



Universitat
de les Illes Balears

TRABAJO DE FIN DE GRADO

CAMBIOS FUTUROS DE LAS OLAS DE CALOR EN LA PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES

Bernat Amengual Mesquida

Grado de Física

Facultad de Ciencias

Año Académico 2020-21

CAMBIOS FUTUROS DE LAS OLAS DE CALOR EN LA PENÍNSULA IBÉRICA Y LAS ISLAS BALEARES

Bernat Amengual Mesquida

Trabajo de Fin de Grado

Facultad de Ciencias

Universidad de las Illes Balears

Año Académico 2020-21

Palabras clave del trabajo:

Ola de calor, cambio climático, RCP 8.5, RCP 2.6

Nombre Tutor del Trabajo: Daniel Argüeso Barriga

Se autoriza la Universidad a incluir este trabajo en el Repositorio Institucional para su consulta en acceso abierto y difusión en línea, con fines exclusivamente académicos y de investigación

| Autor | | Tutor | |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Sí | No | Sí | No |
| <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Resumen

Se ha calculado la proyección de los cambios de las olas de calor en la península ibérica y las islas Baleares hasta finales del siglo XXI con el escenario climático RCP 8.5. En este escenario, las emisiones de gases de efecto invernadero se supone que continúan a un ritmo elevado y es en el que la temperatura media global aumentará más. Los valores que caracterizan las olas de calor se han comparado con los del escenario RCP 2.6 en el cual se supone que cesan las emisiones. Los valores que se darán realmente estarán comprendidos entre los de estos dos escenarios, el peor al que podríamos enfrentarnos y el mejor al que podemos aspirar.

Los cambios de las olas de calor se han analizado con tres índices: El pico de intensidad máxima de la mayor ola de calor del año (HWA), la duración de la ola de calor más larga durante un año (HWD) y el tanto por ciento de días del año dentro de alguna ola de calor (HWF).

Se han usado proyecciones dadas por las combinaciones de modelos climáticos globales con modelos climáticos regionales para tener un muestreo de los datos y una incertidumbre asociada a cada índice.

Se ha obtenido que habrá aumentos en la duración y la frecuencia de las olas de calor en el escenario RCP 8.5. La amplitud aumentará en menor proporción y, en algunas zonas, el aumento no será significativo por la dispersión entre proyecciones. En el escenario RCP 2.6, la duración, la frecuencia y la amplitud aumentan ligeramente hasta la mitad del siglo XXI, disminuyen después y llegan prácticamente a los valores actuales antes de acabar el siglo.

Abstract

The projection of heat wave changes in the Iberian Peninsula and the Balearic Islands until the end of the 21st century has been calculated with the RCP 8.5 climate scenario. In this scenario, greenhouse gas emissions are supposed to continue at a high rate and it is where the global average temperature will increase the most. The values that characterize heat waves have been compared to those of the RCP 2.6 scenario in which emissions are going to cease. The values that will really be given will be between those from these two scenarios, the worst we could face and the best we can aspire to.

The changes in heat waves have been analyzed with three indices: The peak of maximum intensity of the biggest heat wave of the year (HWA), the duration of the longest heat wave during a year (HWD) and the percentage of days of the year within a heat wave (HWF).

Projections given by combinations of global climate models with regional climate models have been used to have a sample of the data and an uncertainty associated with each index.

The study has shown there will be increases in the duration and frequency of heat waves in the RCP 8.5 scenario. The amplitude will increase to a lesser extent and, in some areas, the increase will not be significant due to the dispersion between projections. In the RCP 2.6 scenario, the duration, frequency and amplitude increase slightly until the middle of the 21st century, then decrease and reach practically the current values before the end of the century.

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 4 |
| 2. Objetivos..... | 5 |
| 3. Fundamentos teóricos | 5 |
| 3.1. Identificación de las olas de calor | 6 |
| 3.2. Caracterización de las olas de calor | 6 |
| 3.3. Modelos Climáticos | 7 |
| 4. Metodología..... | 8 |
| 4.1. Origen de los datos y región de estudio | 8 |
| 4.2. Cálculos..... | 9 |
| 5. Cambios de las olas de calor en el escenario RCP 8.5 | 11 |
| 5.1. Amplitud | 11 |
| 5.2. Duración..... | 15 |
| 5.3. Frecuencia | 17 |
| 6. Comparación de los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6 | 19 |
| 6.1. Amplitud | 19 |
| 6.2. Duración..... | 21 |
| 6.3. Frecuencia | 22 |
| 7. Discusión | 24 |
| 8. Conclusiones..... | 26 |
| 9. Bibliografía..... | 27 |

Abreviaturas

| | |
|--------|---|
| AOGCMs | Coupled Atmosphere–Ocean General Circulation Models. |
| CORDEX | Coordinated Regional Downscaling Experiment. |
| EHF | Factor de exceso de calor (Exces Heat Factor). |
| GCM | Modelo climatológico global (Global climate model). |
| HWA | Pico de intensidad máxima de la mayor ola de calor del año natural (heat wave amplitud). |
| HWD | Duración de la ola de calor más larga de un año natural (heat wave duration). |
| HWF | Número de días del año dentro de alguna ola de calor en tanto por ciento (heat wave frequency). |
| HWN | Número de olas de calor en un año natural (heat wave number). |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change. |
| RCM | Modelo climatológico regional (Regional climate model). |
| RCP | Representative Concentration Pathway. |

1. Introducción

Las olas de calor en una región son episodios de varios días consecutivos en los que la temperatura es anormalmente alta comparada con el registro histórico.

Es importante hacer una proyección de los cambios, por los efectos adversos de estos episodios sobre la población, el medio ambiente y la economía. Las olas de calor tienen un efecto negativo sobre la salud de la población con posibles consecuencias fatales en las personas que tienen mayor riesgo de padecer problemas respiratorios o cardiovasculares. En este grupo se encuentran muchas personas mayores. En 2019, un 20% de la población europea tenía más de 65 años y casi el 6%, más de 80 años [Eurostat, 2021]. Las proyecciones indican que la población con más de 80 años de edad será el 11% en 2050 y casi el 16% a finales de siglo XXI [Duch, 2008]. Los efectos adversos de las olas de calor, potenciados por la concentración de la población en grandes ciudades, se darán sobre un colectivo de riesgo más numeroso. La ola de calor en la península ibérica en 2003 [Bell, 2003] o la reciente en el oeste de los Estados Unidos en junio de 2021 [Brink, 2021], potenciaron los incendios forestales que provocaron la desertificación de zonas boscosas y arrasaron zonas de cultivo con grandes pérdidas económicas. La ola de calor en California en agosto de 2020 dejó sin electricidad a parte de la población. El suministro eléctrico queda comprometido durante las olas de calor veraniegas debido al uso de aparatos de aire acondicionado, con cortes controlados o, más preocupante, por el incendio de transformadores, como ocurrió en California. Un factor característico de las olas de calor es que la temperatura mínima nocturna es muy elevada. Ello impide que las personas concilien el sueño y descansen durante la noche sin usar sistemas de climatización. El precio de la electricidad en agosto de 2003 en España aumentó debido al incremento de la demanda durante la ola de calor.

La temperatura media del planeta ha subido entre uno y dos grados centígrados desde la revolución industrial [IPCC, 2019] y, entre las múltiples consecuencias del calentamiento global, se prevén cambios en las olas de calor. La temperatura en Adelaida, Australia, llegó a 46.6 °C en la ola de calor de enero de 2019 [Zhou, 2019]) y en Montoro, Córdoba, llegó a 47.2°C el 14 de agosto de 2021 [AEMET, 2021]. Si actualmente ya se dan olas de calor con picos de temperatura máxima varios grados por encima de los picos medios durante estos episodios, cabe temer que los picos extremos en el futuro podrían ser muy altos y tener efectos devastadores.

En este trabajo, se calculará la proyección de las olas de calor en la península ibérica y las islas Baleares en el escenario denominado RCP 8.5 (Representative Concentration Pathway 8.5) y se comparará con la proyección en el escenario RCP 2.6. Los escenarios RCP son una proyección de la concentración de gases de efecto invernadero durante este siglo [IPCC, 2014]. La etiqueta numérica hace referencia al valor del forzamiento radiativo en el año 2100 en watts por metro cuadrado. El forzamiento radiativo es el balance entre la radiación solar incidente absorbida por la tierra y la irradiada de vuelta al espacio. Existen varios escenarios con distintas etiquetas RCP. Cuanto mayor es el valor numérico de la etiqueta, mayor es la concentración de gases de efecto invernadero en el escenario. Si bien las medidas de transición energética propuestas por los gobiernos deben reducir paulatinamente la emisión de gases de efecto invernadero, interesa conocer lo que ocurriría en el límite, si se supone que las emisiones continúan al mismo ritmo actual, que no se hace ninguna transición a energías limpias para reducir el consumo de combustibles fósiles. El caso RCP 8.5 es el más adverso de todos los

escenarios. En el Quinto informe del IPCC se indica que, en ese escenario, la temperatura media global subirá entre 2.6°C y 4.8°C, respecto a las temperaturas de finales de siglo XX y principios de siglo (tal incremento implicará una subida del nivel del mar de entre cincuenta y ochenta centímetros). Un escenario de RCP 8.5 es cada vez menos probable gracias a las nuevas políticas de transición impuestas por los gobiernos y se trata del escenario donde se darían las peores consecuencias a las que enfrentarnos.

La península ibérica y las islas Baleares es nuestra región de interés. Para el cálculo de los cambios futuros de las olas de calor en la región, se usarán proyecciones que combinan modelizaciones climáticas globales (GCM) y modelizaciones climáticas regionales (RCM).

Los modelos globales hacen buenas proyecciones del clima del planeta pero usan una matriz de valores correspondiente a una malla de puntos geográficos demasiado separados. La región de la península ibérica y las islas Baleares quedan sobre pocos puntos de la malla. Es imposible tener valores en este modelo para distinguir los efectos de los accidentes geográficos o las diferencias entre zonas interiores y costeras. Para conseguir la distinción, se deben usar modelos climáticos regionales. La matriz de valores de estos modelos corresponde a una malla de puntos geográficamente más cercanos, suficiente para distinguir detalles dentro de nuestra región de estudio.

Un modelo regional de Europa y el Mediterráneo occidental da la resolución necesaria para estudiar nuestra región de interés, pero, como modelo regional que es, no tiene en cuenta los cambios climáticos en otras partes del planeta. En este trabajo, se emplearán proyecciones que han usado modelos regionales combinados con modelos globales para evitar tal inconveniente. En su cálculo, usan el modelo global para establecer las condiciones de contorno y de forzamiento del modelo regional. Así, consiguen una buena resolución que nos da pie para estudiar la evolución del clima y su efecto sobre las olas de calor en la región de la península ibérica y las islas Baleares teniendo en cuenta los cambios climáticos a escala global.

La proyección de las olas de calor se realizará en este trabajo promediando los resultados de varias proyecciones climáticas de CORDEX (Coordinate Regional Climate Downscaling Experiment) del World Climate Research Programme que se obtuvieron con modelos regionales combinados con un mismo modelo global (CNRM-CM5). Y para analizar el efecto de la elección del modelo global, se calculará la proyección de las olas de calor promediando los resultados usando proyecciones climáticas de CORDEX que se obtuvieron con un modelo local (RACMO22E) combinado con varios modelos globales.

2. Objetivos

- Analizar la evolución de los índices que caracterizan la amplitud, la duración y la frecuencia de las olas de calor en el Mediterráneo occidental desde 1951 hasta 2099 según proyecciones climáticas de CORDEX en el escenario RCP 8.5.
- Comparar las olas de calor en los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6.

3. Fundamentos teóricos

El estudio de las olas de calor requiere establecer un procedimiento para identificarlas a partir de los registros meteorológicos y luego definir índices para caracterizarlas.

3.1. Identificación de las olas de calor

De manera común, los episodios definidos como ola de calor deben ocurrir durante al menos tres días [Collins, 2000; citado en Pezza, 2012] pero no ha habido una definición internacional única para calificar episodios de aumento de temperatura por encima de la media histórica como ola de calor. Diferentes agencias meteorológicas nacionales usan criterios distintos para calificar un evento meteorológico como ola de calor. La definición que usa la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) es que una ola de calor en una región es un episodio de al menos tres días seguidos la temperatura máxima diaria alcanza valores que están por encima del 95 % de las temperaturas máximas diarias de los meses de julio y agosto registradas entre 1971 y 2000 en al menos el 10% de las estaciones consideradas.

Aparte de las definiciones de las agencias estatales, hay otras definiciones para su estudio como la propuesta por Nairn et al. en 2009 con el índice EHF (excess heat factor). Éste es el criterio que se usará en este trabajo para identificar las olas de calor en las proyecciones.

