



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

RELAZIONE DEL SECONDO ANNO DI PROGETTO MARE CALDO (2020-2021)

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

a cura di

Monica Montefalcone, Annalisa Azzola

Responsabile scientifico: Dr. Monica Montefalcone

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

Genova, marzo 2022

Ringraziamenti

Per la consulenza scientifica si ringrazia il Professore Marco Capello, oceanografo fisico del DiSTAV dell'Università di Genova. Si ringraziano inoltre Margherita Gastaud e Cristina Abbate che hanno collaborato al progetto nell'ambito delle loro tesi di Laurea Magistrale in Biologia ed Ecologia Marina presso il DiSTAV dell'Università di Genova.

INDICE

PROGETTO MARE CALDO	3
MATERIALI E METODI	5
AREE DI STUDIO	5
ATTIVITÀ DI CAMPO	11
Monitoraggio della temperatura nella colonna d'acqua	11
Monitoraggio degli ecosistemi di scogliera	13
ANALISI DEI DATI	19
Dati di temperatura	19
Struttura e stato ecologico delle comunità	19
Cambiamento nel tempo	20
Mortalità	21
Specie termofile	21
RISULTATI E DISCUSSIONI	22
Temperature	22
Struttura e stato ecologico delle comunità	44
Cambiamento nel tempo	50
Monitoraggio morie di massa	52
Monitoraggio specie termofile	61
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	72
BIBLIOGRAFIA	76

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 degli impatti dei cambiamenti climatici nei mari italiani. La rete, nata nel 2019 con l'installazione di una prima stazione pilota presso la costa nord-occidentale dell'Isola d'Elba, conta ad oggi dieci aree marine protette (AMP) aderenti al progetto: AMP Miramare, AMP Portofino, AMP Cinque Terre, 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 e AMP Plemmirio.

Il progetto Mare Caldo prevede lo sviluppo di stazioni fisse per la registrazione 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), per sviluppare quindi 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 lo sviluppo di campagne di monitoraggio sulle biocenosi marine di scogliera per correlare gli andamenti delle temperature rilevate a specifici 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 riportate le analisi dei dati di temperatura registrati dai *temperature data loggers* nelle aree aderenti al progetto, fatta eccezione per l'AMP Cinque Terre, AMP Isole Tremiti e AMP Tavolara-Punta Coda Cavallo, dove l'installazione dei sensori è avvenuta al termine dell'anno 2021. Inoltre, sono riportati i risultati delle campagne di monitoraggio condotte, nel secondo anno di progetto Mare Caldo (2020-2021), nell'AMP Capo Carbonara, AMP Torre Guaceto e all'Isola d'Elba (Fig. 1).



Figura 1. Monitoraggi biologici condotti all'Isola d'Elba nell'ambito del secondo anno di progetto Mare Caldo. Foto di Lorenzo Moscia.

MATERIALI E METODI

AREE DI STUDIO

Nel corso del secondo anno del progetto Mare Caldo (2020-2021) sono stati analizzati i dati di temperatura registrati dai *temperature data loggers* in otto aree situate a diverse latitudini: AMP Miramare, AMP Portofino, Isola d'Elba, AMP Isola dell'Asinara, AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara e AMP Plemmirio.

AMP Miramare

L'AMP Miramare (Fig. 2) 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.

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

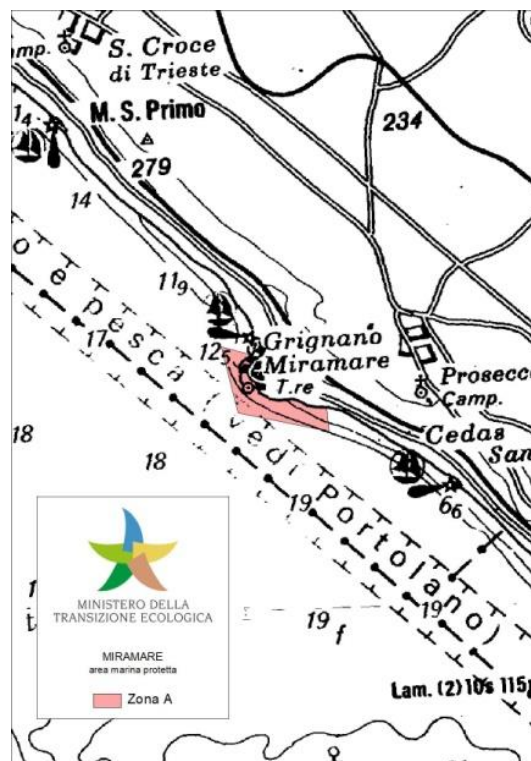


Figura 2. Carta dell'AMP Miramare dove è evidenziata la zona a protezione integrale (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Portofino

L'AMP Portofino (Fig. 3), 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.

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.

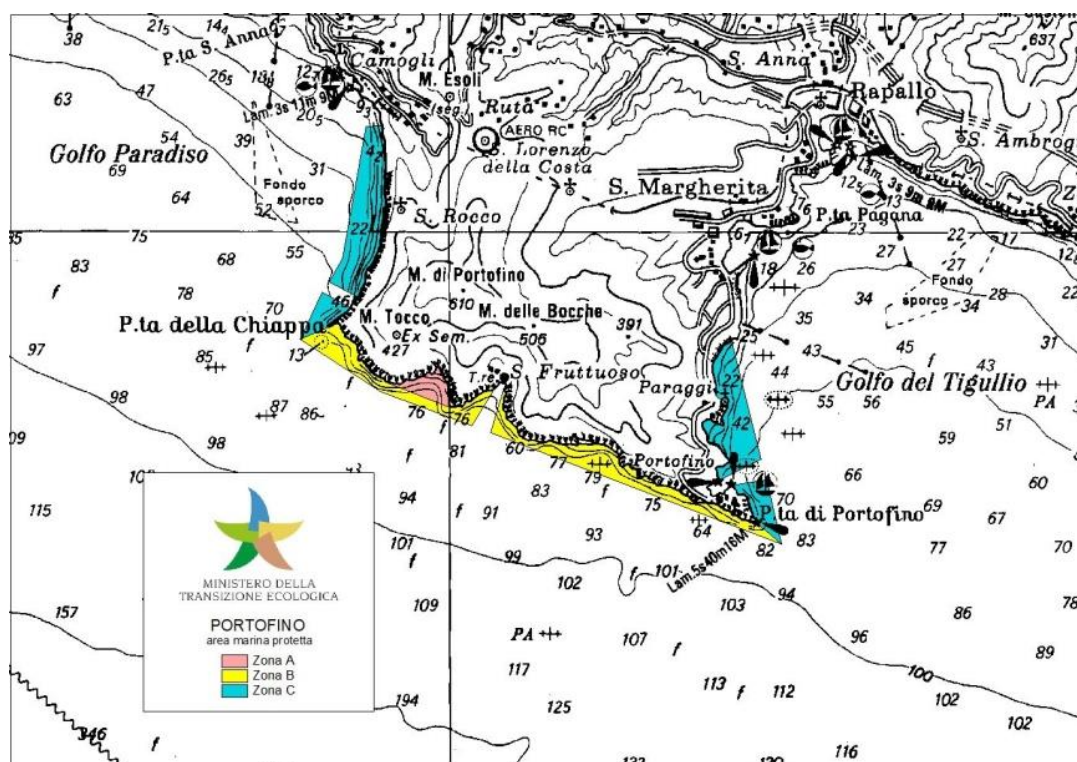


Figura 3. Carta dell'AMP Portofino dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

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 minerari 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 Isola dell'Asinara

L'AMP Isola dell'Asinara (Fig. 4) 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 (<http://www.parcoasinara.org/>).

