

TEMPERATURA DEL MAR MEDITERRÁNEO: HACIA 40 AÑOS DE CALENTAMIENTO

Francisco PASTOR GUZMAN¹, José Antonio VALIENTE PARDO¹, Samira
KHODAYAR PARDO¹,

¹*Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo*

paco@ceam.es, josean@ceam.es, khodavar@ceam.es

RESUMEN

El Mediterráneo, especialmente su cuenca occidental, presenta características geográficas y atmosféricas que conforman un régimen climático particular; habiendo sido calificado además como una zona especialmente sensible al cambio climático. En este marco singular, el mar juega un papel regulador fundamental en la climatología y meteorología de la zona; siendo por tanto de gran interés el estudio de su temperatura superficial, así como de su tendencia para analizar posibles escenarios climáticos futuros. Con este fin, se ha estudiado la mayor serie temporal disponible (1982-2021) de datos de satélite, con cobertura sobre el Mediterráneo, para la elaboración de una climatología y su análisis de tendencia.

A partir de datos de satélite se han construido las series de temperatura diarias para 4.248 puntos sobre la cuenca mediterránea y se ha evaluado su componente desestacionalizada. Se ha obtenido una tendencia consistente de calentamiento de la temperatura superficial del mar durante el periodo de análisis. Se ha analizado también la forma en que se ha producido este calentamiento, encontrándose que no solamente se registran valores de temperatura máxima mayores en los últimos años, sino que, especialmente, se registra una mayor frecuencia de valores de temperatura altos, lo que refuerza la consistencia del citado incremento de temperatura. Además, también se ha registrado un aumento del rango de valores de la temperatura del mar debido a un crecimiento relativo mayor de los valores máximos estivales respecto del registrado para los mínimos invernales.

Palabras clave: temperatura, mar, tendencia, calentamiento, Mediterráneo

ABSTRACT

The Mediterranean, especially its western basin, has geographical and atmospheric characteristics that make up a particular climatic regime; it has also been classified as an area that is particularly sensitive to climate change. Within this singular framework, the sea plays a fundamental regulating role in the climatology and meteorology of the area; it is therefore of great interest to study its surface temperature, as well as its trend in order to analyse possible future climate scenarios. To this end, the largest available time series (1982-2021) of satellite data, with coverage over the Mediterranean, has been studied for the elaboration of a climatology and its trend analysis.

Daily temperature series have been constructed from satellite data for 4248 points over the Mediterranean basin and their seasonally adjusted component has been evaluated. A consistent warming trend of the sea surface temperature during the period of analysis has been obtained. The way in which this warming has occurred has also been analysed, and it has been found that not only have higher maximum temperature values been recorded in recent years, but that, especially, a greater frequency of high temperature values has been recorded, which reinforces the consistency of the aforementioned temperature increase. In addition, there has also been an increase in the range of sea temperature values due to a higher relative increase in summer maxima than in winter minima.

Key words: temperature, sea, trend, warming, Mediterranean, warming

1. INTRODUCCIÓN

El mar Mediterráneo constituye el núcleo de la cuenca mediterránea, tanto respecto a la geografía como la climatología. En este último sentido, el Mediterráneo actúa como motor de la meteorología mediterránea debido a su acción como almacén de energía o a su efecto termorregulador de las capas bajas de la atmósfera. Este papel del mar se manifiesta en situaciones tales como el desarrollo de fenómenos locales como las brisas costeras, que tienen una organización regional en toda la cuenca marcada por el efecto del mar, y en fenómenos de mayor escala espacial y temporal como las olas de calor y en las precipitaciones torrenciales.

