

INTENSIDAD Y EXTENSIÓN ESPACIAL DE LAS OLAS DE FRÍO EN LA PENÍNSULA IBÉRICA: PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA LA SEGUNDA MITAD DE SIGLO (2050-2095)

Alejandro DÍAZ-POSO¹, Nieves LORENZO², Alberto MARTI¹ y Dominic ROYÉ³

¹*Departamento de Geografía, Universidade de Santiago de Compostela, España.*

²*Departamento de Física Aplicada, Universidade de Vigo, España.*

³*Climate Researcch Foundation (FIC), Gran Vía 22, 28013, Madrid, España.*

a.diaz.poso@usc.es, nlorenzo@uvigo.es, alberto.marti@usc.es,

dominic.roye@ficlima.org

RESUMEN

En el contexto actual de calentamiento global las olas de frío han generado una menor atención en la comunidad científica que las olas de calor, pese a sus considerables impactos en la salud pública, en el consumo de energía, en la agricultura o en las infraestructuras de transporte. Este estudio analiza los escenarios de vías de concentración representativas (RCP) 4.5 y RCP 8.5 bajo simulaciones EURO-CORDEX, utilizando el índice biometeorológico Excess Cold Factor (ECF) para la Península Ibérica y Baleares (PIB). El índice ECF considera la temperatura media diaria para un promedio de tres días, así como para los últimos treinta días, teniendo en cuenta, por lo tanto, la aclimatación de la población al frío. El estudio evalúa la intensidad y la extensión espacial de las olas de frío (OF) para la segunda mitad del siglo XXI (2050-2095) con respecto al periodo histórico (1971-2000). Los resultados proyectan una disminución en ambas dimensiones. Se prevé un descenso del 16% en la intensidad máxima de las OF, el cual será más pronunciado en la mitad norte peninsular (< -50%). La extensión espacial media disminuirá entre un 0,7% y 3,2% por década, lo que implicará una menor exposición. Sin embargo, el escenario RCP 8.5 registrará una mayor intensidad máxima que el RCP 4.5, confirmando que las OF persistirán, incluso bajo un forzamiento radiativo elevado. En combinación con la aclimatación de la población a temperaturas más altas, las OF seguirán siendo una amenaza local importante.

Palabras clave: Cambio climático, olas de frío, intensidad, extensión espacial, Península Ibérica, ECF.

ABSTRACT

In the current context of global warming, cold waves have received less attention from the scientific community than heat waves, despite their significant impacts on public health, energy consumption, agriculture, and transportation infrastructure. This study analyzes the Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 and RCP 8.5 scenarios under EURO-CORDEX simulations, using the biometeorological index Excess Cold Factor (ECF) for the Iberian Peninsula and Balearic Islands (IPB). The ECF index considers the daily mean temperature over a three-day period, as well as

the previous thirty days, thus accounting for population acclimatization to cold. The study evaluates the intensity and spatial extent of cold waves (CW) for the second half of the 21st century (2050-2095) compared to the historical period (1971-2000). The results project a decrease in both dimensions. A 16% decrease is expected in the maximum intensity of CW, being more pronounced in the northern half of the peninsula (< -50%). The average spatial extent will decrease by 0.7% to 3.2% per decade, implying lower exposure. However, the RCP 8.5 scenario will record higher maximum intensity than RCP 4.5, confirming that CW will persist, even under a high radiative forcing scenario. Combined with population acclimatization to higher temperatures, CW will continue to pose a significant local threat.

Key words: Climate change, cold waves, intensity, spatial extent, Iberian Peninsula, ECF.

