

De la ola de calor Zoe a la ola de calor Vera: una evaluación ex-post del sistema de categorización y nombramiento de olas de calor ProMeteo en Sevilla, España

José-María Martín-Olalla

*Departamento de Física de la Materia
Condensada de la Universidad de Sevilla,
ES41012 Sevilla,
Spain**

Yuval Baharav

*Adrienne Arsht-Rockefeller Foundation Resilience Center at the Atlantic Council,
Washington, DC,
USA*

Laurence Kalkstein

*Applied Climatologists, Inc. Marco Island, FL,
USA*

Scott Sheridan

*Department of Geography,
Kent State University, Kent, OH,
USA*

Kurt Shickman and Kathy Baughman McLeod

*Adrienne Arsht-Rockefeller Foundation Resilience Center at the Atlantic Council,
Washington, DC,
USA*

Gregory A Wellenius

*Center for Climate and Health,
Boston University School of Public Health, Boston, MA,
USA*

(Fecha: 25 de julio de 2024)

La ola de calor *Zoe* en Sevilla (España) (24 de julio del 2022) fue el primer fenómeno de este tipo nombrado a partir de un sistema de categorización basado en aspectos de salud. Fue seguida en el año 2023 de sus olas hermanas *Yago*, *Xenia*, *Wenceslao*, y *Vera*. Aquí se informa de cómo el proyecto piloto ProMeteo manejó los pronósticos y las principales característica climáticas de las olas de calor identificadas en los años 2022 y 2023. También presentamos una comparación entre las predicciones del modelo y los valores observados de defunción diaria.

Total
Words in text: 5143
Words in headers: 45
Words outside text (captions, etc.): 885
Number of headers: 12
Number of floats/tables/figures: 13
Number of math inlines: 81
Number of math displayed: 3
Files: 3

* olalla@us.es; <https://orcid.org/0000-0002-3750-9113>;
<https://ror.org/03yxnp24>

Desde finales del siglo 20^o y principios del siglo 21^o las olas de calor han sido consideradas como fenómenos peligrosos con una influencia negativa y fuerte en la salud, incluido en la mortalidad prematura(Becker *et al.*,

2022; Campbell *et al.*, 2018; Sheridan and Allen, 2018; Sheridan *et al.*, 2021). Entre otras olas de calor, la ola del 2003 en Europa, que se estima que murieron sobre 70 000 personas fue clave en el inicio de los esfuerzos para mitigar el impacto social de las olas de calor (Robine *et al.*, 2008), teniendo en cuenta especialmente que se teme que su frecuencia e intensidad aumente en los próximos años (IPCC, 2021; King and Karoly, 2017; Masson-Delmotte *et al.*, 2021; Perkins, 2015).

En este sentido, el Adrienne Arsht-Rockefeller Foundation Resilience Center del Atlantic Council, en colaboración con expertos internacionales en clima y salud de los Estados Unidos de América y de Sevilla, España, se embarcaron en el esfuerzo de desarrollar y poner a prueba el uso de un sistema de categorización de olas de calor basado en el pronóstico del exceso de mortalidad asociado a ella, en lugar de basado en las variables meteorológicas únicamente. El sistema de categorización fue implementado inicialmente en el verano del año 2022 como un proyecto piloto en seis ciudades, incluidas cuatro sistemas en los EUA (Kansas City, Los Ángeles, Miami y Milwaukee) y dos proyectos pilotos públicos en Europa: Sevilla, España, y Atenas, Grecia. En Sevilla, el proyecto piloto fue bautizado como ProMeteo. En colaboración con el Ayuntamiento de Sevilla, ProMeteo probó un protocolo específico de nombramiento de olas de calor para aumentar la conciencia y facilitar la diseminación de la información entre ciudadanos y servidores públicos, siendo Zoe en julio del año 2022 la primera ola de calor con nombre. Sevilla fue la única ciudad que implementó el sistema de nombramiento de olas de calor de gran categoría como parte de una estrategia de comunicación que imita los protocolos sobre tormentas y otros fenómenos peligrosos de la troposfera. Si la ola de calor alcanzaba una categoría predefinida y basada en el exceso de mortalidad esperado, el proyecto piloto lanzaba un nombre para la ola de calor. Casualmente, el inicio de este proyecto piloto coincidió con una ola de calor de características notables que barrió Europa Occidental durante el verano del 2022 (Copernicus, 2022a,b) y que ha sido asociada con un exceso de mortalidad (Ballester *et al.*, 2023). El caluroso año 2022 dio paso a otro verano aún más caluroso en el año 2023. (Copernicus, 2023, 2024) La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) reporta para la provincia de Sevilla dos olas de calor en el año 2022 y tres en el año 2023. (AEMET, 2023)

Anteriormente, hemos informado de la influencia del sistema de nombramiento de ola de calor en creencias y comportamientos de los residentes (Metzger *et al.*, 2024) y un análisis retrospectivo de la correlación entre exceso de calor y exceso de mortalidad en la ciudad de Sevilla. (Kalkstein *et al.*, 2024)

El objetivo de este trabajo es presentar una evaluación de cómo de bien se comportó este sistema nuevo en los años 2022 y 2023 para así proporcionar perspectivas y sugerencias para una mejora continua de este tipo de

sistemas.

El municipio de Seville (37.24° Norte, 5.99° Oeste, población 681 998 a 1 de enero del 2022 (Real Decreto 1037/2022), superficie 140 km², elevación 7 m) y la provincia homónima que la rodea (código NUTS ES618, población 1 948 393, superficie 14 000 km²) se encuentran en la parte baja de la cuenca del río Guadalquivir en el suroeste de España (véase la Figura S1 en Material Adicional). La ciudad tiene clima mediterráneo templado (clasificación Köppen Csa) caracterizado por veranos secos y cálidos (Kottek *et al.*, 2006; Tullot, 2000). Para comprobar un sistema piloto que caracterice la influencia de las olas de calor en la mortalidad, Seville tiene características singulares como por ejemplo altas temperaturas estivales y una gran población —esto es necesario para has unique characteristics that include high summer temperatures and a large una caracterización estadística adecuada del exceso de mortalidad asociado al exceso de calor (Royé *et al.*, 2020). Además, Seville es de entre las grandes áreas metropolitanas europeas, la más calurosa siendo las temperaturas diarias por encima de 40 °C habituales en verano y con un registro de temperatura más alta en 46.6 °C, alcanzado el año 1995. La ciudad también tiene una gran variabilidad en verano, asociada a los vientos dominantes de componente oeste que traen masas de aire templadas, mientras que los vientos de componente este suelen traer masas secas y muy cálidas.

1. METODOLOGÍA

El nuevo sistema de aviso, categorización y nombramiento de olas de calor fue descrito exhaustivamente con anterioridad. (Kalkstein *et al.*, 2024) Se basa en el análisis retrospectivo de las masas de aire sinópticas que afectaron a la ciudad desde el 1995 y su influencia en la mortalidad diaria.

Para evaluar el sistema en los veranos de 2022 y 2023 se hicieron uso de las siguientes bases de datos, todas ellas a disposición pública:

1. Las observaciones meteorológicas diarias en la estación (WMO 08391) del Aeropuerto de Seville (LEZL), mantenida por AEMET. La serie de datos se inicia en el año 1951..
2. El pronóstico a 5 días y con cadencia de 3 horas proporcionado por OpenWeather para la ciudad de Seville (city 6361046)
3. El Monitor diario de Mortalidad (MoMo) del Instituto de Salud Carlos III, que publica valores estimados de la mortalidad total por todas las causas desagregada por provincia, sexo y grupo de edad amplio. La serie se inicia el 1 de enero del año 2015. Este conjunto de datos publica diariamente una estimación de las muertes observadas en los días ante-

riores, M , una estimación de las muertes esperadas E basa en población, estacionalidad, y el registro anterior de muertes diarias; y una estimación de las muertes atribuidas A al exceso de temperatura por un modelo que tiene un nivel de disparo en 40°C (Jiménez *et al.*, 2015). Este modelo promedia el impacto del exceso de temperatura a lo largo en los siete días anteriores. (Nogueira and Paixão, 2008)

El conjunto fue descargado en el año 2024, el infrareporte no tiene entonces ningún impacto.

La gravedad de una ola de calor en este estudio será defina por el Factor de Exceso de Calor (EHF) de Nairn-Fawcett, que combina dos componentes de una temperatura característica diaria:

The severity of a heat wave in this study is defined by the Nairn-Fawcett Excess Heat Factor (EHF) (Nairn *et al.*, 2014). The factor combines two components of a daily characteristic temperature T :

1. El exceso de calor EH, que es la diferencia entre la media móvil de tres días de la temperatura y el valor climatológico del percentil 95 de la temperatura T_{95} :

$$EH = SMA_3 - T_{95}. \quad (1)$$

Este factor establece cómo de cálido es un día en relación con el registro histórico de la localidad. Para ello se calculó el percentil 95 de la serie 1981 a 2010.

