

En l'elaboració d'aquest capítol han participat:
Raquel Vaquer-Sunyer i Mélanie Juza.

Onades de calor marines

1. Dies totals d'onada de calor marina
2. Intensitat mitjana
3. Intensitat màxima

Les onades de calor marines són esdeveniments d'escalfament oceànic extrems.¹ Han augmentat en freqüència, durada i intensitat a tot el món, amb impactes nocius per als ecosistemes costaners i les activitats humanes.²⁻⁶ A la mar Mediterrània, el ràpid escalfament superficial s'ha associat a un fort increment dels dies d'onades de calor, particularment en les dues darreres dècades.^{1, 5}

Hobday i col·laboradors¹ caracteritzen els pics de calor com temperatures superfícials de la mar que superen un cert llindar. Aquest llindar es calcula com el percentil 90 de la distribució de temperatura superficial marina local durant un període de referència a llarg termini, és a dir: quan la temperatura supera el 90 % de les observacions històriques de temperatura d'aquell període de referència. Perquè es consideri una onada de calor marina s'han de succeir un mínim de 5 dies consecutius amb pics de calor a l'oceà.

En la literatura científica hi ha diverses metodologies de detecció d'onades de calor marines. Les més generalitzades i utilitzades són les definicions estadístiques a partir de llindars basats en percentils com la de Hobday i col·laboradors.¹ Alguns autors utilitzen un període de referència que es desplaça en el temps en lloc d'un període de referència fix,⁷ o bé empen sèries temporals de temperatures amb la tendència deduïda.⁸ Aquí optem per usar el mètode més comú, basat en utilitzar un període de referència fix, com fan la majoria d'autors.^{1, 5, 9-11}

En les quatre darreres dècades s'han detectat tendències d'escalfament oceànic a la Mediterrània occidental.^{5, 9, 10} La temperatura mitjana superficial anual de la mar Balear ha augmentat en 1,6 °C els darrers 42 anys (entre 1982 i 2023).^{10, 12-14}

La temperatura té un paper essencial en el funcionament dels ecosistemes.⁶ Algunes conseqüències de l'escalfament global de les aigües de la Mediter-

rània inclouen la pèrdua de biodiversitat, canvis en el funcionament dels ecosistemes i en els cicles biogeoquímics, i la proliferació d'espècies invasores.^{15, 16}

Les onades de calor marines tenen múltiples conseqüències sobre els organismes marins, i inclouen mortaldats massives d'organismes bentònics —que viuen fixos al substrat— com coralls, gorgònies o esponges.^{16, 17} També s'han vist associades a esdeveniments de floració massiva de la planta marina *Posidonia oceanica* i a pseudoviviparitat (on la producció de plàntules reemplaça les estructures reproductives sexuals, produint clons de la planta materna).¹⁸⁻²⁰ Aquesta planta forma un hàbitat prioritari, essencial per al funcionament dels ecosistemes costaners mediterranis. A temperatures superiors a 28 °C augmenta considerablement la seva mortalitat.²¹ Alguns estudis indiquen que podria extingir-se funcionalment a meitat d'aquest segle en aigües poc profundes a causa de l'augment de temperatura i a la persistència de les onades de calor.^{22, 23} A conseqüència d'això, tant aquesta planta com el seu hàbitat i els serveis ecosistèmics que reporta podrien desaparèixer, alterant el futur dels ecosistemes costaners mediterranis.^{21, 22}

L'escalfament de la mar també contribueix a la proliferació i l'establiment d'espècies al·lòctones d'origen tropical i subtropical, produint el que es coneix com «tropicalització de la Mediterrània».^{24, 25} De fet, les darreres dècades s'ha constatat un augment de les taxes de colonització d'espècies tropicals i subtropicals al·lòctones de macròfits marins a

QUÈ ÉS?

Les onades de calor marines són esdeveniments d'escalfament oceànic extrems amb un mínim de 5 dies consecutius de pics de calor. Es defineixen com temperatures de la mar que superen el 90 % de les observacions històriques de temperatura d'un període de referència a llarg termini.¹ Aquí empram com a període de referència l'interval d'anys 1982-2015.^{5,9}

METODOLOGIA

Els indicadors d'onades de calor marines han estat generats pel Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (ICTS SOCIB)^{5,9} emprant dades de temperatura superficial de la mar de satèl·lits del Servei Marí Copernicus²⁷ des del seu registre (1982) i usant com a període de referència la climatologia de l'any 1982 al 2015.

S'han calculat els següents indicadors anuals entre els anys 1982 i 2023:

1. Nombre de dies d'onades de calor marines,
2. intensitats mitjanes, i
3. intensitats màximes

RESULTATS

Els dos darrers anys (2022 i 2023), més de la meitat dels dies han transcorregut en onada de calor marina. El 2023 hi va haver 214 dies d'onada de calor marina, mentre que el 2022 varen ser 202 dies en total. El nombre de dies en onada de calor marina ha augmentat en 114 dies els darrers 42 anys.