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de aumento global de las temperaturas atribuido al cambio climático, el estudio de las olas de frío (en adelante, OF) ha suscitado un menor interés en la comunidad científica que las olas de calor. Pese a que en las últimas décadas se ha observado una disminución de su frecuencia y extensión espacial, especialmente en las latitudes medias del hemisferio norte (Van Oldenburg et al., 2019), las OF continúan siendo importantes eventos meteorológicos extremos (Spinoni et al. 2015; Piticar et al. 2018; Smid et al. 2019; Espín-Sánchez y Conesa-García, 2021; Serrano-Notívoli et al. 2022). A pesar del calentamiento global, se espera que la mortalidad relacionada con el frío no disminuya debido al envejecimiento de la población (Gao et al., 2024), pudiendo incluso superar la mortalidad por olas de calor (Vardoulakis et al. 2014; Gasparrini et al. 2015; Carmona et al. 2016). Aunque menos frecuentes, especialmente en Escandinavia y el noreste de Rusia (Carvalho et al. 2021), los episodios de temperaturas extremadamente frías seguirán produciéndose en Europa a lo largo de este siglo (Kodra et al. 2011), como ejemplifica la reciente ola de frío en Fennoscandia de 2024 (Pinto et al., 2024). Junto con Italia y Grecia, España y Portugal son los países con la mayor tasa de exceso de mortalidad invernal y el nivel más bajo de eficiencia térmica doméstica de Europa (Healy, 2003; Ordanovich et al. 2023). Las futuras olas de frío, aunque menos severas, podrían implicar un mayor impacto sobre la salud, ya que su menor frecuencia podría dar lugar a una disminución de la percepción del riesgo y de las medidas de adaptación (Pinto et al. 2024). Las proyecciones futuras para la Península Ibérica y Baleares (en adelante, PIB) muestran un claro consenso en que la intensidad, duración y especialmente, frecuencia y extensión espacial de las OF disminuirá (Pereira et al. 2017; Viceto et al. 2019; Serrano-Notívoli et al. 2022; Díaz-Poso et al. 2023a). Actualmente no existe una definición cuantitativa universalmente aceptada de OF (Añel et al., 2017). La gran mayoría de índices y organizaciones utilizan un umbral de temperatura mínima, así como una extensión y duración mínimas (Spinoni et al. 2015; Pereira et al. 2017; Smid et al. 2019; Viceto et al. 2019; Serrano-Notívoli et al., 2022). Al igual que las olas de calor, las OF pueden caracterizarse considerando cuatro dimensiones: intensidad, duración, frecuencia y extensión espacial (Raei et al. 2018). Las dimensiones de

intensidad y extensión espacial han sido considerablemente menos estudiadas en el ámbito de la PIB (Espín-Sánchez and Conesa-García, 2021; Serrano-Notívoli et al. 2022; Díaz-Poso et al. 2023a).

Desarrollado por Nairn y Fawcett (2013), el Excess Cold Factor (ECF) es un índice biometeorológico que integra la intensidad y el proceso de aclimatación del cuerpo humano al frío (Wang et al., 2016). Asimismo, puede utilizarse en cualquier lugar para el que se disponga de datos, ya que sus valores son relativos al clima local. Como han constatado Nairn et al., (2018) y Díaz-Poso et al., (2023b) con su índice análogo Excess Heat Factor, el índice ECF podría ser más sensible a las variaciones locales de temperatura que otros índices que utilizan umbrales de temperatura mínima, permitiendo alertar anticipadamente a la población de una OF, factor clave para minimizar su impacto sanitario. El objetivo de este trabajo es analizar la evolución de la intensidad y extensión espacial de las OF en la PIB en la segunda mitad de siglo (2050-2095), utilizando el índice ECF y cinco simulaciones del proyecto EURO-CORDEX bajo los escenarios de vías de concentración representativas (de ahora en adelante, RCP) 4.5 y RCP 8.5.

2. DATOS Y MÉTODOS

2.1. Modelos climáticos

Los datos diarios de temperatura máxima y mínima para 2050-2095 se obtuvieron a partir de cinco simulaciones y dos escenarios futuros del proyecto EURO-CORDEX (<http://www.euro-cordex.net/>). Este proyecto ofrece una resolución para el dominio europeo de 0, 11° (~ 12.5 km). Para la obtención de las simulaciones, el Modelo Climático Regional (MCR) RCA4 ha sido forzado por 5 Modelos Climáticos Globales (MCG) (Tabla 1). La decisión de utilizar RCA4 en la PIB se fundamenta en su eficiencia para simular el clima del periodo de referencia 1971-2000 (Kjellström et al., 2016). Para proyectar las temperaturas futuras, se emplearon los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5.

| Proyecto | MCG | MCR |
|-------------|-----------------|------|
| EURO-CORDEX | CNRM-CM5 | RCA4 |
| | EC-EARTH-ICHEC | |
| | IPSL-CM5A-MR | |
| | HADGEM2-ES-MOHC | |
| | MPI-ESM-LR | |

Tabla 1: Modelos utilizados en el análisis.

