

En l'elaboració d'aquest capítol han participat:

Natalia Barrientos, Raquel Vaquer-Sunyer, Mélanie Juza, Manuel Vargas-Yáñez, Damià Gomis, Ananda Pascual, Bàrbara Barceló-Llull, Rosa Balbín, Gabriel Jordà i Marta Marcos.

Temperatura de la mar Balear

1. Temperatura en superfície

2. Temperatura en profunditat

La temperatura de l'oceà ha anat variant de manera natural al llarg de la història de la Terra, i després de la industrialització (segle XVIII) cal sumar a aquests canvis el factor antropogènic. És una de les variables crucials del complex sistema climàtic, ja que l'oceà contribueix a regular el clima de tot el planeta a través dels intercanvis de calor amb l'atmosfera i redistribuint-la mitjançant els corrents marins. De fet, l'oceà emmagatzema quantitats de calor molt superiors a les de l'atmosfera i representa la «memòria» del sistema climàtic, a causa de la gran escala temporal dels canvis oceànics. Per tant, l'anàlisi de les sèries temporals de temperatura oceànica constitueix un indicador climàtic fonamental.^{1, 2}

La mar Mediterrània és una regió especialment vulnerable a l'augment de la temperatura global planetària, en part a causa de la seva naturalesa semitancada, que li proporciona una inèrcia tèrmica més petita.³⁻⁵ D'altra banda, canvis regionals de la temperatura oceànica poden tenir repercussions globals, ja que la Mediterrània, a través de l'estret de Gibraltar, està connectada amb la Circulació Meridional de Retorn de l'Atlàntic Nord Nord (coneguda també com AMOC, per les sigles en anglès), el motor atlàntic de conducció de calor a la Terra.⁶ Per tota la conca Mediterrània s'ha observat que l'augment de la temperatura superficial de l'aigua (a partir d'ara descrita amb les sigles en anglès de Sea Surface Temperature, SST) està correlacionat amb l'augment de la temperatura superficial del planeta.⁷⁻⁹

Les quatre darreres dècades s'han detectat tendències d'escalfament oceànic a la conca occidental de la mar Mediterrània.^{2, 10-13} Dades satel·litàries disponibles des del 1982 permeten estimar tendències a l'alça de l'SST de l'ordre de $0,038 \pm 0,002$ °C/any entre 1982-2020² i de $0,039 \pm 0,002$ °C/any entre 1982-2023.¹⁴ El darrer informe del Centre d'Estudis Ambientals del Mediterrani ofereix una tendència

similar entre 1982-2023 de $0,037$ °C/any.¹⁵ Aquests increments són la segona tendència més gran registrada mai a les mars regionals d'Europa després de la mar Negra.⁵

La temperatura de les masses d'aigua situades a diferents profunditats també és un indicador de canvis al clima. Aquest seria el cas de l'aigua occidental intermèdia (en anglès, Western Intermediate Water, a partir d'ara WIW), que circula entorn dels 100-300 m de profunditat a la mar Balear i per a la qual també és important identificar els canvis estacionals, ja que la WIW es forma a l'hivern i/o la primavera. Igualment són de gran importància els canvis que es produeixen en les aigües intermèdies d'origen llevantí (en anglès, Levantine Intermediate Water, a partir d'ara LIW), situades entre els 300-600 m de profunditat, i en les aigües profundes per sota dels 600 m, a causa del gran volum que ocupen i, en conseqüència, de la gran quantitat de calor absorbida per aquestes masses d'aigua.

Més enllà del seu valor com a indicador climàtic, l'evolució de la temperatura marina, tant en superfície

QUÈ ÉS?

La temperatura de la mar és una variable oceano-gràfica de gran importància climàtica i ecosistèmica. Condiciona la supervivència, la distribució i el metabolisme d'espècies, els corrents oceànics, l'aportació de nutrients, el nivell de la mar i l'intercanvi de gasos amb l'atmosfera (que controla l'acidificació i l'oxigenació de les aigües). Addicionalment, l'anàlisi temporal de la temperatura oceànica representa un indicador climàtic, ja que l'oceà absorbeix i emmagatzema grans quantitats de calor.

METODOLOGIA

Les dades de temperatura superficial de la mar (SST) provenen de satèl·lits del Servei Marí Copernicus²⁷ des que n'hi ha registre (1982). Les dades són posteriorment processades i visibilitzades en mapes i gràfics a través de la pàgina web del Sistema d'Observació i Predicció Costanera de les Illes Balears (ICTS SOCIB)^{2, 14} que contribueixen a identificar tendències i anomalies d'SST que utilitzen com a referència la climatologia de l'any 1982 al 2015.

Per a la temperatura en profunditat, les dades provenen de mesures *in situ* fetes a través de campanyes oceanogràfiques on s'utilitzen dispositius CTD (de l'anglès Conductivity Temperature Depth), que mesuren simultàniament la temperatura, la salinitat i la profunditat. Els CTD proporcionen perfils verticals de tota la columna d'aigua: aigües superficials, aigües intermèdies (dels 150-200 m als 600 m) i aigües profundes (per sota dels 600 m).

RESULTATS

L'SST ha augmentat 1,6 °C en 42 anys, amb una tendència d'augment de 0,39 °C/dècada.

Des del 2005, les anomalies tèrmiques de l'SST són sempre positives i des del 2020 superen 1 °C. L'estiu del 2023 es varen observar anomalies de fins a + 2,2 °C.

En profunditat, com a mínim des del 1996, la mar Balear està experimentant augments de temperatura i de salinitat en tota la columna d'aigua:

PER QUÈ?

Conèixer i predir els canvis de la temperatura oceànica és crucial, ja que podrien repercutir en l'estat ecològic de la mar i en l'estructura socioeconòmica de les Illes Balears. La informació que aporten sèries temporals llargues de temperatura contribueix a definir estratègies d'adaptació i mitigació de riscos.

