



CONVENZIONE OPERATIVA NELL'AMBITO DEL PROGETTO "MARE CALDO" IN COLLABORAZIONE TRA DiSTAV, GREENPEACE E ELBATECH

RELAZIONE RELATIVA AL QUINTO ANNO DI PROGETTO MARE CALDO (2023-2024)

MONITORAGGIO DEGLI EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUGLI ECOSISTEMI MARINI BENTONICI DI SCOGLIERA

A cura di

Annalisa Azzola, Monica Montefalcone, Riccardo Martellucci, Pietro Cimmino

Monica Montefalcone, Annalisa Azzola e Pietro Cimmino (DiSTAV, Università di Genova), hanno curato la raccolta e l'analisi dei dati relativi alle comunità bentoniche di scogliera rocciosa; Riccardo Martellucci (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale) ha curato l'analisi dei dati di temperatura.

Responsabile scientifico: Prof.ssa Monica Montefalcone

DiSTAV, Università degli Studi di Genova, Corso Europa 26, 16132 Genova

Genova, aprile 2025

Ringraziamenti

Per la consulenza scientifica si ringraziano i professori Marco Capello e Paolo Vassallo dell'Università di Genova. Si ringrazia inoltre Nicolò Campisi che ha collaborato al progetto nell'ambito della sua tesi di Laurea Triennale in Scienze Ambientali e Naturali presso il DiSTAV dell'Università di Genova.

INDICE	
PROGETTO MARE CALDO	3
PREMESSE: VARIABILITÀ TERMICA DELL'ANNO 2024	4
MATERIALI E METODI	6
AREE DI STUDIO	6
ATTIVITÀ DI CAMPO	17
Monitoraggio della temperatura nella colonna d'acqua	17
Monitoraggio degli ecosistemi di scogliera	19
ANALISI DEI DATI	24
Dati di temperatura superficiale dell'acqua (SST)	24
Dati di temperatura lungo la colonna d'acqua	24
Struttura e stato ecologico delle comunità	25
Cambiamento nel tempo	26
Mortalità	26
Specie termofile	27
RISULTATI	28
Temperatura superficiale dell'acqua (SST)	28
Temperatura lungo la colonna d'acqua	39
Struttura e stato ecologico delle comunità bentoniche	55
Cambiamento della comunità bentonica nell'AMP Portofino	56
Monitoraggio delle morie di massa	64
Monitoraggio delle specie termofile	71
Confronto tra un'AMP e un'area non soggetta a protezione	75
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	76
BIBLIOGRAFIA	79

PROGETTO MARE CALDO

Il progetto Mare Caldo, in collaborazione tra il DiSTAV dell'Università di Genova e Greenpeace, si propone di sviluppare una rete costiera di stazioni di monitoraggio della temperatura della colonna d'acqua e degli effetti dei cambiamenti climatici nei mari italiani. La rete di dodici stazioni, nata nel 2019 con l'installazione della prima stazione pilota presso la costa nord-occidentale dell'Isola d'Elba, include undici aree marine protette (AMP) aderenti al progetto: AMP Capo Carbonara, AMP Capo Milazzo, AMP Cinque Terre, AMP Isola dell'Asinara, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Isole Tremiti, AMP Miramare, AMP Plemmirio, AMP Portofino, AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, e AMP Torre Guaceto.

Il progetto Mare Caldo prevede l'installazione di stazioni fisse per la registrazione in continuo delle temperature in mare a diverse profondità, secondo il protocollo proposto dal network mediterraneo T-MEDNet (<http://www.t-mednet.org>), piattaforma già esistente e costituita da diverse stazioni per la misurazione delle temperature nel Mediterraneo. Il progetto prevede inoltre la registrazione delle stazioni dei diversi Soggetti Aderenti sulla piattaforma T-MEDNet e la condivisione periodica dei dati registrati con la suddetta piattaforma, in modo da contribuire a una più ampia rete mediterranea per consentire, grazie allo scambio d'informazioni e conoscenze, la messa in atto di meccanismi regionali di tutela.

Nell'ambito del progetto Mare Caldo i dati raccolti nelle diverse stazioni dei mari italiani sono analizzati per evidenziare differenze geografiche e latitudinali negli andamenti stagionali delle temperature nella colonna d'acqua e per rilevare la presenza di eventuali anomalie termiche (e.g., ondate di calore, alterazioni del termoclino). Grazie ai dati così raccolti è possibile sviluppare uno studio comparativo tra le diverse aree in modo da aumentare le conoscenze relative ai mari che circondano la nostra penisola. Il progetto, infine, prevede nelle aree di studio la realizzazione di campagne di monitoraggio sulle biocenosi marine di scogliera per correlare gli andamenti delle temperature rilevate a specifici effetti e cambiamenti nella struttura e nella composizione delle comunità bentoniche.

Gli obiettivi prioritari del progetto Mare Caldo sono:

- 1) monitorare, attraverso l'adozione di un protocollo standardizzato di raccolta dati, i cambiamenti della temperatura lungo la colonna d'acqua per periodi continui per valutare gli effetti del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini costieri, in modo da raccogliere dati utili per sviluppare adeguate misure di gestione e tutela;
- 2) sensibilizzare l'opinione pubblica e aumentare la consapevolezza sui cambiamenti in atto, con il fine ultimo di stimolare i dovuti interventi per fronteggiarli;
- 3) porre le basi per lo sviluppo di una rete nazionale di monitoraggio degli impatti dei cambiamenti climatici sulle comunità di scogliera nei mari italiani.

Nella presente relazione sono riportati i risultati degli andamenti delle temperature registrati dalle 12 stazioni della rete (2023-2024) e i risultati delle campagne di monitoraggio condotte, nel quinto anno di progetto Mare Caldo (2024), nell'AMP Portofino, nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, e nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano.

PREMESSE: VARIABILITÀ TERMICA DELL'ANNO 2024

Il 2024 ha segnato un'ulteriore accelerazione del riscaldamento globale, con effetti sempre più evidenti anche sullo stato e la variabilità dell'oceano. Dopo gli anni record 2022 e 2023 per la temperatura degli oceani, il 2024 ha stabilito nuovi primati, diventando l'anno più caldo mai registrato sia per la temperatura media globale dell'aria sia per quella della superficie marina, superando di oltre 1,5°C i livelli preindustriali (Fig. 1, Copernicus Climate Change Service, 2025). Oltre al riscaldamento a lungo termine, l'anno è stato influenzato anche dagli effetti residui del forte evento El Niño del 2023 (Marullo et al., 2023, Pirro et al., 2024).

Secondo i dati forniti dal Copernicus Climate Change Service (C3S), il 2024 ha registrato una temperatura media globale pari a 15,10°C, ovvero 0,72°C superiore alla media del periodo 1991–2020 e 1,60°C al di sopra del livello preindustriale. L'anno si è distinto non solo per il valore medio annuale, ma anche per la costanza delle anomalie positive: ogni mese da gennaio a giugno è stato più caldo rispetto agli stessi mesi di qualsiasi altro anno precedente, mentre i mesi da luglio a dicembre sono stati i secondi più caldi mai registrati per quel periodo. Il 22 luglio è stato inoltre registrato un nuovo record giornaliero assoluto, con una temperatura media globale dell'aria in superficie pari a 17,16°C.

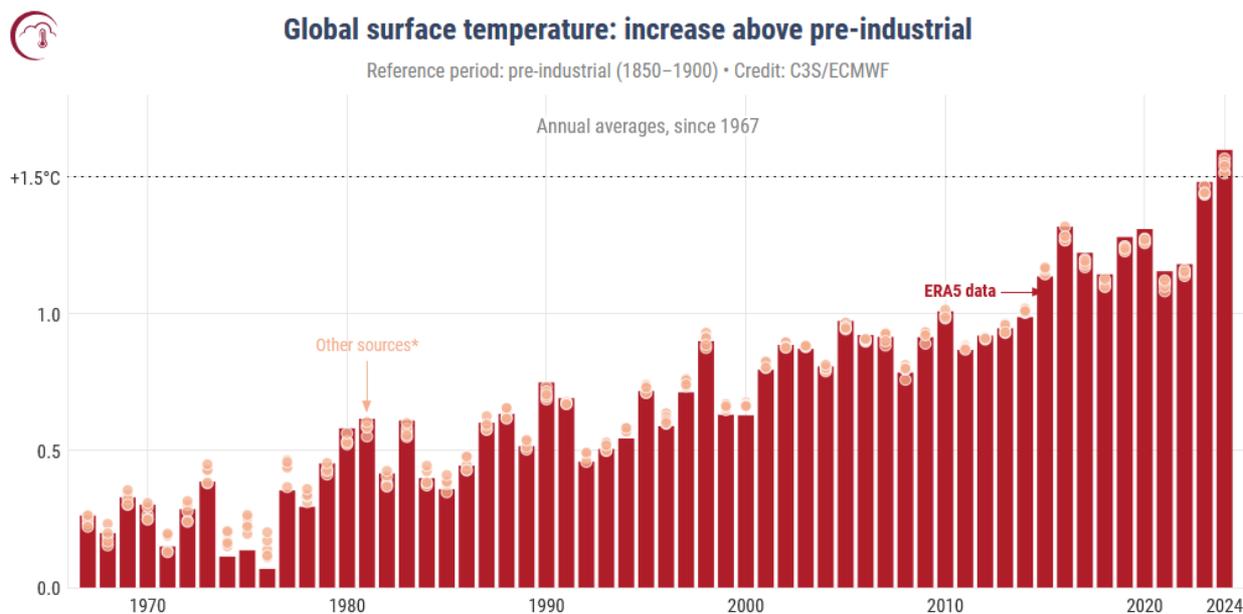


Figura 1. Aumento della temperatura dell'aria superficiale globale (°C) rispetto alla media del periodo di riferimento preindustriale 1850–1900, basato su diversi dataset globali di temperatura, mostrato come media annuale dal 1967. Crediti: C3S/ECMWF.

Nel contesto europeo, il 2024 ha rappresentato un vero punto di svolta. È stato l'anno più caldo mai registrato nel continente, con una temperatura media di 10,69°C. Questo valore supera di 0,28°C il precedente record stabilito nel 2020, risultando 1,47°C al di sopra della media recente (1991–2020) e ben 2,92°C al di sopra del livello preindustriale. Si tratta di anomalie estremamente elevate che riflettono un riscaldamento climatico sempre più evidente anche a scala regionale.

Le temperature superficiali del mare (SST) eccezionalmente elevate sono state associate a numerose ondate di calore marine, in particolare nel Mediterraneo, dove si sono registrati nuovi record di temperatura, salinità e innalzamento del livello del mare con impatti diretti sugli ecosistemi marini e sulle comunità costiere (Juza, 2025).

Nel Mediterraneo, la temperatura del mare ha mostrato un chiaro segnale di riscaldamento: dal 1982 al 2024, le tendenze locali della SST sono variate tra 0,19°C e 0,65°C per decennio. L'anno 2024 ha fatto registrare la temperatura media annuale più alta mai osservata nel bacino, con un valore medio di 21,16°C e un'anomalia di 1,55°C rispetto al periodo di riferimento 1982–2015. Si è trattato del settimo anno consecutivo con temperature medie annuali tra le più elevate mai registrate dal 1982. I valori stagionali rilevati dai satelliti sono stati i più alti degli ultimi 43 anni. In particolare, l'inverno 2024 è stato il più caldo mai registrato nel Mediterraneo occidentale, mentre nell'area orientale l'inverno, la primavera e l'estate hanno superato ogni record precedente (Juza, 2025).

Le anomalie termiche hanno determinato anche un'intensificazione senza precedenti delle ondate di calore marine. Nel 2024, il Mediterraneo ha vissuto in media 246 giorni di Marine Heat Waves (MHWs), con variazioni regionali che hanno raggiunto i 205 giorni nel bacino occidentale e ben 288 giorni in quello orientale. A scala sub-regionale, le proprietà delle MHWs hanno mostrato forti variazioni spazio-temporali. Le intensità medie e massime sono state comprese rispettivamente tra 1,46°C e 2,03°C e tra 2,70°C e 4,02°C sopra la media. La durata media delle MHWs è variata tra 27 e 65 giorni, con una frequenza da 5 a 8 eventi e un totale annuale di giorni di MHW compreso tra 169 e 288. Alcune aree hanno registrato valori estremi: l'intensità media ha raggiunto 3,50°C nel nord Adriatico, mentre l'intensità massima è stata di 7,22°C nel Mar di Alborán. In termini di durata totale, alcune regioni hanno sperimentato fino a 303 giorni di MHW nel sud del Levantino, 16 eventi nel nord-ovest dello Ionio e addirittura 365 giorni consecutivi nel sud dello Ionio.

Nel corso di aprile 2024, la maggior parte delle sotto-regioni del Mediterraneo centrale e orientale ha subito ondate di calore marine classificate come categoria III, considerate severe. Anche il Mediterraneo occidentale, pur con caratteristiche diverse, ha vissuto eventi di MHW intensi e duraturi durante l'inverno, l'estate e l'autunno.

MATERIALI E METODI

AREE DI STUDIO

Nel corso del quinto anno del progetto Mare Caldo (2023-2024) sono stati analizzati i dati di temperatura registrati dai *temperature data logger* nelle dodici aree situate a diverse latitudini (da nord verso sud): AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, Isola d'Elba, AMP Isole Tremiti, AMP Isola dell'Asinara, AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara, AMP Capo Milazzo, e AMP Plemmirio (Fig. 2).

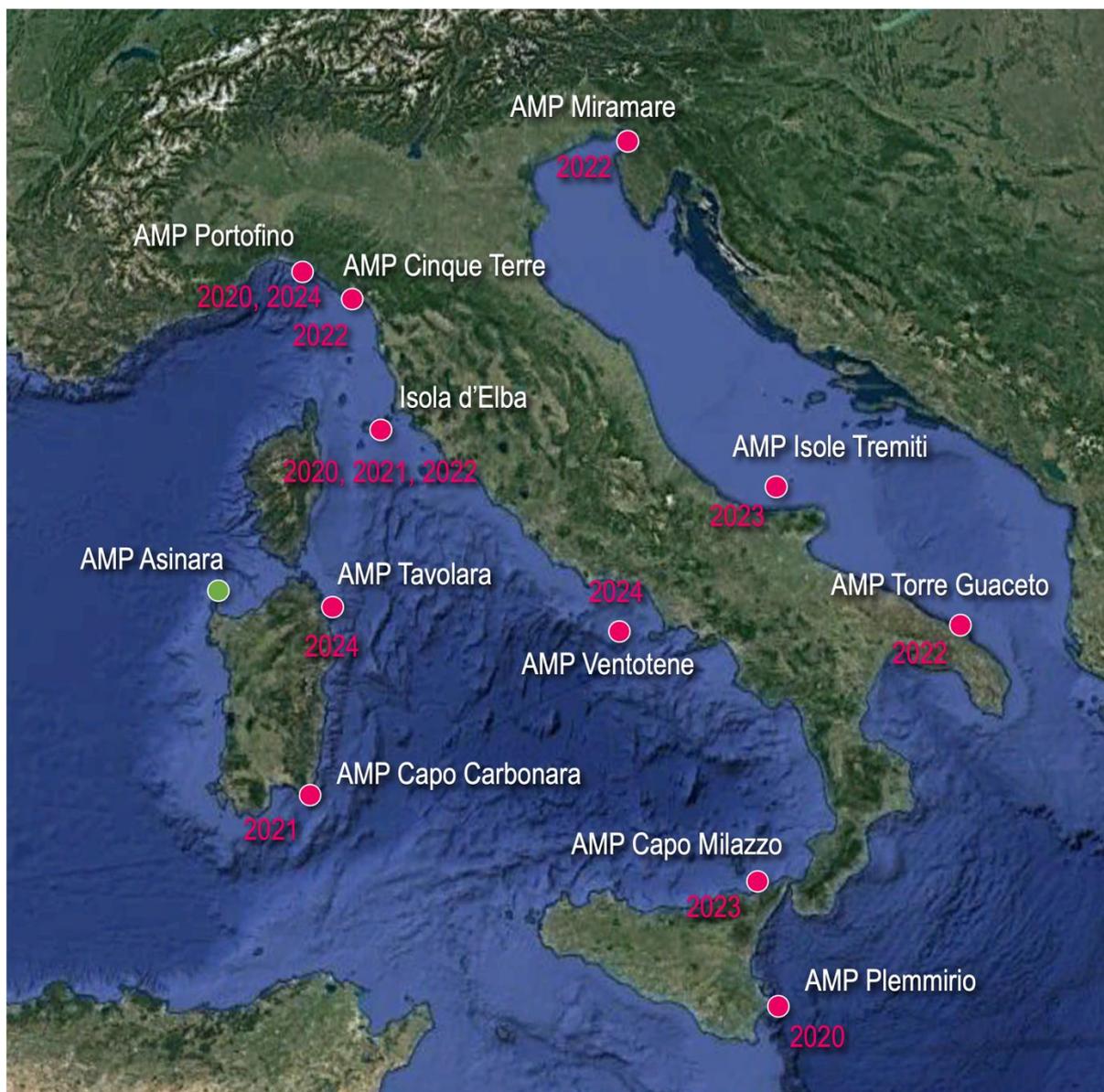


Figura 2. Mappa delle aree di studio comprendenti la stazione pilota dell'Isola d'Elba e le 11 aree marine protette (AMP) aderenti al progetto Mare Caldo. In rosso le stazioni dove, oltre al monitoraggio delle temperature, sono stati condotti i monitoraggi biologici nei cinque anni di progetto; in verde le aree dove i rilevamenti sulle comunità bentoniche sono ancora da svolgere.

AMP Miramare

L'AMP Miramare (Fig. 3) nasce nel 1973 inizialmente come Parco Marino, in concessione demaniale dalla Capitaneria di Porto di Trieste al WWF Italia, e istituita poi come area marina protetta con il Decreto Interministeriale del 12 novembre 1986. L'AMP ha un'estensione di 30 ettari sottoposti a protezione integrale e 90 ettari di zona cuscinetto, istituita nel 1995 da un'ordinanza della Capitaneria di Porto (www.ampmiramare.it).

Dal punto di vista geomorfologico l'AMP presenta ambienti di marea, ambienti detritici, ambienti di scogliera e fondali sabbiosi e fangosi.

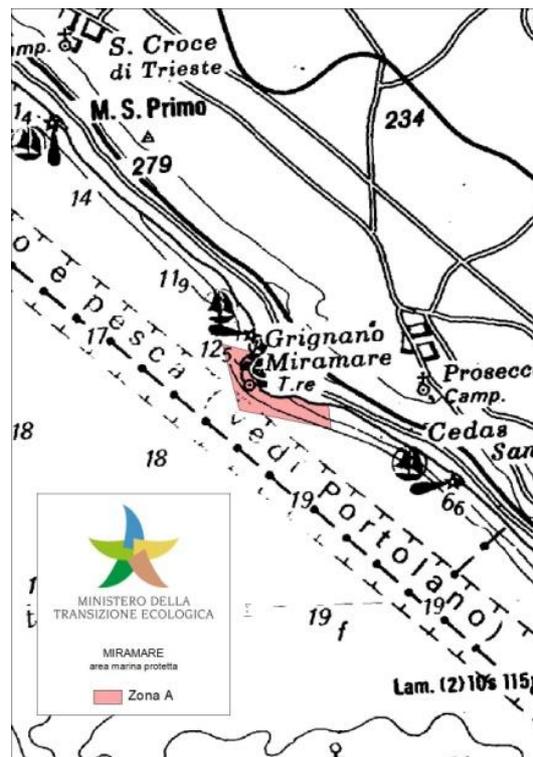


Figura 3. Carta dell'AMP Miramare dove è evidenziata la zona a protezione integrale (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Portofino

L'AMP Portofino (Fig. 4), gestita dal Consorzio di Gestione dell'Area Marina Protetta del Promontorio di Portofino, è stata istituita con il decreto del Ministero dell'Ambiente del 26 aprile 1999 e comprende i Comuni di Camogli, Portofino e Santa Margherita Ligure. L'area marina, si sviluppa per circa 13 km costieri lungo tutto il promontorio di Portofino per un totale di 372 ettari di mare che dividono il Golfo del Tigullio dal Golfo Paradiso (www.portofinoamp.it).

Da un punto di vista geomorfologico le rocce di cui sono costituite le coste del Promontorio di Portofino sono di origine sedimentaria. La costa è caratterizzata da falesie che proseguono verticalmente sott'acqua finendo su fondali detritici.

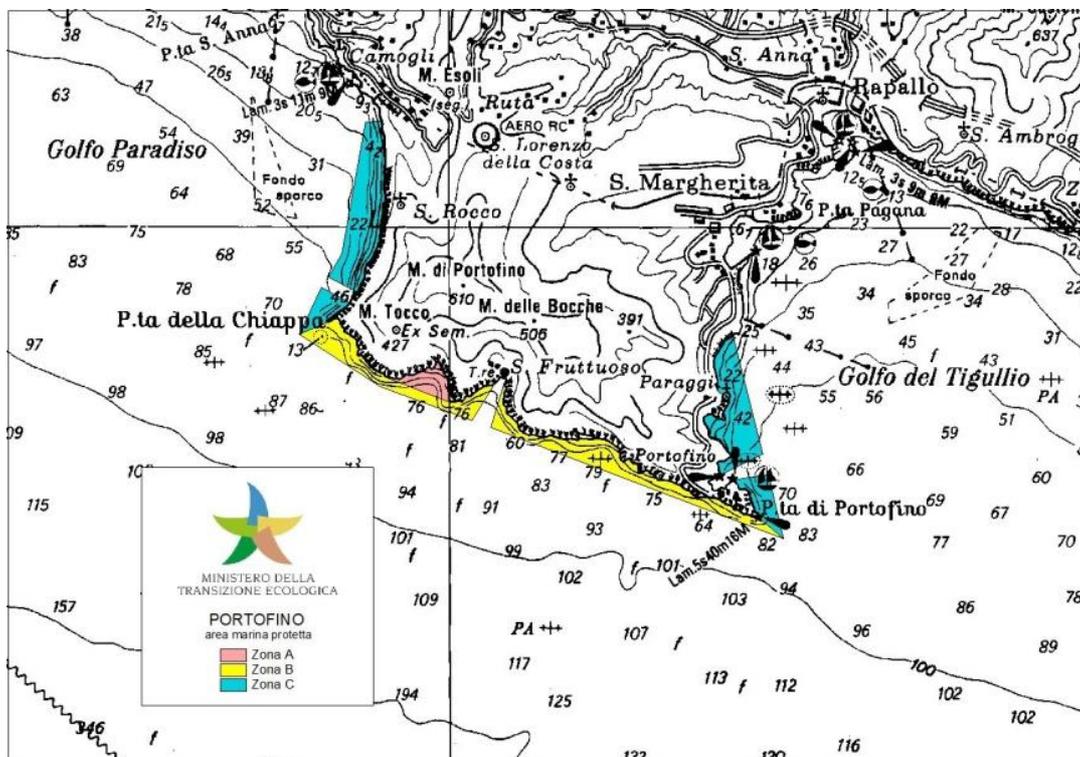


Figura 4. Carta dell'AMP Portofino dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Cinque Terre

L'AMP Cinque Terre (Fig. 5), gestita dall'Ente parco nazionale delle Cinque Terre, è stata istituita con il decreto del Ministero dell'Ambiente del 12 dicembre 1997 in riferimento alle due leggi nazionali: Disposizioni per la difesa del mare (n. 979 del 31 dicembre 1982) e Legge Quadro sulle Aree Protette (n. 394 del 6 dicembre 1991).

L'AMP delle Cinque Terre comprende i Comuni di Riomaggiore, Vernazza, Monterosso e per una piccola porzione Levanto, per un totale di 19 km costieri. L'area ricopre 4591 ha di mare, facenti parte di un unico golfo che si estende da Punta Mesco a est, a Punta Pineda a ovest, poco oltre Capo Montenero (www.parconazionale5terre.it).

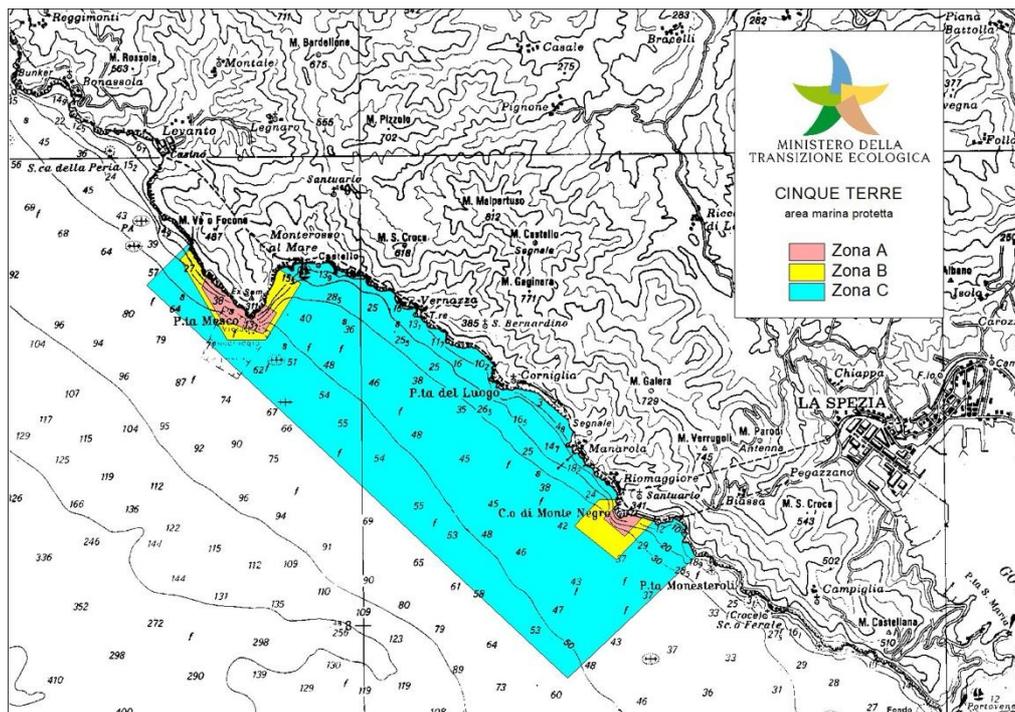


Figura 5. Carta dell'AMP Cinque Terre dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

Isola d'Elba

L'isola d'Elba fa parte del Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano, istituito con il decreto del Presidente della Repubblica il 22 luglio 1996. Il parco comprende tutte le sette isole principali dell'Arcipelago Toscano (Elba, Capraia, Gorgona, Pianosa, Montecristo, Giglio e Giannutri) e alcune isole minori per un totale di 56.766 ettari di mare e 17.887 ettari di terra. L'isola d'Elba, tuttavia, è sottoposta a regime di tutela solo per una parte del suo territorio terrestre e le acque costiere non rientrano nel perimetro del Parco Nazionale.

Da un punto di vista geomorfologico l'Isola d'Elba è l'affioramento più occidentale della catena nord-appenninica ed è nota per i suoi giacimenti minerali a ferro. A ovest è costituita da plutone granodioritico, mentre a est è costituita da una sequenza di unità tettoniche con successioni sedimentarie di tipo Ligure e Toscano, oltre che da monzoniti.

AMP Isole Tremiti

L'AMP Isole Tremiti (Fig. 6) è stata istituita nel 1989, con D.I. del 14.07.1989 inizialmente come "Riserva Naturale marina Isole Tremiti". La gestione della Riserva, con l'istituzione del Parco Nazionale del Gargano avvenuta nel 1991, è passata all'Ente Parco Nazionale del Gargano. Con Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica viene

istituita la “Commissione di Riserva dell’Area Marina protetta Isole Tremiti”. La Commissione ha durata di quattro anni. La Commissione istituita con Decreto del Ministro dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare n. 178 del 11/05/2018 è scaduta nel 2022. Resta in carica il Prof. Angelo Tursi (Rappresentante designato dal Ministro dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare con Decreto n. 31 del 25/01/2021) con funzioni di Presidente (www.parcogargano.it).

L’AMP Isole Tremiti ha un’estensione di 1466 ha, ed è localizzato a circa 12 miglia a Nord del promontorio del Gargano. L’arcipelago è costituito da tre isole maggiori: S. Domino, S. Nicola e Caprara, da un isolotto posto fra le tre isole denominato il Cretaccio ed infine da un’isola minore, localizzata a distanza di circa 12 miglia in direzione NE dalle prime tre e ad oltre 30 miglia dalla costa garganica, denominata Pianosa (www.parcogargano.it).

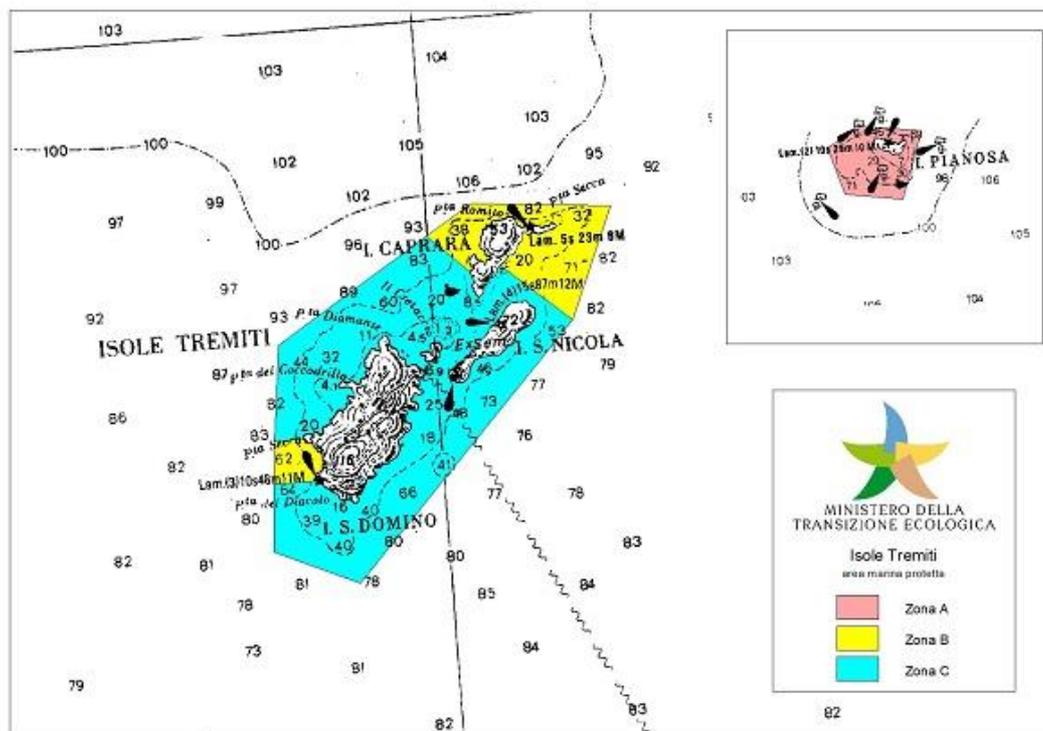


Figura 6. Carta dell’AMP Isole Tremiti dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Isola dell’Asinara

L’AMP Isola dell’Asinara (Fig. 7) è stata istituita dal Ministero dell’Ambiente con Decreto Ministeriale 13 agosto 2002 (GU n. 298 del 20 dicembre 2002). L’AMP si trova di fronte alla Punta di Capo Falcone, a nord-ovest della Sardegna tra Punta Salippa e Punta Scorno, e ha un’estensione totale di 10.732 ettari che coinvolgono 108 km di costa. L’AMP fa parte del territorio del Comune di Porto Torres ma comprende anche i comuni di Stintino, Sassari e Sorso.

Dal punto di vista geomorfologico, il versante occidentale è caratterizzato da ripidi pendii che continuano nella parte sommersa fino a 50 m. La morfologia del fondo marino è costituita da falesie ricche di anfratti, canali e spaccature. Il versante orientale, invece, è caratterizzato da coste basse. Il fondo qui è costituito prevalentemente da un basamento formato da scisti e attraversati da filoni, vene di quarzo e da substrati incoerenti formati da sabbie grossolane di detrito organogeno, da cui emergono frequentemente grossi affioramenti rocciosi (www.parcoasinara.org).

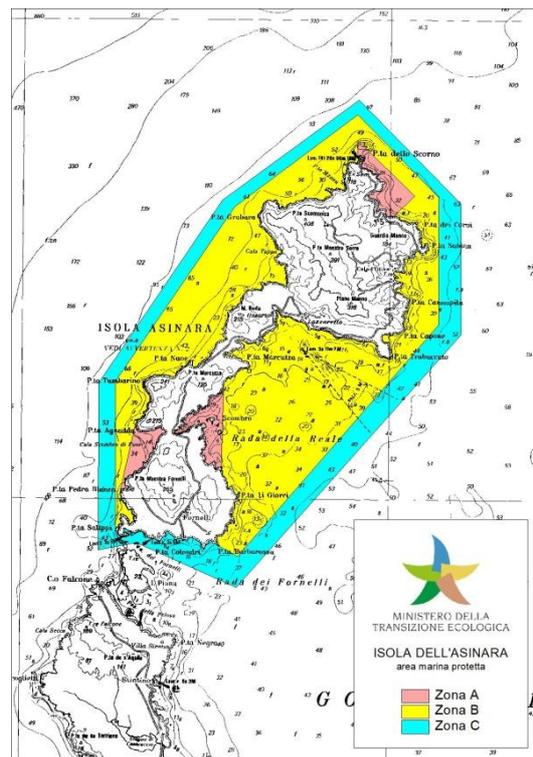


Figura 7. Carta dell'AMP Isola dell'Asinara dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

L'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (Fig. 8) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente nel 1997 con Decreto Ministeriale del 12 Dicembre, in seguito modificato con Decreto Ministeriale del 28 Novembre 2001. L'AMP si estende lungo la costa nord-orientale della Sardegna, da Capo Ceraso fino a Cala Finocchio, e comprende le isole di Tavolara, Molara e Molarotto per un'estensione totale di circa 15.000 ettari di mare. La gestione è affidata dal 01.01.2004 ad un Consorzio costituito fra i Comuni di Olbia, Loiri Porto San Paolo e San Teodoro (www.amptavolara.com).