El mar Mediterráneo es una fuente de calor y humedad muy importante en los intercambios mar-atmósfera, contribuyendo a la inestabilización de las capas bajas y medias de la atmósfera. Al desplazarse las masas de aire mediterráneas sobre un mar más cálido aquellas reciben un aporte notable de humedad que puede jugar un papel importante en el desarrollo de eventos de precipitación torrencial (Pastor et al, 2015). Una vez estas masas de aire *potencialmente inestables* encuentran un mecanismo de disparo, bien sea de tipo orográfico (Pastor et al, 2010) o dinámico, pueden provocar lluvias torrenciales en las regiones costeras mediterráneas. Un indicador de la intensidad de dichos intercambios mar-atmósfera es la temperatura superficial del mar (SST en adelante) por lo que su estudio resulta de especial interés en el contexto del cambio climático. El conocimiento de su evolución en las últimas décadas servirá como base para la inferencia de cambios futuros, especialmente en una zona tan sensible a los previsible efectos del cambio climático como la cuenca mediterránea. En este trabajo se presenta un análisis espaciotemporal de la SST en el Mediterráneo, así como de su tendencia durante las últimas 4 décadas a partir de datos de satélite dado que constituyen la mejor fuente de observaciones que permiten obtener una visión de conjunto en toda la cuenca mediterránea.

2. MÉTODOS

El análisis y descripción espaciotemporal de SST en el Mediterráneo se ha realizado a partir de datos de satélite durante el periodo 1982-2021 de la base de datos GHRSSST Level 4 AVHRR_OI Global Blended Sea Surface Temperature Analysis; información

técnica detallada sobre esta base de datos se puede encontrar en el trabajo de Reynolds et al (2007). Estos datos presentan una cobertura completa, tanto espacial como temporal, para el periodo 1982-2021 con valores diarios a una resolución espacial de 0,25 grados. Para el análisis se ha seleccionado un subconjunto de 4.248 puntos incluidos en la cuenca mediterránea. En cada uno de estos puntos se ha realizado un análisis climático con el cálculo de promedios mensuales para la elaboración de una climatología básica, así como para la evaluación de las anomalías mensuales y su evaluación. A partir de la serie de valores medios mensuales se realizó un análisis espacial para intentar determinar la existencia de patrones regionales y/o estacionales de manera que se pudiera establecer la presencia de subcuencas con características propias específicas.

Tras este análisis espacial, se llevó a cabo un estudio de la evolución temporal de la SST mediante el cálculo de su tendencia, tanto para las series de datos puntuales como para la serie media de SST de todo el Mediterráneo. Al ser la SST una magnitud con un evidente comportamiento estacional, se generaron series de datos desestacionalizadas para evaluar la tendencia de fondo de la SST. Una vez observada la tendencia resultante se procedió a analizar cómo se desarrolló esa tendencia estudiando como cambiaron los valores de SST, tanto intra como interanualmente, para determinar si los cambios en los mismos se debían a incrementos generalizados o a la mayor frecuencia de eventos extremos de temperatura.

Todos los análisis estadísticos de las siguientes secciones se realizaron con el lenguaje y entorno R for Statistical Computing (R Core Team, 2021), a partir de las funciones básicas de R y algunos paquetes de R dedicados. Para el subconjunto de datos, la gestión y la salida gráfica, utilizamos principalmente el paquete *tidyverse* (Wickham et al, 2019). Para la evaluación de las tendencias lineales de la SST, se analizaron las series temporales de datos diarios utilizando métodos y funciones del paquete *forecast* (Hyndman et al, 2022). En primer lugar, se utilizó la función *ts* para convertir el vector numérico de la TSM en un nuevo objeto de serie temporal para la región mediterránea. A continuación, se utilizó el procedimiento *stl* para dividir la serie temporal en sus componentes (tendencia, estacional y resto). Para el análisis de las series temporales se utilizó la función *tslm* del paquete *forecast*, que imita una regresión lineal, pero conserva los atributos temporales, se utilizó para ajustar un modelo lineal para el componente de tendencia de la serie temporal, dando tanto la pendiente del modelo como su error.

3. RESULTADOS

En la primera parte del análisis espacial de SST se realizó un análisis climático de sus promedios mensuales, lo que permitió observar diferencias apreciables en la distribución espacial de la misma con un claro componente estacional. Para analizar con mayor detalle esta distribución espacial se realizó un análisis de clúster que permitió determinar una serie de patrones cuya repetición se observa a través de todo el periodo de estudio. De esta manera, se pudieron determinar dos modos principales de distribución espacial, estival e invernal (figura 1), con dos periodos de transición entre los mismos en primavera y otoño.