2.2. Excess Cold Factor

El índice ECF es una medida de intensidad de la ola de frío desarrollada por Nairn y Fawcett (2013). Es una factorización de dos índices de exceso de frío diario y por lo tanto su resultado se expresa en $^{\circ}\text{C}^2$. El primero es el índice de significación (ECI_{sigi}), el cual compara la temperatura media diaria para un periodo de tres días, con el percentil 5 de temperatura media del periodo climático de referencia. Si es negativo, se considera que el periodo es inusualmente frío en comparación con el clima anual local.

$$ECIsigi=Ti+Ti+1+Ti+23-T05$$

Donde: i es cada día del periodo de estudio, T la temperatura media diaria y $T05$ el percentil 5 de la temperatura media del periodo de referencia (1971-2000). El segundo componente de ECF es el índice de aclimatación (ECF_{accli}), el cual compara la temperatura media alcanzada durante el periodo de tres días considerado, con la temperatura media de los 30 días previos.

$$ECIaccli=Ti+Ti+1+Ti+23-Ti-1+\dots+Ti-3030$$

ECF está diseñado para que el índice de aclimatación (ECI_{accli}) sea un factor amplificador del índice de significación (ECI_{sigi}), por lo que, para no reducir la significación del exceso de frío del umbral climático, ha de ser < -1 . Sólo los valores de $ECF_i < 0$ se consideran días de OF.

$$ECFi=ECIsigi \cdot \min(-1, ECIaccli)$$

2.3. Análisis de datos

Las proyecciones para 2050-2095 se evaluaron utilizando la media del conjunto multi-model resultante de las cinco simulaciones. Los datos del periodo de referencia 1971-2000 se utilizaron para obtener la señal de cambio climático simulada por RCA4. Esta señal se obtuvo utilizando el “método delta” (Zahn y Von Storch, 2010) aplicado a escala climatológica. Este método se basa en un “salto” en la media, el cual manifiesta la señal de cambio climático, preservando la distribución observada en el tiempo presente y mostrando las diferencias entre periodo de referencia y proyectado. El “delta” con el que se calcula el cambio porcentual entre los valores del periodo de referencia y los obtenidos en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, se obtiene restando la media de la integración de referencia 1971-2000 de la media de integración 2050-2095. Se utilizó la suma de rangos de Wilcoxon para evaluar si estos cambios fueron significativos ($\alpha = 0,05$). Esta prueba no paramétrica se utiliza para determinar si las distribuciones de dos muestras independientes son diferentes (Wilcoxon, 1945). El análisis de tendencias se realizó mediante la aplicación de la prueba no paramétrica de Mann-Kendall, con un nivel de confianza del 95% (Mann, 1945; Kendall, 1975).

3. RESULTADOS

En la segunda mitad de siglo, las tendencias de ECF mostrarán importantes diferencias regionales, como se observó en el periodo de referencia 1971-2000. La intensidad media anual negativa de ECF (ECF_{mean}) para 2050-2095 se muestra en la Figura 1 para ambos escenarios. Los valores bajos de ECF_{mean} , correspondientes a una intensidad media más alta, se distribuyen de forma similar en ambos escenarios, no observándose una influencia latitudinal relevante, como en 1971-2000. Destacan las zonas del E y NE peninsular (≤ -6 °C²), y especialmente las principales elevaciones de la PIB (≤ -10 °C²). La disminución de la intensidad media anual es considerable respecto al periodo de referencia, con una media espacial para ambos escenarios de $-3,1$ °C², lo que supone una disminución del -34% .