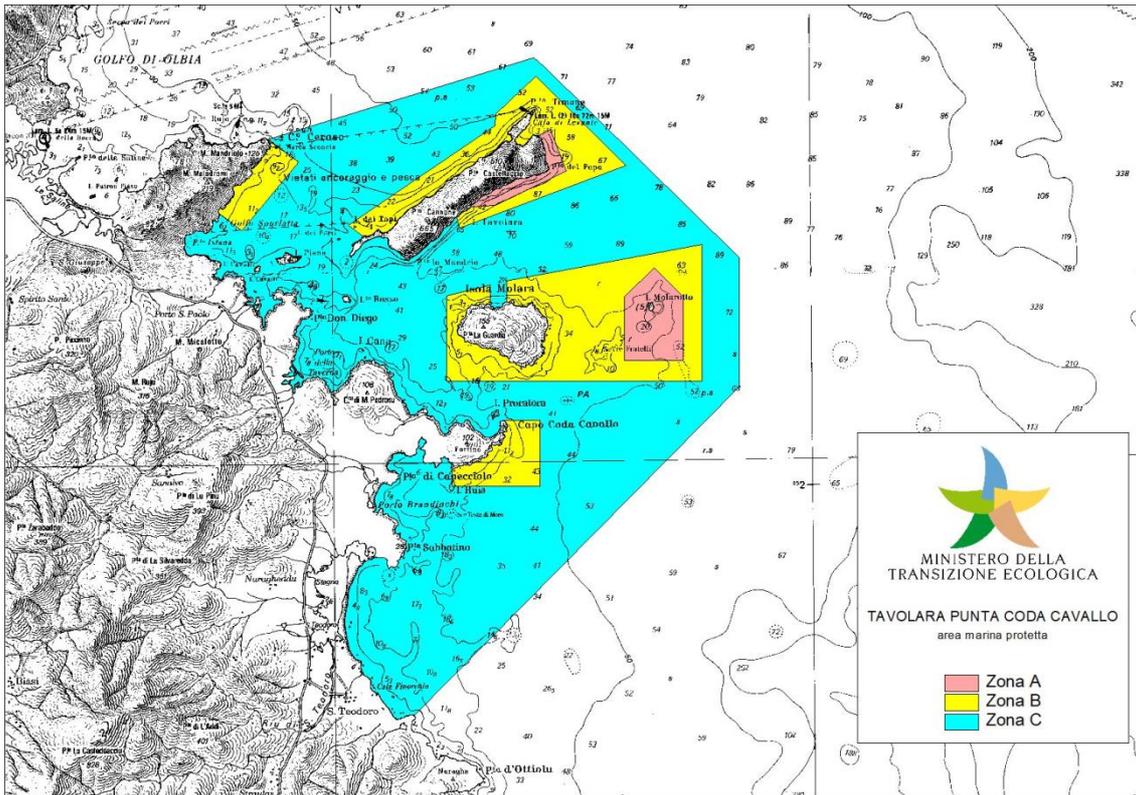


Figura 8. Carta dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

L'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (Fig. 9) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente nel 1999 con il Decreto Ministeriale del 12 dicembre 1997 (G.U. n. 190 del 14.08.1999). L'AMP ricade nel territorio della provincia di Latina in Lazio, e comprende le Isole di Ventotene e Santo Stefano per un'estensione totale di 2.799 ettari.

A differenza delle altre isole facenti parte dell'Arcipelago delle Pontine, le isole di Ventotene e Santo Stefano sono geologicamente più recenti e formate da differenti tipi di rocce dovute a un tipo di magmatismo più basico. L'Isola di Ventotene, in particolare, è caratterizzata da falesie verticali, promontori, e lingue di basalto nero originati dall'erosione marina dei depositi vulcanici (www.riservaventotene.it).

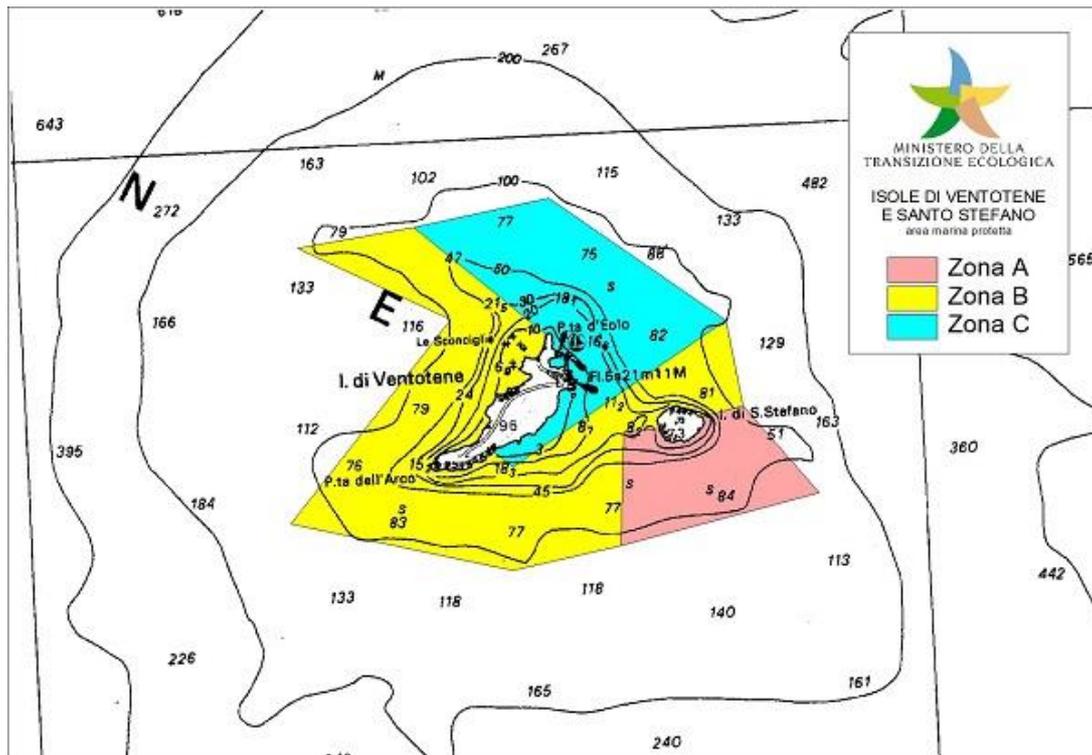


Figura 9. Carta dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Torre Guaceto

L'AMP di Torre Guaceto (Fig. 10) è stata istituita con Decreto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del 04 febbraio 2000 (G.U. n. 124 del 30/05/2000) con l'obiettivo di gestire sia un'area terrestre sia marina. Ad oggi è gestita dal consorzio comprendente i comuni di Brindisi e Carovigno e l'Associazione Italiana per il WWF for Nature Onlus. L'AMP si estende per circa 2.200 ettari fino alla linea batimetrica dei 50 m, interessando un tratto di costa di 8 Km, compreso tra Punta Penna Grossa e gli scogli di Apani (www.riservaditorreguaceto.it).

Dal punto di vista geomorfologico l'area di Torre Guaceto ha formazione calcarea e calcareo dolomitica di età cretacea. A causa dell'alternanza di fondali sabbiosi e rocciosi l'AMP comprende diversi habitat tra i quali l'habitat degli ambienti di marea, delle scogliere marittime, delle spiagge ghiaiose e delle acque stagnanti.

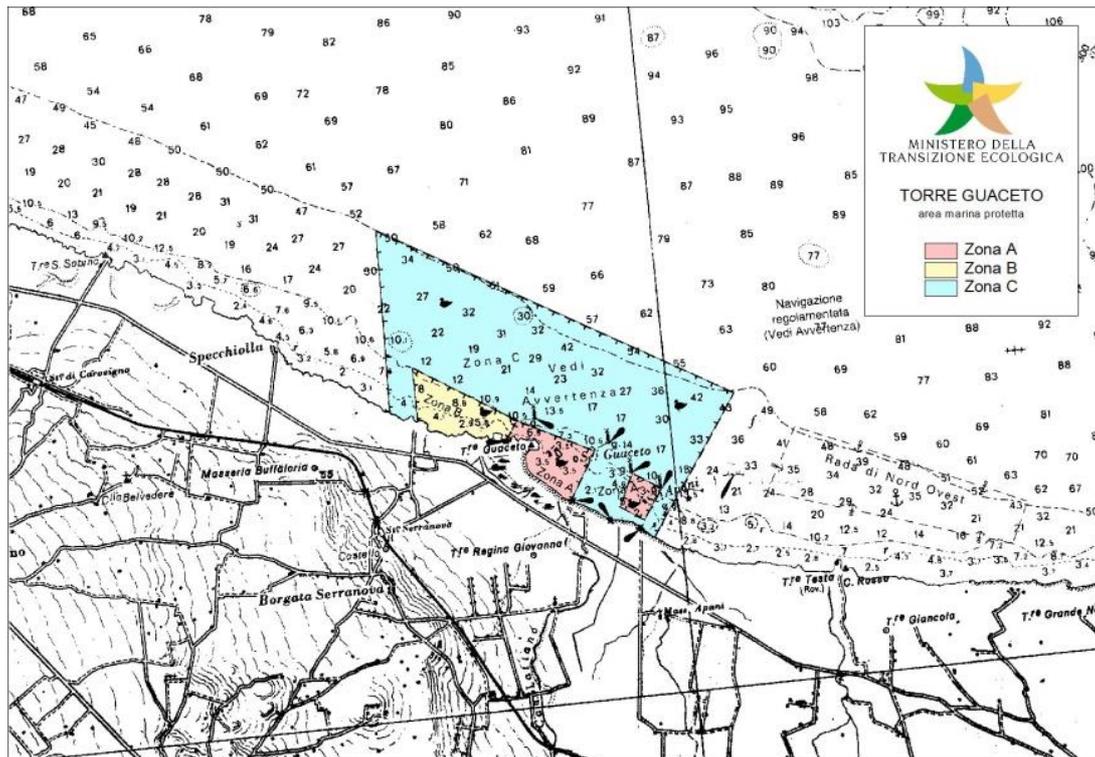


Figura 10. Carta dell'AMP Torre Guaceto dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Capo Carbonara

L'AMP Capo Carbonara (Fig. 11) è stata istituita dal Ministero dell'Ambiente con Decreto Ministeriale del 15 settembre 1998, poi modificato nel 1999 e sostituito integralmente dal Decreto Ministeriale del 7 febbraio 2012 (Gazzetta Ufficiale n. 113 del 16 maggio 2012). L'AMP è situata a sud-est della Sardegna ed è delimitata a ovest da Capo Boi e a est da Punta Porceddus, nella zona di mare antistante l'Isola di Serpentara. L'area ricopre 14.360 ettari, suddivisi in due ampie baie dal promontorio granitico di Capo Carbonara. L'AMP comprende inoltre l'Isola dei Cavoli e l'Isola di Serpentara e ha un'estensione costiera di 42 km, di cui 7 km di costa sabbiosa, 25 km di costa rocciosa 'continentale' e 10 km di costa rocciosa 'insulare' (Isola dei Cavoli, Isola di Serpentara e numerosi scogli minori) (www.ampcapocarbonara.it).

Da un punto di vista geomorfologico la linea di costa è caratterizzata da promontori, costituiti per lo più da graniti e granodioriti. Il paesaggio sommerso dell'Area Marina Protetta Capo Carbonara è caratterizzato da rocce granitiche, che formano pinnacoli e bastioni, e da rocce magmatiche alternate a sistemi sabbiosi.

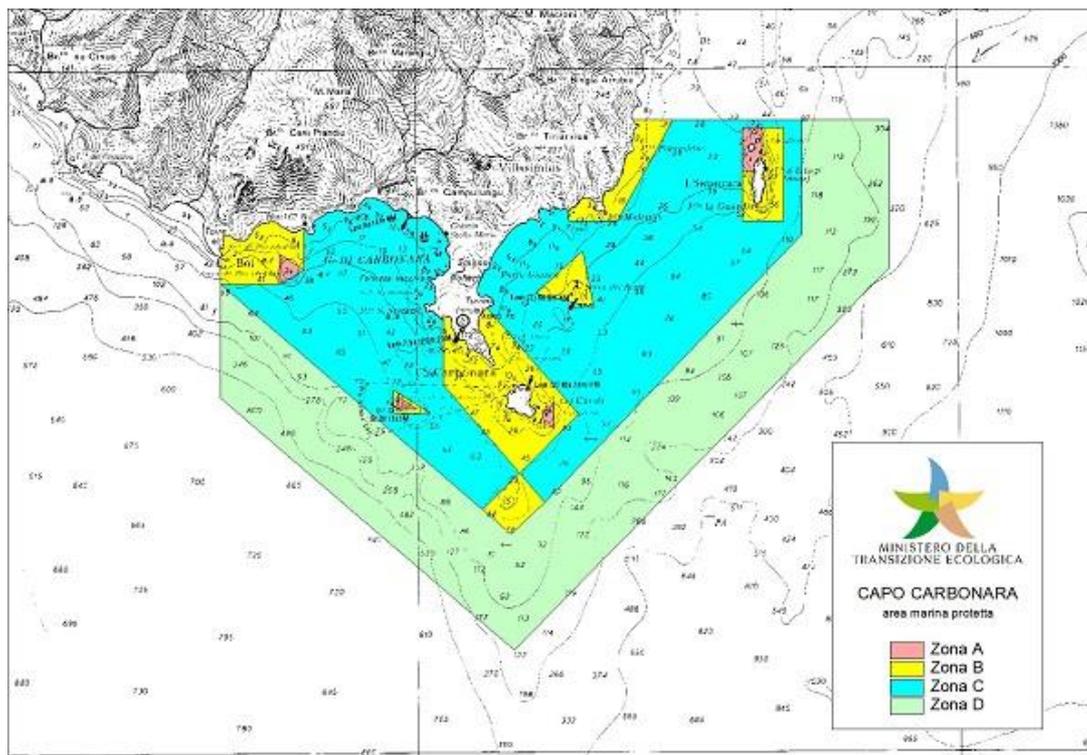


Figura 11. Carta dell'AMP Capo Carbonara dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Capo Milazzo

L'AMP Capo Milazzo (Fig. 12), gestita dal Consorzio di Gestione dell'Area Marina Protetta Capo Milazzo composto dal Comune di Milazzo, dall'Università degli Studi di Messina e dall'Associazione Ambientalista Marevivo onlus, è stata istituita con il Decreto 17 maggio 2018 (GU n.55 del 6 marzo 2019). Ha un'estensione di 755 ettari che interessano 5.670 m di costa.

Da un punto di vista geologico il promontorio dell'AMP Capo Milazzo presenta insenature, cale e grotte che si susseguono tra ricchi giacimenti fossiliferi. I fondali sono caratterizzati dalla presenza di foreste animali formate da gorgonie bianche, gialle e rosse, e dalle praterie di *Posidonia oceanica* (www.ampcapomilazzo.it).

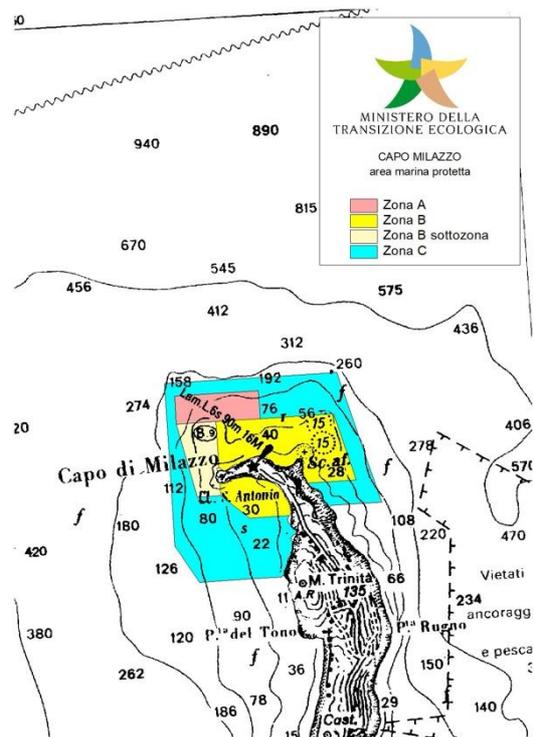


Figura 12. Carta dell'AMP Capo Milazzo dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Plemmirio

L'AMP Plemmirio (Fig. 13), gestita dal Consorzio Plemmirio, è stata istituita con il decreto del Ministero dell'Ambiente del 15 settembre 2004. L'area marina, situata 12 km a sud dalla città di Siracusa, si sviluppa per circa 14 km lungo tutto il tratto di costa della Penisola della Maddalena, per un totale di 2.429 ettari di mare (www.plemmirio.eu).

Dal punto di vista geomorfologico la Penisola della Maddalena è costituita da una piattaforma prevalentemente calcarenitica. Quest'area, scolpita nei secoli dall'erosione marina, presenta una morfologia piuttosto varia. L'AMP Plemmirio è, infatti, caratterizzata da alte falesie, linee di spiaggia, spianate d'abrasione, grotte, insenature frastagliate, archi sottomarini, crepe e anfratti che contribuiscono a rendere i paesaggi aerei e subacquei ricchi e diversificati, offrendo così una notevole varietà di habitat per gli organismi. I fondali dell'area sono costituiti prevalentemente da fondi duri rocciosi (Pasolli 2011).

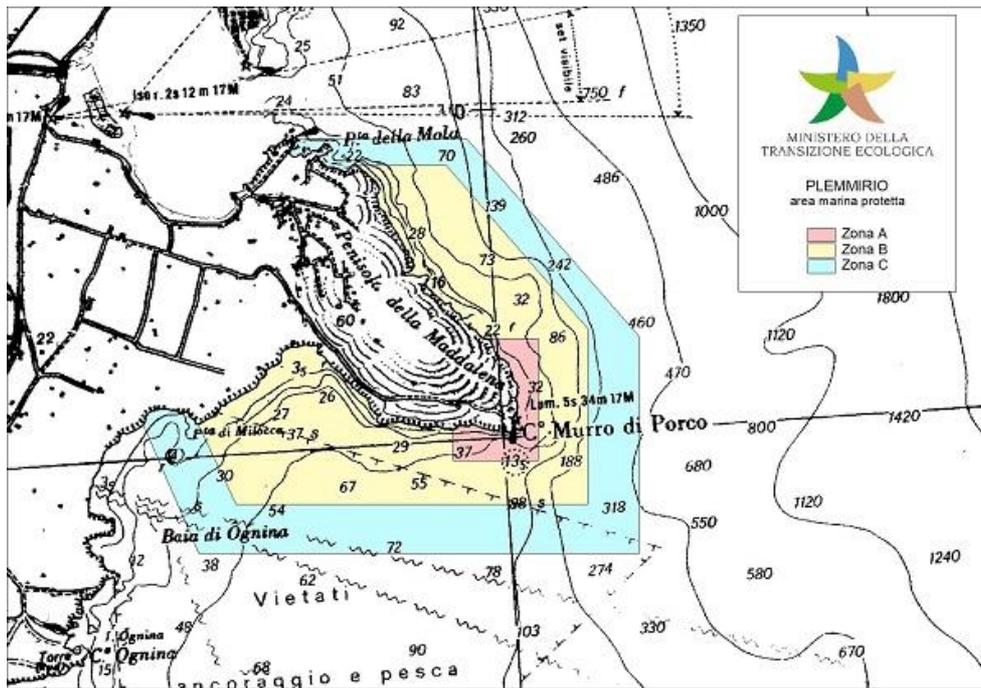


Figura 13. Carta dell'AMP Plemmirio dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

ATTIVITÀ DI CAMPO

MONITORAGGIO DELLA TEMPERATURA NELLA COLONNA D'ACQUA

Nell'ambito del progetto Mare Caldo le temperature della colonna d'acqua sono state registrate *in situ* da stazioni composte di sensori (*temperature data logger*) installati a diverse profondità e settati per registrare le temperature in continuo a intervalli di tempo regolari.

Il protocollo per il monitoraggio della temperatura è stato sviluppato sul modello di quello utilizzato dalla rete mediterranea T-MEDNet in modo da poter inserire i dati delle stazioni italiane in un più ampio network di monitoraggio mediterraneo e favorire la comparazione dell'evoluzione delle temperature nelle diverse aree del bacino.

Temperature data logger

I *temperature data logger* utilizzati nell'ambito del progetto Mare Caldo sono gli HOBO MX TidbiT 400 (Fig. 13), in grado di registrare in continuo a intervalli di un'ora e archiviare i dati con una capacità di memoria tale per cui possano essere scaricati ogni sei mesi. Il modello è stato inoltre scelto perché dotato di tecnologia Bluetooth, che facilita il *download*

immediato dei dati, attraverso l'uso di dispositivi mobili con apposita applicazione, non appena i sensori vengono recuperati in mare.

Per ogni area di studio dove è stato necessario acquistare i *temperature data logger* (i.e., tutte le aree a esclusione dell'AMP Miramare e dell'AMP Portofino che ne erano già dotate) si è scelto di acquistarne 12: 8 sensori previsti per la stazione di monitoraggio, 2 sensori di *backup* in acqua e 2 di *backup* in caso di perdita e/o malfunzionamento dei sensori in acqua.

Per tutti i *temperature data logger* acquistati nell'ambito del progetto Mare Caldo, il settaggio è stato curato dal partner tecnico ElbaTech SRL che ha effettuato per ognuno il test iniziale di funzionamento e quello di accuratezza (al fine di calcolarne l'offset).

Stazioni per la registrazione delle temperature in mare

Al fine di monitorare le variazioni stagionali delle temperature e i fenomeni di stratificazione dell'acqua, ogni stazione del progetto Mare Caldo si compone di 8 *temperature data logger* posizionati su pareti rocciose ogni 5 m di profondità, dai 40 m fino alla superficie (i.e., 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 e 40 m).

Oltre ai *temperature data logger* previsti per la stazione di monitoraggio a 5 m e a 10 m, sono stati posti anche 2 sensori di *backup* alle medesime profondità, al fine di garantire comunque la raccolta dei dati anche in caso di perdita del sensore, essendo queste due profondità quelle più esposte al moto ondoso.

AMP Miramare e AMP Portofino

L'AMP Portofino, facendo già parte della rete mediterranea T-MEDNet dal 2015 ed essendo partner del progetto Interreg MPA-ADAPT, disponeva già di *temperature data logger* posizionati nel sito di Cala dell'Oro, zona di riserva integrale dell'Area Marina Protetta. Similmente, l'AMP Miramare disponeva già dei sensori posizionati all'interno dell'AMP alle profondità di 1, 10, 11, e 17 m. Il modello utilizzato da entrambe queste AMP è HOBO Water Temp Pro v2, leggermente differente rispetto a quello scelto per le altre aree di studio del progetto Mare Caldo (Fig. 14). Tuttavia, dal confronto dei rispettivi *data sheets* effettuato dal partner tecnico ElbaTech SRL è emerso che i dati raccolti dalle due tipologie di sensori sono del tutto comparabili poiché differiscono per caratteristiche ininfluenti alla misurazione della temperatura (Tab. 1).



Figura 14. I due modelli di *temperature data logger* utilizzati nell'ambito del progetto Mare Caldo. A sinistra il modello HOBO Water Temp Pro v2, adottato dall'AMP Miramare e dall'AMP Portofino; a destra il modello HOBO MX Tidbit 400 acquistato per l'Isola d'Elba e le altre aree marine protette del progetto.

Tabella 1. Caratteristiche rilevanti per il confronto dei due modelli di *temperature data logger*.

Area	AMP Miramare, AMP Portofino	Progetto Mare Caldo
Modello	HOBO Water Temp Pro v2	HOBO TidBit 400
Accuratezza	+/- 0.21°C da 0° a 50°C	+/- 0.2°C da 0° a 70°C
Risoluzione	0.02°C a 25°C	0.01°C
Memoria	42000 measurements	96000 measurements
Interfaccia	USB	Bluetooth

Installazione dei *temperature data logger*

L'installazione dei *temperature data logger* prevede l'utilizzo di chiodi da roccia *narrow angle*, che sono fissati meccanicamente o con ancorante chimico bicomponente mediante pistola per silicone, sulla base della litologia presente nell'area di interesse. Sui chiodi vengono installati i supporti per le sonde fissate tramite fascette di plastica (che rendono semplice la periodica rimozione dei sensori).

MONITORAGGIO DEGLI ECOSISTEMI DI SCOGLIERA

Oltre alle analisi relative ai dati di temperatura, nell'ambito del quinto anno di progetto Mare Caldo sono stati condotti i monitoraggi biologici per la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi di scogliera nell'AMP Portofino, nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, e nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano.

Tempistiche

I monitoraggi sono stati condotti tra giugno e settembre 2024. In particolare, nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano tra il 4 e l'8 giugno, nell'AMP Portofino tra il 25 e il 29 giugno, nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo tra il 10 e il 13 settembre.

Inoltre, tra il 25 e il 29 giugno sono stati effettuati rilevamenti subacquei all'Isola Gallinara (nei siti Erxi, Falconara, Nave e Sciusciau) al fine di fare un primo confronto qualitativo per valutare le differenze tra un'area marina protetta (AMP Portofino) e un'area non soggetta a protezione.

Selezione delle stazioni di monitoraggio per ogni area di studio

Per ogni area di studio sono state individuate stazioni di monitoraggio biologico in corrispondenza di scogliere rocciose dove, indipendentemente dalla morfologia del fondale, fosse raggiunta (quando possibile) una profondità di circa 40 m. In particolare:

1. Nell'AMP Portofino i monitoraggi sono stati condotti in due stazioni (Fig. 15): I) Isuela e II) Torretta.
2. Nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo i monitoraggi sono stati condotti in quattro stazioni (Fig. 16): I) Secca del Papa 2; II) Punta Arresto; III) Punta del Papa; e IV) Teddja Liscia.
3. Nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano i monitoraggi sono stati condotti in quattro stazioni (Fig. 17): I) Punta Cannucce; II) Molara; III) Punta dell'Arco; e IV) Secchitella.

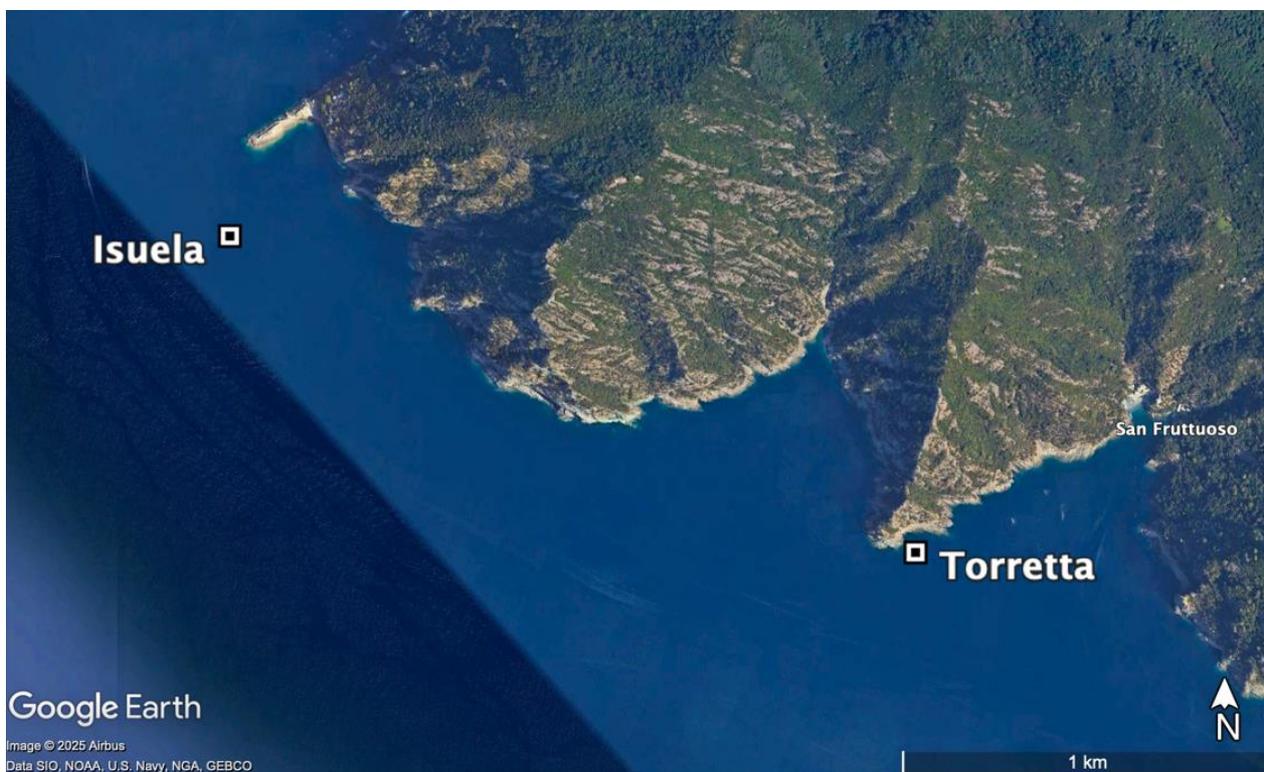


Figura 15. Posizione geografica delle due stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'AMP Portofino.



Figura 16. Posizione geografica delle quattro stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo.



Figura 17. Posizione geografica delle quattro stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano.

Metodi di rilevamento

In ogni stazione di monitoraggio, i dati sono stati raccolti tramite rilevamenti visivi in immersione subacquea con autorespiratore ad aria (ARA) da parte di operatori scientifici subacquei qualificati del DiSTAV (Università di Genova), utilizzando come normativa di riferimento per l'immersione scientifica il codice di pratica dell'Unesco (*Scientific Diving: a general code of practice*, edizione del 1996 e aggiornamenti successivi) e adottando gli standard previsti dalla Comunità Europea (ESD, *European Scientific Diver*, e AESD, *Advanced European Scientific Diver*, MAST CT 96-6351, Maggio 1997) (<http://www.aioss.info/>).

Gli operatori scientifici subacquei partecipanti alle attività di campo sono stati:

Prof.ssa Monica Montefalcone

Brevetto SDI-TDI Instructor e Advanced European Scientific Diver

Docente DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Dr. Annalisa Azzola

Brevetto FIPSAS Instructor e European Scientific Diver

Assegnista di ricerca DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Dott. Pietro Cimmino

Brevetto SSI Instructor

Assegnista di ricerca DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Gli operatori scientifici subacquei del DiSTAV sono sempre stati accompagnati in immersione dal personale delle aree marine o dei *diving center* locali, assieme al personale di Greenpeace. Il personale presente sulla barca d'appoggio ha anche curato gli aspetti legati alla sicurezza in mare. La profondità è stata misurata con un computer da immersione, la cui precisione è di circa 30 cm. Di seguito sono riportate le tre attività condotte in immersione.

1. Transetti bionomici verticali

Nell'ambito dei monitoraggi sono stati realizzati transetti bionomici al fine di caratterizzare le comunità bentoniche e per valutarne lo stato ecologico. Per ogni stazione è stato quindi percorso un tragitto definito lungo il gradiente di profondità (i.e., a partire da 40 m circa

fino alla superficie), mantenendo una fascia di osservazione d'ampiezza fissa (Gatti et al. 2017). Lungo ogni transetto sono state annotate le specie cospicue presenti identificate mediante criterio fisionomico, che presentassero dimensioni tali da permetterne il riconoscimento e l'identificazione sott'acqua. Per tutte le specie rilevate è stata inoltre stimata l'abbondanza tramite stime semi-quantitative basate su 3 classi: 1 = poco abbondante; 2 = mediamente abbondante; 3 = molto abbondante.

2. Monitoraggio delle specie termofile

Lungo i transetti sono stati inoltre registrati i dati di presenza e abbondanza (tramite stime semi-quantitative basate sempre sulle tre classi di abbondanza 1, 2, 3) di alcune specie indicatrici del cambiamento climatico (i.e., specie termofile), facendo riferimento agli esempi elencati in Tabella 2 della relazione del primo anno (Montefalcone & Azzola 2020). Le specie termofile sono distinte in specie aliene, specie criptogeniche (quelle specie per le quali non è possibile definirne con certezza l'origine aliena o nativa, a causa di scarse conoscenze tassonomiche), e specie native. La lista delle specie termofile è stata aggiornata e adattata in funzione delle diverse realtà locali e non è esaustiva di tutte le specie termofile segnalate in Mediterraneo, ma rappresenta un elenco delle specie termofile bentoniche più frequentemente osservate in corrispondenza della fascia infralitorale e circalitorale delle scogliere rocciose nei mari italiani.

3. Monitoraggio degli eventi di mortalità di massa

Seguendo il protocollo utilizzato dalla rete di monitoraggio T-MEDNet, sono stati raccolti dati sugli eventi di moria e sbiancamento di alcune specie target (e.g., *Cladocora caespitosa*, *Eunicella cavolini*, *Eunicella singularis*, *Paramuricea clavata*, *Pinna nobilis*, spugne massive e incrostanti, briozoi massivi, alghe corallinacee) che sono state individuate di volta in volta in relazione alle diverse aree di studio. In particolare, è stato registrato il numero di individui (o colonie) presenti di ciascuna specie target a una data profondità, o la percentuale di ricoprimento del fondo da parte delle alghe corallinacee. È stato poi registrato il numero di individui (o colonie, o % di ricoprimento per le alghe) che mostrassero segni di impatto e necrosi (e.g., segni di sbiancamento per gli organismi calcarei, parziale o totale mortalità della colonia, presenza di epibiosi). Secondo il protocollo T-MEDNet gli organismi sono da considerarsi impattati quando presentano segni di necrosi (o sbiancamento) per oltre il 10% della superficie dell'individuo o della colonia.

ANALISI DEI DATI

DATI DI TEMPERATURA SUPERFICIALE DELL'ACQUA (SST)

Le analisi sulle *Marine Heat Waves* (MHWs), ossia aumenti estremi della temperatura degli oceani per un periodo di tempo prolungato, sono state effettuate sul dataset di temperatura superficiale del mare ottenuta dal servizio Copernicus Marine Services (ESA Sea Surface Temperature Climate Change Initiative). Il prodotto è stato utilizzato per ottenere la climatologia relativa al periodo 1981-2016. I giorni con MHWs sono stati individuati sulla base della temperatura superficiale del mare (SST) superiore alla soglia del 90° percentile climatologico per almeno cinque giorni consecutivi. L'intensità degli eventi è stata valutata secondo i criteri proposti da Hobday et al. (2016), calcolando per ciascun episodio l'intensità media e massima in termini di anomalia rispetto alla soglia.