Es necesario definir una temperatura umbral a partir de la cual se considera la temperatura candidata a formar parte de una ola de calor, recordemos que para considerar una ola de calor se debe superar el umbral durante al menos tres días. Las temperaturas habituales no son las mismas en diferentes regiones. Por ejemplo, en el 25 % de los días de julio y agosto se superan los 38 °C en Sevilla mientras que ésta es la temperatura récord histórica en Molina de Aragón [AEMET, 2019]). Por ello, el umbral deberá depender del punto de la malla. Además, deberá ser suficientemente alto para mantener la excepcionalidad de las olas de calor, pero no demasiado para no perder eventos. Nairn propone que el umbral en un punto de la malla sea el percentil 95 del registro histórico de temperaturas medias incluyendo al menos 30 años.

El índice EHF, cuyas unidades serán °C², se calcula a partir de una serie temporal de temperaturas. Sea la temperatura media diaria (\bar{T}_d) el promedio de las temperaturas máxima y mínima del día número d . Sea T_{95} el valor de la temperatura que acota por arriba al 95% de las temperaturas medias diarias en un punto de la malla de la serie temporal en el período 1970-2005. Se define el índice de significancia

$$\text{EHF}_{\text{sig}}(d) = \frac{\bar{T}_{d-2} + \bar{T}_{d-1} + \bar{T}_d}{3} - T_{95}. \quad (1)$$

y el índice de aclimatación

$$\text{EHI}_{\text{acl}}(d) = \frac{\bar{T}_{d-2} + \bar{T}_{d-1} + \bar{T}_d}{3} - \frac{\bar{T}_{d-32} + \dots + \bar{T}_{d-3}}{30}. \quad (2)$$

A partir de estos índices, para el día número d del período, se define [Nairn, 2009]

$$\text{EHF}(d) = \text{EHI}_{\text{sig}}(d) \times \max(1, \text{EHI}_{\text{acl}}(d)). \quad (3)$$

Cuando $\text{EHF}(d)$ es positivo durante al menos tres días consecutivos, entonces se ha producido una ola de calor durante esos días.

3.2. Caracterización de las olas de calor

Las olas de calor se caracterizan de manera básica con la duración y la amplitud. La duración es el número de días durante los que el índice EHF es positivo. La amplitud es la diferencia máxima entre la temperatura diaria durante una ola de calor y la temperatura media histórica del día correspondiente.

En este trabajo, se quiere analizar la evolución de las olas de calor en el resto del siglo XXI. Para ello, se calcularán cuatro índices que promedian las características de las olas de calor producidas a lo largo de cada año natural. Estos índices se conocen por unas siglas que siempre comienzan con HW por la denominación inglesa de las olas de calor (*heat wave*):

- HWA: Valor en grados centígrados al cuadrado del valor máximo de EHF de la mayor ola de calor del año (A por amplitud).
- HWD: Duración en días de la ola de calor más larga del verano.
- HWF: Porcentaje de días del año dentro de una ola de calor (F por frecuencia).
- HWN: Número de olas de calor del año.

3.3. Modelos Climáticos

Los modelos climáticos se desarrollaron para estudiar cómo puede evolucionar el clima en diferentes escenarios. A diferencia de las previsiones del tiempo, cuyo objetivo es prever lo que pasará en los próximos días, el objetivo de los modelos climáticos es describir el comportamiento general del clima a largo plazo.

El clima de una región depende de la atmósfera y los océanos de todo el planeta. Los modelos Atmosphere–Ocean General Circulation Models (AOGCMs) tienen en cuenta el acoplamiento atmósfera-océano con sus variaciones espacio temporales, son útiles para entender el sistema climático global y ayudan a hacer las proyecciones del clima.

Actualmente, todos los modelos climáticos tienen en cuenta el acoplamiento entre atmósfera y océano. Los denominados Modelos de Circulación General o Modelos Globales de Clima (GCM) son modelos numéricos altamente complejos que representan el clima del planeta y su respuesta frente a determinados cambios. Las modelizaciones se realizan con una malla espacial superior a 100 km debido a las exigencias computacionales y no tienen suficiente resolución espacial para representar factores de menor escala como la topografía, la línea de costa, el uso del suelo o los procesos atmosféricos de naturaleza local. Pese a ser herramientas muy útiles para estudiar el clima del planeta, los modelos globales carecen de detalle suficiente para estudiar fenómenos extremos que ocurren a escalas más finas. Para estudiarlos, se utilizan Modelos Regionales de Clima (RCM) con los que es posible disminuir la malla espacial a pocas decenas de kilómetros (~10-20 km) de manera que estos factores y procesos locales se incorporan a los experimentos. Sin embargo, para que las simulaciones sean factibles, es necesario representar el clima sobre una región limitada. Por tanto, los RCM se centran en una región concreta de estudio donde se representa el sistema climático a alta resolución y la información de gran escala se obtiene a través de bases de datos globales como pueden ser los GCMs.

Los modelos regionales se deben dotar de forzamientos externos porque el clima de una región está influenciado por el de todo el planeta. Los forzamientos se establecen en forma de condiciones de contorno dadas por un modelo global. Este procedimiento, donde la información a escala global se traspa a escalas menores, se denomina en inglés *downscaling*. Para muestrear la incertidumbre asociada a cada uno de los modelos individualmente, las proyecciones del clima se pueden hacer combinando diferentes modelos regionales con distintos modelos globales.

El uso de modelos regionales para el cálculo de las olas de calor es necesario para el estudio de los eventos climáticos extremos porque éstos están localizados espacialmente y ocurren normalmente durante periodos de tiempo cortos. Las líneas de costa, la vegetación, las

montañas e incluso zonas de aerosoles troposféricos de corta vida solamente se visibilizan con modelos regionales [Giorgi, 2006]. Estos modelos también describen determinados episodios mejor que los modelos globales. Por ejemplo, las frecuencias de días de altas precipitaciones [Christensen, 1998 y Huntingford, 2003; citados en Giorgi, 2006]. Además, hay elementos geográficos importantes que afectan directamente al clima de una región y que no se representan adecuadamente en los modelos globales. Por ejemplo, la península itálica e incluso las mismas islas Baleares a menudo no están representadas.

4. Metodología

4.1. Origen de los datos y región de estudio

Los datos de las temperaturas mínima y máxima diaria del aire cerca de la superficie de las proyecciones usadas en este trabajo corresponden a la región EUR-11 de CORDEX y se han descargado del portal ESGF (Earth System Grid Federation).

Hemos calculado los valores medios del índice HWA con los datos históricos del período 1995-2015 y los hemos dibujado en la Fig. 1 para mostrar el dominio de la región EUR-11 y marcar sobre ella la región de estudio de este trabajo. Esta región corresponde a una malla de 180×90 puntos.

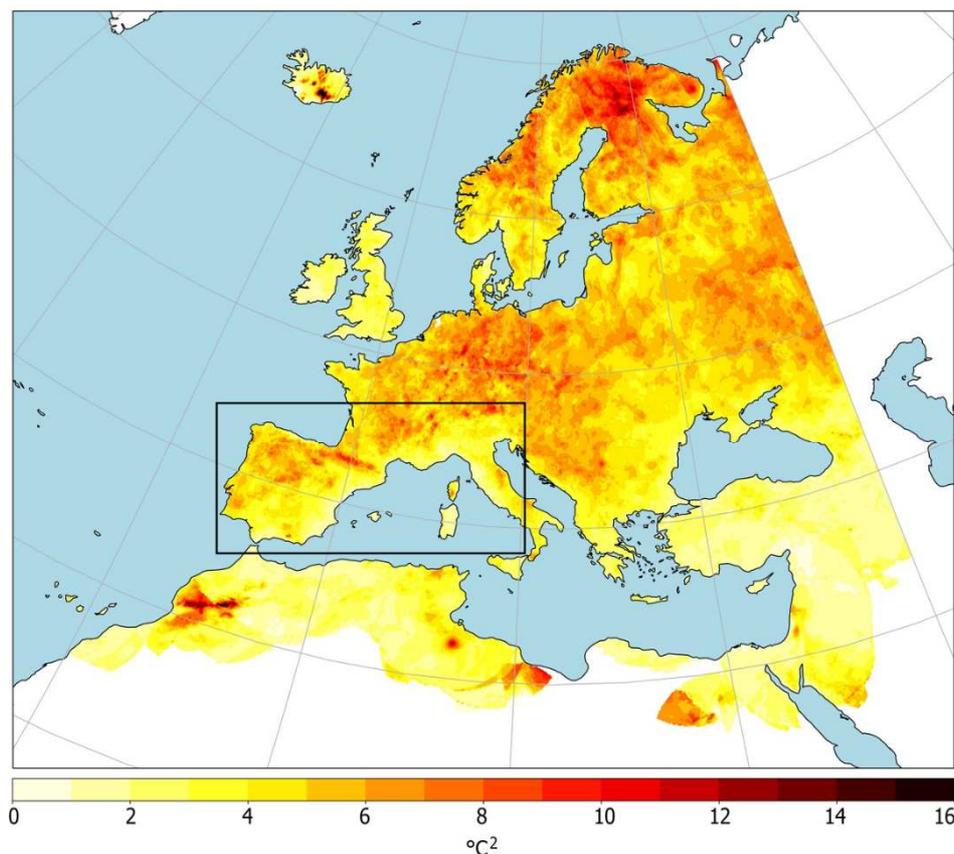


Figura 1. Región EUR-11 de CORDEX coloreada según los valores calculados del valor medio $\langle HWA \rangle_{1995-2015}$ de los datos históricos del índice HWA en el período 1995-2015. El recuadro sobre el mediterráneo occidental delimita la región de estudio de este trabajo.

El modelo global y el modelo regional que aparecen usados en más proyecciones de CORDEX para la región EUR-11 en el escenario RCP 8.5 son el GCM CNRM-CM5 y el RCM RACMO22E. En la Tabla 1, se muestran las proyecciones disponibles ligadas a alguno de estos modelos. Se dispone de las proyecciones del modelo global CNRM-CM5 combinado con cinco modelos regionales y las proyecciones de cinco modelos globales combinados con el modelo regional RACMO22E. La lista de estas nueve proyecciones diferentes en el escenario RCP 8.5 se denominará L_p . La proyección (CNRM-CM5, RACMO22E) está en los dos grupos.

Tabla 1. Combinaciones de los modelos de las proyecciones para la región EUR-11 de CORDEX. Con el símbolo \otimes se han marcado las combinaciones disponibles para el escenario RCP 8.5 y con el símbolo \boxtimes , las disponibles para el RCP 2.6. Las casillas amarillas corresponden a las proyecciones del conjunto L_p del escenario RCP 8.5.

| | | \otimes RCP 8.5 | Modelo climático global (GCM) | | | | | |
|---------------------------------|------------|---------------------|-------------------------------|------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------|
| | | \boxtimes RCP 2.6 | CNRM-CM5 | MPI-ESM-LR | EC-EARTH | NorESM1-M | IPSL-CM5A-MR | GFDL-ESM2G |
| Modelo climático Regional (RCM) | REMO2015 | $\otimes\boxtimes$ | | | | $\otimes\boxtimes$ | $\otimes\boxtimes$ | \boxtimes |
| | HIRHAM5 | \otimes | \otimes | \otimes | | | | |
| | RACMO22E | $\otimes\boxtimes$ | $\otimes\boxtimes$ | \otimes | $\otimes\boxtimes$ | \otimes | | |
| | WRF381P | \otimes | | | \otimes | \otimes | | |
| | CCLM4-8-17 | \otimes | \otimes | | | | | |

En relación con el objetivo de analizar el efecto de los modelos sobre la proyección de las olas calor, se han tomado los dos grupos de proyecciones incluidos en L_p (casillas amarillas en la Tabla 1).

Los datos de CORDEX de la región EUR-11 disponibles para las proyecciones en el escenario con RCP 2.6 son las combinaciones marcadas también en la Tabla 1.

Dado que en el escenario RCP 2.6 no se mantiene fijo ningún modelo climático global en suficientes proyecciones, no se hace el análisis del efecto de la elección de los modelos climáticos GCM y RCM.

En relación con el objetivo de comparar el efecto sobre las olas de calor de la elección del escenario RCP 8.5 o RCP 2.6, se han calculado las olas de calor promediando sobre todas las proyecciones de la Tabla 1 porque se habrá visto con el escenario RCP 8.5 que diferentes proyecciones dan resultados con algunas diferencias y se ha considerado que el promedio de las proyecciones se puede acercar mejor a la evolución futura de las olas de calor.

4.2. Cálculos

Para cada proyección, se ha calculado $\bar{T}_p(i, j; d)$ que es el promedio de las temperaturas mínima y máxima del aire cerca de la superficie el día d en el lugar geográfico de longitud λ_i y latitud φ_j , correspondiente al elemento (i, j) de la malla.