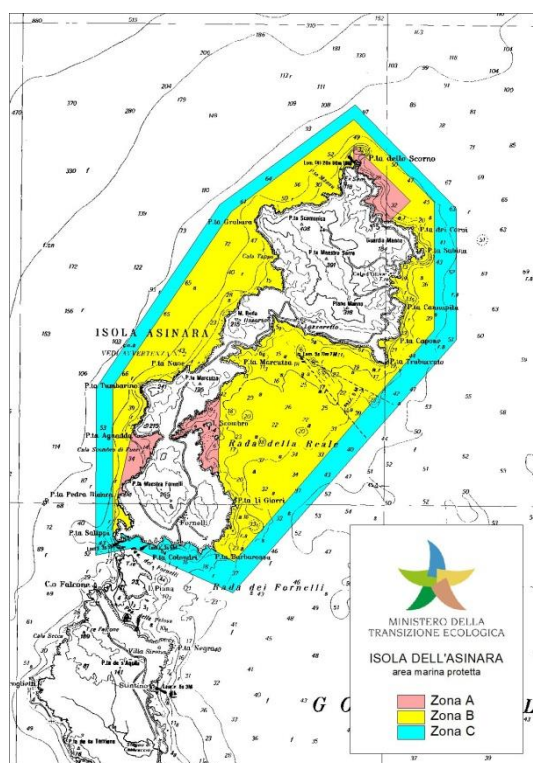


Figura 4. Carta dell'AMP Isola dell'Asinara dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

L'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano (Fig. 5) 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 (<http://www.parks.it/riserva.marina.ventotene>).

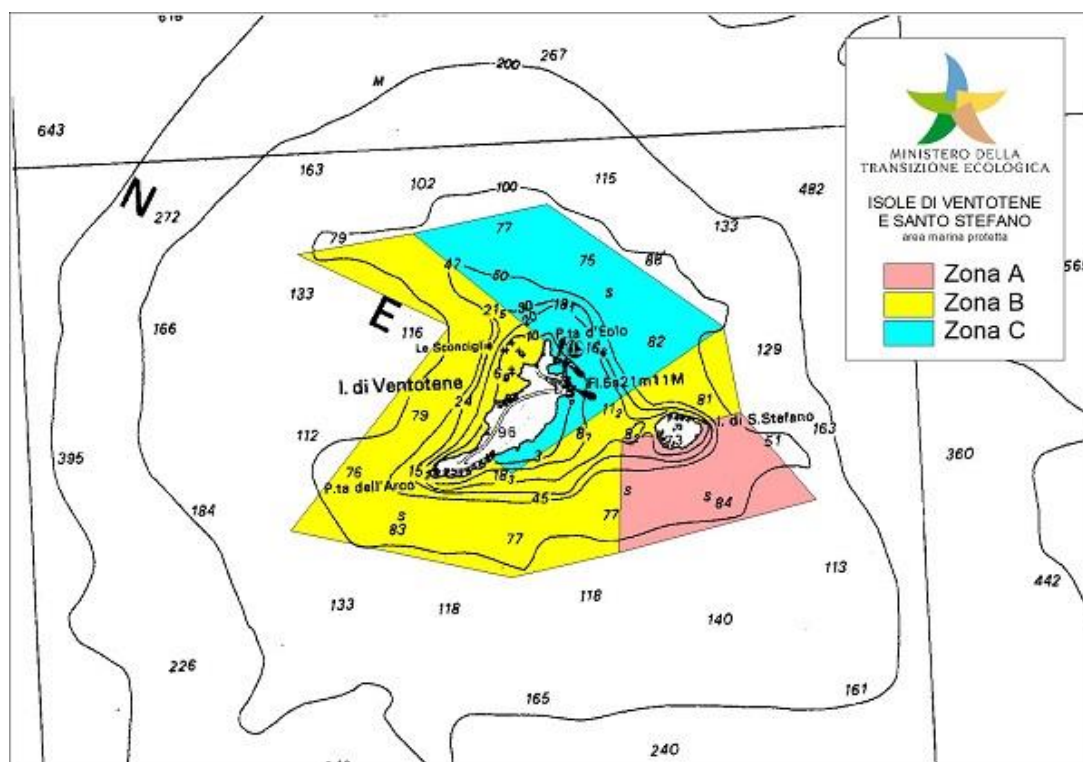


Figura 5. Carta dell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Torre Guaceto

L'AMP di Torre Guaceto (Fig. 6) 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.

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.

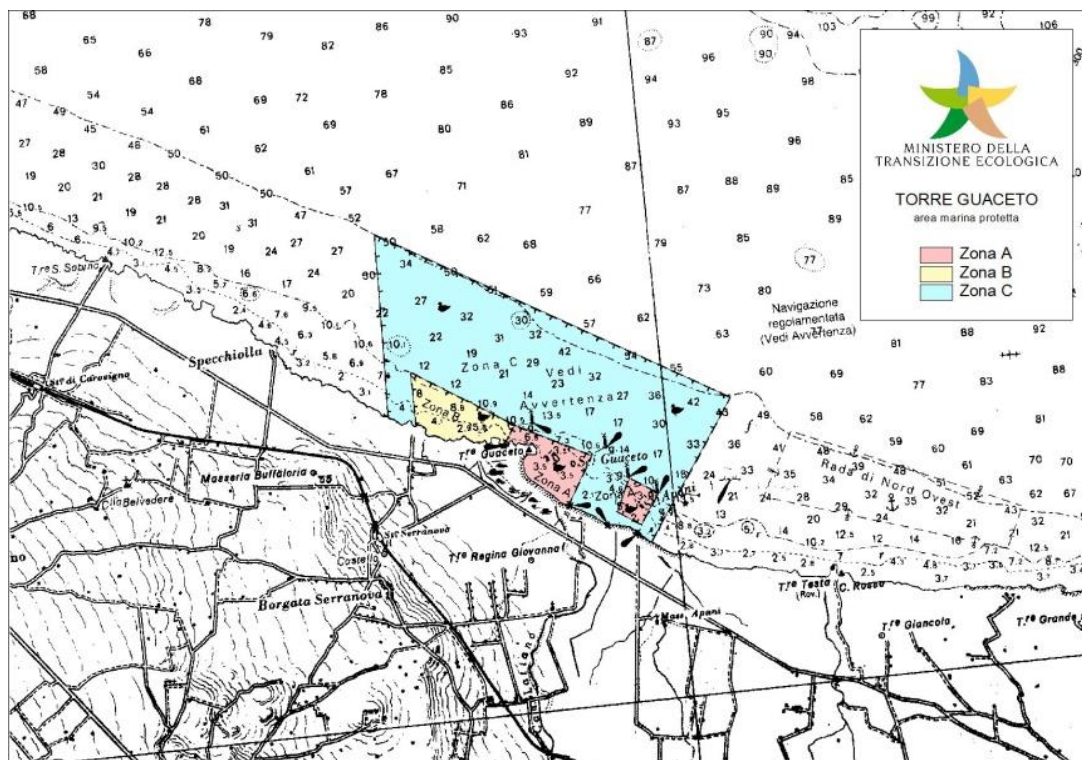


Figura 6. Carta dell'AMP Torre Guaceto dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Capo Carbonara

L'AMP Capo Carbonara (Fig. 7) 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) (<https://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.

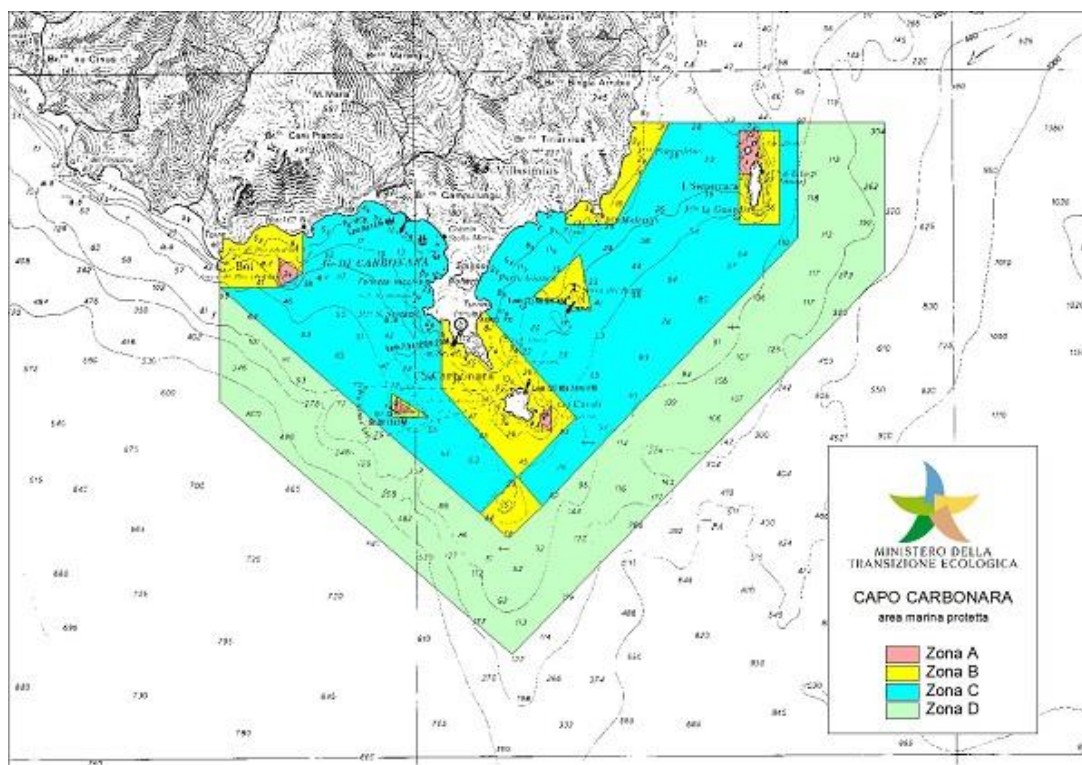


Figura 7. Carta dell'AMP Capo Carbonara dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

