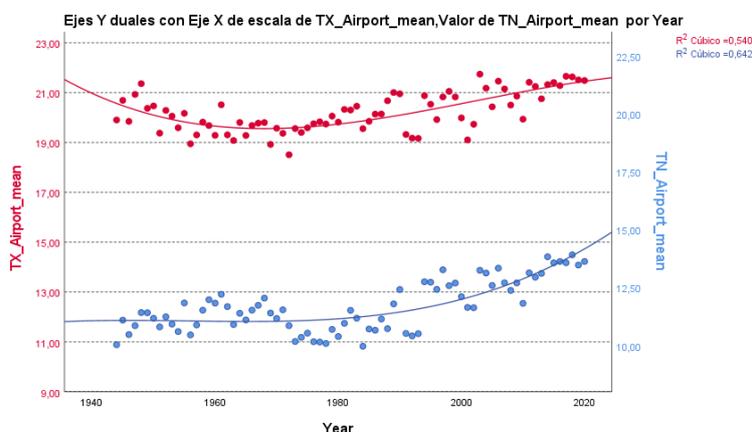
<sup>10</sup> Calculada a partir de un modelo cúbico.

<sup>11</sup> <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>. Consultado el 1/08/2022.

Correlación prácticamente similar ( $R = 0,978$ ) si se consideran las concentraciones en la atmósfera de  $\text{CO}_2$ . Correlaciones que descienden ligeramente si se consideran las temperaturas mínimas (0,935 y 0,892, respectivamente). Parece evidente, por tanto, que el Observatorio Fabra sigue una tendencia muy similar (aun cuando los incrementos sean superiores) a la evolución de las temperaturas mundiales si se consideran las temperaturas máximas. Lo que no sucede con la misma claridad, cuando se consideran las mínimas<sup>12</sup>.

Confirmando la hipótesis central de este trabajo, acerca de las diferencias acusadas de comportamiento de las diferentes ubicaciones del área de Barcelona, la evolución de las temperaturas de la estación meteorológica del Aeropuerto (Figura 8) muestra un claro mayor incremento de las mínimas que de las máximas. Si se toma como referencia el periodo 1950-2020, las máximas habrían aumentado tan sólo 1,89°C (por 2,96°C el Fabra en idéntico periodo), frente a 2,58°C las mínimas (por 1,89°C el Observatorio Fabra)<sup>13</sup>.

Figura 8. Evolución de las temperaturas máximas y mínimas en el Aeropuerto



Fuente: Servei Meteorològic de Catalunya. Elaboración propia.

La cercanía al mar suaviza la evolución de las temperaturas diurnas en el Aeropuerto, en cambio el efecto ya indicado de la mayor inercia térmica del agua, impide el refrescamiento nocturno, lo que determina un acusado calentamiento nocturno a lo largo del periodo 1950-2020. La mayor lejanía al mar del Observatorio Fabra determina muy probablemente su mayor proceso de calentamiento diurno<sup>14</sup> (no atemperado en exceso por la abundancia de verde ni por la mayor altitud), respecto al nocturno, dado que el efecto marítimo es menos intenso<sup>15</sup>.

<sup>12</sup> La menor  $R^2$  del modelo entre las temperaturas mínimas y el paso del tiempo (0,517), mostrado en la figura 7, que la existente en el modelo de las máximas (0,706), sugiere un comportamiento de aquéllas más alejada del proceso de calentamiento global.

<sup>13</sup> Asimismo, la  $R^2$  entre la evolución de las temperaturas mínimas es superior (0,642) que la de las máximas (0,540), ratificando que el proceso de calentamiento en el Aeropuerto se produce, principalmente, en temperaturas nocturnas.

<sup>14</sup> Fenómeno observado con mayor claridad en la depresión pre-litoral del territorio metropolitano de Barcelona. Los municipios situados en la citada depresión litoral tienen una mayor oscilación térmica, con máximas más elevadas que Barcelona, y mínimas más bajas, resultado de la influencia "continental" de su clima, en relación al "marítimo" de la ciudad condal.

<sup>15</sup> Para completar este estudio sobre la evolución del clima de Barcelona, se han analizado también las tendencias observadas en las estaciones meteorológicas CMT (1995/2020) y Raval (2007-2020). En ambas se manifiesta un claro proceso de calentamiento que se puede sintetizar del modo que sigue: a) CMT ha experimentado un incremento de las temperaturas máximas de 1,80 grados Celsius en los 26 años de funcionamiento de la estación, lo que representa un incremento anual de 0,072°C/año. Para las mínimas, el incremento ha sido acusadamente menor, de 0,77°C en los últimos 26 años, lo que representa un incremento anual de 0,031°C/año. b) La estación del Raval ha experimentado, en el periodo de 14 años transcurrido entre 2007 y 2020, un incremento de 0,26634 grados Celsius las máximas (0,019°C anuales), así como de un total de 0,81 grados las mínimas (lo que representa un incremento anual de 0,062 °C/año, tres veces más que las máximas). Estas estimaciones de variación de las temperaturas se han realizado mediante un modelo OLS de las

La diferencia observada en el clima de las citadas estaciones determina, asimismo, unos distintos umbrales para definir las olas de calor diurnas y nocturnas. El percentil 95% de los meses de julio y agosto entre 1971 y 2000 del Observatorio Fabra se alcanza con temperaturas máximas superiores a 32,4°C, límite para definir las DHW, y mínimas superiores a 22,5°C, umbral a partir del cual identificar la NHW. Para el caso del Aeropuerto, esos umbrales son, respectivamente, 30,6°C y 22,5°C. 1,8°C mayor el Fabra en las máximas, y similitud completa en las mínimas. La cercanía al mar del Aeropuerto se manifiesta, por tanto, en la mayor suavidad de las máximas, y la menor capacidad de enfriamiento de las mínimas, respecto al Fabra.

Mayor dificultad representa estimar los umbrales de ola de calor para CMT y, sobre todo, Raval, al disponer tan sólo de series temporales de información que no alcanzan el periodo de referencia 51-00. Para *estimar las temperaturas diarias* de ambas estaciones en los periodos de los que no se disponen datos (1951-1995, para el caso de CMT, y 1951-2007 para el de Raval) se elaboran modelos OLS con las temperaturas máxima (TX) y mínima (TN) de ambas estaciones como variables dependientes, el año, mes, cd\* y las temperaturas máximas y mínimas de Fabra y Aeropuerto como independientes. Los modelos desarrollados permiten, primero, extender la serie de CMT, y luego, con el concurso adicional de esta última, hacer lo propio con la serie de Raval, hasta el inicio del periodo de referencia, 1 de enero de 1951. En la Tabla 2 se presentan los resultados, siendo los rasgos más significativos los que se exponen a continuación:

- El modelo de temperaturas máximas (figura 9) de la estación CMT<sup>16</sup> alcanza una  $R^2 = 0,963$ , con todas las variables significativas. La variable más significativa es la TX del Aeropuerto<sup>17</sup>, lo que sugiere un régimen climático similar en el comportamiento de las TX de ambas estaciones.
- El modelo de temperaturas mínimas de CMT la  $R^2$  alcanza 0,975, también con todas las variables significativas, pero con el año con el signo cambiado, resultado de su colinealidad con las temperaturas de Fabra y Aeropuerto. Es este caso, la temperatura mínima del Aeropuerto es la variable más significativa, confirmando la mayor similitud de CMT con dicha estación meteorológica.
- El modelo de temperaturas máximas (figura 10) de Raval alcanza una  $R^2 = 0,978$ , teniendo la TX de Fabra y CMT una influencia algo superior a la del Aeropuerto<sup>18</sup>.
- Por su parte, la  $R^2$  del modelo de las mínimas es de 0,992, con todas las variables significativas (excepto el mes), y manifestando también una mayor incidencia de la TN de CMT y Fabra respecto a Aeropuerto.

