En la elaboración de este capítulo han participado:
Natalia Barrientos, Raquel Vaquer-Sunyer, Mélanie Juza, Manuel Vargas-Yáñez, Damià Gomis, Ananda Pascual, Bàrbara Barceló-Llull, Rosa Balbín, Gabriel Jordà y Marta Marcos.

Temperatura del mar Balear

1. Temperatura en superficie

2. Temperatura en profundidad

La temperatura del océano ha ido variando de forma natural a lo largo de la historia de la Tierra, y tras la industrialización (siglo XVIII) hay que sumarle el factor antropogénico. Es una de las variables cruciales del complejo sistema climático, ya que el océano contribuye a regular el clima de todo el planeta a través de los intercambios de calor con la atmósfera y de su redistribución mediante las corrientes marinas. De hecho, el océano almacena cantidades de calor muy superiores a las de la atmósfera y representa la «memoria» del sistema climático, a causa de la gran escala temporal de los cambios oceánicos. Por tanto, el análisis de las series temporales de temperatura oceánica constituye un indicador climático fundamental.[1, 2]

El mar Mediterráneo es una región especialmente vulnerable al aumento de la temperatura global planetaria, debido en parte a su naturaleza semicerrada, que le proporciona menor inercia térmica.[3-5] Por otro lado, cambios regionales en la temperatura oceánica pueden tener repercusiones globales, ya que el Mediterráneo, a través del estrecho de Gibraltar, se encuentra conectado con la Circulación Meridional de Retorno del Atlántico Norte, el motor atlántico de conducción de calor en la Tierra.[6] En toda la cuenca Mediterránea se ha observado que el aumento de la temperatura superficial del agua (a partir de ahora descrita con las siglas en inglés para Sea Surface Temperature, SST) está correlacionado con el aumento de la temperatura superficial del planeta.[7-9]

En las últimas cuatro décadas, se han detectado tendencias de calentamiento oceánico en la cuenca occidental del mar Mediterráneo.[2, 10-13] Datos satelitales del período 1982-2018 permiten estimar tendencias al alza de la SST del orden de 0,036 ± 0,006 °C/año.[14] Estos valores son similares a los aportados en el «Ocean State Report» del Servicio Marino Copernicus, que integra todo tipo de observaciones de temperatura y obtiene un incremento promedio para la SST del Mediterráneo de 0,036 ± 0,002 °C/año entre 1993 y 2020. Dicho incremento supone la segunda mayor tendencia registrada en los mares regionales de Europa después del mar Negro.[5]

En el mar Balear, las tendencias de SST detectadas mediante datos satelitales del período 1982-2021 también muestran incrementos de 0,036 ± 0,002 °C/año, que corresponden a un aumento acumulativo de 1,43 °C en cuarenta años (ver la figura de la ficha).[2, 13, 15] Además de un aumento progresivo de la SST anual, también se ha observado una intensificación de la señal estacional, debido a que la SST de verano ha aumentado más que la de invierno.[14]

La temperatura de las masas de agua situadas a diferentes profundidades es también un indicador de cambios en el clima. Este sería el caso del agua occidental intermedia (en inglés, Western Intermediate Water, a partir de ahora WIW), que circula en torno a los 100-300 m de profundidad en el mar Balear, y para la que también es importante identificar los cambios estacionales, ya que la WIW se forma en invierno y/o primavera. Igualmente son de gran importancia los cambios que se producen en las aguas intermedias de origen

¿QUÉ ES?

La temperatura del mar es una variable oceanográfica de gran importancia climática y ecosistémica. Ello se debe a que condiciona la supervivencia, la distribución y el metabolismo de especies, las corrientes oceánicas, el aporte de nutrientes, el nivel del mar y el intercambio de gases con la atmósfera (que controla la acidificación y la oxigenación de las aguas). Adicionalmente, el análisis temporal de la temperatura oceánica representa un indicador climático, debido a que el océano absorbe y almacena grandes cantidades de calor.

¿POR QUÉ?

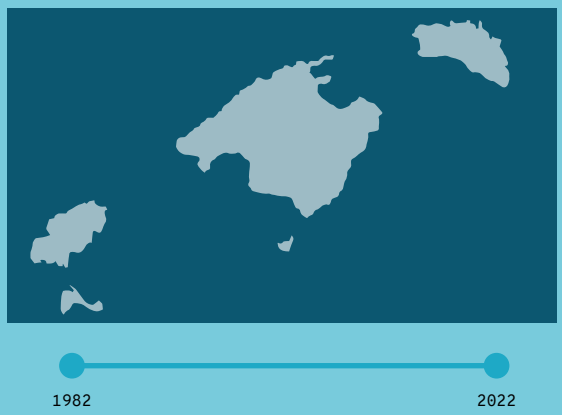
Conocer y predecir los cambios en la temperatura oceánica resulta crucial, ya que podrían repercutir en el estado ecológico del mar y en la estructura socioeconómica de las Islas Baleares. La información que aportan largas series temporales de temperatura contribuye a definir estrategias de adaptación y mitigación de riesgos.

METODOLOGÍA

Los datos de temperatura superficial del mar (SST) provienen de satélites del Servicio Marino Copernicus[24] desde que hay registro (1982). Los datos son posteriormente procesados y visibilizados en mapas y gráficos a través de la página web del Sistema de Observación y Predicción Costero de las Illes Balears (ICTS SOCIB),[2, 13, 15, 32] que contribuyen a identificar tendencias, anomalías y olas de calor marinas, y que utilizan como referencia la climatología de 1982 a 2015.

Para la temperatura en profundidad, los datos provienen de medidas *in situ* realizadas a través de campañas oceanográficas en las que se utilizan dispositivos CTD (del inglés Conductivity Temperature Depth), que miden simultáneamente la temperatura, la salinidad y la profundidad. Los CTD proporcionan perfiles verticales de toda la columna de agua: aguas superficiales, aguas intermedias (de 150-200 m a 600 m) y aguas profundas (por debajo de 600 m).

LOCALIZACIÓN



RESULTADOS

La SST ha aumentado 1,43 °C en cuarenta años, con una tendencia de aumento de 0,36 °C/década.