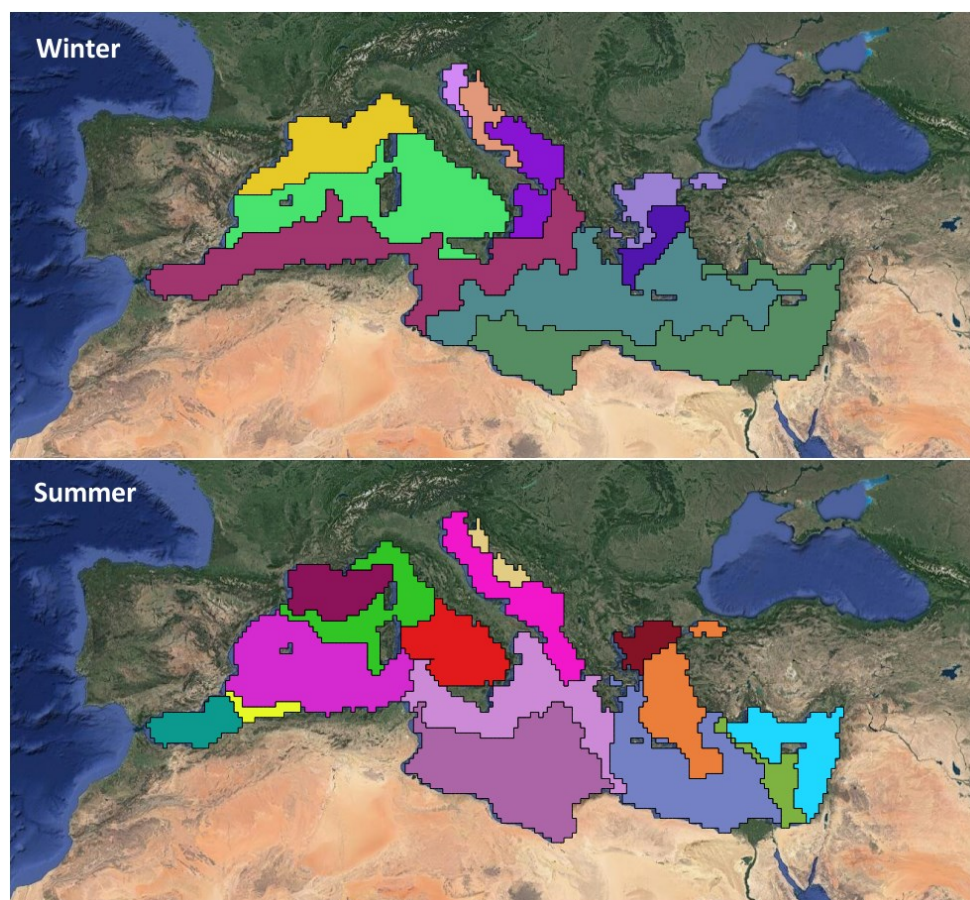


Fig. 1: Distribución espacial (clúster) de temperatura del mar en el Mediterráneo en los modos invernal (superior) y estival (inferior).

En el modo de distribución invernal se observa un claro gradiente de temperatura de Norte a Sur, con los valores más altos de temperatura cuanto más al Sur de la cuenca. También cabe destacar que, con menor intensidad, se aprecia también un gradiente longitudinal con temperaturas más altas, por lo general, hacia el Este de la cuenca mediterránea. En el caso del modo estival, se detecta la presencia de una serie de áreas diferenciadas sin un patrón lineal o sencillo de distribución como se daba en el caso invernal. En algunos casos en verano, la dinámica de la circulación oceánica determina la estructura de los clústeres como puede ser el caso del mar de Alborán. Los valores estivales más altos de temperatura se observan en el tercio Este del Mediterráneo, pero también en algunas zonas de la cuenca occidental, el sur del mar Tirreno o las costas de Libia. Por el contrario, los valores más bajos se observan en el área del mar de Alborán y el Golfo de León o incluso en el Este del mar Egeo, con relación al entorno del Mediterráneo oriental. Este periodo estival se prolonga entre los meses de junio a octubre, con el mes de noviembre como transición progresiva hacia el modo invernal, pero presentando una distribución espacial más cercana al régimen estival, aunque no tan definida y con mayor variabilidad interanual. El régimen invernal se encuentra bien establecido desde el final de diciembre hasta inicios de abril, quedando los meses de abril (sobre todo su segunda mitad) y mayo como los meses de transición en primavera.