---

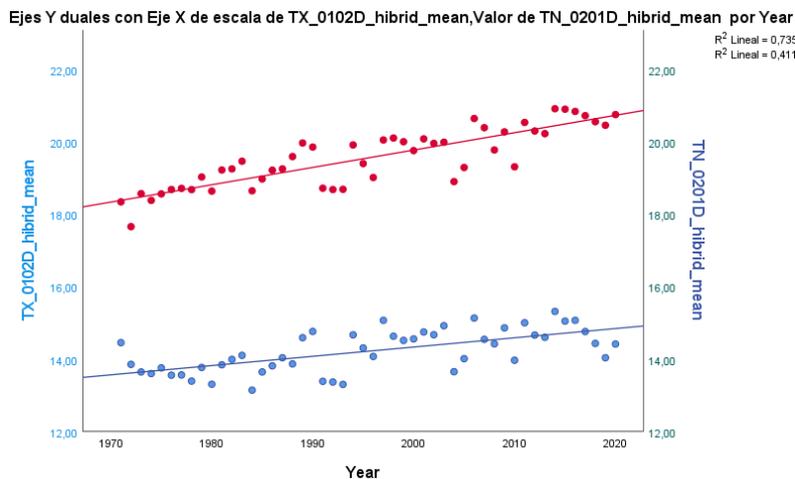
temperaturas medias máximas y mínimas. Su fiabilidad estadística, por tanto, es limitada, dada la escasa cantidad de casos observados (26 en el caso de CMT y 14 en el Raval). Aún con estas reservas, parecen observarse tendencias claramente diferenciadas, a pesar de encontrarse ambas estaciones a tan sólo 2,8 km de distancia.

<sup>16</sup> El calendar day de la temperatura máxima de esta estación ha correspondido al día 215 del año, correspondiente al 3 de agosto, siendo los días 216 y 217 los siguientes más cálidos. Sin embargo, se utiliza el 17 de agosto, que corresponde al día de calendario con mayor temperatura mínima (seguido de 218 y 207).

<sup>17</sup> Que alcanza, también, la correlación simple, de Pearson, más elevada, si exceptuamos la existente entre CMT y Raval.

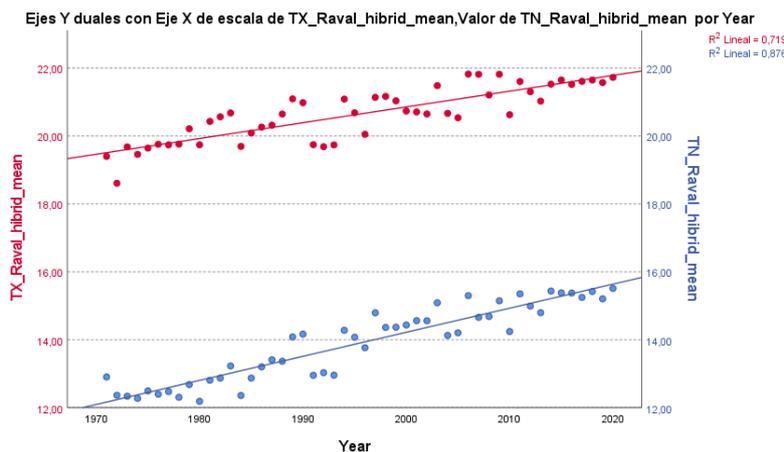
<sup>18</sup> El modelo finalmente se construye tan sólo con las TX de Fabra, Aeropuerto y CMT, debido al carácter inestable del obtenido con el resto de variables. El signo equivocado del año, así como de cd\*, no permiten dar una credibilidad plena al modelo obtenido, a pesar de su elevada  $R^2$  (0,980). A su vez la no significación estadística de las temperaturas mínimas ha llevado, asimismo, a excluirlas del modelo. Estos problemas no se producen en el modelo de las temperaturas mínimas, razón por la cual se ha optado por mantener el inicialmente obtenido, con el conjunto de variables. Ver Tabla 2.

Figura 9. Evolución de las TX y TN en la estación CMT



Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Evolución de las TX y TN en la estación meteorológica del Raval



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Modelos OLS de las estaciones de CMT y Raval

Modelo	TX CMT		TN CMT		TX Raval		TN Raval	
	coef.	t-student	coef.	t-student	coef.	t-student	coef.	t-student
Year	0,011	7,178	-0,030	-22,902	-	-	0,037	18,840
Month	0,066	16,512	-0,008	-2,360	-	-	-0,002	-0,844
cd*	0,147	3,248	0,625	15,382	-	-	0,289	9,546
TX Fabra	0,190	26,038	0,013	2,048	0,249	32,805	0,011	2,261
TN Fabra	0,120	15,202	0,286	40,320	-	-	0,253	45,278
TX Aeropuerto	0,541	61,606	0,045	5,725	0,285	22,039	0,045	5,473
TN Aeropuerto	-0,019	-2,636	0,536	84,229	-	-	0,075	9,829
TX CMT	-	-	-	-	0,453	32,422	-0,054	-6,181
TN CMT	-	-	-	-	-	-	0,630	64,287
constant	-17,808	-6,055	63,913	24,178	1,180	19,035	-73,305	-18,410
R <sup>2</sup>	0,963		0,975		0,978		0,992	

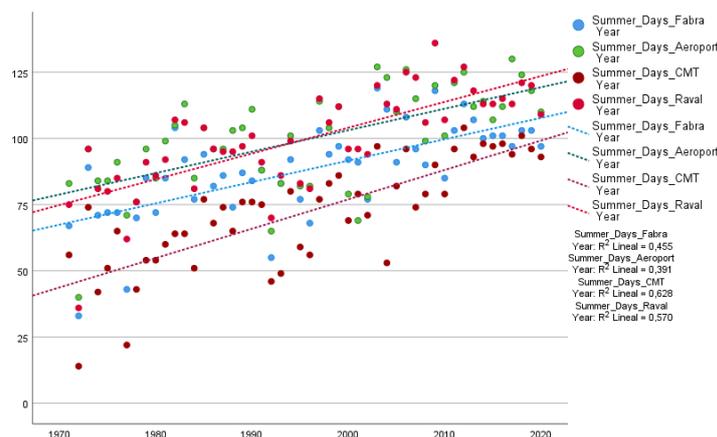
Fuente: Elaboración propia.