A partir de la matriz de temperaturas medias, se ha calculado el índice EHF para identificar las olas de calor. Una vez identificadas las olas de calor, se han calculado los índices HWA, HWD y HWF. Se indicará con $HWX_p(i, j; a)$ uno cualquiera de los tres índices para el año a en el lugar geográfico de longitud λ_i y latitud φ_j .

Con el objetivo de estudiar la evolución de las olas de calor, se han definido tres períodos de 21 años:

PA:  de 2006 a 2026 o período actual.

FC:  de 2040 a 2060 o período del futuro cercano.

FL:  de 2079 a 2099 o período del futuro lejano.

El promedio de cada índice HWX en el elemento (i, j) de la malla de la región de estudio en un período es

$$\langle \text{HWX}_p(i, j) \rangle_{\text{PX}} = \frac{1}{21} \sum_{a \in \text{PX}} \text{HWX}_p(i, j; a), \text{PX} \in \{\text{PA}, \text{FC}, \text{FL}\}. \quad (4)$$

La visualización de los valores de cada promedio se realizará dibujando un mapa de la región de estudio que llamaremos $\langle \text{HWX} \rangle_{\text{PX}}$, el cual permitirá localizar visualmente las zonas geográficas donde las olas de calor serán más severas según cada proyección.

El promedio de un índice sobre N proyecciones es

$$\langle \langle \text{HWX}(i, j) \rangle_{\text{PX}} \rangle_{\text{proy}} = \frac{1}{N} \sum_p \langle \text{HWX}_p(i, j) \rangle_{\text{PX}}. \quad (5)$$

La visualización de los valores de cada promedio se realizará dibujando un mapa de la región de estudio que llamaremos $\langle \langle \text{HWX} \rangle_{\text{PX}} \rangle_{\text{proy}}$.

Con el objetivo de hallar las regiones donde las olas de calor cambiarán más según las proyecciones se han calculado dos tipos de incrementos. El primero es el incremento de cada índice en el futuro cercano y en el futuro lejano respecto a su valor en el período actual para una misma proyección,

$$\langle \text{HWX} \rangle_{\text{PX}} - \langle \text{HWX} \rangle_{\text{PA}} \equiv \langle \text{HWX}_p(i, j) \rangle_{\text{PX}} - \langle \text{HWX}_p(i, j) \rangle_{\text{PA}} \quad (6)$$

$$\text{PX} \in \{\text{FC}, \text{FL}\},$$

y el segundo es el incremento promediado sobre todas las proyecciones.

$$\langle \langle \text{HWX} \rangle_{\text{PX}} \rangle_{\text{proy}} - \langle \langle \text{HWX} \rangle_{\text{PA}} \rangle_{\text{proy}}, \quad \text{PX} \in \{\text{FC}, \text{FL}\}. \quad (7)$$

Para cada año, también se ha calculado el valor de cada índice promediado sobre el territorio de interés

$$\langle \text{HWX}_p(a) \rangle_{\text{terr}} = \frac{1}{N_{\text{terr}}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \text{HWX}_p(i, j; a), \quad a \in [2006, 2099] \quad (8)$$

$$\{\lambda_i, \varphi_j \in \text{terr}\}$$

Los valores correspondientes a puntos de la malla sobre el mar o el océano se han excluido del cálculo del promedio porque las olas de calor en estas zonas no tienen repercusión sobre la población. N_{terr} es el número de puntos de la malla de la región de estudio sobre tierra.

La escala de color usada no será lineal cuando los valores máximos se den en regiones de extensión reducida. En estos casos, la escala de color no lineal proporcionará más resolución para distinguir los cambios de color correspondientes a valores menores que se dan en la mayor parte de la región de estudio.

5. Cambios de las olas de calor en el escenario RCP 8.5

5.1. Amplitud

En las Figs. 2 y 3, se presentan los mapas con un código de colores para los promedios temporales del índice HWA en la región de estudio para el período actual (izquierda), el futuro cercano (centro) y el futuro lejano (derecha). Los promedios mostrados en la Fig. 2 se han calculado con las proyecciones que combinan el modelo global CNRM-CM5 con los modelos regionales identificados por las siglas a la izquierda de cada fila y, los mostrados en la Fig. 3, con las que combinan el modelo regional RACMO22E con los modelos globales indicados.

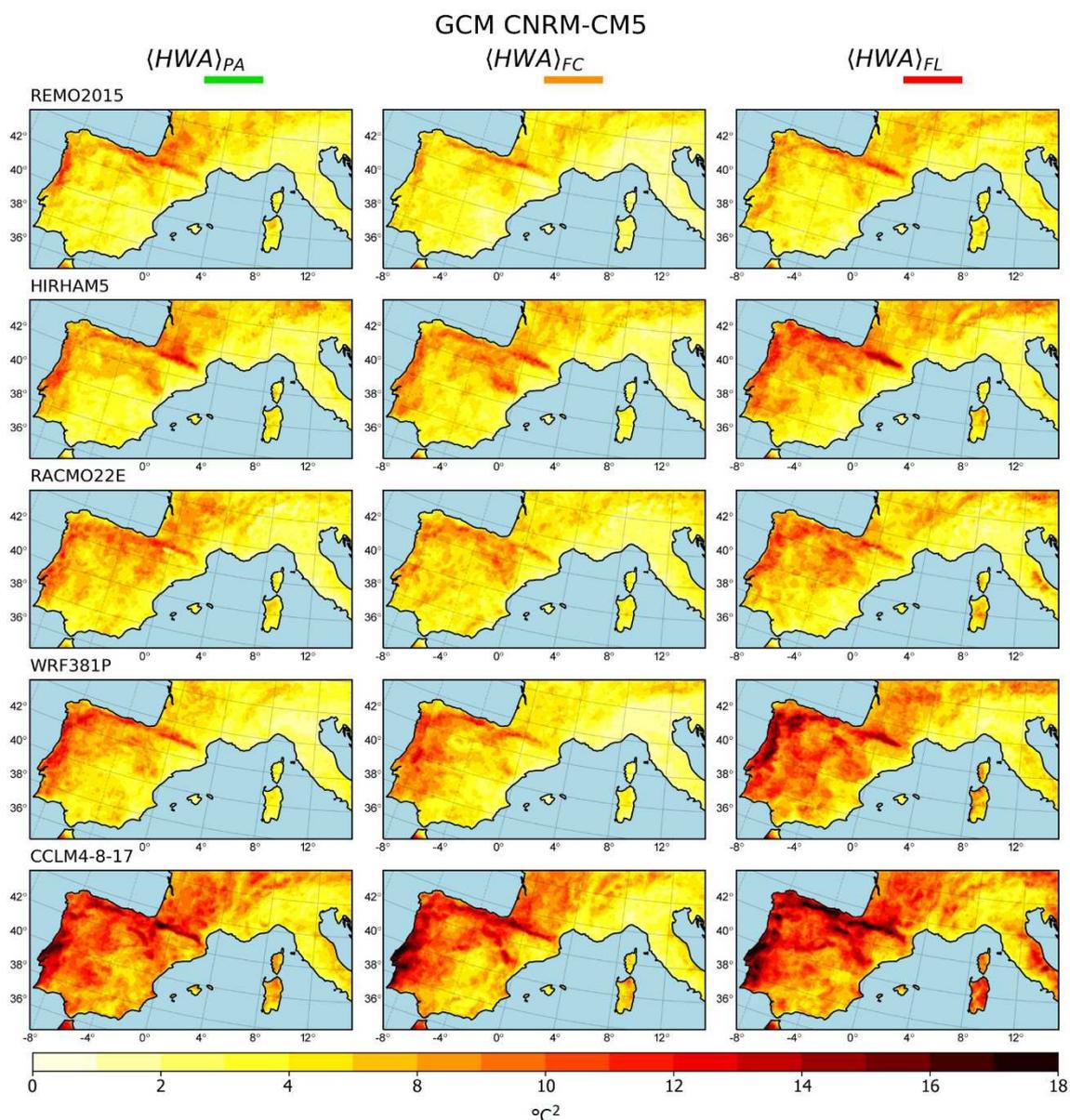


Figura 2. En cada fila, se muestra el mapa del índice $\langle HWA \rangle_{PX}$ para el período actual (2006-2026), el futuro cercano 2040-2060) y el futuro lejano (2079-2099) para una proyección con el modelo global CNRM-CM5 y uno de los modelos regionales del estudio.

El incremento del índice HWA en el futuro cercano y en el futuro lejano desde el periodo actual se presenta en la Fig. 4, para cada proyección en L_p . El incremento promedio sobre todas las proyecciones se presenta en la Fig. 4.

En el período actual, la mayoría de las proyecciones dan amplitudes medias de entre 2 y 4 °C² en las zonas más cálidas (sur de la península) y de entre 8 y 10 °C² en las zonas más frías (norte de la península y Pirineos). La proyección (CNRM-CM5, CCLM-4-8-17) da incrementos bastante mayores, de 6 a 8 °C² en las zonas más cálidas y de 12 a 14 °C² en las más frías.

Para el futuro cercano, la amplitud media aumenta unos pocos grados de manera uniforme por toda la región de estudio. El cambio más notable es la expansión de las zonas donde la amplitud es mayor. En los mapas, se puede ver como el color rojo tiñe regiones más amplias indicando que las olas de calor cubren territorios más amplios. En la costa mediterránea, incluyendo las islas dentro de la región de estudio, y en el suroeste de la península ibérica, se

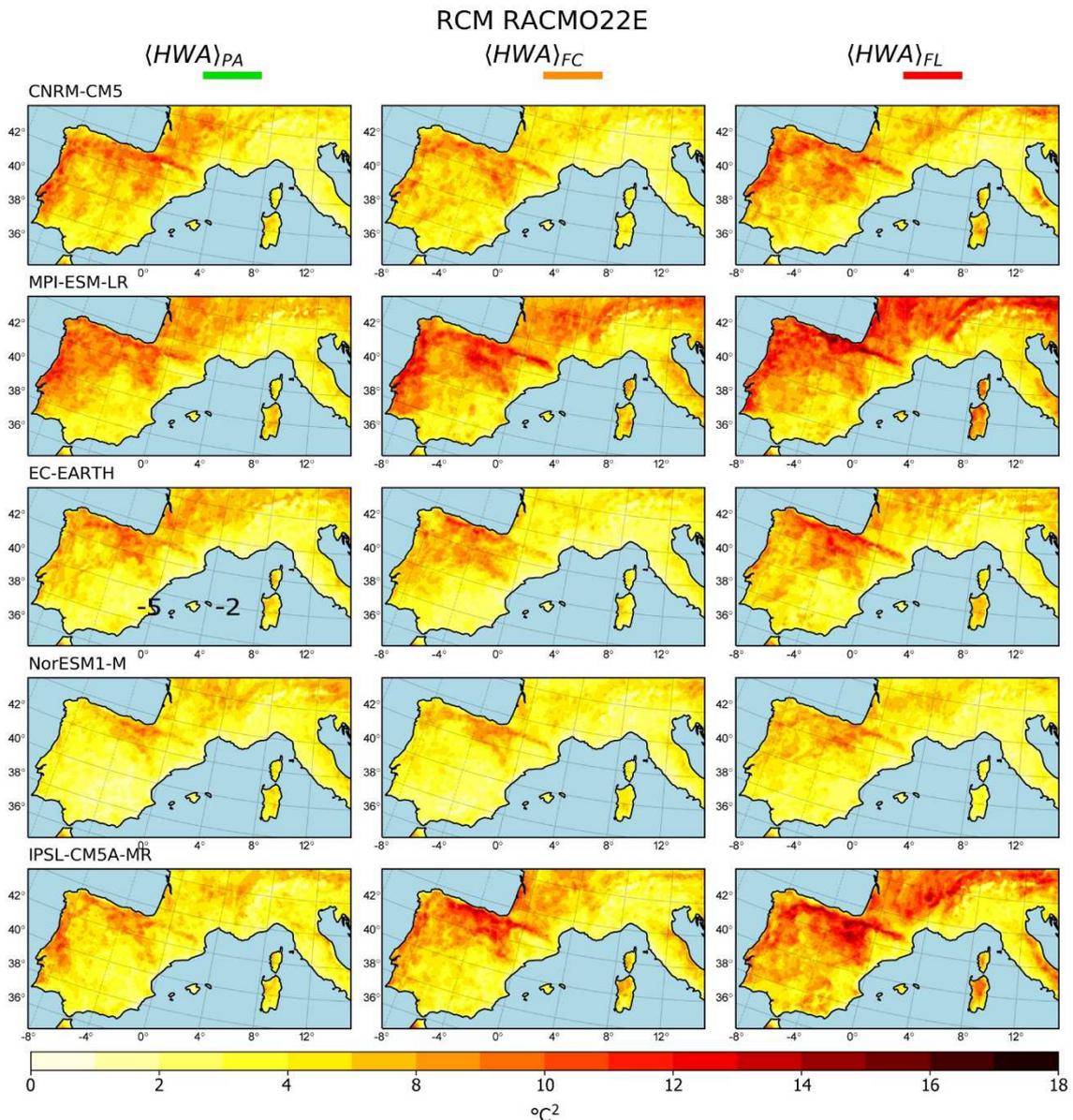


Figura 3. En cada fila, se muestra el mapa del índice $\langle HWA \rangle_{PX}$ para el período actual (2006-2026), el futuro cercano 2040-2060 y el futuro lejano (2079-2099) para una proyección con el modelo regional RACMO22E y uno de los modelos globales del estudio.