LOCALITZACIÓ

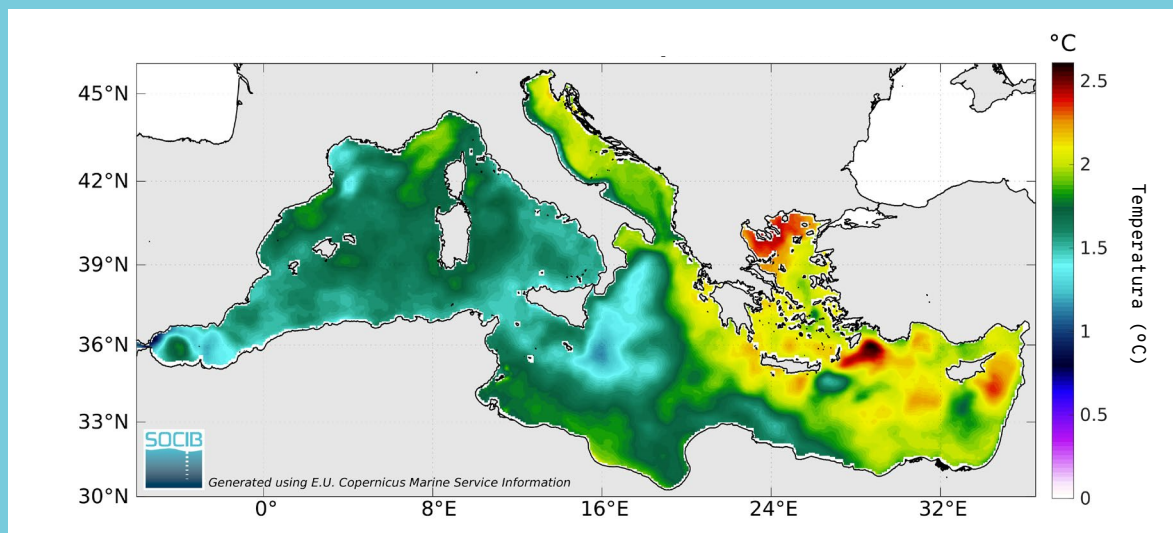


→ Des de l'any 1996:

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

→ Des de l'any 1945:

- 0,022 °C/dècada a 0-150 m
- 0,023 °C/dècada a 150-600 m
- 0,029 °C/dècada a > 600 m



Mapa de la Mediterrània que mostra la tendència acumulativa de la temperatura superficial de la mar (significativa al 95 %) entre els anys 1982-2023 a partir de dades satel·litàries. FONT: ICTS SOCIB (https://apps.socib.es/subregmed-indicators/ocean_temperature.htm); Juza i Tintoré.^{2, 14}

com en profunditat, condiona molt significativament els ecosistemes marins. En particular:

- Determina la supervivència i la distribució de moltes espècies. La pèrdua de part de la distribució de certes espècies, com la fanerògama *Posidonia oceanica*,^{16, 17} o la variabilitat interanual dels hàbitats de reproducció d'altres en són només alguns exemples.¹⁸ D'altra banda, canvis regionals en la temperatura marina poden afavorir la introducció i l'adaptació d'espècies invasores.¹⁹
- Regula diferents processos metabòlics: un increment de la temperatura pot augmentar el metabolisme de certs organismes que presenten intervals de tolerància petits.²⁰
- Influeix en la dinàmica d'intercanvi de gasos amb l'atmosfera: l'absorció de CO₂ atmosfèric per part dels oceans depèn de la temperatura, i aquesta absorció, més enllà dels beneficis que comporta la retirada de CO₂ de l'atmosfera, també genera un descens del pH de l'aigua, causant acidificació oceànica.²¹
- Controla processos hidrodinàmics com la posició dels fronts oceànics, que al temps condicionen la productivitat i els cicles de nutrients²² (tot i que a la Mediterrània la salinitat controla principalment els fronts oceànics).
- Dirigeix els corrents oceànics (i per tant, la distribució de calor i altres paràmetres) i l'estratificació de la columna d'aigua a través dels canvis en la densitat.²³ Els canvis en l'estratificació afecten processos dinàmics verticals que són crucials, entre d'altres coses, per a l'aportació de nutrients des de les capes més profundes a la capa fòtica.
- Finalment, l'augment de la temperatura marina és un dels dos factors (junt amb la fusió de gels continentals causada per la temperatura atmosfèrica) responsables de l'augment del nivell de la mar, que al temps té un impacte important sobre els ecosistemes costaners (vegeu l'indicador «Nivell de la mar» de l'INFORME MAR BALEAR).²⁴ Així mateix, quan l'SST augmenta per sobre de la mitjana es poden desencadenar esdeveniments de calor extrema coneguts com onades de calor marines, que s'han intensificat en els darrers anys (vegeu els indicadors sobre «Onades de calor marines» de l'INFORME MAR BALEAR).²⁵

METODOLOGIA

Hi ha diferents fonts de dades de temperatura a la mar Balear. Les dades presentades s'han recollit de la manera que es detalla següent. Per a aquesta anàlisi, s'utilitza l'àrea geogràfica de la mar Balear definida pel doctor Enric Ballesteros.²⁶ Inclou la massa d'aigua sobre el promontori balear amb els límits següents: a l'oest, la part més profunda del canal d'Eivissa; al nord, la part més profunda del canal de València; i al

sud i a l'est, es delimita fins a la profunditat de 2.600 m. Les dades que es presenten s'han recollit com es detalla a continuació.

1. Temperatura en superfície (SST)

S'utilitzen dades satel·litàries des de l'any 1982 disponibles al Servei Marí Copernicus²⁷ en forma de sèries històriques de dades diàries amb una resolució espacial de l'ordre de 5 km i una precisió en els valors inferior a 0,1 °C, suficient per captar variacions en el cicle estacional a nivell de conca.

Aquestes dades es processen i visibilitzen mitjançant l'aplicació web Indicadors Subregionals de la Mar Mediterrània del Sistema d'Observació i Predicció Costanera de les Illes Balears (ICTS SOCIB).^{2, 14} Entre els productes es proporcionen mapes i gràfics de tendències d'SST que mostren mitjanes anuals i estacionals (hivern: gener, febrer, març; primavera: abril, maig, juny; estiu: juliol, agost, setembre; i tardor: octubre, novembre, desembre).

Adicionalment s'inclouen mapes i gràfics que comparen les anomalies d'SST (a partir d'ara, SSTA) en referència a la climatologia existent entre els anys 1982-2015. Es tria aquest rang d'anys per ser el període de temps més llarg possible, excloent els anys recents per poder comparar-los amb una referència independent.^{2, 15} S'indiquen les tendències de canvi d'SST i d'SSTA (significatives al 95 %) en °C/dècada des del 1982 fins al 2023.