Los modelos anteriores permiten extender al periodo 1971/2000 las temperaturas máximas y mínimas de las estaciones CMT y Raval. Lo anterior posibilita, asimismo, estimar los umbrales para establecer las HWs de día y noche de ambas estaciones, los cuales quedan determinados en  $> 28,8^{\circ}\text{C}$ , las TX, y  $>24,2^{\circ}\text{C}$  las TN en el caso de CMT, y  $>30,8^{\circ}\text{C}$  las TX y  $>23,7^{\circ}\text{C}$  las TN, en el caso del Raval.

A fin de caracterizar el proceso de calentamiento experimentado en Barcelona, así como ratificar la hipótesis del muy diferente comportamiento climático de las distintas ubicaciones urbanas, se analizarán, a continuación, los distintos indicadores presentados en el epígrafe de metodología. Los principales resultados pueden ser resumidos del modo que sigue:

- En lo que respecta a los *días de verano* (TX  $> 25^{\circ}\text{C}$ ), los veranos se han incrementado entre 40 y 54 días a lo largo de los últimos 50 años<sup>19</sup>, variando ese incremento en función de la estación meteorológica considerada: menor en el Observatorio Fabra y en el Aeropuerto (40 días) y mayor en Raval (48 días) y CMT (54 días). La Figura 11 muestra la evolución de los días de verano. CMT, que por su cercanía al mar experimenta menores calores veraniegos, es, no obstante, la que mayores incrementos observa. También de destacar que el centro de la ciudad (Raval) ha pasado a ser el espacio urbano con un mayor número de días cálidos, superando a la zona del Aeropuerto.

Figura 11. Evolución del número de días de verano (1971-2020)

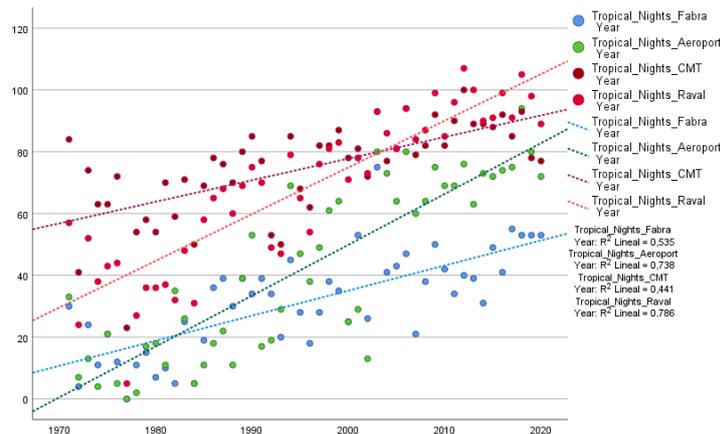


Fuente: Elaboración propia.

- Por lo que respecta a las *noches tropicales* (TN  $> 20^{\circ}\text{C}$ ), destaca, igualmente, Raval que con 105 noches cálidas ha sobrepasado a la anteriormente estación nocturna más caliente, CMT (92 noches). El centro de la ciudad, por tanto, experimenta 3 meses y medio de noches cálidas; mucho más que la zona forestal de la sierra de Collserola (Fabra), que tiene noches mucho más suaves (51, al final del periodo de 50 años). A destacar, también, el aumento espectacular de noches tropicales de la estación del Aeropuerto, cuando al principio del periodo 1971/2020 era la que experimentaba un mayor enfriamiento veraniego nocturno. Las noches tropicales, en suma, han aumentado entre un máximo de 80 en Aeropuerto (74 en Raval) y un mínimo de 34 en CMT.

Figura 12. Evolución del número de noches tropicales (1971-2020)

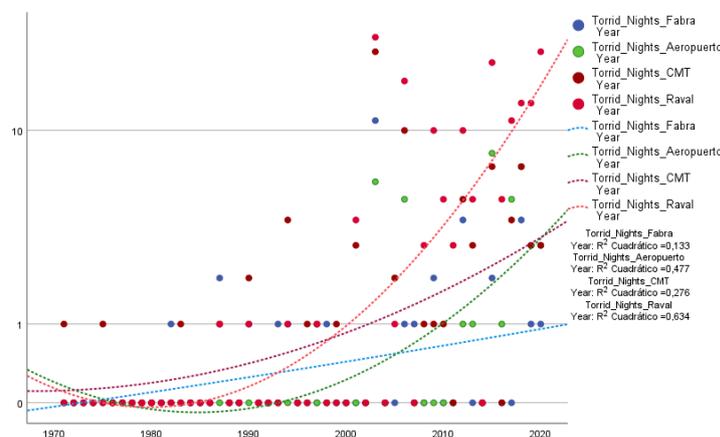
<sup>19</sup> Los valores iniciales y finales relativos a los días de verano y las noches tropicales, a fin de determinar la variación experimentada entre 1971 y 2020, son los estimados mediante modelos OLS.



Fuente: Elaboración propia.

- En relación a las *noches tórridas* (TN > 25°C) el incremento ha sido espectacular, pasando de 2 entre 1971 y 1980, a 10 entre 1981 y 1990, 12 en el periodo 1991-2000, 130 entre 2001 y 2010, y 173 entre 2011 y 2020. Destaca por encima de todos los años, el extraordinario año cálido de 2003, con 15,5 noches por estación, con Raval destacando por encima de las demás, con 24 noches tórridas ese año. En el centro de Barcelona (Raval) la progresión ha sido más que exponencial, pasando de 0 noches tórridas el primer decenio, a 2 el segundo y tercer decenio, 63 el cuarto decenio y ¡100! el quinto y último decenio estudiado. De hecho 7 de los 10 años con más noches tórridas se han producido en el periodo que va de 2011 a 2020. La Figura 13 presenta la evolución de las noches tórridas.

Figura 13. Evolución del número de noches tórridas (1971-2020)



Fuente: Elaboración propia.