La intensitat mitjana de les onades de calor marines l'any 2023 va ser de 2,03 °C més que la mitjana del

PER QUÈ?

La temperatura de l'aigua té múltiples efectes sobre els organismes marins, els hàbitats i el funcionament dels ecosistemes. Algunes de les conseqüències de l'escalfament global de les aigües de la Mediterrània inclouen la pèrdua de biodiversitat, canvis en el funcionament dels ecosistemes i en els cicles biogeoquímics, i la proliferació d'espècies invasores.¹⁵

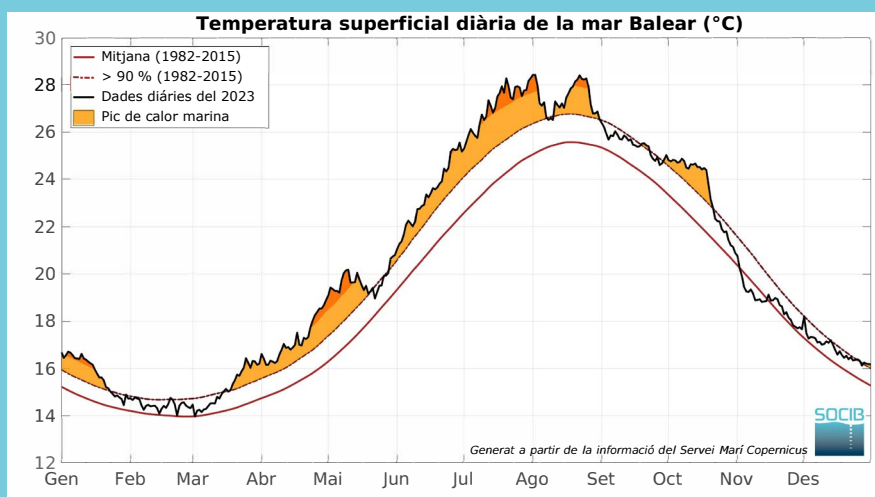
A causa de les onades de calor que sofreix la Mediterrània, especialment en les dues darreres dècades, s'han registrat esdeveniments de mortalitat massiva d'organismes bentònics —que viuen fixos al substrat— com coralls, gorgònies o esponges.^{16,17}

LOCALITZACIÓ



període de referència 1982-2015. Ha augmentat en 0,49 °C en els darrers 42 anys.

La intensitat màxima de les onades de calor marines el 2023 va ser de 4,31 °C per damunt de la mitjana del període de referència 1982-2015. Ha augmentat en 1,94 °C en els darrers 42 anys.



Sèrie temporal diària de la temperatura superficial de la mar Balear l'any 2023. En color negre es mostra la temperatura superficial registrada a partir d'observacions de satèl·lit i en tons de color taronja es mostra la intensitat de les onades de calor marines registrades. FONT: Generat per ICTS SOCIB <https://apps.socib.es/subregmed-marine-heatwaves/daily_bulletin.htm>^{5,9} a partir de dades del Servei Marí Copernicus.²⁷