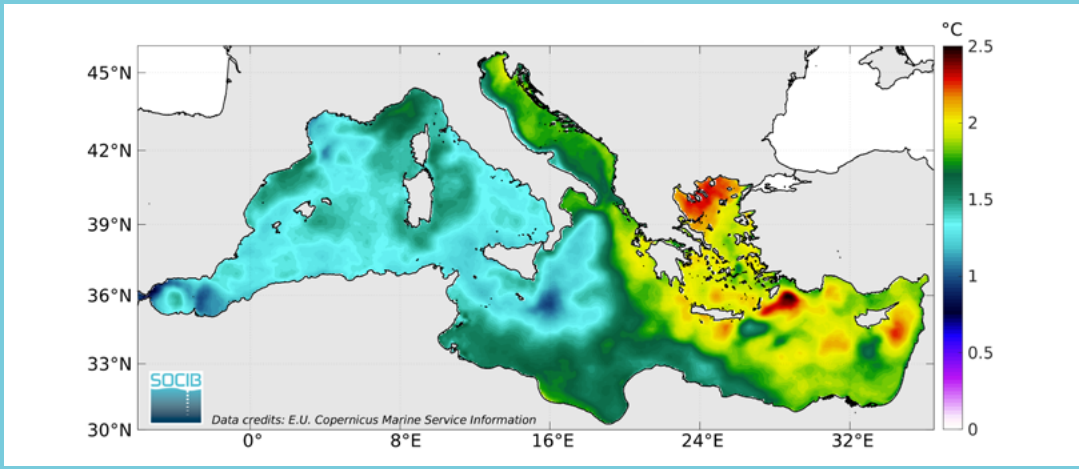
Desde 1982, la máxima temperatura promedio registrada ha sido de 29,2 °C (el 13 de agosto de 2022).

Desde 2020, las anomalías térmicas de la SST superan 1 °C, en particular en la zona sureste del mar Balear. Para 2021 y 2022, las anomalías promedio de verano fueron de + 1,2 °C (con un máximo estacional de +1,6 °C en el sur de Mallorca) y de + 2,7 °C (con un máximo estacional de + 3 °C en varios puntos del mar Balear), respectivamente.

Adicionalmente, se han se han registrado cinco olas de calor de mayo a diciembre.

En profundidad, como mínimo desde 1996, el mar Balear está experimentado aumentos de temperatura y de salinidad en toda la columna de agua:

- 0,14 °C/década a 100-300 m.
- 0,1 °C/década a 300-600 m.
- 0,08 °C/década a > 600 m.



Mapa del Mediterráneo que muestra la tendencia acumulativa de la temperatura superficial del mar (significativa al 95 %) entre los años 1982–2021 a partir de datos satelitales. FUENTE: ICTS SOCIB <https://apps.socib.es/subregmed-indicators/ocean_temperature.htm>.[2, 15]

levantino (en inglés, Levantine Intermediate Water, a partir de ahora LIW), situadas entre los 300-600 m de profundidad, y en las aguas profundas por debajo de los 600 m, debido al gran volumen que ocupan y, en consecuencia, a la gran cantidad de calor absorbida por estas masas de agua.

Más allá de su valor como indicador climático, la evolución de la temperatura marina, tanto en superficie como en profundidad, condiciona muy significativamente los ecosistemas marinos. En particular:

→ Determina la supervivencia y la distribución de muchas especies. La pérdida de parte de la distribución de ciertas especies, como la fanerógama *Posidonia oceanica*,[16, 17] o la variabilidad interanual de los hábitats de reproducción de otras son solo algunos ejemplos.[18] Por otra parte, cambios regionales en la temperatura marina pueden favorecer la introducción y la adaptación de especies invasoras.[19]

→ Regula distintos procesos metabólicos: un incremento de la temperatura puede aumentar el metabolismo de ciertos organismos que presentan intervalos de tolerancia pequeños.[20]

→ Influye en la dinámica de intercambio de gases con la atmósfera: la absorción de CO_2 atmosférico por parte de los océanos depende de la temperatura, y dicha absorción, más allá de los beneficios que comporta la retirada de CO_2 de la atmósfera, también genera un descenso del pH del agua, lo que causa acidificación oceánica.[21]

→ Controla procesos hidrodinámicos como la posición de los frentes oceánicos, que a su vez condicionan la productividad y los ciclos de nutrientes.[22]

→ Dirige las corrientes oceánicas (y por tanto, la distribución de calor y otros parámetros) y la estratificación de la columna de agua a través de los cambios en la densidad.[23] Los cambios en la estratificación afectan a procesos dinámicos verticales que son cruciales para, entre otras cosas, el aporte de nutrientes desde las capas más profundas a la capa fótica.

→ Finalmente, el aumento de la temperatura marina es uno de los dos factores (junto con la fusión de hielos continentales causada por la temperatura atmosférica) responsables del aumento del nivel del mar, que a su vez tiene un impacto importante sobre los ecosistemas costeros.

METODOLOGÍA

Existen distintas fuentes de datos de temperatura en el mar Balear. Los datos presentados a continuación han sido recogidos de la manera que se detalla seguidamente.

1. Temperatura en superficie

Se utilizan datos satelitales desde 1982 disponibles en el Servicio Marino Copernicus[24] en forma de series históricas de datos diarios con una resolución espacial del orden de 5 km y una precisión en los valores inferior a 0,1 °C, suficiente para captar variaciones en el ciclo estacional a nivel de cuenca.

Estos datos se procesan y visibilizan mediante la aplicación web Indicadores Subregionales del Mar Mediterráneo del Sistema de Observación y Predicción Costero de las Illes Balears (ICTS SOCIB).[15] Entre los productos generados se proporcionan mapas y gráficos de tendencias de SST que muestran promedios anuales y estacionales (invierno: enero, febrero, marzo; primavera: abril, mayo, junio; verano: julio, agosto, septiembre; y otoño: octubre, noviembre, diciembre).

Adicionalmente se incluyen mapas y gráficos que comparan las anomalías de SST (a partir de ahora, SSTA) en referencia a la climatología existente entre los años 1982-2015. Se elige este rango de años por ser el periodo de tiempo más largo posible, excluyendo los años recientes para poder compararlos entre sí con una referencia independiente.[2, 15] Se indican las tendencias de cambio de SST y de SSTA (significativas al 95 %) en °C/década desde 1982 hasta 2021.