DATI DI TEMPERATURA LUNGO LA COLONNA D'ACQUA

Per ogni area di studio i dati di temperatura registrati dai *temperature data logger* sono stati riportati in un foglio di calcolo Excel organizzati in una matrice profondità x tempo.

I dati di temperatura che presentavano lunghi intervalli di mancata acquisizione sono stati integrati utilizzando i campi prodotti dal modello numerico fornito da Copernicus Marine Services, in particolare il modello fisico ad alta risoluzione per il Mar Mediterraneo. Questo modello è stato scelto in quanto ha mostrato una buona rappresentatività rispetto alle osservazioni costiere disponibili. La procedura seguita è stata la seguente: è stato individuato il punto della griglia del modello più vicino alla stazione di misura, sia in termini di posizione geografica che di profondità. Per garantire la compatibilità temporale, i dati in situ sono stati mediati su base giornaliera, in modo da uniformarli alla risoluzione temporale del modello. Per assicurare l'affidabilità del confronto, i dati in situ ritenuti errati o anomali sono stati esclusi tramite una procedura statistica, che ha tenuto conto della variabilità attesa del segnale termico e dei limiti plausibili di variazione giornaliera della temperatura. Il confronto tra le due serie, effettuato nei periodi in cui erano entrambe disponibili, ha evidenziato un'elevata coerenza sia in termini di valori assoluti sia di andamento temporale, anche alle diverse profondità. Sulla base di questi risultati, i dati del modello numerico sono stati utilizzati per colmare le lacune presenti nei periodi privi di registrazioni dirette, ricostruendo così una serie temporale continua e coerente.

I dati scaricati dai *temperature data logger* sono stati inoltre rappresentati graficamente (tramite diagramma di Hovmöller) utilizzando il software Ocean Data View (ODV), che consente l'analisi e la visualizzazione di dati oceanografici tramite una scala graduata di colore per mezzo della quale viene evidenziato l'andamento delle temperature nel tempo, in relazione alle diverse profondità.

Per ogni area di studio sono di seguito riportati i periodi di monitoraggio a partire dalla data di installazione dei *temperature data logger* fino alla data dell'ultimo download dei dati:

- AMP Miramare: 14.01.2021 - 15.01.2025
- AMP Portofino: 17.09.2019 - 06.11.2024
- AMP Cinque Terre: 29.08.2022 - 11.11.2024
- Isola d'Elba: 26.11.2019 - 14.10.2024
- AMP Isole Tremiti: 2.05.2022 - 07.06.2024
- AMP Isola dell'Asinara: 30.06.2021 - 05.11.2024
- AMP Tavolara Punta Coda Cavallo: 21.06.2022 - 22.08.2024
- AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano: 29.04.2021 - 25.10.2024
- AMP Torre Guaceto: 30.03.2021 - 04.11.2022
- AMP Capo Carbonara: 8.09.2020 - 11.11.2024
- AMP Capo Milazzo: 22.07.2023 - 04.11.2024
- AMP Plemmirio: 23.07.2020 - 17.03.2025

STRUTTURA E STATO ECOLOGICO DELLE COMUNITÀ

Al fine di caratterizzare la composizione e la struttura delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio previste dal progetto Mare Caldo, le specie e le relative abbondanze rilevate tramite i transetti bionomici sono state organizzate in matrici (sito x profondità) x specie su fogli di calcolo Excel. Sul numero totale di specie rilevate è stata calcolata la percentuale delle specie per ogni taxon.

Le matrici di dati sono state inoltre importate nel software *open-source* PaSt (Hammer et al. 2001) per le analisi sulla struttura delle comunità. In particolare, si è scelto di utilizzare due indici di diversità: i) l'indice di Shannon, per misurare la diversità delle specie nella comunità e il suo stato ecologico; e ii) l'indice di Simpson, per misurare la dominanza tra le specie. Lo stato ecologico delle comunità di scogliera rocciosa delle aree di studio è stato definito tramite i valori ottenuti dall'applicazione dell'indice di Shannon secondo la classificazione riportata in Tabella 2.

Tabella 2. Classi di stato ecologico associate ai valori dell'indice di Shannon (H') (Zettler et al. 2007).

$H' > 4$	Elevato
$3 < H' \leq 4$	Buono
$2 < H' \leq 3$	Moderato
$1 < H' \leq 2$	Scarso
$H' \leq 1$	Cattivo

Lo stato ecologico delle aree di studio indagate nell'ambito del quinto anno di progetto è stato confrontato con lo stato ecologico delle nove aree di studio indagate nei primi quattro anni di progetto.

CAMBIAMENTO NEL TEMPO

Grazie alla disponibilità di una serie storica di dati a partire dagli anni '50, per l'AMP Portofino è stato possibile valutare il cambiamento nel tempo della struttura e della composizione delle comunità bentoniche di scogliera.

Quest'analisi era stata già condotta da Gatti et al. (2017) nell'ambito di uno studio nel quale erano stati identificati tre periodi temporali: il periodo "a", dalla fine degli anni '50 agli anni '70; il periodo "b", che comprende gli anni '80 e '90; e il periodo "c", dal 2000 al 2013. Per rispettare la logica della serie storica, i dati erano stati raggruppati per quattro profondità: 10 m, 20 m, 30 m, 40 m. Sulla base di questo disegno era stata costruita una matrice di dati (profondità \times tempo) \times specie (Gatti et al. 2017), la cui analisi aveva mostrato un drastico cambiamento tra il periodo a e il periodo b.

Nell'ambito del progetto Mare Caldo erano stati poi aggiunti alla matrice storica i dati registrati a luglio 2020 (periodo denominato "d") lungo i transetti bionomici (Montefalcone & Azzola 2020). In questo modo era stato possibile confermare il cambiamento di fase (*phase shift*) nella comunità bentonica di Portofino tra gli anni '50-'70 e gli anni '80-'90, già osservato da Gatti et al. (2017).

Allo stesso modo, i dati raccolti nell'ambito dei monitoraggi condotti nel 2024 a Portofino sono stati inseriti nella matrice storica di dati, al fine di valutare se e come sia cambiata la comunità bentonica in quest'ultimo periodo temporale. Con questo obiettivo, è stata eseguita un'analisi multivariata delle corrispondenze (CA) tramite il software open-source PaSt.

MORTALITÀ

Per determinare l'impatto delle anomalie termiche sulle specie target previste dal protocollo della rete mediterranea T-MEDNet, il numero di organismi o di colonie (o la

percentuale di ricoprimento per le alghe corallinacee) che riportavano segni di necrosi, sbiancamento o sofferenza è stato rapportato al numero totale di individui monitorati. L'impatto è stato valutato 'basso' per una percentuale del 10-30%, 'moderato' per una percentuale del 30-60% e 'severo' nel caso in cui il rapporto tra individui impattati e totali fosse maggiore del 60%.

La percentuale di mortalità delle diverse specie target rilevata nelle aree di studio indagate nell'ambito del quinto anno di progetto è stata confrontata con la percentuale di mortalità rilevata nelle nove aree di studio indagate nei primi quattro anni di progetto.

SPECIE TERMOFILE

Per ogni area di studio è stato calcolato il numero di specie termofile presenti e su questo numero è stata calcolata la percentuale delle specie aliene, criptogeniche e native. Inoltre, il numero di specie termofile bentoniche è stato rapportato al numero totale delle specie rilevate in ciascuna area di studio, al fine di valutare il loro contributo relativo nelle comunità di scogliera.

Il numero di specie termofile rilevato nelle aree di studio indagate nell'ambito del quinto anno di progetto è stato confrontato con il numero di specie termofile rilevato nelle nove aree di studio indagate nei primi quattro anni di progetto.

RISULTATI

TEMPERATURA SUPERFICIALE DELL'ACQUA (SST)

AMP Miramare

Nel corso del 2024 si sono verificati nove episodi distinti di *Marine Heat Waves* (MHWs) nella AMP di Miramare (Fig. 18), distribuiti tra gennaio e novembre e caratterizzati da durata e intensità variabili. I primi due eventi si sono manifestati nel mese di gennaio, ciascuno della durata di sette giorni: il primo, dal 1 al 7 gennaio, ha mostrato un'intensità media di circa 0,57 °C e una massima pari a 0,78 °C, mentre il secondo, tra il 10 e il 16 gennaio, ha avuto un'intensità media leggermente inferiore (0,52 °C) ma ha raggiunto un picco massimo molto più elevato, pari a 1,25 °C. Dopo una pausa, il fenomeno è riapparso in modo significativo tra il 18 febbraio e il 1 aprile, dando luogo all'evento più prolungato dell'anno, con una durata di ben 43 giorni, un'intensità media prossima a 0,93 °C e una massima che ha sfiorato 1,67 °C. Subito dopo, nel mese di aprile, si sono verificati tre episodi in rapida successione: il primo dal 4 al 10 aprile con un'intensità media di 1,33 °C e una massima di 1,80 °C, il secondo tra il 12 e il 17 aprile con valori medi e massimi in ulteriore aumento (rispettivamente 1,83 °C e 2,63 °C), seguiti da un'intensificazione estiva rappresentata da un episodio di 13 giorni tra il 6 e il 18 luglio, in cui l'intensità media ha superato i 2,15 °C e la massima ha raggiunto 3,28 °C. Nel mese di agosto si è osservata una nuova sequenza di attività intensa: un evento di 25 giorni tra il 3 e il 27 agosto con un'intensità media pari a 1,13 °C e una massima di 2,36 °C, seguito a breve distanza da un ulteriore episodio, tra il 29 agosto e il 12 settembre, che ha mostrato una media superiore a 2,04 °C e un valore massimo di 3,25 °C, tra i più elevati dell'intero anno. L'ultimo episodio registrato si è verificato infine tra il 2 e il 14 novembre, con una durata di 13 giorni e un'intensità moderata, pari a 0,79 °C in media e 1,23 °C come valore massimo.

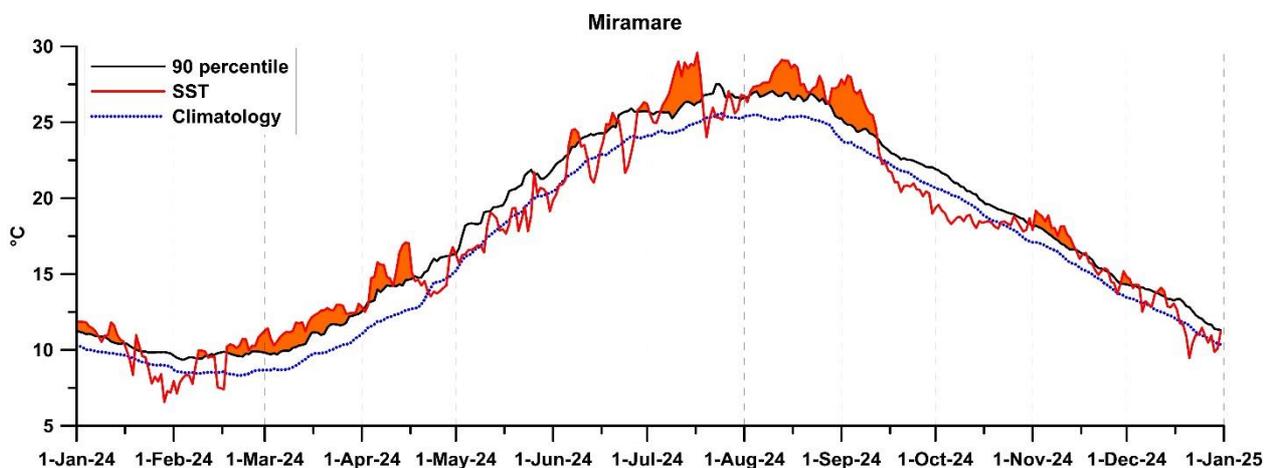


Figura 18. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Portofino

Nel 2024, a Portofino si sono osservati sei episodi di MHWs per durata e intensità, distribuiti tra febbraio e novembre (Fig. 19). Il primo evento si è verificato tra il 13 e il 18 febbraio, con una durata di sei giorni e valori di intensità piuttosto contenuti, con una media di circa $0,32^{\circ}\text{C}$ e un massimo appena inferiore a $0,80^{\circ}\text{C}$. Poche settimane dopo, tra il 5 e il 10 marzo, è stato registrato un nuovo episodio di pari durata ma con un'intensità leggermente più elevata (media di $0,47^{\circ}\text{C}$ e massimo di $0,61^{\circ}\text{C}$). Successivamente, tra il 16 e il 29 marzo, si è verificato un evento più duraturo e marcato, della durata di quattordici giorni, caratterizzato da un'intensità media pari a $0,63^{\circ}\text{C}$ e da un picco massimo che ha superato $1,19^{\circ}\text{C}$. Un deciso salto di intensità si è registrato a metà aprile, tra il 12 e il 16, con un episodio breve ma intenso: l'intensità media ha raggiunto $1,57^{\circ}\text{C}$ e quella massima ha superato $2,61^{\circ}\text{C}$. L'evento più rilevante dell'anno si è verificato in estate, tra il 22 luglio e il 14 settembre, durando ben 55 giorni, con un'intensità media di circa $1,59^{\circ}\text{C}$ e un picco massimo che ha toccato i $3,28^{\circ}\text{C}$, rappresentando il valore più alto osservato nell'intero periodo. Infine, nel mese di novembre, tra il 10 e il 16, si è manifestato l'ultimo episodio dell'anno, di sette giorni, con intensità moderata (media di $0,55^{\circ}\text{C}$ e massimo di $0,84^{\circ}\text{C}$).

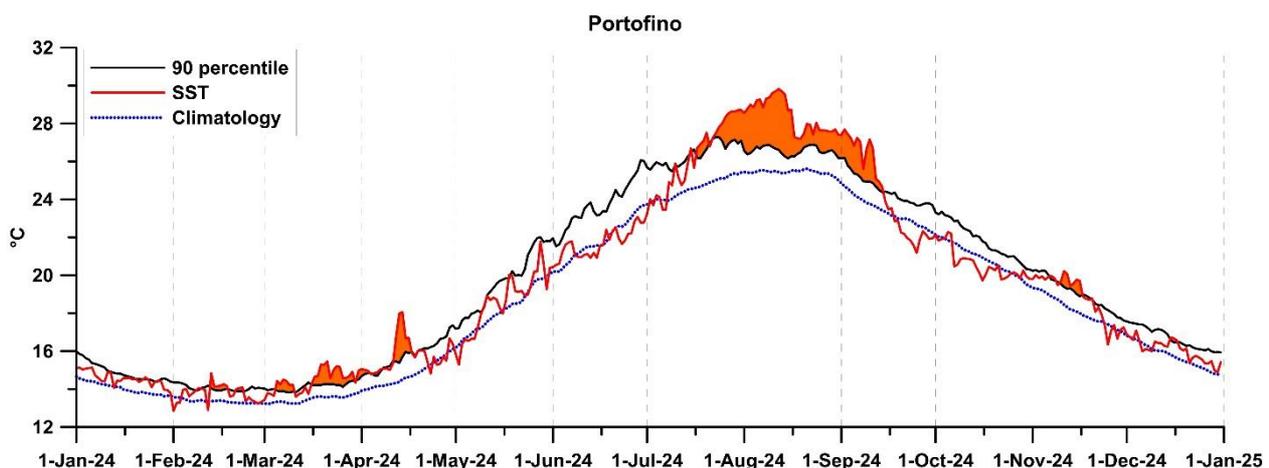


Figura 19. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Cinque Terre

Nel corso del 2024 sono stati rilevati sei episodi di MHWs nell'area delle Cinque Terre (Fig. 20). Il primo evento è stato osservato all'inizio di marzo, tra il 2 e il 10 del mese, con una durata di 9 giorni e un'anomalia media relativamente contenuta, pari a circa $0,32^{\circ}\text{C}$ sopra la soglia, mentre l'intensità massima ha raggiunto $0,77^{\circ}\text{C}$. A breve distanza, tra il 16 e il 25 marzo, si è verificato un secondo episodio più intenso e duraturo (10 giorni), con valori medi superiori a $0,64^{\circ}\text{C}$ e un picco di oltre 1°C . A fine mese, dal 31 marzo al 6 aprile, si è registrato un terzo episodio, più breve e meno marcato rispetto ai precedenti,

con intensità media di circa $0,24^{\circ}\text{C}$. Una fase particolarmente rilevante si è verificata a metà aprile, dal giorno 11 al 17, quando è stato registrato un evento di 7 giorni con un'intensità media elevata, pari a $1,34^{\circ}\text{C}$, e un'anomalia massima che ha superato i $2,42^{\circ}\text{C}$. Questo evento si distingue come il primo episodio veramente intenso dell'anno, sebbene di durata limitata. L'evento più lungo e intenso dell'intero periodo si è verificato durante l'estate, estendendosi dal 17 luglio all'11 settembre per un totale di 57 giorni consecutivi. In questo intervallo si sono osservate anomalie molto marcate: l'intensità media ha raggiunto i $1,42^{\circ}\text{C}$, mentre il valore massimo ha superato i $3,65^{\circ}\text{C}$, rendendo questo episodio uno dei più estremi in termini di intensità osservati nell'area. Un ultimo evento è stato identificato a metà novembre, tra l'11 e il 16 del mese, con una durata breve (6 giorni) e intensità più contenuta (media di $0,39^{\circ}\text{C}$, picco di $0,53^{\circ}\text{C}$), ma comunque indicativo di condizioni anomale anche nel tardo autunno.

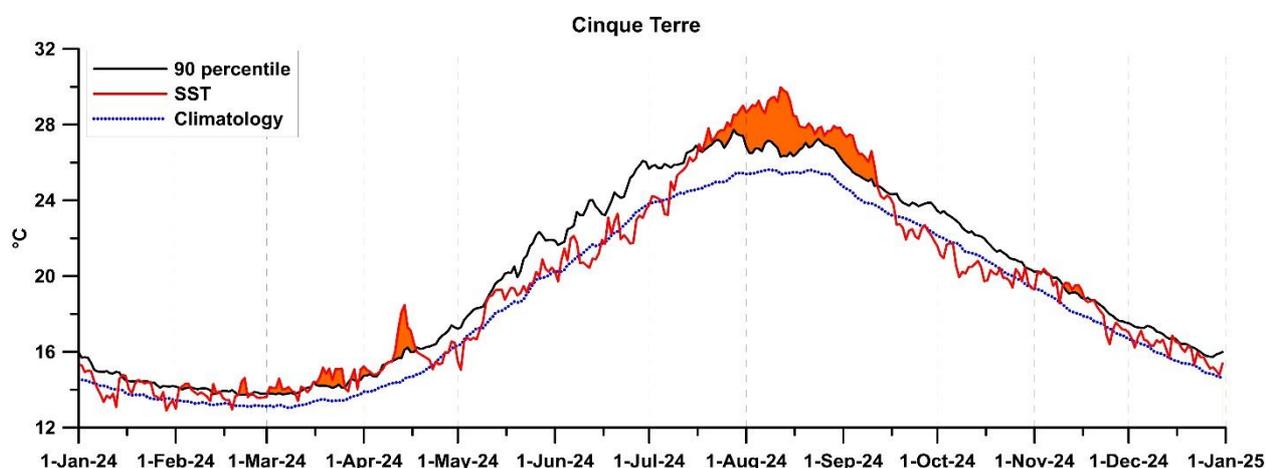


Figura 20. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

Isola d'Elba

Nel 2024, l'Isola d'Elba ha registrato otto eventi di MHWs, distribuiti tra gennaio e novembre, con una crescente intensità e durata nel corso dell'anno (Fig. 21). Il primo evento si è verificato tra l'1 e il 14 gennaio, con una durata di 14 giorni e un'intensità media di $0,25^{\circ}\text{C}$, mentre il valore massimo ha raggiunto $0,58^{\circ}\text{C}$. Poco dopo, tra il 18 e il 23 gennaio, si è osservato un secondo MHW di breve durata (6 giorni) con valori simili, pari a $0,28^{\circ}\text{C}$ di media e $0,55^{\circ}\text{C}$ di picco. A inizio febbraio, dal 2 all'8, si è registrato un MHW leggermente più intenso con una media di $0,41^{\circ}\text{C}$ e un massimo di circa $0,50^{\circ}\text{C}$. A seguire, dal 10 febbraio al 29 marzo, si è sviluppato un MHW prolungato di ben 48 giorni, con un'intensità media di $0,65^{\circ}\text{C}$ e un valore massimo di $1,32^{\circ}\text{C}$, segnando una svolta rispetto ai primi mesi dell'anno. Dopo una breve pausa, tra il 31 marzo e il 7 aprile si è osservato un altro evento di MHW, più contenuto (8 giorni), ma comunque rilevante, con

una media di 0,51°C e un picco di 0,99°C. A metà aprile, dal 12 al 20, ha avuto luogo un MHW breve ma particolarmente intenso, con un'intensità media di 0,98°C e un picco massimo che ha raggiunto i 2,59 °C. Il fenomeno di MHW più marcato dell'anno si è verificato tra il 14 luglio e il 14 settembre, con un evento straordinario della durata di 63 giorni, caratterizzato da un'intensità media di 1,35 °C e un picco massimo che ha superato i 3,21°C. Infine, tra il 2 e il 20 novembre, si è registrato l'ultimo MHW rilevante dell'anno, della durata di 19 giorni e con valori medi di 0,63°C e un massimo di 1,10°C.

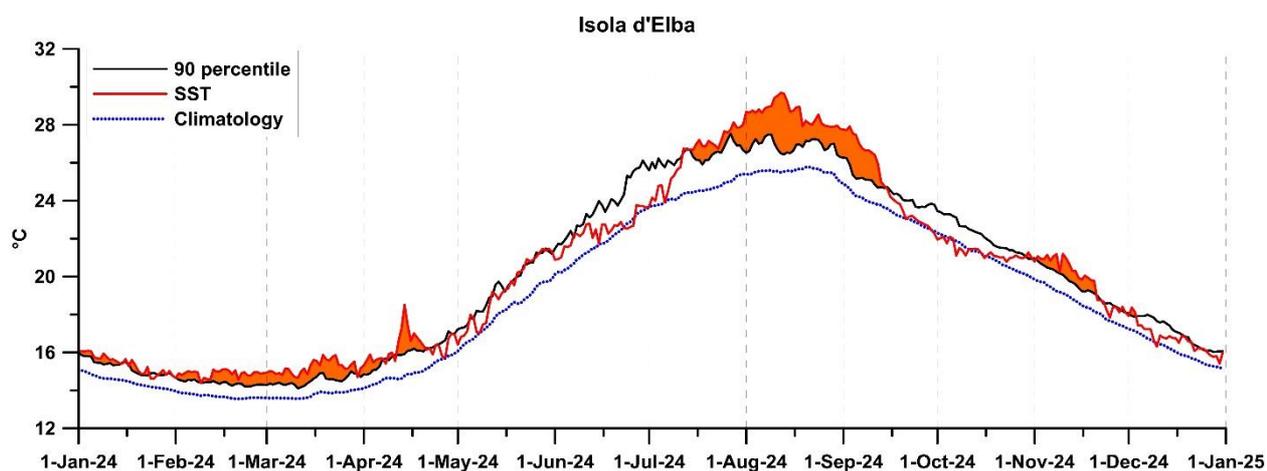


Figura 21. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Isole Tremiti

Nel 2024, le Isole Tremiti hanno registrato otto eventi di MHWs, con durate variabili da 6 a 67 giorni e intensità che spaziano da moderate a elevate (Fig. 22). Il primo MHW si è verificato dal 2 al 7 febbraio, con una durata di 6 giorni e un'intensità media di 0,32 °C, raggiungendo un picco massimo di 0,52°C. Un evento simile si è verificato tra il 10 e il 16 febbraio, con una durata di 7 giorni e un'intensità media di 0,28°C, con il picco massimo di 0,51°C. Successivamente, tra il 19 e il 24 febbraio, si è registrato un altro MHW di 6 giorni, con un'intensità media di 0,40°C e un picco di 0,69°C. Dal 27 febbraio al 4 marzo, si è verificato un altro breve MHW di 6 giorni, con un'intensità media di 0,48°C e un picco massimo di 0,84°C. Un evento più lungo si è sviluppato tra il 6 e il 21 marzo, della durata di 16 giorni, con un'intensità media di 0,62°C e un picco di 1,39°C. A fine marzo e inizio maggio, tra il 28 marzo e il 2 maggio, si è verificato un evento di 36 giorni, con un'intensità media di 1,07°C e un picco massimo di 2,29°C, segnando uno dei fenomeni più intensi dell'anno. A metà giugno, dal 18 al 25, un MHW di 8 giorni ha avuto un'intensità media di 0,75°C e un picco di 1,72°C. Infine, dal 9 luglio al 13 settembre, si è verificato un evento particolarmente lungo e intenso, della durata di 67 giorni, con un'intensità media di 1,65°C e un picco massimo di 3,06°C, segnando un'estrema anomalia termica nel periodo estivo.

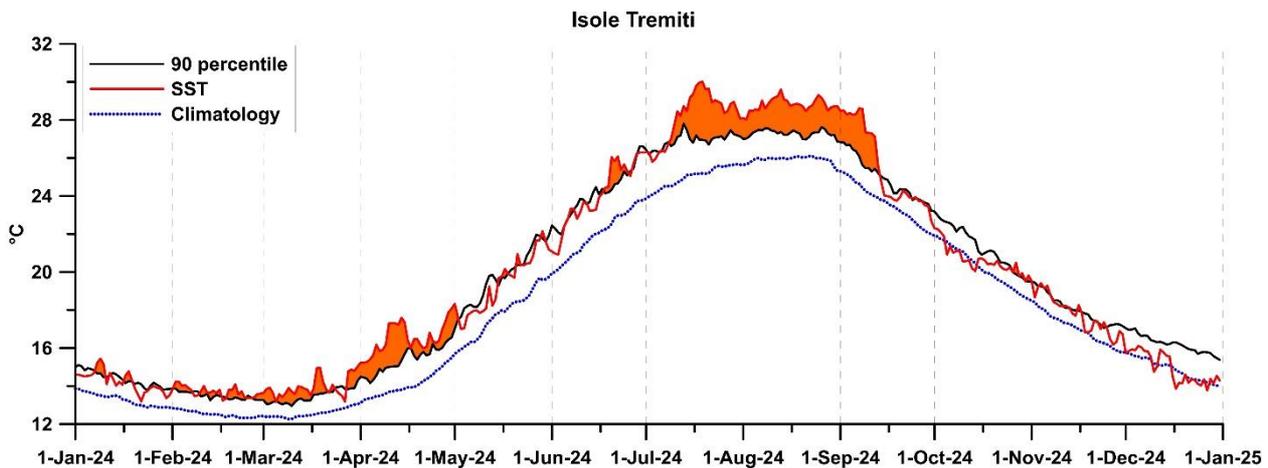


Figura 22. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Isola dell'Asinara

Nel 2024, l'Asinara ha registrato quattordici eventi di MHWs, che si sono verificati in vari periodi dell'anno, con durate che vanno dai 5 ai 22 giorni (Fig. 23). Il primo evento ha avuto luogo tra il 23 e il 28 gennaio, con una durata di 6 giorni e un'intensità media di 0,17°C, mentre il picco massimo ha raggiunto 0,32°C. A febbraio, il 9-13, si è verificato un MHW di breve durata (5 giorni), con valori medi di 0,16°C e un massimo di 0,34°C. Poco dopo, tra il 15 e il 23 febbraio, si è osservato un MHW più consistente, con una durata di 9 giorni e un'intensità media di 0,57°C, raggiungendo un picco di 0,94°C. Successivamente, dal 25 febbraio al 1° marzo, si è verificato un altro evento di 5 giorni con un'intensità media di 0,31°C e un picco di 0,55°C. Tra il 13 e il 17 marzo, si è registrato un altro breve MHW con valori più contenuti (5 giorni, media di 0,20°C e massimo di 0,32°C), seguito da un episodio dal 19 al 26 marzo della durata di 8 giorni, con un'intensità media di 0,71°C e un picco massimo di 1,20°C. A fine marzo e inizio aprile, tra il 29 marzo e il 15 aprile, si è verificato un evento di durata più lunga (18 giorni), con un'intensità media di 0,63°C e un massimo di 0,97°C. A maggio, tra il 10 e il 21, un altro MHW di 12 giorni ha registrato una media di 0,36°C e un picco massimo di 0,96°C. Nel mese di giugno, tra il 5 e l'11, si è verificato un MHW di 7 giorni con una media di 0,44°C e un massimo di 0,87°C. Il mese di luglio e agosto ha visto l'emergere del fenomeno più marcato dell'anno, con un evento che si è protratto dal 28 luglio al 18 agosto per 22 giorni, con un'intensità media di 0,98°C e un picco massimo di 1,90°C. A fine agosto, dal 28 al 1° settembre, si è verificato un altro MHW di breve durata (5 giorni), con una media di 0,16°C e un massimo di 0,38°C, seguito da un altro evento dal 3 al 7 settembre, sempre di 5 giorni, con valori medi di 0,29°C e picchi di 0,45°C. Il 5-16 novembre si è verificato un altro MHW, della durata di 12 giorni, con un'intensità media di 0,57°C e un massimo di 0,86°C. Infine, tra il 22 e il 28 novembre, un breve MHW di 7 giorni ha mostrato un'intensità media di 0,30°C e un picco di 0,60°C.

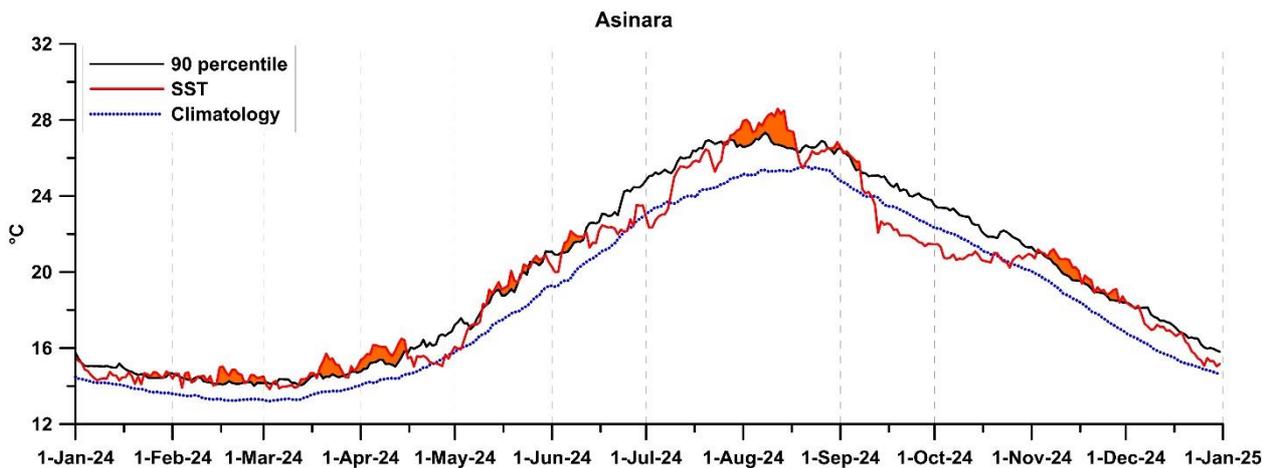


Figura 23. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

Nel 2024, Tavolara ha registrato dieci eventi di MHWs, variabili in durata e intensità (Fig. 24). Il primo si è verificato tra il 2 e il 6 gennaio, con una durata di 5 giorni, un'intensità media di 0,14 °C e un picco massimo di 0,20°C. Un altro evento è avvenuto dall'1 al 7 febbraio, della durata di 7 giorni, con un'intensità media di 0,33°C e un massimo di 0,49°C. Dal 10 febbraio al 2 marzo, Tavolara ha vissuto un MHW di 21 giorni, con un'intensità media di 0,42°C e un picco massimo di 0,92°C. Successivamente, dal 16 al 27 marzo, un evento di 12 giorni ha avuto un'intensità media di 0,42°C e un picco massimo di 0,94°C. Tra il 31 marzo e il 17 aprile, si è verificato un MHW di 18 giorni, con un'intensità media di 0,48°C e un picco massimo di 1,06°C. Un altro evento si è verificato dal 15 al 21 maggio, della durata di 7 giorni, con un'intensità media di 0,43°C e un picco massimo di 1,05°C. Dal 9 al 21 luglio, Tavolara ha registrato un MHW di 13 giorni, con un'intensità media di 1,10°C e un picco massimo di 1,79°C. Tra il 23 luglio e il 16 agosto, si è verificato un MHW di 25 giorni, con un'intensità media di 1,23°C e un picco massimo di 2,39°C. Dal 23 agosto al 7 settembre, un MHW di 16 giorni ha registrato un'intensità media di 0,88°C e un picco massimo di 1,69°C. Infine, dal 10 al 16 novembre, un evento di 7 giorni ha avuto un'intensità media di 0,19°C e un picco massimo di 0,37°C.