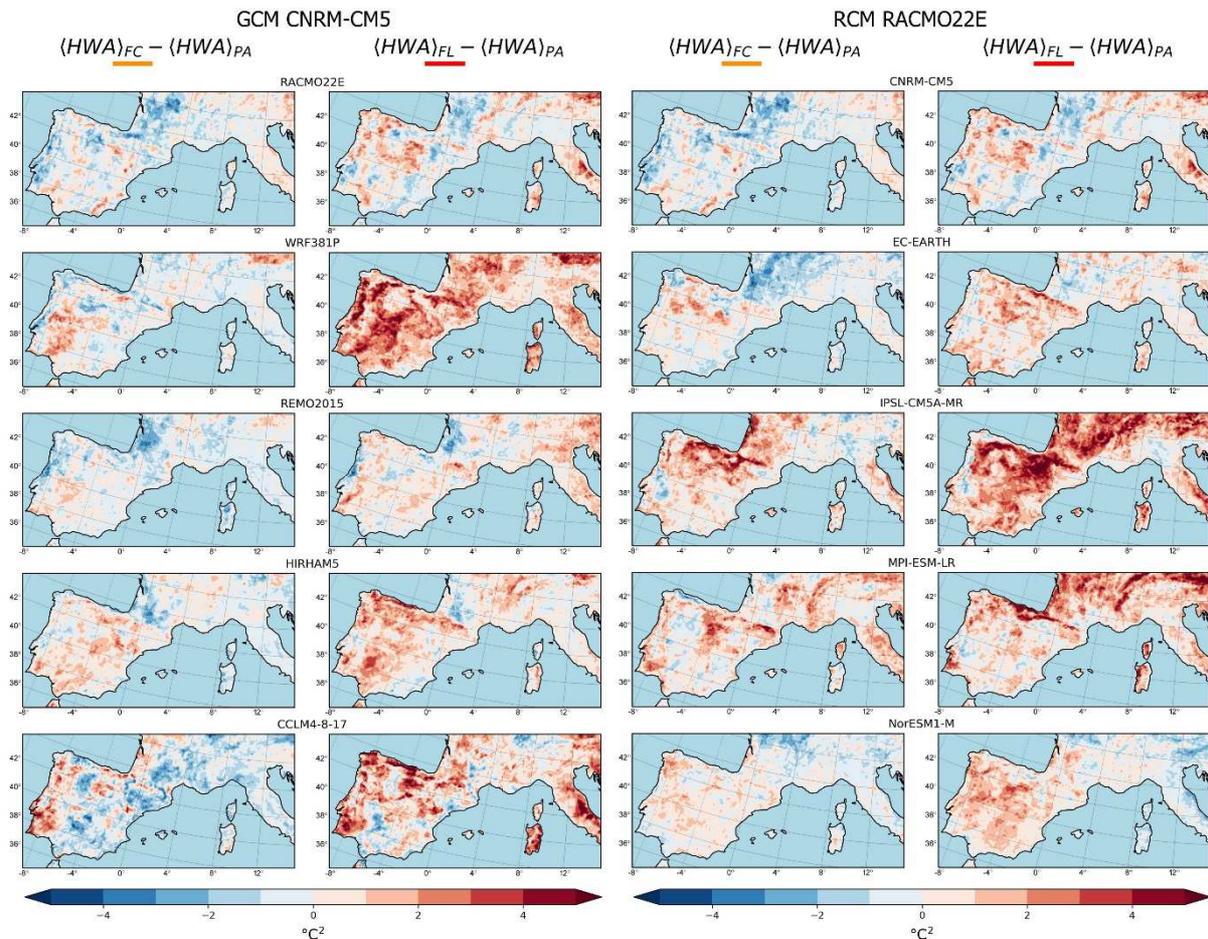


Figura 4. Mapas de incremento $\langle HWA \rangle_{PX} - \langle HWA \rangle_{PA}$ en dos bloques de cinco filas por dos columnas. En el bloque izquierdo, la primera columna es el incremento del índice en el futuro cercano ($PX = FC$) y la segunda, en el futuro lejano ($PX = FL$). Cada fila del bloque izquierdo corresponde al mapa de una proyección con el modelo global fijado. En el bloque derecho, se muestran el mismo tipo de mapas del bloque izquierdo, pero usando las proyecciones con el modelo regional fijado.

observa que la amplitud media de las olas de calor varía poco, este aspecto es evidente en la Fig. 4 por la coloración más clara de estas regiones en los mapas, que corresponde a cambios de hasta solamente $1 \text{ } ^\circ\text{C}^2$.

En el futuro lejano, los cambios iniciados en el futuro cercano se acentúan, más o menos dependiendo de la proyección usada, pero la tendencia es un incremento de la amplitud de las olas de calor respecto a la de las olas del periodo actual. Además, se observan cambios más notables en la zona mediterránea que en el futuro cercano, donde la amplitud media de las olas de calor apenas cambiaba. En el futuro lejano, la amplitud de la ola de calor aumenta en prácticamente toda la península ibérica. Todos los modelos predicen un mayor aumento notable al entrar en el futuro lejano.

De manera general, en todos los modelos y períodos, las olas de calor tienen mayor amplitud en las zonas con mayor variabilidad climática como en el norte de la península ibérica y en la costa atlántica, y la mayor amplitud promedio se sitúa sobre los Pirineos, posiblemente debido al efecto de la presencia y ausencia cíclica de nieve. Cuando se produce una ola de calor que incluye la zona de los Pirineos, la amplitud de la ola de calor es alta en esa zona.

En la Fig. 5a, se aprecian regiones coloreadas de tono azul donde habría una disminución de la amplitud en el futuro cercano y regiones de tono rojizo donde habría un aumento. Esto indicaría cambios en la amplitud de las olas de calor dependientes del lugar geográfico, regiones

donde la amplitud decrecería hasta 1°C^2 y regiones donde aumentaría hasta 1°C^2 . Pero la dispersión que hay entre las proyecciones es mayor que estas variaciones. Cualitativamente, se encuentran zonas, por ejemplo, Mallorca y prácticamente cualquier región de la península ibérica, donde unas proyecciones dan cambios positivos y otras, negativos. Cuantitativamente, la desviación estándar de los valores de $\langle \text{HWA}_p(a) \rangle_{\text{terr}}$ para las proyecciones disponibles indicadas en la Tabla 1 es del orden de 1°C^2 . En concreto, la desviación estándar de $\langle \text{HWA}_p(a) \rangle_{\text{terr}}$ en el último año del futuro cercano es

$$s_{20}(a = 2060) = 1.4 \text{ }^{\circ}\text{C}^2.$$

Las variaciones en la amplitud son poco significativas, no solo porque las observadas son del orden de las diferencias entre las proyecciones sino también porque las diferentes proyecciones muestran cambios distintos en una misma región.

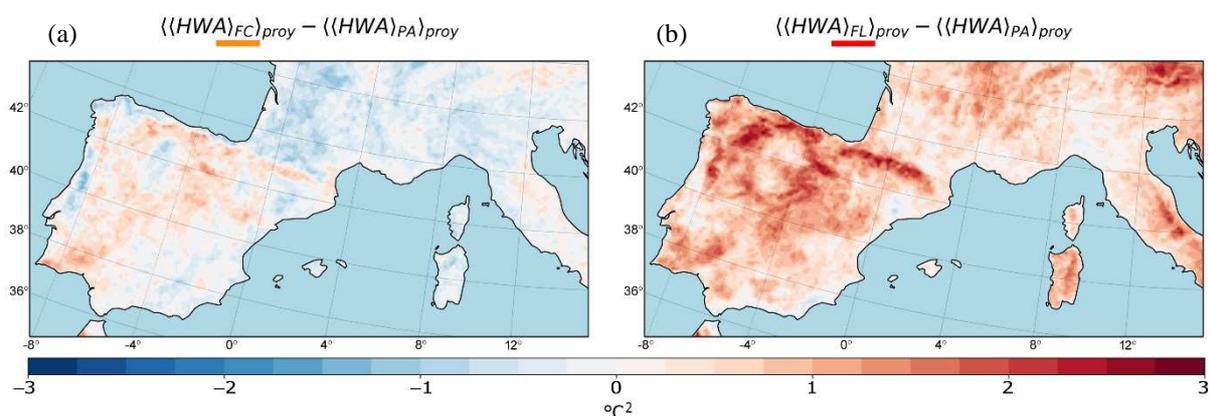


Figura 5. Mapas de incremento $\langle \langle \text{HWA} \rangle_{\text{PX}} \rangle_{\text{proy}} - \langle \langle \text{HWA} \rangle_{\text{PA}} \rangle_{\text{proy}}$ para el futuro cercano y el futuro lejano, ambos respecto del periodo actual. El incremento en cada mapa es el promedio sobre todas las proyecciones L_p .

En la Fig. 5b, se aprecian regiones coloreadas de tono rojizo donde la amplitud aumentaría entre 1 y 3°C^2 en el futuro lejano. La desviación estándar de $\langle \text{HWA}_p(a) \rangle_{\text{terr}}$ en el último año de este período es

$$s_{20}(a = 2099) = 1.9 \text{ }^{\circ}\text{C}^2.$$

El aumento de la amplitud es mayor a la desviación estándar por lo que los aumentos en la amplitud pueden darse en el escenario RCP 8.5. En el norte de la península ibérica, donde la temperatura media es inferior al resto de la península, hay un mayor aumento en la amplitud de las olas de calor.

El mapa de colores de la península ibérica en el futuro cercano (Fig. 5a) tiene una estructura espacial semejante al mapa de colores en el futuro lejano (Fig. 5b). A los incrementos en el futuro cercano, pese a ser del orden de la desviación estándar, se les puede asociar el mismo patrón de incrementos que para el futuro lejano donde los valores si son más significativos. Por tanto, los valores para el futuro cercano bien podrían ser algo significativos.

El comportamiento de cada una de las proyecciones para el índice HWA queda reflejado en la Fig. 6. Todas las proyecciones muestran un comportamiento creciente en el futuro. La diferencia entre algunas proyecciones también queda claramente reflejada en las medias móviles.

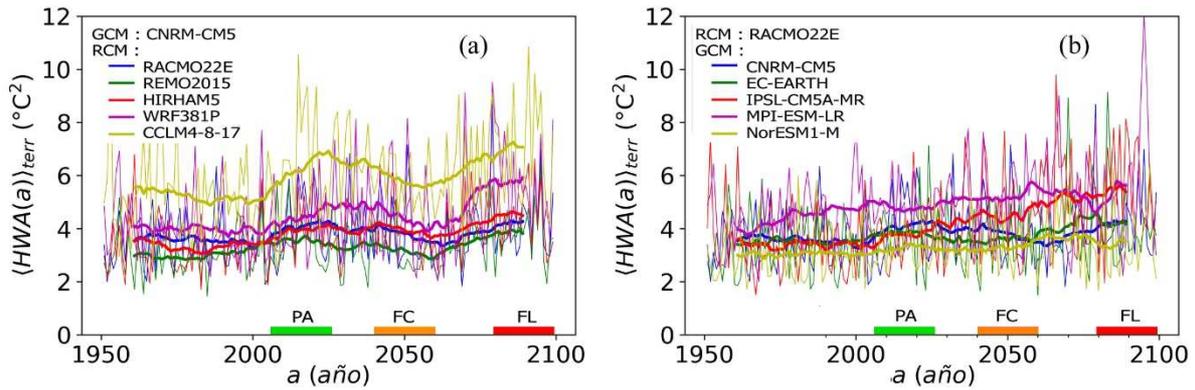


Figura 6. Índices $\langle HWA(a) \rangle_{terr}$ en el período 1950-2099 y medias móviles sobre periodos de 21 años para las proyecciones con el modelo global fijo (a) y el modelo regional fijo (b).

La similitud de la evolución de las medias móviles correspondiente a las cinco proyecciones mostradas en la Fig. 6a, indica que el modelo climático global tiene un efecto dominante en el perfil de la evolución temporal.