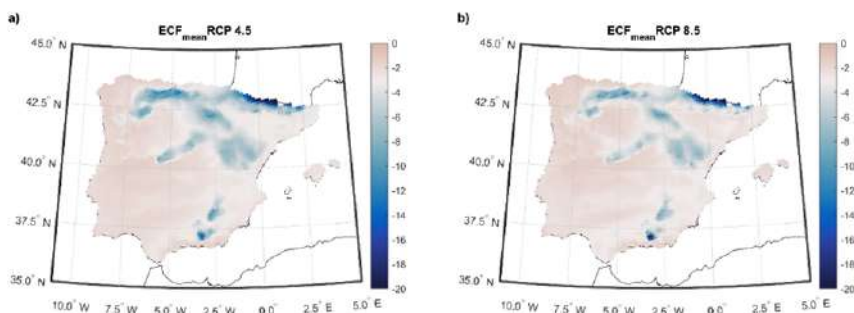


Fig. 1: a) ECF_{mean} para 2050-2095, RCP 4.5 (media $-3.2^{\circ}C^2$); b) ECF_{mean} para 2050-2095, RCP 8.5 (media $-2.9^{\circ}C^2$) (media espacial $-3.1^{\circ}C^2$)

La figura 2 muestra la distribución de la intensidad máxima anual (ECF_{min}) para ambos escenarios. Se espera que las OF sean mucho menos intensas en la PIB para ambos escenarios ($-23,48^{\circ}C^2$) que en el periodo de referencia ($-52,46^{\circ}C^2$). Asimismo, la intensidad máxima para el conjunto de la PIB será mayor en el escenario RCP 8.5 ($-24,54^{\circ}C^2$) que en el RCP 4.5 ($-22,44^{\circ}C^2$).

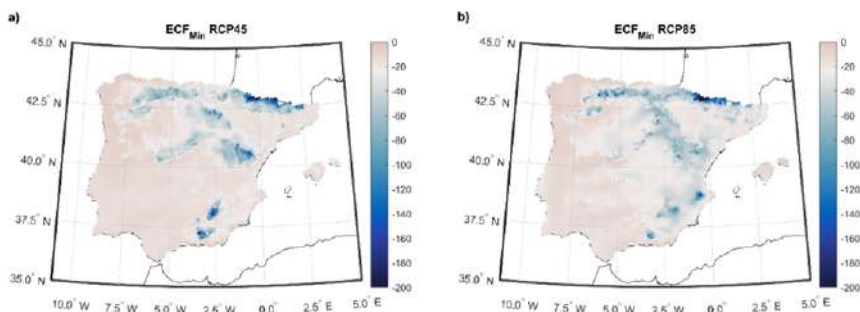


Fig. 2: a) ECF_{min} para 2050-2095, RCP 4.5 (media $-22,44^{\circ}C^2$); b) ECF_{min} para 2050-2095, RCP 8.5 (media $-24,54^{\circ}C^2$) (media espacial $-23,48^{\circ}C^2$)

El patrón espacial para ambos escenarios es similar a ECF_{mean} , con mayores intensidades el N y NE peninsular ($< -50^{\circ}C^2$), y especialmente en los sistemas montañosos, independientemente de su latitud. Destacan los Pirineos ($< -180^{\circ}C^2$), y en menor medida la Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico y Sistema Bético ($\leq -100^{\circ}C^2$). Asimismo, en las estribaciones de las principales elevaciones, las intensidades son mayores que en el resto de la península. Las intensidades máximas más bajas se registran en la franja occidental y SO de la península, así como en las zonas costeras ($< -20^{\circ}C^2$). Los patrones espaciales de ECF_{mean} y ECF_{min} para este periodo muestran una fuerte dependencia altitudinal. El efecto continental es menos relevante, con mayor influencia en la submeseta norte que en la sur debido a su mayor altitud media. No hay efecto latitudinal y el comportamiento similar es similar al observado tanto en

el periodo de referencia, como en la primera mitad de siglo (2021-2050) (Díaz-Poso et al., 2023a). La figura 3 muestra el cambio porcentual de ECF_{min} . Las OF serán menos intensas en la segunda mitad del siglo que en el periodo de referencia. El cambio porcentual es significativo en toda la PIB. En ambos escenarios, el calentamiento es ligeramente más pronunciado en la mitad norte de la península ($< -50\%$), independientemente de la altitud. El calentamiento medio en el escenario RCP 8.5 será menor. En este escenario, de intensidades de mayor magnitud (Fig. 2b), se produce un mayor calentamiento en el tercio norte peninsular, así como un aumento de la intensidad de las OF en ambas mesetas ($\leq 50\%$). Localmente, en el extremo oriental del Sistema Bético, se producirán incrementos que oscilan entre el 150% y el 200% respecto al periodo histórico de referencia. El calentamiento medio ECF_{min} para ambos escenarios será del 15,85%.