2. El índice de aclimatación A , que es la diferencia entre la media móvil de tres días y la media móvil de treinta días:

$$A = MVS_3 - MVS_{30}. \quad (2)$$

El índice de aclimatación mide cómo de cálido fue un día en relación con el pasado reciente (último mes).

El índice EHF es el producto de los dos factores anteriores siempre que EH sea positivo (exceso):

$$EHF = \begin{cases} EH \times \max([1^\circ\text{C}, A]), & \text{si EH positive,} \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (3)$$

Por construcción la raíz cuadrada de EHF es real. Tiene también una interpretación sencilla: cuando $A \geq 1^\circ\text{C}$, \sqrt{EHF} es la media geométrica de los dos índices (EH and A). Es decir, \sqrt{EHF} es menor que el mayor de los índices, y mayor que el menor de los índices. Se sitúa entre ambos.

Para nuestro análisis el valor de entrada del EHF será la temperatura media aparente (DMAT) que combina las

Category	Exceso de mortalidad esperado	Percentil EHF/ K^2	$\sqrt{EHF}/^\circ\text{C}$
0	< 10 %	32	< 1.7
1	< 20 %	74	< 7.8
2	< 30 %	93	< 15.5
3	> 30 %	> 93	> 15.5

Cuadro 1 Sistema de categorización de ProMeteo Sevilla basado en nuestro análisis retrospectivo. (Kalkstein *et al.*, 2024) El cuadro lista el exceso de mortalidad esperado, el cuantil de la categoría, EHF y su raíz cuadrada.

temperaturas nocturnas y diurnas y la influencia de la humedad y del viento. (Staiger *et al.*, 2012; Steadman, 1984) El percentil 95 de esta propiedad en Seville es 30.6°C .

De 1973 a From 1973 to 2023 encontramos 527 días con EHF distinto de cero, el 11 % de los 4692 días en junio, julio y agosto. Los valores acumulados de EHF son mayores entre final de julio y principios de agosto (epidemiological weeks 29 to 33) cuando DMAT también alcanza los valores mayores, véase la Figura S2 en Material Adicional. Para entender el incremento de temperatura media en la ciudad indicamos que hasta 1982 los días con EHF positivo crecían a razón de 5.8 días por año; desde 1990 crecen a 13 days per year.

En nuestro análisis retrospectivo se dividieron las olas de calor en Seville en cuatro categorías basándose en el nivel de exceso de mortalidad medio asociado con el fenómeno. (Kalkstein *et al.*, 2024) El cuadro 1 muestra las principales características de cada categoría.

Finalmente, se estableció un protocolo para nombrar olas de calor basado en el pronóstico del tiempo. Requerimos tres días con EHF positivo con al menos un día en Categoría 3 day; o un valor acumulado en tres días superior a $34 K^2$, implicando que en promedio el fenómeno alcanza la mitad superior de la Categoría 2. Será la categoría 2^+ en la Figure 1; véase también la Sección 3.

2. RESULTADOS

La figura 1 muestra las observaciones asociadas a la temperatura (paneles superiores) y a la mortalidad (paneles inferiores) durante el verano del 2022 (izquierda) y del 2023 (derecha) en Seville. El eje horizontal se extiende a lo largo de 105 días (15 semanas) correspondientes a la semanas epidemiológicas 22 a 36.

Los paneles superiores muestran en líneas finas las medias móviles MV3 y MV30 de la temperatura media aparente. El percentil 95 $T_{95} = 30.8^\circ\text{C}$ se indica. También se muestra el EH (exceso de calor, véase la Eq. 1) y el factor de aclimatación A (véase la Eq. 2) por líneas gruesas cuando son positivos. Finalmente la raíz cuadrada del exceso de calor de Nairn-Fawcett EHF (véase la Eq. 3) aparece con barras rellenas de color naranja. Los valores

de los excesos se anotan en el eje vertical a la derecha. Las categorías se marcan en ese eje siguiendo los valores del cuadro 1.

Los paneles superiores en la figura 1 muestran varias desviaciones de EHF durante el verano. Cada una de ellas constituye una ola de calor. Los fenómenos sin nombre se etiquetaron con letras del alfabeto latino, de lo contrario se señala el nombre de la ola de calor. El cuadro 2 lista las características meteorológicas básicas de las olas de calor identificadas durante los años 2022 y 2023: inicio, duración, temperatura máxima diaria, la temperatura mínima mayor, el valor acumulado del EHF, y el valor máximo del EHF, que se emplea para identificar la categoría del fenómeno según el cuadro 1.

La primera ola de calor en junio del año 2022 —(a)— ocurrió poco antes de que el proyecto fuera anunciado públicamente y alcanzó la categoría 1 (C1) de nuestro sistema de categorización. A partir de ahí varias desviaciones durante el mes de julio y principios del mes de agosto del año 2022 coincidieron con la ola de calor que asoló Europa Occidental (Copernicus, 2022a,b). La primera desviación fue una serie de diez días con EHF en categoría 1 —(b)— y categoría 2 —(c)—. Tras un breve descanso de tres días, una nueva ola de calor se formó el 21 de julio. El pronóstico del 24 de julio preveía que se alcanzara la condición para nombrar el fenómeno (véase Figure S4 en Material Adicional) y se anunció el nombre de la ola de calor Zoe. Fue la primera ola de calor nombrada a partir de un sistema de categorización basado en riesgos de salud.

La ola de calor Zoe estuvo caracterizada por una temperatura máxima de entre 44.5 °C (25 de julio, 11^a temperatura más alta del registro histórico) y 40.3 °C; temperaturas mínimas de 28.1 °C (25 de julio, 3^a más alta en el registro) a 22.3 °C; y temperatura aparente media de entre 34.9 °C (25 de julio, 22^a más alta) a 30.6 °C, véase el cuadro 2. Tras la ola Zoe, otra de categoría 1 fue registrada a principios de agosto —(d)—. En el verano del 2022 hubo 23 fechas con EHF distinto de cero, que acumularon un valor de 131.5 K².

En el año 2023 se identificaron siete olas de calor, de las cuales cuatro fueron fenómenos nombrados: : Yago, Xenia, Wenceslao and Xenia, véase el cuadro 2. La figura S5 en Material Adicional muestra las condiciones cuando se anunció la ola de calor Yago a final de junio. Yago fue propiciada por el factor de aclimatación *A* que habitualmente es mayor durante el primer tercio del verano, véase la figura 1. La ola de calor Xenia y las olas (e) y (f) llegaron a principios de julio. A toro pasado ninguna de estas olas alcanzó la condición para poner un nombre. Estas condiciones existieron en los pronósticos anteriores, véase la figura S6 en Material Adicional. Las dos últimas olas de calor, Wenceslao and Vera, acumularon 14 días con exceso de calor positivo y se formaron a principios de agosto, alcanzando categoría 2⁺. Cada una duró una semana. Véase las figuras S7 and S8 en Mate-

rial Adicional. En total se identificaron 31 días en el año 2023 con EHF positivo, que acumularon 250 K². Comparado con el registro desde el 1995 al 2023, el año 2023 fue el cuarto más caluroso tras los años 1995, 2003 y 2004; mientras que el 2022 fue el sexto, con el 1998 en quinto lugar, véase la figura S3 en Material Adicional.

Los paneles inferiores de la figura 1 muestra la defunción diaria en la provincia de Sevilla según MoMo. Los puntos indican la defunción observada, con la línea gruesa negra mostrando la media móvil central de siete días. La línea roja señala la defunción esperada. El sombreado oscuro indica la banda $E \pm \sqrt{E}$, la defunción esperada más y menos la raíz cuadrada del estimador no sesgados de su varianza según un modelo de Poisson. El sombreado claro indica el intervalo de confianza 1% – 99% de *E*, según se publica por MoMo. La influencia de las variables meteorológicas se indica según dos modelos. La línea naranja muestra *E* más la defunción atribuida al exceso de temperatura por MoMo. La línea azul muestra el exceso de defunción atribuido al EHF por nuestro sistema. (Kalkstein *et al.*, 2024)

El cuadro 3 enumera los datos básicos de la defunción asociada con las quince semanas epidemiológicas de nuestro análisis. En el 2022 hubo 4426 defunciones esperadas (tasa de 23.6 defunciones por día y por millón de habitantes) de las cuales 2101 serían mujeres (tasa 20.2) y 2325 varones (tasa 21.7). Hubo 4813 defunciones observadas (tasa 23.6), 9% más que las defunciones esperadas, 2391 mujeres (tasa 23.0, 14% más) y 2421 varones (tasa 24.3, 4% más).

La defunción observada tuvo dos desviaciones en el verano del 2022, véase la figura 1 panel A2. La primera desviación fue coincidente con la ola de calor (a) y ocurrió antes de que el proyecto se hubiera iniciado. La segunda desviación fue coincidente con las olas de calor (b), Zoe, y (c), y se prolongó durante julio y el inicio del mes de agosto.

Relativo a la defunción esperada, MoMo atribuye 163 defunciones (3.7%) al exceso de temperatura, de las cuales 124 serían mujeres y 40 varones. Nuestro modelo atribuye un exceso de 111 (2.5%) respecto a la defunción esperada por MoMo.