La elección del modelo global parece afectar al ritmo de crecimiento de la amplitud (Fig. 6b). Las medias móviles parten con amplitudes que difieren en $1^{\circ}C^2$ aproximadamente, tienen evoluciones diferentes y acaban con una diferencia de unos $3^{\circ}C^2$ a finales de siglo.

El papel que juega el RCM en la proyección queda muy bien definido en la Fig. 6a donde se puede ver que el forzamiento de un mismo modelo global produce tendencias similares. Obviamente, debido a las diferencias entre modelos regionales, hay cambios en los valores para un mismo forzamiento. Por otro lado, el modelo global vemos que es el responsable del forzamiento de las curvas que reproducen los modelos regionales. Como podemos ver en la Fig. 6b, con cada modelo global se obtiene una evolución diferente. Cada modelo global tiene una respuesta diferente a un mismo cambio en el balance radiativo.

5.2. Duración

Entre 1950 y 2006, año de inicio del período actual, el valor medio del índice HWD es de casi una semana en la región de estudio. Desde 2006 hasta el fin del periodo actual comienza a aumentar paulatinamente. Luego, todas las proyecciones muestran grandes aumentos en la duración de las olas de calor. Algunas olas presentan duraciones de hasta 3 meses (ver Fig. 7) Esto podría ser debido a que la temperatura media global está aumentando y el T_{95} usado para definir la ola de calor está fijado en el periodo base de 1970 a 2005, durante el cual la temperatura media global es inferior. La temperatura media diaria del escenario será superior a T_{95} durante más días consecutivos simplemente porque en el futuro estará cerca del actual T_{95} a causa del calentamiento global.

Los mapas de colores para la duración de todas las proyecciones L_p muestran un patrón similar. Las proyecciones con el modelo global CNRM-CM5 fijo han mostrado diferencias muy pequeñas también en los valores. Por su parte, las proyecciones con el modelo regional RACMO22E fijo muestran diferencias de los valores entre las proyecciones pequeñas, pero algo mayores que con el modelo global fijo. El mapa de la proyección (CNRM-CM5, RACMO22E) es representativo de los mapas de las otras cuatro proyecciones con el modelo global fijo.

Es interesante observar que las zonas más cálidas son las zonas donde los valores del índice HWD son más altos (Fig. 7) y los valores del índice HWA son más bajos (Figs. 2 y 3). Una

explicación, que se debería verificar, es que la temperatura media de las zonas cálidas aumentaría más que las otras zonas. Así, la zona cálida estaría más próxima al T_{95} y lo superaría durante más tiempo. Además, al aumentar mucho la duración de la ola de calor, el factor de aclimatización disminuye. Con ello, también disminuye el EHF y, en consecuencia, el valor del índice HWA.

Los colores de diferentes puntos de los mapas de las cinco proyecciones mostrados en la Fig. 7 son próximos para el futuro cercano y bastante diferentes para el futuro lejano. Entre el periodo actual y el futuro lejano, el incremento en la duración es de 20 días en algunas zonas y de hasta 72 en otras. En la Fig. 8, se puede ver que los incrementos en el futuro lejano varían ampliamente dependiendo de la zona. Esto significa que las diferencias en la duración de las

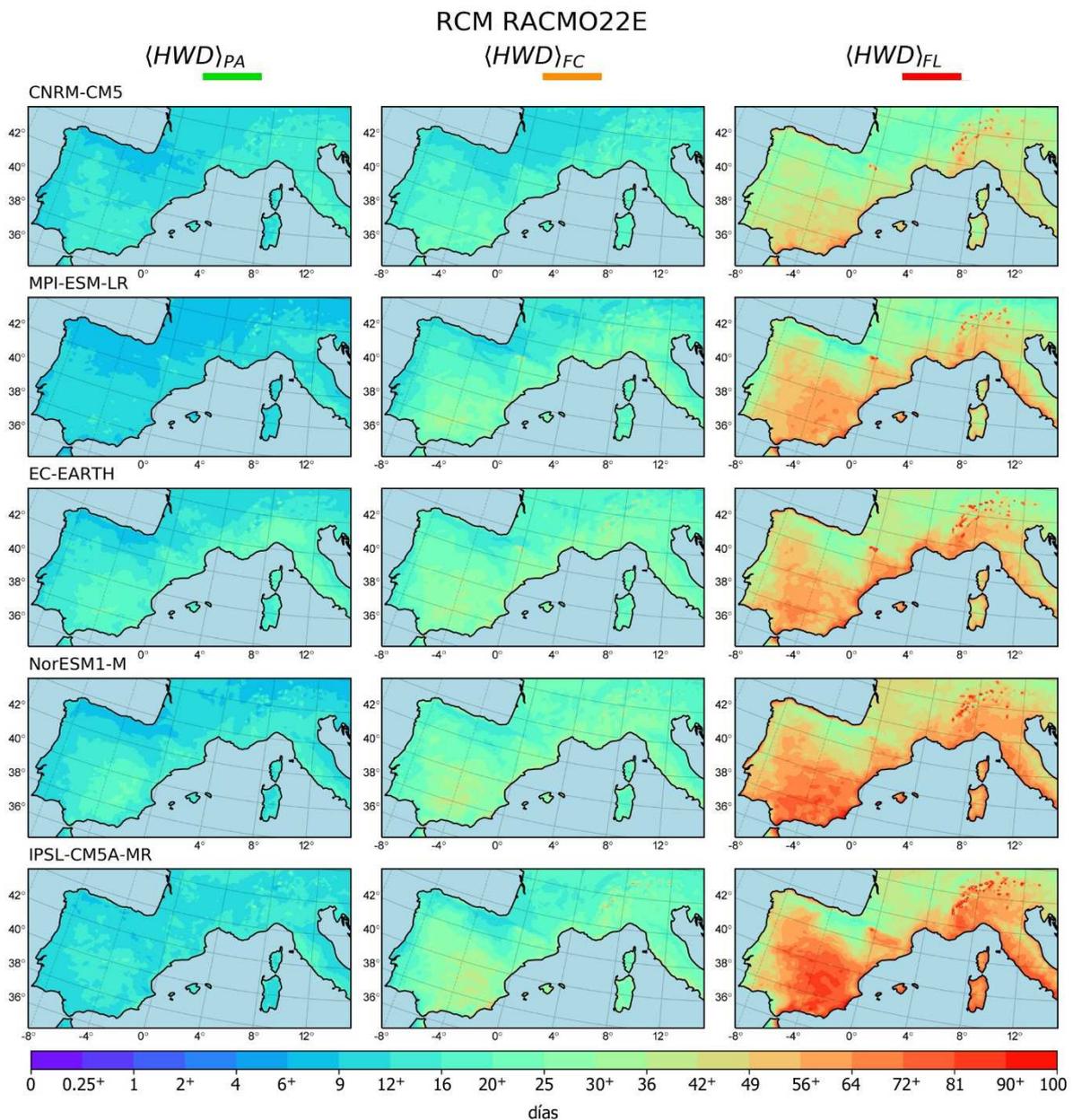


Figura 7. En cada fila, se muestra el mapa del índice $\langle HWD \rangle_{PX}$ para el período actual (2006-2026), el futuro cercano 2040-2060) y el futuro lejano (2079-2099) para una proyección con el modelo regional RACMO22E y uno de los modelos globales del estudio. El superíndice + indica que se debe añadir un cuarto de día al valor que acompaña.

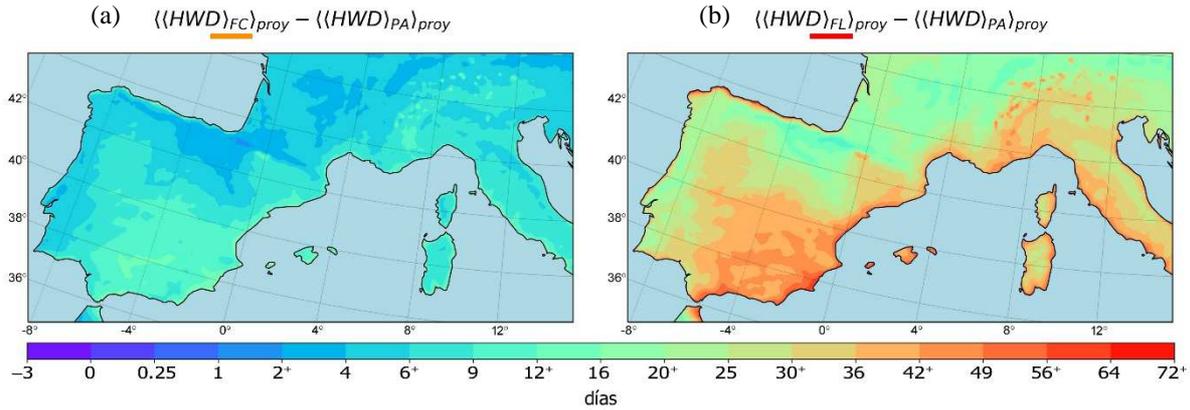


Figura 8. Mapas de incremento $\langle\langle HWD \rangle_{PX}\rangle_{proy} - \langle\langle HWD \rangle_{PA}\rangle_{proy}$ para el futuro cercano y el futuro lejano, ambos respecto del periodo actual. El incremento en cada mapa es el promedio sobre todas las proyecciones L_p .

olas de calor entre unas zonas y otras de la región de estudio se acentúan con el paso del tiempo en todas las proyecciones. En el futuro cercano, la duración es de 16 días en unas zonas y de hasta 36 días en otras. En el futuro lejano, la duración mínima es de unos 25 días y la máxima, de hasta 100 días en alguna proyección.

El comportamiento de cada una de las proyecciones para el índice HWD queda reflejado en la Fig. 9. Todas las proyecciones muestran un incremento pronunciado del valor medio en la región de estudio del índice. Las medias móviles para las proyecciones con el modelo global fijo son similares, consecuencia de que los patrones y valores de los mapas de colores para las proyecciones también lo eran. Las proyecciones para el modelo regional fijo muestran asimismo un patrón en los mapas de colores, pero en este caso, como se puede ver en las Figs 7 y 9, los valores de los promedios del índice HWD no son tan semejantes como para las proyecciones con el modelo global fijo.

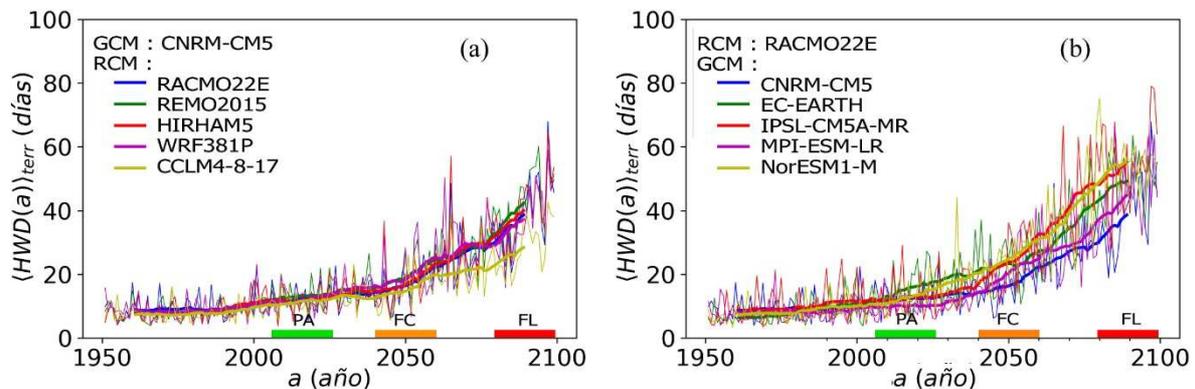


Figura 9. Índices $\langle HWD(a) \rangle_{terr}$ en el período 1950-2099 y medias móviles sobre periodos de 21 años para las proyecciones con el modelo global fijo (a) y el modelo regional fijo (b).

5.3. Frecuencia

Los mapas de colores para la frecuencia muestran un patrón similar al de la duración en todas las proyecciones L_p . Las proyecciones con el modelo global CNRM-CM5 fijo han mostrado diferencias muy pequeñas, porcentualmente menores que para la duración. Ello queda reflejado en la Fig. 11a con la similitud de las líneas de la media móvil de los valores promediados sobre el territorio. Igual que para el índice anterior, las proyecciones con el modelo

regional RACMO22E fijo (Fig. 10) muestran diferencias de los valores pequeñas entre ellas, pero algo mayores que con el modelo global fijo. El mapa de la proyección (CNRM-CM5, RACMO22E) es representativo de los mapas de las otras cuatro proyecciones con el modelo global fijo.