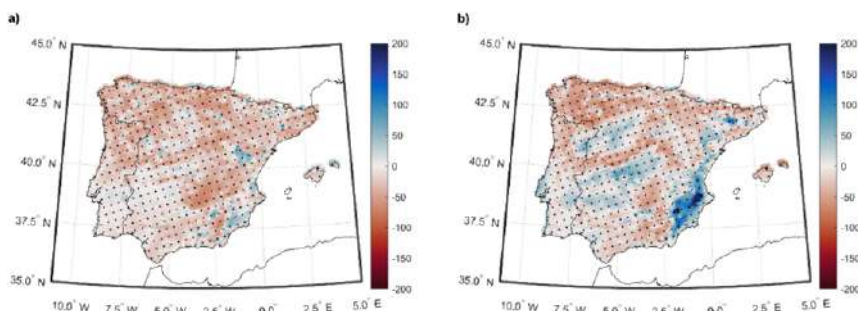


Fig. 3: Porcentaje de cambio en ECF_{min} para 2050-2095 en comparación a 1971-2000 para ambos escenarios: a) RCP 4.5 (calentamiento medio del 21,6%); y b) RCP 8.5 (calentamiento medio del 10,1%). Puntos: cambio significativo $\alpha = 0,05$

Las tendencias de ECF_{min} para 2050-2095 oscilan entre $3^{\circ}C^2/década$ y $-2^{\circ}C^2/década$ para el escenario RCP 4.5. Las tendencias negativas más destacables (correspondientes a un aumento de la intensidad) se registran principalmente en las estribaciones meridionales de sistemas montañosos como Central o Bético ($\sim -2^{\circ}C^2/década$), aunque no son significativas. Las principales tendencias positivas ($2-3^{\circ}C^2/década$) ocupan una mayor extensión, aunque tampoco son significativas, registrándose en Montes de León, Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico, y ocasionalmente el Sistema Central y Pirineos. Los descensos de intensidad significativos son moderados ($0-1^{\circ}C^2/década$) y se limitan a áreas muy reducidas del NE peninsular. Para RCP 8.5, las tendencias positivas se registran en áreas montañosas muy reducidas, y ninguna es significativa, al igual que las negativas. Por lo tanto, no habrá una tendencia significativa relevante en la segunda mitad del siglo, ya que se partirá de valores de intensidad máxima de menor magnitud que se mantendrán similares hasta finales de siglo. La figura 4 muestra la distribución de la extensión anual de las OF en la PIB para 2050-2095 mediante diagrama box-plot. Mientras que en 1971-2000 la extensión máxima (límite superior) superó el 30% de la PIB en 21 años (70% de los años), en 2050-2095 sólo se superará en dos ocasiones en el escenario RCP 4,5 (4,35% de los años) y nunca en el RCP 8,5. En este escenario la extensión máxima no alcanzará el 20% de la extensión de la IPB en ningún año,

mientras que, en 1971-2000, esto ha sido un acontecimiento extraordinario, pues sólo ha ocurrido en un año. El 50% de las OF, representado como el rango intercuartílico (la diferencia entre los percentiles 75 y 25), muestra cómo la mitad de las OF tendrán una extensión espacial mucho menor que en 1971-2000, especialmente en RCP 8.5. Aunque muy infrecuentes, también pueden producirse OF extensas, como muestran los valores atípicos, que cubren más del 40% / 30% de la extensión de la PIB en los escenarios RCP 4.5 / RCP 8.5, respectivamente.

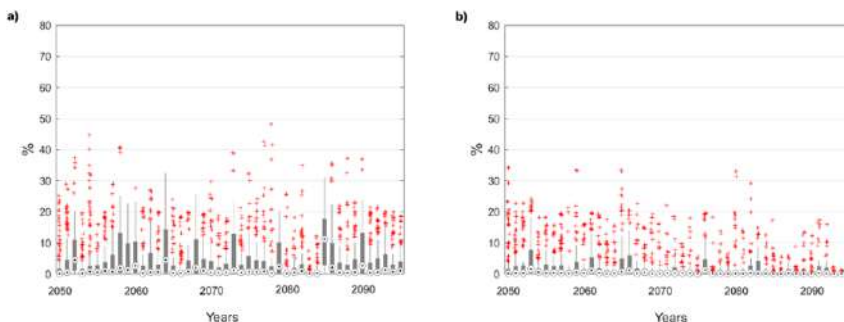


Fig. 4: Distribución de la extensión espacial anual de las olas de frío en la PIB (2050-2095): a) RCP 4.5; y b) RCP 8.5