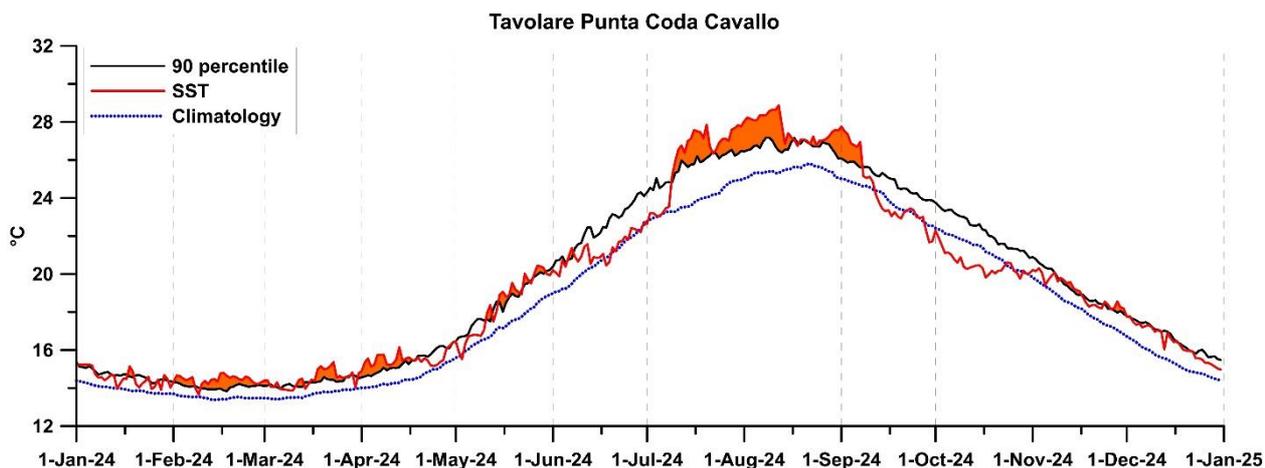


Figura 24. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Isola Ventotene e Santo Stefano

Nel 2024, Ventotene e Santo Stefano hanno sperimentato dieci eventi di MHWs, distribuiti lungo tutto l'anno, con durate variabili da 5 a 55 giorni e intensità che vanno da valori moderati a elevati (Fig. 25). Il primo evento si è verificato tra il 21 e il 25 gennaio, con una durata di 5 giorni, un'intensità media di 0,33°C e un picco massimo di 0,43°C. Poi, dall'1 al 27 febbraio, è stato registrato un MHW più lungo, della durata di 27 giorni, con una media di 0,39°C e un massimo di 0,67°C. Un evento significativo si è verificato tra l'1 marzo e il 24 aprile, con una lunga durata di 55 giorni, durante i quali l'intensità media è stata di 0,74°C, mentre il picco massimo ha raggiunto 2,00°C, segnando un aumento rilevante rispetto ai mesi precedenti. A metà luglio, dal 12 al 23, un altro evento di 12 giorni ha mostrato un'intensità media di 0,79°C e un picco massimo di 1,52°C. Un MHW ancora più intenso si è sviluppato dal 25 luglio al 12 settembre, con una durata di 50 giorni e un'intensità media di 1,30°C, raggiungendo un picco di 2,31°C, segnalando un fenomeno eccezionale. A ottobre e novembre, tra il 24 ottobre e il 20 novembre, si è osservato un altro MHW della durata di 28 giorni, con un'intensità media di 0,60°C e un massimo di 1,31°C. Successivamente, tra il 4 e il 12 dicembre, un evento di 9 giorni ha avuto un'intensità media di 0,35°C e un picco di 0,77°C, seguito da un MHW di 8 giorni tra il 15 e il 22 dicembre, con una media di 0,50°C e un massimo di 0,73°C. Infine, a dicembre, dal 25 al 29, si è verificato un evento di 5 giorni con un'intensità media di 0,38°C e un picco di 0,61°C.

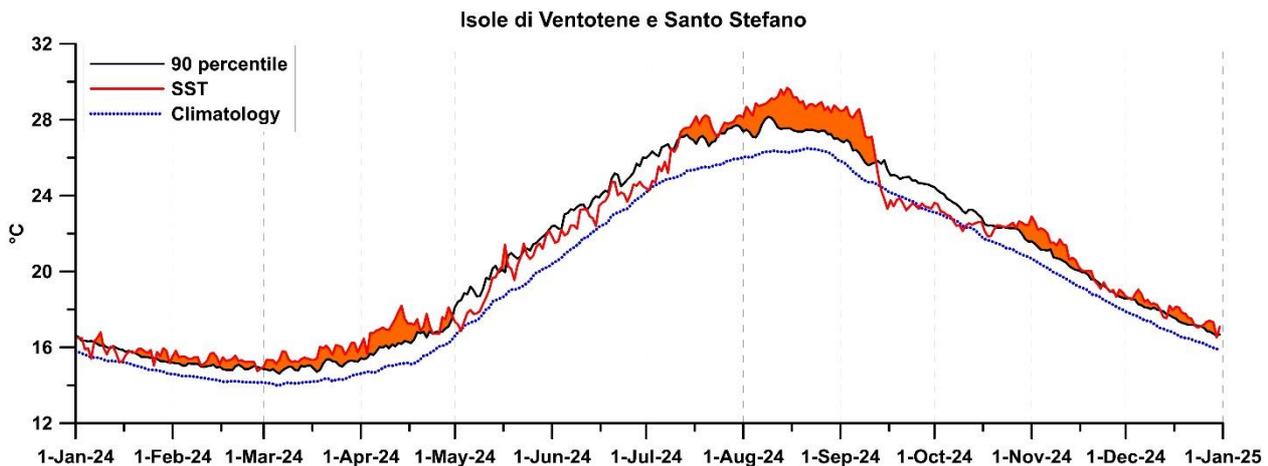


Figura 25. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Torre Guaceto

Nel corso del 2024 sono stati identificati dieci eventi di MHWs (Fig. 26). Il primo episodio si è verificato tra il 15 e il 19 febbraio e ha avuto una durata minima di 5 giorni, con un'intensità media modesta pari a circa $0,23^{\circ}\text{C}$ sopra la soglia, e un picco massimo prossimo a $0,7^{\circ}\text{C}$. Dopo una breve pausa, a partire dal 24 febbraio si è sviluppato un evento molto più esteso e intenso, protrattosi fino al 31 marzo per un totale di 36 giorni, durante i quali l'intensità media ha raggiunto quasi $0,91^{\circ}\text{C}$, con una massima superiore a $1,60^{\circ}\text{C}$. Questo evento è stato seguito da un altro lungo episodio tra il 2 aprile e il 2 maggio, durato 31 giorni, con intensità ancora maggiore: in media $1,25^{\circ}\text{C}$ sopra la soglia, e un picco massimo che ha sfiorato i 2°C . Durante il mese di maggio si sono osservati due episodi più brevi ma comunque rilevanti. Il primo, tra l'8 e il 14 maggio, ha mostrato intensità contenute, mentre il secondo, dal 17 al 21 maggio, ha presentato valori medi superiori a $0,49^{\circ}\text{C}$. In giugno la frequenza degli eventi è aumentata, con tre episodi ravvicinati: uno dal 4 all'8 giugno, uno più duraturo tra il 10 e il 24 giugno, e un terzo tra il 27 giugno e il 1° luglio. Tutti e tre hanno mostrato intensità comprese tra $0,65^{\circ}\text{C}$ e $0,69^{\circ}\text{C}$ in media, con picchi oltre $1,10^{\circ}\text{C}$, indicando una fase di stress termico prolungato nella transizione tra primavera ed estate. L'evento più significativo dell'anno si è manifestato tra il 6 luglio e il 14 settembre, con una durata record di 71 giorni. Durante questo periodo, le anomalie termiche sono risultate particolarmente elevate, con un'intensità media di circa $1,28^{\circ}\text{C}$ e una massima che ha superato i $2,38^{\circ}\text{C}$. Questo episodio rappresenta un evento estremo sia per durata sia per intensità, e potrebbe aver avuto impatti ecologici rilevanti sull'ecosistema marino. Infine, un ultimo evento è stato registrato tra il 4 e il 13 novembre, con durata di 10 giorni e intensità moderata.

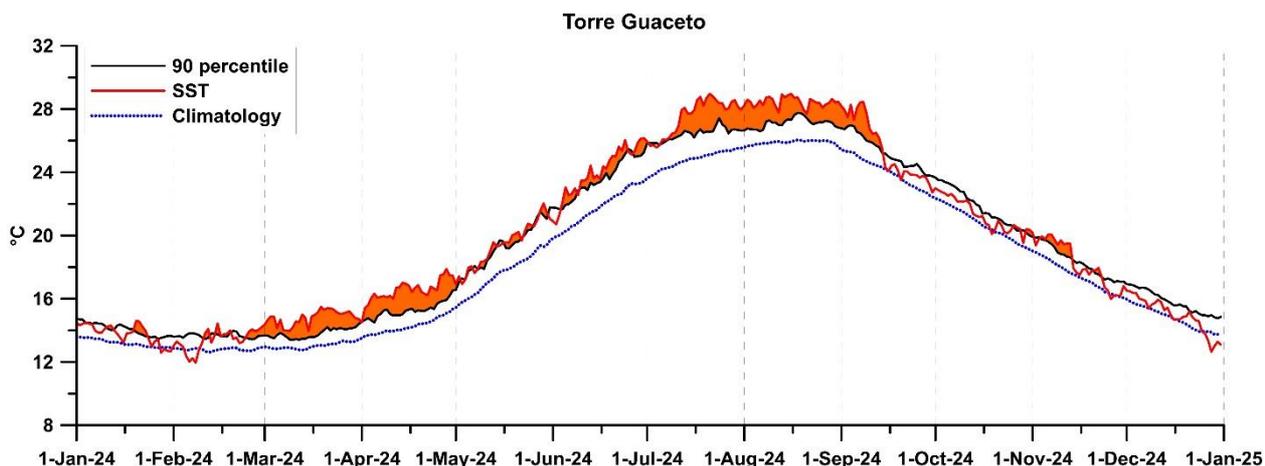


Figura 26. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile..

AMP Capo Carbonara

Nel 2024, Capo Carbonara ha registrato dieci episodi di MHWs, distribuiti tra gennaio e dicembre, caratterizzati da una notevole continuità temporale e da intensità crescenti nel corso dell'anno (Fig. 27). Il primo evento si è verificato tra il 7 e il 26 gennaio, con una durata di 20 giorni e un'intensità media di circa 0,33°C, mentre il valore massimo ha raggiunto 0,95°C. A breve distanza è seguito un secondo episodio, tra il 29 gennaio e il 22 febbraio, durato 25 giorni e leggermente più intenso, con valori medi di 0,50°C e un picco massimo prossimo a 1,00°C. Questo è stato immediatamente seguito, senza soluzione di continuità, da un terzo episodio tra il 24 febbraio e il 6 marzo, della durata di 11 giorni e con un'intensità media di circa 0,52°C e un massimo di 0,87°C. Dopo un breve intervallo, si è verificato un evento minore tra il 9 e il 13 marzo, durato solo cinque giorni e con intensità più contenute (0,33°C in media e 0,53°C come massimo). Successivamente, tra il 15 e il 29 marzo, si è osservato un episodio più marcato della durata di 15 giorni, con intensità media pari a 0,72°C e un picco massimo di 1,34°C. Dal 31 marzo al 19 aprile si è registrato un evento della durata di 20 giorni che ha mostrato un ulteriore incremento, con una media di 0,81°C e un massimo di 1,49°C. Dopo una pausa nel mese di aprile, l'attività è ripresa tra il 20 e il 30 maggio con un episodio di 11 giorni, un'intensità media di circa 0,52°C e un picco di 1,17°C. Durante l'estate si sono verificati due eventi ravvicinati: il primo, tra il 10 e il 18 agosto, durato 9 giorni con un'intensità media di circa 0,71°C e un massimo di 1,21°C; il secondo, tra il 28 agosto e il 9 settembre, durato 13 giorni con valori medi di 0,74°C e un massimo di 1,30°C. L'ultimo e più prolungato episodio dell'anno si è verificato in autunno, tra il 7 novembre e il 7 dicembre, durando 31 giorni e con una delle intensità medie più elevate, pari a 0,83°C, accompagnata da un picco massimo superiore a 1,34°C.

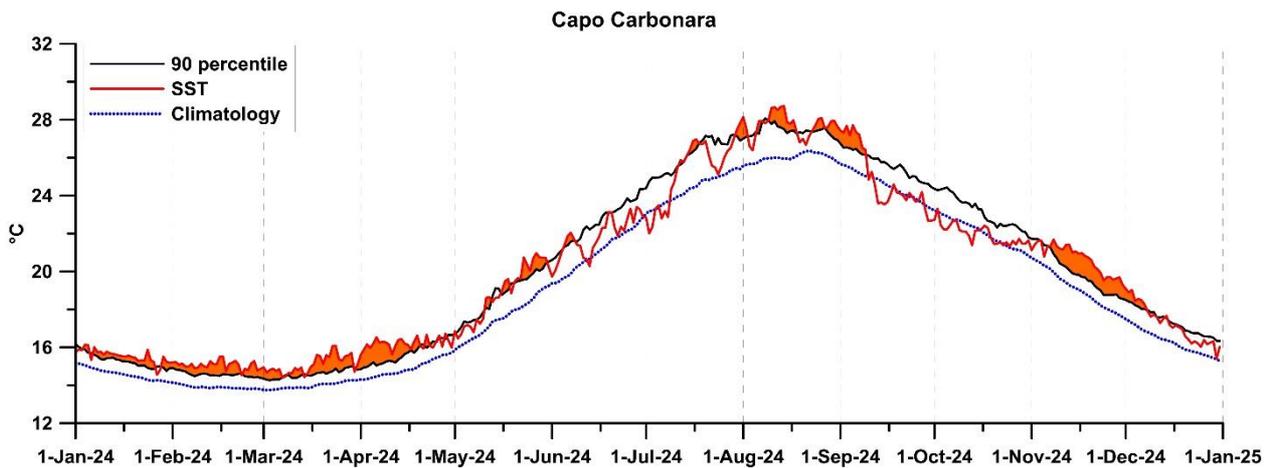


Figura 27. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Capo Milazzo

Nel 2024, Capo Milazzo ha registrato nove episodi di attività termica di varia intensità e durata, distribuiti regolarmente lungo tutto l'anno (Fig. 28). Il primo evento si è verificato tra l'1 e il 24 gennaio, durando 24 giorni, con un'intensità media di 0,53°C e un valore massimo pari a 0,82°C. Poco dopo, dal 26 gennaio al 24 febbraio, si è osservato un secondo episodio più duraturo (30 giorni) e leggermente più intenso, con una media di 0,56°C e un picco massimo di 1,07°C. Successivamente, tra l'1 e il 16 marzo, si è verificato un evento di minore intensità, con valori medi di appena 0,22°C e un massimo di 0,74 °C. Questo è stato seguito, dal 18 al 30 marzo, da un episodio più consistente di 13 giorni, con un'intensità media pari a 0,56°C e un massimo che ha superato 1,14°C. Tra il 2 e il 17 aprile, per 16 giorni, si è registrato un ulteriore aumento con una media di 0,69°C e un picco massimo di 1,31°C. Un evento isolato e più contenuto si è verificato in giugno, tra il 6 e il 10, durando 5 giorni con una media di 0,29°C e un massimo di 0,71°C. Il periodo più intenso e prolungato dell'anno è stato osservato tra il 10 luglio e il 12 settembre, durato ben 65 giorni, con un'intensità media di 1,08°C e un picco massimo che ha raggiunto i 2,54°C. Successivamente, tra il 26 ottobre e il 5 dicembre, si è verificato un episodio autunnale esteso su 41 giorni, con valori medi di 0,60°C e un massimo di 1,08°C. Infine, l'anno si è chiuso con un ultimo evento di breve durata tra il 7 e l'11 dicembre, della durata di 5 giorni, caratterizzato da un'intensità media di circa 0,31°C e un massimo di 0,50°C.

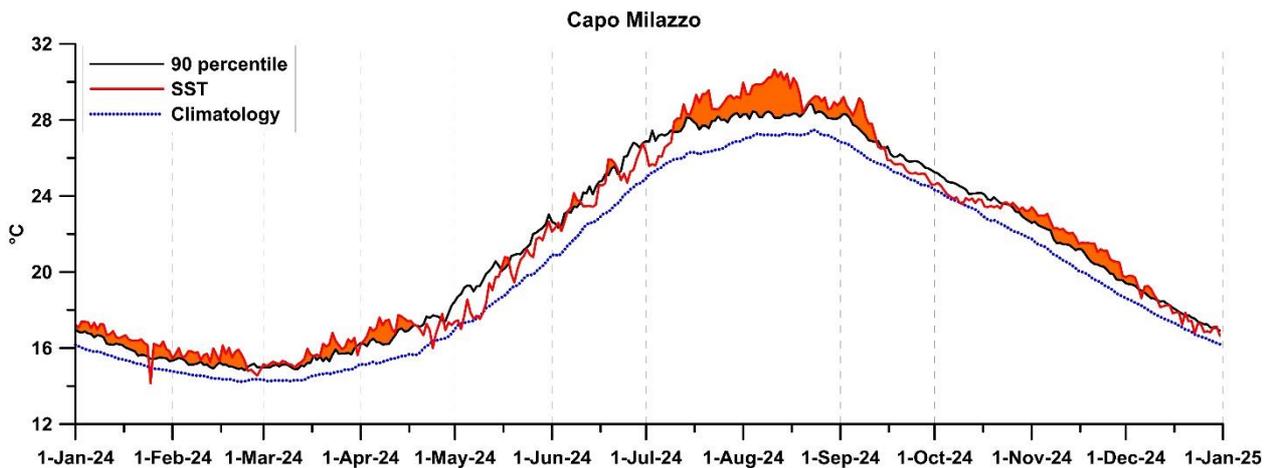


Figura 28. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

AMP Plemmiro

Nel 2024, Plemmiro ha vissuto undici eventi di MHWs, con durate variabili da 5 a 71 giorni e intensità che vanno da moderate a elevate (Fig. 29). Il primo MHW si è verificato dall'1 al 5 gennaio, con una durata di 5 giorni, un'intensità media di 0,28°C e un picco massimo di 0,56°C. Un altro evento ha avuto luogo tra il 7 e il 27 gennaio, con una durata di 21 giorni, un'intensità media di 0,29°C e un picco massimo di 0,70°C. Successivamente, tra il 10 e il 25 febbraio, un MHW di 16 giorni ha registrato un'intensità media di 0,55°C e un picco di 1,30°C. Un evento breve si è verificato dal 10 al 17 marzo, con una durata di 8 giorni, un'intensità media di 0,20°C e un massimo di 0,39°C. Un altro MHW lungo si è verificato tra il 22 marzo e il 24 aprile, della durata di 34 giorni, con un'intensità media di 0,67°C e un picco massimo di 1,58°C. A metà maggio, dal 12 al 19, un MHW di 8 giorni ha avuto un'intensità media di 0,80°C e un picco massimo di 1,15°C. Un altro evento di 21 giorni si è verificato tra il 21 maggio e il 10 giugno, con un'intensità media di 0,84°C e un picco di 1,28°C. A metà giugno, dal 17 al 30, un MHW di 14 giorni ha mostrato un'intensità media di 0,67°C e un picco di 1,49°C. Un MHW molto lungo ha avuto luogo dal 9 luglio al 17 settembre, della durata di 71 giorni, con un'intensità media di 1,21°C e un picco massimo di 2,23°C. A ottobre, tra il 29 ottobre e il 9 novembre, si è verificato un evento di 12 giorni, con un'intensità media di 0,22°C e un massimo di 0,43°C. Un altro MHW è stato registrato tra l'11 novembre e il 24 dicembre, della durata di 44 giorni, con un'intensità media di 0,59°C e un picco massimo di 1,00°C. Infine, a dicembre, dal 27 al 31, un breve MHW di 5 giorni ha avuto un'intensità media di 0,27°C e un picco di 0,46°C.

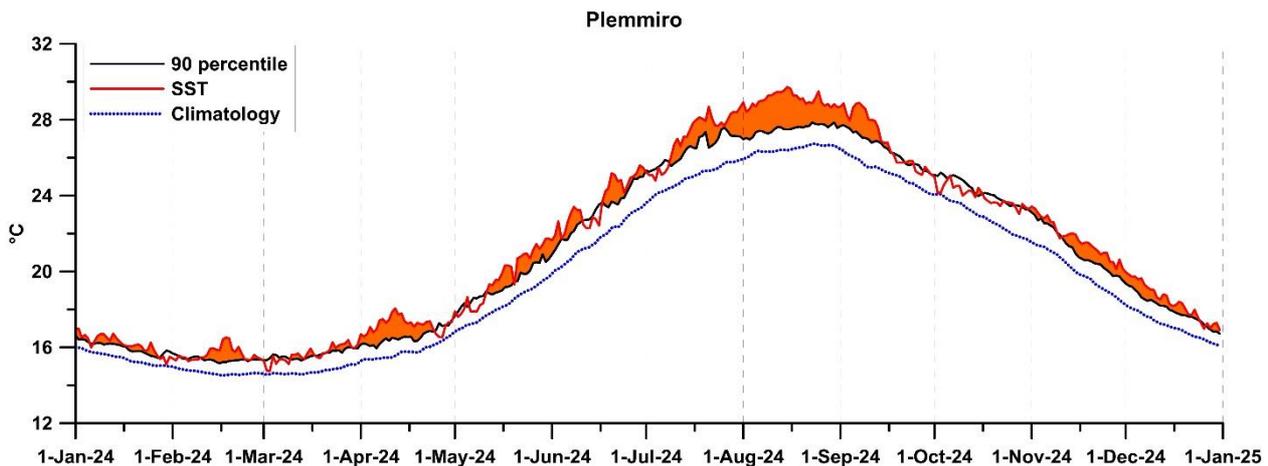


Figura 29. SST (linea rossa) rispetto ai dati climatologici (linea blu tratteggiata) e al 90° percentile (linea nera), l'area arancione rappresenta il periodo in cui la temperatura ha superato il 90° percentile.

TEMPERATURA LUNGO LA COLONNA D'ACQUA

L'analisi dei dati ha permesso di monitorare l'andamento della temperatura in dodici aree di studio per il periodo di tempo intercorso tra l'installazione dei sensori e l'ultimo download dei dati. Per l'AMP Torre Guaceto non è stato possibile analizzare i dati relativi al quinto anno di progetto Mare Caldo per problemi tecnici che non hanno permesso lo scarico dei dati da parte dell'AMP. Tutti i risultati relativi all'analisi dei dati di temperatura a disposizione per quest'area sono riportati nelle precedenti relazioni di progetto (Montefalcone & Azzola 2020, 2022; Azzola & Montefalcone 2023, 2024).

Di seguito, per ogni area di studio, è riportato il numero totale di dati raccolti nell'ambito dei cinque anni di progetto Mare Caldo. AMP Miramare: 269.006 dati; AMP Portofino: 395.828 dati; AMP Cinque Terre: 68.910 dati; Isola d'Elba: 305.009 dati; AMP Isole Tremiti: 124.957 dati; AMP Isola dell'Asinara: 148.948 dati; AMP Tavolara Punta Coda Cavallo: 136.805 dati; AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano: 216.684 dati; AMP Torre Guaceto: 88.800 dati; AMP Capo Carbonara: 242.992 dati; AMP Capo Milazzo: 75.268 dati; AMP Plemmiro: 232.481 dati.

AMP Miramare

Nel periodo compreso tra gennaio 2021 e dicembre 2024, l'area dell'AMP Miramare ha mostrato piogge regolari e abbondanti, con valori massimi che hanno raggiunto i 200 mm (Fig. 30). Il periodo autunnale è stato caratterizzato dalla maggiore intensità delle precipitazioni, con eventi significativi che hanno superato i 150 mm, in particolare a luglio 2021 e luglio 2022. Il wind stress ha mostrato oscillazioni stagionali, con valori medi generalmente intorno a $0,1 \text{ N m}^{-2}$. Il periodo invernale ha visto i valori massimi, mentre

l'estate quelli minimi; tuttavia, la differenza tra le stagioni non è stata particolarmente marcata.

L'evoluzione temporale della temperatura lungo la colonna d'acqua presso la stazione costiera dell'AMP Miramare (Fig. 30) evidenzia una marcata ciclicità stagionale con un progressivo riscaldamento superficiale tra la tarda primavera e l'estate. In questo periodo la colonna d'acqua mostra un forte gradiente verticale tra i primi metri e il fondo, con temperature che raggiungono valori massimi di circa 26–27 °C tra luglio e agosto nei primi 5 m e si mantengono su valori sensibilmente inferiori, intorno ai 17–18 °C, a circa 15 m di profondità, segno di stratificazione termica. Segue durante l'autunno un progressivo rimescolamento verticale, con temperature più uniformi lungo la colonna e valori più bassi che si estendono fino alla superficie nei mesi invernali, in particolare tra gennaio e marzo di ciascun anno, quando si registrano valori minimi prossimi ai 9–10 °C lungo tutto il profilo. Si osservano infine alcune anomalie locali, come episodi con temperature inferiori rispetto alla media stagionale che si propagano dal fondo verso l'alto, in particolare tra gennaio e marzo 2024, con valori di circa 12–13 °C a 15 m di profondità che si riscontrano fino a 5 m, e in parte anche tra fine 2022 e inizio 2023, probabilmente associati a episodi di mixing più profondo o a condizioni meteorologiche particolarmente favorevoli alla perdita di calore superficiale.

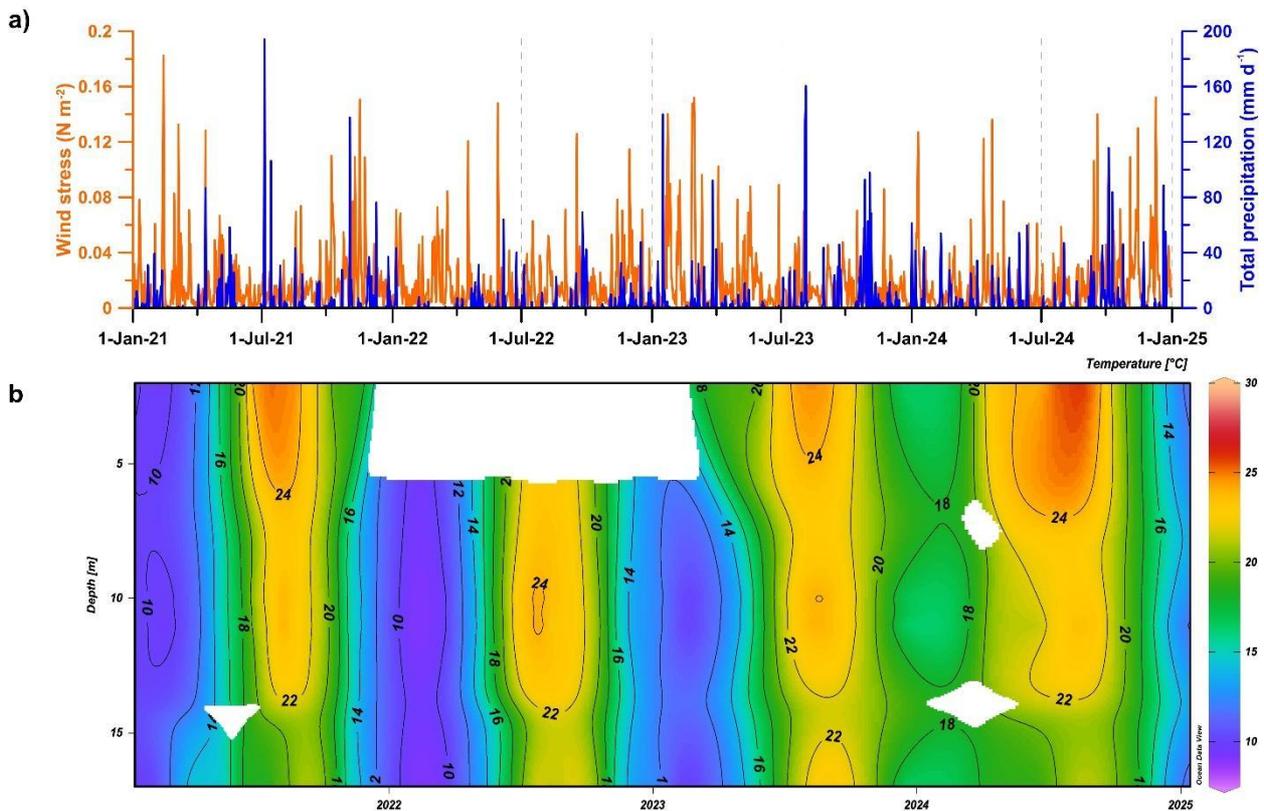


Figura 30. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Portofino

Nel sito dell'AMP Portofino, tra gennaio 2021 e dicembre 2024, si osserva un'alternanza di episodi intensi sia di precipitazione giornaliera sia di stress del vento, con numerosi picchi distribuiti in modo disomogeneo nel tempo (Fig. 31). Le precipitazioni (in blu) risultano particolarmente rilevanti nei primi mesi del 2021, in corrispondenza di eventi localizzati tra settembre dello stesso anno e aprile 2022, e nuovamente con valori molto elevati nei mesi di gennaio e novembre 2023 e tra marzo e settembre 2024, quando si registra anche il massimo assoluto del periodo. Lo stress del vento (in arancione) mostra una frequenza maggiore di eventi intensi nella prima parte della serie, in particolare tra gennaio e aprile 2021, tra ottobre 2021 e marzo 2022, e poi tra settembre 2022 e marzo 2023, con il picco massimo registrato a dicembre 2022, seguito da un'attività più discontinua e meno marcata nel 2024.

Il diagramma Hovmöller della temperatura nell'AMP Portofino (Fig. 31) evidenzia un'evoluzione stagionale ben marcata ma con caratteristiche in parte differenti rispetto alla stazione dell'Isola d'Elba. Nei mesi invernali (dicembre–marzo), la colonna d'acqua tende a essere relativamente omogenea, con valori che oscillano tra 13 °C e 15 °C, anche se in alcuni anni, come nel 2022 e nel 2023, il rimescolamento verticale non raggiunge profondità elevate, suggerendo una ventilazione invernale meno efficiente.

A partire dalla primavera, si sviluppa una stratificazione termica evidente, con il formarsi di un termoclino che si approfondisce progressivamente fino a raggiungere circa 25–30 m nei mesi estivi. In estate (giugno–settembre), le temperature superficiali mostrano valori generalmente compresi tra 24 °C e 28 °C. Il 2022 risulta particolarmente caldo: si osserva un picco superiore ai 28 °C nei primi 10 metri, associato a un termoclino stabile e profondo, che suggerisce una stagione estiva prolungata e dominata da condizioni di calma atmosferica. Anche il 2023 mostra un'estate calda, con temperature superiori ai 26 °C e una stratificazione ben sviluppata.

L'inverno 2020 e quello 2024 appaiono invece caratterizzati da un rimescolamento più profondo, con temperature quasi uniformi lungo tutta la colonna d'acqua fino ai 40 m, evidenziando episodi di ventilazione efficiente. Il 2021 e il 2023, al contrario, mostrano una colonna d'acqua meno mescolata, con una stratificazione che tende a persistere anche oltre l'autunno. Questo comportamento potrebbe riflettere condizioni meteorologiche invernali più miti o una ridotta intensità dei venti.

Nel complesso, la struttura termica stagionale nell'AMP Portofino segue un'evoluzione regolare, ma mostra una variabilità interannuale significativa sia nei massimi estivi sia nell'efficienza del rimescolamento invernale, evidenziando il ruolo delle condizioni atmosferiche nella modulazione della colonna d'acqua superficiale nel Mar Ligure.

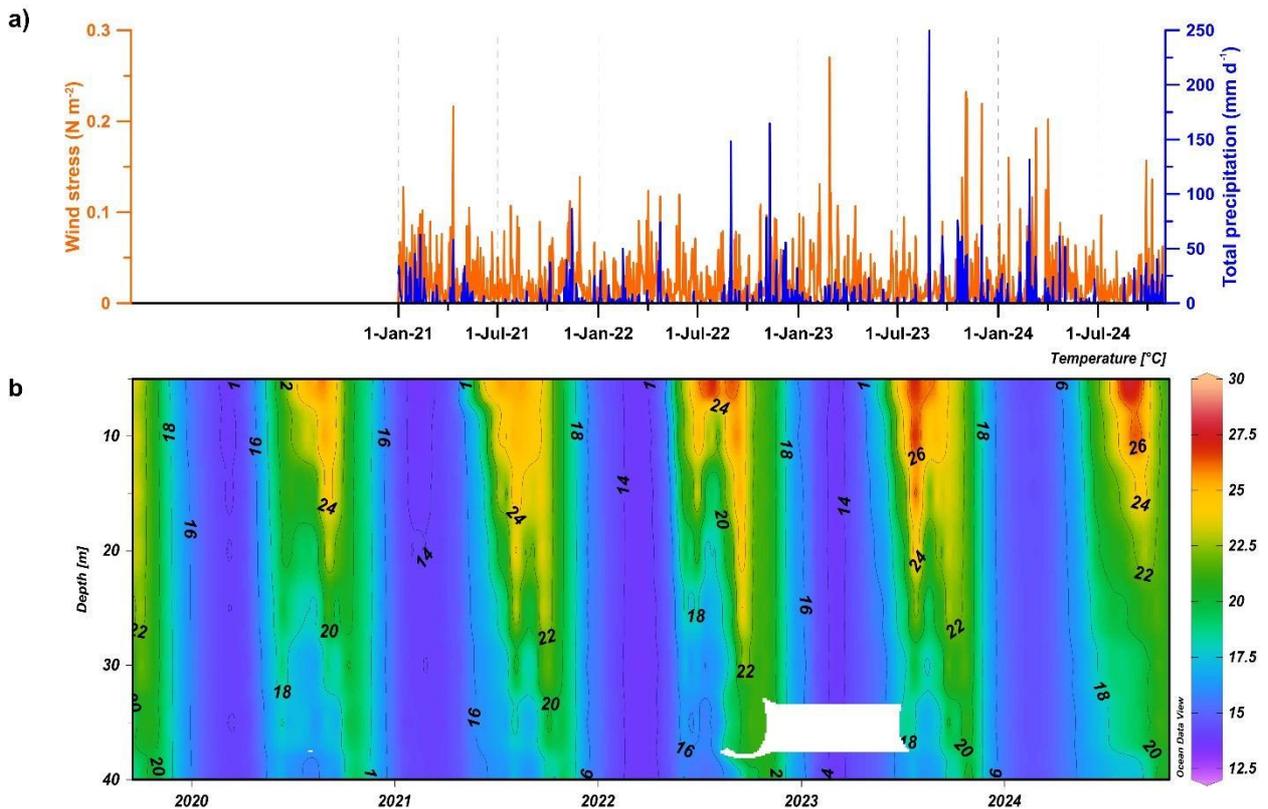


Figura 31. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Cinque Terre

Nel periodo tra ottobre 2022 e novembre 2024, l'area dell'AMP Cinque Terre ha registrato una significativa variabilità nelle condizioni atmosferiche, con una marcata stagionalità delle precipitazioni e nello stress del vento (Fig. 32). Le precipitazioni sono state scarse nell'autunno 2022, con eventi limitati e intensità massime di 20 mm/giorno. L'inverno e la primavera del 2023 hanno mostrato un aumento dell'attività piovosa, con sette eventi tra 10 e 30 mm/giorno. L'estate 2023 è stata completamente asciutta, seguita da piogge leggere durante l'autunno 2023 e l'inverno 2024, con valori medi intorno ai 15 mm/giorno. L'autunno 2024 ha visto l'evento più intenso del periodo, con un picco giornaliero di 50 mm.