2. Temperatura en profunditat

S'inclouen dades de temperatura en profunditat a partir de mesures *in situ* que deriven en sèries temporals locals disperses en l'espai i en el temps, però de gran resolució quant als valors proporcionats. Els mostratges *in situ* no solen capturar canvis de temperatura significatius en superfície a causa de la baixa freqüència del mostratge i l'alta variabilitat d'aquestes aigües, però sí que mostren informació valuosa de les masses d'aigua de profunditat i de la seva evolució.

Es presenten dades de temperatura en profunditat de campanyes oceanogràfiques que fan transsectes en les mateixes localitzacions mitjançant dispositius CTD (de l'anglès Conductivity Temperature Depth, pels paràmetres de conductivitat, temperatura i profunditat que mesuren) assemblats en una roseta (figura 1). També hi ha dades de mostratge de masses d'aigua mitjançant boies de deriva (programa Argo) o *gliders* que no s'inclouen en aquest indicador a causa de la variabilitat espacial en la recollida de dades. Els CTD proporcionen perfils verticals dels paràmetres des de la superfície fins a la profunditat desitjada.

Es consideren aigües intermèdies les situades entre els 150-200 m als 600 m, i aigües profundes les que hi ha per sota dels 600 m. A la mar Balear es pot fer una divisió en la capa intermèdia per separar l'aigua intermèdia occidental de la d'origen oriental o llewantina (WIW i LIW).



Figura 1. Dispositiu CTD utilitzat en campanyes oceanogràfiques per mesurar paràmetres de temperatura, salinitat i profunditat, entre d'altres variables. FONT: Miquel Gomila.

Concretament, es mostren diagrames de temperatura-salinitat (TS) elaborats amb les dades de temperatura potencial i de salinitat corresponents a 37 estacions oceanogràfiques que cobreixen els canals de la mar Balear, que l'Institut Espanyol d'Oceanografia (IEO-CSIC) mostra amb periodicitat estacional des del 1996 com a part del projecte de monitorització nacional RADMED²⁸ (Sèries Temporals de Dades Oceanogràfiques a la Mediterrània). Les dades utilitzades s'estenen fins al 2019 (inclusivament) i mostren les principals masses d'aigua presents a la mar Balear, així com a la resta de la Mediterrània occidental.

S'inclouen anàlisis de les sèries temporals de temperatura en profunditat de tres masses d'aigua: aigua intermèdia occidental (WIW), aigua intermèdia oriental (LIW) i aigües profundes (en anglès, Deep Water, a partir d'ara DW).

Per obtenir un valor únic de la temperatura de WIW corresponent a cada campanya que pogués graficar-se com una sèrie temporal, es varen usar tres mètodes:

- Identificar, en cadascuna de les 37 estacions oceanogràfiques i per a cadascuna de les campanyes realitzades, aquelles aigües amb densitat potencial entre 28,8 i 29,05 kg/m³, atès que és el rang de densitat més freqüent per a la WIW (Vargas-Yáñez *et al.*).²⁹
- Buscar el mínim valor de temperatura dins les aigües en aquest rang de densitat i considerar aquest valor com a representatiu de la WIW. Aquesta operació es va fer per a cada estació oceanogràfica i per a cada campanya (vegeu Vargas-Yáñez *et al.*¹² per a una descripció detallada de la metodologia).

- Utilitzar un criteri geomètric per determinar quin percentatge de WIW correspon a cada parell de valors de T i S. Aquest mètode permet, a més a més, donar un interval d'error per a aquestes estimacions (vegeu Juza *et al.*³⁰ per als detalls d'aquest mètode).

Per calcular la sèrie temporal de la LIW es varen emprar dos mètodes diferents:

- En cada estació i per a cada campanya es va identificar el valor més alt de la salinitat, considerant-lo el valor de la LIW. Per obtenir un únic valor de temperatura corresponent a cada campanya oceanogràfica, es va fer la mitjana dels valors de totes les estacions i es va obtenir, a més a més, la desviació estàndard.
- Es va utilitzar el màxim de salinitat de les 37 estacions de cada campanya.

Per calcular la sèrie temporal de la DW, es varen considerar com aigües profundes aquelles amb una densitat superior als 29,11 kg/m³. Tanmateix, aquest valor de densitat no s'assolia a la majoria de les campanyes anteriors a l'any 2005, la qual cosa rebaixa considerablement la longitud de les sèries temporals i la possibilitat d'estimar tendències significatives. Per això, es va decidir fixar el llindar de densitat per considerar la presència d'aigües profundes en 29,1 kg/m³.

Entre les limitacions a l'hora de caracteritzar correctament l'evolució dels camps de temperatura cal destacar la gran variabilitat temporal (des de variacions diàries a decadal) i espacial (depèn de la posició dels corrents i els fronts oceànics, transferència de calor atmosfera-oceà) inherent a aquesta variable.³¹ Per tant, es necessita una gran quantitat de dades amb bona distribució en l'espai i amb continuïtat temporal. En particular, per poder observar tendències climàtiques significatives de temperatura és necessari comptar amb sèries llargues (> 30 anys com a mínim); per això és fonamental acompanyar qualsevol valor de tendències amb un càlcul estadístic de la seva significança.³¹

RESULTATS

1. Temperatura en superfície

La temperatura mitjana superficial anual de la mar Balear des del 1982 fins al 2023 oscil·la entre els 17,8 °C (l'any 1984) i els 20,5 °C (el 2023) (figura 2). Es registra també una tendència positiva en l'anomalia d'SST de 0,39 ± 0,02 °C/dècada, la qual cosa implica un increment d'1,6 °C en 42 anys.^{13, 15} Des del 2005, totes les anomalies de temperatura mitjana anuals a la conca balear (calculades en referència a la climatologia del 1982 fins al 2015) han estat positives, superant el valor d'1 °C des de l'any 2020.