AMP Plemmirio

L'AMP Plemmirio (Fig. 8), 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.

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, <https://plemmirio.eu>).

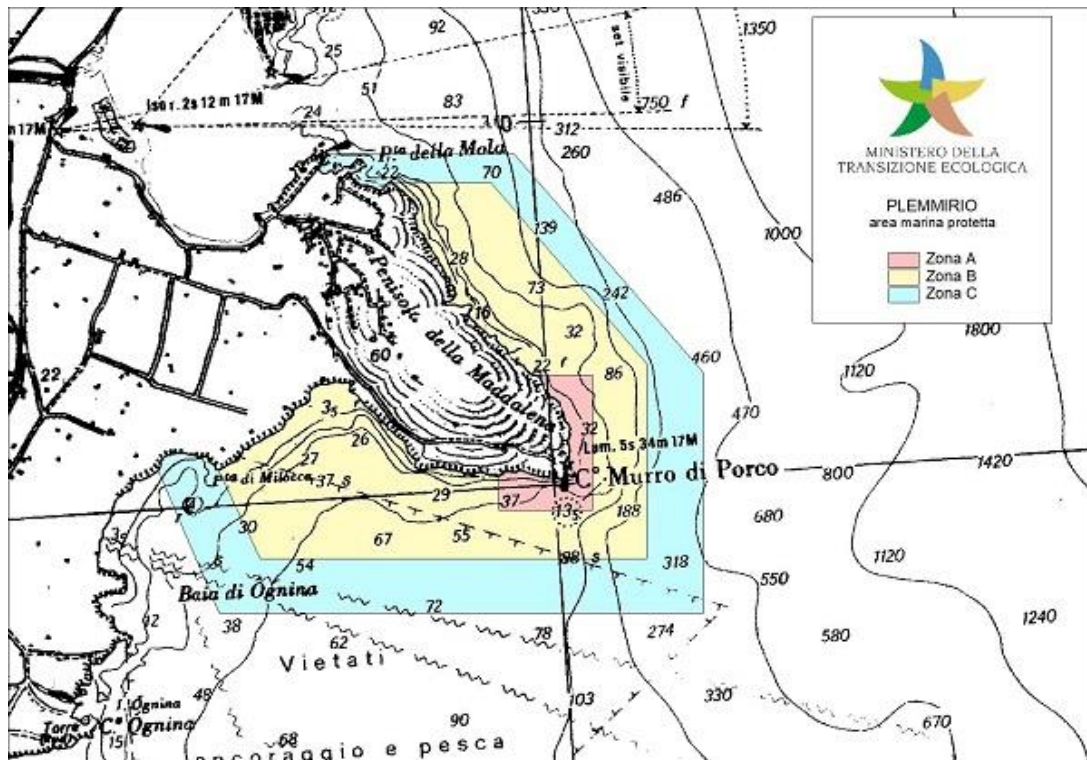


Figura 8. Carta dell'AMP Plemmirio dove sono evidenziate le tre zone a diverso grado di protezione (<https://www.mite.gov.it>).

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 a intervalli di tempo regolari.

Il protocollo per il monitoraggio della temperatura è stato sviluppato sul modello di quello utilizzato dalla rete T-MEDNet Mediterranea 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 loggers* utilizzati nell'ambito del progetto Mare Caldo sono gli HOBO MX TidbiT 400 (Fig. 9), 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 loggers* (i.e., tutte le aree ad 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 loggers* 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).

Sviluppo delle 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 loggers* 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 loggers* 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 loggers* posizionati nel sito di Cala dell'Oro (44°19'01.56" N, 9°09'51.94" E), 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. 9). 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).

Tabella 1. In tabella sono riassunte le caratteristiche rilevanti per la messa a confronto dei due modelli di *temperature data loggers*.

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



Figura 9. I due modelli di *temperature data loggers* 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.

Installazione dei *temperature data loggers*

L'installazione dei *temperature data loggers* 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 secondo anno di progetto Mare Caldo, sono stati condotti i monitoraggi biologici per la valutazione degli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi di scogliera all'Isola d'Elba, nell'AMP Torre Guaceto e nell'AMP Capo Carbonara.

Tempistiche

I monitoraggi sono stati condotti prima, durante e dopo la stagione estiva, tra maggio e ottobre 2021. In particolare, nell'AMP Capo Carbonara i monitoraggi sono stati condotti nelle giornate dal 25 al 31 maggio, nell'AMP Torre Guaceto nelle giornate dal 14 al 18 giugno, mentre all'Isola d'Elba nelle giornate dal 19 al 22 ottobre.

Selezione delle stazioni di monitoraggio per ogni area di studio

Per ogni area di studio sono state individuate dalle quattro alle cinque stazioni di monitoraggio biologico in corrispondenza di scogliere rocciose dove, indipendentemente dalla morfologia del fondale, fosse raggiunta una profondità di circa 40 m. Per l'Isola d'Elba e l'AMP Capo Carbonara una prima stazione è stata scelta in corrispondenza del sito dove sono stati installati i sensori di rilevamento della temperatura, mentre per le restanti stazioni sono stati ripercorsi i siti già studiati in passato poiché in queste due aree sono disponibili dati storici. Per l'AMP Torre Guaceto, a causa delle caratteristiche morfologiche del fondale, i monitoraggi sono stati condotti in diversi siti e in ognuno di questi è stata indagata una sola fascia batimetrica.

In particolare:

1. All'Isola d'Elba i monitoraggi sono stati condotti nelle quattro stazioni (Fig. 10) già monitorate nell'ambito del primo anno di progetto: I) Formiche della Zanca (42°48'23.51" N, 10°07'34.74" E), dove sono stati installati i sensori; II) Cannelle (42°46'28.98" N, 10°25'60.00" E); III) Scoglietto (42°49'42.84" N 10°19'55.38" E); e IV) Picchi di Pablo (denominato anche Altare, 42°43'44.58" N, 10°25'58.38" E). Nelle stazioni II, III, e IV si ha disponibilità di dati storici in letteratura.

2. Nell'AMP Torre Guaceto i monitoraggi sono stati condotti in cinque stazioni (Fig. 11) di cui la prima in zona A e le restanti in zona C: I) Stazione 5-10 m (40°42'53.34" N, 17°48'7.26" E); II) Stazione 10-15 m (40°43'11.10" N, 17°48'56.94" E); III) Stazione 20 m (40°43'24.06" N, 17°48'33.06" E); e IV) Stazione 26 m (40°43'24.06" N, 17°48'33.06" E); V) Stazione 40 m (40°43'45.36" N, 17°49'3.12" E).

3. Nell'AMP Capo Carbonara i monitoraggi sono stati condotti in quattro stazioni (Fig. 12): I) Isola dei Cavoli (39°5'3.66" N, 9°32'24.48" E) in zona A dove sono stati installati i sensori; II) Scoglio del Buttiglione (39°8'33.87" N; 9°36'33.27" E) in zona B; III) Secca di Santa Caterina (39°5'1.14" N; 9°30'53.51" E) in zona A; e IV) Secca del Berni (39°7'25.29" N; 9°33'7.75" E) in zona B.