Dies totals d'onada de calor marina de l'any 2023

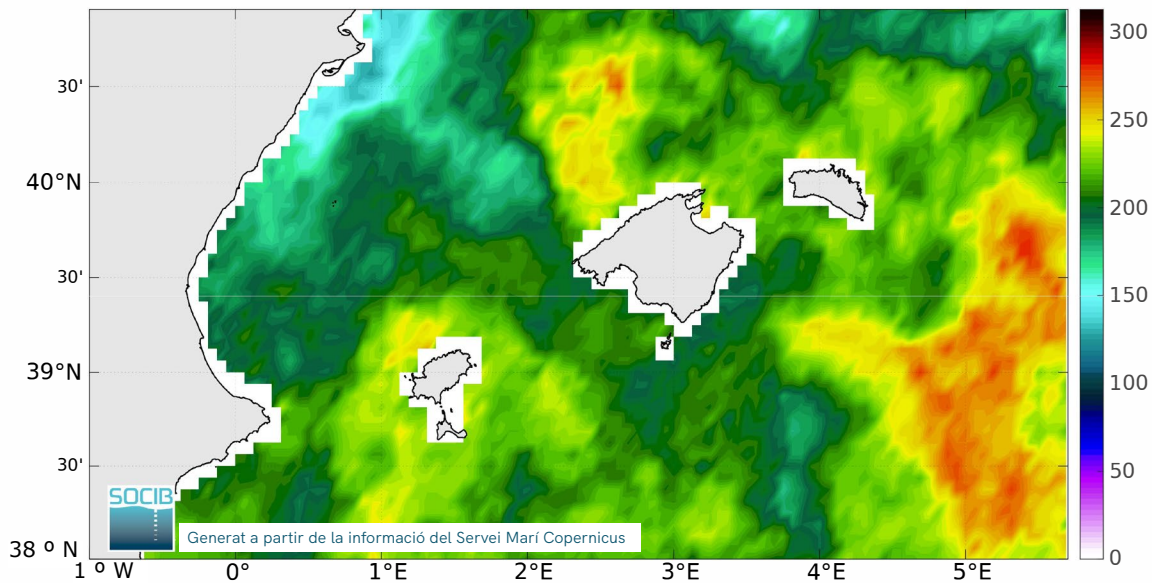


Figura 1. Dies totals d'onada de calor marina l'any 2023. FONT: Generat pel SOCIB⁹ a partir de dades del Servei Marí Copernicus.²⁷

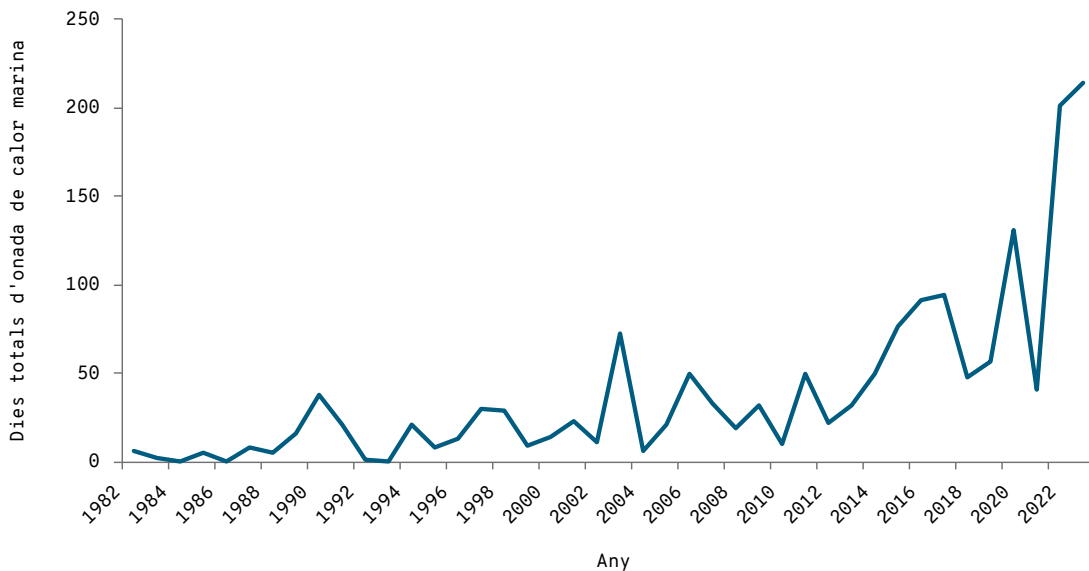


Figura 2. Evolució temporal dels dies totals d'onada de calor marina entre els anys 1982 i 2023. FONT: Generat a partir de les dades del Servei Marí Copernicus²⁷ processades pel SOCIB.⁹

la Mediterrània, amb una velocitat i unes taxes d'expansió superiors a les d'espècies temperades o cosmopolites, coincidint amb l'augment de la temperatura oceànica i amb la freqüència de les onades de calor.²⁶

A causa de la gran sensibilitat dels organismes marins a l'escalfament, a l'increment en la freqüència, la durada i la intensitat de les onades de calor i als canvis en els ecosistemes que comporten, resulta crucial el seguiment, la monitorització i l'avaluació de la seva evolució al llarg del temps.

METODOLOGIA

S'utilitzen dades de temperatures de superfície de la mar de satèl·lit del Servei Marí Copernicus²⁷

des de l'any 1982, disponibles en una resolució espacial de l'ordre de 5 km i amb una precisió en els valors inferior a 0,1 °C. Aquestes dades han estat processades pel Sistema d'Observació i Predicció Costaner de les Illes Balears (ICTS SOCIB)⁹ i es visualitzen mitjançant l'aplicació web d'Onades de Calor Subregionals de la Mar Mediterrània del SOCIB.^{5, 9}

D'acord amb la definició de Hobday i col·laboradors,¹ les onades de calor marines s'identifiquen a escala diària com les temperatures superficials de la mar superiors al percentil 90 de la distribució local respecte al període de referència 1982-2015 registrades durant 5 dies consecutius o més.^{5, 10} Si les onades de calor marines successives ocorren amb menys de 2 dies de diferència es consideren la mateixa onada de calor.¹⁵