2. Temperatura en profundidad

Se incluyen datos de temperatura en profundidad a partir de medidas *in situ* que derivan en series temporales locales dispersas en el espacio y en el tiempo, pero de gran resolución en cuanto a los valores proporcionados. Los muestreos *in situ* no suelen capturar cambios de temperatura significativos en superficie debido a la baja frecuencia del muestreo y a la alta variabilidad de estas aguas, pero sí muestran información valiosa de las masas de agua de profundidad y de su evolución. Se presentan datos de temperatura en profundidad de campañas oceanográficas que realizan transectos en las mismas localizaciones mediante dispositivos CTD (del inglés Conductivity Temperature Depth, por los parámetros de salinidad, temperatura y profundidad que miden) ensamblados en una roseta (Figura 1). También existen datos de muestreo de masas de agua mediante boyas de deriva (programa Argo) o *gliders* que no se incluyen en este indicador debido a la variabilidad espacial en la recolección de datos. Los CTD proporcionan perfiles verticales de los parámetros desde la superficie hasta la profundidad deseada. Se consideran aguas intermedias de los 150-200 m a los 600 m, y aguas profundas por debajo de los 600 m. En el mar Balear puede hacerse una división en la capa intermedia para separar el agua intermedia occidental de la de origen oriental o levantina (WIW y LIW).

Concretamente, se muestran diagramas de temperatura-salinidad (TS) elaborados con los datos de temperatura potencial y de salinidad correspon-

Figura 1. Ejemplo de dispositivo CTD utilizado en campañas oceanográficas para medir parámetros de temperatura, salinidad y profundidad, entre otras variables. Fuente: Miquel Gomila.

dientes a 37 estaciones oceanográficas que cubren los canales del mar Balear, que el Instituto Español de Oceanografía (IEO-CSIC) muestrea con periodicidad estacional desde 1996 como parte del proyecto de monitorización nacional RADMED[25] (Series Temporales de Datos Oceanográficos en el Mediterráneo). Los datos utilizados se extienden hasta 2019 (inclusive) y muestran las principales masas de agua presentes en el mar Balear, así como en el resto del Mediterráneo occidental.

Se incluyen análisis de las series temporales de temperatura en profundidad en tres masas de agua: agua intermedia occidental (WIW), agua intermedia oriental (LIW) y aguas profundas (del inglés Deep Water, a partir de ahora DW).

Para obtener un valor único de la temperatura de WIW correspondiente a cada campaña que pudiera graficarse como una serie temporal, se usaron tres métodos:

→ (i) Identificar, en cada una de las 37 estaciones oceanográficas y para cada una de las campañas oceanográficas realizadas, aquellas aguas con densidad potencial entre 28,8 y 29,05 kg/m^3, dado que es el rango de densidad más frecuente para la WIW (Vargas-Yáñez *et al.*).[26]

→ (ii) Buscar el mínimo valor de temperatura dentro de las aguas en este rango de densidad y considerar este valor como representativo de la WIW. Esta operación se realizó para cada estación oceanográfica y para cada campaña (ver Vargas-Yáñez *et al.*[12] para una descripción detallada de la metodología).

→ (iii) Utilizar un criterio geométrico para determinar qué porcentaje de WIW corresponde a cada par de valores de T y S. Este método permite, además, dar un intervalo de error para estas estimaciones (ver Juza *et al.*[27] para los detalles de este método).

Para calcular la serie temporal de la LIW se emplearon dos métodos distintos:

→ (i) En cada estación y para cada campaña se identificó el valor más alto de la salinidad, considerándolo el valor de la LIW. Para obtener un único valor de temperatura correspondiente a cada campaña oceanográfica, se promediaron los valores de todas las estaciones y se obtuvo además la desviación estándar.

→ (ii) Se utilizó el máximo de salinidad de las 37 estaciones de cada campaña.

Para calcular la serie temporal de la DW, se consideraron como aguas profundas aquellas con una densidad superior a los 29,11 kg/m^3. Sin embargo, este valor de densidad no se alcanzaba en la mayoría de las campañas anteriores al año 2005, lo que acorta considerablemente la longitud de las series temporales y la posibilidad de estimar tendencias significativas. Por ello, finalmente se decidió fijar el umbral de densidad para considerar la presencia de aguas profundas en 29,1 kg/m^3.

Entre las limitaciones a la hora de caracterizar correctamente la evolución de los campos de temperatura cabe destacar la gran variabilidad temporal (desde variaciones diarias a decadales) y espacial (depende de la posición de las corrientes y frentes oceánicos, transferencia de calor atmósfera-océano) inherente a esta variable.[28] Por tanto, se precisa una gran cantidad de datos con buena distribución en el espacio y continuidad temporal. En particular, para poder observar tendencias climáticas significativas de temperatura es necesario contar con series largas (> 30 años como mínimo); por ello es fundamental acompañar cualquier valor de tendencias con un cálculo estadístico de su significancia.[28]

RESULTADOS

1. Temperatura en superficie

La temperatura media superficial anual del mar Balear desde 1982 hasta 2021 oscila entre los 18 y los 20 °C. Se registra asimismo una tendencia positiva de 0,36 ± 0,02 °C/década, lo que implica un incremento de 1,43 °C en cuarenta años[13, 15] (Figura 2). Desde 2005, todas las anomalías de temperatura promedio anuales en la cuenca balear (calculadas en referencia a la climatología de 1982 hasta 2015) han sido positivas, han superado el valor de 1 °C en 2020.

El conocimiento de las fluctuaciones de las SST estacionales es muy importante, puesto que afectan a los ciclos biológicos de muchos organismos marinos. Las tendencias calculadas para el período