Per quanto riguarda lo stress del vento, la variabilità è stata più pronunciata, con picchi di $0,2\ N/m^2$ osservati nell'autunno 2022 e nell'inverno 2023. Le primavere e le estati, in particolare quella del 2023, sono state caratterizzate da valori modesti, inferiori a $0,1\ N/m^2$. Un evento significativo si è verificato nell'autunno 2023, con un picco di $0,5\ N/m^2$, il valore massimo del periodo. L'inverno 2024 ha visto frequenti episodi con valori fino a $0,2\ N/m^2$, mentre la primavera e l'estate 2024 hanno registrato livelli bassi, a eccezione di alcuni episodi isolati. Un ulteriore picco si è verificato nell'autunno 2024, con uno stress del vento di $0,3\ N/m^2$.

L'evoluzione temporale della temperatura lungo la colonna d'acqua tra l'inizio del 2023 e la fine del 2024 (Fig. 32) evidenzia un andamento stagionale ben marcato, con la formazione di una stratificazione termica nei mesi primaverili ed estivi, caratterizzata da un termocline stabile localizzato tra i 10 e i 15 m di profondità e da temperature superficiali che raggiungono valori fino a 28 °C. Nei mesi autunnali e invernali la colonna d'acqua tende a mescolarsi, assumendo un profilo termico più omogeneo, con temperature comprese intorno ai 15 °C lungo l'intero intervallo di profondità considerato. Confrontando i due anni, si nota che l'estate del 2023 presenta temperature più elevate e una stratificazione più netta rispetto all'estate del 2024, che risulta termicamente meno definita, e in entrambi i cicli annuali si osservano episodi localizzati di abbassamento della temperatura anche nei mesi estivi, visibili come discese delle isoterme e zone di colore più freddo che si estendono in profondità, compatibili con situazioni transitorie di raffreddamento della colonna d'acqua. L'intero profilo evidenzia con continuità i processi di stratificazione e mixing stagionale che regolano la dinamica termica delle acque superficiali costiere in quest'area del Mar Ligure.

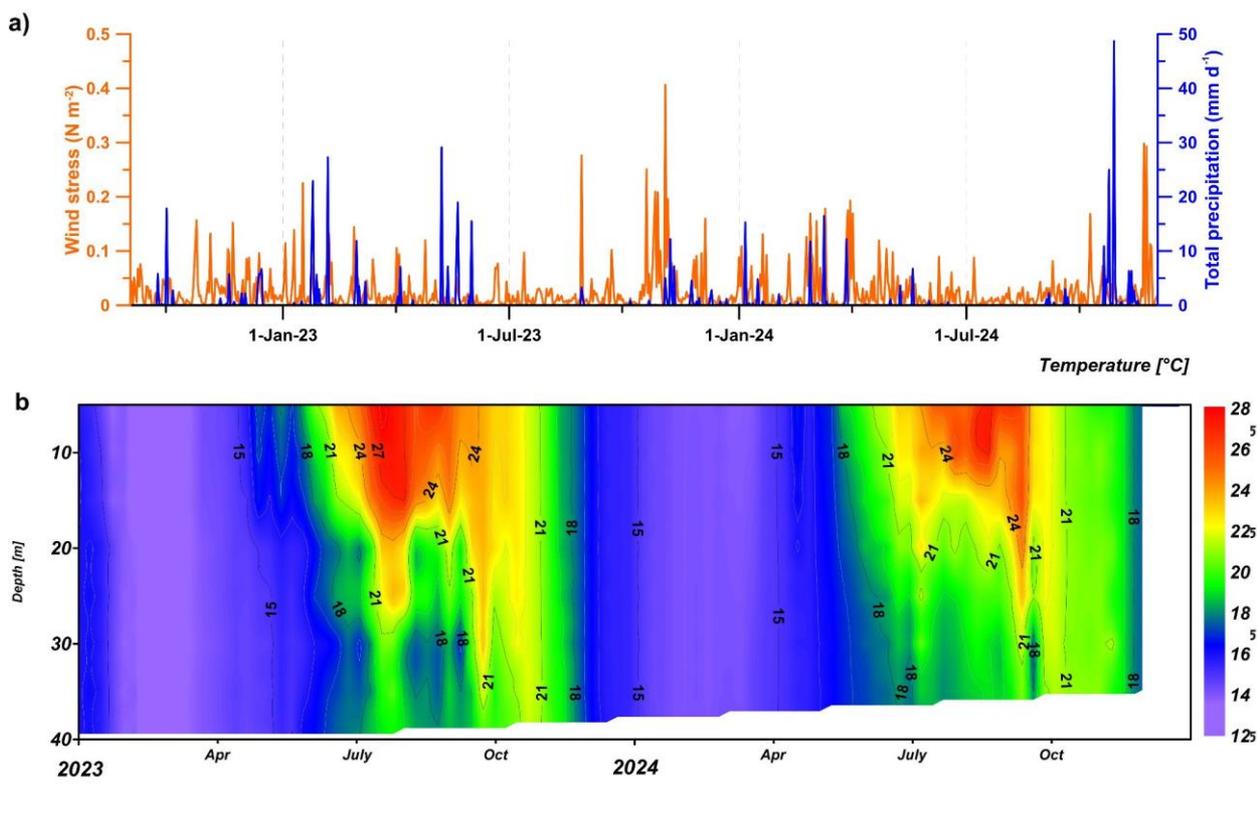


Figura 32. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

Isola d'Elba

Da gennaio 2020 a dicembre 2024 il wind stress mostra un'elevata variabilità, con frequenti picchi che superano 0.2 N m^{-2} durante l'autunno e l'inverno di ciascun anno (Fig. 33). In particolare, si osservano intensificazioni rilevanti tra gennaio e marzo 2021, dicembre 2022 e gennaio 2023, e nuovamente nel periodo invernale del 2024. Le precipitazioni giornaliere totali appaiono distribuite in modo irregolare, con eventi isolati che raggiungono intensità anche superiori a 100 mm d^{-1} , come nel novembre 2021, gennaio 2023 e ottobre 2024. Durante i mesi estivi, entrambi i parametri tendono a mantenersi su valori più bassi, ma non mancano episodi puntuali di intensificazione, ad esempio a luglio 2020, agosto 2021 e luglio 2024. Si osserva che i massimi di wind stress sono in genere più frequenti rispetto ai picchi estremi di precipitazione, i quali risultano più sporadici ma molto intensi. La figura evidenzia anche un pattern ricorrente di eventi meteorologici intensi concentrati principalmente nel semestre freddo.

La temperatura lungo la colonna d'acqua nel periodo 2020–2024 (Fig. 33), mostra una marcata oscillazione stagionale. Durante i mesi invernali (dicembre–marzo), la colonna risulta generalmente ben mescolata, con temperature pressoché uniformi comprese tra $13,5 \text{ °C}$ e 15 °C su tutta la profondità. A partire dalla primavera, si osserva una progressiva stratificazione della colonna d'acqua, con la formazione di un termoclino che si approfondisce nel corso dell'estate, raggiungendo solitamente i 25–30 m. Nei mesi estivi (giugno–settembre), le temperature superficiali raggiungono valori compresi tra 24 °C e 28 °C , con variazioni interannuali ben visibili.

A questo andamento stagionale si sovrappongono alcuni eventi di rilievo. L'estate del 2022 è caratterizzata da un picco termico particolarmente intenso nei primi 10 metri, con temperature superiori ai 28 °C : si tratta dell'evento più caldo del periodo considerato, probabilmente legato a condizioni di calma atmosferica, alta radiazione solare e scarso rimescolamento. Anche l'estate del 2023 mostra un riscaldamento marcato, con valori prossimi ai $26\text{--}27 \text{ °C}$ in superficie, ma con un termoclino più ben sviluppato e stabile rispetto all'anno precedente, indice di una stratificazione più profonda e persistente.

Un altro evento significativo si osserva nell'inverno tra il 2021 e il 2022, durante il quale la colonna d'acqua appare completamente omogenea, con isoterme verticali che indicano un rimescolamento profondo fino al fondo (40 m). Questo episodio riflette condizioni favorevoli alla ventilazione invernale e alla perdita di calore verso l'atmosfera. Al contrario, l'estate del 2020 mostra una stratificazione meno accentuata, con temperature superficiali che non superano i 24 °C e un termoclino più superficiale e debole.

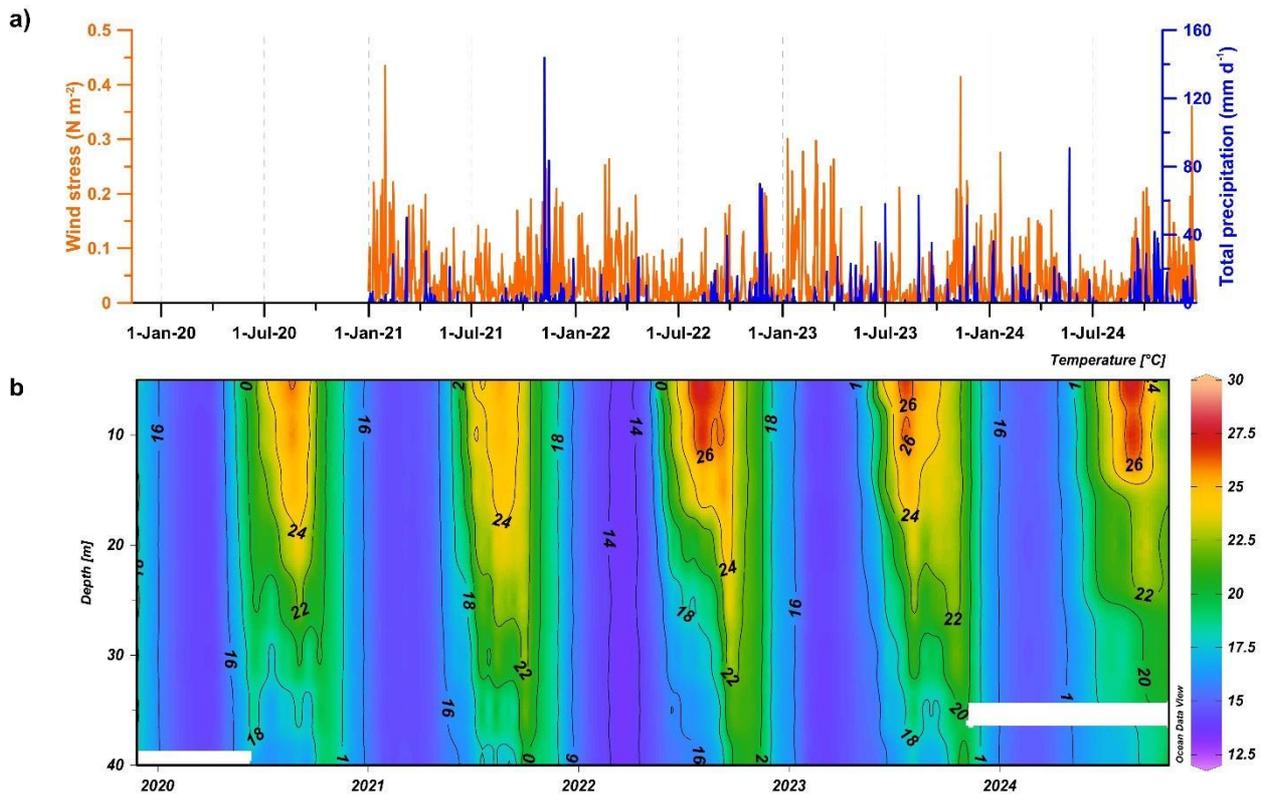


Figura 33. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Isole Tremiti

Nel periodo compreso tra luglio 2022 e marzo 2024 lo stress del vento (Fig. 34, linea arancione) mostra una variabilità stagionale evidente, con valori generalmente più elevati nei mesi compresi tra novembre e marzo, e più bassi tra maggio e settembre. Si registrano diversi picchi superiori a $0,2\ N\ m^{-2}$, in particolare a dicembre 2022, febbraio 2023, luglio 2023 e gennaio 2024.

Le precipitazioni totali giornaliere (Fig. 34, linea blu) risultano più frequenti e intense tra ottobre e febbraio di ciascun anno. Tra gli eventi più rilevanti si segnala un picco eccezionale a gennaio 2024, con valori superiori a $150\ mm/giorno$. Altri episodi significativi si osservano a novembre 2022, gennaio 2023 e settembre 2023. Nei mesi estivi le precipitazioni sono generalmente scarse, con valori prossimi allo zero per lunghi periodi.

L'Hovmöller di temperatura per le Isole Tremiti evidenzia un ciclo stagionale ben marcato. Nei mesi invernali, tra gennaio e marzo, la colonna d'acqua appare completamente rimescolata, con temperature omogenee comprese tra $15\ ^{\circ}C$ e $16\ ^{\circ}C$ fino a circa 30 m di profondità. In entrambi gli anni si osserva il minimo termico intorno a fine gennaio, ma nel 2023 le temperature minime sembrano leggermente inferiori rispetto al 2024.

La stratificazione termica si sviluppa progressivamente dalla primavera, con la formazione del termoclino che si approfondisce nei mesi estivi. I massimi termici si registrano in

entrambi gli anni tra luglio e agosto, nel 2024 le temperature superficiali superano i 27 °C in modo più esteso e persistente. Il termoclino risulta inoltre più profondo e marcato nel 2024, raggiungendo circa 25 m rispetto ai 20–22 m del 2023. Il periodo autunnale, da ottobre a dicembre, è caratterizzato da un progressivo approfondimento dello strato mescolato e conseguente raffreddamento della colonna d'acqua. L'autunno 2023 evidenzia un mescolamento anticipato rispetto al 2024 nel quale la colonna d'acqua resta stratificata per un periodo di tempo maggiore.

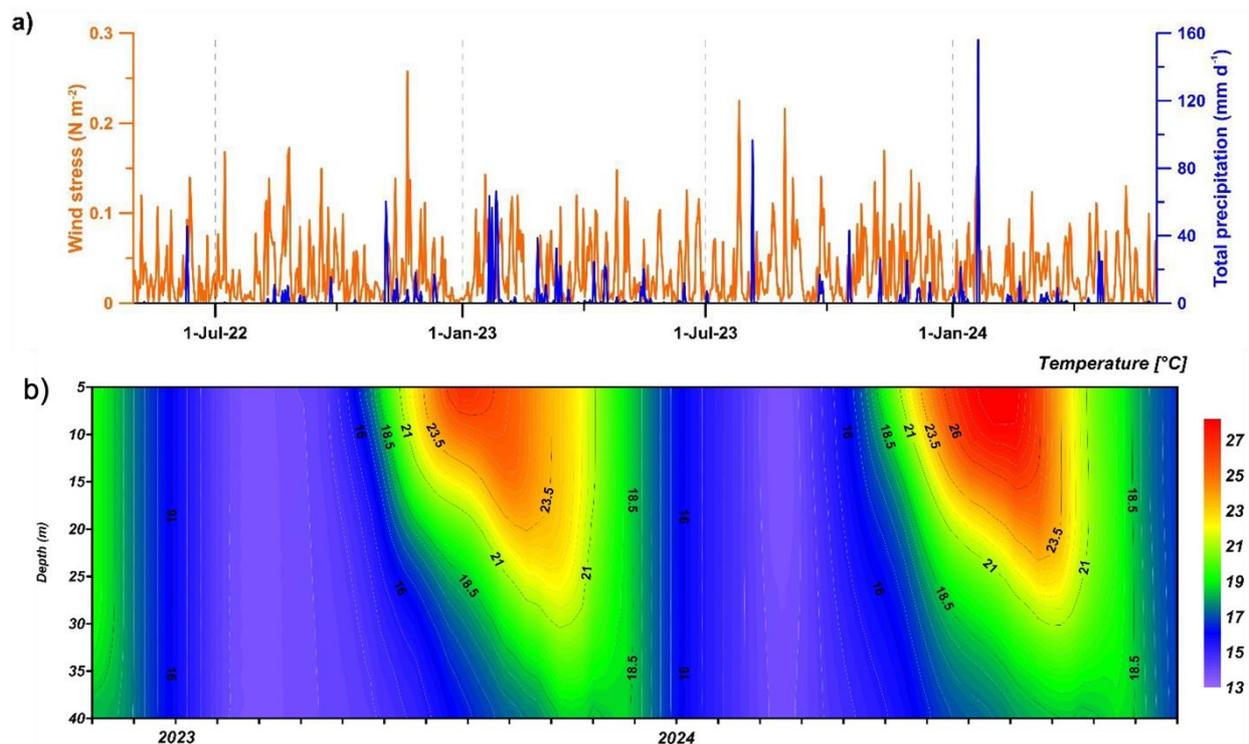


Figura 34. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Isola dell'Asinara

Da luglio 2021 a dicembre 2024, l'area dell'AMP Isola dell'Asinara ha mostrato una stagionalità nei regimi atmosferici, con piogge e stress del vento più intensi nei mesi autunnali e invernali (Fig. 35). L'autunno 2021 ha registrato piogge concentrate, con un picco di 40 mm/giorno a dicembre, mentre la primavera 2022 è stata meno attiva. Le estati sono state generalmente asciutte e con stress del vento basso.

Tra l'autunno 2022 e l'inverno 2023 si è verificata una fase particolarmente intensa, con piogge fino a 90 mm/giorno e picchi di stress del vento superiori a 0,4 N/m^2 . La primavera 2023 ha mantenuto piogge moderate, mentre l'estate 2023 ha visto un evento anomalo di wind stress. Piogge frequenti e stress del vento elevato si sono verificati anche nell'autunno 2023 e inverno 2024. La primavera ed estate 2024 sono state più stabili, con

stress del vento generalmente basso, mentre l'autunno 2024 ha visto un ritorno di condizioni più dinamiche con piogge significative e stress del vento intenso.

Il ciclo stagionale della temperatura è ben marcato; durante il periodo estivo (giugno–settembre) si osserva un forte riscaldamento degli strati superficiali, con temperature che superano i 27 °C nei primi 10 metri. Questo riscaldamento è accompagnato da una netta stratificazione, evidenziata dalla presenza di un forte gradiente termico tra i 10 e i 25 m di profondità. Al contrario, nei mesi invernali (dicembre–marzo), la colonna d'acqua si presenta omogeneamente fredda (13,5–15,5 °C) fino ai 40 m, segnalando condizioni di mescolamento verticale completo. Il pattern si ripete con regolarità nei tre anni osservati, indicando un regime termico stagionale stabile.

Nel corso dell'estate 2022 si rileva un episodio di riscaldamento superficiale particolarmente intenso e prolungato (Fig. 35), con isoterme superiori ai 26 °C che si estendono fino a circa 15 m di profondità. Anche nell'estate del 2023 si osservano temperature elevate, ma con uno spessore verticale dell'acqua calda leggermente inferiore. L'estate 2024 mostra nuovamente un'anomalia termica superficiale evidente, ma di durata più contenuta rispetto agli anni precedenti. Tali episodi possono essere interpretati come ondate di calore marine caratterizzate da temperature superiori alla norma e da una forte e persistente stratificazione.

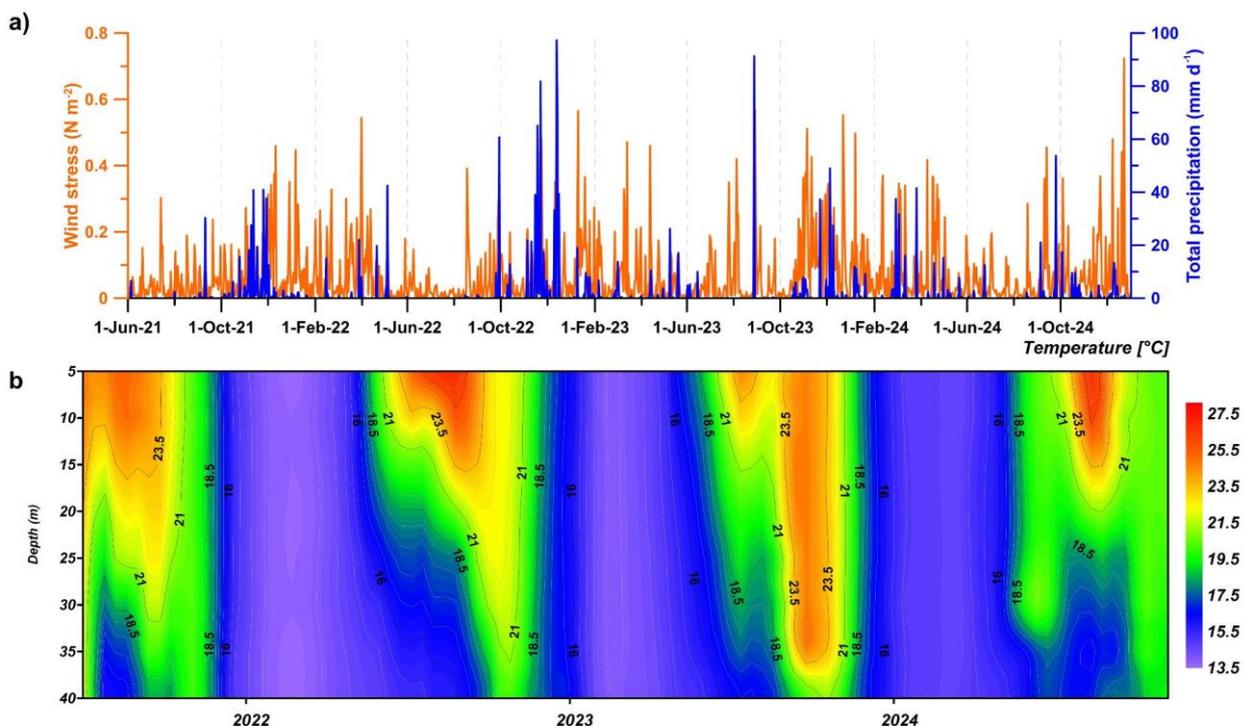


Figura 35. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

Nel sito dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, tra luglio 2022 e luglio 2024, si osservano eventi intensi e frequenti di stress del vento (Fig. 36), con numerosi picchi distribuiti in modo relativamente regolare lungo tutta la serie, in particolare nei periodi tra novembre 2022 e marzo 2023, giugno e novembre 2023, e nuovamente tra gennaio e aprile 2024, mentre gli eventi di precipitazione giornaliera (in blu) risultano più sporadici ma con alcuni picchi rilevanti, come tra ottobre e dicembre 2022, tra febbraio e aprile 2023, a luglio 2023 e tra dicembre 2023 e febbraio 2024.

Il diagramma Hovmöller della temperatura (Fig. 36) evidenzia un'evoluzione stagionale regolare, con la formazione annuale di un termoclino estivo ben definito tra 10 e 25 m di profondità. Nei mesi più caldi, da luglio a settembre, la temperatura superficiale raggiunge valori elevati, oscillando intorno ai 27 °C nel 2022 e nel 2023, con un progressivo riscaldamento degli strati superiori che produce una stratificazione marcata. In entrambi gli anni, il termoclino si sviluppa stabilmente nel periodo estivo, separando nettamente le acque superficiali più calde da quelle più fredde e profonde, che rimangono intorno ai 18–20 °C.

Nei mesi invernali, in particolare tra dicembre e marzo, la colonna d'acqua mostra un raffreddamento progressivo e un rimescolamento verticale più evidente, con temperature comprese tra 14 e 16 °C che si estendono uniformemente fino a circa 40 m di profondità. Il rimescolamento sembra più profondo e prolungato nell'inverno 2022–2023 rispetto al 2023–2024, suggerendo condizioni atmosferiche più favorevoli alla perdita di calore e alla ventilazione invernale.

Tra gli eventi più rilevanti si nota nell'estate del 2023 un prolungamento del riscaldamento fino a inizio ottobre, con un'anomalia termica positiva negli strati superiori che ha ritardato il mescolamento verticale. Analogamente, nel giugno 2024 si osserva un riscaldamento anticipato e marcato della colonna d'acqua superficiale, con temperature oltre i 22 °C già presenti a 15 m di profondità, un'indicazione di inizio precoce della stratificazione. Al contrario, nella seconda metà del 2022 si registra un raffreddamento relativamente rapido e omogeneo, con la scomparsa della stratificazione già entro la fine di ottobre. Queste variazioni suggeriscono una risposta sensibile del sistema alle condizioni atmosferiche e oceaniche interannuali, che influenzano la tempistica e l'intensità della stratificazione estiva e del rimescolamento invernale.

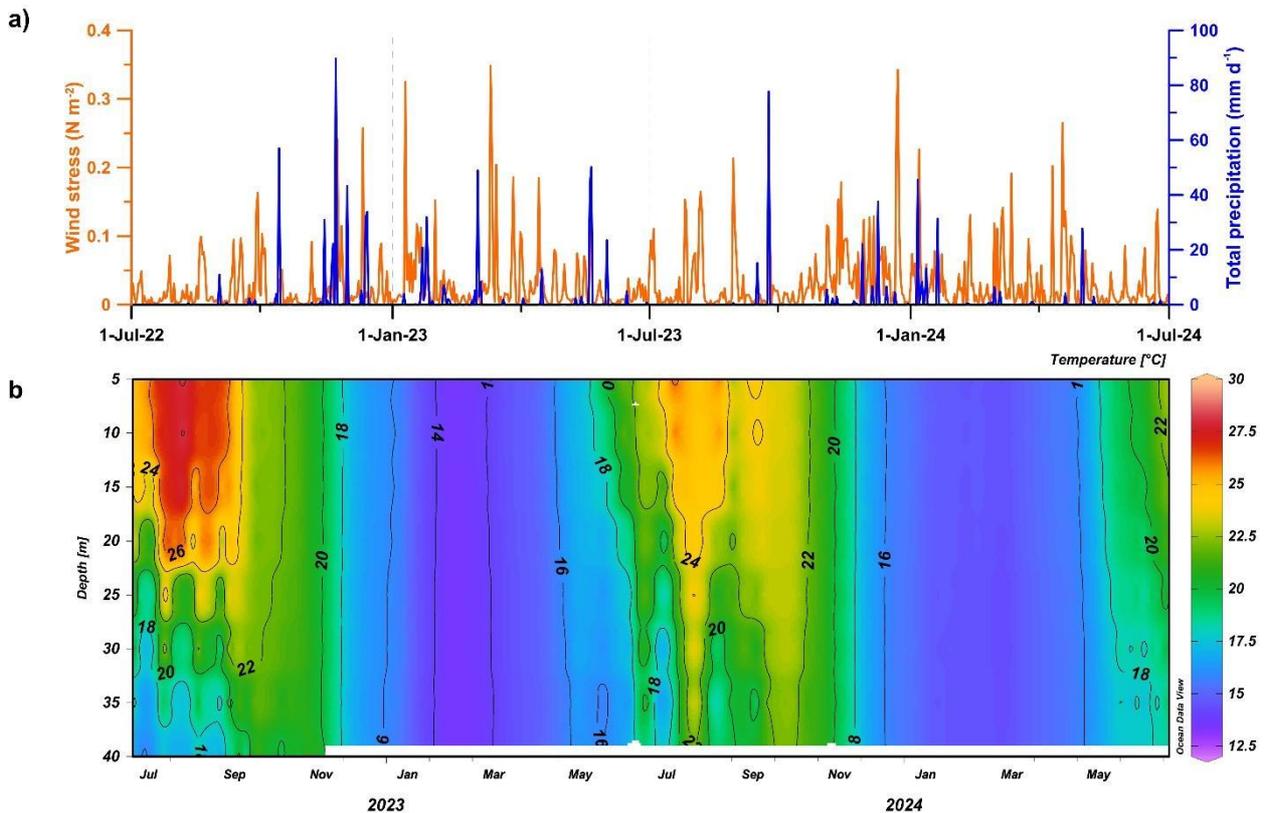


Figura 36. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

Nel periodo compreso tra luglio 2021 e dicembre 2024, su scala interannuale, entrambi i parametri mostrano un chiaro carattere stagionale (Fig. 37). Lo stress del vento aumenta durante i mesi autunnali e invernali (novembre–marzo), raggiungendo valori mediamente più elevati rispetto al periodo estivo, in cui si osservano condizioni generalmente più stabili e meno ventose. In modo analogo, le precipitazioni risultano più frequenti e intense nella stagione invernale, mentre nei mesi estivi si osserva una marcata riduzione della piovosità, spesso prossima allo zero per periodi anche prolungati.

A questa componente stagionale si sovrappongono numerosi eventi estremi. Per quanto riguarda lo stress del vento, si evidenziano episodi intensi, con valori che superano i $0,4\ N\ m^{-2}$ nei mesi di gennaio 2022, gennaio 2023 e gennaio 2024, suggerendo ricorrenze associate a perturbazioni cicloniche invernali. Analogamente, eventi precipitativi estremi – con cumulate giornaliere superiori a $80\ mm$ – sono ben visibili tra novembre e dicembre 2022 e a gennaio 2023, con un picco particolarmente intenso oltre i $100\ mm$.

L'Hovmöller della temperatura registrata nell'AMP Isole di Ventotene e S. Stefano tra il 2022 e il 2024 (Fig. 37) mostra un ciclo stagionale ben definito nella colonna d'acqua compresa tra la superficie e i $40\ m$ di profondità. Durante i mesi estivi (giugno-settembre)

di ciascun anno si osserva la formazione ricorrente di una marcata stratificazione termica: le temperature superficiali raggiungono valori compresi tra 26 e 28 °C, con un termoclino localizzato tra 10 e 20 m di profondità che separa nettamente lo strato superficiale riscaldato dalle acque sottostanti, più fredde. Nei mesi invernali (gennaio-marzo), la colonna d'acqua tende a essere completamente rimescolata fino a 40 m, con temperature più uniformi comprese tra 15 e 17 °C, evidenziando un'inversione stagionale della struttura termica.

Sovrapposto a questo comportamento regolare, si notano alcune variazioni interannuali e anomalie potenzialmente significative. L'estate del 2023 è stata caratterizzata da un riscaldamento superficiale più intenso e duraturo rispetto agli anni adiacenti, con temperature >27 °C persistenti più a lungo e una stratificazione termica più spessa, suggerendo condizioni atmosferiche anomale come ondate di calore prolungate o venti deboli. Inoltre, nel tardo autunno del 2023 si osserva un ritardo nel raffreddamento della colonna d'acqua, con temperature superiori ai 22 °C ancora presenti fino a novembre a 10 m di profondità, a differenza degli anni precedenti in cui il raffreddamento iniziava prima. Al contrario, l'inverno 2022–2023 sembra aver registrato uno dei rimescolamenti verticali più profondi e omogenei del periodo, con temperature attorno ai 15 °C osservate fino alla base del profilo (~40 m), indicando un evento di raffreddamento marcato. Infine, la profondità media del termoclino e l'intensità dei gradienti termici nei mesi estivi evidenziano una certa variabilità interannuale.

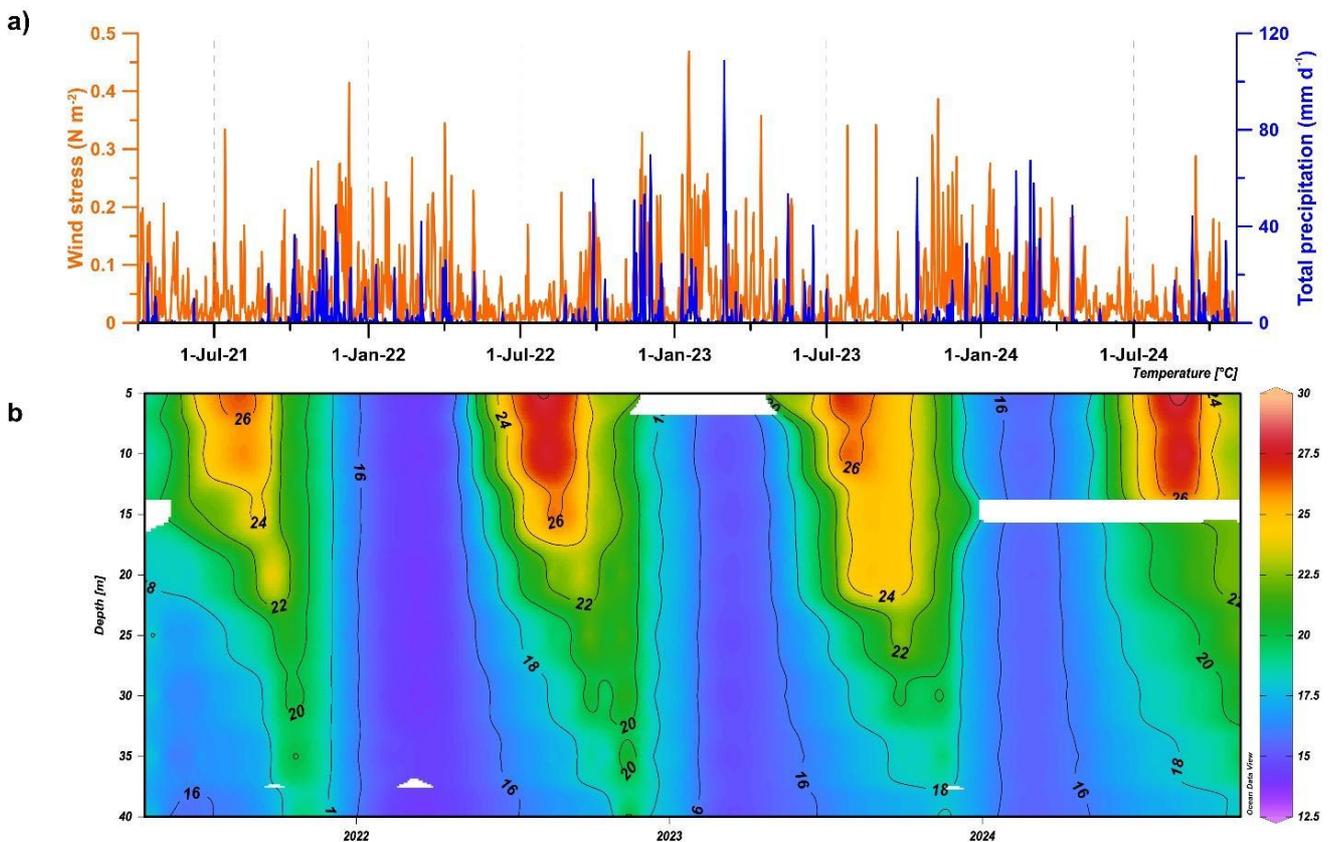


Figura 37. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Capo Carbonara

Da gennaio 2021 a dicembre 2024, l'area dell'AMP Capo Carbonara ha mostrato una chiara stagionalità delle precipitazioni e nel wind stress, con attività più intense nei mesi autunnali e invernali (Fig. 38). Nel 2021, le piogge sono state concentrate tra la fine dell'autunno e l'inizio dell'inverno, con un picco di 100 mm/giorno a dicembre. Il wind stress ha avuto una fase attiva all'inizio dell'anno, con picchi fino a 0,35 N/m².