En el 2023 (panel B2 en la figura 1) la línea roja quebrada muestra la defunción esperada (*E*) por MoMo. En el intervalo considerado entran 4587 defunciones esperadas (tasa de 22.5 defunciones por día y por millón de habitantes) de los cuales 2231 serían mujeres (tasa 21.5) y 2356, varones (tasa 23.6). La defunción observada fue 4271 (tasa 21.0), 7% menor, 2063 mujer (tasa 19.9, 8% menor) y 2209 varón (tasa 22.1, 6% menor).

A la vista de estos números y median una inspección visual de la línea roja en el panel B2, nosotros eliminamos seis defunciones por día del valor de defunción esperada reportada por MoMo para obtener nuestra estimación dada por la línea roja gruesa (3957 defunciones, 19.4 por millón de habitantes). Sobre este valor hubo un exceso de

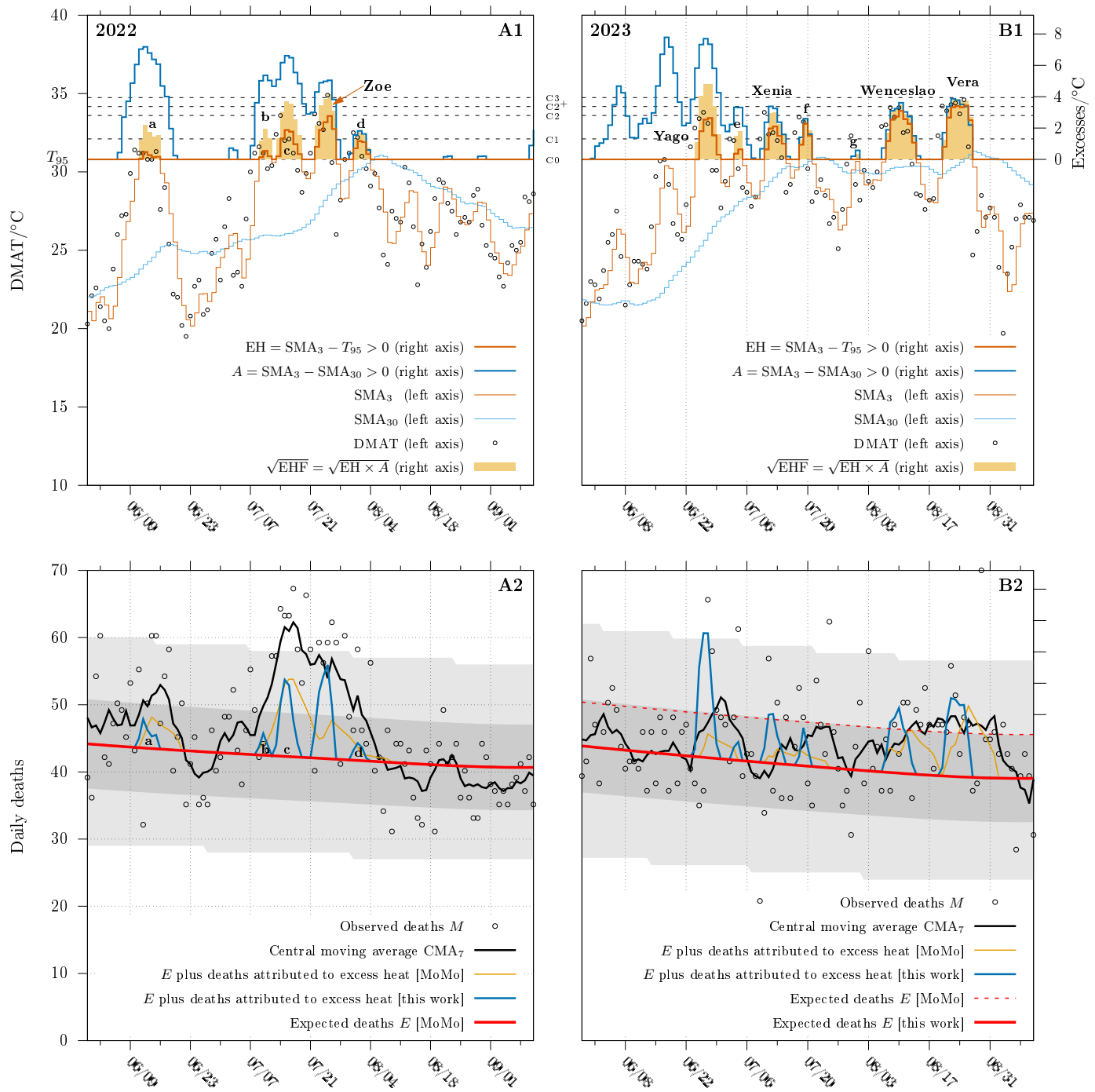


Figura 1 Observaciones meteorológicas en Seville (paneles superiores) y mortalidad por todas las causas en la provincia de Seville (paneles inferiores) durante el verano del 2022 (izquierda) y del 2023 (derecha). Las fechas están impresas en formato mes/día. Los paneles superiores muestra la temperatura media aparente diaria (DMAT, círculos) su media móvil de tres días (SMA₃) y su media móvil de treinta días (SMA₃₀) junto al percentil 95 climático $T_{95} = 30.8^{\circ}\text{C}$ (ejes izquierdo); el exceso climático EH (naranja), el índice de aclimatación A (azul), y la raíz cuadrada del exceso de calor en área sombreada (los valores de los excesos se leen en los ejes de la derecha). Las líneas quebradas muestra los niveles para las categorías 0, 1, 2, y 3. La letras indican olas de calor sin nombre. El panel inferior muestra la mortalidad diaria por todas las causas publicada por MoMo (círculos M) y su media móvil de siete días (línea negra); las defunciones esperadas (línea roja E); las defunciones esperadas más la atribuidas al exceso de temperatura por MoMo (línea azul, $E + A$); y las muestras esperadas más las muertes atribuidas al EHF por nuestro análisis retrospectivo (línea azul, $E + C$). El sombreado más oscuro muestra $E \pm \sqrt{E}$ y el más suave el intervalo de confianza 1%–99% de E publicado por MoMo. En el panel A2, las defunciones esperadas son las de MoMo. En el panel B2, las defunciones esperadas por MoMo se muestra por una línea quebrada roja.

Start date	Duration d	máx($T_{\text{máx}}$) °C	máx($T_{\text{mín}}$) °C	EHF _{ac} K ²	EHF _{máx} K ²	Category	Name (label)	Announced
2022-Jun-11	5	42.6	23.3	13.6	4.8	1	(a)	
2022-Jul-09	3	42.5	23.0	6.9	3.7	1	(b)	
2022-Jul-13	6	44.8	26.0	45.8	13.6	2 ⁺	(c)	
2022-Jul-22	5	44.5	28.1	57.7	17.0	3	Zoe	2022-Jul-24
2022-Jul-31	4	41.0	23.9	7.5	3.0	1	(d)	
2023-Jun-24	6	42.0	23.0	77.2	23.0	3	Yago	2023-Jun-23
2023-Jul-03	2	38.2	24.3	5.4	3.2	1	(e)	
2023-Jul-10	5	41.7	25.3	27.4	8.8	2	Xenia	2023-Jul-09
2023-Jul-18	3	41.7	25.2	11.6	6.8	1	(f)	
2023-Jul-31	1	39.9	23.7	0.1	0.1	0	(g)	
2023-Aug-07	7	43.7	24.5	51.7	12.2	2 ⁺	Wenceslao	2023-Aug-07
2023-Aug-20	7	42.6	24.2	76.5	15.0	2 ⁺	Vera	2023-Aug-24

Cuadro 2 Catálogo de olas de calor registradas durante los años 2022 y 2023 en Sevilla, España, con características basadas en la temperatura final observada en la estación de AEMET en el aeropuerto de Sevilla. La primera columna muestra la fecha de inicio, después la duración (número de días continuados), la temperatura máxima diaria en esos días; la temperatura mínima más alta; el valor acumulado del exceso de calor; el valor máximo del exceso de calor, que sirve para categorizar el evento; el nombre de la ola de calor o su etiqueta; y la fecha de anuncio de la ola de calor. El nombre y la fecha de anuncio se basan en los pronósticos de OpenWeather, y no en observaciones, véase las figuras S4 a S8 en Material Adicional.

Estadística	2022	2023
Defunción observada (MoMo)	4813	4271
Defunción esperada (MoMo)	4426	4587
Exceso de defunción (MoMo)	387	-316
P-score (MoMo)	9 %	-7 %
Defunción esperada (este trabajo)	4426	3957
Exceso de defunción (este trabajo)	387	314
P-score	9 %	8 %
Atribuido a exceso de temperatura (MoMo)	163	155
Atribuido a EHF (este trabajo)	111	186

Cuadro 3 Defunción asociada a las semanas epidemiológicas 22 a 36 en Sevilla, España. Véase la figura 1 (paneles inferiores).

314 defunciones (8 % mayor). El exceso atribuido por Mo-Mo al exceso de temperatura añade 155 defunciones (4 % mayor). Nuestro modelo añade 186 defunciones (4.5 %) atribuidas al exceso de calor.