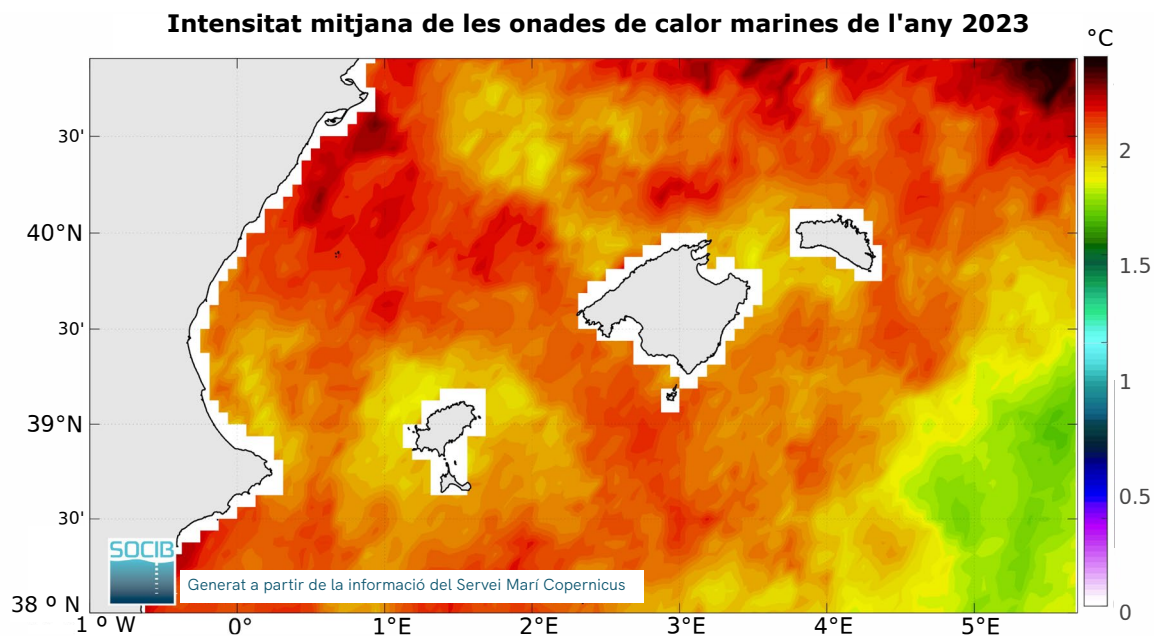


Figura 3. Intensitat mitjana de les onades de calor marines l'any 2023. FONT: Generat pel SOCIB⁹ a partir de dades del Servei Marí Copernicus.²⁷

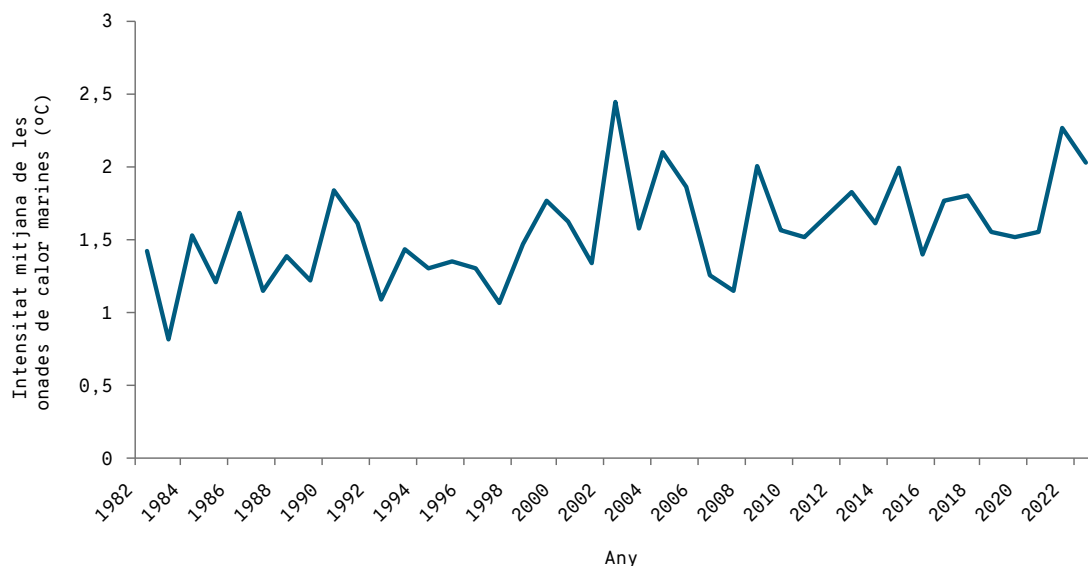


Figura 4. Evolució al llarg del temps de la intensitat mitjana de les onades de calor marines entre els anys 1982 i 2023. FONT: Generat a partir de les dades del Servei Marí Copernicus²⁷ processades pel SOCIB.⁹