Nel 2022, le precipitazioni si sono concentrate in inverno e primavera (30–60 mm/giorno), mentre d'estate sono state quasi assenti. Il wind stress è rimasto moderato, con valori sotto 0,3 N/m², ma più frequente nei mesi freddi. Il 2023 ha visto una prima metà piovosa e un'estate secca. Il wind stress è stato variabile, con picchi fino a 0,45 N/m² nell'autunno 2023, senza piogge significative.

Nel 2024, le piogge sono state più rare in primavera ed estate, con un picco autunnale di 40 mm/giorno. Il wind stress è rimasto attivo in inverno (0,3 N/m²), è diminuito nei mesi centrali e si è intensificato in autunno, raggiungendo 0,4 N/m² a novembre.

La temperatura nell'AMP Capo Carbonara, nei primi 40 m della colonna d'acqua dal 2020 al 2024 (Fig. 38), mostra una stagionalità ben delineata e una stratificazione estiva tipica delle acque costiere meridionali della Sardegna. Nei mesi invernali (dicembre–marzo), le temperature tendono a uniformarsi lungo la colonna d'acqua, ma con una minore omogeneità verticale rispetto a quanto osservato a Portofino o all'Elba, suggerendo una ventilazione invernale generalmente più superficiale. Le temperature minime invernali si attestano intorno ai 14–15 °C.

Durante la primavera e soprattutto in estate, la stratificazione si intensifica rapidamente. La colonna d'acqua sviluppa un termocline marcato, che nei mesi di luglio e agosto si colloca intorno ai 10–20 m di profondità. Le temperature superficiali raggiungono frequentemente i 27–28 °C, con punte superiori ai 28 °C nel 2022, anno che mostra una delle stratificazioni più intense e durature del periodo analizzato. Anche nel 2023 si osservano valori elevati, ma con una maggiore variabilità verticale e temporale. La persistenza della stratificazione estiva si protrae spesso fino a ottobre, indicando stagioni calde prolungate.

In contrasto, gli inverni appaiono meno efficaci nel rimescolare completamente la colonna d'acqua, con un gradiente termico residuo che in alcuni anni, come il 2021 e il 2023, permane anche nei mesi freddi. L'anno 2024 mostra invece un rimescolamento più profondo, sebbene non totale, che porta a temperature più omogenee fino a circa 30 m.

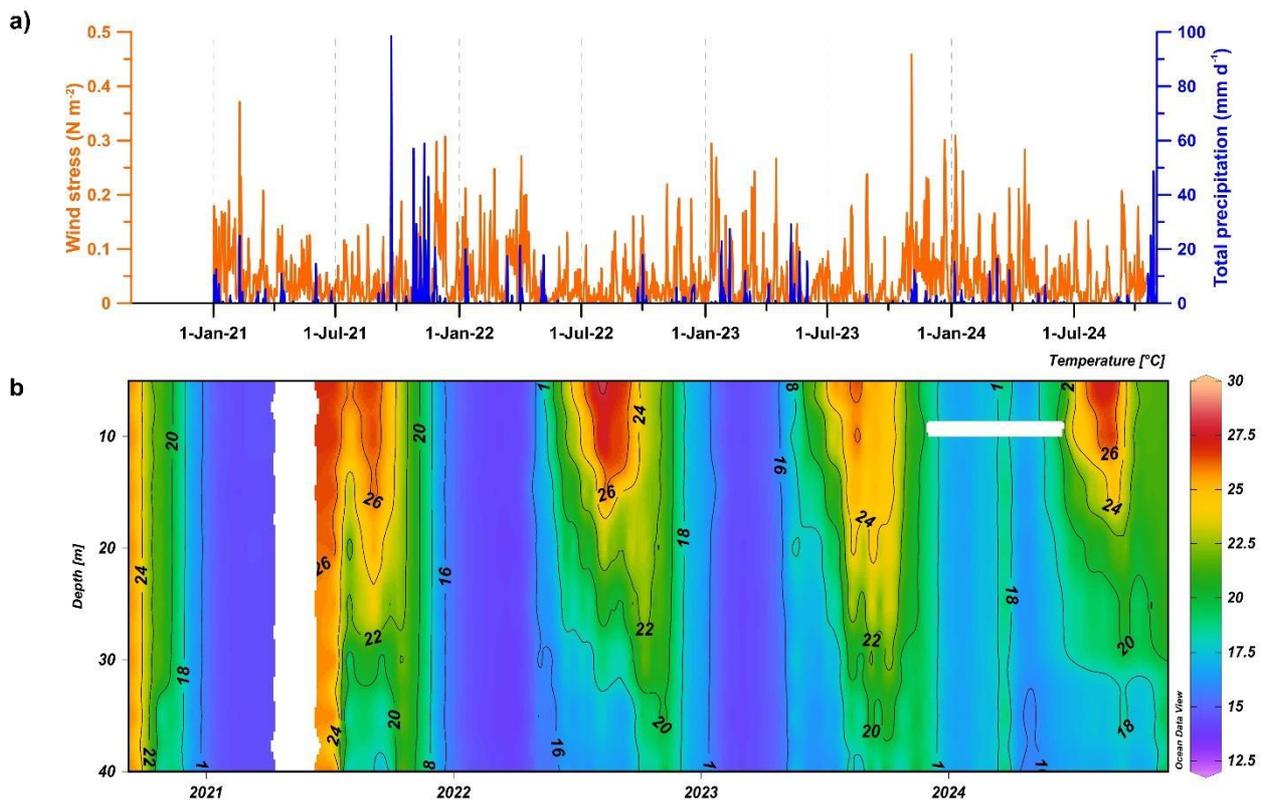


Figura 38. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Capo Milazzo

Nel periodo compreso tra luglio 2023 e novembre 2024, l'area dell'AMP Capo Milazzo ha mostrato precipitazioni scarse, con eventi concentrati principalmente tra l'inverno e la primavera del 2024, raggiungendo valori massimi di 60 mm, mentre nell'estate del 2024 non si sono registrate piogge (Fig. 39). Due eventi autunnali nel 2024, localizzati, hanno raggiunto valori di 50 mm. Il wind stress è stato elevato durante la stagione autunnale-invernale, con picchi significativi nell'autunno 2023, quando si sono registrati valori costantemente alti di $0,15 \text{ N m}^{-2}$, e un picco massimo a gennaio 2024 con valori di $0,4 \text{ N m}^{-2}$. Nella stagione estiva, invece, i valori di wind stress sono stati bassissimi, mentre in autunno 2024 si è osservato un evento con valori di $0,25 \text{ N m}^{-2}$.

Il diagramma Hovmöller della temperatura per il sito dell'AMP Capo Milazzo (Fig. 39) mostra una dinamica stagionale ben marcata, con evidenti cicli annuali di stratificazione e rimescolamento. Durante l'estate 2023 e quella del 2024, si osserva la formazione di un termoclino tra i 10 e i 25 m, con temperature superficiali che raggiungono i 27°C . La stratificazione appare stabile nei mesi da luglio a settembre, con uno spessore termico abbastanza sottile e ben definito. Gli strati profondi, sotto i 30 m, si mantengono relativamente freschi, intorno ai $17\text{--}18^{\circ}\text{C}$. Il raffreddamento inizia tipicamente tra ottobre e novembre, con una transizione graduale verso un profilo termico più uniforme. In inverno

(gennaio-marzo 2024), la temperatura si distribuisce più omogeneamente lungo la colonna d'acqua, con valori compresi tra 14 e 17 °C fino a circa 35 m di profondità, indicando un rimescolamento verticale efficace, probabilmente dovuto a condizioni meteorologiche favorevoli (ventilazione, raffreddamento atmosferico). Il sito dell'AMP Capo Milazzo mostra una tendenza a un raffreddamento invernale più profondo e marcato, con isoterme più orizzontali e uniformi, specie tra gennaio e aprile 2024. Un riscaldamento anticipato è evidente nel giugno 2024, con temperature sopra i 22 °C già presenti intorno ai 10 m, suggerendo un inizio precoce della stratificazione. Tuttavia, la colonna d'acqua appare più sensibile a intrusioni temporanee di masse d'acqua a temperatura differente, come indicato dalle ondulazioni delle isoterme, specie nei mesi di settembre e ottobre 2024.

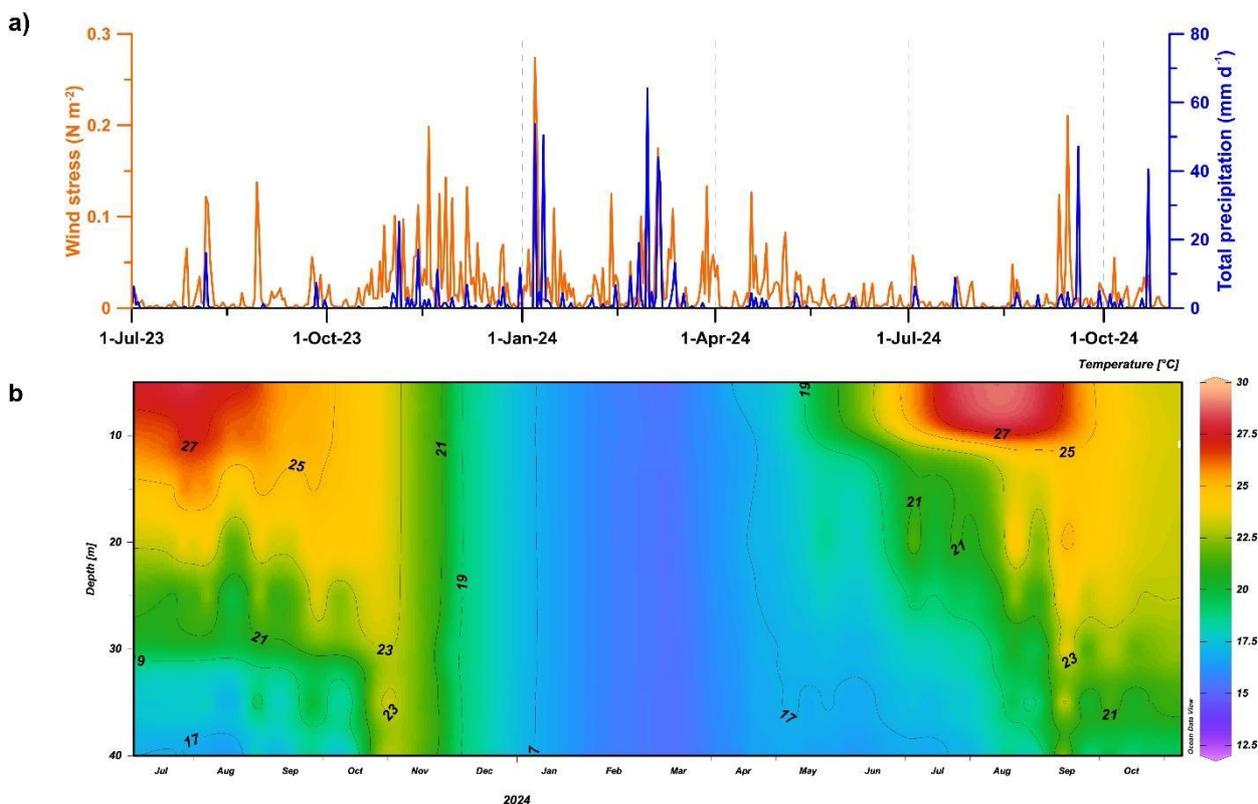


Figura 39. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

AMP Plemmirio

Nel periodo compreso tra gennaio 2021 e gennaio 2025, presso il sito dell'AMP Plemmirio, si osserva una chiara variabilità stagionale del wind stress, con valori generalmente più elevati durante le stagioni autunnale e invernale (Fig. 40). I picchi più intensi si registrano tra la fine del 2021 e l'inizio del 2022, nonché a gennaio 2023 e gennaio 2024, con valori prossimi o superiori a 0,4 N m⁻². I mesi estivi sono invece caratterizzati da wind stress molto ridotto. Le precipitazioni giornaliere mostrano un andamento irregolare ma coerente

con la stagionalità attesa, con eventi intensi concentrati prevalentemente nei mesi autunnali e invernali. Tra gli episodi più rilevanti si segnalano quelli avvenuti all'inizio del 2023 e alla fine del 2024, con picchi che superano i 120 mm/giorno. Complessivamente, si evidenzia una parziale corrispondenza temporale tra gli eventi di wind stress elevato e gli episodi precipitativi più intensi, suggerendo una possibile associazione tra le due variabili durante le fasi di maggiore attività atmosferica.

La variazione della temperatura lungo la colonna d'acqua mostra una evidente ciclicità stagionale nel periodo 2021–inizio 2025 (Fig. 40), con riscaldamenti estivi ben marcati che portano le temperature superficiali a superare i 26 °C, e punte oltre i 28 °C registrate nell'estate del 2024, quando si intensifica la stratificazione e si approfondisce fino a circa 25 m, delineando un termoclino stabile e persistente situato tra 15 e 25 m. Nei mesi invernali (generalmente tra dicembre e marzo) si osserva un rimescolamento completo della colonna d'acqua, con temperature omogenee comprese tra 14 e 16 °C e assenza di stratificazione. Tra gli eventi più significativi si segnala un'anomalia termica particolarmente marcata nell'estate 2023, caratterizzata da temperature elevate che si protraggono più a lungo rispetto agli anni precedenti, con valori >26 °C estesi verticalmente oltre i 20 m per diverse settimane, suggerendo un'intensificazione dei processi di stratificazione e accumulo di calore negli strati superiori, potenzialmente legati a condizioni atmosferiche più stabili o a ondate di calore marine, in un contesto che appare coerente con un progressivo riscaldamento estivo negli anni analizzati.

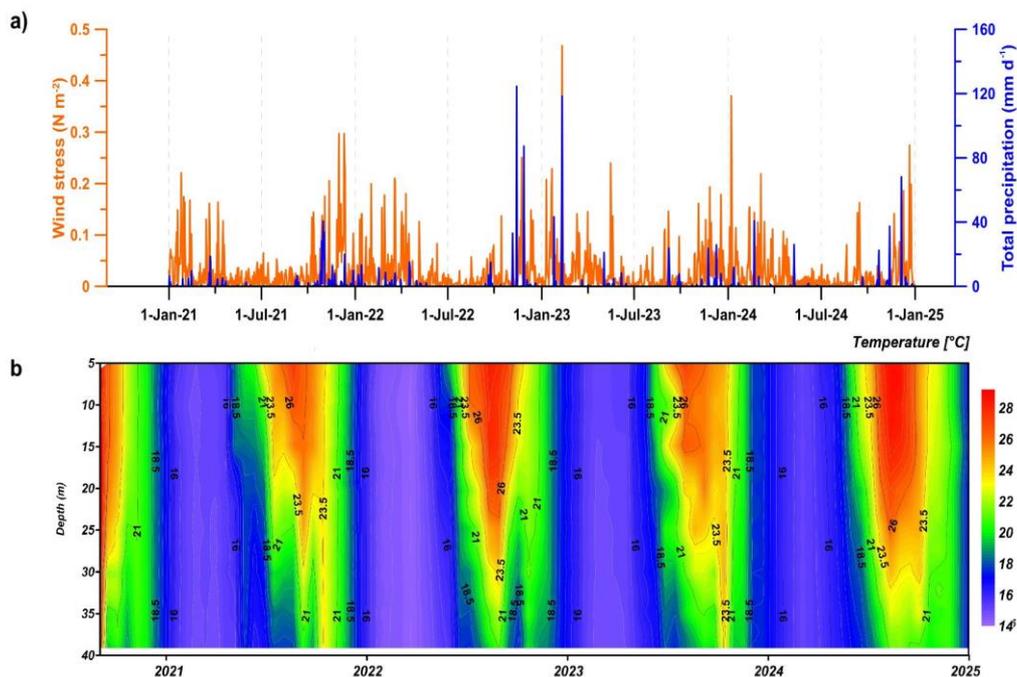


Figura 40. (a) serie temporale di stress del vento (linea arancione) e precipitazioni (linea blu). (b) Hovmöller di Temperatura.

STUTTURA E STATO ECOLOGICO DELLE COMUNITÀ BENTONICHE

L'analisi della struttura e della composizione delle comunità bentoniche dell'AMP Portofino, dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, e dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano ha permesso di caratterizzare gli ecosistemi di scogliera in queste tre aree di studio. Attraverso l'applicazione dei due indici di diversità, l'indice di Shannon e l'indice di Simpson, è stato inoltre possibile valutare lo stato ecologico degli habitat di scogliera.

AMP Portofino

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a giugno 2024, nell'AMP Portofino sono state rilevate un totale di 80 specie bentoniche sessili tra le quali 30 specie vegetali e 50 specie animali. Di queste ultime, il 46% (N=23) è rappresentato da poriferi, il 28% (N=14) da cnidari, il 16% (N=8) da briozoi, il 6% (N=3) da anellidi, e il 4% (N=2) da cordati (Fig. 41).

La media dei valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H') alle quattro profondità indagate, risulta 2,9 (i.e. 10 m: $H'=2,68$; 20 m: $H'=3,08$; 30 m: $H'=2,74$; 40 m: $H'=2,98$), evidenziando un moderato stato ecologico delle comunità di scogliera nell'AMP Portofino (Fig. 42).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano bassi a tutte le profondità indagate (i.e. 10 m: $D'=0,04$; 20 m: $D'=0,01$; 30 m: $D'=0,05$; 40 m: $D'=0,03$), a indicare quindi una buona equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Portofino (Fig. 42).

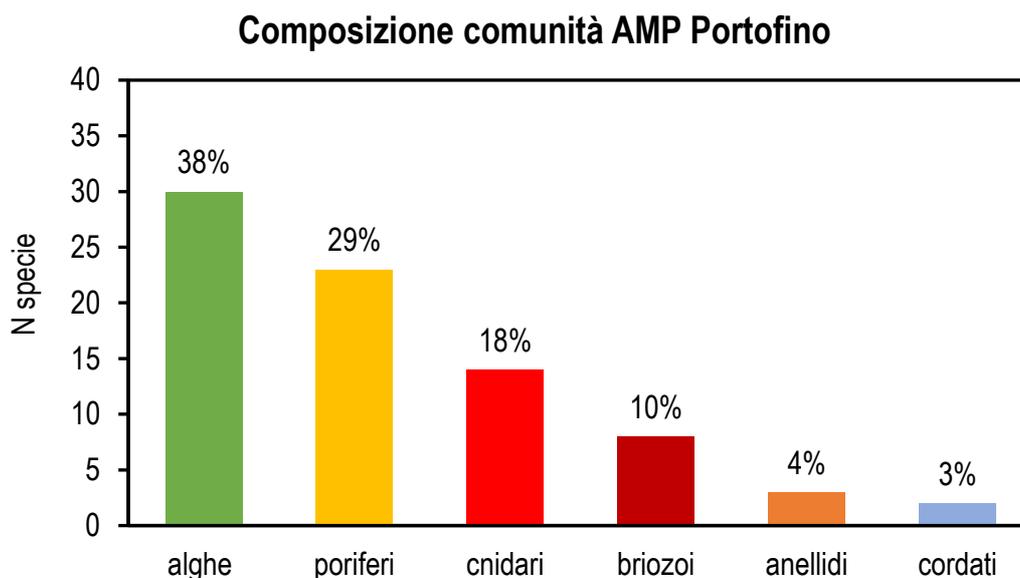


Figura 41. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Portofino. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

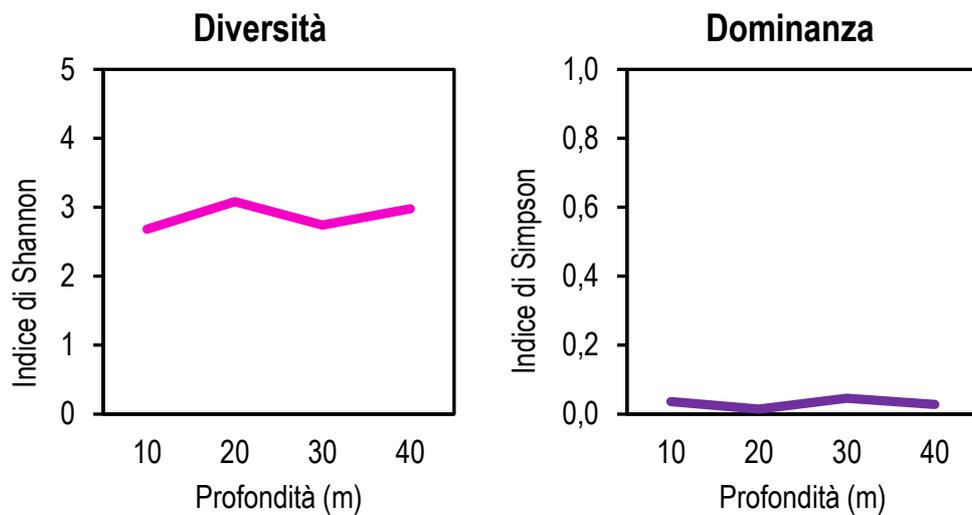


Figura 42. Andamento dell'indice di Shannon (a sinistra) e dell'indice di Simpson (a destra) lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Portofino.

Cambiamento della comunità bentonica nell'AMP Portofino

L'analisi delle corrispondenze (CA) applicata alla matrice dei dati storici di comunità di Portofino ha fornito due assi significativi (test Lebart, $p < 0,05$), che spiegano rispettivamente il 13,77% e il 9,92% della variazione totale (Fig. 43a). Il primo asse, in particolare, rappresenta il gradiente di profondità, mentre il secondo asse rappresenta il gradiente temporale.

Come già evidenziato da Gatti et al. (2017) e nella relazione del progetto Mare Caldo di Montefalcone & Azzola (2020), dagli anni '50 la struttura e la composizione della comunità di Portofino è significativamente cambiata nel tempo a tutte le profondità (Fig. 43a). In particolare, anche i dati raccolti nel 2024 (Fig. 43b) confermano che il cambiamento abbia portato a una nuova conformazione della comunità, che si è ormai stabilizzata in un nuovo stato stabile alternativo per struttura e composizione, che non sembrerebbe poter tornare a quella originale degli anni '50-'70. Un cambiamento che potrebbe quindi essere definito irreversibile.

Tuttavia, per l'ultimo periodo di rilevamento (i.e., 2020 e 2024) i dati si riferiscono ai soli monitoraggi condotti nei siti previsti dal progetto Mare Caldo e sono, quindi, di numero inferiore rispetto ai rilevamenti effettuati negli anni precedenti, rendendo quindi necessari futuri monitoraggi.

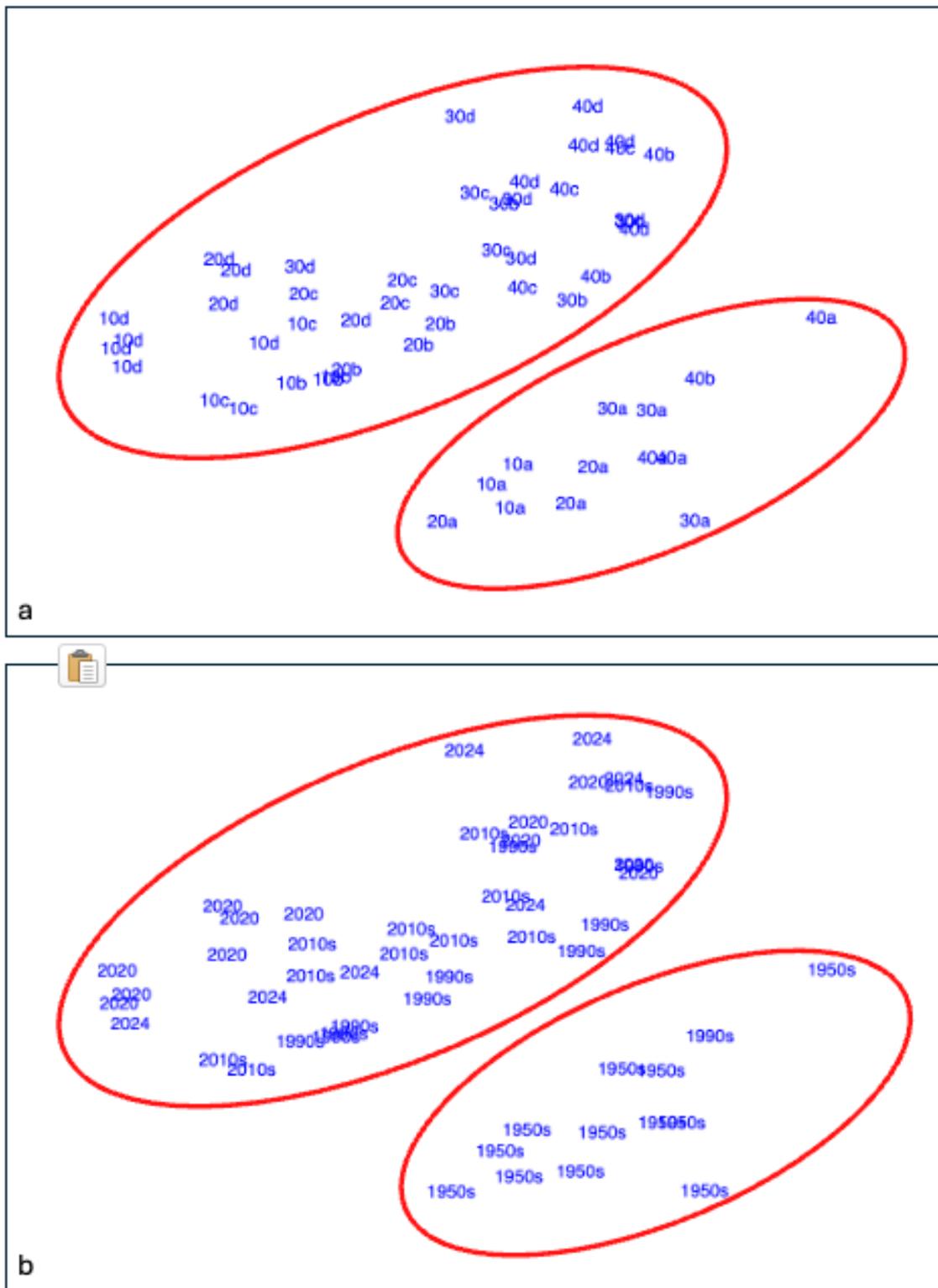


Figura 43. Grafico dell'analisi delle corrispondenze (CA) dove sono messi in evidenza nella figura **a**) i periodi temporali di raccolta dati (a: anni 1950-1970; b: 1980-1990; c: 2000-2010; e d: 2020-2024) e le profondità (10, 20, 30, e 40 m); mentre nella figura **b**) l'anno di raccolta dati per evidenziare in particolare le repliche riferite agli anni 2020 e 2024 dei dati raccolti nell'ambito del progetto Mare Caldo.

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a settembre 2024, nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo sono state rilevate un totale di 48 specie bentoniche sessili tra le quali 21 specie vegetali e 27 specie animali. Di queste ultime, il 41% (N=11) è rappresentato da poriferi, il 33% (N=9) da cnidari, l'11% (N=3) da briozoi, il 7% (N=2) da anellidi, il 4% (N=1) da cordati, e il 4% (N=1) da fanerogame (Fig. 44).

La media dei valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H') alle quattro profondità indagate risulta 2,9 (i.e. 10 m: $H'=2,79$; 20 m: $H'=2,86$; 30 m: $H'=2,84$; 40 m: $H'=3,08$), evidenziando un moderato stato ecologico delle comunità di scogliera nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (Fig. 45).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano bassi a tutte le profondità indagate (i.e. 10 m: $D'=0,02$; 20 m: $D'=0,03$; 30 m: $D'=0,03$; 40 m: $D'=0,03$) a indicare quindi una buona equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (Fig. 45).

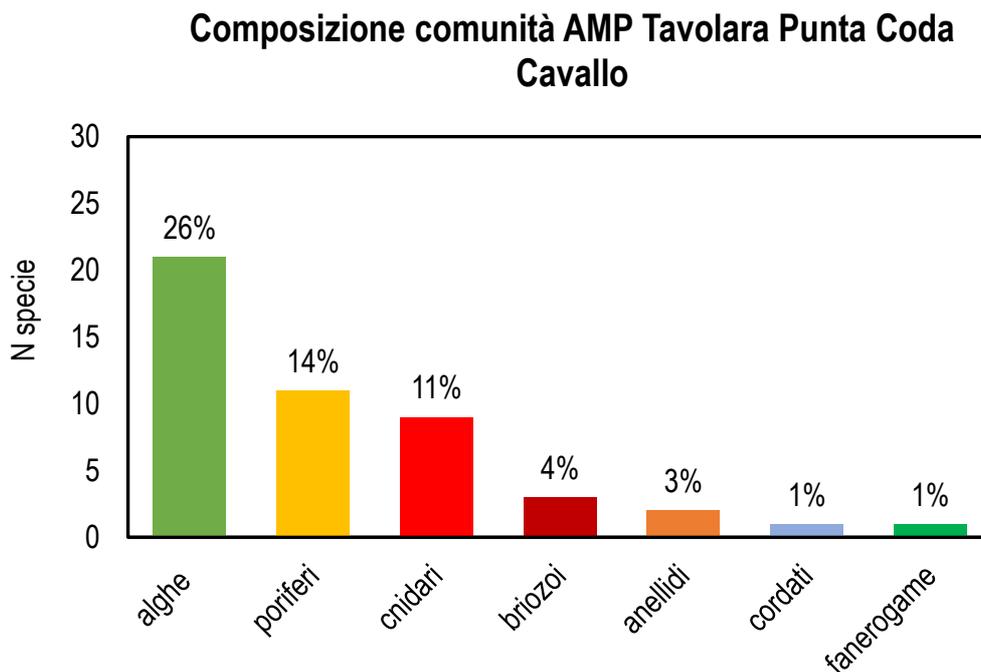


Figura 44. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

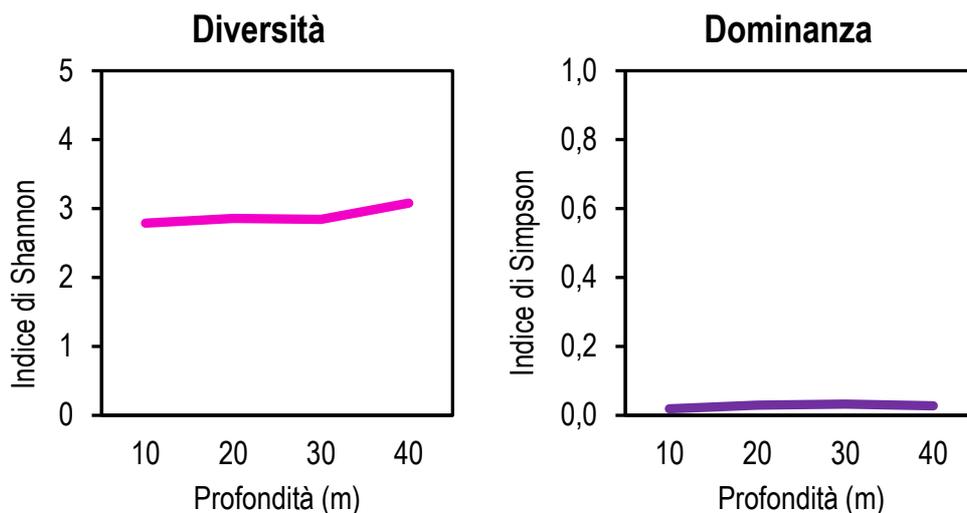


Figura 45. Andamento dell'indice di Shannon (a sinistra) e dell'indice di Simpson (a destra) lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo.

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a giugno 2024, nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano sono state rilevate un totale di 43 specie bentoniche sessili tra le quali 19 specie vegetali e 24 specie animali. Di queste ultime, il 33% (N=9) è rappresentato da briozoi, il 19% (N=5) da poriferi, il 19% (N=5) da cnidari, l'11% (N=3) da anellidi, il 4% (N=1) da cordati, e il 4% (N=1) da fanerogame (Fig. 46).

La media dei valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H') alle quattro profondità indagate, risulta 2,8 (i.e. 10 m: $H'=2,68$; 20 m: $H'=2,71$; 30 m: $H'=3,02$; 40m: $H'=2,71$) evidenziando un moderato stato ecologico delle comunità di scogliera nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (Fig. 47).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano bassi a tutte le profondità indagate (i.e. 10 m: $D'=0,03$; 20 m: $D'=0,04$; 30 m: $D'=0,03$; $D'=0,00$) a indicare quindi una buona equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (Fig. 47).