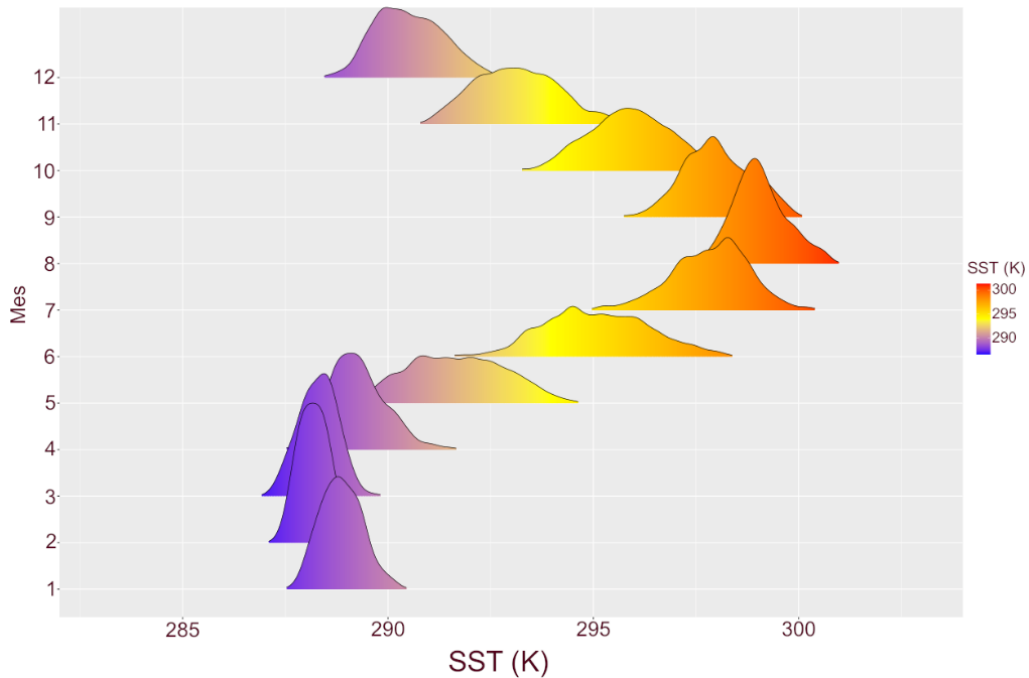


Fig. 2: Densidad anual de valores de SST en el periodo 1982-2021.

El análisis de la densidad mensual de valores de SST (figura 2) permite observar también los dos modos principales de la SST, estival e invernal, con periodos de transición en primavera y otoño. Los meses invernales muestran un rango de valores de SST menor al registrado en los meses de verano y con valores de densidad más altos mientras que los meses estivales, sobre todo entre junio y octubre, presentan mayores rangos de temperatura, pero con valores de densidades algo menores.

En lo concerniente al análisis de la tendencia temporal, se realizó el cálculo de ésta mediante una regresión lineal simple a partir de la serie de valores diarios promediados en toda la cuenca mediterránea. Se obtuvo un valor de tendencia positivo para el periodo 1982-2021, mostrado en la figura 3. No obstante, al mostrar la SST un fuerte componente estacional, este cálculo podría enmascarar el sentido físico del incremento de SST. Para evitar este tipo de problemas se procedió a la desestacionalización de la serie de valores diarios mediante el análisis de sus componentes estacional, de fondo y residuos estadísticos.



Fig. 3: Evolución temporal de la serie diaria de SST media del Mediterráneo (línea roja) y su tendencia lineal (línea azul) en el periodo 1982-2021.