Figura 10. 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'area dell'Isola d'Elba.



Figura 11. Posizione geografica delle cinque stazioni presso le quali sono stati svolti i monitoraggi biologici per la valutazione dell'impatto del cambiamento climatico sulle comunità di scogliera dell'AMP Torre Guaceto.



Figura 12. 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 Capo Carbonara.

Metodi di rilevamento

In ogni stazione di monitoraggio, i dati sono stati raccolti tramite rilevamenti visivi in immersione subacquea (Fig. 13) 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:

Dr. Monica Montefalcone

Brevetto SDI-TDI Instructor e Advanced European Scientific Diver

Ricercatrice DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Dott.ssa Annalisa Azzola

Brevetto FIPSAS Instructor e European Scientific Diver

Dottoranda DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Cristina Abbate

Brevetto SNSI Instructor

Laureanda in Biologia ed Ecologia Marina DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Gli operatori scientifici subacquei del DiSTAV sono sempre stati accompagnati in immersione dal personale delle aree marine o del diving center, 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 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 ad 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.



Figura 13. Monitoraggi biologici condotti nell'AMP Capo Carbonara nell'ambito del secondo anno di progetto Mare Caldo. Foto di Lorenzo Moscia.

ANALISI DEI DATI

DATI DI TEMPERATURA

Per ogni area di studio i dati di temperatura registrati dai *temperature data loggers* sono stati riportati in un foglio di calcolo Excel organizzati in una matrice profondità × tempo. Per tutte le aree sono stati calcolati i valori medi di temperatura, i valori massimi e i valori minimi annuali, stagionali e mensili. Da questi calcoli sono stati esclusi i mesi per i quali non si avesse disponibilità di dati dal primo all'ultimo giorno del mese (i.e., il primo e l'ultimo mese di rilevamento). Inoltre, sono state calcolate le medie mensili alle 8 diverse profondità e sono state rappresentate tramite grafico a linee per l'analisi dell'andamento nel tempo delle temperature lungo la colonna d'acqua.

I dati scaricati dai *temperature data loggers* sono stati inoltre rappresentati graficamente tramite 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 vengono di seguito riportati i periodi di monitoraggio a partire dalla data di installazione dei *temperature data loggers* fino alla data dell'ultimo *download* dei dati:

- AMP Miramare: 14.01.2021 - 22.10.2021
- AMP Portofino: 17.09.2019 - 11.10.2021
- Isola d'Elba: 26.11.2019 - 19.10.2021
- AMP Isola dell'Asinara: 28.06.2021 - 12.10.2021
- AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano: 29.04.2021 - 11.10.2021
- AMP Torre Guaceto: 30.03.2021 - 12.11.2021
- AMP Capo Carbonara: 8.09.2020 - 6.10.2021
- AMP Plemmirio: 23.07.2020 - 5.10.2021

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 × profondità) × 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 aree di studio indagate nell'ambito del secondo anno di progetto è stato confrontato con lo stato ecologico delle aree di studio indagate nel primo anno di progetto.

CAMBIAMENTO NEL TEMPO

Per l'analisi del cambiamento nel tempo della struttura e della composizione delle comunità bentoniche di scogliera nelle aree di studio sono stati utilizzati metodi differenti in base alla disponibilità di dati storici in letteratura e di dati storici non ancora pubblicati.

Isola d'Elba

Il cambiamento nel tempo relativo alle comunità bentoniche di scogliera dell'Isola d'Elba è stato valutato nell'ambito del primo anno di progetto (Montefalcone & Azzola 2020). I dati raccolti nel corso del secondo anno di progetto contribuiscono ad arricchire la serie storica di dati permettendo di delineare sempre più chiaramente le traiettorie temporali di cambiamento in quest'area di studio.

AMP Torre Guaceto

Per l'AMP Torre Guaceto non sono disponibili dati storici quantitativi che permettano l'analisi delle traiettorie temporali della struttura delle comunità bentoniche. I rilevamenti in quest'area di studio rappresentano quindi il 'punto zero' (*baseline*) per futuri studi relativi al cambiamento nel tempo degli habitat di scogliera. In quest'ottica, i dati sono stati organizzati in una matrice (sito × intervallo di profondità × tempo) × specie.

AMP Capo Carbonara

L'analisi del cambiamento nel tempo nella struttura delle comunità bentoniche di scogliera nell'Area Marina Protetta Capo Carbonara è stata condotta confrontando i dati di presenza/assenza disponibili in letteratura (Bianchi & Morri 2001) con i dati raccolti nell'ambito dei monitoraggi condotti dal DiSTAV nel 2020 (Azzola et al. 2022a). Nel corso dei monitoraggi condotti nel 2021 per il progetto Mare Caldo non sono state infatti osservate differenze significative nelle comunità bentoniche rispetto ai dati raccolti nel 2020, e pertanto non sono state riformulate le analisi.

A tal fine è stata costruita una matrice (tempo × profondità) × specie. Sono stati identificati due periodi: il periodo 0, riferito ai dati raccolti nel 2000, e il periodo 2, riferito ai dati raccolti nel 2020 (comparabili a quelli del 2021). Le profondità sono state organizzate in quattro fasce seguendo lo schema di analisi originariamente adottato da Bianchi & Morri (2001): a (0-3 m); b (3-18 m); c (18-30 m); d (>30 m).

Sulla matrice dei dati è stata condotta un'analisi multivariata delle corrispondenze (CA) tramite il software open-source PaSt (Hammer et al. 2001). La significatività degli assi estratti è stata valutata attraverso il test di Lebart. Successivamente, sono stati calcolati graficamente i centroidi dei due periodi temporali analizzati e ciò ha permesso di delineare la traiettoria temporale per le quattro fasce di profondità. Infine, tramite il teorema di Pitagora applicato agli scores del primo e del secondo asse della CA, sono state calcolate le derivate temporali per valutare in quali fasce batimetriche si siano verificati i maggiori cambiamenti.

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 secondo anno di progetto è stata confrontata con la percentuale di mortalità rilevata nelle aree di studio indagate nel primo anno 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 nella comunità di scogliera.

Il numero di specie termofile rilevato nelle aree di studio indagate nell'ambito del secondo anno di progetto è stato confrontato con il numero di specie termofile rilevato nelle aree di studio indagate nel primo anno di progetto.

RISULTATI E DISCUSSIONI

TEMPERATURE

COLONNA D'ACQUA

L'analisi dei dati ha permesso di monitorare l'andamento della temperatura nelle otto aree di studio nei mesi per i quali i dati erano disponibili. Per l'AMP Portofino e per l'Isola d'Elba, dove erano disponibili due anni di dati, il confronto dell'andamento tra i due anni ha permesso di identificare un'anomalia termica nel mese di giugno 2020. Diversi dati anomali nelle temperature sono stati inoltre registrati nelle altre aree di studio, ma solo tramite il confronto con l'andamento dei prossimi anni sarà possibile definire se queste anomalie rappresentino regolari variabilità stagionali o possano essere definite anomalie termiche.

Di seguito, per ogni area di studio, è riportato il numero totale di dati raccolti nell'ambito dei due anni di progetto Mare Caldo:

- AMP Miramare: 61.720 dati
- AMP Portofino: 144.597 dati
- Isola d'Elba: 127.987 dati
- AMP Isola dell'Asinara: 17.778 dati
- AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano: 23.598 dati
- AMP Torre Guaceto: 24.308 dati
- AMP Capo Carbonara: 54.102 dati
- AMP Plemmirio: 81.325 dati

AMP Miramare

Nell'AMP Miramare è stato possibile analizzare i dati di temperatura per i mesi da febbraio 2021 a settembre 2021. La temperatura media per la stagione primaverile è stata di $\sim 14^{\circ}\text{C}$, con massime di $\sim 24^{\circ}\text{C}$ e minime di $\sim 10^{\circ}\text{C}$ (Tab. 2).