La figura 2 muestra la relación entre el exceso diario de defunción y las predicciones de nuestro modelo en el 2022 (arriba) y el 2023 (abajo). El eje horizontal señala el EHF y el eje vertical el exceso relativo de defunción respecto de las defunciones esperadas (línea roja en la figura 1 abajo). La gran dispersión en $\text{EHF} = 0$ es consecuencia del tamaño del experimento natural, que habitualmente tiene unas 45 defunciones diarias. Hacemos notar también que cuando una ola de calor finaliza las defunciones relacionadas con ella pueden acumularse en los siguientes días, incluso aunque no tengan exceso de calor. En el 2022 el exceso de defunción fue pertinazmente mayor que las predicciones asociadas con nuestro modelo, mientras que en el 2023, el exceso de defunción va en línea con nuestras previsiones.

3. DISCUSIÓN

El 2022-06-21 el proyecto piloto ProMeteo comenzó a monitorizar la previsión a 5 días y cadencia de 3 horas proporcionada por OpenWeather para la ciudad de Sevilla, ES y a producir sistemáticamente una predicción basada en la temperatura aparente media y el exceso de calor de Nairn-Fawcett (EHF) producido con estos datos. La predicción fue publicada en una página web que fue enviada a los patrocinadores del proyecto, incluido el Ayuntamiento de Sevilla. La página web no era accesible al público.

En Material Adicional, figuras S4 a S8 se muestra una captura de pantalla de la página web con las predicciones próximas al anuncio de un fenómeno con nombre. En las figuras S4 a S8 el panel superior izquierdo indica las cinco categorías y sus colores correspondientes: verde, naranja claro, naranja, rojo claro, y rojo. El panel derecho muestra el pronóstico para los cinco días posteriores, incluyendo la categoría y su color. Aunque el pronóstico es

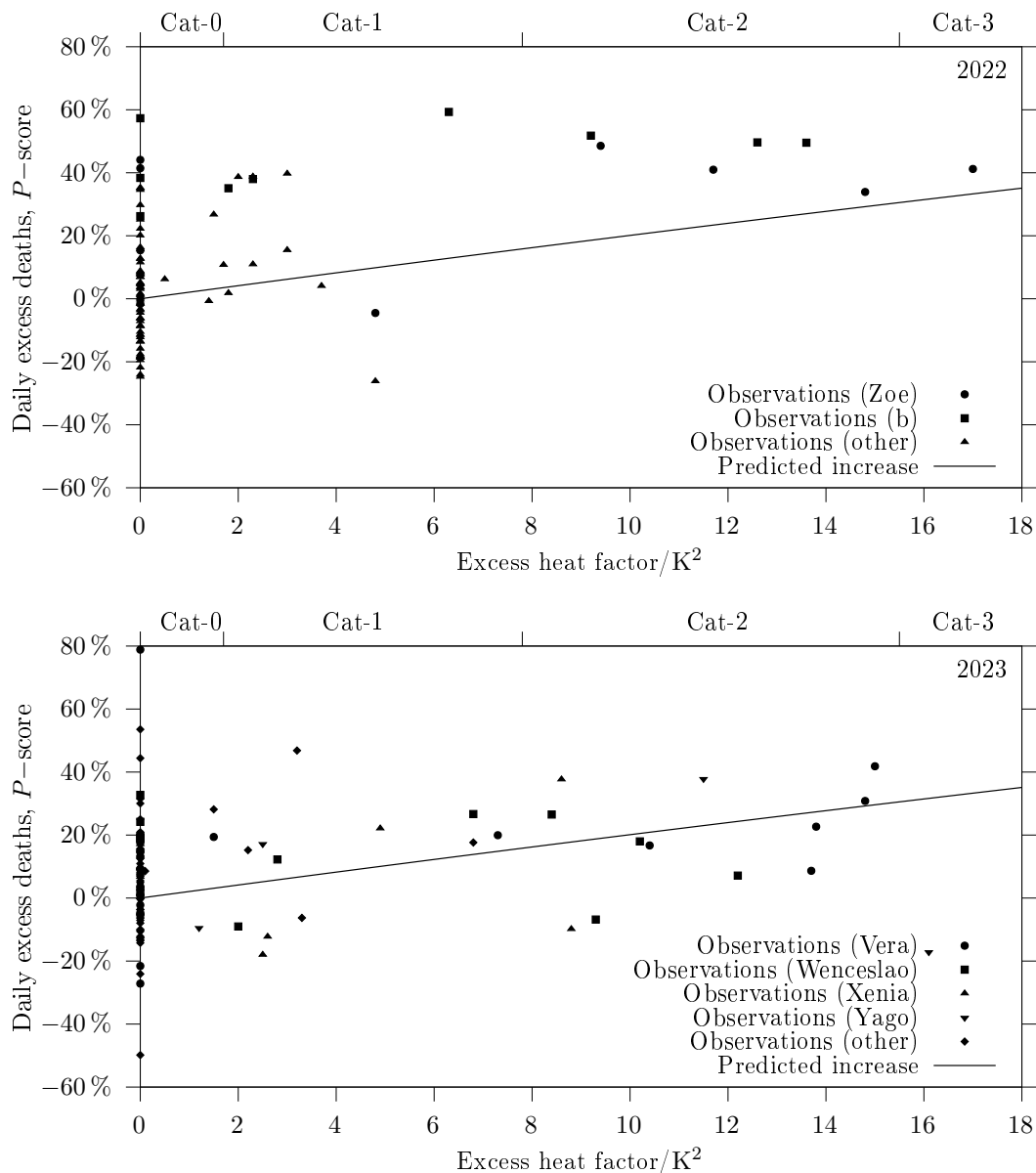


Figura 2 La relación entre el EHF diario (eje horizontal, predictor) y el P -exceso de la defunción diaria (eje vertical) junto con las predicciones de nuestro modelo (línea fina). Véase el cuadro 2 para la identificación de las olas de calor. Arriba el año 2022; abajo el año 2023.

a cinco días vista, ProMeteo se centró en los primeros tres días (D , $D+1$ and $D+2$), ya que las predicciones meteorológicas tienden a ser más precisas en plazos más cortos. Se indica que durante el año 2022 el EHF era erróneo debido a un error de programación: se estaba atribuyendo la media móvil de 50 días a la media móvil de 30 días. Ya que la categorización estaba basada en los cuantiles del EHF, y el error amplificaba el EHF de forma monótona, el sistema de categorización no se vio afectado por este incidente.

ProMeteo identificó dos eventos importantes durante el año 2022. El primero, designado como (b) en la figura 1—

comenzó el 10 de julio y terminó el 21 de julio, haciendo máximo el 16 de julio. Le siguió casi continuamente por la segunda ola de calor, que se inició el 22 de julio y terminó el 29 de julio, haciendo máximo el 26 de julio. Estas olas de calor son sincronicas con la gran ola de calor que barrió Europa durante el mes de julio de ese año. (Copernicus, 2022a)

ProMeteo alertó a las autoridades locales del municipio de Sevilla de estos fenómenos y acordó con ellas publicar una nota de prensa y avisos especiales en redes sociales. El 12 de julio ProMeteo alertó de la inminente ola de calor y la categorizó como de alto riesgo para la pobla-

ción vulnerable, basándose en su análisis retrospectivo. Los avisos continuaron en las redes sociales hasta el 20 de julio. El 22 de julio una segunda nota de prensa alertó de una nueva ola de calor, con riesgo medio. El aviso fue actualizado el 23 de julio cuando el riesgo se aumentó a elevado. El 24 de julio la predicción para los siguientes dos días indicaba que la temperatura aparente media se situaría 6°C por encima del percentil 95 (situado en 30.8°C), con temperatura máximas siete grados por encima del percentil 95 (38.2°C) y temperaturas mínimas siete grados por encima de su percentil 95 (22°C).

A lo largo de esos días la condición de categoría 3, que habría supuesto el lanzamiento de un nombre para el fenómeno, solo fue alcanzado en algunos pronósticos de la ola de calor (b). En ese momento los patrocinadores del proyecto dudaron en lanzar el nombre debido a, entre otras razones, la novedad del sistema de nombramiento, que hacía que el proyecto fuera cauteloso. También la diferencia horaria entre los patrocinadores locales y americanos desempeñó un papel puesto que el primer pronóstico del día llegaba a las 07:00UTC (09:00 hora local), madrugada en el otro lado del Atlántico.

Al final, la condiciones que se habían observado desde el 10 de julio hicieron que el proyecto reevaluara los criterios para lanzar nombre y el proceso de toma de decisiones. Como resultado de esto se determinó el 19 de julio que los patrocinadores locales tomarían la decisión en base a la actualización de las 07:00UTC. También se acordó que una serie de tres días con EHF promedio en la mitad superior de categoría 2 también debería adquirir un nombre. Es la categoría $\text{C}2^{+}$ en la figura 1.