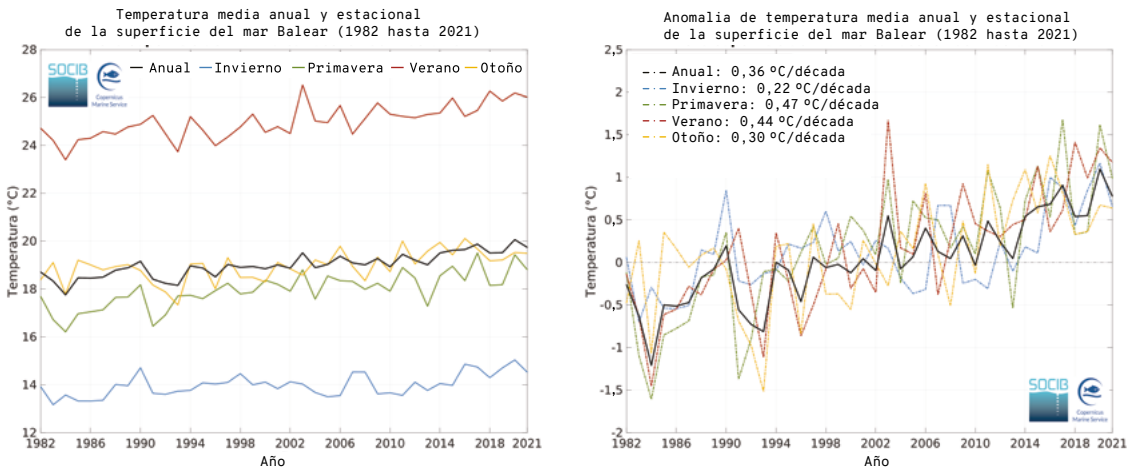


Figura 2. Temperatura media anual (color negro) y estacional (resto de colores) de la superficie del mar Balear desde 1982 hasta 2021. El gráfico de la izquierda muestra los valores absolutos, mientras que el de la derecha muestra las anomalías respecto a la climatología de referencia 1982–2015. En el panel de la derecha se cuantifican también las tendencias de aumento en °C/década, tanto anual como para cada estación. FUENTE: ICTS SOCIB <https://apps.socib.es/subregmed-indicators/ocean_temperature.htm>.[2, 15]

1982-2021 (Figura 2) muestran un mayor aumento de temperatura en primavera (0,47 °C/década) y en verano (0,44 °C/década) en comparación con la de otoño (0,30 °C/década) o invierno (0,22 °C/década); se trata de resultados en consonancia con los de Pisano *et al.*[14]

La SST media de 2021 varía entre los 20,2 °C en el sector sur del mar Balear y los 19,5 °C en el sector norte. Las anomalías térmicas (referidas a la climatología 1982-2015) son mayores en el sureste, alcanzando un máximo de 1°C (Figura 3).

Por estaciones, en 2021 la temperatura media de invierno osciló entre los 14 °C en el norte de la cuenca y los 15 °C en la parte sur; en primavera, entre los 18,5 °C en el norte y los 19,25 °C del canal de Mallorca; en verano, la SST varió entre los 25,75 °C del norte y los 26,6 °C del sureste de Cabrera; y en otoño, osciló entre los 19 °C del norte y los 19,75 °C del sur de la cuenca. Las mayores anomalías térmicas en 2021 se dieron en verano con valores de + 1,6 °C (siempre respecto a la climatología de 1982-2015), y se observan en el sureste y el sur de Cabrera (Figura 3).

2. Temperatura en profundidad

Los valores de temperatura y de salinidad en profundidad para las distintas masas de agua del mar Balear se muestran primero en forma de diagrama TS (Figura 4). Los valores de TS invernales de las aguas atlánticas (que circulan en los 100 metros más superficiales de las aguas baleares) corresponden a las temperaturas más altas (> 13,5 °C) y a los valores de salinidad más bajos (< 38,2) del diagrama TS. Estas aguas aumentan considerablemente su temperatura en verano al tiempo que disminuye su salinidad, debido a una influencia más directa de las aguas atlánticas.[26]

Bajo el agua atlántica se aprecia un mínimo pronunciado de temperatura de < 13 °C, con salinidades de entre 38,0 y 38,3, que corresponde a la WIW. Esta masa de agua se detecta en los canales del mar Balear en invierno si se ha formado en la plataforma continental de las Baleares, o en primavera y verano si se ha formado en la plataforma continental de Cataluña o del golfo de León, y alcanza los canales baleares fluyendo con la corriente que discurre hacia el sur a lo largo de toda la plataforma continental catalana. A pesar de su baja temperatura, su densidad no es demasiado elevada, debido al carácter continental de las aguas que contribuyen a su formación. En consecuencia, esta masa de agua se sitúa por debajo del agua atlántica, a partir de unos 150 m, pero no se hunde más allá de los 300 m.

Por debajo de la WIW se encuentra la LIW. Esta masa de agua se origina al sur de la isla de Rodas, en la cuenca Mediterránea oriental, también en invierno, y es la masa de agua con mayor salinidad de todas las que pueden encontrarse en el Mediterráneo occidental. Su posición dentro del diagrama TS es evidente por su máximo absoluto de salinidad.

Finalmente, por debajo de la LIW circulan las aguas profundas (DW), que se originan por la mezcla de dos masas de agua. La primera de ellas es el Agua Profunda del Mediterráneo Occidental, formada en invierno frente al golfo de León, cuando las tormentas son capaces de enfriar y mezclar toda la columna de agua desde la superficie hasta más de 2.000 m de profundidad. La segunda es el Agua Densa del Tirreno, que, como su propio nombre indica, se forma en ese mar.

Si exceptuamos la WIW formada durante el año 2010 (ver elcolor verde en la Figura 4 y Vargas-Yáñez *et al.*[29]), desde 1996 la tendencia generalizada para todas las masas de agua es hacia un aumento de la temperatura y de la salinidad. Así, por ejemplo, el análisis de la serie temporal de la WIW muestra que durante el periodo de estudio (1996-2019) la temperatura de esta masa de agua aumentó a un ritmo de en torno 0,14 ± 0,06 °C/década (intervalo de confianza del 95 %) como media de los tres métodos de estudio (Figura 5).