En la figura 4 se muestra la evolución de la componente de fondo (desestacionalizada) de la serie de SST media diaria del Mediterráneo. Se aprecia de nuevo una clara tendencia al calentamiento del Mediterráneo a lo largo de las últimas 4 décadas, descontando el efecto de la estacionalidad o de eventos extremos registrados durante ese periodo. Cabe destacar que la tendencia presenta un valor muy similar tanto para la serie de datos original como para la serie desestacionalizada con un valor en el segundo caso de $(9.6 \pm 0.8) \cdot 10^{-5}$ °C/día, equivalente a un ascenso de SST de 0.35 grados por década. Estas tendencias presentan una significación estadística del 99.9%.

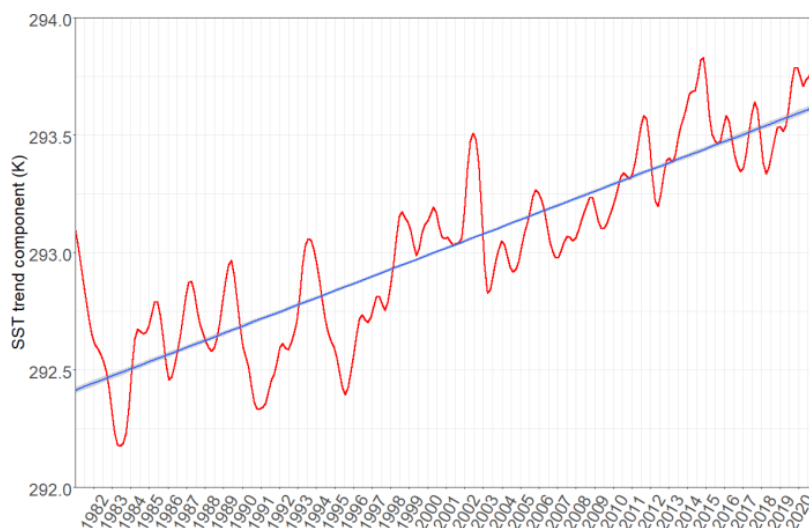


Fig. 4: Evolución temporal de la serie diaria desestacionalizada de SST media del Mediterráneo (rojo) y su tendencia lineal (azul) en el periodo 1982-2021

El calentamiento del Mediterráneo mostrado en las figuras 3 y 4 se obtuvo a partir de los valores medios diarios de SST por lo que es necesario un análisis espacial para

poder determinar si se produjo de manera uniforme en toda la cuenca o si existen diferencias regionales. Para ello, se reprodujo el análisis de la serie desestacionalizada para todos los puntos del Mediterráneo obteniendo de esta manera un mapa de su tendencia. En la figura 5 se muestra la variación total de SST en el periodo 1982-2021 obtenida para punto de la malla de datos sobre el Mediterráneo a partir de la tendencia obtenida en cada punto, teniendo una significación estadística superior al 99% en casi toda la cuenca mediterránea y con un error estadístico en el rango $(0.46-1.19) \cdot 10^{-5}$. Se observa un ascenso generalizado de la SST en toda la cuenca, pero con algunas diferencias regionales. Los valores más altos, en el rango entre 1.75 y 2° C, para el ascenso de SST se observan en la parte más oriental del Mediterráneo, en el noroeste del Egeo y, con valores ligeramente inferiores en el área comprendida entre los Golfos de León y Génova, la costa de Cataluña y Baleares. Por el contrario, la zona con menor incremento de la SST en el periodo de estudio se sitúa al Sur de Italia con valores inferiores a 1° C.