Pese a que a principios de la segunda mitad de siglo las extensiones previstas ya son bajas, las tendencias futuras muestran una disminución de la extensión media de las OF del $-0,1\%$ /década para el escenario RCP 4.5 y del $-0,5\%$ para RCP 8.5, siendo la tendencia negativa más acentuada en la extensión máxima, que disminuye un $-0,7\%$ y un $-3,2\%$ por década, respectivamente.

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este trabajo analiza la intensidad y extensión de las OF en la PIB para la segunda mitad de siglo. Para ello se utiliza el índice ECF (Nairn y Fawcett, 2013; Díaz-Poso et al., 2023a) y el periodo 1971-2000 como referencia. Se han utilizado los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 para cuantificar el comportamiento diferencial entre ambos forzamientos radiativos a finales de siglo, lo que contribuirá a una mejor comprensión de la intensidad de las futuras OF. Los resultados muestran como el patrón espacial de intensidad media y máxima de ECF observado en 1971-2000 se repetirá en 2050-2095. Las intensidades serán mayores en el E y NE de la PIB, así como en los principales sistemas montañosos, mientras que las más bajas se registrarán en el O y SO de la PIB. Este patrón de distribución espacial responde a la presencia de una vaguada a 500 hPa sobre el NE de la PIB, que conduce una masa de aire continental extremadamente fría hacia regiones del E y NE de la PIB. Este patrón da lugar a la mayor parte de las OF que afectan a la PIB (Mohammed et al. 2018; Serrano-Notívoli et al. 2022; Díaz-Poso et al. 2023a). Las intensidades máximas y medias para ambos escenarios serán muy inferiores a las registradas en 1971-2000. En líneas generales, tanto para ECF_{mean} como ECF_{min} , existe una dependencia inversamente proporcional entre intensidad y altura, sin influencia latitudinal. En ambos escenarios de ECF_{min} ,

las mayores intensidades se alcanzan en Pirineos, Cordillera Cantábrica, Sistema Ibérico y Sistema Bético. Asimismo, la intensidad máxima (ECF_{min}) para la PIB será mayor en el escenario RCPC 8.5 que en el escenario RCP 4.5, e incluso bajo un forzamiento radiativo severo (RCP 8.5), la ocurrencia de las OF experimentará una gran variabilidad (Kodra et al., 2011). Este hallazgo contrasta totalmente con el de Smidt et al., (2019), que predicen la completa desaparición de las OF a finales de siglo. No se observan tendencias significativas para ECF_{min} , dado que a partir de la década de 2050 los valores se mantendrán, aproximadamente, similares hasta finales de siglo. En lo que respecta a extensión, las proyecciones de ECF muestran tendencias negativas para 2050-2095, aunque no son muy notorias, ya que la extensión media de las OF en 2050 se corresponderá a un porcentaje realmente bajo de la extensión de la PIB.

Estos resultados son coherentes con los estudios que han abordado las dimensiones de intensidad y extensión en las últimas décadas a nivel europeo/PIB, tanto con ECF (Piticar et al. 2018; Espín-Sánchez y Conesa-García, 2021), como con otro tipo de índices (Spinoni et al. 2015; Van Oldenborgh et al. 2019; Serrano-Notivol et al. 2022). Ambos descensos también coinciden con las escasas proyecciones que incluyen OF en la segunda mitad de siglo (Pereira et al. 2017; King y Karoly, 2017; Viceto et al. 2018). Asimismo, la reducción actual de la mortalidad relacionada con el frío debido al aumento de las temperaturas (Wang et al. 2016; Gasparrini et al. 2017) dará paso a un aumento en el futuro debido al envejecimiento de la población, que a su vez estará aclimatada a temperaturas más elevadas (Vardoulakis et al. 2014; Ordanovich et al. 2023; Chen et al. 2024) y será altamente vulnerable a las OF (Gasparrini et al. 2015; Carmona et al. 2016; Vicedo-Cabrera et al. 2018). Además, en un contexto de menor frecuencia de OF, la percepción del riesgo podría disminuir, así como las medidas de adaptación (Pinto et al., 2024), lo que implicaría una gran amenaza para la población, pues, como se ha constatado, las OF seguirán aconteciendo en la segunda mitad de siglo, incluso bajo escenarios de gran forzamiento radiativo, por lo que será necesario establecer y desarrollar planes regionales de respuesta a las OF. En este sentido, al igual que EHF (Díaz-Poso et al., 2023b), ECF es una herramienta útil en la toma de decisiones relativas a alertas sanitarias por OF. Las principales conclusiones son las siguientes:

- Las dimensiones de intensidad y extensión espacial disminuirán en magnitud en la segunda mitad de siglo.
- Las mayores intensidades de ECF se registrarán en el N y NE de la península y en las regiones montañosas. En el O y SO de la península y en las zonas costeras, las OF tendrán menor intensidad.
- La disminución media de la intensidad máxima de las OF en la PIB será del 16%. Esta disminución será menor en el escenario RCPC 8.5 y su variabilidad mayor, con disminuciones/aumentos locales de intensidad más acusados.
- La extensión máxima de las OF seguirá disminuyendo mucho más que la extensión media, con descensos que oscilan entre el -0,7%/década y el -3,2%/década.
- La tendencia negativa en la extensión espacial obtenida es de mayor magnitud en el escenario RCP 8.5 que en el que RCP 4.5

AGRADECIMIENTOS

Alejandro Díaz Poso agradece su apoyo al programa FPU del Ministerio de Universidades [número de contrato FPU20 – 04454]

REFERENCIAS

- Añel JA, Fernández-González M, Labandeira X, López-Otero X, De la Torre L (2017) Impact of cold waves and heat waves on the energy production sector. *Atmosphere*. 8(11), 209. <https://doi.org/10.3390/atmos8110209>
- Carmona R, Díaz J, Mirón JJ et al (2016) Geographical variation in relative risks associated with cold waves in Spain: The need for a cold wave prevention plan. *Environ. Int.* 88:103–111. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.027>
- Carvalho D, Cardoso Pereira S et al (2021) Future surface temperatures over Europe according to CMIP6 climate projections: An analysis with original and bias-corrected data. *Climatic Change* 167, 10. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03159-0>
- Chen K, de Schrijver E, Sivaraj S et al (2024) Impact of population aging on future temperature-related mortality at different global warming levels. *Nat Commun* 15, 1796. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-45901-z>
- Díaz-Poso A, Lorenzo N, Martí A et al (2023a) Cold wave intensity on the Iberian Peninsula: Future climate projections. *Atmos. Res.* 295, 107011, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107011>
- Díaz-Poso A, Lorenzo N, Royé D (2023b) Spatio-temporal evolution of heat wave severity and expansion across the Iberian Peninsula and Balearic Islands. *Environ. Res.* 217, 114864. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114864>
- Espín-Sánchez D, Conesa-García C (2021) Spatio-temporal changes in the heatwaves and coldwaves in Spain (1950-2018): Influence of the East Atlantic Pattern. *Geogr. Pannonica*, 25, 168-183. <https://doi.org/10.5937/gp25-31285>
- Gao Y, Huang W, Zhao Q et al (2024) Global, regional, and national burden of mortality associated with cold spells during 2000-19: A three-stage modelling study. *Lancet Planet Health*, 8:e108-16. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(23\)00277-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(23)00277-2)
- Gasparrini A, Guo Y, Hashizume M et al (2015) Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: A multicountry observational study. *Lancet*. 386 (9991), 369–375. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(14\)62114-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(14)62114-0)
- Gasparrini A, Guo Y, Sera F et al (2017) Projections of temperature-related excess mortality under climate change scenarios. *Lancet Planet. Health*. 1, e360–e367. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30156-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30156-0)
- Healy JD (2003) Excess winter mortality in Europe: A cross-country analysis identifying key risk factors. *J. Epidemiology Community Health*. 57(10):784–789. <http://dx.doi.org/10.1136/jech.57.10.784>
- Kendall MG (1975) Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London, p. 120
- King AD, Karoly DJ (2017) Climate extremes in Europe at 1.5 and 2 degrees of global warming. *Environ. Res. Lett.* 12, 114031. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa8e2c>
- Kodra E, Steinhäuser K, Ganguly AR (2011) Persisting cold extremes under 21st-Century warming scenarios. *Geophys. Res. Lett.* 38, L08705. <https://doi.org/10.1029/2011GL047103>
- Kjellström E, Bärning L, Nikulin C et al (2016) Production and use of regional climate model projections – a Swedish perspective on building climate services. *Clim. Serv.* 2-