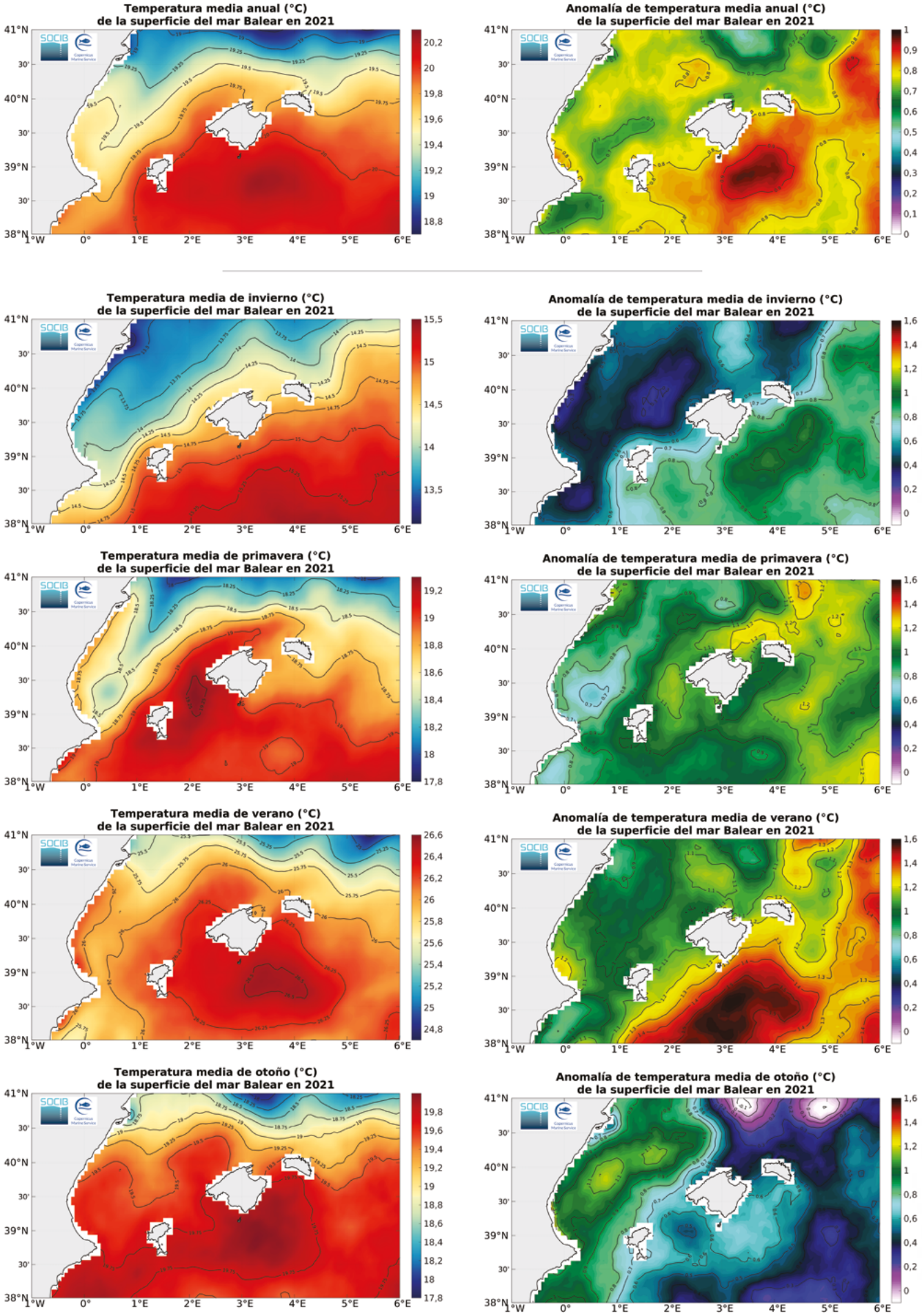


Figura 3. Mapas satelitales de 2021 con la media anual de la temperatura superficial y la media de cada estación en la región del mar Balear. Los paneles de la izquierda muestran los valores absolutos, mientras que los de la derecha muestran las anomalías respecto a la climatología de referencia 1982–2015. ICTS SOCIB <https://apps.socib.es/subregmed-indicators/ocean_temperature.htm>.[2, 15]

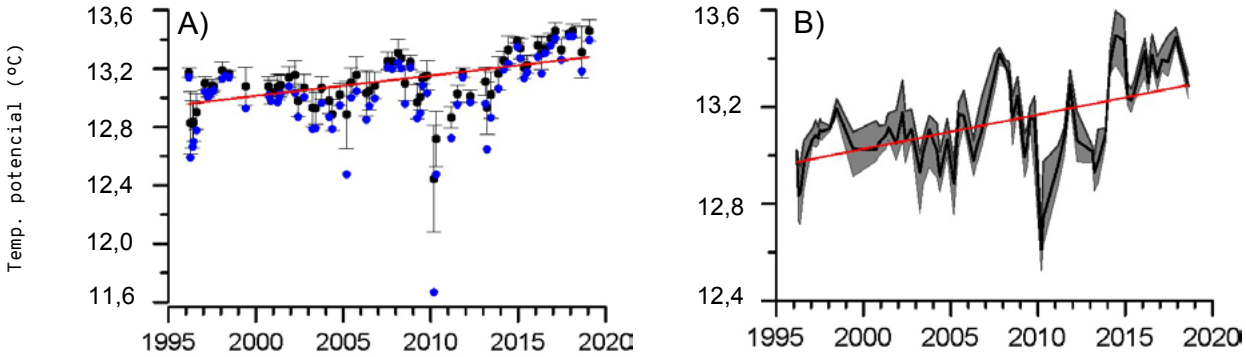


Figura 5. Evolución temporal de la temperatura del agua intermedia occidental (WIW) en 37 estaciones RADMED de los canales del mar Balear. A) Puntos negros: primer método de cálculo que muestra el valor medio de las 37 estaciones con una desviación estándar; puntos azules: segundo método de cálculo que indica el mínimo de densidad de todos los valores correspondientes a las 37 estaciones. B) Tercer método de cálculo de las propiedades de la WIW (método geométrico),[27] donde la línea negra indica el percentil 50, mientras que el sombreado gris muestra los percentiles 17 y 83. En ambas gráficas la línea roja muestra la tendencia de aumento de la temperatura. Fuente: modificado de Vargas-Yáñez *et al.*[12]

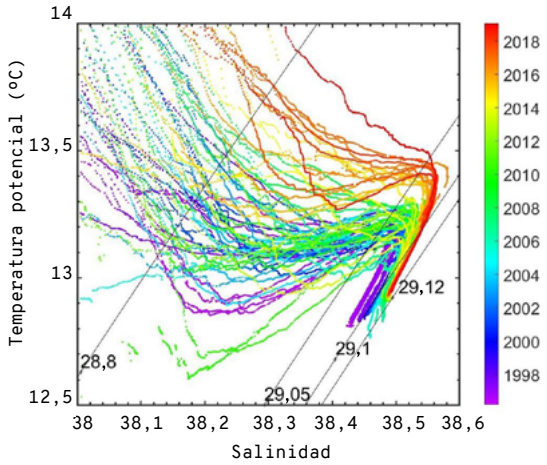


Figura 4. Diagrama de temperatura y salinidad (TS) que muestra la evolución anual (de 1996 a 2019) de las masas de agua que circulan en el mar Balear. Cada una de las 71 campañas oceanográficas se presenta como un único perfil sobre el diagrama TS, obtenido a partir de la media de todas las estaciones de la campaña. El color del perfil denota el año de la campaña. Las líneas diagonales muestran los valores de densidad potencial (isopicna) correspondientes a cada par de valor de TS. El agua atlántica es la de mayor variabilidad debido a que fluye en la superficie (< 100 m), y se encontraría siempre a la izquierda de la isopicna 28,80 kg/m³. El agua occidental intermedia (WIW) se situaría entre las isopicnas 28,80 y 29,05 kg/m³. La isopicna 29,05 kg/m³ indicaría el núcleo del agua oriental intermedia (LIW), y las isopicnas 29,10 y 29,12 las aguas profundas (DW). Fuente: modificado de Vargas-Yáñez *et al.*[12]