Con la llegada de pronóstico de la mañana del 2022-07-24 (que se muestra en la figura S4) esta condición se cumplió, el consejero científico local (JMM-O) tomó la decisión de que estas condiciones se satisficieran y el Ayuntamiento de Sevilla acordó nombrar el fenómeno como Zoe, siguiendo una lista preestablecida de nombres propios de mujer y de varón en orden alfabético inverso.

En el 2023 ProMeteo identificó cuatro fenómenos con nombre y tres sin nombre. Seis mensajes de alerta fueron emitidos en forma de notas de prensa y mensajes en redes sociales.

Un asunto interesante de tratar es cómo de bien se ajustaron las predicciones a los valores observados. La figura 1 muestra los datos finales tomados de la estación meteorológica de AEMET en el aeropuerto de Sevilla, 7.5 km en dirección ENE del centro de la ciudad, mientras que las figuras S4 a S8 muestran las predicciones cuando se decidió poner un nombre. Retrospectivamente, la categoría 3 fue alcanzada efectivamente durante la ola de calor Zoe, que estuvo bien nombrada. De la misma forma, durante la ola (b) se alcanzó la categoría 2^{+} y la ola (b) habría merecido un nombre si el protocolo hubiera considerado esta categoría en ese momento. En el 2023 la ola Xenia fue nombrada en base a las predicciones (véase la figura S6 en Material Adicional) pero

los datos finales la clasifican en la mitad inferior de la Categoría 2, lo que no la califica para tener nombre. El análisis retrospectivo de los restantes seis fenómenos del 2023 muestran que las decisiones iniciales de ProMeteo fueron correctas para las observaciones finales, incluyendo los tres fenómenos nombrados —Yago, Wenceslao y Vera— y los tres sin nombre —designados como (e), (f) y (g)—.

Otro asunto de interés es la disponibilidad de nuestros mensajes de alerta. El modelo se basa en una media móvil de tres días, que necesita de tres días para cebarse. Además las olas de calor son fenómenos que tienen un tramo ascendente, seguido de uno descendente. La ola de calor Zoe fue anunciada después de que hubiera comenzado, una vez que el criterio para nombrar se satisfizo. El aviso era efectivo para el día objetivo (2022-07-24), que fue el más peligroso de la ola de calor. Las olas Yago, Xenia y Wenceslao, se identificaron y anunciaron antes de su inicio, o en el momento de su inicio. Finalmente se avisó de la ola Vera el 2023-08-24, cuatro días después de su inicio. El 21 de agosto ProMeteo emitió un aviso de ola de calor pero sin poner nombre al fenómeno, en base a la información disponible que predecía un valor acumulado del EHF en 33K^2 para los siguientes tres días; estos es justo por debajo de la categoría 2^{+} . No fue hasta el 24 de agosto que la alerta fue actualizada y el nombre Vera fue lanzado (véase la figura S8). Mirando hacia atrás, y basándose en los valores observados, los días 22 y 23 de agosto fueron peores que el día 24 de agosto.

El informe de AEMET sobre olas de calor en la provincia de Sevilla (AEMET, 2023) difiere de nuestro relato en algunos aspectos. La ola (a) de junio del 2022, y la ola Yago de junio del 2023 no fueron identificadas por AEMET. En ambas olas el factor de aclimatación es la componente dominante del EHF, AEMET no considera esta contribución para designar olas de calor. En segundo lugar, AEMET une las olas designadas como (b) y (c), y la ola Zoe en un único fenómeno desde el 9 de julio hasta el 26 de julio. También AEMET identifica una ola desde el 30 de julio al 14 de agosto, más duradera que la ola designada como (d) en el cuadro 2. Finalmente, AEMET no identificó las olas (e), (f) y (g) en el 2023; los fenómenos más débiles de nuestro catálogo.

La figura 1 (paneles inferiores) muestra una desviación de la defunción diaria sincrónica con las predicciones de MoMo (basadas en la temperatura máxima diaria) y del análisis retrospectivo de ProMeteo (basado en el EHF de Nairn-Fawcett, a partir de la temperatura aparente media)'s retrospective analysis (based on the Nairn-Fawcett excess heat factor deduced from daily mean average temperature). Por contra, ambos modelos fallaron a la hora de estimar correctamente el exceso de defunción en el año 2022. El exceso de 163 defunciones (MoMo) y 111 defunciones (ProMeteo) quedan muy por debajo del exceso observado: 387 defunciones. Esto podría ser un indicio de la existencia de otras causas más allá del exceso de

calor pero también es un indicio de las limitaciones de los modelos actuales, especialmente cuando la condición de exceso de calor se mantiene durante una larga serie continuada de días, como en julio del 2022, y dentro del contexto posterior a la pandemia de COVID-19.

En el año 2023 este escenario fue invertido y las defunciones observadas en el verano caen un 7 % respecto de la defunción esperada por MoMo (véase la figura 1 panel B2). Una explicación plausible es que el exceso del 2022 aún tuvo influencia en la defunción observada en el 2023, en comparación con lo que predice un modelo estándar. Nuestra propuesta de defunciones esperadas conlleva un exceso del 8 % en el 2023, la mitad del cual se explica por la defunción atribuida al exceso de temperatura (MoMo) o al exceso de calor (nuestro modelo).

Debemos señalar que ProMeteo no intenta predecir de forma precisa el exceso de defunción, sino identificar y categorizar los riesgos potenciales asociados con el calor extremo para que individuos y políticos puedan tomar acciones preventivas. Este objetivo se alcanzó en los años 2022 y 2023, ya que todos fenómenos identificados se vieron acompañados, desgraciadamente, de un aumento de la defunción, como esperábamos.

El objetivo de predecir de forma precisa el exceso de defunción asociado a datos meteorológicos se topa con el problema habitual de la estadística descriptiva: el tamaño de muestra y su variabilidad. Aquí la variabilidad de la defunción diaria en la provincia de Sevilla es aproximadamente $1/\sqrt{E}$, que es comparable con la influencia que tendría un fenómeno de categoría 3. Por tanto, cuando se intenta reconstruir la relación entre EHF y exceso de defunción, los fenómenos con EHF pequeños quedan muy mal determinados debido al ruido de la señal base; y los fenómenos con EHF grande quedan muy mal determinados debido a su escasez. Esta escasez sugiere que el conocimiento de la relación entre EHF y mortalidad es limitada, y que es posible que aparezcan desencuentros entre predicciones y observaciones. El análisis podría mejorarse en conurbaciones más pobladas, y teniendo una serie de años más larga. De forma alternativa, el análisis de la relación entre los valores agregados de defunción durante un verano y el valor acumulado de EHF puede proporcionar mayor información.

4. LIMITACIONES CONOCIDAS

Debido a la cercanía de la estación del AEMET en el aeropuerto de Sevilla y el centro de la ciudad asumimos una gran correlación entre las temperaturas de ambas localizaciones. Ya que el EHF se construye a partir de diferencias de temperatura (véase la Eq. 1 y la Eq. 2), no vemos razón para creer que este desajuste tenga una influencia relevante. Debemos tener en cuenta que nuestro predictor siempre es la temperatura de la estación meteorológica, que se constituye en un intermediario de la

temperatura de la ciudad.

Debido a la ausencia de datos de defunción diaria en la ciudad de Seville (población 681 998 en el 2022 y 2023) que se usaron para el análisis retrospectivo de ProMeteo (Kalkstein *et al.*, 2024), hacemos uso aquí de los datos de defunción diaria en la provincia of Seville (población 1 948 393 en el 2022). La hipótesis nula es que la razón entre las dos defunciones es independiente de la fecha y puede ser explicada por las variaciones en el tamaño poblacional de cada agrupación. Realmente la asociación entre esta razón y un índice ordinal para los 552 días de junio, julio y agosto desde el 2015 al 2020 da $R^2 = 0.004$ ($p = 0.13$): la hipótesis nula no se quiebra al nivel estándar de significancia ($\alpha = 0.05$). Además, regresiones del tipo log-log regressions de las dos defunciones indican una pendiente $m = 0.96[0.86, 1.06]$ con $R = 0.63$ (Pearson), y $R = 0.62$ (Spearman). Al final, nuestra predicción de exceso de defunción basada en la asociación de la desviación relativa P -valor con el EHF es válida aproximadamente para los datos de la provincia de Sevilla.

5. CONCLUSIONS

Hemos presentado una evaluación ex-post del sistema de categorización y nombramiento de basado en aspectos de salud durante dos años consecutivos. El sistema fue capaz de predecir los fenómenos mayores y más peligrosos que asolaron la ciudad de Sevilla durante los veranos del 2022 y del 2023 en un tiempo adecuado.

Los fenómenos fueron contemporáneos con desviaciones en la defunción diaria. Nuestras predicciones fueron capaces de explicar el exceso de defunción en el año 2023. Sin embargo, el exceso de defunción del año 2022 fue bastante peor que lo que indicaban nuestras predicciones.

DISPONIBILIDAD DE LOS DATOS

Los datos de AEMET están accesible con API-key en AEMET Open Data <https://opendata.aemet.es/centrodedescargas/inicio>.

El pronóstico de Openweather puede descargarse con API-key en <https://openweathermap.org/api>.