Le temperature medie a febbraio sono risultate di $\sim 10^{\circ}\text{C}$ su tutta la colonna d'acqua. Da marzo le temperature hanno iniziato ad aumentare ed è stato registrato un picco di calore a 17 m di $\sim 14^{\circ}\text{C}$. Questo dato anomalo, tuttavia, potrebbe anche essere dovuto ad un'anomalia di funzionamento del sensore. Fino all'estate è stato registrato un normale aumento della temperatura, che ha raggiunto i valori massimi a luglio con $\sim 26^{\circ}\text{C}$ a 1 m e $\sim 19^{\circ}\text{C}$ a 17 m. Ad agosto le temperature hanno iniziato a diminuire fino al mese di settembre quando su tutta la colonna d'acqua sono state registrate temperature di $\sim 21\text{-}22^{\circ}\text{C}$ (Fig.14, 15).

Tabella 2. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 1, 10, 11, 17 m) nell'AMP Miramare per il periodo compreso tra febbraio 2021 e ottobre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE MEDIE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
1	17,44	6,30	28,57	8,42
10	16,52	5,81	31,59	8,59
11	16,20	5,61	27,43	8,47
17	16,26	4,52	25,28	8,54

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
Primavera-21	14,28	2,88	23,88	9,61
Estate-21	22,72	2,79	31,59	16,23

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
feb-21	9,60	0,65	11,57	8,42
mar-21	10,68	1,72	16,15	9,14
apr-21	12,08	1,13	16,37	10,59
mag-21	16,08	1,09	19,27	12,78
giu-21	19,72	3,70	28,57	14,53
ago-21	23,51	2,58	27,97	18,25
set-21	22,06	0,72	23,74	20,29
ott-21	19,25	1,44	23,79	17,15

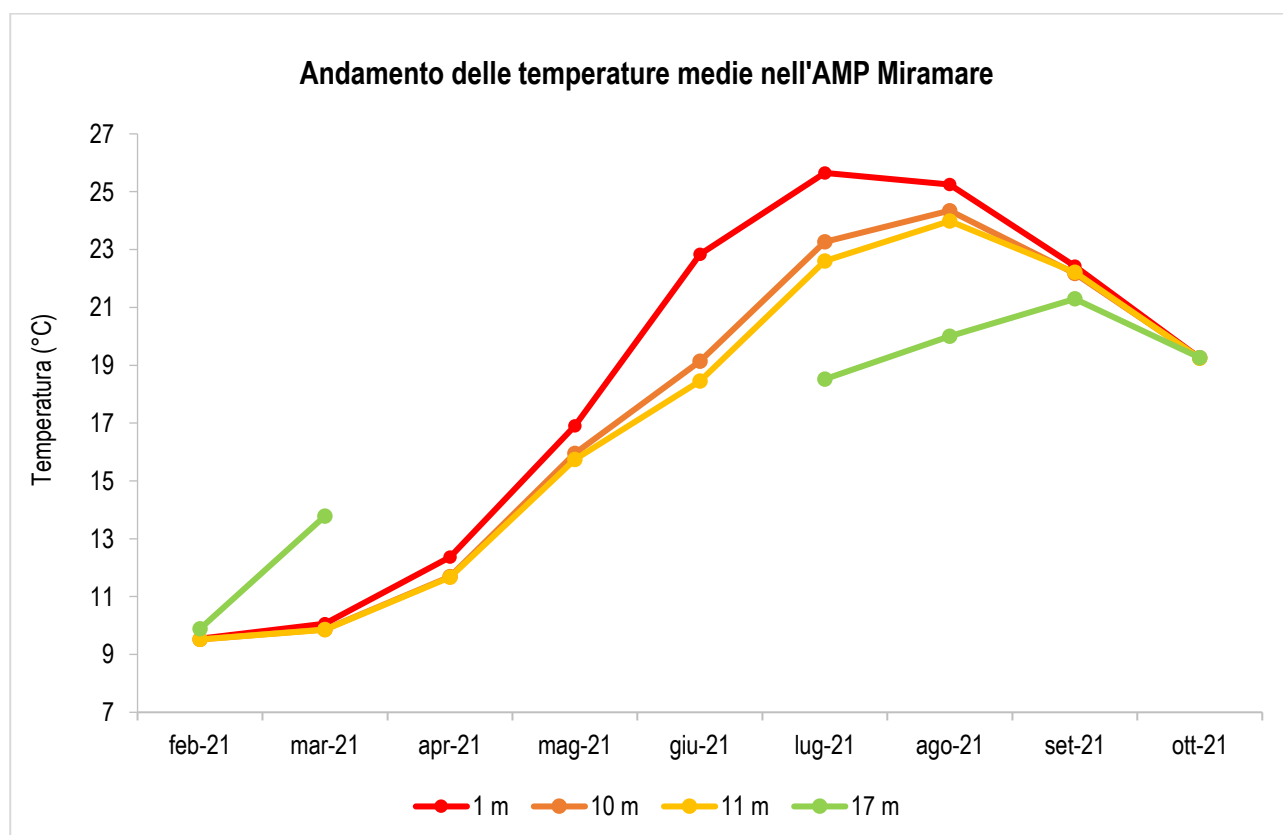


Figura 14. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 1, 10, 11, 17 m) per il periodo compreso tra febbraio 2021 e settembre 2021 nell'AMP Miramare. A 17 m mancano i dati da aprile a giugno 2021.

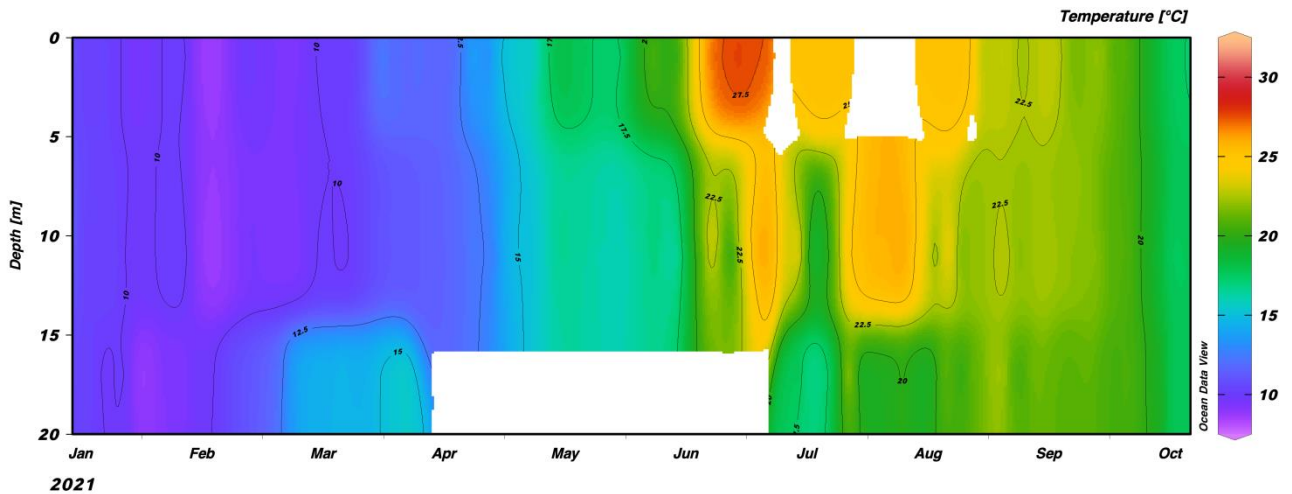


Figura 15. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Miramare per il periodo compreso tra il 14 gennaio 2021 e il 22 ottobre 2021. Le aree bianche indicano i periodi nei quali i sensori non hanno registrato i dati per problemi tecnici.

AMP Portofino

Per l'AMP Portofino, nel primo anno di monitoraggio i dati forniti dai *temperature data loggers* hanno permesso di analizzare l'andamento delle temperature per il periodo compreso tra ottobre 2019 e settembre 2020. I risultati sono riportati nella relazione del primo anno di progetto (Montefalcone & Azzola 2020).

Nel secondo anno di progetto è stato analizzato l'andamento della temperatura sulla colonna d'acqua da ottobre 2020 a settembre 2021.

La temperatura media per la stagione autunnale è stata di ~19°C con massime di ~24°C e minime di ~14°C. Per la stagione invernale la temperatura media è risultata di ~14°C con massime di ~16°C e minime di ~12°C. In primavera la temperatura media registrata è stata di ~16°C con massime di ~25°C e minime di ~14°C. Infine, nella stagione estiva sono state registrate temperature medie di ~21°C con massime che hanno raggiunto i ~27°C a 5 m e ~20°C a 40 m (Tab. 3).