También la LIW muestra un aumento gradual estadísticamente significativo, en este caso de 0,10 ± 0,02 °C/década (intervalo de confianza del 95 %) como media de los dos métodos de estudio (Figura 6).

En aguas profundas (Figura 7), también se muestra un aumento progresivo de la temperatura, aunque en este caso parece derivar de un cambio brusco en la densidad ocurrido a partir del invierno de 2005, cuando un agua profunda más cálida y también más salada y densa que la que se había formado hasta ese momento ocupó las capas más profundas del Mediterráneo occidental, afectando también al mar Balear. Este cambio abrupto ha sido denominado en la literatura científica Transición del Mediterráneo Occidental,[23] y parece estar ligado a un aumento de la salinidad y de la temperatura de las aguas intermedias que proceden del Mediterráneo oriental. La influencia de este episodio en las series temporales de las aguas profundas del mar Balear ya había sido puesto de manifiesto en Vargas-Yáñez *et al.*[25] Las tendencias de aumento de temperatura de 0,08 ± 0,01 °C/década se han obtenido utilizando el método 1 (Figura 7A, puntos azules).

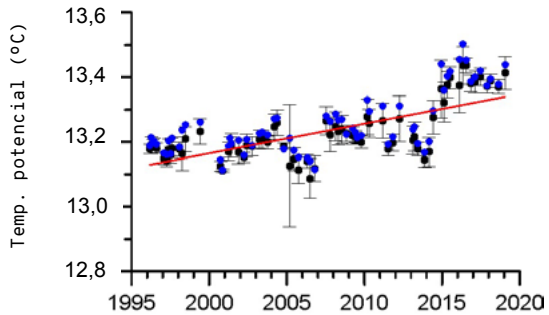


Figura 6. Evolución de la temperatura potencial del agua levantina occidental (LIW) en los canales del mar Balear. Puntos negros: primer método de cálculo donde se promediaron los valores de las 37 estaciones, obteniéndose además la desviación estándar. Puntos azules: segundo método de cálculo a partir del máximo valor de salinidad de todas las estaciones de cada campaña. La línea roja muestra la tendencia de aumento de la temperatura. Fuente: modificado de Vargas-Yáñez *et al.*[12]

Es importante destacar otro estudio de Barceló-Llull *et al.*[30] que muestra un aumento de las temperaturas máximas de las masas de agua de profundidades intermedias en el canal de Mallorca tras ocho años de seguimiento:

- A 100 m de profundidad se observan aún cambios estacionales, mientras que a 200 m la señal estacional ya es muy pequeña.

- La tendencia máxima de temperatura de 0,19 °C/año se alcanza en torno a los 100 m superiores. Entre los 100-300 m esta tendencia disminuye a 0,077 °C/año, mientras que entre los 300-700 m es de 0,043 °C/año.

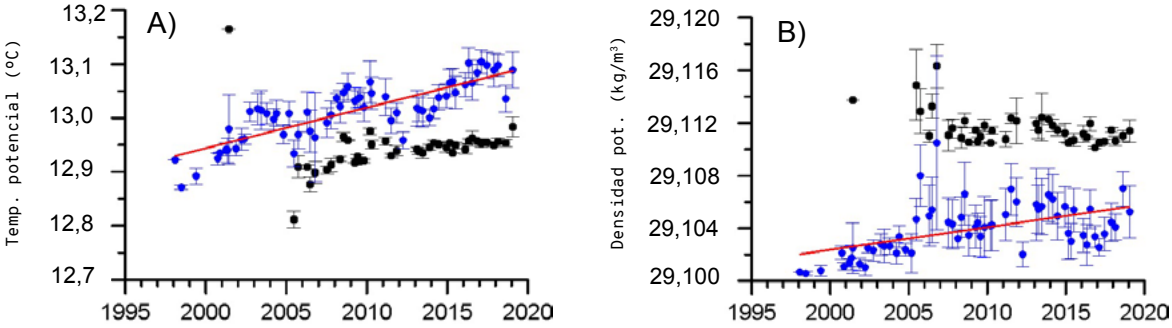


Figura 7. Evolución temporal de la temperatura (A) y la densidad (B) en aguas profundas. Puntos negros: aguas con densidad superior a los 29,11 kg/m³ a partir de 2005 (método 1). Puntos azules: para prolongar el seguimiento temporal anterior al año 2005 se utilizaron máximos de densidad de 29,1 kg/m³ para considerar la presencia de aguas profundas (método 2). En ambas gráficas la línea roja muestra la tendencia de aumento de la temperatura. FUENTE: modificado de Vargas-Yáñez *et al.*[12]

Figura 8. Serie temporal diaria de la temperatura superficial del mar Balear en el año 2022. En negro se muestra la temperatura superficial registrada a partir de observaciones de satélite; en tonos de color naranja se muestra la intensidad de las olas de calor marinas registradas. FUENTE: ICTS SOCIB <https://apps.socib.es/subregmed-marine-heatwaves/daily_bulletin.htm>.[13, 32]

El extraordinario año 2022

En 2022, el mar Balear sufrió temperaturas extremas y cinco olas de calor marinas en cadena —desde inicios de mayo hasta finales de diciembre— y con carácter excepcional debido a su aparición inicial temprana en el año, su intensidad, duración y extensión espacial (Figura 8). El 13 de agosto de 2022, los datos de satélites registraron un promedio de temperatura superficial de 29,2 °C en la región de las Islas Baleares que correspondía a una anomalía de + 3,3 °C respecto a los datos históricos; la temperatura máxima detectada en la boya de Sa Dragonera fue de 33,3 °C (ver el indicador «Temperatura del aire sobre el mar» del INFORME MAR BALEAR). Fue la SST promedio más alta registrada en la región desde 1982 (primer año con datos de satélite), superando el récord anterior del verano de 2003 en la misma región. Adicionalmente, se detectaron cinco olas de calor desde mayo hasta diciembre de 2022.