Per cada any es calculen les mètriques sobre onades de calor marines. En aquest estudi, presentem resultats a la mar Balear sobre:

1. Dies totals,
2. intensitat mitjana, i
3. intensitat màxima

Dies totals d'onada de calor marina

L'any 2023 hi va haver un total de 214 dies amb onada de calor marina a la mar Balear. Això representa un 58,6 % dels dies de l'any sofrint onades de calor marines (figura 1). L'any 2022 varen ser 202 dies, mentre que el 2021 varen ser 41. Els anys amb un nombre més petit de dies d'onada de calor marina varen ser 1984, 1986 i 1993.

El nombre de dies amb onada de calor marina ha anat augmentant paulatinament al llarg del temps a un ritme de 2,7 dies/any, amb un increment entre els anys 1982 i 2023 de 114 dies (figura 2).

Intensitat mitjana

La intensitat mitjana de les onades de calor marines l'any 2023 va ser de 2,03 °C per damunt del període de referència 1982-2015, només superada els anys 2003, 2022 i 2005, que va ser de 2,44, 2,27 i 2,1 °C, respectivament (figures 3 i 4).

La tendència de l'increment de la intensitat mitjana al llarg del període 1982-2023 va ser de 0,49 °C, la qual cosa representa un increment de 0,01 °C l'any (figura 4).

Intensitat màxima de les onades de calor marines de l'any 2023

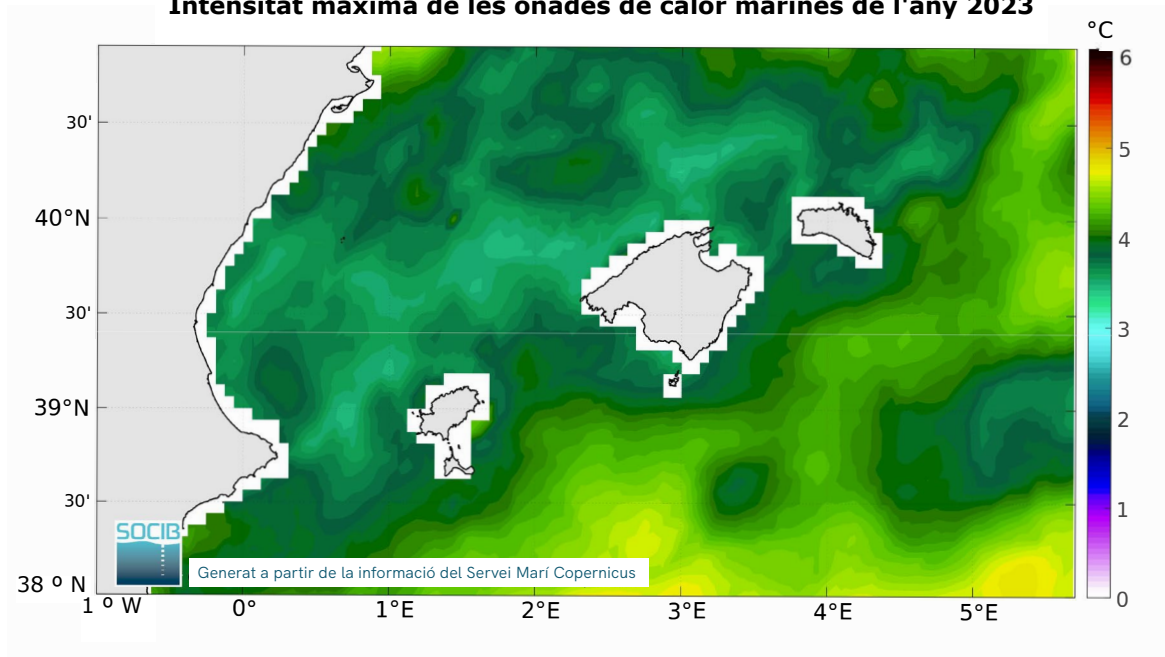


Figura 5. Intensitat màxima de les onades de calor marines l'any 2023. FONT: Generat pel SOCIB⁹ a partir de dades del Servei Marí Copernicus.²⁷