- Los *días de calor extremo* (HD, con una TX para cada estación superior al percentil 95% del periodo 1971-2000). En este caso se han ido incrementado de forma no lineal, tal como se desprende de la Figura 14, pasando de 58, entre 1971-1980, a 182 (1981-1990), 150 (1991-2000), y dispararse hasta 507 entre 2001 y 2020, y 489 en la década 2011-2020. La década 2001-2010, por tanto, es la que mayor número de eventos de calor diurno extremo ha tenido, en buena medida gracias a la excepcionalidad de 2003, que destaca con 171 días de calor extremo, más del doble que el año que le sigue, 2006, con 83 HD. La singularidad de esos años, sin embargo, esconde la proliferación progresiva de calor diurno por encima del percentil 95% de los meses de julio y agosto de la última década: de los 10 años con mayor número de eventos de calor (diurno) extremo, 6 se han

producido en la última década. Entre las estaciones, Raval y CMT, con 389 y 381 HD en 50 años, destacan por su progresivo calentamiento diario.

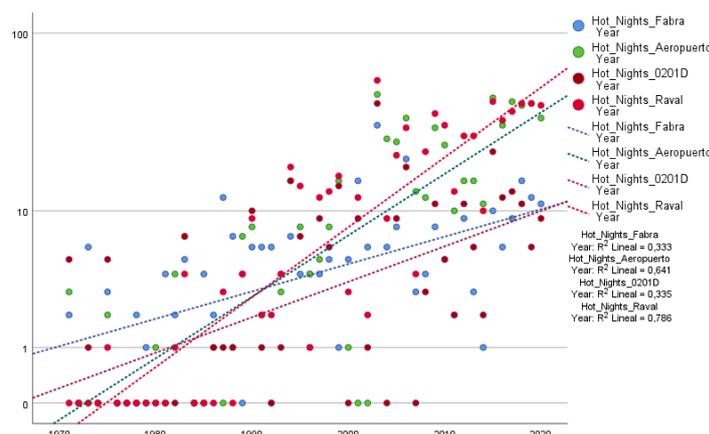
Figura 14. Evolución del número de extreme heat days (1971-2020)



Fuente: Elaboración propia.

- Las *noches de calor extremo* (HN, con una TN para cada estación superior al percentil 95% del periodo 1971-2000), muestran una evolución claramente exponencial, pasando en el conjunto de las cuatro estaciones de 32 noches de calor extremo en la década 1971-1980, a 115 en la de 1981-1990, 246 en 1991-2000, 635 en 2001-2010 y 766 en el último decenio analizado. A pesar de 2003 sigue mostrando un comportamiento completamente atípico, con un promedio de 44 HN en las cuatro estaciones meteorológicas estudiadas (que llegó al extremo de 55 noches en Raval), 17 años, todos ellos posteriores a 2001 con la sola excepción de 1994, superaron las 10 noches de calor nocturno extremo. Destacando Raval de forma excepcional puesto que pasó de 1 HN en la década 1971-1980 a 311 HN en la década 2011-2020. *El calor nocturno extremo es la norma, que no la excepción, en el centro de la ciudad, alcanzando ya la cifra de 1 mes al año.* Junto a Raval, destaca Aeropuerto, con 283 HN en la última década, muy por encima de 94 de CMT y las 78 del Observatorio Fabra.

Figura 15. Evolución del número de extreme heat nights (1971-2020)



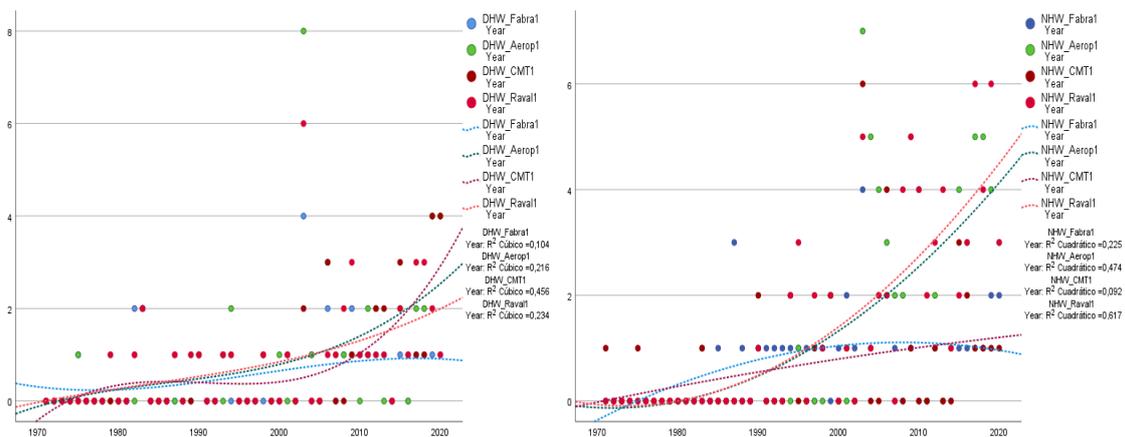
Fuente: Elaboración propia.

- Las *olas de calor diurnas* (DHW) se han incrementado de forma significativa a lo largo de los últimos 50 años. La figura 14 y la Tabla 3, presentan los resultados por años y por decenios.

Considerando el promedio de las 4 estaciones analizadas, se han multiplicado por 15, pasando de 1 DHW en la década 1971-1980, a 15 en la década 2011-2020. El crecimiento es continuado, decayendo tan sólo en el decenio 1991-2000. Respecto a las estaciones, destacan, para el conjunto del periodo analizado (1971-2020), Aeropuerto, con 42 DHW, Raval con 40 y CMT, con 35. En cambio, el Observatorio Fabra, con sólo 28 olas de calor diurno en 50 años, es la que menos eventos extremos ha experimentado. 2003, con un promedio de 5 olas de calor, destaca de nuevo, seguido de 2019 (2,75 DHW), 2020 (2,5), 2006 (2,25), 2015 (2) y 1983 (2).

- Si el incremento de las olas de calor diurnas ha sido importante a lo largo de los últimos 50 años, mucho más significativo ha sido el aumento de las *olas de calor nocturnas* (NHW), que se han multiplicado por 40 entre los decenios 1971-1980 y 2011-2020 (figura 15, tabla 3). Si en la primera década del periodo de estudio, tan sólo se experimentaron 2 olas de calor nocturno (las 2 en CMT, ninguna en las demás estaciones), en la segunda se elevaron a 12 (destacando Fabra con 6), en la tercera 27 (destacando Raval con 10), en la cuarta 82 (con todas las estaciones con más de 10 NHW), y en la quinta, 80 (destacando, especialmente, Raval). Por estaciones, *Raval*, y *por tanto el centro de la ciudad*, es la que ha experimentado más olas de calor nocturno, con 69, seguida por Aeropuerto (64), Fabra (37) y CMT (34). Por su parte el análisis por anualidades vuelve a manifestar la singularidad de 2003<sup>20</sup>, con 22 NHW, seguida de 2019 y 2017 (con 13 NHW), 2009 (12), 2006 y 2018 (11), y 2015 (10).

Figuras 16 y 17. Evolución del número de olas de calor de día (DHW) y de noche (NHW) (1971-2020)



Fuente: Elaboración propia.