Es importante mencionar que estos valores son promedios en la región de las Islas Baleares y que existen variaciones espaciales importantes. Localmente se detectaron temperaturas de superficie más cálidas. Por ejemplo, gracias a los diversos sistemas de observaciones de temperatura multiplataforma de ICTS SOCIB (estaciones fijas costeras, boyas de deriva superficiales y buque oceanográfico) se detectaron valores que superaron los 30 °C durante el verano en el canal de Ibiza o a lo largo de la costa de las Islas Baleares.[31]

Proyecciones climáticas para la temperatura del mar Balear

Los modelos climáticos muestran que la SST continuará aumentando considerablemente durante el siglo XXI, con un aumento de entre + 1,2 °C y + 3,6 °C para finales de siglo, en función del escenario de emisiones de gases de efecto invernadero (pesimista o moderado, respectivamente).[33-35] Un hecho que, entre otros, magnificará la intensidad y duración de las olas de calor marinas, independientemente del escenario de emisión.[35]

Los modelos también proyectan un aumento considerable de la temperatura del mar Balear en toda la columna de agua, más pronunciado entre los 0-150 m (0,81-3,71 °C) y entre los 150-600 m (0,82-2,97 °C).[36]

CONCLUSIONES

→ Estudios de las series de datos satelitales del mar Balear muestran tendencias de aumento de la SST del orden de 0,36 °C/década (años 1982-2021), lo que supone un incremento de 1,43 °C en cuarenta años.

→ Entre 1982-2021 la temperatura media superficial del mar Balear osciló entre 18-20 °C, con una tendencia de aumento de 0,36 °C/década. Existe una marcada variabilidad estacional en las tendencias: en primavera y verano son mayores (0,47 y 0,44 °C/década, respectivamente) que en otoño o invierno (0,30 y 0,22 °C/década, respectivamente).

→ En agosto de 2022 se registró la SST promedio más alta del mar Balear desde que hay registro (año 1982): 29,2 °C —la temperatura máxima detectada fue de 33,3 °C en la boya de Sa Dragonera (ver el indicador «Temperatura del aire sobre el mar» del Informe Mar Balear).

→ Las anomalías térmicas anuales de SST se calculan respecto a la climatología de los años 1982-2015. Las anomalías de SST son positivas desde 2005 y superan el valor de 1 °C en 2020 (año más cálido que 2021). Desde 2020 se registran anomalías térmicas que alcanzan + 1 °C en el sureste del mar Balear. La máxima temperatura promedio registrada desde 1982 ha sido de 29,2 °C el 13 de agosto de 2022, correspondiendo a una anomalía regional de + 3,3 °C para este mismo día. Las anomalías promedio de verano fueron de + 1,2 °C en 2021 (con un máximo estacional de +1,6 °C en el sur de Mallorca) y de + 2,7 °C en 2022 (con un máximo estacional de + 3 °C en varios puntos del mar Balear).

→ En profundidad se observa una tendencia generalizada de aumento de temperatura y de salinidad en todas las masas de agua (WIW, LIW y DW) como mínimo desde 1996. Por tanto, todas las masas de agua, desde aproximadamente los 100 m de profundidad hasta el fondo del mar Balear, han sufrido un calentamiento al menos desde 1996 (y muy posiblemente desde mediados del siglo XX).[11] El cálculo de las series temporales mediante diferentes metodologías induce a pensar que estos resultados son robustos y no dependen del procesado de los datos:

- La tendencia de aumento de la WIW (100-300 m) es de 0,14 °C/década.

- La tendencia de aumento de la LIW (300-600 m) es de 0,1 °C/década.

- La tendencia de aumento de la DW (> 600 m) es de 0,08 °C/década.

→ Los modelos climáticos apuntan a que la temperatura del mar aumentará notablemente durante el siglo XXI en toda la columna de agua, especialmente en los primeros 150 metros.[33, 34, 36]

→ En el año 2022 se han alcanzado muchos récords de temperaturas extremas en el mar Balear, tanto en frecuencia y duración como en intensidad. En concreto se han registrado cinco olas de calor durante gran parte del año (de mayo a diciembre).

→ Es fundamental mantener la observación de esta variable oceanográfica para llegar a disponer de series de gran longitud temporal. Ello permitiría interpretar mejor los datos de las tendencias y afinar la variabilidad climática. Todo ello debería redundar en una mejora de la gestión de la adaptación a los posibles impactos.[2, 37]

REFERENCIAS

[1] Von Schuckmann, K. *et al.* (2016). «An imperative to monitor Earth's energy imbalance». *Nature Climate Change 6 (2)*, 138-144. DOI: 10.1038/nclimate2876.

[2] Juza, M.; Tintoré, J. (2021). «Multivariate Sub-Regional Ocean Indicators in the Mediterranean Sea: From Event Detection to Climate Change Estimations». *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-20.

[3] Hoegh-Guldberg, O. *et al.* (2014). «The Ocean». A: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge; Nova York: Cambridge University Press.

[4] Burrows, M. T. *et al.* (2011). «The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems». *Science*, 334, 652 655. DOI: 10.1126/science.1210288.

[5] Von Schuckmann, K. *et al.* (2021). «Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 5». *Journal of Operation Oceanography*, 14(sup1), 1-185. DOI: 10.1080/1755876X.2021.1946240.

[6] Volkov, D. L. *et al.* (2019). «Teleconnection between the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Sea Level in the Mediterranean Sea». *Journal of Climate*, 32, 935-955. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0474.1.

[7] Coma, R. M. *et al.* (2009). «Global warming-enhanced stratification and mass mortality events in the Mediterranean». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(15), 6176-6181. DOI: 10.1073/pnas.0805801106.

[8] Conversi, A. *et al.* (2010). «The Mediterranean Sea Regime Shift at the End of the 1980s, and Intriguing Parallelisms with Other European Basins». *PLoS ONE*, 5(5). DOI: 10.1371/journal.pone.0010633.

[9] Calvo, E. *et al.* (2011). «Effects of climate change on Mediterranean marine ecosystems: the case of the Catalan Sea». *Climate Research*, 50(1), 1-29. DOI: 10.3354/cr01040.