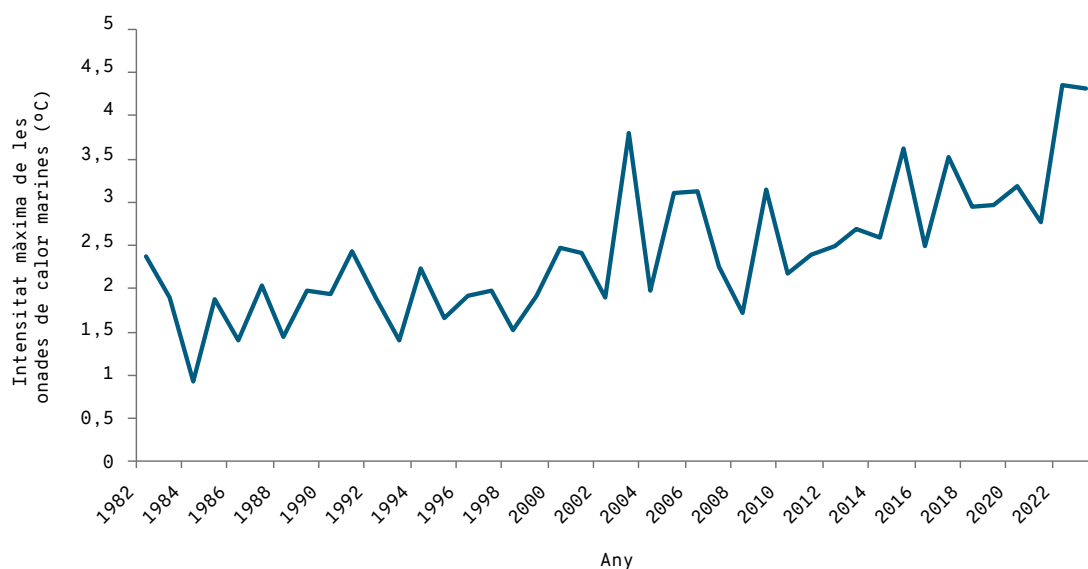


Figura 6. Evolució al llarg del temps de la intensitat màxima de les onades de calor marines entre els anys 1982 i 2023. FONT: Generat a partir de les dades del Servei Marí Copernicus²⁷ processades pel SOCIB.⁹

Intensitat màxima

La intensitat màxima de les onades de calor marines l'any 2023 va ser de 4,31 °C per damunt de la mitjana del període de referència 1982-2015, només superada l'any 2022, quan va ser de 4,36 °C (figures 5 i 6).

La intensitat màxima ha superat els 3,5 °C de la mitjana del període de referència durant cinc anys: 2022, 2023, 2003, 2015 i 2017, i va ser de 4,36, 4,31, 3,79, 3,63 i 3,53 °C, respectivament.

La intensitat màxima ha augmentat al llarg del temps a un ritme de 0,05 °C/any, la qual cosa suposa un increment d'1,94 °C en els darrers 42 anys (període 1982-2023).

CONCLUSIONS

→ Els dos darrers anys —2022 i 2023—, més de la meitat dels dies han transcorregut en onada de calor marina a la mar Balear. En concret, el 2023 es registraren 214 dies d'onada de calor marina, mentre que el 2022 foren 202. De fet, el nombre de dies en onada de calor marina ha augmentat al llarg del temps a un ritme de 2,7 dies l'any.

→ La intensitat mitjana de les onades de calor marines l'any 2023 va ser de 2,03 °C més que la mitjana del període de referència 1982-2015. La intensitat mitjana ha augmentat a un ritme de 0,01 °C l'any en el període 1982-2023.

- La intensitat màxima de les onades de calor marines l'any 2023 va ser de 4,31 °C per damunt de la mitjana del període de referència 1982-2015. Ha anat augmentant al llarg del temps a un ritme de 0,05 °C/any.
- Les onades de calor marines tenen múltiples efectes sobre els organismes marins, els hàbi-

tats i el funcionament dels ecosistemes. S'han observat esdeveniments de mortalitats massives de coralls, gorgònies i esponges a causa de l'efecte de les onades de calor. També s'han associat a esdeveniments de floració massiva de *Posidonia oceanica* i pseudoviviparitat.