<sup>20</sup> A destacar que en Raval el número de NHW experimentadas en 2017 y 2019 superan las de 2003. Lo que no sucede en el resto de estaciones meteorológicas estudiadas. El calor nocturno extremo de 2003, por tanto, es normal ya el centro de ciudad. La singularidad se ha convertido en costumbre.

Tabla 3. Evolución de las olas de calor de día (DHW) y de noche (NHW) por decenios (1971-2020)

Decada		Suma	Decada		Suma
1971-1980	DHW_Fabra	2	1971-1980	NHW_Fabra	0
	DHW_Aerop	1		NHW_Aerop	0
	DHW_CMT	0		NHW_CMT	2
	DHW_Raval	1		NHW_Raval	0
	Total_DHW	4		Total_NHW	2
1981-1990	DHW_Fabra	5	1981-1990	NHW_Fabra	6
	DHW_Aerop	4		NHW_Aerop	2
	DHW_CMT	5		NHW_CMT	3
	DHW_Raval	6		NHW_Raval	1
	Total_DHW	20		Total_NHW	12
1991-2000	DHW_Fabra	1	1991-2000	NHW_Fabra	8
	DHW_Aerop	4		NHW_Aerop	3
	DHW_CMT	3		NHW_CMT	6
	DHW_Raval	3		NHW_Raval	10
	Total_DHW	11		Total_NHW	27
2001-2010	DHW_Fabra	12	2001-2010	NHW_Fabra	14
	DHW_Aerop	15		NHW_Aerop	32
	DHW_CMT	8		NHW_CMT	12
	DHW_Raval	15		NHW_Raval	24
	Total_DHW	50		Total_NHW	82
2011-2020	DHW_Fabra	8	2011-2020	NHW_Fabra	9
	DHW_Aerop	18		NHW_Aerop	27
	DHW_CMT	19		NHW_CMT	10
	DHW_Raval	15		NHW_Raval	34
	Total_DHW	60		Total_NHW	80

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se ensaya un modelo conjunto de las cuatro estaciones seleccionadas a fin de determinar el *proceso de calentamiento experimentado por el conjunto de la ciudad*, más allá del producido en cada estación.

Los modelos ensayados evalúan en calentamiento diurno conjunto de la ciudad de Barcelona en  $0,048197^{\circ}\text{C}/\text{año}$ , lo que representaría un incremento de 2,41 grados Celsius en los 50 años transcurridos entre 1971 y 2020. La  $R^2$  de dichos modelos alcanza 0,798, apareciendo todas las variables temporales con el signo correcto y significativas estadísticamente y destacando entre ellas  $cd216$ , es decir el *calendar day* ajustado al día 216 del año ( $t$ -student = 503,831). Respecto a los coeficientes de regresión de las variables dummy de las estaciones, destacan la mayor temperatura de Raval, con  $1,496^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura de referencia del Observatorio Fabra. Situándose a continuación el Aeropuerto ( $1,261^{\circ}\text{C}$ ) y CMT ( $0,418^{\circ}\text{C}$ ). La Tabla 4 resume el modelo.

Por su parte los modelos de las temperaturas mínimas muestran un calentamiento anual de  $0,054483^{\circ}\text{C}$ , lo que representa 2,724 grados en el periodo 1971-2020. Mayor calentamiento que el experimentado por las temperaturas máximas, en congruencia con el efecto marítimo previsto. La tabla 5 muestra como la  $R^2$  es también más elevada en el caso de las temperaturas nocturnas, alcanzando 0,824, con todas las variables significativas al 99% de confianza, y con el signo correcto. De nuevo  $cd216$  es el que presenta una mayor significación ( $t$  de Student = 533,108). Respecto a los coeficientes de regresión de las variables dummy de las estaciones, destaca, en este caso, CMT (la estación situada más cerca del mar), con  $2,618^{\circ}\text{C}$ , y Raval,  $2,302^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura de referencia del Observatorio Fabra. Situándose a continuación el Aeropuerto ( $0,318^{\circ}\text{C}$ ). La Tabla 5 resume el modelo alcanzado.

Tabla 4. Modelo conjunto temperaturas máximas (1971-2020)

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,893 <sup>a</sup>	,798	,798	2,6666

a. Predictores: (Constante), cd\_216, Aeropuerto, Year, CMT, Month, Raval

b. Variable dependiente: TX

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error			
1	(Constante)	-75,64730	1,365		-55,413	,000
	Year	,04820	,001	,117	70,467	,000
	Month	-,21052	,003	-,122	-66,728	,000
	cd_216	7,75004	,015	,924	503,831	,000
	Aeropuerto	1,26064	,028	,092	45,155	,000
	CMT	,41812	,028	,031	14,981	<,001
	Raval	1,49589	,028	,109	53,599	,000

a. Variable dependiente: TX

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4. Modelo conjunto temperaturas mínimas (1971-2020)

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación
1	,908 <sup>a</sup>	,824	,824	2,4733

a. Predictores: (Constante), cd\_216, Raval, Year, Aeropuerto, Month, CMT

b. Variable dependiente: TN

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients no estandarizados		Coefficients estandarizados	t	Sig.
		B	Desv. Error			
1	(Constante)	-96,034464	1,266		-75,843	,000
	Year	,054483	,001	,133	85,881	,000
	Month	-,166218	,003	-,097	-56,793	,000
	Aeropuerto	,318439	,026	,023	12,296	<,001
	CMT	2,618481	,026	,192	101,149	,000
	Raval	2,302357	,026	,169	88,937	,000
	cd_216	7,606804	,014	,912	533,108	,000

a. Variable dependiente: TN

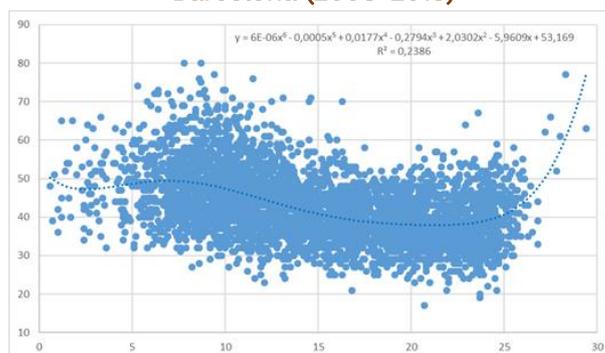
Fuente: Elaboración propia.

## 4. Conclusión

Este artículo se ha centrado en el análisis de los eventos climáticos extremos en la ciudad de Barcelona. Concretamente en las olas de calor experimentadas en el curso de los últimos 50 años (1971-2020). A dichos efectos se ha sostenido una noción de *ola de calor de carácter micro-local*. La hipótesis de investigación se ha basado que en un territorio complejo desde el punto de vista geográfico (y, también, de su grado de antropización) como es del Pla de Barcelona, la depresión litoral limitada por la sierra de Collserola y el mar Mediterráneo, se producen diferencias significativas de comportamiento climático, que no pueden ser simplificadas con el estudio de una sola estación, el Observatorio Fabra, situada en plena zona boscosa y a una altura significativa sobre el nivel del mar (411 metros).