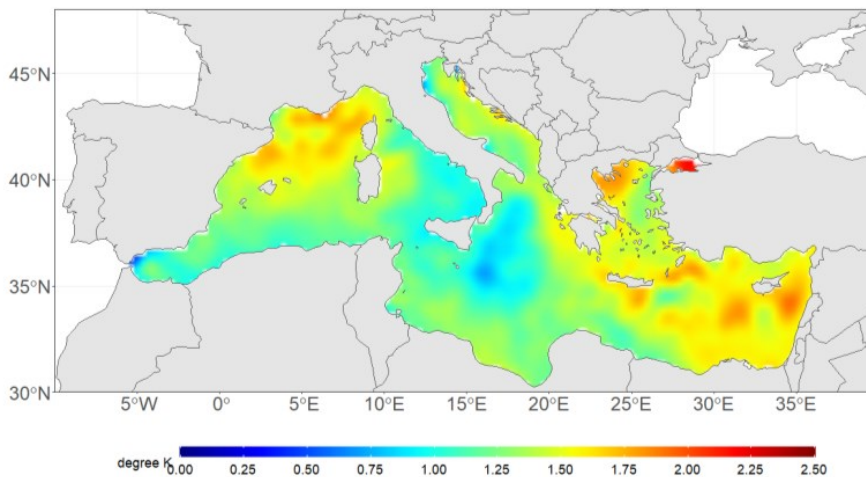


Fig. 5: Mapa de la variación total de SST desestacionalizada en el periodo 1982-2021, calculada a partir de la tendencia de los valores diarios.

Además de la variación regional, también resulta de interés estudiar si el incremento global de la SST se ha producido de manera uniforme a lo largo del año, especialmente si se tiene en cuenta su diferente distribución espacial de invierno y verano. En la figura 6 se muestra la densidad de valores de SST en periodos anuales. Se puede observar en la figura la presencia de dos picos destacados de la densidad que se corresponden con la distribución invernal (valores bajos de SST) y estival (valores altos). Se aprecia también que en el caso del pico estival existe un progresivo desplazamiento a lo largo de la serie temporal, de forma que dicho pico se ha ido desplazando hacia valores más altos a lo largo del periodo de estudio, mientras que en el caso del pico invernal su variación ha sido mucho más débil. También se aprecia cómo se ha ido ensanchando el rango de SST registrada, no solamente por la presencia de valores más extremos sino por la mayor frecuencia/densidad de valores altos.