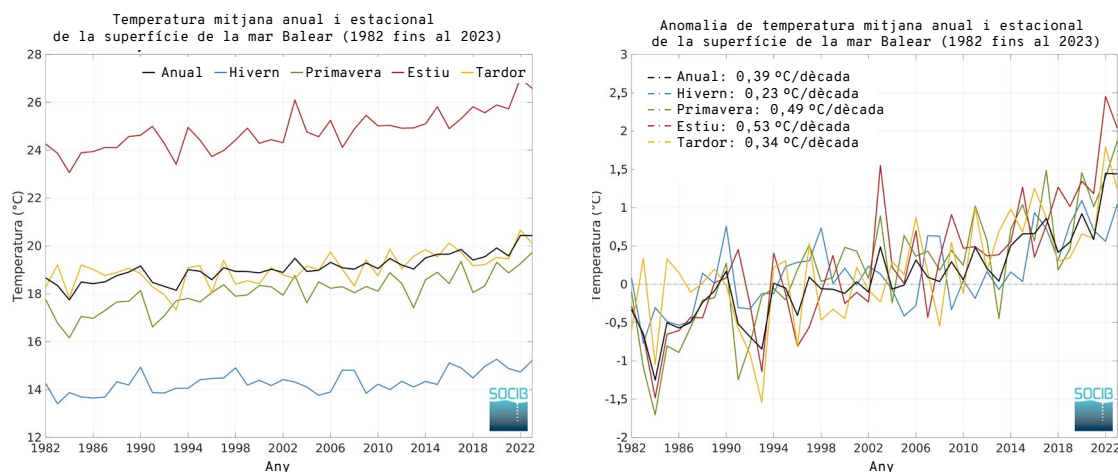


Figura 2. Temperatura mitjana anual (color negre) i estacional (resta de colors) de la superfície de la mar Balear des del 1982 fins al 2023. El gràfic de l'esquerra mostra els valors absoluts, mentre que el de la dreta mostra les anomalies respecte a la climatologia de referència 1982-2015. Al panell de la dreta es quantifiquen també les tendències d'augment en °C/dècada, tant anual com per a cada estació. FONT: SOCIB (https://apps.socib.es/subregmed-indicators/ocean_temperature.htm), Juza i Tintoré.^{2, 14}

El coneixement de les fluctuacions de les SST estacionals és molt important, perquè afecten els cicles biològics de molts organismes marins. Les tendències calculades per al període 1982-2023 (figura 2) mostren un augment superior de temperatura a la primavera (0,49 °C/dècada) i a l'estiu (0,53 °C/dècada) en comparació amb la de la tardor (0,34 °C/dècada) o l'hivern (0,23 °C/dècada).

L'SST mitjana de l'any 2023 varia entre els 20,8 °C al sector sud de la mar Balear i els 20 °C al sector nord (figura 3). Les anomalies tèrmiques (referides a la climatologia 1982-2015) són superiors a l'est i al nord-nord-oest de la mar Balear, assolint 1,6 °C l'any 2023.

Per estacions, el 2023 la temperatura mitjana d'hivern va oscil·lar entre els 14,25 °C al nord de Menorca i els 15,3 °C al sud de Formentera; per primavera, entre els 19,3 °C al nord-est de Menorca i els 20 °C del canal de Mallorca; a l'estiu, l'SST va variar entre els 26,5 °C del nord-est de Menorca i els 27,3 °C del canal de Mallorca; i per la tardor, va oscil·lar entre els 19,5 °C del nord del canal de Mallorca i els 20,8 °C del canal de Menorca. Les anomalies tèrmiques més grans de l'any 2023 es varen registrar a l'estiu amb valors de +2-2,2 °C (sempre respecte a la climatologia de 1982-2015), i es varen observar a l'est de Cabrera, al canal de Mallorca i al sud de Formentera (figura 3).

2. Temperatura en profunditat

Els valors de temperatura i de salinitat en profunditat per a les diferents masses d'aigua de la mar Balear es mostren primer en forma de diagrama TS (figura 4). Els valors de TS hivernals de les aigües atlàntiques (que circulen en els 100 metres més superficials de les aigües balears) corresponen a les temperatures més altes (> 13,5 °C) i als valors de salinitat més baixos (< 38,2) del diagrama TS. Aquestes aigües augmenten considerablement de temperatura a l'estiu, al temps que en disminueix la salinitat, a causa d'una influència més directa de les aigües atlàntiques.²⁹

Sota l'aigua atlàntica s'aprecia un mínim pronunciat de temperatura de < 13 °C, amb salinitats d'entre 38,0 i 38,3, que correspon a la WIW. Aquesta massa d'aigua es detecta als canals de la mar Balear a l'hivern si s'ha format en la plataforma continental de les Balears, o a la primavera i l'estiu si s'ha format en la plataforma continental de Catalunya o del golf de Lleó, i assoleix els canals balears fluint amb el corrent que discorre cap al sud al llarg de tota la plataforma continental catalana. Malgrat la baixa temperatura, la seva densitat no és massa elevada, a causa del caràcter continental de les aigües que contribueixen a la seva formació. En conseqüència, aquesta massa d'aigua se situa per sota de l'aigua atlàntica, a partir d'uns 150 m, però no s'enfonsa més enllà dels 300 m.

Per sota de la WIW hi ha la LIW. Aquesta massa d'aigua s'origina al sud de l'illa de Rodes, a la conca Mediterrània oriental, també a l'hivern, i és la massa d'aigua amb més salinitat de totes les que es poden trobar a la Mediterrània occidental. La seva posició dins del diagrama TS és evident pel seu màxim absolut de salinitat (figura 4). Aquest màxim de salinitat augmenta amb els anys com a conseqüència directa de l'acció humana, a causa principalment del represament dels grans rius que desemboquen a la mar Mediterrània i la mar Negra i a l'obertura del canal de Suez.

Finalment, per sota de la LIW circulen les aigües profundes (DW), que s'originen per la mescla de dues masses d'aigua. La primera d'elles és l'Aigua Profunda de la Mediterrània Occidental, formada a l'hivern davant del golf de Lleó, quan les tempestes són capaces de refredar i mesclar tota la columna d'aigua des de la superfície fins a més de 2.000 m de profunditat. La segona és l'Aigua Densa de la Mar Tirrena, que es forma en aquella mar.