REFERÈNCIES

- ¹ Hobday, A. J.; Alexander, L. V.; Perkins, S. E.; Smale, D. A.; Straub, S. C.; Oliver, E. C. J.; Benthuyssen, J. A.; Burrows, M. T.; Donat, M. G.; Feng, M.; Holbrook, N. J.; Moore, P. J.; Scannell, H. A.; Sen Gupta, A.; Wernberg, T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography*, 141, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2015.12.014>.
- ² Frölicher, T. L.; Fischer, E. M.; Gruber, N. (2018). Marine heatwaves under global warming. *Nature*, 560, 360-364. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0383-9>.
- ³ Oliver, E. C. J.; Donat, M. G.; Burrows, M. T.; Moore, P. J.; Smale, D. A.; Alexander, L. V.; Benthuyssen, J. A.; Feng, M.; Sen Gupta, A.; Hobday, A. J.; Holbrook, N. J.; Perkins-Kirkpatrick, S. E.; Scannell, H. A.; Straub, S. C.; Wernberg, T. (2018). Longer and more frequent marine heatwaves over the past century. *Nature Communications* 9, 1324. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03732-9>.
- ⁴ Smale, D. A.; Wernberg, T.; Oliver, E. C. J.; Thomsen, M.; Harvey, B. P.; Straub, S. C.; Burrows, M. T.; Alexander, L. V.; Benthuyssen, J. A.; Donat, M. G.; Feng, M.; Hobday, A. J.; Holbrook, N. J.; Perkins-Kirkpatrick, S. E.; Scannell, H. A.; Sen Gupta, A.; Payne, B. L.; Moore, P. J. (2019). Marine heatwaves threaten global biodiversity and the provision of ecosystem services. *Nature Climate Change*, 9, 306-312. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0412-1>.
- ⁵ 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>.
- ⁶ Smith, K. E.; Burrows, M. T.; Hobday, A. J.; Sen Gupta, A.; Moore, P. J.; Thomsen, M.; Wernberg, T.; Smale, D. A. (2021). Socioeconomic impacts of marine heatwaves: global issues and opportunities. *Science*, 374. <https://doi.org/10.1126/science.abj3593>.
- ⁷ Rosselló, P.; Pascual, A.; Combes, V. (2023). Assessing marine heat waves in the Mediterranean Sea: a comparison of fixed and moving baseline methods. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1168368>.
- ⁸ Martínez, J.; Leonelli, F. E.; García-Ladona, E.; Garrabou, J.; Kersting, D. K.; Bensoussan, N.; Pisano, A. (2023). Evolution of marine heatwaves in warming seas: the Mediterranean Sea case study. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1193164>.
- ⁹ Juza, M.; Tintoré, J. (2021). Sub-regional Mediterranean marine heat waves: from event detection to climate change indices. [web app]. Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (SOCIB). <https://apps.socib.es/subregmed-marine-heatwaves/>.
- ¹⁰ 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. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.610589>.
- ¹¹ Dayan, H.; McAdam, R.; Juza, M.; Masina, S.; Speich, S. (2023). Marine heat waves in the Mediterranean Sea: an assessment from the surface to the subsurface to meet national needs. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1045138>.
- ¹² Mediterranean Centre for Environmental Studies. (2024). Mediterranean sea surface temperature report. Meteorology and climatology area. [en línia]. <<https://www.ceam.es/news/mediterranean-sst-report-2/>>.
- ¹³ 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*. <https://doi.org/http://doi.org/10.62135/IAJB7896>.
- ¹⁴ Juza, M.; Tintoré, J. (2020). Sub-regional Mediterranean Sea indicators». Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (SOCIB) [web app]. <<https://apps.socib.es/subregmed-indicators/>>.