A su vez se ha sostenido la hipótesis del muy diferenciado comportamiento térmico diurno y nocturno, desarrollando el concepto de ola de calor de día (DHW) y de noche (NHW). Los efectos sobre la salud son más acusados en el caso del calor nocturno, donde la imposibilidad de descansar puede provocar un importante empeoramiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares que producen una alta proporción de muertes prematuras. Por ello, en este estudio hemos diferenciado entre olas de calor diurnas y nocturnas, prestando especial atención a estas últimas. La Figura 18 muestra la relación existente entre las temperaturas nocturnas y la mortalidad en la ciudad de Barcelona.

Figura 18. Mortalidad y temperaturas mínimas en la ciudad de Barcelona (2008-2018)



Fuente: Agència de Salut Pública de Barcelona. Elaboración propia.

Sin embargo, no es sencillo demostrar la existencia de ese diferente comportamiento climático en un territorio tan reducido como es el municipio de Barcelona (100 km<sup>2</sup>). La mayor parte de las estaciones meteorológicas oficiales tienen poco más de 15 años funcionamiento, espacio temporal insuficiente para realizar un estudio robusto de las HW. Sólo dos de estas estaciones tienen una trayectoria temporal suficiente: el Observatorio Fabra y el Aeropuerto de Barcelona/el Prat de Llobregat. Y las dos no son plenamente representativas del clima del clima de la ciudad de Barcelona: la primera por encontrarse fuera del entorno urbanizado, así como a una altitud considerable sobre el nivel del mar, y la segunda por situarse fuera del municipio de Barcelona, a 13,6 km del centro de la ciudad. Del resto de estaciones meteorológicas se han seleccionado para este estudio dos de ellas. Raval, que se considera la estación más representativa del clima del centro de Barcelona, y CMT, con mayor trayectoria temporal, situada muy cerca del mar.

Dado que los modelos climáticos más pormenorizados no tienen una resolución espacial suficiente, y nos son realmente fiables para describir de forma pormenorizada el clima de Barcelona, la metodología utilizada en esta investigación ha consistido en extender la serie de las estaciones Raval y CMT al conjunto del periodo de análisis (1971-2020), y, a tal fin se han desarrollado para ambas estaciones modelos diarios de las temperaturas máximas y mínimas, mediante el soporte de la información proveniente de Fabra y Aeropuerto. Dichos modelos OLS, ajustados para los periodos en los que se dispone de información climática de las citadas estaciones y extrapolados hasta 1 de enero de 1971, han permitido, prima facie, establecer los parámetros necesarios para identificar las olas de calor. El relativo buen desempeño de dichos modelos ( $R^2$  y significación estadística elevada de las variables independientes) permiten ser optimistas respecto a los resultados obtenidos. Ello no obstante se debe desarrollar ulterior investigación a fin de ratificar finalmente dichos resultados. Especialmente sería conveniente contrastar las TX y TN obtenidas, con la resultante de los modelos sinópticos disponibles del área de Barcelona, así como de la base de datos de ERA5, de la Unión Europea.

Cuestión aparte ha consistido en la estimación del proceso de calentamiento experimentado por Barcelona. En relación con la cuantificación del calentamiento global en el área de Barcelona, hay que recordar que en el área mediterránea ya se ha superado con creces el límite de 1,5 grados establecido en el Protocolo de París como máximo de calentamiento deseable a finales del siglo. El área de Barcelona probablemente ha experimentado incrementos superiores a la media mediterránea. Así, por ejemplo, las temperaturas medias máximas en el Observatorio Fabra han aumentado 2,88 grados en los últimos 50 años, lo que supone un incremento anual de 0,058 grados/año. Por su parte, la temperatura media mínima del Fabra ha aumentado 2,38 grados, 0,048 grados/año.

Sin embargo, los incrementos difieren muy significativamente dependiendo de la ubicación espacial de la estación meteorológica. Los resultados son bastante diferentes para otros observatorios, como el del Aeropuerto de Barcelona-el Prat de Llobregat. En el Aeropuerto, el aumento de la temperatura máxima ha sido menos acusado que en el Observatorio Fabra, 2°C en los últimos 50 años. Sin embargo, las temperaturas mínimas aumentaron 3,62°C entre 1971 y 2020, más que en el Observatorio Fabra. Por tanto, aunque el calentamiento global es una realidad indiscutible en el área mediterránea, dada la variación observada en la evolución de las temperaturas debido a la diferente ubicación de las distintas estaciones meteorológicas de Barcelona (longitud, latitud, altitud, distancia al mar, etc.), ha sido necesario desarrollar un modelo conjunto para todas ellas. Ese modelo conjunto permite estimar de manera más robusta el proceso de calentamiento experimentado en el área de Barcelona, más allá del experimentado en una concreta estación meteorológica. Los resultados del mismo respaldan el efecto del cambio climático en las temperaturas. Entre 1971 y 2020, las mínimas (TN) habrían aumentado en el conjunto de la ciudad, 2,724°C, más que las máximas (TX), que lo habrían hecho en 2,41°C.

*Tanto los datos realmente observados, como los resultantes de los modelos anteriores sugieren que el calentamiento experimentado en la ciudad de Barcelona supera, de forma acusada, las estimaciones realizadas por el Servei Meteorològic de Catalunya (SMT) (Altava-Ortiz et al, 2016). Dichas estimaciones establecen, para final de siglo, un incremento de 1,1°C en las temperaturas mínimas (en el marco del escenario moderado), así como de 0,9°C en las temperaturas máximas (en el marco del escenario optimista) en relación a la media del periodo de referencia 1971-2000<sup>21</sup>. Estimaciones que ya se habrían superado en 2020, puesto que el incremento real de la TN, en relación a dicho periodo de referencia, ha sido de 1,740°C, y el de las TX, 1,672°C. Y lo mismo puede indicarse respecto a las noches tropicales y tórridas. Las estimaciones a fin de siglo suponen un incremento entre 43 y 73 noches tropicales, cuando en 2020 ya se habría producido un incremento de 39 noches con temperatura mínima superior a 20°C. Es urgente, por tanto, corregir las estimaciones de realizadas para el área de Barcelona (ajustados a 2006), con los datos más recientes provenientes de las estaciones meteorológicas.*

## 5. Discusión

Este artículo ha ido dirigido, principalmente, a *evaluar los eventos climáticos extremos, relativos a las olas de calor, diurnas y nocturnas, del área de Barcelona*. En este sentido, el presente trabajo ha destacado la importancia de *identificar dichos eventos climáticos extremos a escala micro-local*, al partir de la hipótesis de que, en un entorno geográfico complejo, como es el de *Pla de Barcelona*, las olas de calor se manifiestan de forma diferenciada. A veces (como es el caso de la principal estación meteorológica de Barcelona, el Observatorio Fabra), las estaciones de medición no son realmente representativas de los diferentes paisajes urbanizados. El estudio de las diferentes estaciones

<sup>21</sup> Aunque es cierto se mantienen, aún, dentro de los límites del escenario pesimista (¡¡a fin de siglo!!) que se establecen en 2,3°C (TN) y 3,4°C (TX).

meteorológicas oficiales disponibles destaca que, en Barcelona, la estación más representativa del clima urbano del centro urbano es la del Raval, frente al Observatorio Fabra (situada fuera del entorno urbanizado, y a una significativa mayor altitud), Zoo y Zona Universitaria (que se descartan por estar situadas en zonas verdes urbanas, y donde el efecto de isla de frío de los parques podría alterar los resultados de la investigación), CMT (demasiado cercana al mar para ser identificada como representativa del tejido urbano central), o Aeropuerto (situada a una distancia significativa del centro de Barcelona).