- 3,15-29.<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.004>
- Mann HB (1945) Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. 13, 245–259.
- Mohammed AJ, Alarcón M, Pino D (2018) Extreme temperature events on the Iberian Peninsula: Statistical trajectory analysis and synoptic patterns. *Int. J. Climatol.*, 38, 5305–5322.<https://doi.org/10.1002/joc.5733>
- Nairn J, Fawcett R (2013) Defining heatwaves: Heatwave defined as a heat-impact event servicing all community and business sectors in Australia. Centre for Australian Weather and Climate Research: Melbourne, Australia; p. 84.
- Serrano-Notivol R, Lemus-Canovas M, Barroo S et al (2022) Heat and cold waves in mainland Spain: Origins, characteristics, and trends. *Weather. Clim. Extremes*. 37 (4), 100471. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100471>
- Smid M, Russo S, Costa AC et al (2019) Ranking European capitals by exposure to heat waves and cold waves. *Urban Clim.* 27, 388–402. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.12.010>
- Spinoni J, Lakatos M, Szentimrey T et al (2015) Heat and cold waves trends in the Carpathian Region from 1961 to 2010. *Int. J. Climatol.* 35,4197–4209.<https://doi.org/10.1002/joc.4279>
- Ordanovich D, Tobías A, Ramiro D (2023) Temporal variation of the temperature-mortality association in Spain: A nationwide analysis. *Environ. Health*. 22, 5. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00957-6>
- Pereira SC, Marta-Almeida M, Carvalho AC et al (2017) Heat wave and cold spell changes in Iberia for a future climate scenario. *Int. J. Climatol.* 37, 5192–5205. <https://doi.org/10.1002/joc.5158>
- Pinto I, Rantanen M, Ødemark K et al (2024) Extreme cold will still occur in Northern Europe, although less often: Risking decreasing preparedness and higher vulnerability. Grantham Institute for Climate Change. <https://doi.org/10.25561/108899>
- Piticar A, Croitoru AE, Ciupertea FA et al (2018) Recent changes in heat waves and cold waves detected based on excess heat factor and excess cold factor in Romania. *Int. J. Climatol.*, 38: 1777–1793.<https://doi.org/10.1002/joc.5295>
- Raei E, Nikoo MR, AghaKouchak A et al (2018) GHWR: A multi-method global heatwave and warm-spell record and toolbox. *Sci. Data* 5, 180206.<https://doi.org/10.1038/sdata.2018.206>
- Vardoulakis S, Dear K, Hajat S et al (2014) Comparative assessment of the effects of climate change on heat- and cold-related mortality in the United Kingdom and Australia. *Environ. Health Perspect.* 122 (12), 1285–1292.<https://doi.org/10.1289/ehp.1307524>
- Van Oldenborgh GJ, Mitchell-Larson E, Vecchi GA et al (2019) Cold waves are getting milder in the northern midlatitudes. *Environ. Res. Lett.* 14. 114004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4867>
- Vicedo-Cabrera AM, Guo Y, Sera F et al (2018) Temperature-related mortality impacts under and beyond Paris Agreement climate change scenarios. *Clim. Chang.* 150,391.<https://doi.org/10.1007/s10584-018-2274-3>
- Viceto C, Pereira SC, Rocha A (2019) Climate change projections of extreme temperatures for the Iberian Peninsula. *Atmosphere*. 10(5), 229. <https://doi.org/10.3390/atmos10050229>
- Wang Y, Shi L, Zanobetti A et al (2016) Estimating and projecting the effect of cold waves on mortality in 209 US cities. *Environ. Int.* 94, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.05.008>
- Wilcoxon F (1945) Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics*. 1, 80–83.
- Zahn M, von Storch H (2010) Decreased frequency of North Atlantic polar lows associated with future climate warming. *Nature*, 467, 309–312. <https://doi.org/10.1038/nature09388>