- ¹⁵ Torres, C.; Jordà, G.; de Vilchez, P.; Vaquer-Sunyer, R.; Rita, J.; Canals, V.; Cladera, A.; Escalona, J. M.; Miranda, M. Á. (2021). Climate change and their impacts in the Balearic Islands: a guide for policy design in Mediterranean regions. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01810-1>.
- ¹⁶ Garrabou, J.; Gómez-Gras, D.; Medrano, A.; Cerrano, C.; Ponti, M.; Schlegel, R.; Bensoussan, N.; Turicchia, E.; Sini, M.; Gerovasileiou, V.; Teixido, N.; Mirasole, A.; Tamburello, L.; Cebrian, E.; Rilov, G.; Ledoux, J.; Souissi, J. Ben; Khamassi, F.; Ghanem, R.; Benabdi, M.; Grimes, S.; Ocaña, O.; Bazairi, H.; Hereu, B.; Linares, C.; Kersting, D. K.; la Rovira, G.; Ortega, J.; Casals, D.; Pagès-Escalà, M.; Margarit, N.; Capdevila, P.; Verdura, J.; Ramos, A.; Izquierdo, A.; Barbera, C.; Rubio-Portillo, E.; Anton, I.; López-Sendino, P.; Díaz, D.; Vázquez-Luis, M.; Duarte, C.; Marbà, N.; Aspillaga, E.; Espinosa, F.; Grech, D.; Guala, I.; Azzurro, E.; Farina, S.; Cristina Gambi, M.; Chimienti, G.; Montefalcone, M.; Azzola, A.; Mantas, T. P.; Frascchetti, S.; Ceccherelli, G.; Kipson, S.; Bakran-Petricioli, T.; Petricioli, D.; Jimenez, C.; Katsanevakis, S.; Kizilkaya, I. T.; Kizilkaya, Z.; Sartoretto, S.; Elodie, R.; Ruitton, S.; Comeau, S.; Gattuso, J.; Harmelin, J. (2022). Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea. *Global Change Biology*, 28, 5708–5725. <https://doi.org/10.1111/gcb.16301>.
- ¹⁷ Garrabou, J.; Gómez-Gras, D.; Ledoux, J.-B.; Linares, C.; Bensoussan, N.; López-Sendino, P.; Bazairi, H.; Espinosa, F.; Ramdani, M.; Grimes, S.; Benabdi, M.; Souissi, J. Ben; Soufi, E.; Khamassi, F.; Ghanem, R.; Ocaña, O.; Ramos-Esplà, A.; Izquierdo, A.; Anton, I.; Rubio-Portillo, E.; Barbera, C.; Cebrian, E.; Marbà, N.; Hendriks, I. E.; Duarte, C. M.; Deudero, S.; Díaz, D.; Vázquez-Luis, M.; Alvarez, E.; Hereu, B.; Kersting, D. K.; Gori, A.; Viladrich, N.; Sartoretto, S.; Paireaud, I.; Ruitton, S.; Pergent, G.; Pergent-Martini, C.; Rouanet, E.; Teixidó, N.; Gattuso, J.-P.; Frascchetti, S.; Rivetti, I.; Azzurro, E.; Cerrano, C.; Ponti, M.; Turicchia, E.; Bavestrello, G.; Cattaneo-Vietti, R.; Bo, M.; Bertolino, M.; Montefalcone, M.; Chimienti, G.; Grech, D.; Rilov, G.; Toney Kizilkaya, I.; Kizilkaya, Z.; Eda Topçu, N.; Gerovasileiou, V.; Sini, M.; Bakran-Petricioli, T.; Kipson, S.; Harmelin, J. G. (2019). Collaborative database to track mass mortality events in the Mediterranean Sea. *Frontiers in Marine Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00707>.
- ¹⁸ Diaz-Almela, E.; Marbà, N.; Duarte, C. M. (2007). Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering records. *Global Change Biology*, 13, 224–235. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01260.x>.
- ¹⁹ Marín-Guirao, L.; Entrambasaguas, L.; Ruiz, J. M.; Procaccini, G. (2019). Heat-stress induced flowering can be a potential adaptive response to ocean warming for the iconic seagrass *Posidonia oceanica*. *Molecular Ecology*, 28, 2486–2501. <https://doi.org/10.1111/mec.15089>.
- ²⁰ Tomas, F.; Hernan, G.; Mañez-Crespo, J.; Arona, A.; Meléndez, D. H.; Reynés, X.; Delgado, J.; Procaccini, G.; Ballesteros, E. (2024). Mass flowering and unprecedented extended pseudovivipary in seagrass (*Posidonia oceanica*) after a marine heat wave. *Marine Pollution Bulletin*, 203, 116394. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116394>.
- ²¹ 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>.
- ²² Jordà, G.; Marbà, N.; Duarte, C. M. (2012). Mediterranean seagrass vulnerable to regional climate warming. *Nature Climate Change*, 2, 821–824. <https://doi.org/10.1038/nclimate1533>.
- ²³ Guerrero-Meseguer, L.; Marín, A.; Sanz-Lázaro, C. (2017). Future heat waves due to climate change threaten the survival of *Posidonia oceanica* seedlings. *Environmental Pollution*, 230, 40–45. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.039>.
- ²⁴ Bianchi, C. N.; Morri, C. (2003). Global sea warming and “tropicalization” of the Mediterranean Sea: biogeographic and ecological aspects. *Biogeographia - The Journal of Integrative Biogeography*, 24. <https://doi.org/10.21426/B6110129>.
- ²⁵ Santana-Garcon, J.; Bennett, S.; Marbà, N.; Vergés, A.; Arthur, R.; Alcoverro, T. (2023). Tropicalization shifts herbivore pressure from seagrass to rocky reef communities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290. <https://doi.org/10.1098/rspb.2022.1744>.
- ²⁶ Wesselmann, M.; Hendriks, I. E.; Johnson, M.; Jordà, G.; Mineur, F.; Marbà, N. (2024). Increasing spread rates of tropical non-native macrophytes in the Mediterranean Sea. *Global Change Biology*, 30. <https://doi.org/10.1111/gcb.17249>.
- ²⁷ Copernicus Marine Service. [en línia]. <<https://marine.copernicus.eu/>>.

Vaquer-Sunyer, R.; Juza, M. (2024). Onades de calor marines. A: Vaquer-Sunyer, R.; Barrientos, N.; Gouraguine, A. (eds.). *Informe Mar Balear 2024*
<https://informemarbalear.org/ca/canvi-global/imb-onades-calor-marines-cat_2024.pdf>.
<https://doi.org/10.62135/BDTA2996>.