Dal confronto delle medie mensili alle 8 profondità tra l'anno 2020 e il 2021 sono stati osservati andamenti simili con temperature generalmente più basse nel 2021. Le temperature medie a ottobre sono risultate di ~21-22°C (su tutta la colonna d'acqua) nel 2020 e di ~19-20°C nel 2021. Da novembre, in entrambi gli anni, le temperature sono diminuite a tutte le profondità fino a raggiungere i ~14°C a marzo. Nel corso di questo

periodo le acque più superficiali (i.e., 5, 10, 20 m) sono risultate più fredde di quelle profonde (i.e., 25, 30, 35, 40 m). Da marzo si è verificata un'inversione di tendenza con acque superficiali più calde e acque profonde più fredde. Nel mese di giugno, grazie al confronto dei dati tra il 2020 e il 2021, è stato possibile individuare nel 2020 un'anomalia termica con picchi di ~20°C fino a 20 m di profondità (~1°C in più rispetto al 2021). A luglio nel 2020, in seguito all'anomalia, le acque si sono poi leggermente raffreddate, mentre nel 2021 si sono riscaldate per il normale andamento stagionale. Ad agosto, in entrambi gli anni, sono stati raggiunti i più alti valori di temperatura, tipici dell'estate, con medie di ~25-26°C a 5 m e di ~16°C a 40 m. Infine, a settembre le temperature delle masse d'acqua più superficiali hanno iniziato a decrescere mentre quelle più profonde a crescere (Fig. 16, 17).

L'anomalia osservata per il mese di giugno 2020 è stata registrata anche in altre stazioni della rete mediterranea T-MEDNet (<https://t-mednet.org/t-sites/t-figures>), ovvero in Spagna (Tabarca, Cap de Creus, Medes) e Francia (Banyuls Sur Mer, Cap de Creus, Villefranche), interessando la colonna d'acqua in alcuni casi fino a 35 m di profondità.

Tabella 3. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) nell'AMP Portofino per il periodo compreso tra ottobre 2019 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE MEDIE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
5	19,07	4,36	27,70	12,03
10	18,78	4,09	27,33	12,10
15	18,40	3,74	26,62	12,12
20	18,00	3,34	26,40	12,87
25	17,51	2,95	26,18	12,90
30	16,96	2,51	26,18	13,06
35	16,60	2,19	26,30	12,73
40	16,23	1,88	25,43	12,78

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
Autunno-19	19,63	2,21	24,17	15,37
Inverno-20	14,69	0,78	16,61	12,97
Primavera-20	16,55	2,26	23,38	13,88
Estate-20	20,10	3,50	27,70	14,70
Autunno-20	18,60	1,93	24,39	14,05
Inverno-21	14,28	0,60	15,92	12,03
Primavera-21	15,65	1,59	25,21	13,59
Estate-21	20,88	3,53	27,09	14,91

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
ott-19	21,40	1,01	23,50	16,80
nov-19	18,82	1,01	20,72	16,51
dic-19	16,57	0,73	18,06	13,28
gen-20	15,11	0,48	16,13	13,55
feb-20	14,29	0,25	14,84	13,28
mar-20	13,96	0,21	14,96	12,97
apr-20	14,80	0,73	16,58	13,98
mag-20	17,25	1,19	21,84	14,48
giu-20	19,45	2,15	27,33	14,70
lug-20	19,58	2,95	26,99	15,10
ago-20	20,26	3,96	27,70	14,79
set-20	20,83	3,43	25,89	15,01
ott-20	19,98	0,85	21,89	15,49
nov-20	18,28	0,68	19,39	15,32
dic-20	15,87	0,61	17,15	13,69
gen-21	14,29	0,54	15,84	12,32
feb-21	13,95	0,36	14,46	12,03
mar-21	14,05	0,15	14,98	13,47
apr-21	14,59	0,30	15,99	13,86
mag-21	16,11	0,78	19,29	14,48
giu-21	18,11	2,50	25,57	15,06
lug-21	20,41	3,69	27,01	14,91
ago-21	21,65	3,47	27,09	14,98
set-21	21,47	3,03	25,19	15,34

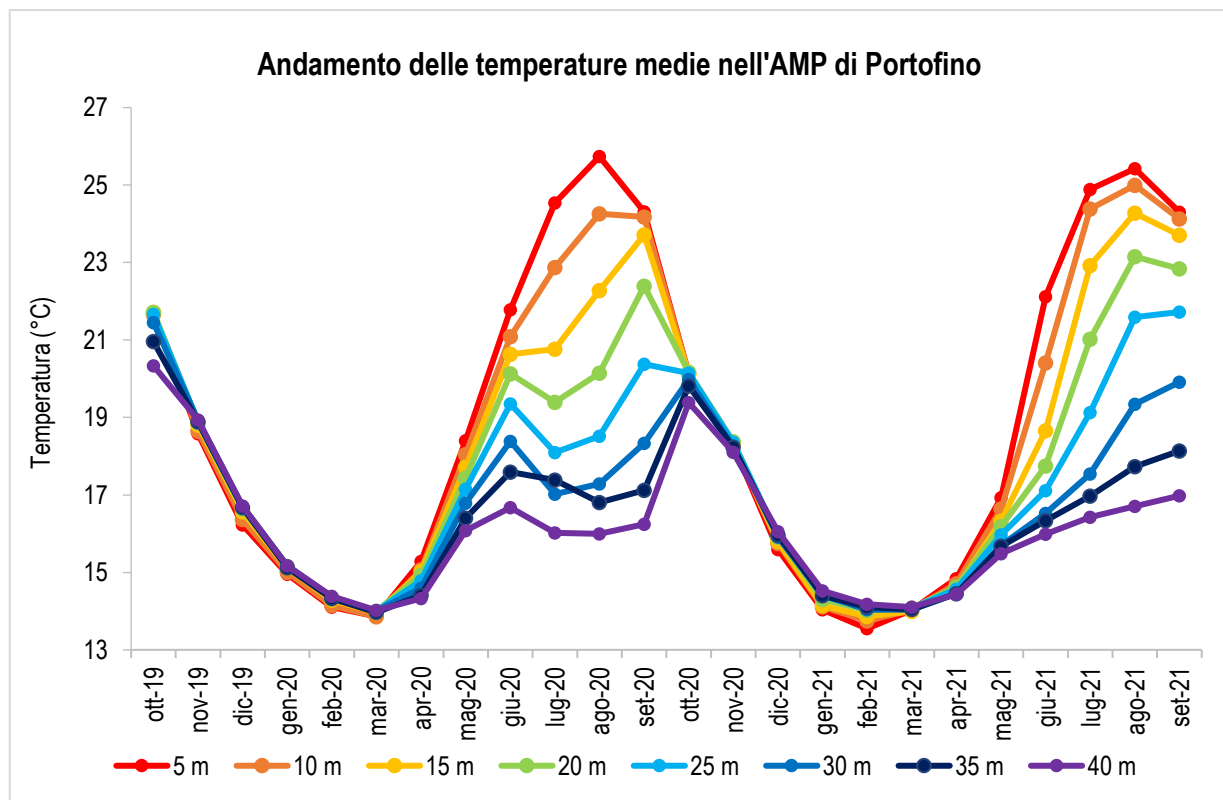


Figura 16. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo compreso tra ottobre 2019 e settembre 2021 nell'AMP Portofino.