La hipótesis del trabajo queda ratificada al estudiar de forma comparada en las distintas estaciones meteorológicas los eventos climáticos extremos ocurridos en la ciudad de Barcelona entre 1971 y 2020. En este sentido, destaca que la estación del Raval es la que observa *las temperaturas más altas tanto durante el día (a pesar de su cercanía al mar) como, sobre todo, durante la noche*. Si nos atenemos a la última década estudiada, 2011-2020, la TX media de la estación de Raval ha sido de 21,52°C, por encima de Aeropuerto (21,37°C), CMT (20,64°C) y Fabra (20,30°C). Respecto a las TN, Raval ha experimentado también unas temperaturas mínimas medias anuales para ese mismo decenio de 15,27°C, más elevadas que CMT (14,74°C), Aeropuerto (13,48°C) y Fabra (12,44°C).

Durante todo ese mismo último decenio, Raval ha sido, junto a Aeropuerto la estación con mayor número de “días de verano” (TX > 25°C) al año: 117, es decir casi cuatro meses/año fueron días de verano en la última década, muy por encima del Observatorio Fabra (102,5 días/año) y, sobre todo CMT (97 días/año), la más fresca de todas las estaciones de medición en época estival debido a su proximidad al mar. Además, Raval alcanzó un total de 96,6 “noches tropicales”, lo que equivale a más de 3 meses al año, por encima de CMT (88,1 NTr/año), Aeropuerto (74,8) y, sobre todo, Fabra (44,8). La suavidad de las noches en esta última estación viene explicada por su mayor altitud y distancia al mar<sup>22</sup>. Por el contrario, la cercanía al mar determina la mayor abundancia de noches cálidas en el continuo urbanizado de Barcelona, muy especialmente en el centro de la ciudad, donde la Isla de Calor Urbana dificulta el enfriamiento nocturno. El efecto combinado de la cercanía al mar y de la UHI acentúan las “noches tórridas” del centro de la ciudad: considerando el último decenio, Raval ha experimentado 10 noches tórridas por año, frente a 3,2 CMT, 2,9 Aeropuerto y, sólo, 1,2 Fabra.

*La diferencia observada en el clima de las citadas estaciones determina, asimismo, unos distintos umbrales para definir las olas de calor diurnas (DHW) y nocturnas (NHW).* El percentil 95% de los meses de julio y agosto entre 1971 y 2000 del Observatorio Fabra se alcanza con temperaturas máximas superiores a 32,4°C, límite para definir las DHW, y mínimas superiores a 22,5°C, umbral a partir del cual identificar la NHW. Para el caso del Aeropuerto, esos umbrales son, respectivamente, 30,6°C y 22,5°C. 1,8°C mayor el Fabra en las máximas, y similitud completa en las mínimas. La cercanía al mar del Aeropuerto se manifiesta, por tanto, en la mayor suavidad de las máximas, y la menor capacidad de enfriamiento de las mínimas, respecto al Fabra. En lo que respecta al resto de estaciones analizadas, los umbrales para establecer las HWs de día y noche quedan determinados en > 28,8°C, las TX, y > 24,2°C las TN en el caso de CMT, y > 30,8°C las TX y > 23,7°C las TN, en el caso de Raval. La mayor cercanía al mar de CMT determina un umbral más suave que Raval, en relación a la estimación de las DHW, así como un umbral más elevado, en lo que corresponde a las NHW.

Si consideramos la totalidad del periodo analizado, 1971-2020, Aeropuerto y Raval han experimentado un mayor número de olas de calor de día, 42 y 40, respectivamente, frente a 35 CMT y 28 Fabra. Más destacado es, todavía, el protagonismo del calor extremo en Raval si se consideran las olas de calor nocturnas: 69, respecto a Aeropuerto (64), Observatorio Fabra (37) y CMT (33). Considerando la última

<sup>22</sup> Hay que indicar que en el entorno geográfico de Barcelona, altitud y distancia al mar observan (en las estaciones analizadas) una muy elevada correlación:  $R^2 = 0,942$ .

década, Raval ha tenido un promedio de 1,5 olas de calor diurna por año, pero 3,4 olas de calor nocturno.

En el centro de Barcelona los eventos climáticos extremos por ola de calor no han cesado de incrementarse en el tiempo. Si en las tres primeras décadas estudiadas se produjo un promedio de 0,33 DHW/año, en las dos siguientes décadas las olas de calor diurno pasaron a ser 1,5 DHW/año. Incremento todavía más evidente si atendemos a las olas de calor nocturno, que pasaron de ser 0 NHW/año en la década 1971/1980, 0,1 NHW/año en el decenio 1981/1990, 1NHW/año entre 1991 y 2000, 2,4 NHW/año entre 2001 y 2010, y 3,4 NHW/año en la última década. Los eventos climáticos extremos por ola de calor nocturna no han dejado de crecer en el curso de los últimos 50 años. Y, probablemente, continuarán creciendo en las próximas décadas.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a Agència de Salut Pública de Barcelona, por la información proporcionada. También al Ministerio de Economía y Competitividad de España (MINECO) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) que permitieron la realización del proyecto Extreme Spatial and Urban Planning Tool for Episodes of Heat Waves and Flash Floods. Building Resilience for Cities and Regions (X-ClimPlan).

## Autoría

La primera autora y el segundo autor han estructurado el trabajo en conjunto, y han desarrollado el cuerpo del texto, las autoras tercera y cuarta y el quinto autor han contribuido a la definición de la metodología, el sexto autor ha realizado la revisión formal del documento y su adaptación a la revista.