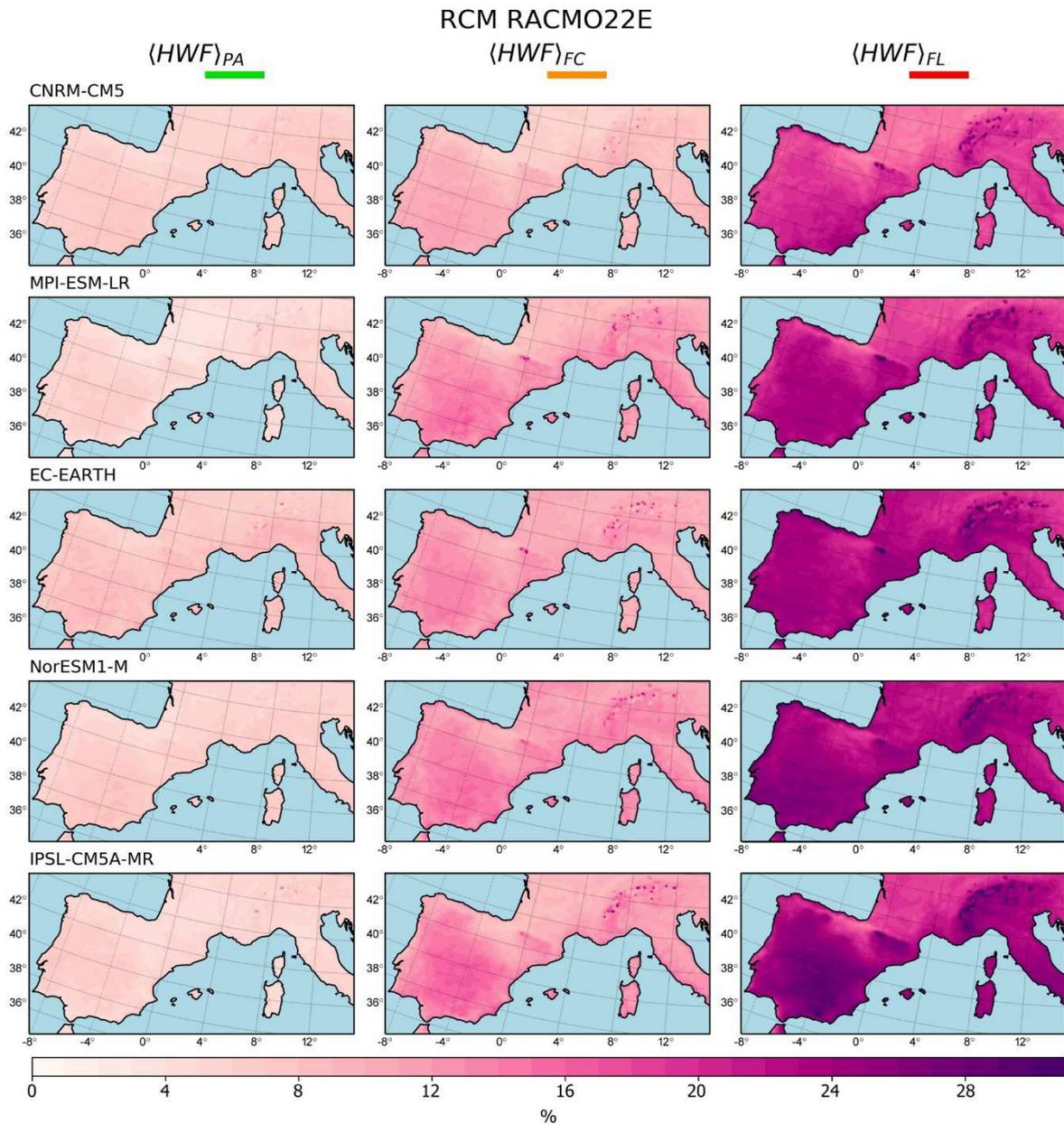


Figura 10. En cada fila, se muestra el mapa del índice $\langle HWF \rangle_{PX}$ para el período actual (2006-2026), el futuro cercano 2040-2060) y el futuro lejano (2079-2099) para una proyección con el modelo global CNRM-CM5 y uno de los modelos regionales del estudio.

Existe una relación del índice HWF con los índices HWD y HWN. El gran aumento en la duración de la mayor ola de calor del año puede ser debido a la coalescencia de diferentes olas de calor, provocando la disminución del índice HWN en el futuro lejano. Esta disminución se comentará más adelante con la Fig. 17.

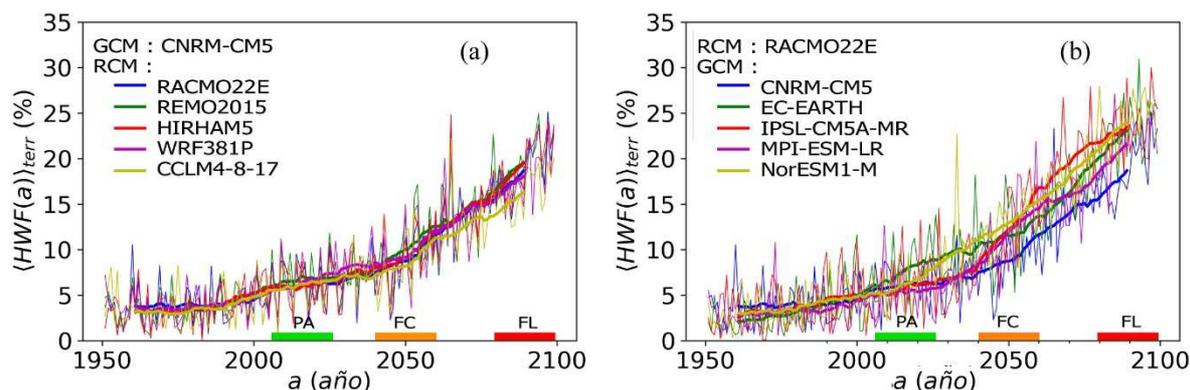


Figura 11. Índices $\langle HWF(a) \rangle_{terr}$ en el período 1950-2099 y medias móviles sobre periodos de 21 años para las proyecciones con el modelo global fijo (a) y el modelo regional fijo (b).

6. Comparación de los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6

El clima global a finales del siglo XXI se encontrará en el escenario RCP 2.6 si se toman medidas medioambientales para reducir la concentración de gases de efecto invernadero. De no tomarse medidas, se podría encontrar en el escenario RCP 8.5. Dado que los modelos globales y regionales disponibles para estos dos escenarios no son los mismos, se tomarán los valores promediados sobre todas las proyecciones disponibles de cada escenario para el análisis comparativo de los cambios futuros en las olas de calor.

6.1. Amplitud

La amplitud para todas las proyecciones y la media móvil sobre 21 años del promedio de las proyecciones, para los dos escenarios que se comparan, se muestran en la Fig. 12. El promedio y la desviación estándar del índice HWA en los lustros que acaban en 2020, 2050 y 2099 se presentan en la Tabla 2.

La diferencia entre las medias de las amplitudes en cada lustro mostradas en la Tabla 2 parecen poco significativas dada la magnitud de la desviación estándar. La dispersión entre los modelos es muy grande para poder ver claras diferencias pues las gaussianas se solapan. No obstante, la media móvil en el escenario RCP 8.5 se encuentra siempre por encima de la media móvil en el escenario RCP 2.6.

Los mapas de los promedios sobre todas las proyecciones en el periodo actual, futuro cercano y futuro lejano se muestran en la Fig. 13. Los patrones para la amplitud observados al norte de la península ibérica para el escenario RCP 8.5 se repiten en el RCP 2.6.

Algo que ocurre en el escenario RCP 8.5 y no en el escenario RCP 2.6 es el aumento de la extensión de las zonas afectadas por las olas de calor de mayor amplitud. Casi la mitad de la península ibérica en el mapa del futuro lejano para el escenario RCP 8.5 tiene tonos rojos.

Tabla 2. Promedio y desviación estándar del índice HWA en el lustro que acaba en el año a .

| $\langle \langle HWA(a) \rangle_{terr} \rangle_{proy} \rangle_{lustro}$ | | |
|---|---|---|
| Escenario | | |
| a | RCP 2.6 | RCP 8.5 |
| 2020 | $3.6 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ | $4.6 \pm 1.3 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ |
| 2050 | $3.9 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ | $4.5 \pm 1.4 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ |
| 2099 | $3.7 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ | $5.1 \pm 1.9 \text{ } ^\circ\text{C}^2$ |

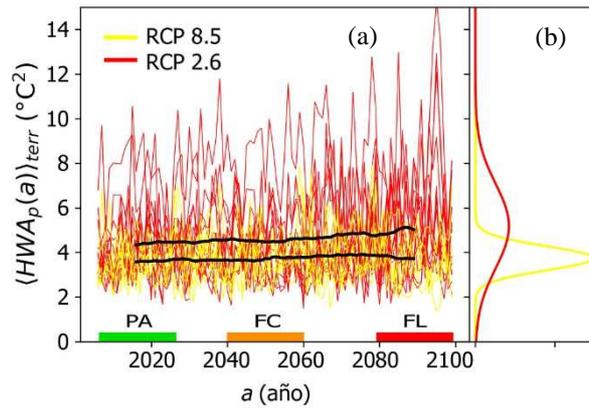


Figura 12. a) Representación de los valores medios del índice $\langle HWA(a) \rangle_{terr}$ en el período 2006-2099 calculado para todas las proyecciones disponibles en los dos escenarios. Las líneas se dibujan de un color diferente para cada escenario. Todos los índices muestran oscilaciones y se ha dibujado la media móvil de la evolución del índice también para cada escenario. b) Se dibujan dos gaussianas con las medias y desviaciones estándar de los valores del índice promediados en los últimos cinco años del futuro lejano para cada una de las proyecciones en los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6.

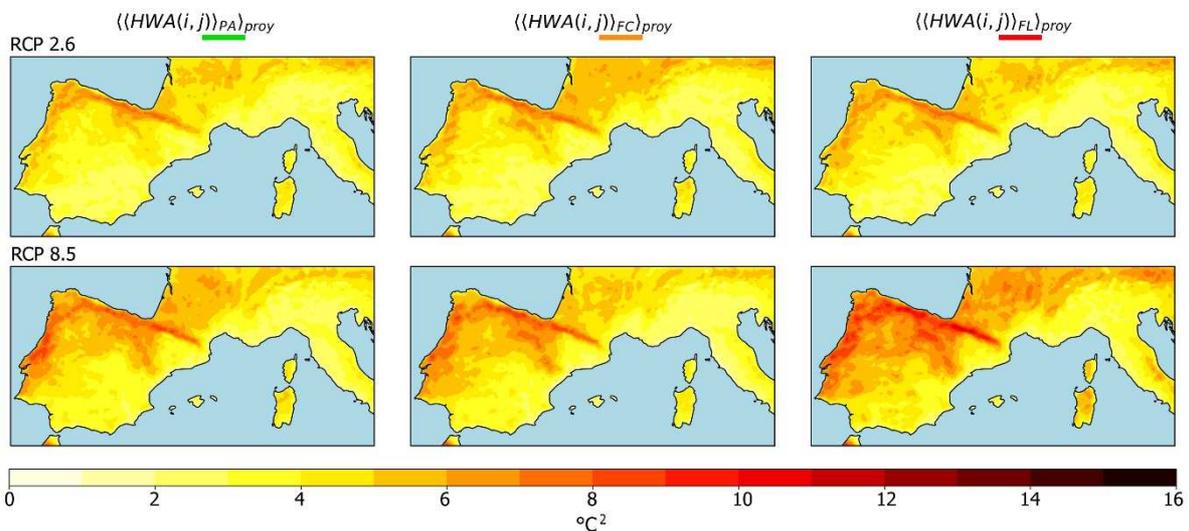


Figura 13. Mapas $\langle HWA \rangle_{PX}$ para los dos escenarios. Los mapas se presentan en dos filas de tres columnas. Los tres mapas de cada fila corresponden al mismo escenario para el período actual, el futuro cercano y el futuro lejano.

6.2. Duración

En el escenario RCP 8.5, se esperan grandes aumentos en la duración de las olas de calor (mapas Fig. 7 y medias móviles Fig. 9). En la Fig. 14, se pueden comparar esos aumentos con las variaciones de la duración en el escenario RCP 2.6. Los valores del promedio y de la desviación estándar del índice HWA en los lustros que acaban en 2020, 2050 y 2099 se encuentran en la Tabla 3.

La diferencia entre ambos escenarios es de 37 ± 9 días en el lustro que acaba en el 2099. La duración en el escenario RCP 8.5 es más de 3,5 veces la duración en el escenario RCP 2.6. El calentamiento global del escenario RCP 8.5 supone que durante más tiempo que en el escenario RCP 2.6, se darán las condiciones de una ola de calor según la definición basada en el periodo base de 1970 a 2005.

En el escenario RCP 2.6, la media móvil de las proyecciones muestra cierta concavidad negativa y se aprecia un máximo en la década de 2050. Los efectos de las medidas para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero tardarán en reducir la duración media de las olas de calor.