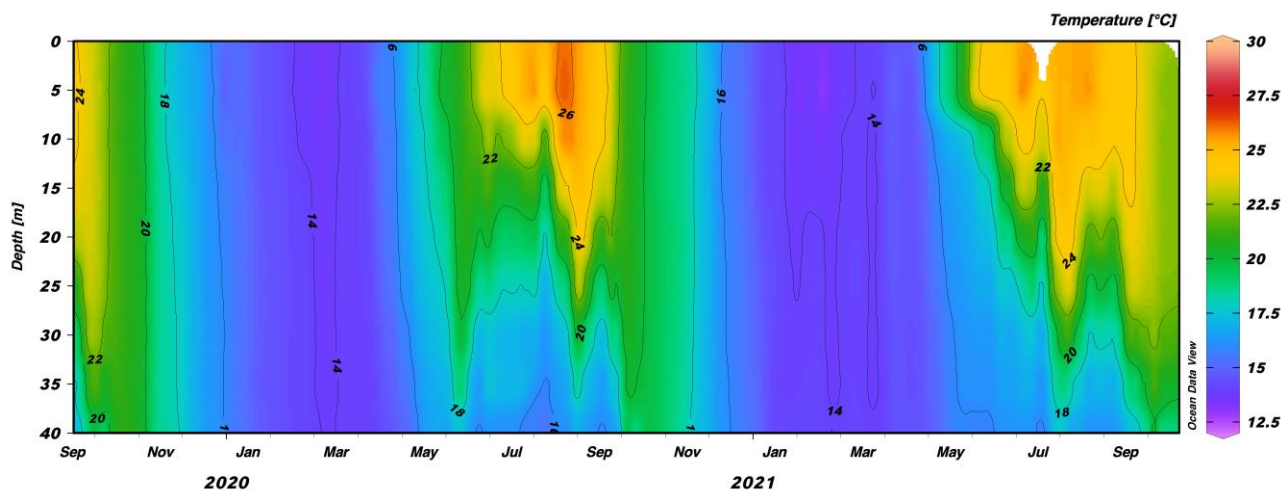


Figura 17. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Portofino per il periodo compreso tra il 17 settembre 2019 e l'11 ottobre 2021. Le aree bianche indicano i periodi nei quali i sensori non hanno registrato i dati per problemi tecnici.

Isola d'Elba

Per l'area dell'Isola d'Elba, nel primo anno di monitoraggio i dati forniti dai *temperature data loggers* hanno permesso di analizzare l'andamento delle temperature per il periodo compreso tra dicembre 2019 e settembre 2020 (Montefalcone & Azzola 2020).

Nel secondo anno di progetto è stato analizzato l'andamento della temperatura sulla colonna d'acqua da ottobre 2020 a settembre 2021.

Dall'analisi dei dati di temperatura sulla colonna d'acqua nell'area dell'Isola d'Elba la temperatura media registrata per la stagione invernale è stata di ~15°C con massime di ~16°C e minime di ~14°C. Per la stagione primaverile la temperatura media è stata di ~16°C, con massime di ~24°C e minime di ~14°C. Per l'estate la temperatura media registrata è stata di ~22°C con massime di ~27°C a 5 m e di ~25°C a 40 m e minime di ~15°C (Tab. 4).

Dal confronto delle medie mensili alle 8 profondità tra l'anno 2020 e il 2021 anche per l'area dell'Isola d'Elba sono stati osservati andamenti simili con temperature generalmente più basse nel 2021. Le temperature medie a ottobre 2020 sono risultate di ~17°C (su tutta la colonna d'acqua) e di ~16°C nel 2021. Da gennaio, in entrambi gli anni, le temperature sono diminuite a tutte le profondità fino a raggiungere i ~14°C a marzo. Ad aprile le acque superficiali hanno iniziato a scaldarsi fino a maggio, mese in cui nel 2020 si sono registrate temperature di ~18°C a 5 m e ~16°C a 40 m, mentre nel 2021 temperature di ~17°C a 5 m e ~15°C a 40 m. Similmente all'AMP Portofino, e alle altre stazioni T-MEDNet, nel mese di giugno 2020 è stato possibile osservare un'anomalia termica con picchi di ~20°C fino a 25 m di profondità. Da luglio in entrambi gli anni è stato registrato un aumento stagionale delle temperature, fino ad agosto con medie di ~26°C a 5 m e di ~16°C a 40 m nel 2020 e medie di ~25°C a 5 m e di ~17°C a 40 m. Infine, a settembre le temperature delle masse d'acqua più superficiali hanno iniziato a decrescere mentre quelle più profonde a crescere (Fig. 18, 19).

Tabella 4. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) nell'area dell'Isola d'Elba per il periodo compreso tra dicembre 2019 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE MEDIE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
5	19,05	4,19	27,29	13,79
10	18,88	4,06	27,39	13,72
15	18,65	3,84	28,01	13,77
20	18,28	3,52	27,29	13,76
25	17,75	3,02	28,28	13,82
30	17,25	2,61	27,88	13,72
35	16,74	2,17	26,00	13,80
40	16,67	1,89	26,02	14,13

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
Autunno-19	17,66	0,76	24,42	14,66
Inverno-20	14,98	0,74	16,91	13,91
Primavera-20	16,69	2,31	22,09	13,72
Estate-20	21,10	3,39	28,28	15,03

Autunno-20	18,60	1,92	24,96	14,99
Inverno-21	14,81	0,58	16,40	13,99
Primavera-21	16,02	1,77	24,02	14,05
Estate-21	21,65	3,00	27,29	15,49
Autunno-21	21,96	1,58	24,01	15,46

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
dic-19	16,95	0,60	18,23	15,85
gen-20	15,39	0,35	16,09	14,76
feb-20	14,53	0,21	15,16	14,12
mar-20	14,20	0,17	14,87	13,72
apr-20	14,80	0,69	17,05	13,75
mag-20	17,43	1,27	21,17	14,66
giu-20	20,09	1,59	25,11	15,24
lug-20	20,01	2,95	28,28	15,29
ago-20	21,76	3,69	27,29	15,47
set-20	21,42	3,27	25,83	14,99
ott-20	19,96	1,02	22,36	15,16
nov-20	18,19	0,81	19,28	15,57
dic-20	16,21	0,29	16,91	15,30
gen-21	14,99	0,45	15,73	14,25
feb-21	14,38	0,11	14,73	13,99
mar-21	14,45	0,14	15,19	14,05
apr-21	14,83	0,30	16,11	14,23
mag-21	16,45	0,96	22,64	14,68
giu-21	18,56	2,36	25,16	14,89
lug-21	21,50	2,75	26,19	15,49
ago-21	22,37	3,00	27,29	15,66
set-21	21,98	2,71	26,05	15,66

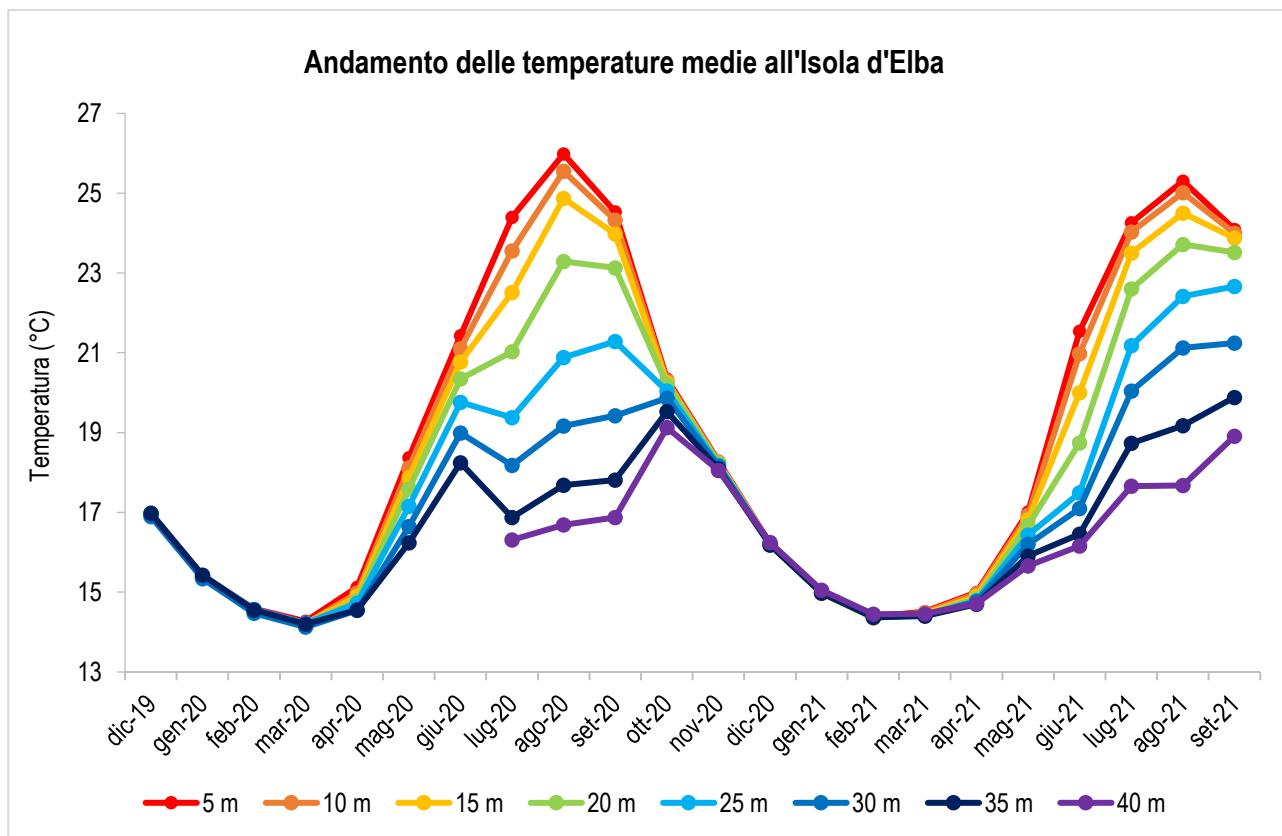


Figura 18. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo compreso tra dicembre 2019 e settembre 2021 nell'area dell'Isola d'Elba.