El monitor español de mortalidad diaria (MoMo) puede descargarse en https://momo.isciii.es/panel_momo/

DECLARACIONES

Dr. Wellenius es consultor de Google, LLC (Mountain View, CA) y del Health Effects Institute (Boston, MA).

PATROCIONIO

Este trabajo fue patrocinado por el Atlantic Council/Arsht Rockefeller Foundation Contract #AARFRC-008-FY22-HEAT.

ACKNOWLEDGMENTS

Agradecemos a Esperanza Caro (Ayuntamiento de Sevilla) por su inestimable ayuda, a Concha Ortiz (<https://conchaortiz.es>) por sus servicios de traducción e interpretación, a Geraldine Henrich-Koenis (Addrienne Arsht-Rockefeller Foundation Resilience Center), a Rosa Llacer (Descubre Comunicación) y a Descubre Comunicación (<https://descubrecomunicacion.com>) por sus extraordinario trabajo en llevar este proyecto a la luz pública.

CREDIT

Conceptualización: Laurence Kalkstein, Yuval Baharav, Kurt Shickman, Kathy Baughman-McLeod, José-María Martín-Olalla; Metodología: Scott Sheridan, José-María Martín-Olalla, Yuval Baharav, Gregory A Wellenius; Análisis formal e investigación: José-María Martín-Olalla, Scott Sheridan, Laurence Kalkstein, Gregory A Wellenius; Borrador original: José-María Martín-Olalla, Gregory A Wellenius; Revisión y edición del borrador original: José-María Martín-Olalla, Gregory A Wellenius, Yuval Baharav; Adquisición de fondos: Kathy Baughman-McLeod, Kurt Shickman ; Supervisión: Kurt Shickman, Gregory A Wellenius. Traducción al castellano del original: José-María Martín-Olalla

REFERENCIAS

AEMET, (2023), “Olas de calor en España desde 1975,” .
 Ballester, Joan, Marcos Quijal-Zamorano, Raúl Fernando, Méndez Turrubiates, Ferran Pegenaute, François R Herrmann, Jean Marie Robine, Xavier Basagaña, Cathryn Tonne, Josep M Antó, and Hicham Achekbak (2023), “Heat-related mortality in Europe during the summer of 2022,” *Nature Medicine* 29:7 **29**, 1857–1866.
 Becker, Florian N, Andreas H. Fink, Peter Bissolli, and Joaquim G. Pinto (2022), “Towards a more comprehensive assessment of the intensity of historical European heat waves (1979–2019),” *Atmospheric Science Letters* **23**, e1120.
 Campbell, Sharon, Tomas A. Remenyi, Christopher J. White, and Fay H. Johnston (2018), “Heatwave and health impact research: A global review,” *Health and Place* **53**, 210–218.
 Copernicus, (2022a), “Prolonged and intense heatwave affecting parts of western and northern Europe breaks temperature records; globally, July 2022 was one of three warmest Julys on record,” .
 Copernicus, (2022b), “Summer 2022 Europe’s hottest on record,” .

Copernicus, (2023), “Summer 2023: the hottest on record,” .
 Copernicus, (2024), “Europe experiences widespread flooding and severe heatwaves in 2023,” .
 IPCC, (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Vol. In Press (Cambridge University Press) type: Book.
 Jiménez, Julio Díaz, Rocío Carmona Alférez, and Cristina Linares Gil (2015), *Temperaturas umbrales de disparo de la mortalidad atribuible al calor en España en el periodo 2000-2009*, Vol. 725-15-015-7 (Instituto de Salud Carlos III, Escuela Nacional de Sanidad).
 Kalkstein, Laurence, Scott Sheridan, José-María Martín-Olalla, Elizabeth Berg, Nicholas Maillaux, Sara Pabich, Rebecca Rose, Gregory Wellenius, Kathy Baughman McLeod, Kurt Shickman, and Yuval Baharav (2024), “Development and evaluation of a health-based heat wave categorization system: A case study of Seville, Spain,” 10.5281/zenodo.11407481.
 King, Andrew D, and David J Karoly (2017), “Climate extremes in Europe at 1.5 and 2 degrees of global warming,” *Environmental Research Letters* **12**, 114031.
 Kottek, Markus, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, and Franz Rubel (2006), “World map of the Köppen-Geiger climate classification updated,” *Meteorologische Zeitschrift* **15**, 259–263.
 Masson-Delmotte, V.P., P. Zhai, S.L. Pirani, C. Connors, S. Péan, N. Berger, Y. Caud, L. Chen, M.I. Goldfarb, and Pedro M. Scheel Monteiro (2021), “IPCC, 2021: Summary for policymakers. in: Climate change 2021: The physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,” (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA).
 Metzger, Aaron, Yuval Baharav, Lilly Nichols, Megan Finke, Breahna Saunders, Peter Mitchell, Gregory A. Wellenius, Kathy Baughman McLeod, and Kurt Shickman (2024), “Beliefs and behaviors associated with the first named heat wave in Seville Spain 2022,” *Scientific Reports* 2024 14:1 **14**, 1–10.
 Nairn, John R, Robert J B Fawcett, Kristie L Ebi, and Jeremy Hess (2014), “The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity,” *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2015, Vol. 12, Pages 227–253 **12**, 227–253.
 Nogueira, Paulo, and Eleonora Paixão (2008), “Models for mortality associated with heatwaves: update of the Portuguese heat health warning system,” *International Journal of Climatology* **28**, 545–562.
 Perkins, Sarah E (2015), “A review on the scientific understanding of heatwaves—their measurement, driving mechanisms, and changes at the global scale,” *Atmospheric Research* **164–165**, 242–267.
 Robine, Jean Marie, Siu Lan K. Cheung, Sophie Le Roy, Herman Van Oyen, Clare Griffiths, Jean Pierre Michel, and François Richard Herrmann (2008), “Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003,” *Comptes Rendus - Biologies* **331**, 171–178.
 Royé, Dominic, Raquel Codesido, Aurelio Tobías, and Margarita Taracido (2020), “Heat wave intensity and daily mortality in four of the largest cities of Spain,” *Environmental Research* **182**, 109027.

- Sheridan, Scott C, and Michael J. Allen (2018), “Temporal trends in human vulnerability to excessive heat,” *Environmental Research Letters* **13**, 043001.
- Sheridan, Scott C, P. Grady Dixon, Adam J. Kalkstein, and Michael J. Allen (2021), “Recent trends in heat-related mortality in the united states: An update through 2018,” *Weather, Climate, and Society* **13**, 95–106.
- Staiger, Henning, Gudrun Laschewski, and Angelika Grätz (2012), “The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. part a: Scientific basics,” *International Journal of Biometeorology* **56**, 165–176.
- Steadman, Robert G (1984), “A universal scale of apparent temperature,” *Journal of Climate and Applied Meteorology* **23**, 1674–1687.
- Tullot, Inocencio Font (2000), *Climatología de España y Portugal* (Ediciones Universidad de Salamanca).

Apéndice A: Material adicional



Figura S1 Un mapa sencillo que muestra España (panel principal) y la provincia de Sevilla (ES618) sombreada y la ciudad de Sevilla (círculo negro). Abajo a la derecha la localización en Europa. La ciudad está en las coordenadas 5.99° oeste y 37.24° norte.