Los mapas de los promedios sobre todas las proyecciones en el periodo actual, futuro cercano y futuro lejano se muestran en la Fig. 15. Los mapas del escenario RCP 2.6 muestran que los valores de HWD en el futuro lejano son algo menores que en el futuro cercano. Por ejemplo, la extensión de territorio en el sudeste de la península ibérica con valores comprendidos entre dos y tres semanas se reduce al pasar del futuro cercano al futuro lejano. Por el contrario, en el escenario RCP 8.5, la duración aumenta en el futuro cercano y aún más en el futuro lejano.

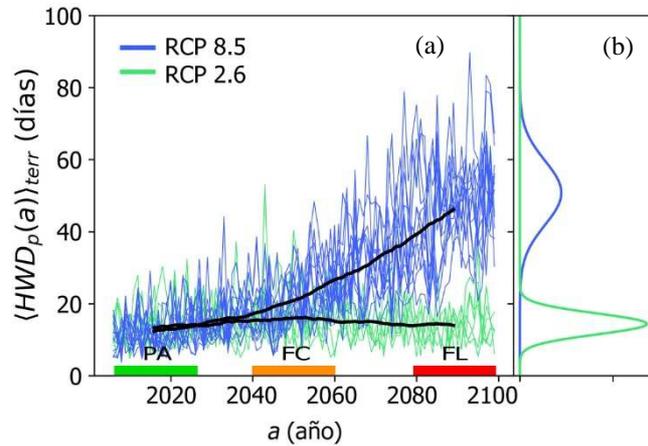


Figura 14. a) Representación de los valores medios del índice $\langle HWD(a) \rangle_{terr}$ en el período 2006-2099 calculado para todas las proyecciones disponibles en los dos escenarios. Las líneas se dibujan de un color diferente para cada escenario. Todos los índices muestran oscilaciones y se ha dibujado la media móvil de la evolución del índice también para cada escenario. b) Se dibujan dos gaussianas con las medias y desviaciones estándar de los valores del índice promediados en los últimos cinco años del futuro lejano para cada una de las proyecciones en los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6.

Tabla 3. Promedio y desviación estándar del índice HWD en el lustro que acaba en el año a .

| $\langle \langle HWD(a) \rangle_{terr} \rangle_{proy} \rangle_{lustro}$ | | |
|---|-----------------|-----------------|
| Escenario | | |
| a | RCP 2.6 | RCP 8.5 |
| 2020 | 14 ± 4 días | 11 ± 3 días |
| 2050 | 17 ± 4 días | 19 ± 4 días |
| 2099 | 14 ± 3 días | 51 ± 9 días |

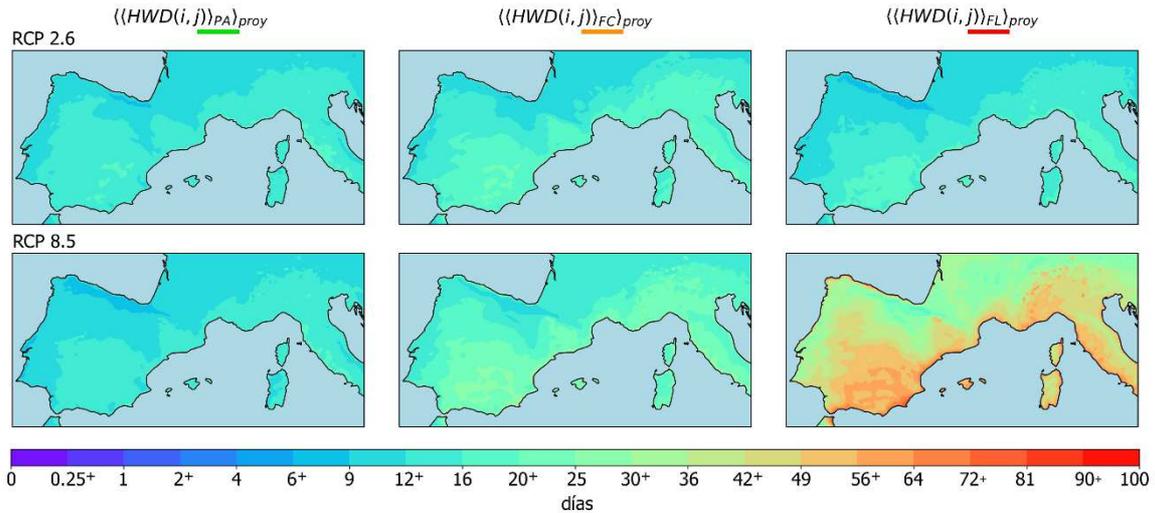


Figura 15. Mapas $\langle\langle HWD \rangle\rangle_{PX} \text{ proy}$ para los dos escenarios. Los mapas se presentan en dos filas de tres columnas. Los tres mapas de cada fila corresponden al mismo escenario para el período actual, el futuro cercano y el futuro lejano.

6.3. Frecuencia

La frecuencia media de las olas de calor en el escenario RCP 8.5 aumentará mucho (mapas Fig. 10 y medias móviles Fig. 11). En la Fig. 16, se observa el aumento de frecuencia de unos 20 puntos entre 2006 y 2099.

En la misma Fig. 16, se puede comparar el incremento durante todo el periodo con la evolución de la frecuencia en el escenario RCP 2.6. Los valores del promedio y de la desviación estándar del índice HWF en los lustros que acaban en 2020, 2050 y 2099 se encuentran en la Tabla 4.

Para interpretar la evolución de la frecuencia y duración de las olas de calor debemos seguir la del número total de olas de calor del año (Tabla 5 i Fig. 17).

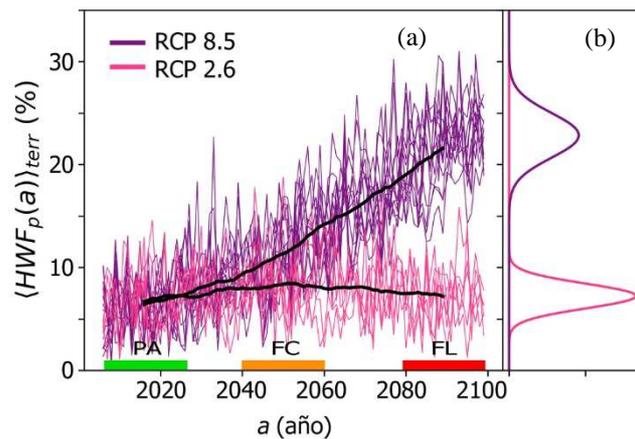


Figura 16. a) Representación de los valores medios del índice $\langle HWF_p(a) \rangle_{terr}$ en el período 2006-2099 calculado para todas las proyecciones disponibles en los dos escenarios. Las líneas se dibujan de un color diferente para cada escenario. Todos los índices muestran oscilaciones y se ha dibujado la media móvil de la evolución del índice también para cada escenario. b) Se dibujan dos gaussianas con las medias y desviaciones estándar de los valores del índice promediados en los últimos cinco años del futuro lejano para cada una de las proyecciones en los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6.

Tabla 4. Promedio y desviación estándar del índice HWF en el lustro que acaba en el año a .

| $\langle\langle\text{HWF}(a)\rangle_{\text{terr}}\rangle_{\text{proy}}\rangle_{\text{lustro}}$ | | |
|--|--------------|---------------|
| Escenario | | |
| a | RCP 2.6 | RCP 8.5 |
| 2020 | $7 \pm 2 \%$ | $6 \pm 1 \%$ |
| 2050 | $9 \pm 2 \%$ | $10 \pm 2 \%$ |
| 2099 | $7 \pm 1 \%$ | $22 \pm 2 \%$ |

Tabla 5. Promedio y desviación estándar del índice HWN en el lustro que acaba en el año a .

| $\langle\langle\text{HWN}(a)\rangle_{\text{terr}}\rangle_{\text{proy}}\rangle_{\text{lustro}}$ | | |
|--|---------------|---------------|
| Escenario | | |
| a | RCP 2.6 | RCP 8.5 |
| 2020 | 3.0 ± 0.3 | 3.0 ± 0.4 |
| 2050 | 3.6 ± 0.2 | 4.1 ± 0.4 |
| 2099 | 3.1 ± 0.2 | 5.0 ± 0.6 |

La cota inferior del índice HWF es $100 \times \text{HWD}/365$. Si un año solamente tuviera una ola de calor, sería obviamente la de mayor duración, luego su duración definiría el valor de HWD y su porcentaje sobre los 365 días del año, el valor de HWF.

En el escenario RCP 8.5, la frecuencia es de $22 \pm 2 \%$ en el lustro que termina en el año 2099, lo que supone 83 ± 8 días distribuidos en 5.0 ± 0.6 olas de calor. La ola de mayor duración es de 51 ± 9 días. Los días que participan en otras olas de calor serán 33 ± 12 días, que es la suma de las 4.0 ± 0.6 olas de calor restantes que tendrán una duración media de 8 ± 3 días.

En el escenario RCP 2.6, la frecuencia es de $7 \pm 1 \%$ lo que supone 26 ± 4 días distribuidos en 3.1 ± 0.2 olas de calor. La ola de mayor duración es de 14 ± 3 días. Los días que participan en otras olas de calor serán 12 ± 5 días, que es la suma de las 2.1 ± 0.2 olas de calor restantes que tendrán una duración media de 5.5 ± 2.5 días.

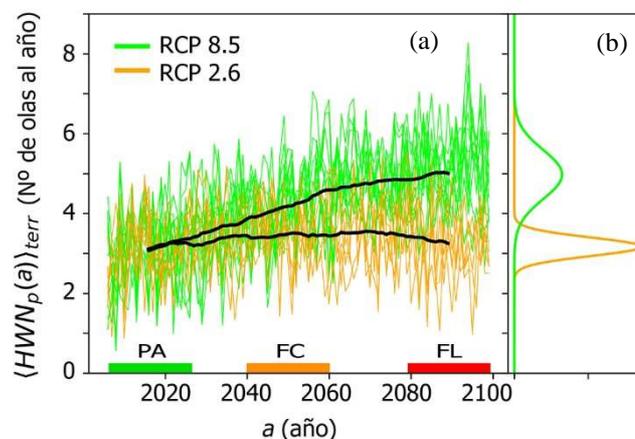


Figura 17. a) Representación de los valores medios del índice $\langle\text{HWN}(a)\rangle_{\text{terr}}$ en el período 2006-2099 calculado para todas las proyecciones disponibles en los dos escenarios. Las líneas se dibujan de un color diferente para cada escenario. Todos los índices muestran oscilaciones y se ha dibujado la media móvil de la evolución del índice también para cada escenario. b) Se dibujan dos gaussianas con las medias y desviaciones estándar de los valores del índice promediados en los últimos cinco años del futuro lejano para cada una de las proyecciones en los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6.

7. Discusión

El análisis realizado en este trabajo se ha basado en promedios temporales y espaciales. La realización de promedios suaviza los picos máximos de los índices.

Por una parte, los promedios temporales suavizan los picos porque una zona puede estar afectada por una gran ola de calor un año, pero quizá no lo estará todos los años incluidos en el cálculo del promedio. Por ejemplo, la Fig. 18a muestra el índice HWA de 2003. Se pueden apreciar picos en el valor de HWA de más de $16\text{ }^{\circ}\text{C}^2$, un valor muy por encima de los mostrados en las Figs. 2 y 3 para el período actual y propios del futuro lejano. A su lado, en la Fig. 18b, se muestra el promedio del índice HWA entre los años 1990 y 2010 para los datos de temperatura observados en ese periodo. Los valores máximos son menores a los de 2003 y a los de un año concreto cualquiera.

Por otra parte, los promedios espaciales sobre todo el territorio también disminuyen los valores máximos de la amplitud. Como hemos visto en la Fig. 12, el valor medio sobre todo el territorio a final de siglo es $5.1 \pm 1.9\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ en el escenario RCP 8.5. Normalmente, las olas de calor de un año no afectarán todo el territorio de la región de estudio y, al promediar espacialmente, el valor medio del índice quedará reducido.

A causa del suavizado al promediar, se debe tener en cuenta que no se pueden comparar los valores de una única ola de calor con los promedios realizados en este trabajo. Ahora bien, los promedios temporales señalarán las zonas más propensas a tener valores de los índices elevados.

El índice HWA crece mucho en el futuro según las proyecciones. Sin embargo, ello es una consecuencia directa de encontrarnos en un escenario de calentamiento global rápido y usar un período base fijo. Con el calentamiento global, la temperatura media diaria durante el verano superará normalmente el valor T_{95} del período base. En ese contexto, para que un episodio de varios días consecutivos en los que la temperatura es anormalmente alta en una región se denomine ola de calor, se deberá comparar con el registro histórico de un período base próximo a la fecha del episodio. El periodo base no debería ser fijo.