Si exceptuem la WIW formada durant l'any 2010 (vegeu el color verd a la figura 4 i Vargas-Yáñez *et al.*),³² des del 1996 la tendència generalitzada per a totes les masses d'aigua és cap a un augment de la temperatura

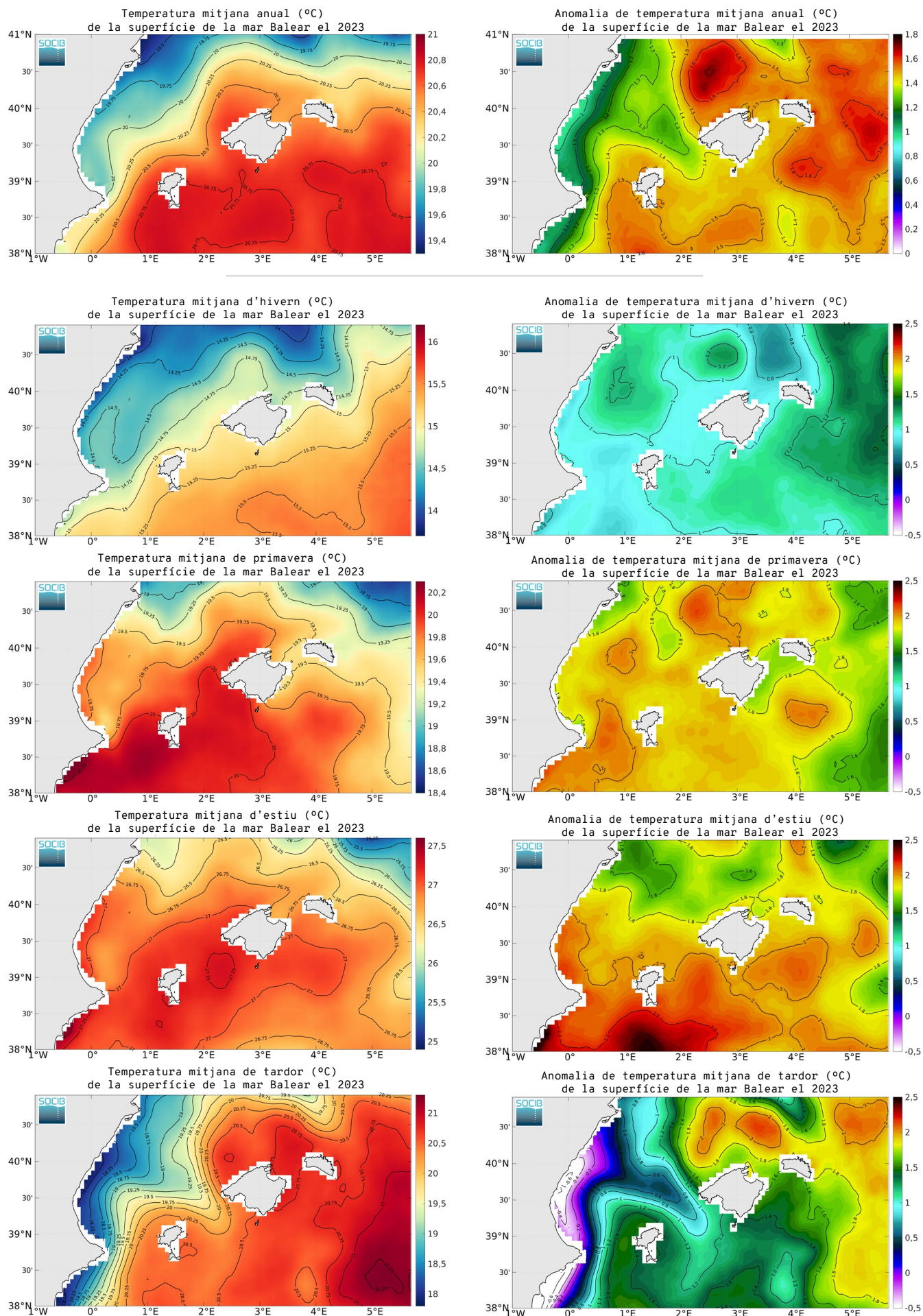


Figura 3. Mapes satel·litaris del 2023 amb la mitjana anual de la temperatura superficial i la mitjana de cada estació a la regió de la mar Balear. Els panells de l'esquerra mostren valors absoluts, mentre que els de la dreta mostren les anomalies respecte a la climatologia de referència 1982-2015. FONT: SOCIB (https://apps.socib.es/subregmed-indicators/ocean_temperature.htm), Juza i Tintoré.^{2, 14}

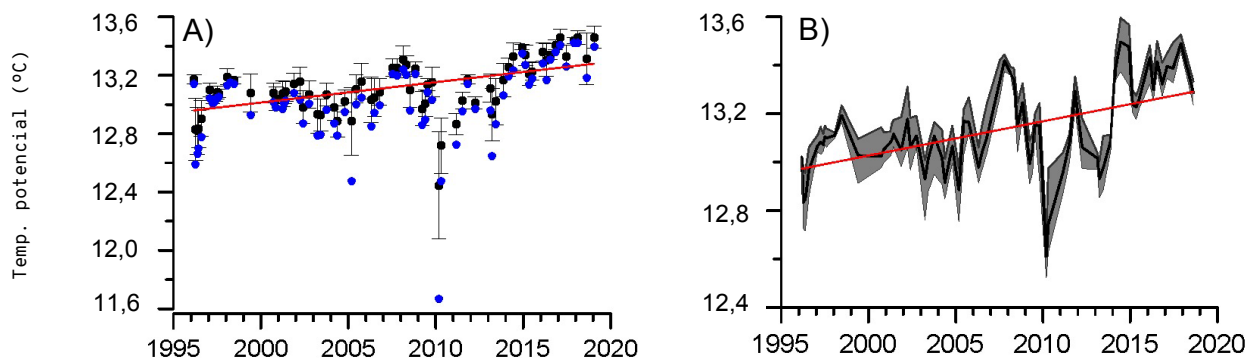


Figura 5. Evolució temporal de la temperatura de l'aigua intermèdia occidental (WIW) en 37 estacions RADMED dels canals de la mar Balear. A) Punt negre: primer mètode de càlcul que mostra el valor mitjà de les 37 estacions amb una desviació estàndard; punt blau: segon mètode de càlcul que indica el mínim de densitat de tots els valors corresponents a les 37 estacions. B) Tercer mètode de càlcul de les propietats de la WIW (mètode geomètric),³⁰ on la línia negra indica el percentil 50, mentre que l'ombregat gris mostra els percentils 17 i 83. En ambdues gràfiques la línia vermella mostra la tendència d'increment de temperatura. FONT: modificat de Vargas-Yáñez *et al.*¹²