Composizione comunità AMP Isole di Ventotene e S. Stefano

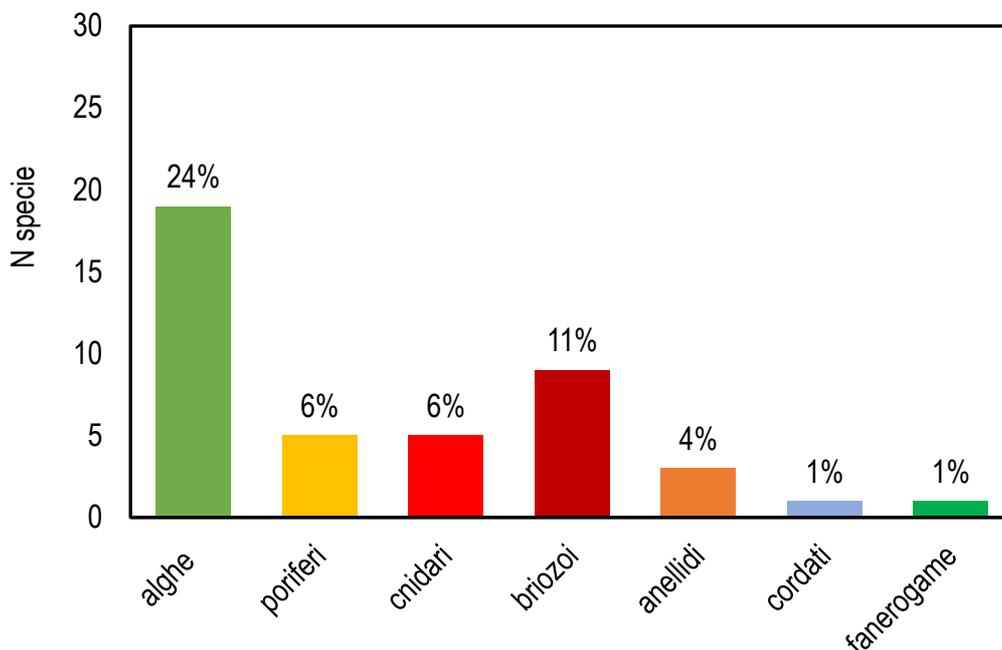


Figura 46. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

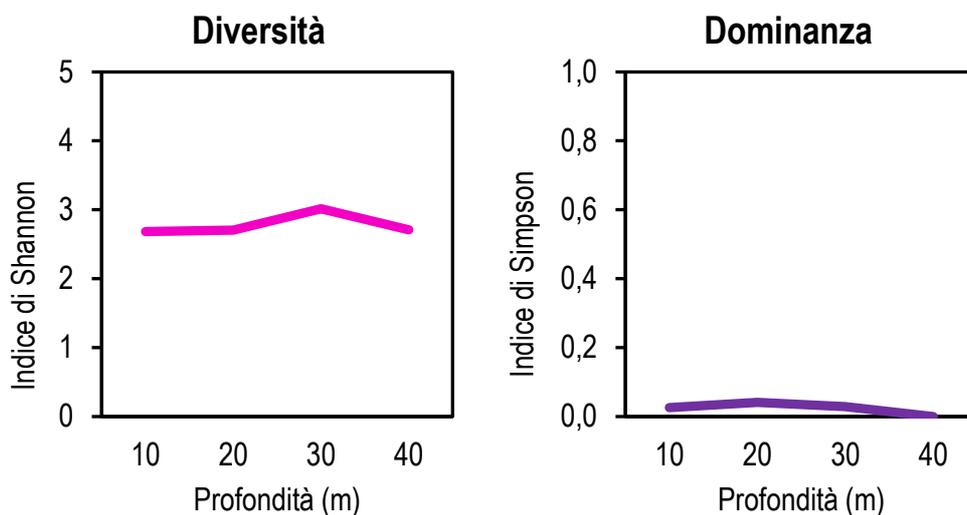


Figura 47. Andamento dell'indice di Shannon (a sinistra) e dell'indice di Simpson (a destra) lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano.

Confronto della struttura e dello stato ecologico delle comunità bentoniche nelle undici aree monitorate

Il confronto della composizione e della struttura delle comunità bentoniche nelle undici aree di studio monitorate nell'ambito dei cinque anni di progetto Mare Caldo ha permesso di evidenziare come i maggiori valori di biodiversità, in termini di numero di specie bentoniche sessili, siano stati rilevati nell'AMP Capo Carbonara (N=84), seguita dall'AMP Portofino (N=80), dall'AMP Torre Guaceto (N=77), dall'AMP Plemmirio (N=70), dall'Isola d'Elba (N=70), AMP Isole Tremiti (N=69), AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (N=48), AMP Capo Milazzo (N=44), AMP Miramare (N=43), AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (N=43), e AMP Cinque Terre (N=39). I gruppi più rappresentati in termini di numero di specie sono risultati le alghe, i poriferi, gli cnidari e i briozoi (Fig. 48, 49).

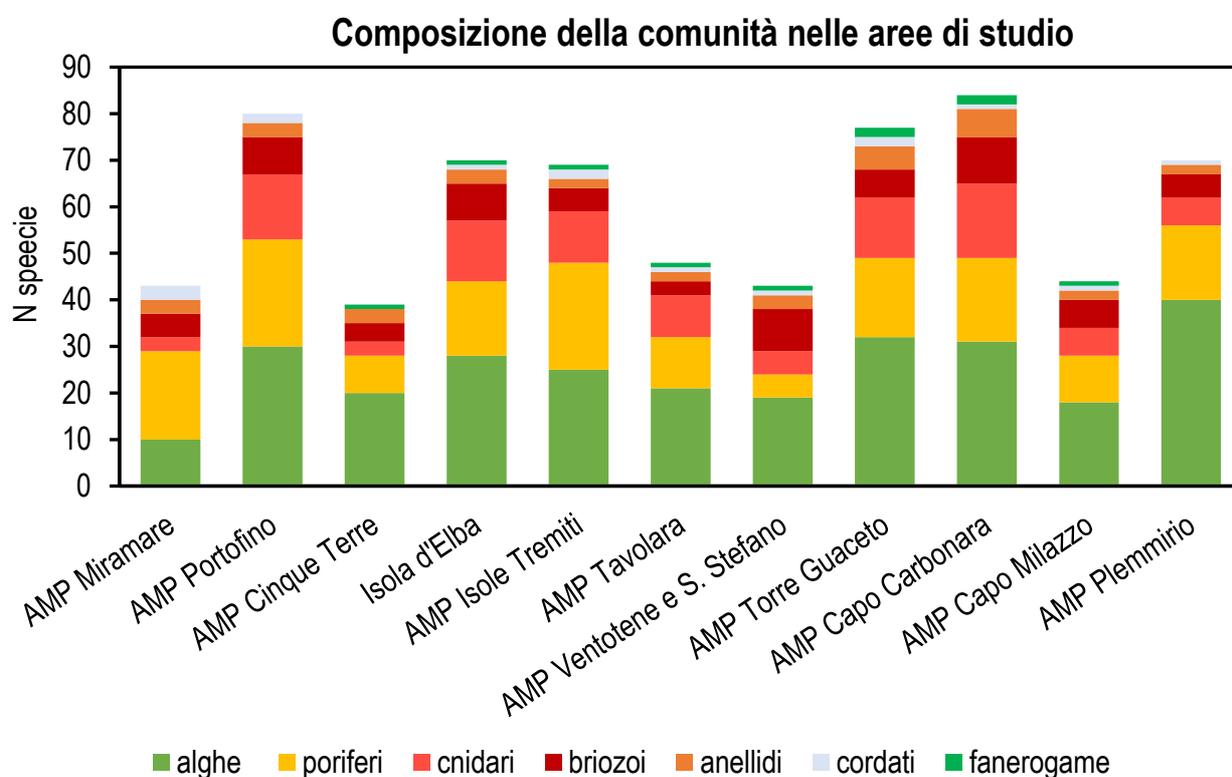


Figura 48. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità bentonica nelle undici aree di studio indagate nei cinque anni di progetto Mare Caldo.

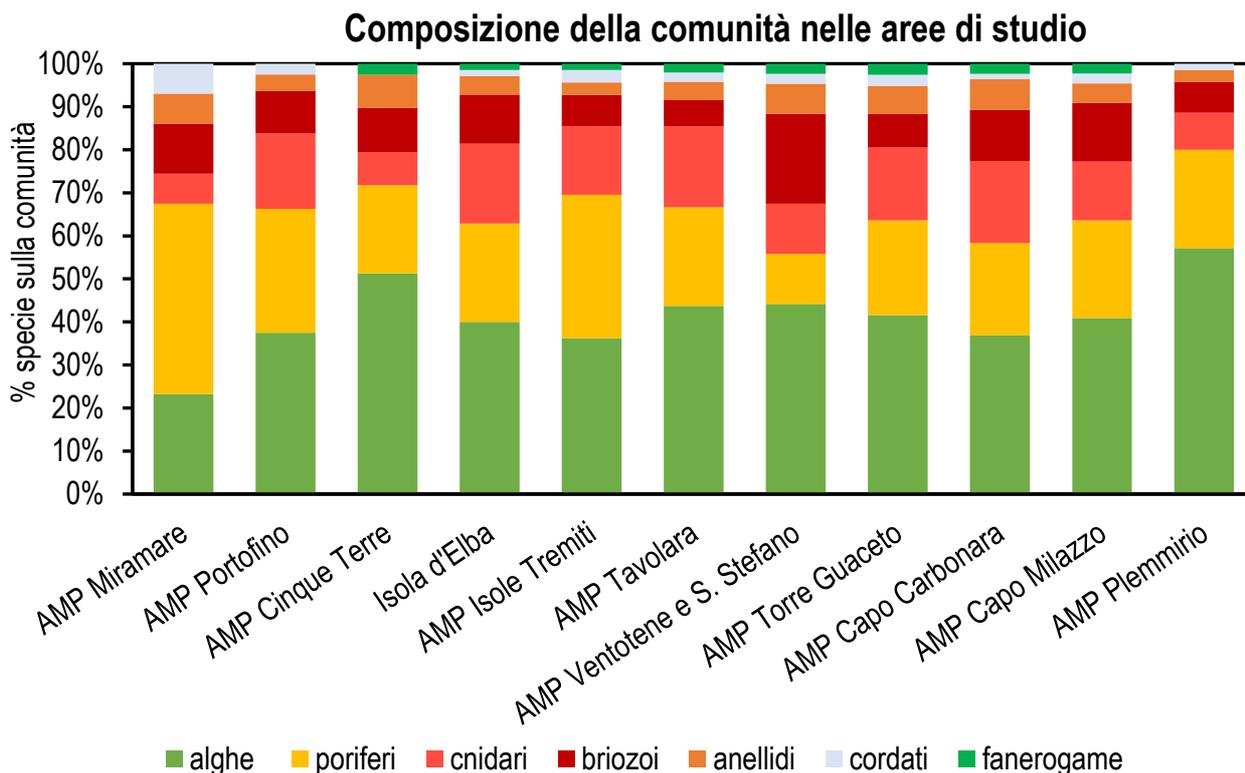


Figura 49. Percentuale di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità bentonica nelle undici aree di studio indagate nei cinque anni di progetto Mare Caldo.

I valori dell'indice di diversità di Shannon indicano un elevato stato ecologico per l'AMP Capo Carbonara, mentre un buono stato ecologico per l'AMP Miramare, l'AMP Torre Guaceto e l'AMP Plemmirio. Una moderata qualità ecologica è stata invece rilevata per l'AMP Portofino, l'AMP Cinque Terre (che sono sotto-campionate rispetto alle altre aree, avendo monitorato solo due siti invece di quattro) e per l'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, l'AMP Isole Tremiti, l'AMP Isole Ventotene e Santo Stefano, e l'AMP Capo Milazzo. Infine, per l'Isola d'Elba è stato rilevato uno scarso stato ecologico (Fig. 50).

I valori dell'indice di Dominanza confermano un minor stato ecologico delle comunità dell'Isola d'Elba rispetto a tutte le altre aree indagate. Le comunità in quest'area sono infatti fortemente dominate da alcune specie e, di conseguenza, risultano essere meno resilienti (Fig. 51). Viceversa, a fronte di un impatto, le comunità delle altre aree di studio con bassi valori di dominanza sono meno esposte al rischio di perdita di biodiversità (nel caso di scomparsa delle specie meno abbondanti) e di perdita di funzioni ecosistemiche (nel caso di scomparsa delle specie cospicue).

Diversità nelle comunità delle undici aree monitorate

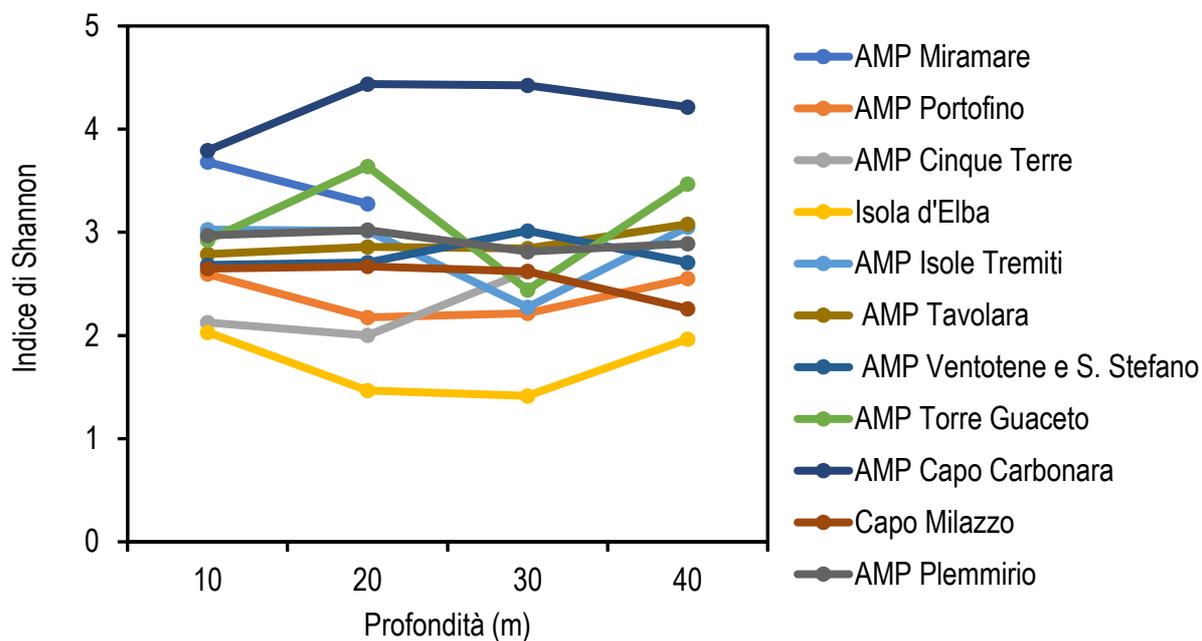


Figura 50. Grafico dell'andamento dell'Indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nelle undici aree monitorate.

Dominanza nelle comunità delle undici aree monitorate

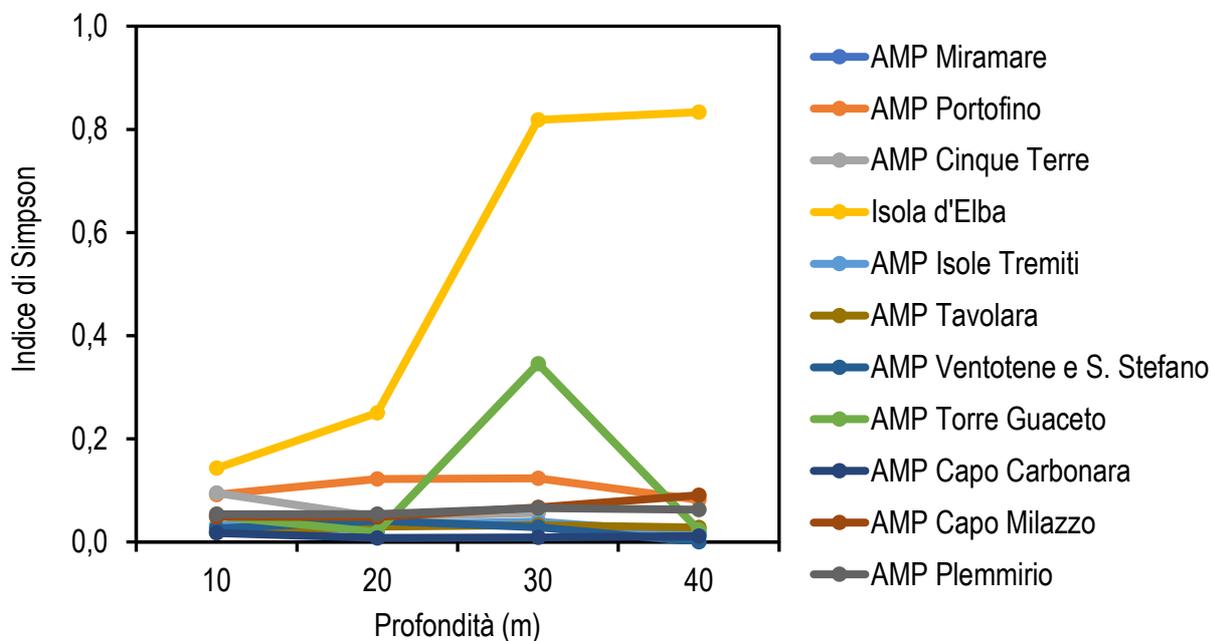


Figura 51. Grafico dell'andamento dell'Indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nelle undici aree monitorate.

MONITORAGGIO DELLE MORIE DI MASSA

Nel corso dei monitoraggi condotti nei cinque anni del progetto Mare Caldo in nessuna delle aree di studio sono stati rilevati eventi eccezionali di morie di massa riconducibili ad anomalie termiche verificatesi dal 2020 al 2024.

Tuttavia, per ogni area di studio, l'analisi dei dati sulle colonie (o individui) che mostravano segni di necrosi o sbiancamento ha permesso di stabilire quali siano le specie maggiormente colpite dal riscaldamento e il relativo grado di impatto (i.e. basso, moderato, severo).

AMP Portofino

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target nell'AMP Portofino (Tab. 3) hanno evidenziato alcuni effetti negativi dell'innalzamento delle temperature, seppur con un basso grado di impatto per la maggior parte delle specie monitorate alle diverse profondità. Gli organismi più sensibili sono risultati le specie di gorgonie *Eunicella cavolini* e *Paramuricea clavata*, che in quest'area di studio formano ricchi popolamenti. Per *Paramuricea clavata*, in particolare nel sito Torretta a 25 m di profondità, è stato registrato un grado di impatto severo con il 94% delle colonie monitorate che mostravano segni di necrosi. Inoltre, le gorgonie sono apparse abbondantemente coperte da mucillagine, che in alcuni casi arrivava a coprire fino all'80% delle colonie.

Un basso grado di impatto è stato invece rilevato per le alghe corallinacee incrostanti che hanno mostrato una percentuale di sbiancamento medio del 10%.

Rispetto ai monitoraggi condotti nel 2020 sugli stessi siti (Montefalcone & Azzola 2020), i segnali di mortalità per la specie *Paramuricea clavata* sembrano essere aumentati dal 5% circa al 35% (Fig. 53). Al contrario, per la specie *Eunicella cavolini* la percentuale di impatto sul totale delle colonie monitorate nel 2020 e nel 2024 è rimasta di circa 15% (Fig. 54). Allo stesso modo non si è osservato un cambiamento nella percentuale di sbiancamento delle alghe corallinacee incrostanti, che è sempre risultata pari a circa il 10% (Fig. 55).

Tabella 3. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Portofino. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = 60%.

Sito	Specie	Prof (m)	N colonie impattate	N colonie non impattate	% colonie impattate	Grado di impatto
Isuela	<i>Cladocora caespitosa</i>	35	0	1	0	B
Torretta	<i>Eunicella cavolini</i>	20	2	6	25	B

Isuela	<i>Eunicella cavolini</i>	25	1	9	10	B
Torretta	<i>Eunicella cavolini</i>	25	1	11	8	B
Isuela	<i>Eunicella cavolini</i>	30	2	18	10	B
Isuela	<i>Eunicella cavolini</i>	35	1	15	6	B
Torretta	<i>Eunicella cavolini</i>	45	4	8	33	M
Torretta	<i>Eunicella singularis</i>	37	0	3	0	B
Isuela	<i>Paramuricea clavata</i>	25	0	3	0	B
Torretta	<i>Paramuricea clavata</i>	25	50	3	94	S
Torretta	<i>Paramuricea clavata</i>	30	40	43	48	M
Isuela	<i>Paramuricea clavata</i>	35	12	14	46	M
Isuela	<i>Paramuricea clavata</i>	40	13	85	13	B
Torretta	<i>Paramuricea clavata</i>	40	40	70	36	M
Isuela	<i>Paramuricea clavata</i>	50	8	89	8	B
Isuela	<i>Savalia savaglia</i>	45	1	1	50	M

Sito	Specie	Prof (m)	Area impattata (cm ²)	Area non impattata (cm ²)	% area impattata	Grado di impatto
Torretta	Corallinacee incrostanti	5	10	90	10	B
Torretta	Corallinacee incrostanti	24	5	95	5	B
Isuela	Corallinacee incrostanti	25	10	90	10	B
Isuela	Corallinacee incrostanti	32	15	85	15	B

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo (Tab. 4) hanno evidenziato un generale basso o moderato impatto attribuibile agli effetti dell'innalzamento delle temperature su alcune specie più vulnerabili.

La specie che ha mostrato i maggiori segnali di impatto è risultata la gorgonia *Eunicella cavolini* per la quale il 20% delle colonie monitorate mostravano segnali di necrosi, seguita dalla specie *Paramuricea clavata* con il 15% circa.

L'unica specie che ha mostrato un grado di impatto severo è il corallo mediterraneo *Cladocora caespitosa*, per il quale tuttavia sono state osserate solo due colonie.

Come per l'AMP Portofino, anche in quest'area di studio è stato rilevato un generale basso grado di impatto per le alghe corallinacee incrostanti (Tab. 4).

Tabella 4. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = 60%.

Sito	Specie	Prof (m)	N colonie impattate	N colonie non impattate	% colonie impattate	Grado di impatto
Punta del Papa	<i>Balanophyllia europaea</i>	5	0	10	0	B
Teddja Liscia	<i>Balanophyllia europaea</i>	5	3	30	9	B
Punta del Papa	<i>Balanophyllia europaea</i>	10	0	6	0	B
Teddja Liscia	<i>Balanophyllia europaea</i>	10	0	8	0	B
Punta Arresto	<i>Balanophyllia europaea</i>	15	2	10	17	B
Teddja Liscia	<i>Balanophyllia europaea</i>	20	1	3	25	B
Punta del Papa	<i>Balanophyllia europaea</i>	22	0	2	0	B
Punta Arresto	<i>Balanophyllia europaea</i>	25	0	6	0	B
Punta del Papa	<i>Cladocora caespitosa</i>	17	1	0	100	S
Punta Arresto	<i>Cladocora caespitosa</i>	20	1	0	100	S
Punta Arresto	<i>Cladocora caespitosa</i>	24	1	1	50	M
Punta del Papa	<i>Cladocora caespitosa</i>	24	2	4	33	M
Punta del Papa	<i>Cladocora caespitosa</i>	26	0	1	0	B
Teddja Liscia	<i>Eunicella cavolini</i>	12	2	6	25	B
Punta Arresto	<i>Eunicella cavolini</i>	20	0	4	0	B
Teddja Liscia	<i>Eunicella cavolini</i>	22	0	3	0	B
Punta Arresto	<i>Eunicella cavolini</i>	24	1	3	25	B
Punta del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	25	2	5	29	B
Secca del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	25	0	2	0	B
Punta Arresto	<i>Eunicella cavolini</i>	27	2	2	50	M
Punta del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	27	3	18	14	B
Teddja Liscia	<i>Eunicella cavolini</i>	27	3	6	33	M
Punta del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	30	3	3	50	M
Secca del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	30	0	8	0	B
Punta del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	35	0	6	0	B
Secca del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	35	0	4	0	B
Secca del Papa	<i>Eunicella cavolini</i>	43	2	4	33	M
Punta del Papa	<i>Eunicella singularis</i>	33	0	3	0	B
Punta del Papa	<i>Eunicella singularis</i>	37	0	1	0	B
Secca del Papa	<i>Eunicella singularis</i>	40	0	2	0	B
Secca del Papa	<i>Eunicella singularis</i>	45	0	3	0	B
Secca del Papa	<i>Paramuricea clavata</i>	30	2	4	33	M
Secca del Papa	<i>Paramuricea clavata</i>	35	0	10	0	B
Secca del Papa	<i>Paramuricea clavata</i>	40	1	7	13	B
Secca del Papa	<i>Paramuricea clavata</i>	45	1	4	20	B

Sito	Specie	Prof (m)	Area impattata (cm ²)	Area non impattata (cm ²)	% area impattata	Grado di impatto
Punta Arresto	Corallinacee incrostanti	20	0	100	0	B
Punta Arresto	Corallinacee incrostanti	26	5	95	5	B
Punta del Papa	Corallinacee incrostanti	25	5	95	5	B
Punta del Papa	Corallinacee incrostanti	28	5	95	5	B
Punta del Papa	Corallinacee incrostanti	35	0	100	0	B
Secca del Papa	Corallinacee incrostanti	45	10	90	10	B

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (Tab. 5) hanno evidenziato un generale moderato impatto attribuibile agli effetti dell'innalzamento delle temperature su alcune specie più vulnerabili.

La specie che ha mostrato i maggiori segnali di impatto è risultata *Cladocora caespitosa*, per la quale il circa 50% delle colonie monitorate ha mostrato segnali di sbiancamento e nel sito Punta dell'Arco ha raggiunto l'80% delle colonie impattate, risultante in un grado di impatto severo (Tab. 5).

La specie di gorgonia *Eunicella cavolini* ha invece mostrato un basso grado di impatto (circa il 20%), così come la specie *Paramuricea clavata* per la quale su 30 colonie monitorate nessuna mostrava segnali di impatto (Tab. 5).

Come per le altre aree di studio indagate nel 2024, anche in quest'area è stato rilevato un generale basso grado di impatto per le alghe corallinacee incrostanti (Tab. 5).

Tabella 5. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano. Il grado d'impatto è valutato in base alla percentuale di colonie riportanti segnali di mortalità: grado di impatto basso (B) = 10-30%; moderato (M) = 30-60%; severo (S) = 60%.

Sito	Specie	Prof (m)	N colonie impattate	N colonie non impattate	% colonie impattate	Grado di impatto
Punta dell'Arco	<i>Balanophyllia europaea</i>	10	3	1	75	S
Punta dell'Arco	<i>Balanophyllia europaea</i>	3	2	10	17	B
Punta Cannuccia	<i>Cladocora caespitosa</i>	10	4	4	50	M
Punta dell'Arco	<i>Cladocora caespitosa</i>	10	9	2	82	S
Molara	<i>Cladocora caespitosa</i>	15	34	34	50	M
Punta dell'Arco	<i>Cladocora caespitosa</i>	18	1	1	50	M

Punta Cannuccia	<i>Cladocora caespitosa</i>	20	2	2	50	M
Punta Cannuccia	<i>Eunicella cavolini</i>	20	4	1	80	S
Punta dell'Arco	<i>Eunicella cavolini</i>	20	1	9	10	B
Punta dell'Arco	<i>Eunicella cavolini</i>	26	1	21	5	B
Punta Cannuccia	<i>Eunicella cavolini</i>	27	0	18	0	B
Punta Cannuccia	<i>Eunicella cavolini</i>	30	1	3	25	B
Punta dell'Arco	<i>Eunicella cavolini</i>	30	5	10	33	M
Secchitella	<i>Eunicella cavolini</i>	30	1	8	11	B
Punta dell'Arco	<i>Eunicella cavolini</i>	35	0	4	0	B
Secchitella	<i>Eunicella cavolini</i>	35	2	15	12	B
Punta Cannuccia	<i>Paramuricea clavata</i>	30	0	30	0	B

Sito	Specie	Prof (m)	Area impattata (cm ²)	Area non impattata (cm ²)	% area impattata	Grado di impatto
Molara	Corallinacee incrostanti	13	5	95	5	B
Molara	Corallinacee incrostanti	18	5	95	5	B
Molara	Corallinacee incrostanti	20	5	95	5	B
Punta Cannuccia	Corallinacee incrostanti	25	10	90	10	B
Punta Cannuccia	Corallinacee incrostanti	32	10	90	10	B
Punta Cannuccia	Corallinacee incrostanti	35	5	95	5	B
Punta dell'Arco	Corallinacee incrostanti	3	5	95	5	B
Punta dell'Arco	Corallinacee incrostanti	10	5	95	5	B
Punta dell'Arco	Corallinacee incrostanti	25	10	90	10	B
Punta dell'Arco	Corallinacee incrostanti	35	0	100	0	B
Secchitella	Corallinacee incrostanti	20	0	100	0	B
Secchitella	Corallinacee incrostanti	30	5	95	5	B
Secchitella	Corallinacee incrostanti	35	20	80	20	B

Confronto delle aree monitorate nell'ambito dei cinque anni di progetto

Nell'ambito dei cinque anni di progetto, considerando tutte le aree monitorate, indipendentemente dal diverso livello di protezione e dalla diversa latitudine, sono stati sempre osservati fenomeni di morie su colonie animali e organismi vegetali in tutte le aree di studio. Per la specie *Balanophyllia europea* il maggior grado di impatto è stato registrato nell'AMP Torre Guaceto nel 2021 (Fig. 52). L'AMP Capo Carbonara è risultata, invece, nel 2021 l'area dove sono stati rilevati i maggiori segnali di sofferenza sulle colonie del madreporario *Cladocora caespitosa*, per il quale tutte le colonie riportavano segnali di sbiancamento o necrosi (Fig. 52). Allo stesso modo in quest'area sono stati rilevati i maggiori segnali di impatto per le colonie di *Paramuricea clavata* (Fig. 53). Per la specie *Eunicella cavolini* ed *Eunicella singularis*, invece, la maggior percentuale di impatto è stata

osservata nell'AMP Capo Milazzo nel 2023 (Fig. 54). Per quanto riguarda le alghe calcaree incrostanti, i maggiori impatti sono stati osservati nell'AMP Capo Carbonara nel 2021, all'Isola d'Elba nel 2021 e nell'AMP Torre Guaceto nel 2021 (Fig. 55).

In generale, quindi, nel 2024 non sono stati rilevati segnali di impatto maggiori rispetto agli anni precedenti. Ovviamente dati provenienti da diverse aree raccolti in anni diversi risultano solo parzialmente confrontabili, ma possono rappresentare una *baseline* per futuri monitoraggi nel tempo.

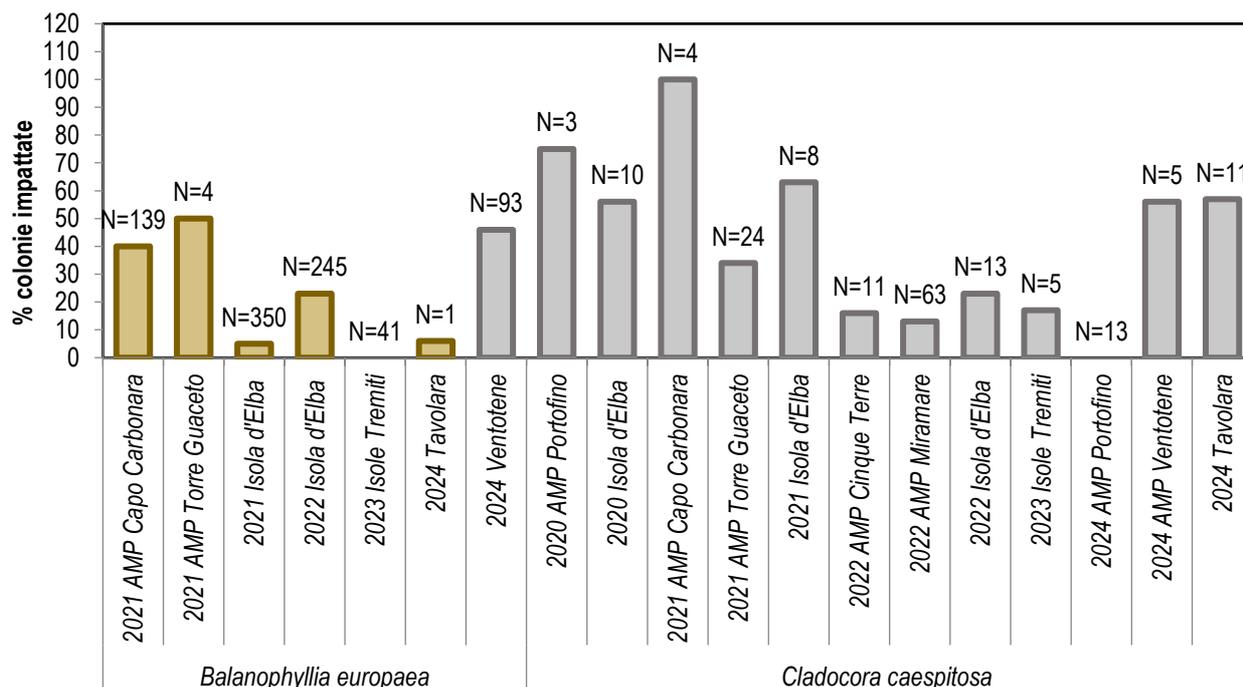


Figura 52. Percentuale (%) di colonie o individui di sclerattinie riportanti segni di sbiancamento.