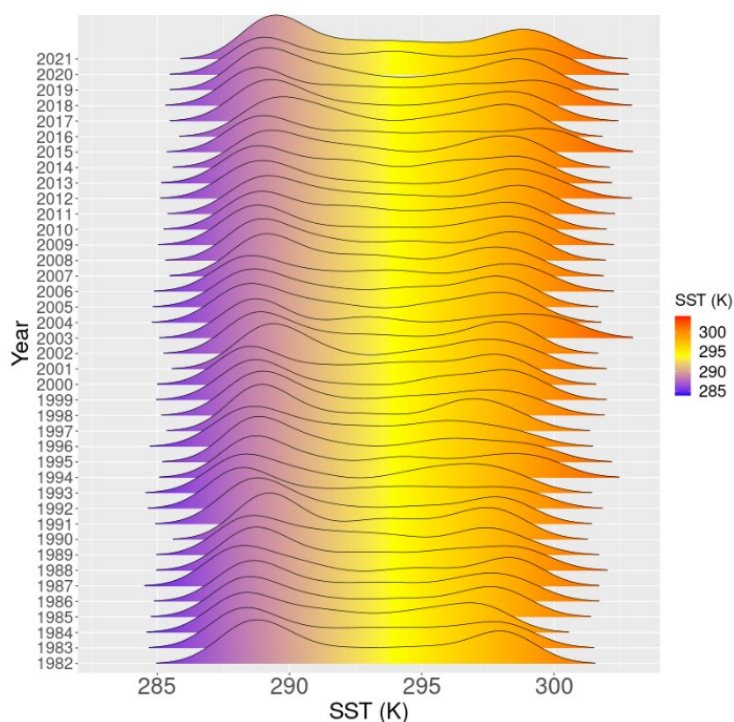


Fig. 6: Densidad anual de valores de SST en el periodo 1982-2021

4. DISCUSIÓN

En el apartado anterior se han mostrado los resultados del análisis espaciotemporal de datos de SST en la cuenca mediterránea para el periodo 1982-2021. En primer lugar, se ha podido determinar la presencia de dos modos principales de distribución de la SST en el Mediterráneo para invierno y verano. El modo de distribución invernal está determinado por un gradiente ascendente Norte-Sur que se extiende a lo largo de toda la cuenca mediterránea. En cambio, en el modo estival se establecen una serie de áreas diferenciadas sin un patrón o gradiente sencillo o lineal. Se trata de zonas bien delimitadas con valores de SST en rangos relativamente diferenciados que se observan, con ligeras variaciones en su extensión, a lo largo de todo el periodo analizado. Esta diferenciación de áreas puede ser debida tanto a factores atmosféricos como oceanográficos, principalmente por estos últimos debido a la circulación termohalina del Mediterráneo. Aparecen en verano zonas relativamente frías como el Golfo de León o el mar de Alborán con la entrada de agua atlántica a través del Estrecho de Gibraltar o la entrada de agua más fría desde el mar Negro hacia el Norte y Este del mar Egeo. También se ha analizado la densidad de valores de SST, que ha permitido determinar las características de esta en los dos modos principales de distribución, con un rango de valores menor, pero con mayores densidades en el modo invernal y un rango de temperaturas más extenso y menos denso para el verano.

En lo referente a la evolución temporal de la SST mediterránea se ha podido establecer una tendencia al calentamiento consistente a lo largo del periodo de 40 años analizado (1982-2021). Este calentamiento, aun siendo generalizado en toda la cuenca mediterránea, presenta ciertas diferencias regionales con los valores más altos de

incremento de SST en el tercio oriental del Mediterráneo y la mitad Norte del Mediterráneo occidental. Los valores más bajos, pero aún positivos, de la variación de SST se han registrado en el área entre el Sur de Italia y la costa de Libia. Esta tendencia general tampoco ha sido uniforme a lo largo del año, habiéndose registrado un aumento más significativo de la temperatura en los meses estivales que en el periodo invernal. Se ha constatado también que la variación en los valores de SST estivales se ha producido principalmente por la mayor presencia, frecuencia y extensión de valores de SST altos que por la mera presencia de valores extremos, aunque estos últimos también han ido aumentando su cuantía y frecuencia.

La región mediterránea es considerada como un punto caliente con respecto al cambio climático y sus previsible impactos. En este trabajo hemos demostrado que el mar Mediterráneo, motor y regulador de la climatología del área, ha experimentado un calentamiento consistente durante al menos los últimos 40 años. Este calentamiento está teniendo o tendrá en el futuro impactos en muchos ámbitos, desde la meteorología al desarrollo de la actividad económica o a la distribución y evolución de las poblaciones de fauna y flora marina. Es, por tanto, de especial interés persistir en el estudio y vigilancia de este calentamiento del mar Mediterráneo como indicador de futuros impactos del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los datos de temperatura del mar utilizados en este estudio se obtuvieron de la base de datos GHRSSST Level 4 AVHRR_OI Global Blended Sea Surface Temperature Analysis (último acceso 2022-03-10 en <https://doi.org/10.5067/GHAAO-4BC21>) disponible en la web del Physical Oceanography Distributed Active Archive Center. Este trabajo fue financiado por la Generalitat Valenciana mediante el proyecto IMAGINA_PROMETEO (PROMETEU/2019/110) y el ministerio de Ciencia y Tecnología a través del proyecto VERSUS (CGL2015-67466-R).

REFERENCIAS

- Hyndman R, Athanasopoulos G, Bergmeir C, Caceres G, Chhay L, O'Hara-Wild M, Petropoulos F, Razbash S, Wang E, Yasmeeen F. (2022). forecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.16, <https://pkg.robjhyndman.com/forecast/>.
- Pastor, F., Gómez, I., Estrela, M.J. (2010). Numerical study of the October 2007 flash flood in the Valencia region (Eastern Spain): the role of orography. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1331–1345, doi:10.5194/nhess-10-1331-2010.
- Pastor, F., Valiente, J.A., Estrela, M.J. (2015). Sea surface temperature and torrential rains in the Valencia region: Modelling the role of recharge areas. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 1677–1693, doi:10.5194/nhess-15-1677-2015.
- R Core Team. (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

Reynolds, R. W., T. M. Smith, C. Liu, D. B. Chelton, K. S. Casey and M. G. Schlax. (2007). Daily High-resolution Blended Analyses for sea surface temperature, *Journal of Climate*, 20, 22. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1824.1>

Wickham et al. (2019). Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.