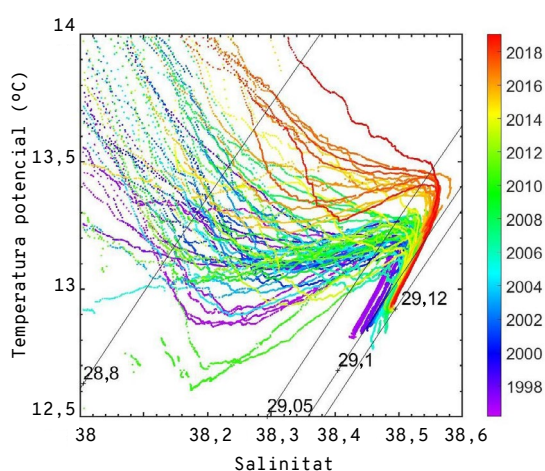


Figura 4. Diagrama de temperatura i salinitat (TS) que mostra l'evolució anual (del 1996 al 2019) de les masses d'aigua que circulen a la mar Balear. Cada una de les 71 campanyes oceanogràfiques es presenta com un únic perfil sobre el diagrama TS, obtingut a partir de la mitjana de totes les estacions de la campanya. El color del perfil denota l'any de la campanya. Les línies diagonals mostren els valors de densitat potencial (isopícnas) corresponents a cada parell de valor de TS. L'aigua atlàntica és la de més variabilitat perquè flueix en la superfície (< 100 m), i es trobaria sempre a l'esquerra de la isopícnas 28,80 kg/m³. L'aigua occidental intermèdia (WIW) es situaria entre les isopícnas 28,80 i 29,05 kg/m³. La isopícnas 29,05 kg/m³ indicaria el nucli de l'aigua oriental intermèdia (LIW), i les isopícnas 29,10 i 29,12 kg/m³, les aigües profundes (DW). FONT: modificat de Vargas-Yáñez *et al.*¹²

i de la salinitat. Així, per exemple, l'anàlisi de la sèrie temporal de la WIW mostra que durant el període d'estudi (1996-2019) la temperatura d'aquesta massa d'aigua va augmentar a un ritme d'entorn $0,14 \pm 0,06$ °C/dècada (interval de confiança del 95 %) com a mitjana dels tres mètodes d'estudi (figura 5).

També la LIW mostra un augment gradual estadísticament significatiu, en aquest cas de $0,10 \pm 0,02$ °C/dècada (interval de confiança del 95 %) com a mitjana dels dos mètodes d'estudi (figura 6).

En aigües profundes (figura 7), també es mostra un augment progressiu de la temperatura, tot i que en aquest cas sembla derivar d'un canvi brusc en

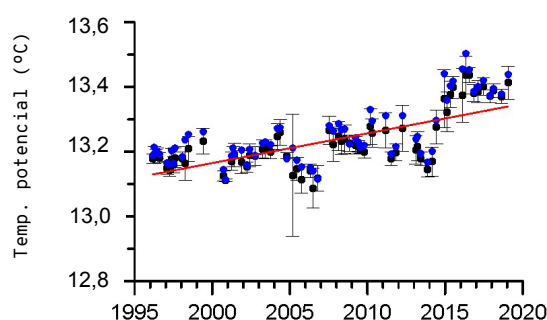


Figura 6. Evolució de la temperatura potencial de l'aigua llevantina occidental (LIW) als canals de la mar Balear. Punt negre: primer mètode de càlcul on es va fer la mitjana dels valors de les 37 estacions, obtenint a més la desviació estàndard. Punt blau: segon mètode de càlcul a partir del màxim valor de salinitat de totes les estacions de cada campanya. La línia vermella mostra la tendència d'increment de temperatura. FONT: modificat de Vargas-Yáñez *et al.*¹²

la densitat ocorregut a partir de l'hivern del 2005, quan una aigua profunda més càlida i també més salada i densa que la formada fins aquell moment va ocupar les capes més profundes de la Mediterrània occidental,²³ afectant també la mar Balear. Aquest canvi abrupte s'ha anomenat a la literatura científica Transició de la Mediterrània Occidental,²³ i sembla estar vinculat a un augment de la salinitat i de la temperatura de les aigües intermèdies que procedeixen de la Mediterrània oriental. La influència d'aquest episodi en les sèries temporals de les aigües profundes de la mar Balear ja s'havia posat de manifest a Vargas-Yáñez *et al.*²⁸ Les tendències d'augment de temperatura de $0,08 \pm 0,01$ °C/dècada s'han obtingut utilitzant el mètode 1 (figura 7A, punts blaus).

És important destacar un altre estudi de Barceló-Llull *et al.*³³ que mostra un augment de les temperatures màximes de les masses d'aigua de profunditats intermèdies al canal de Mallorca després de vuit anys de seguiment:

- Als 100 m de profunditat s'observen encara canvis estacionals, mentre que a 200 m el senyal estacional ja és molt petit.
- La tendència màxima de temperatura de

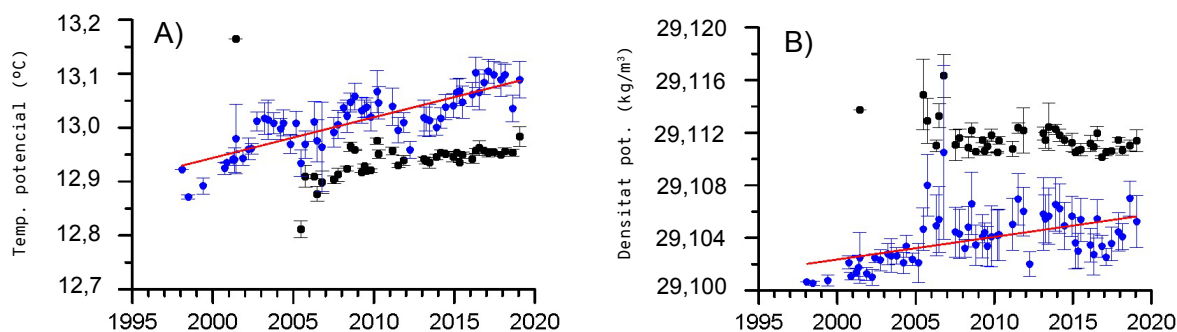


Figura 7. Evolució temporal de la temperatura (A) i la densitat (B) en aigües profundes. Punts negres: aigües amb densitat superior als 29,11 kg/m³ a partir del 2005 (mètode 1). Punts blaus: per prolongar el seguiment temporal anterior al 2005 es varen utilitzar màxims de densitat de 29,1 kg/m³ per considerar la presència d'aigües profundes (mètode 2). En ambdues gràfiques, la línia vermella mostra la tendència d'increment de temperatura. FONT: modificat de Vargas-Yáñez *et al.*¹²

0,19 °C/any s'assoleix entorn dels 100 m superiors. Entre els 100-300 m aquesta tendència disminueix a 0,077 °C/any, mentre que entre els 300-700 m és de 0,043 °C/any.