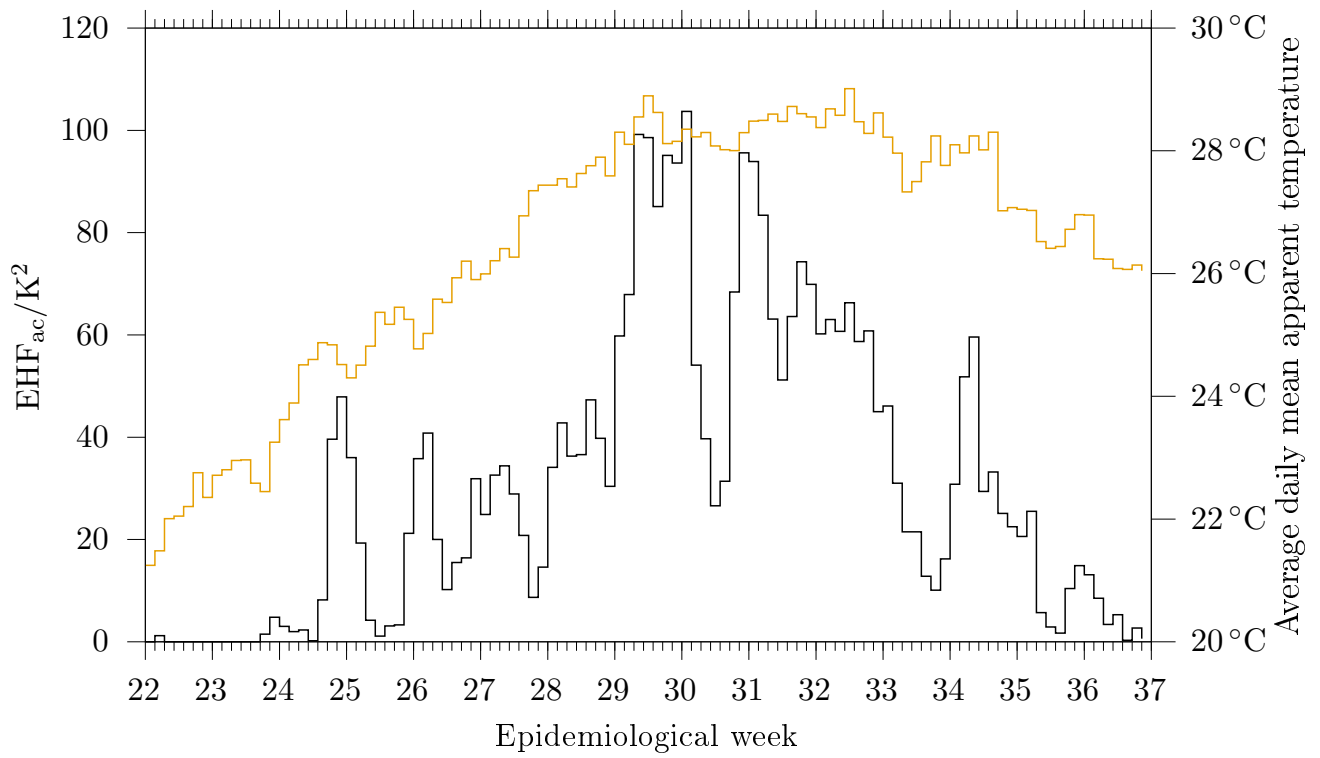


Figura S2 Valores acumulados de EHF diario (negro, eje izquierdo) y temperatura media aparente (naranja, eje derecho) en Sevilla desde el 1973 al 2023. Los datos se muestran para la semana epidemiológica, desde el inicio de la semana 22 al final de la semana 36. Los valores mayores de EHF y de DMAT se observan entre las semanas 29 y 33: final de julio y principios de agosto. El exceso de calor en las semanas 25 y 26 está relacionado principalmente con valores altos de factor de aclimatación, que rara vez tiene importancia después.

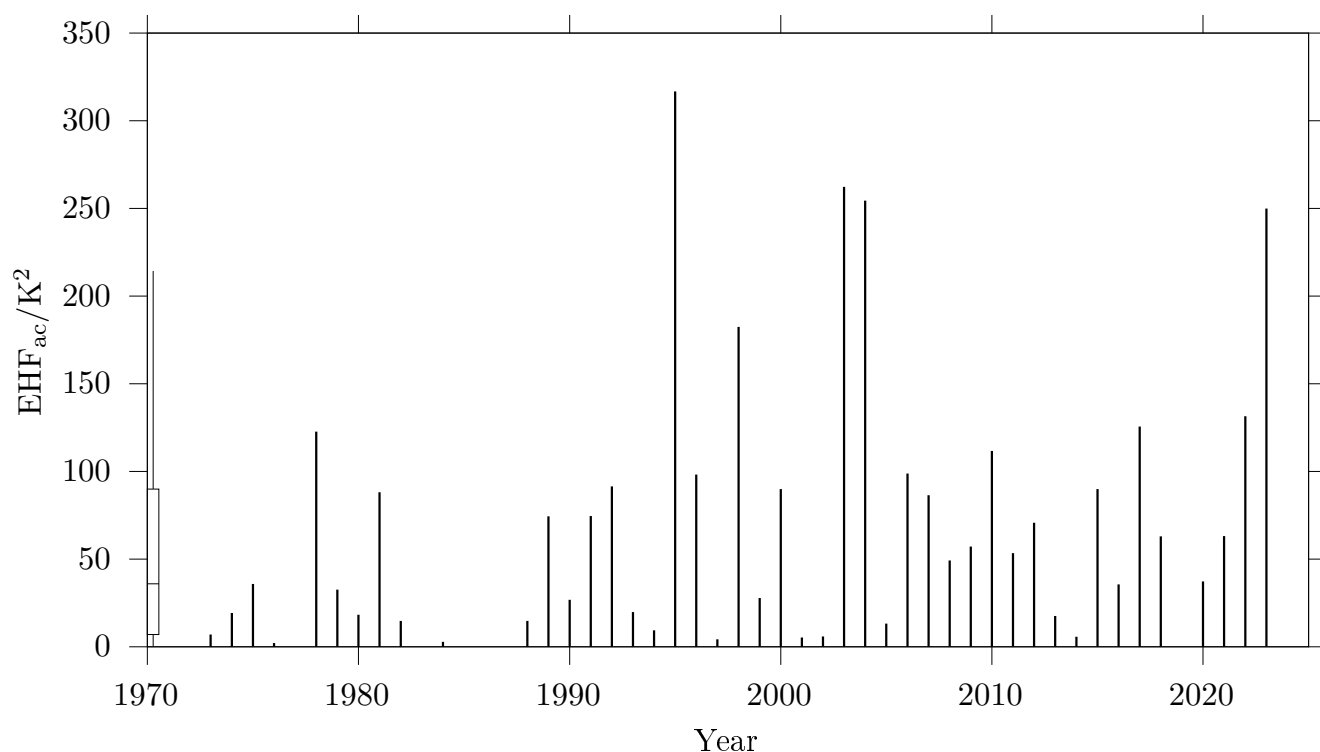


Figura S3 Valores acumulados de EHF por año con una caja con bigotes, a la izquierda, que muestra $Q_1 = 7 \text{ K}^2$ (primer cuartil), $Q_2 = 35.8 \text{ K}^2$ (segundo) y $Q_3 = 89.9 \text{ K}^2$ (tercer). Los bigotes van hasta el valor $Q_3 + 1.5 \times (Q_3 - Q_1) = 214.3 \text{ K}^2$ para identificar los valores atípicos de la distribución: los años 1995, 2003, 2004 y 2023.

Sistema de pronóstico de olas de calor para Sevilla

Nivel 3		Fecha y hora de pronóstico 07/24/2022 09:00:01	
Ola de calor de riesgo muy elevado		24.7.2022	NIVEL 2
		Temperatura Aparente Media	35.0 C
		Temperatura Máxima	45.1 C
		Temperatura Mínima	25.5 C
		Factor de exceso de calor	24.5
		Factor de exceso de calor (total de los 3 días siguientes)	66.5
		Se recibe un nombre la onda de calor:	
		Día de calor: Temperatura máxima superior a 41 grados.	
Nivel 2			
Ola de calor de riesgo elevado		25.7.2022	NIVEL 3
		Temperatura Aparente Media	36.0 C
		Temperatura Máxima	45.1 C
		Temperatura Mínima	29.2 C
		Factor de exceso de calor	26.2
		Factor de exceso de calor (total de los 3 días siguientes)	42.8
		Día de calor: Temperatura máxima superior a 41 grados.	
Nivel 1			
Episodio de calor con impacto medio		26.7.2022	NIVEL 1
		Temperatura Aparente Media	32.0 C
		Temperatura Máxima	40.9 C
		Temperatura Mínima	23.1 C
		Factor de exceso de calor	15.8
		Factor de exceso de calor (total de los 3 días siguientes)	16.6
Sin aviso			
		27.7.2022	NIVEL 0
		Temperatura Aparente Media	26.4 C
		Temperatura Máxima	35.2 C
		Temperatura Mínima	19.6 C
		Factor de exceso de calor	8.8
		28.7.2022	SIN AVISO
		Temperatura Aparente Media	26.3 C
		Temperatura Máxima	36.6 C
		Temperatura Mínima	18.2 C
		Factor de exceso de calor	0.0

Figura S4 Captura de pantalla de la página web de ProMeteo cuando se decidió lanza el nombre de Zoe el 2022-07-24 07:00UTC. El panel de arriba izquierda muestra los códigos de color asociados con cada una de las cinco categorías. El panel de la derecha muestra la predicción a cinco días, con la categoría y el color correspondiente. Se advierte de que el EHF se calculaba incorrectamente por entonces. El error no influía en el sistema de categorización.