El índice HWA presenta muchas diferencias entre las proyecciones, provocando que la desviación estándar sea muy alta en relación con el aumento medio. Los valores obtenidos se encuentran dentro de un rango muy grande de posibilidades.

En la mayoría de las proyecciones, se han encontrado zonas donde el índice HWA tiene disminuciones importantes. Aunque, como hemos visto, promediando sobre todas las proyecciones, estas disminuciones son del orden de la desviación estándar y están localizadas en diferentes zonas en cada proyección, por lo que carecen de significancia. Una posible explicación a las disminuciones del índice HWA se muestra en la Fig. 19. En un punto de la malla suponemos una ola de calor modelizada con una gaussiana. En la Fig. 19a, encontraríamos una ola de calor con un pico de temperatura de $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la media, la

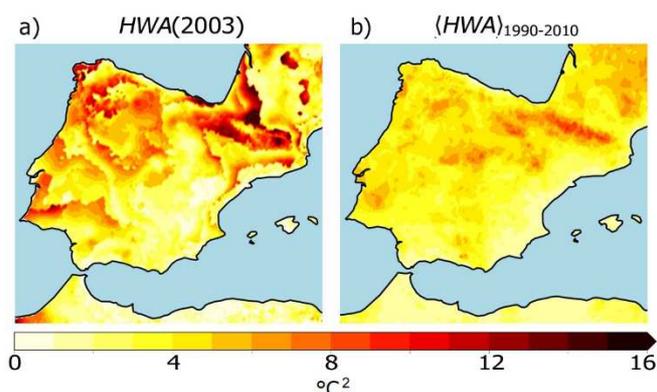


Figura 18. Representación del índice HWA calculado con valores observados. a) Valores del año 2003. b) Valores promediados desde 1990 hasta 2010.

línea roja muestra que el valor del índice EHF llega a unos $25 \text{ }^\circ\text{C}^2$. A su lado, en la Fig. 19b, vemos que al aumentar el pico de la ola de calor a $9 \text{ }^\circ\text{C}$, el índice EHF alcanza los $50 \text{ }^\circ\text{C}^2$. Por otro lado, en la Fig. 19c, se puede ver que el aumento en la duración de la ola de calor, con el mismo pico de temperatura de $6 \text{ }^\circ\text{C}$ que en Fig. 19a, hace disminuir el valor de EHF hasta los $13 \text{ }^\circ\text{C}^2$. Esta disminución es debida a la reducción del término de aclimatación por el aumento de los valores de T_{30} . En la Fig. 19d, se muestra como un aumento de la temperatura máxima junto al de la duración provoca que EHF no aumente demasiado respecto al caso inicial. Por tanto, podemos pensar que habrá una ratio límite entre el aumento de la temperatura máxima y la duración de la ola de calor. Si se supera, habrá aumentos en el valor de EHF (y en consecuencia de HWA) y, si no se supera, habrá descensos en el valor de EHF.

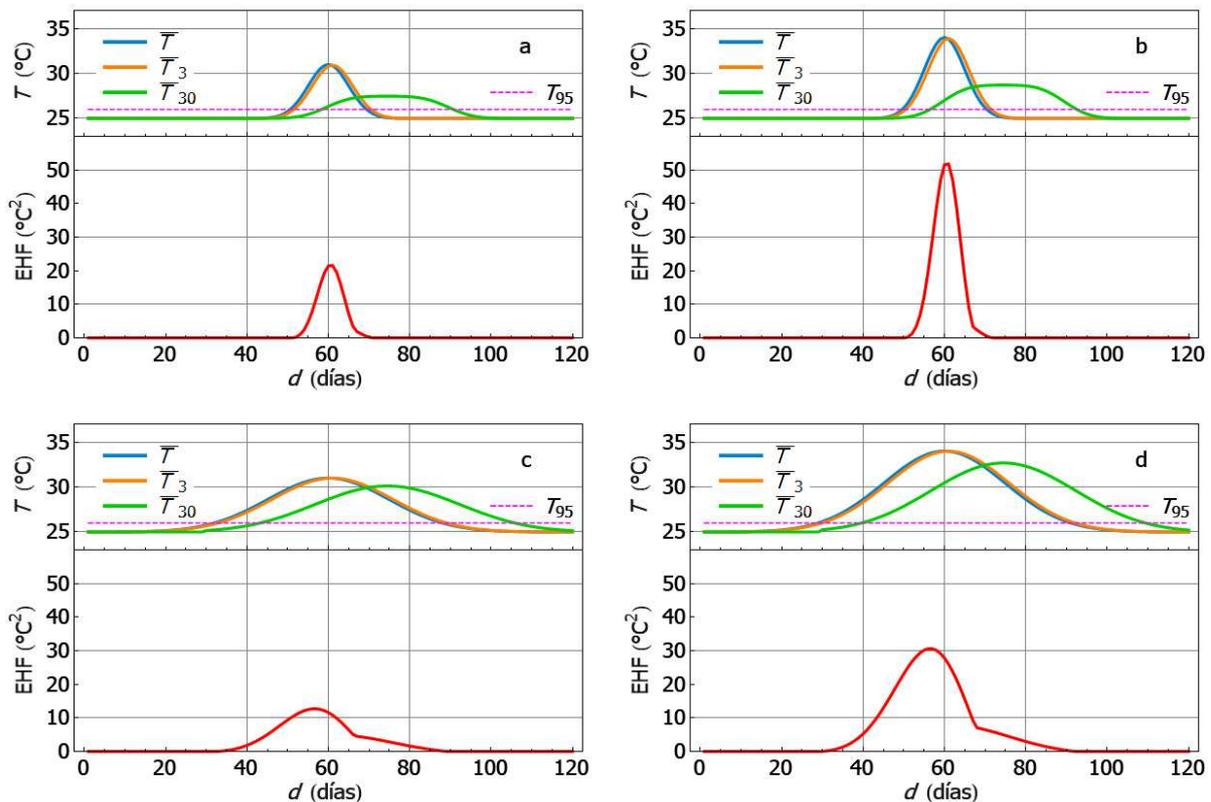


Figura 19. Modelizaciones de una ola de calor en forma de gaussiana con el índice EHF en un punto de la malla. Se muestra la temperatura media diaria T_d , la temperatura promedio de tres días T_3 , la temperatura promedio de 30 días T_{30} y el percentil 95 umbral para la ola de calor T_{95} . a) Ola de calor base. b) Ola de calor con un mayor pico de temperatura. c) Ola de calor con el mismo pico máximo, pero de mayor duración. d) Aumento en el pico de temperatura máxima y en la duración de la ola de calor

Los aumentos en la amplitud están relacionados con los aumentos en la duración, pero podría haber otro factor a tener en cuenta aparte del hecho de que se reduce la aclimatación. En la Fig. 20, se muestran dos perfiles de temperatura en un punto de la malla. El perfil

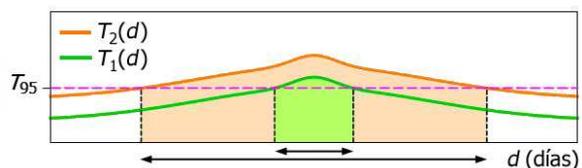


Figura 20. Dos supuestos perfiles de temperatura con la temperatura umbral T_{95} en un punto de la malla.

verde $T_1(d)$ correspondería a una ola de calor de baja amplitud que supera durante pocos días el umbral del percentil 95. Si ese perfil de temperatura aumenta un poco, el valor del pico máximo no dista mucho del anterior, pero el número de días que estarán por encima de ese percentil aumentan considerablemente. Con el calentamiento global podría darse esta situación.

8. Conclusiones

Basándonos en promedios temporales y espaciales podemos afirmar que las olas de calor en el escenario RCP 8.5 tendrán aumentos en la amplitud, la duración y la frecuencia.

El aumento de la amplitud en este escenario parece ser debido al aumento general de las temperaturas medias globales ya que solo es de unos $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}^2$ en promedio sobre nuestra región de interés. Los aumentos en la amplitud son poco significativos por la gran dispersión entre las proyecciones y, aunque muestren diferencias, todas dan un ligero aumento de la amplitud media.

Los índices muestran algunos patrones en los mapas dependiendo de las características geográficas. La amplitud muestra mayores valores en las zonas con mayor variabilidad climática, por ejemplo, las montañas nevadas donde el efecto de la nieve produce amplias variaciones en el registro de temperaturas. La duración y la frecuencia, por el contrario, tienen mayores valores en las zonas donde las temperaturas medias son más altas. En esas zonas, es más fácil que se supere la temperatura umbral para considerar que se ha producido una ola de calor, aunque el pico máximo sea relativamente bajo.

Con el periodo base 1970-2005 fijo habría olas de calor de 51 ± 9 días en promedio sobre toda la región de estudio. Ahora bien, dichas olas de calor deberán ser redefinidas para poder ser consideradas olas en ese escenario, aunque esto nos indica que normalmente los veranos en el futuro lejano serán tan calurosos o más que una ola de calor actual. Para el estudio de las olas de calor en escenarios con calentamiento global, es necesario el uso de un periodo base móvil porque, con el paso del tiempo, un periodo base fijo deja de representar lo que son las temperaturas habituales e implica que las olas de calor pierdan el carácter de excepcionalidad para volverse algo habitual en el futuro, hasta llegar al extremo de que todos los días cumplen las condiciones para estar dentro de una ola de calor.

El modelo climático global determina la forma de la evolución de los índices de las olas de calor, mientras que el modelo climático regional básicamente sube o baja los valores de los índices. Por ello, los mapas con el modelo global fijo muestran pocas diferencias entre sí porque todas las proyecciones siguen la misma tendencia paralelamente. Con el modelo climático regional fijo, se observan cambios en la tendencia de los índices. Aparte de tener valores algo diferentes, varían tanto el ritmo de crecimiento como los años donde se producen grandes picos.

Los valores de los índices en el escenario RCP 2.6 muestran una tendencia inicial creciente en la duración y la frecuencia. Al dejar de emitir gases de efecto invernadero, no se obtiene una respuesta climática instantánea, pero la tendencia creciente se detiene y se revierte con el tiempo. Los valores de los índices de las olas de calor llegan a descender hasta valores próximos a los actuales a finales del siglo XXI.

9. Bibliografía

- [AEMET, 2019] Área de Climatología y Aplicaciones Operativas (AEMET), 2019; Olas de calor en España desde 1975. <http://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/estudios/Olas_calor/Olas_Calor_Actualizacion_Junio_2019>.
- [AEMET, 2021] datosclima.es -Base de datos Meteorológica, 2021: <<https://datosclima.es/Aemet2013/Temperatura2013.php>>
- [Bell, 2003] M. Bell, A. Giannini, E. Grover, M. Hopp, B. Lyon y A. Seth (IRI Climate Digest), 2003; Climate Impacts - August. <<https://iri.columbia.edu/climate/cid/Sep2003/impacts.html>>.
- [Brink, 2021] H. Brink (CNN), 2021. <<https://cnnespanol.cnn.com/2021/07/09/pronostico-riesgo-calor-nivel-mas-alto-suroeste-ee-uu-amenaza-romper-records-temperatura-todos-los-tiempos-trax/>>
- [Collins, 2000] D. A. Collins, P. M. Della-Marta, N. Plummer y B. C. Trewin, 2000; Trends in annual frequencies of extremes temperatura events in Australia. *Aust. Meteor. Mag.*, **49**.
- [Duch, 2008] J. Duch Guillot, 2008; El futuro demográfico de la Unión Europea. *Focus*.
- [Eurostat, 2021] Eurostat, 2021. <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Population_structure_and_ageing>
- [Giorgi, 2006] F. Giorgi, 2006; Regional climate modeling: Status and perspectives. *J. Phys. IV France*, **139**.
- [IPCC, 2014] Core Writing Team, R. K. Pachauri y L. A. Mayer (editores) (IPCC), 2014; Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the International Panel on Climate Change.
- [IPCC, 2019] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019; Calentamiento global de 1,5 °C. ISBN 978-92-9169-353-5.
- [López, 2020] J. López de Benito (Energynews), 2020; Las olas de calor provocan grandes apagones en California. <<https://www.energynews.es/ola-de-calor-suministro-electrico-california/>>
- [Nairn, 2009] J. Nairn, R. Fawcett y D. Ray, 2009; Defining and predicting excessive heat events: A national system. *CAWCR Tech. Rep.*, **017**.
- [Pezza, 2012] A. B. Pezza, P. van Rensch y W. Cai, 2012; Severe heat waves in southern Australia: Synoptic climatology and large scale connections. *Climate Dyn.*, **38**.
- [Zhou, 2019] N. Zhou, 2019; Adelaide breaks its all-time heat record. *The Guardian, Australia*.