Per últim, un estudi del 2023 de Vargas-Yáñez *et al.*³⁴ ha compilat sèries temporals de diferents institucions (IEO —RADMED, MEDAR/MEDATLAS—, SOCIB i Ports de l'Estat) per al càlcul de tendències a llarg termini aplicant un ajustament lineal (taula 1). Es varen trobar augments de temperatura des de l'any 1900 a diferents profunditats de la mar Balear (0,018 °C/10 anys), essent més pronunciats a partir del 1945 (0,028 °C/10 anys).

Projeccions climàtiques per a la temperatura de la mar Balear

Els models climàtics mostren que l'SST continuarà augmentant considerablement durant el segle XXI, amb un increment d'entre + 1,2 °C i + 3,6 °C per al final de segle, en funció de les trajectòries socioeconòmiques compartides (*i. e.* els escenaris d'emissions de gasos d'efecte hivernacle).³³⁻³⁵ Un fet que, entre d'altres, magnificarà la intensitat i la durada de les onades de calor marines, independentment de l'escenari d'emissió.³⁷

Els models també projecten un augment considerable de la temperatura de la mar Balear en tota la columna d'aigua, més pronunciat entre els 0-150 m (0,81-3,71 °C) i entre els 150-600 m (0,82-2,97 °C).³⁸

CONCLUSIONS

- Estudis de les sèries de dades satel·litàries de la mar Balear mostren tendències d'augment de l'SST de l'ordre de 0,39 °C/dècada (anys 1982-2023), la qual cosa suposa un increment d'1,6 °C en 42 anys.
- Entre els anys 1982-2023 la temperatura mitjana superficial de la mar Balear va oscil·lar entre 17,8-20,5 °C. Hi ha una marcada variabilitat estacional en les tendències: per estiu i primavera són més grans (0,53 i 0,49 °C/dècada, respectivament) que per tardor o hivern (0,34 i 0,23 °C/dècada, respectivament).
- Les anomalies tèrmiques anuals d'SST es calculen respecte a la climatologia dels anys 1982-2015. Les anomalies d'SST són positives des del 2005 i superen el valor d'1 °C a partir de l'any 2020. L'any 2023 són més grans a l'est i el nord-nord-oest de la mar Balear, assolint 1,6 °C. A l'estiu es varen registrar les anomalies més grans de l'any, de fins a 2,2 °C al canal de Mallorca i al sud de Formentera.
- En profunditat, tendències de temperatura estimades des de l'any 1900 mostren augments en totes les profunditats de la mar Balear d'entre 0,007-0,018 °C/dècada; mentre que, si s'inclouen dades a partir de 1945, la tendència s'incrementa entre 0,022-0,029 °C/dècada. Des del 1996 s'observa una tendència generalitzada d'augment de temperatura i salinitat en totes les

Taula 1. Evolució de la temperatura a diverses profunditats des de l'any 1900. Els valors de temperatura s'han calculat a partir de les mitjanes dels intervals de confiança del 95 %. FONT: Vargas-Yáñez *et al.*³⁴

Tendències de temperatura de la mar Balear (°C/10 anys)		
Profunditat (m)	Entre 1900-2020	Entre 1945-2020
0-150	0,017	0,022
150-600	0,007	0,023
> 600	0,014	0,029
Total	0,018	0,028

masses d'aigua (WIW, LIW i DW). El càlcul de les sèries temporals mitjançant diferents metodologies fa pensar que aquests resultats són robustos i no depenen del processament de les dades:

- La tendència d'augment de la WIW (100-300 m) és de 0,14 °C/dècada.
- La tendència d'augment de la LIW (300-600 m) és de 0,1 °C/dècada.
- La tendència d'augment de la DW (> 600 m) és de 0,08 °C/dècada.

→ Per tant, totes les masses d'aigua, des d'aproximadament els 100 m de profunditat fins al fons de la mar Balear, han sofert un escalfament des de mitjan segle XX, essent més acusat en les últimes dècades.

→ Els models climàtics apunten que la temperatura de la mar augmentarà notablement durant el segle XXI en tota la columna de agua, especialment en els primers 150 metres.^{33, 34, 36}

→ És fonamental mantenir l'observació d'aquesta variable oceanogràfica per arribar a disposar de sèries de gran longitud temporal. Això permetria interpretar millor les dades de les tendències i afinar la variabilitat climàtica. Tot plegat hauria de redundar en una millora de la gestió de l'adaptació als possibles impactes.^{2, 38}