Sistema de pronóstico de olas de calor para Sevilla

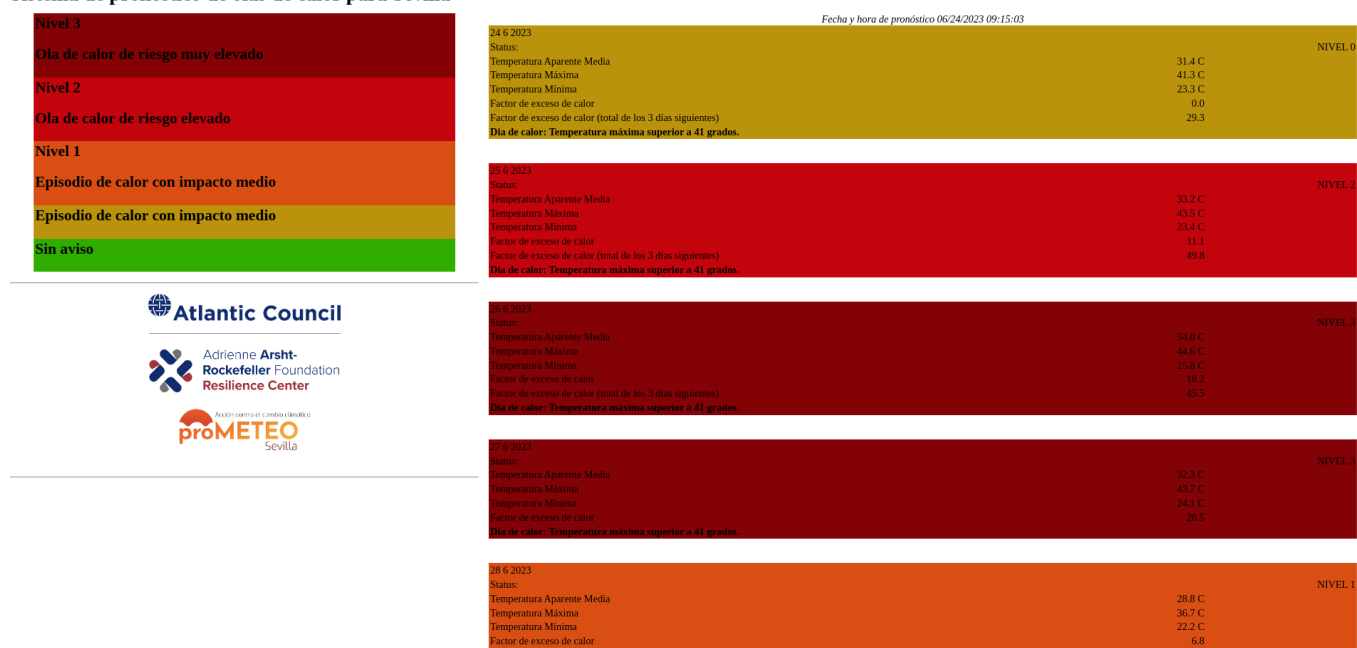


Figura S5 Captura de pantalla de la página web de ProMeteo cuando la ola de calor Yago fue anunciada el 2023-06-24 07:15UTC. El panel superior izquierdo muestra los códigos de color asociados con las cinco categorías. El panel de la derecha muestra el pronóstico para cinco días con categoría y color.

Sistema de pronóstico de olas de calor para Sevilla



Figura S6 Captura de pantalla de la página web de ProMeteo cuando la ola de calor Xenia fue anunciada el 2023-07-29 07:15UTC. El panel superior izquierdo muestra los códigos de color asociados con las cinco categorías. El panel de la derecha muestra el pronóstico para cinco días con categoría y color.

Sistema de pronóstico de olas de calor para Sevilla

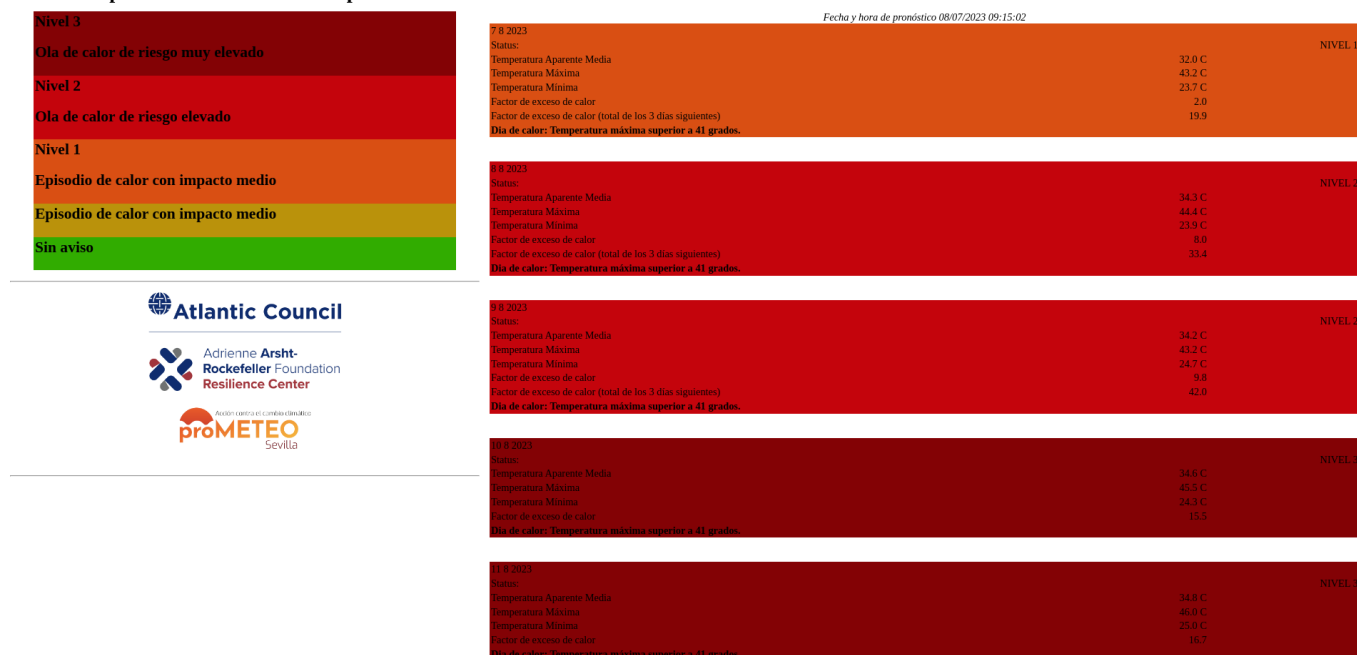


Figura S7 Captura de pantalla de la página web de ProMeteo cuando la ola de calor Wenceslao fue anunciada el 2023-08-07 07:15UTC. El panel superior izquierdo muestra los códigos de color asociados con las cinco categorías. El panel de la derecha muestra el pronóstico para cinco días con categoría y color.

Sistema de pronóstico de olas de calor para Sevilla

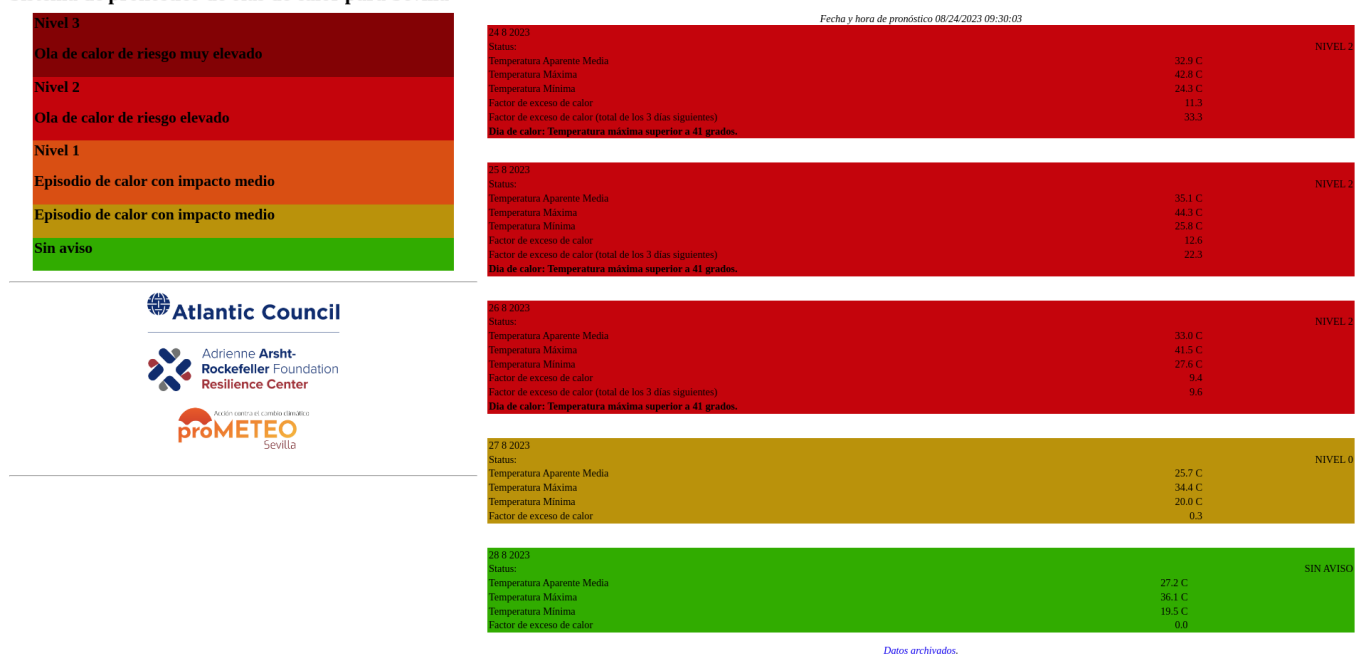


Figura S8 Captura de pantalla de la página web de ProMeteo cuando la ola de calor Vera fue anunciada el 2023-08-24 07:30UTC. El panel superior izquierdo muestra los códigos de color asociados con las cinco categorías. El panel de la derecha muestra el pronóstico para cinco días con categoría y color.