[10] Vargas-Yáñez, M. *et al.* (2010). «How much is the Western Mediterranean really warming and salting?». *Journal of Geophysical Research*, 115, C04001. DOI:10.1029/2009JC005816.

[11] Vargas-Yáñez, M. *et al.* (2010). «Climate change in the Western Mediterranean Sea 1900-2008». *Journal of Marine Systems* 82, 171-176. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.04.013.

[12] Vargas-Yáñez, M.*et al.* (2021). «Long-Term Changes in the Water Mass Properties in the Balearic Channels Over the Period 1996-2019». *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-17. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.640535.

[13] Juza, M.; Fernández-Mora, À.; Tintoré, J. (2022). «Sub-Regional Marine Heat Waves in the Mediterranean Sea From Observations: Long-Term Surface Changes, Sub-Surface and Coastal Responses». *Frontiers in Marine Science*, 9. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.785771.

[14] Pisano, A. *et al.* (2020). «New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations». *Remote sensing*, 12, 132. DOI: 10.3390/rs12010132.

[15] Juza, M.; Tintoré, J. (2020). «Sub-regional Mediterranean Sea Indicators». Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (SOCIB) [App web]. <https://apps.socib.es/subregmed-indicators/>.

[16] Marbà, N.; Duarte, C. M. (2010). «Mediterranean Warming Triggers Seagrass (*Posidonia oceanica*) Shoot Mortality». *Global Change Biology*, 16, 2366-2375. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02130.x.

[17] Jordà, G.; Marbà, N.; Duarte, C. M. (2012). «Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming». *Nature Climate Change*, 2(11), 821-824. DOI: 10.1038/nclimate1533.

[18] Reglero, P. *et al.* (2012). «Geographically and environmentally driven spawning distributions of tuna species in the western Mediterranean Sea». *Marine Ecology Progress Series*, 463, 273-284. DOI: 10.3354/meps09800.

[19] Zenetos, A.; Galanidi, M. (2020). «Mediterranean non indigenous species at the start of the 2020s: recent changes». *Marine Biodiversity Records*, 13(1), 10. DOI: 10.1186/s41200-020-00191-4.

[20] Marbà N. *et al.* (2015). «Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota». *Frontiers in Marine Science*, 2, 56. DOI: 10.3389/fmars.2015.00056.

[21] Hilmi, N. *et al.* (2014). «Exposure of mediterranean countries to ocean acidification». *Water*, 6(6), 1719-1744. https://doi.org/10.3390/w6061719.

[22] Landry, M. R. *et al.* (2012). «Pelagic community responses to a deep-water front in the California Current Ecosystem: overview of the A-Front Study». *Journal of Plankton Researc*h, 34(9), 739-48. DOI: 10.1093/plankt/fbs025.

[23] López-Jurado, J.; González-Pola, C.; Velez-Belchi, P. (2005). «Observation of an abrupt disruption of the long-term warming trend at the Balearic Sea, western Mediterranean Sea, in summer 2005». *Geophysical Research Letters*, 32. https://doi.org/10.1029/2005GL024430.

[24] Copernicus Marine Service (CMEMS) [en línea]. <https://resources.marine.copernicus.eu/products>.

[25] Vargas-Yáñez, M. *et al.* (2017). «Updating temperature and salinity mean values and trends in the Western Mediterranean: The RADMED project». *Progress in Oceanography*, 157, 27-46. https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.09.004.

[26] Vargas-Yáñez, M. *et al.* (2020). «Climatological Hydrographic Properties and Water Mass Transports in the Balearic Channels From Repeated Observations Over 1996-2019». *Frontiers in Marine Science*, 7, 1-22.

[27] Juza, M. *et al.* (2019). «Characterization of changes in Western Intermediate Water properties enabled by an innovative geometry-based detection approach». *Journal of Marine Systems*, 191, 1-12. https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.11.003.

[28] Vargas-Yáñez, M. *et al.* (2010). «Cambio climático en el Meditteráneo español». Instituto Español de Oceanografía, Ministerio de Educación y Ciencia (editor).

[29] Vargas-Yáñez, M. *et al.* (2012). «The effect of interpolation methods in temperature and salinity trends in the Western Mediterranean». *Mediterranean Marine Science*, 13(1). DOI:10.12681/mms.28.

[30] Barceló-Llull, B. *et al.* (2019). «Temporal and Spatial Hydrodynamic Variability in the Mallorca Channel (Western Mediterranean Sea) From 8 Years of Underwater Glider Data». *Journal of Geophysical Research*, Oceans, 124(4), 2769-86. https://doi.org/10.1029/2018JC014636.

[31] SOCIB [en línia]. <https://www.socib.es/index.php?seccion=detalle_noticia&id_noticia=535&language=es_ES>.

[32] Juza, M.; Tintoré, J. (2021). «Sub-regional Mediterranean Marine Heat Waves». Balearic Islands Coastal and Observing and Forecasting System (SOCIB) [App web]. <https://apps.socib.es/subregmed-marine-heatwaves>.

[33] Jordà, G. *et al.* (2012). «Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios». *Global and Planetetary Change*, 80-81, 198-214. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.10.013.

[34] Adloff, F. *et al.* (2015). «Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios». *Climate Dynamics*, 45(9), 2775-802. DOI: 10.1007/s00382-015-2507-3.

[35] Darmaraki, S. *et al.* (2019). «Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea». *Climate Dynamics*, 53(3), 1371-92. DOI: 10.1007/s00382-019-04661-z.

[36] Soto-Navarro, J. *et al.* (2020). «Evolution of Mediterranean Sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble». *Climate Dynamics*, 54(3), 2135-65. DOI: 10.1007/s00382-019-05105-4.

[37] Pascual, A.; Macías, D. (2021). «Ocean Science Challenges for 2030». Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

CITAR COMO

Barrientos, N.; Vaquer-Sunyer, R.; Juza, M.; Vargas-Yáñez, M.; Gomis, D.; Pascual, A.; Barceló-Llull, B.; Balbín, R.; Jordà, G.; Marcos, M. (2022) «Temperatura del mar Balear». En: Vaquer-Sunyer, R.; Barrientos, N. (ed.). *Informe Mar Balear 2022* <https://informemarbalear.org/es/cambio-global/imb-temperatura-esp.pdf>.