REFERÈNCIES

- ¹ VON SCHUCKMANN, K.; PALMER, M. D.; TRENBERTH, K. E. *et al.* (2016). «An imperative to monitor Earth's energy imbalance». *Nature Climate Change* 6 (2), 138-144. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.610589>.
- ³ HOEGH-GULDBERG, O.; CAI, R.; POLOCZANSKA, E. *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.; SCHOEMAN, D. S.; BUCKLEY, L. B. *et al.* (2011). «The Pace of Shifting Climate in Marine and Terrestrial Ecosystems». *Science*, 334(6056), 652-5. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2021.1946240>.
- ⁵ VON SCHUCKMANN, K.; LE TRAON, P-Y.; SMITH, N. *et al.* (2021). «Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 5». *Journal of Operational Oceanography*, 14(sup1), 1-185. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2021.1946240>.
- ⁶ VOLKOV, D. L.; BARINGER, M.; SMEED, D. *et al.* (2019). «Teleconnection between the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Sea Level in the Mediterranean Sea». *Journal of Climate*, 32(3), 935-55. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0474.1>.
- ⁷ COMA, R.; RIBES, M.; SERRANO, E. *et al.* (2009). «Global warming-enhanced stratification and mass mortality events in the Mediterranean». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(15), 6176-6181. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805801106>.
- ⁸ CONVERSI, A.; FONDA UMANI, S.; PELUSO, T. *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):e10633. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010633>.
- ⁹ CALVO, E. M.; SIMÓ, R.; COMA, R. *et al.* (2011). «Effects of climate change on Mediterranean marine ecosystems: the case of the Catalan Sea». *Climate Research*, 50(1), 1-29. <https://doi.org/10.3354/cr01040>.
- ¹⁰ VARGAS-YÁÑEZ, M.; ZUNINO, P.; BENALI, A. *et al.* (2010). «How much is the western Mediterranean really warming and salting?». *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C4). <https://doi.org/10.1029/2009JC005816>.
- ¹¹ VARGAS-YÁÑEZ, M.; MOYA, F.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M. C. *et al.* (2010). «Climate change in the Western Mediterranean Sea 1900-2008». *Journal of Marine Systems*, 82(3), 171-176. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.04.013>.
- ¹² VARGAS-YÁÑEZ, M.; JUZA, M.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M. C. *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(March), 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 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/>>.
- ¹⁵ MEDITERRANEAN CENTRE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES (2024). «Mediterranean Sea Surface Temperature report. Meteorology and Climatology Area». [en línia]. <<https://www.ceam.es/ceamet/SST/SST-trend.html>>.
- ¹⁶ MARBÀ, N.; DUARTE, C. (2010). «Mediterranean warming triggers seagrass (*Posidonia oceanica*) shoot mortality». *Global Change Biology*, 16, 2366-75. <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), 821-4. <https://doi.org/10.1038/nclimate1533>.
- ¹⁸ REGLERO, P.; CIANNELLI, L.; ALVAREZ-BERASTEGUI, D. *et al.* (2012). «Geographically and environmentally driven spawning distributions of tuna species in the western Mediterranean Sea». *Marine Ecology Progress Series*, 463, 273-84. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1186/s41200-020-00191-4>.
- ²⁰ MARBÀ, N.; JORDÀ, G.; AGUSTÍ, S. *et al.* (2015). «Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota». *Frontiers in Marine Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fmars.2015.00056>.
- ²¹ HILMI, N.; ALLEMAND, D.; CINAR, M. *et al.* (2014). «Exposure of mediterranean countries to ocean acidification». *Water*, 6(6), 719-44. <https://doi.org/10.3390/w6061719>.
- ²² LANDRY, M. R.; OHMAN, M. D.; GOERICKE, 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 Research*, 34(9), 739-48. <https://doi.org/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 VAQUER-SUNYER, R.; BARRIENTOS, N.; MARCOS, M.; GOMIS, D. (2024). «Nivell de la Mar». A: VAQUER-SUNYER, R.; BARRIENTOS, N.; GOURAGUINE, A. (eds.). *Informe Mar Balear 2024*. <https://doi.org/10.62135/VSO7793.e>.
- ²⁵ VAQUER-SUNYER, R. *et al.* (2024). «Onades de calor marines». A: VAQUER-SUNYER, R.; BARRIENTOS, N.; GOURAGUINE, A. (eds.). *Informe Mar Balear 2024*. <https://doi.org/10.62135/JFBC6211>.
- ²⁶ BALLESTEROS, E. (2022). «Assaig sobre una primera proposta d'àrees marines protegides a Balears». *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears*, 65, 27-89.
- ²⁷ COPERNICUS MARINE SERVICE (CMEMS). [en línia]. <<https://resources.marine.copernicus.eu/products>>.
- ²⁸ VARGAS-YÁÑEZ, M.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M. C.; MOYA, F. *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>.
- ²⁹ VARGAS-YÁÑEZ, M.; JUZA, M.; BALBÍN, R. *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(September), 1-22. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.568602>.
- ³⁰ JUZA, M.; ESCUDIER, R.; VARGAS-YÁÑEZ, 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>.
- ³¹ VARGAS-YÁÑEZ, M.; GARCÍA MARTÍNEZ, M. C.; MOYA RUIZ, F. *et al.* (2010). «Cambio climático en el mediterráneo español». Institut Espanyol d'Oceanografia, Ministeri d'Educació i Ciència (editor).

- ³² VARGAS-YÁÑEZ, M.; MALLARD, E.; MICHEL, R. *et al.* (2012). «The effect of interpolation methods in temperature and salinity trends in the Western Mediterranean». *Mediterranean Marine Science*, 13. <https://doi.org/10.12681/mms.28>.
- ³³ BARCELÓ-LLULL, B.; PASCUAL, A.; RUIZ, S. *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>.
- ³⁴ VARGAS-YÁÑEZ, M.; MOYA, F.; SERRA, M. *et al.* (2023). «Observations in the Spanish Mediterranean Waters: A Review and Update of Results of 30-Year Monitoring». *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1284. <https://doi.org/10.3390/jmse11071284>.
- ³⁵ JORDÀ, G.; GOMIS, D.; ÁLVAREZ-FANJUL, E.; SOMOT, S. (2012). «Atmospheric contribution to Mediterranean and nearby Atlantic sea level variability under different climate change scenarios». *Global and Planetary Change*, 80-81, 198-214. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.10.013>.
- ³⁶ ADLOFF, F.; SOMOT, S.; SEVAULT, F. *et al.* (2015). «Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios». *Climate Dynamics*, 45(9), 2775-802. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2507-3>.
- ³⁷ DARMARAKI, S.; SOMOT, S.; SEVAULT, F. *et al.* (2019). «Future evolution of Marine Heatwaves in the Mediterranean Sea». *Climate Dynamics*, 53(3), 1371-92. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04661-z>.
- ³⁸ SOTO-NAVARRO, J.; JORDÀ, G.; AMORES, A. *et al.* (2020). «Evolution of Mediterranean Sea water properties under climate change scenarios in the Med-CORDEX ensemble». *Climate Dynamics*, 54(3), 2135-65. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-05105-4>.
- ³⁹ PASCUAL, A.; MACÍAS, D. (2021). «Ocean Science Challenges for 2030». Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

CITAR COM

BARRIENTOS, N.; VAQUER-SUNYER, R.; JUZA, M.; VARGAS-YÁÑEZ, M.; GOMIS, D.; PASCUAL, A.; BARCELÓ-LLULL, B.; BALBÍN, R.; JORDÀ, G.; MARCOS, M. (2024) «Temperatura de la mar Balear». A: VAQUER-SUNYER, R.; BARRIENTOS, N.; GOURAGUINE, A. (EDS.). *Informe Mar Balear 2024* <https://www.informemarbalear.org/cat/canvi-global/imb-temperatura-aigua-cat_2024.pdf>. <https://doi.org/10.62135/IAJB7896>.