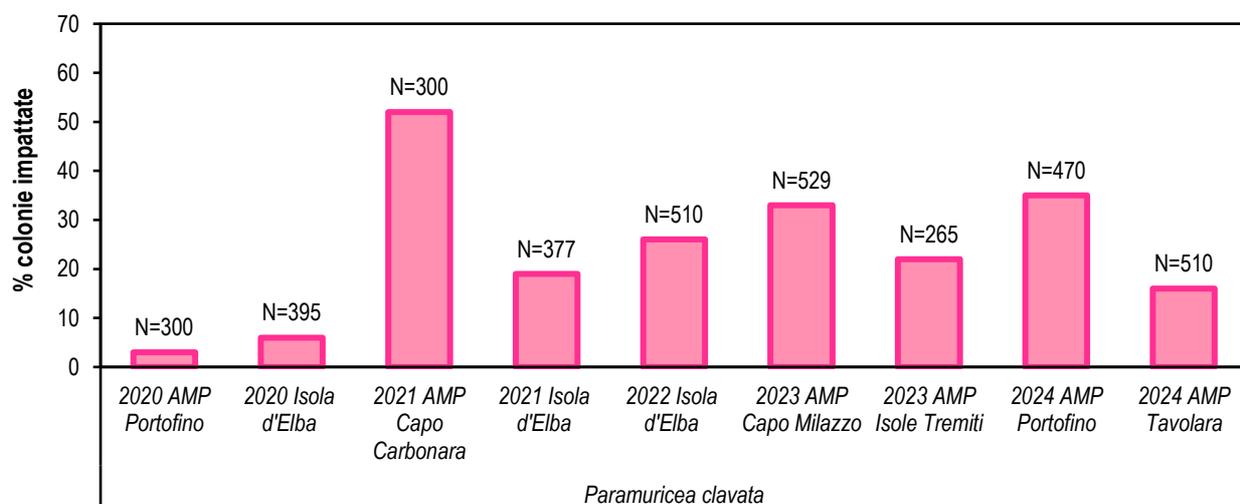


Figura 53. Percentuale (%) di colonie di gorgonie della specie *Paramuricea clavata* riportanti segni di necrosi.

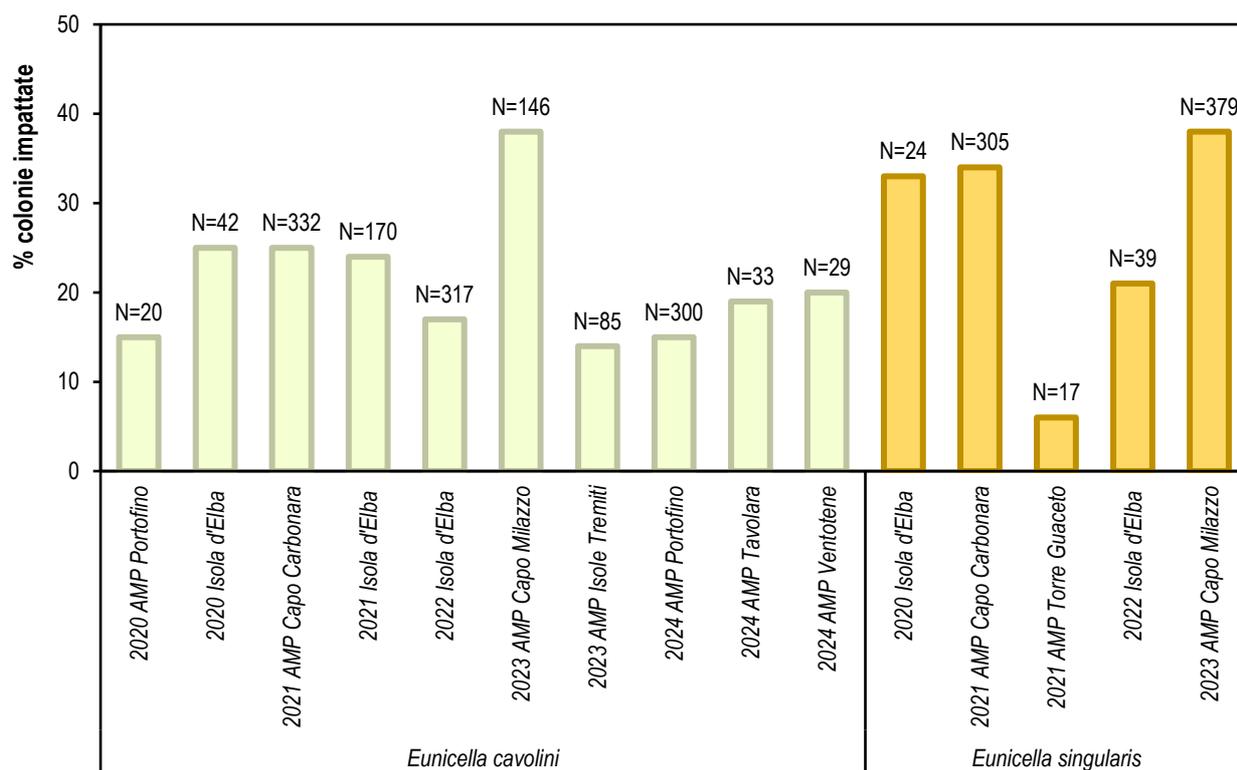


Figura 54. Percentuale (%) di colonie di gorgonie del genere *Eunicella* riportanti segni di necrosi.

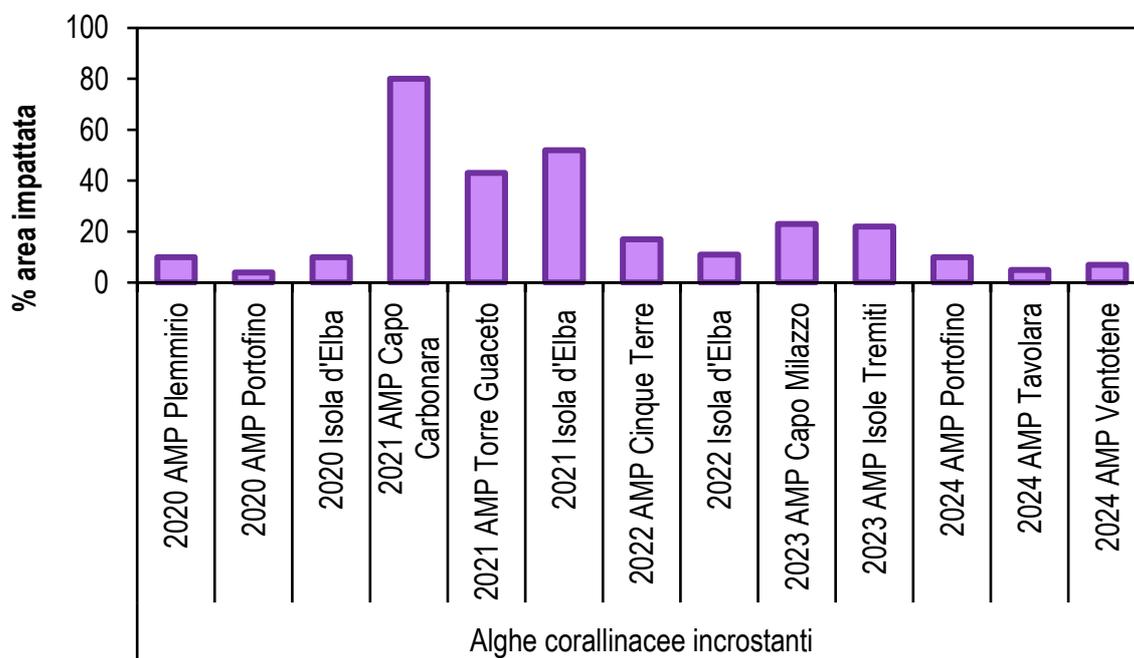


Figura 55. Percentuale (%) di alghe incrostanti sbiancate nelle aree di monitoraggio.

MONITORAGGIO DELLE SPECIE TERMOFILE

AMP Portofino

Nell'ambito dei monitoraggi del quinto anno di progetto Mare Caldo nell'AMP Portofino sono state rilevate un totale di 6 specie termofile, di cui 1 aliena (~ 17%) e 5 native (~ 83%) (Tab. 6).

Rispetto ai monitoraggi condotti nel 2020 sui medesimi siti (Montefalcone & Azzola 2020), nei presenti rilevamenti non sono state rilevate la specie ittica *Mycteroperca rubra* e l'alga *Pseudochlorodesmis furcellata*, entrambe native; al contrario, sono state osservate le specie di echinodermi *Hacelia attenuata* e *Ophidiaster ophidianus*.

Tabella 6. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Portofino. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza (1,2,3)	Status
Torretta	<i>Caulerpa cylindracea</i>	10	2	A
Torretta	<i>Caulerpa cylindracea</i>	19	1	A
Isuela	<i>Hacelia attenuata</i>	40	2	N
Isuela	<i>Ophidiaster ophidianus</i>	37	2	N
Isuela	<i>Sphyraena viridensis</i>	5	3	N
Torretta	<i>Sphyraena viridensis</i>	18	3	N
Isuela	<i>Thalassoma pavo</i>	15	3	N
Torretta	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	5	1	N

AMP Tavolara Punta Coda Cavallo

Nell'ambito dei monitoraggi del quinto anno di progetto Mare Caldo nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo sono state rilevate un totale di 9 specie termofile, di cui 1 aliena (~ 11%) e 8 native (~ 89%) (Tab. 7).

Tabella 7. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza (1,2,3)	Status
Secca del Papa	<i>Balistes capriscus</i>	25	1	N
Punta del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	15	1	A
Teddja Liscia	<i>Caulerpa cylindracea</i>	16	2	A
Punta del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	1	A
Punta Arresto	<i>Caulerpa cylindracea</i>	23	1	A
Punta del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	23	2	A

Punta del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	25	3	A
Punta Arresto	<i>Caulerpa cylindracea</i>	26	2	A
Teddja Liscia	<i>Caulerpa cylindracea</i>	28	2	A
Punta Arresto	<i>Caulerpa cylindracea</i>	30	1	A
Punta del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	30	3	A
Secca del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	30	1	A
Punta del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	35	2	A
Secca del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	43	1	A
Secca del Papa	<i>Caulerpa cylindracea</i>	45	2	A
Punta del Papa	<i>Caulerpa prolifera</i>	15	1	N
Punta del Papa	<i>Caulerpa prolifera</i>	19	2	N
Teddja Liscia	<i>Caulerpa prolifera</i>	19	2	N
Punta del Papa	<i>Caulerpa prolifera</i>	25	2	N
Teddja Liscia	<i>Caulerpa prolifera</i>	25	1	N
Punta Arresto	<i>Caulerpa prolifera</i>	26	2	N
Punta del Papa	<i>Caulerpa prolifera</i>	28	1	N
Teddja Liscia	<i>Caulerpa prolifera</i>	28	1	N
Teddja Liscia	<i>Caulerpa prolifera</i>	28	2	N
Punta Arresto	<i>Caulerpa prolifera</i>	30	3	N
Secca del Papa	<i>Caulerpa prolifera</i>	35	2	A
Punta Arresto	<i>Dasycladus vermicularis</i>	21	1	N
Punta del Papa	<i>Epinephelus costae</i>	15	1	N
Teddja Liscia	<i>Hacelia attenuata</i>	16	1	N
Punta del Papa	<i>Hacelia attenuata</i>	17	1	N
Secca del Papa	<i>Hacelia attenuata</i>	25	1	N
Punta del Papa	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	5	1	N
Punta del Papa	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	25	1	N
Punta Arresto	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	26	1	N
Secca del Papa	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	43	1	N
Punta Arresto	<i>Sparisoma cretense</i>	14	3	N
Punta del Papa	<i>Thalassoma pavo</i>	5	3	N
Teddja Liscia	<i>Thalassoma pavo</i>	5	2	N
Punta Arresto	<i>Thalassoma pavo</i>	6	2	N
Teddja Liscia	<i>Thalassoma pavo</i>	9	1	N
Punta del Papa	<i>Thalassoma pavo</i>	10	1	N
Teddja Liscia	<i>Thalassoma pavo</i>	18	2	N
Punta del Papa	<i>Thalassoma pavo</i>	20	2	N
Secca del Papa	<i>Thalassoma pavo</i>	24	3	N
Teddja Liscia	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	4	1	N

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

Nell'ambito dei monitoraggi del quarto anno di progetto Mare Caldo nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano sono state rilevate un totale di 10 specie termofile, di cui 1 aliena (10%) e 9 native (90%) (Tab. 8).

Tabella 8. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Sito	Specie	Prof (m)	Abbondanza (1,2,3)	Status
Punta Cannucce	<i>Caulerpa cylindracea</i>	4	1	A
Molara	<i>Caulerpa cylindracea</i>	6	1	A
Punta Cannucce	<i>Caulerpa cylindracea</i>	6	1	A
Secchitella	<i>Caulerpa cylindracea</i>	20	1	A
Punta dell'Arco	<i>Caulerpa cylindracea</i>	21	1	A
Punta Cannucce	<i>Caulerpa cylindracea</i>	22	2	A
Punta Cannucce	<i>Caulerpa cylindracea</i>	27	1	A
Secchitella	<i>Caulerpa cylindracea</i>	40	1	A
Punta dell'Arco	<i>Centrostephanus longispinus</i>	23	1	N
Punta Cannucce	<i>Centrostephanus longispinus</i>	28	1	N
Punta dell'Arco	<i>Centrostephanus longispinus</i>	28	1	N
Punta Cannucce	<i>Centrostephanus longispinus</i>	38	1	N
Punta dell'Arco	<i>Centrostephanus longispinus</i>	38	1	N
Secchitella	<i>Centrostephanus longispinus</i>	40	1	N
Secchitella	<i>Centrostephanus longispinus</i>	45	1	N
Punta Cannucce	<i>Centrostephanus longispinus</i>	48	1	N
Punta Cannucce	<i>Epinephelus costae</i>	28	1	N
Molara	<i>Hacelia attenuata</i>	16	2	N
Punta dell'Arco	<i>Hacelia attenuata</i>	23	1	N
Punta Cannucce	<i>Hacelia attenuata</i>	29	1	N
Punta dell'Arco	<i>Hacelia attenuata</i>	30	1	N
Punta Cannucce	<i>Hacelia attenuata</i>	32	1	N
Punta dell'Arco	<i>Hacelia attenuata</i>	38	1	N
Punta Cannucce	<i>Hacelia attenuata</i>	40	1	N
Punta Cannucce	<i>Hermodice carunculata</i>	13	1	N
Molara	<i>Hermodice carunculata</i>	15	3	N
Punta Cannucce	<i>Ophidiaster ophidianus</i>	6	2	N
Molara	<i>Ophidiaster ophidianus</i>	15	1	N
Molara	<i>Ophidiaster ophidianus</i>	20	1	N
Punta dell'Arco	<i>Ophidiaster ophidianus</i>	20	1	N
Punta Cannucce	<i>Ophidiaster ophidianus</i>	30	2	N
Punta Cannucce	<i>Sparisoma cretense</i>	4	2	N
Punta dell'Arco	<i>Sparisoma cretense</i>	6	5	N
Molara	<i>Sparisoma cretense</i>	15	2	N

Molara	<i>Sphyaena viridensis</i>	10	1	N
Punta dell'Arco	<i>Sphyaena viridensis</i>	14	20	N
Molara	<i>Sphyaena viridensis</i>	15	1	N
Secchitella	<i>Sphyaena viridensis</i>	18	3	N
Punta dell'Arco	<i>Thalassoma pavo</i>	3	2	N
Punta Cannucce	<i>Thalassoma pavo</i>	6	3	N
Punta dell'Arco	<i>Thalassoma pavo</i>	10	1	N
Molara	<i>Thalassoma pavo</i>	15	8	N
Punta dell'Arco	<i>Thalassoma pavo</i>	16	2	N
Punta dell'Arco	<i>Thalassoma pavo</i>	18	1	N

Confronto delle aree monitorate nell'ambito dei cinque anni di progetto

I dati relativi alle specie termofile mostrano un generale gradiente latitudinale con incremento di abbondanze da nord verso sud. Una maggiore presenza di specie termofile si osserva infatti nell'AMP Capo Carbonara, nell'AMP Plemmirio e nell'AMP Capo Milazzo, dove naturalmente abbondano le specie native termofile, ma sono anche diverse le specie aliene provenienti dal canale di Suez e dall'Atlantico. A queste tre aree seguono l'AMP Torre Guaceto, l'Isola d'Elba, l'AMP Isole Tremiti, l'AMP Tavolara e l'AMP Ventotene. Il minor numero di specie termofile è stato registrato nelle aree più settentrionali, ovvero nell'AMP Portofino e nell'AMP Cinque Terre. Nell'AMP Miramare, area del progetto Mare Caldo più a nord, non sono state rilevate specie termofile (Fig. 56).

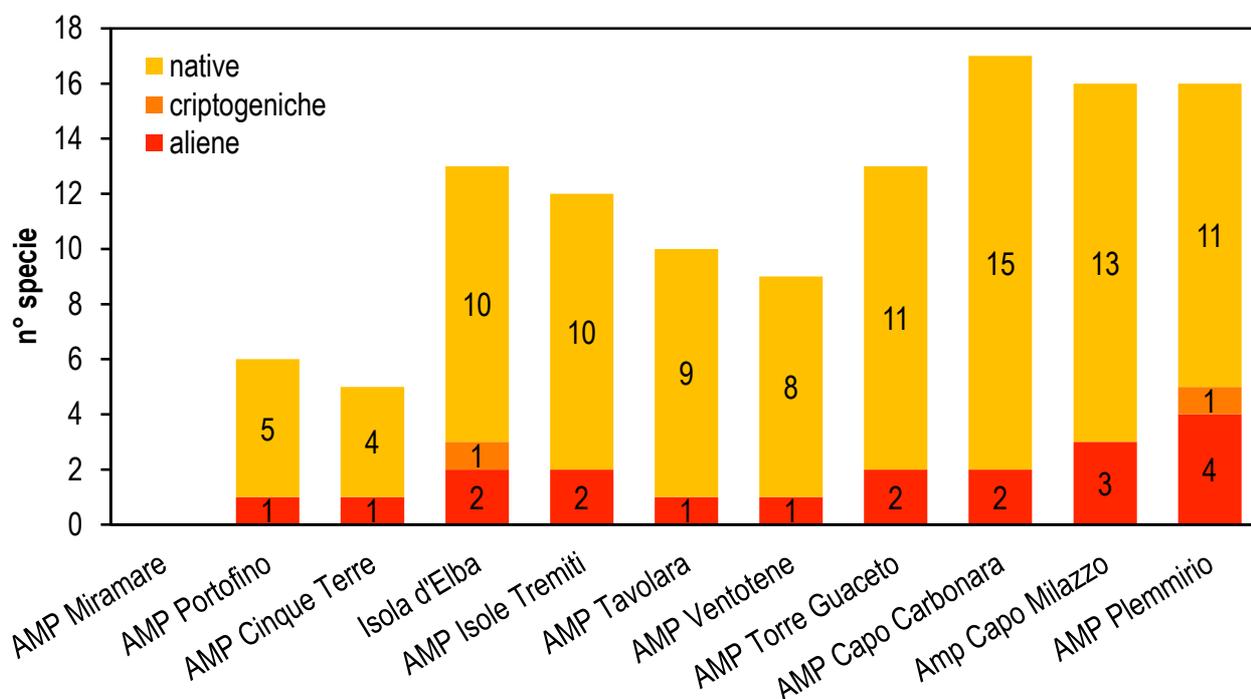


Figura 56. Numero di specie termofile aliene, criptogeniche e native per le undici aree di studio monitorate nell'ambito dei cinque anni di progetto Mare Caldo.

CONFRONTO TRA UN'AMP E UN'AREA NON SOGGETTA A PROTEZIONE

I rilevamenti qualitativi condotti nell'area non protetta dell'Isola Gallinara hanno permesso di osservare segnali di impatto simili a quelli osservati nell'AMP Portofino, ma anche come la mitigazione delle pressioni antropiche locali possano risultare in una migliore qualità degli habitat di scogliera rocciosa.

I monitoraggi condotti all'Isola Gallinara hanno permesso di rilevare, come per l'AMP Portofino, un'importante presenza di mucillagine sul fondo a partire dai 15-20 m di profondità fino a circa 30 m, mostrando come questo fenomeno sia ormai diffuso in diverse aree del Mar Ligure. I popolamenti del coralligeno risultano naturalmente differenti da quelli dell'AMP Portofino, in quanto non sono dominati da foreste di gorgonie ma da spugne massive ed erette, organismi in genere meno sensibili agli effetti delle anomalie termiche, per i quali infatti non sono stati osservati segnali di mortalità. Segnali di sbiancamento sono stati, invece, osservati per due individui su tre della specie *Cladocora caespitosa*.

Anche all'Isola Gallinara sono state osservate diverse specie termofile, tra cui le specie ittiche *Sphyaena viridensis* (barracuda), *Thalassoma pavo* (donzella pavonina), e *Diplodus cervinus* (sarago faraone). Inoltre, sono state osservate le specie di invertebrati *Pennaria disticha* e *Hacelia attenuata* e le specie algali *Pseudochlorodesmis furcellata*, *Tricleocarpa fragilis* e l'aliena *Caulerpa cylindracea* che, come per l'AMP Portofino, ricopriva esigue porzioni di fondale.

In generale, l'effetto positivo della protezione a Portofino si può osservare soprattutto nella maggiore biodiversità che quest'area ospita rispetto all'Isola Gallinara.

Con l'obiettivo di delineare un ulteriore confronto qualitativo tra due aree a diverso regime di protezione, e quindi soggette a differenti pressioni antropiche locali, sono stati svolti rilevamenti sulla presenza di rifiuti marini (*marine litter*) sui fondali dell'AMP Portofino e dell'Isola Gallinara. Nei due siti monitorati nell'AMP Portofino non è stato rilevato alcun rifiuto sul fondo, confermando l'importanza cruciale che le AMP possono avere nella salvaguardia e nella tutela dell'ambiente marino. All'Isola Gallinara, invece, sono state osservate diverse lenze abbandonate sul fondo, dovute alle attività di pesca locale, e bottiglie di vetro, probabilmente gettate in mare dai natanti di passaggio durante il periodo estivo, per un totale di circa 30 oggetti registrati su un totale di quattro siti monitorati.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Al fine di comprendere gli effetti del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini sono necessari monitoraggi a lungo termine che permettano di analizzare gli andamenti di temperatura e di evidenziare i cambiamenti nel tempo. Le indagini ad ampia scala temporale e spaziale possono, infatti, essere utilizzate per valutare le relazioni tra i fattori ambientali e i cambiamenti nelle comunità biologiche (Doney et al. 2012). Nell'ambito del progetto Mare Caldo, ci si è posti l'obiettivo di monitorare l'andamento delle temperature lungo la colonna d'acqua, fino a 40 m di profondità, al fine di valutare gli effetti dei cambiamenti climatici sulle comunità bentoniche di scogliera rocciosa.

Come ormai ogni anno accade, il 2024 è stato dichiarato l'anno più caldo mai registrato a livello globale, con una temperatura media di 1,47°C al di sopra della media recente (1991–2020) e con un valore di 2,92°C al di sopra del livello preindustriale. Si tratta di anomalie estremamente elevate che riflettono un riscaldamento climatico sempre più evidente anche a scala regionale. Di conseguenza, le temperature superficiali del mare (SST) eccezionalmente elevate sono state associate a numerose ondate di calore marine. In particolare nel Mediterraneo, l'anno 2024 ha fatto registrare la temperatura media annuale più alta mai osservata nel bacino, con un valore medio di 21,16°C e un'anomalia di 1,55°C rispetto al periodo di riferimento 1982–2015.

L'analisi delle temperature superficiali dell'acqua (SST) condotta grazie ai dati ottenuti dal servizio Copernicus Marine Services (ESA Sea Surface Temperature Climate Change Initiative) ha mostrato come tutte le aree del progetto Mare Caldo siano state interessate da numerose *Marine Heat Waves* (MHWs) durante il 2024, sia nella stagione estiva sia invernale, con picchi di temperatura mediamente maggiori di 0,5°C-1°C rispetto alla media climatologica, ma che in alcuni casi hanno raggiunto picchi massimi di oltre 2,5°C (e.g., AMP Cinque Terre, Isola d'Elba, AMP Torre Guaceto, AMP Isole Tremiti). Coerentemente, l'analisi degli andamenti delle temperature lungo la colonna d'acqua nei cinque anni di progetto Mare Caldo ha evidenziato nel 2024 anomalie termiche e picchi di calore protrattisi fino a 40 m di profondità, in particolare per l'AMP Isola dell'Asinara, l'Isola d'Elba, l'AMP Tavolara, e l'AMP Plemmirio.

Al fine di valutare quali siano stati gli effetti dell'aumento delle temperature sugli ecosistemi di scogliera, nell'ambito dei primi cinque anni del progetto Mare Caldo sono state condotte attività di monitoraggio biologico in undici aree di studio: AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, Isola d'Elba, AMP Isole Tremiti, AMP Tavolara Punta Coda Cavallo, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara, AMP Capo Milazzo e AMP Plemmirio. Le attività di rilevamento subacqueo tramite transetti bionomici, in particolare, hanno permesso di caratterizzare la struttura e la composizione delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio. Le aree a maggiore biodiversità sono risultate l'AMP Capo Carbonara (84 specie), seguita dall'AMP Portofino (80 specie), dall'AMP Torre Guaceto (77 specie), dall'AMP Plemmirio (70 specie) e dall'Isola d'Elba (70 specie), dall'AMP Isole Tremiti (69 specie), dall'AMP Tavolara Punta

Coda Cavallo (48 specie), dall'AMP Capo Milazzo (44 specie), dall'AMP Miramare (43 specie), dall'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (43 specie), e dall'AMP Cinque Terre (39 specie).

I risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice di diversità di Shannon hanno mostrato un elevato stato ecologico ($H' > 4$) per l'AMP Capo Carbonara, un buono stato ecologico ($3 < H' \leq 4$) per l'AMP Miramare e l'AMP Torre Guaceto, un moderato stato ecologico ($2 < H' \leq 3$) per l'AMP Cinque Terre, l'AMP Isole Tremiti, l'AMP Plemmirio, l'AMP Portofino, l'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo e l'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano. Infine, uno scarso stato ecologico ($1 < H' \leq 2$) è stato rilevato per l'Isola d'Elba. L'indice di dominanza di Simpson ha confermato il basso stato ecologico di quest'ultima area rispetto alle altre aree, evidenziando una bassa resilienza al disturbo delle comunità bentoniche. Un basso valore di equitabilità rende una comunità più incline alla perdita di biodiversità (nel caso di scomparsa delle specie meno abbondanti) e di funzionamento dell'ecosistema (nel caso di scomparsa delle specie chiave).

Durante i cinque anni di monitoraggio non sono stati osservati eventi di mortalità di massa paragonabili a quelli verificatisi nel 1990 e nel 2003 (Cerrano et al. 2000; Garrabou et al. 2009). Tuttavia, in tutte le aree di studio sono stati osservati segni di sbiancamento e necrosi delle specie target attribuibili all'effetto del riscaldamento delle acque. Sulle undici aree monitorate, l'AMP Miramare situata più a nord è l'area dove sono stati registrati i minori valori di impatto, sia per quanto riguarda le specie di cnidari sia per le alghe calcaree. Tuttavia, in quest'area sono stati osservati i segnali di moria di massa del mollusco *Pinna nobilis*, che ha coinvolto tutte le popolazioni mediterranee di questa specie a partire dal 2018. L'AMP Capo Carbonara e l'Isola d'Elba nel 2021 e l'AMP Capo Milazzo nel 2023 sono risultate le aree dove si sono osservati i maggiori impatti sulle gorgonie, probabilmente dovuti alla presenza di mucillagine che in alcune aree di studio copriva il 30-40% delle colonie. In particolare, per le specie *Eunicella cavolini* ed *Eunicella singularis*, in entrambe le aree circa il 20-30% delle colonie osservate mostravano segni di necrosi. Per la specie *Paramuricea clavata*, invece, l'AMP Capo Carbonara è risultata nel 2021 l'area dove sono stati osservati i maggiori impatti, con il 50% delle colonie che mostravano segnali di necrosi. Per le alghe calcaree i maggiori segnali di impatto sono stati osservati nell'AMP Capo Carbonara, dove il 65% della superficie monitorata di alghe incrostanti è risultata sbiancata, seguita dall'AMP Torre Guaceto nel 2021, dove il 45% di superficie di alghe corallinacee incrostanti e di *Peyssonnelia* sp. sono risultate sbiancate e in necrosi. Come risultato positivo, nel 2024 nelle aree dell'AMP Portofino, dell'AMP Tavolara Punta Coda Cavallo e dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano è stato registrato un generale basso o moderato grado di impatto e su nessuna specie sono state osservate percentuali di mortalità maggiori rispetto a quanto osservato negli anni precedenti nelle altre aree monitorate.

Le analisi condotte sulle specie termofile hanno rivelato un gradiente latitudinale coerente con i dati della temperatura. Nelle AMP più meridionali di Capo Carbonara, Capo Milazzo e Plemmirio è stato registrato il maggior numero di specie termofile. Le specie termofile

autoctone sono naturalmente abbondanti in queste aree; tuttavia, il loro potenziale incremento e la diffusione di specie esotiche potrebbero portare a un impoverimento delle comunità autoctone (Occhipinti-Ambrogi 2007). Diverse specie termofile sono state osservate inaspettatamente anche all'Isola d'Elba, nell'AMP di Portofino e nell'AMP Cinque Terre, mentre non sono state osservate specie termofile nell'AMP Miramare.

Per comprendere l'entità dell'impatto del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini, un valido strumento è l'analisi delle serie storiche di dati (Gatti et al. 2017). Il confronto con i dati storici disponibili dagli anni '50 per l'AMP Portofino ha permesso di valutare il cambiamento nel tempo della struttura e della composizione delle comunità bentoniche di scogliera a fronte dell'aumento della temperatura registrato negli ultimi decenni. Gatti et al. (2017) avevano già evidenziato un cambiamento irreversibile nella struttura della comunità, confermato nel 2020 con i dati raccolti nell'ambito del progetto Mare Caldo (Montefalcone & Azzola 2020). Il confronto con i nuovi dati raccolti durante i monitoraggi del 2024 ha permesso di confermare che la comunità bentonica di Portofino abbia ormai raggiunto un nuovo stato stabile alternativo irreversibile, con una conformazione che difficilmente potrà tornare allo stato originale.

In conclusione, i risultati del quinto anno del progetto Mare Caldo confermano le osservazioni riportate nell'ambito dei primi quattro anni di progetto. Gli effetti del cambiamento climatico e delle anomalie termiche sono evidenti in tutte le aree di monitoraggio, indipendentemente dalla diversa localizzazione geografica, dalla diversa latitudine e dal diverso livello di conservazione. Come già evidenziato, la mitigazione e la corretta gestione delle pressioni locali, anche grazie all'istituzione di aree marine protette, rappresentano le migliori strategie per aumentare la resilienza degli ecosistemi marini costieri, come evidenziato dai valori di stato ecologico più bassi dell'Isola d'Elba, che rappresenta l'unica stazione non ricadente in un'AMP. Allo stesso modo, i monitoraggi qualitativi condotti all'Isola Gallinara confermano come la mancanza di protezione e di gestione di un'area costiera comporti una minore qualità degli habitat, ad esempio dovuta alla presenza di rifiuti e attrezzi da pesca abbandonati sul fondale. Tuttavia, pur essendo validi strumenti di conservazione, le AMP non sono sufficienti a contrastare gli effetti del cambiamento climatico, per i quali sono necessari anche interventi sinergici a livello globale. Per questo motivo risulta fondamentale lo sviluppo di reti di monitoraggio e ricerca a livello internazionale. I risultati ottenuti nei cinque anni di progetto Mare Caldo, e il loro confronto con la rete mediterranea T-MEDNet, evidenziano l'importanza di valutare in maniera sinottica e comparativa gli effetti del riscaldamento globale sugli ecosistemi marini.

BIBLIOGRAFIA

- Azzola A & Montefalcone M (2023) Relazione del terzo anno di progetto Mare Caldo (2021-2022). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Azzola A & Montefalcone M (2024) Relazione del quarto anno di progetto Mare Caldo (2022-2023). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Cerrano C., Bavestrello G., Bianchi C.N., Cattaneo-Vietti R., Bava S., Morganti C., Morri C., Picco P., Sara G., Schiaparelli S., et al. (2000) A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. *Ecology Letters*, 3(4): 284-293.
- Copernicus Climate Change Service (2025). Global Climate Highlights 2024. The 2024 Annual Climate Summary (<https://climate.copernicus.eu>).
- Doney S.C., Ruckelshaus M., Emmett Duffy J., Barry J.P., Chan F., English C.A., Galindo H.M., Grebmeier J.M., Hollowed A.B., Knowlton N., et al. (2012) Climate change impacts on marine ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 4: 11-37.
- Garrabou J., Coma R., Bensoussan N., Bally M., Chevaldonné P., Gigliano D., Diaz D., Harmelin J.G., Gambi M.C., Kersting D., et al. (2009) Mass mortality in northwestern Mediterranean rocky benthic communities: Effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology*, 15: 1090–1103.
- Gatti G., Bianchi C.N., Montefalcone M., Venturini S., Diviacco G., Morri C. (2017) Observational information on a temperate reef community helps understanding the marine climate and ecosystem shift of the 1980–90s. *Marine Pollution Bulletin*, 114(1): 528-538.
- Hobday A.J., Alexander L.V., Perkins S.E., Smale D.A., Straub S.C., Oliver E.C., ... & Wernberg T. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in oceanography*, 141: 227-238.
- Juza M. (2025) Global warming impacts in the Mediterranean Sea and Balearic Islands region. Annual Report 2024, Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System (SOCIB).
- Marullo S., Serva F., Iacono R., Napolitano E., di Sarra A., Meloni D., ... & Santoleri R. (2023) Record-breaking persistence of the 2022/23 marine heatwave in the Mediterranean Sea. *Environmental Research Letters*, 18(11): 114041.
- Montefalcone M & Azzola A (2020) Relazione del primo anno di progetto (2019-2020). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.

- Montefalcone M & Azzola A (2022) Relazione del secondo anno di progetto (2020-2021). Monitoraggio degli effetti dei cambiamenti climatici sugli ecosistemi marini bentonici di scogliera. Relazione tecnica, DiSTAV, Università di Genova.
- Occhipinti-Ambrogi A. (2007) Global change and marine communities: alien species and climate change. *Marine Pollution Bulletin*, 55(7-9): 342-352.
- Pirro A., Menna M., Mauri E., Laxenaire R., Salon S., Bosse A., ... & Negretti M.E. (2024) Rossby waves driven by the Mid Mediterranean Jet impact the Eastern Mediterranean mesoscale dynamics. *Scientific Reports*, 14(1): 29598.
- Zettler, M. L., Schiedek, D., & Bobertz, B. (2007). Benthic biodiversity indices versus salinity gradient in the southern Baltic Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 55(1-6), 258-270.