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

## Bibliografía

AEMET. Agencia Española de Meteorología (2021). *Olas de calor en España desde 1975*. [https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos\\_en\\_linea/publicaciones\\_y\\_estudios/estudios/Olas\\_calor/Olas\\_Calor\\_ActualizacionOctubre2021.pdf](https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/Olas_calor/Olas_Calor_ActualizacionOctubre2021.pdf)

Altava-Ortiz, V., Barrera-Escoda, A., Amaro, J., Cunillera, J., Prohom, M. & Sairouni, A. (2016). L'augment de la temperatura i la precipitació a l'àrea metropolitana: estacions menys marcades i índexs de calor diürns i nocturns més elevats. *ESTUDI: Generació d'escenaris climàtics futurs regionalitzats a molt alta resolució (1 km) per a l'àrea metropolitana de Barcelona (Projecte ESAMB)*. Àrea Metropolitana de Barcelona, 2016. 16 p.

Arellano, B. & Roca, J. (2019). Combining different sensors for the detailed analysis of the daytime and nighttime UHI. *Conference Proceedings, SPIE 11157, Remote Sensing Technologies and Applications in Urban Environments IV*, 1115703. <https://doi.org/10.1117/12.2532461>

Arellano, B. & Roca, J. 2021. Remote Sensing & Night Time Urban Heat Island. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B3-2021, 15-22. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2021-15-2021>

- Arellano, B., Roca, J., Martínez, D., Serra, C., Lana, X. & Biere, R. (2021). Modelling nighttime air temperature from remote sensing imagery and GIS data. *Conference Proceedings, SPIE 11888, Space, Satellites, and Sustainability II*, 118880H. <https://doi.org/10.1117/12.2599022>
- COP21 (2015). <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- COP26 (2021). <https://www.un.org/es/climatechange/cop26>
- Della-Marta, P.M., Haylock M.R., Luterbacher J. & Wanner H. (2007). Doubled length of Western European summer heat waves since 1880. *J. Geophysical Research Atmospheres*, 112(D15), 103. <https://doi.org/10.1029/2007JD008510>
- Ding, T.; Qiana, W. & Yan, Z. (2010). Changes in hot days and heat waves in China during 1961–2007. *International Journal of Climatology*, 30(10), 1452–1462. <https://doi.org/10.1002/joc.1989>
- Fischetti, M. (2021). There's Still Time to Fix Climate—About 11 Years. *Scientific American*, Oct. 2021. <https://www.scientificamerican.com/article/theres-still-time-to-fix-climate-about-11-years...preventin-catastrophe>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), L08707. <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Habeeb, D., J. Vargo & B. Stone, Jr. (2015). Rising heat wave trends in large U.S. cities. *Natural Hazards* 76(3), 1651–1665. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1563-z>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2012. <https://www.ipcc.ch/report/mana-ging-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*. Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>
- Lange, M.A. (2020). *Climate Change in the Mediterranean: Environmental Impacts and Extreme Events*. IEMed Mediterranean Yearbook. 2020. <https://www.iemed.org/publication/climate-change-in-the-mediterranean-environmental-impacts-and-extreme-events/?lang=es>
- Lorenzo, M.N. & Álvarez, I. (2022). Future changes of hot extremes in Spain: towards warmer conditions. *Natural Hazards*, 113, 383–402. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05306-x>
- Lorenzo, M.N., Díaz-Poso, A. & Royé, D. (2021). Heatwave intensity on the Iberian Peninsula: Future climate projections. *Atmospheric Research*, 258(15), 105655. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105655>
- Martín-Vide, J. & Moreno-García, M.C. (2020). Probability values for the intensity of Barcelona's urban heat island (Spain). *Atmospheric Research*, 240, 104877. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104877>
- Martín-Vide, J., Cordobilla, M.J. & Moreno-García, M.C. (2015). La isla de calor en el área metropolitana de Barcelona y la adaptación al cambio climático. *METROBS-2015*. Direcció de Serveis Ambientals, Àrea Metropolitana de Barcelona, AMB, 101 pp. 2015. <https://www.amb.cat/es/web/ecologia/actualitat/publicacions/detall/-/publicacio/la-isla-de-calor-en-el-area-metropolitana-de-barcelona-y-la-adaptacion/5773152/11818>

Meehl, G.A. & Tebaldi, C. (2004). More Intense, more Frequent, and longer lasting Heatwaves in the 21st Century. *Science*, 305(5686), 994-997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>

Meteorological Service Singapore. Severe Weather. Heat Wave. [http://www.weather.gov.sg/learn\\_phenomena/](http://www.weather.gov.sg/learn_phenomena/)

Parsons, K. (2014). *Human thermal environments. The effects of hot, moderate and cold environments on human health, comfort and performance*. 3<sup>rd</sup>. CRC Press.

Perkins, S.E. & Alexander, L.V. (2013). On the Measurement of Heat Waves. *Journal of Climate*, 26(13), 4500-4517. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1>

Royé, D. (2017). The effects of hot nights on mortality in Barcelona, Spain. *International Journal of Biometeorology*, 61, 2127-2140. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1416-z>

Sarofim, M.C., Saha, S., Hawkins, M.D., Mills, D.M., Hess, J., Horton, R., Kinney, P., Schwartz, J. & Juliana, A. St. (2016). Chapter 2: Temperature-related death and illness. In: *The impacts of climate change on human health in the United States: A scientific assessment*. U.S. Global Change Research Program. <https://health2016.globalchange.gov>.

Serra C., Lana X., Martínez M.D., Roca J., Arellano B., Biere R., Moix M., & Burgueño A. (2020). Air temperature in Barcelona metropolitan region from MODIS satellite and GIS data. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 473-492. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02973-y>

Serra, C., Lana, X., Martínez, D., Roca, J., Arellano, B. & Biere, R. (2022). Olas de Calor en verano y puntos calientes en la Región Metropolitana de Barcelona. *XIV Congreso de Ciudad y Territorio Virtual*. Bogotá/Cartagena de Indias. Colombia. <https://doi.org/10.5821/ctv.11058>

U.S. Environmental Protection Agency, EPA. (2014). *Climate change indicators in the United States, 2014*. Third edition. EPA 430-R-14-004. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-07/documents/climateindicators-full-2014.pdf>

USGCRP (2017). *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I* [Wuebbles, D.J., D.W. Fahey, K.A. Hibbard, D.J. Dokken, B.C. Stewart, and T.K. Maycock (eds.)]. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA. <https://science2017.globalchange.gov/>

Wu, X., Wang, L., Yao, R., Luoc, M. Wang, S. & Wangd, L. (2020). Quantitatively evaluating the effect of urbanization on heat waves in China. *Science of The Total Environment*, 731(August 2020), 138857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138857>

Xu, Y., Dadvand, P., Barrera-Gómez, J., Sartini, C., Mari-Dell'Olmo, M., Borrell, C., Medina-Ramón, M., Sunyer, J. y Basagaña, X. (2013). Differences on the effect of heat waves on mortality by sociodemographic and urban landscape characteristics. *J Epidemiol Community Health*, 67(6), 519-525. <https://doi.org/10.1136/jech-2012-201899>