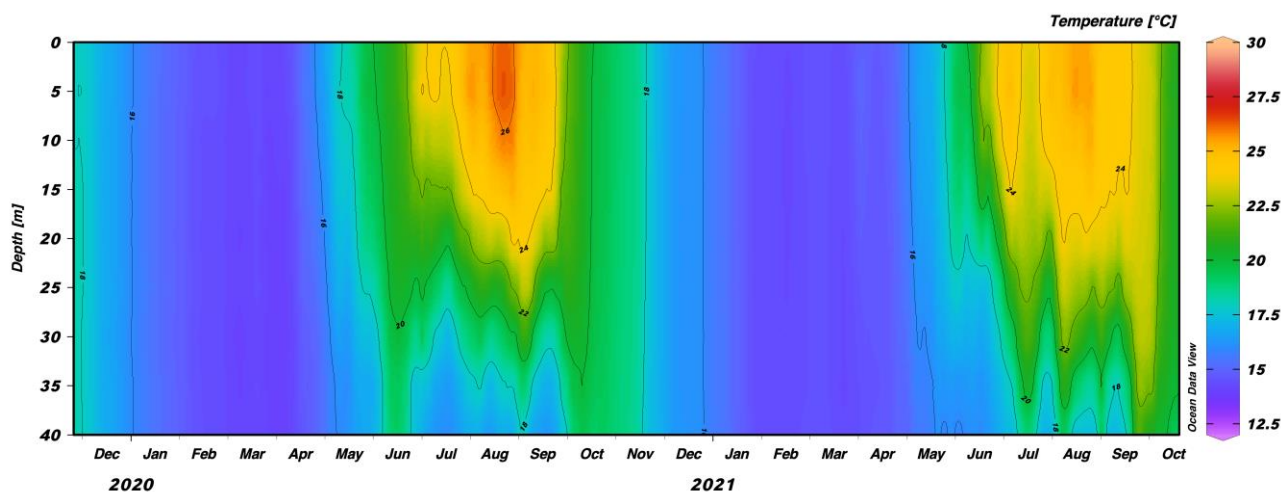


Figura 19. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'area dell'Isola d'Elba per il periodo compreso tra il 26 novembre 2019 e il 19 ottobre 2021.

AMP Isola dell'Asinara

Nell'AMP Isola dell'Asinara sono stati analizzati i dati di temperatura per il periodo tra luglio 2021 e settembre 2021, ad esclusione della profondità dei 15 m dove si sono verificati problemi ai sensori (Tab. 5) (Fig. 20).

Dall'analisi grafica tramite il software ODV si osserva per i primi giorni di monitoraggio un'anomalia nei dati di temperatura (Fig. 21), verosimilmente dovuta a problemi tecnici dei sensori. Solo tramite il confronto con i dati degli anni futuri sarà possibile evidenziare eventuali andamenti anomali per l'estate 2021.

Tabella 5. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) nell'AMP Isola dell'Asinara per il periodo compreso tra luglio 2021 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE MEDIE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
5	19,07	4,36	27,70	12,03
10	18,78	4,09	27,33	12,10
15	18,40	3,74	26,62	12,12
20	18,00	3,34	26,40	12,87
25	17,51	2,95	26,18	12,90
30	16,96	2,51	26,18	13,06
35	16,60	2,19	26,30	12,73
40	16,23	1,88	25,43	12,78

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	Max (°C)	Min (°C)	dev.st
lug-21	20,54	29,88	14,58	20,54
ago-21	21,04	27,28	15,21	21,04
set-21	21,89	25,34	15,40	21,89

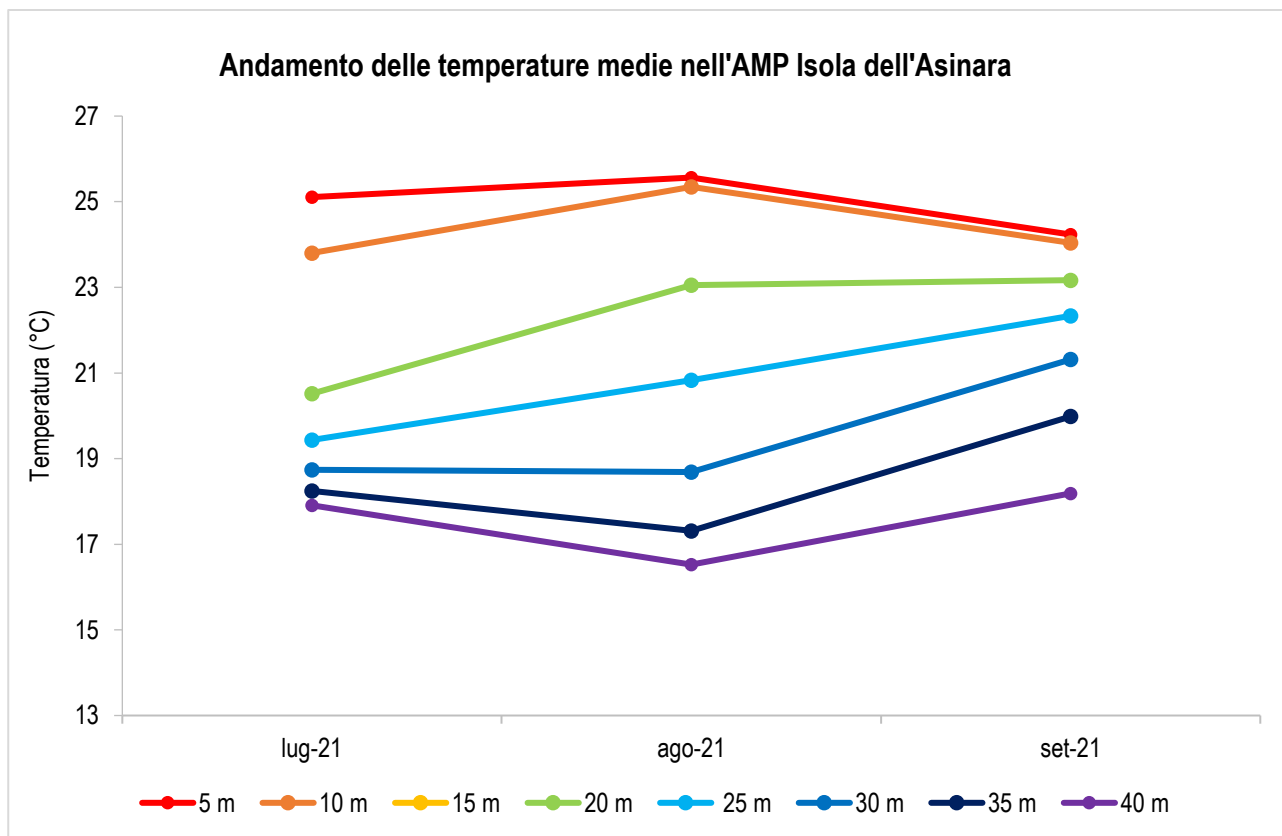


Figura 20. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 20, 25, 30, 35, 40 m, ad eccezione dei 15 m per i quali ci sono stati problemi tecnici) per il periodo compreso tra luglio 2021 e settembre 2021 nell'AMP Isola dell'Asinara.

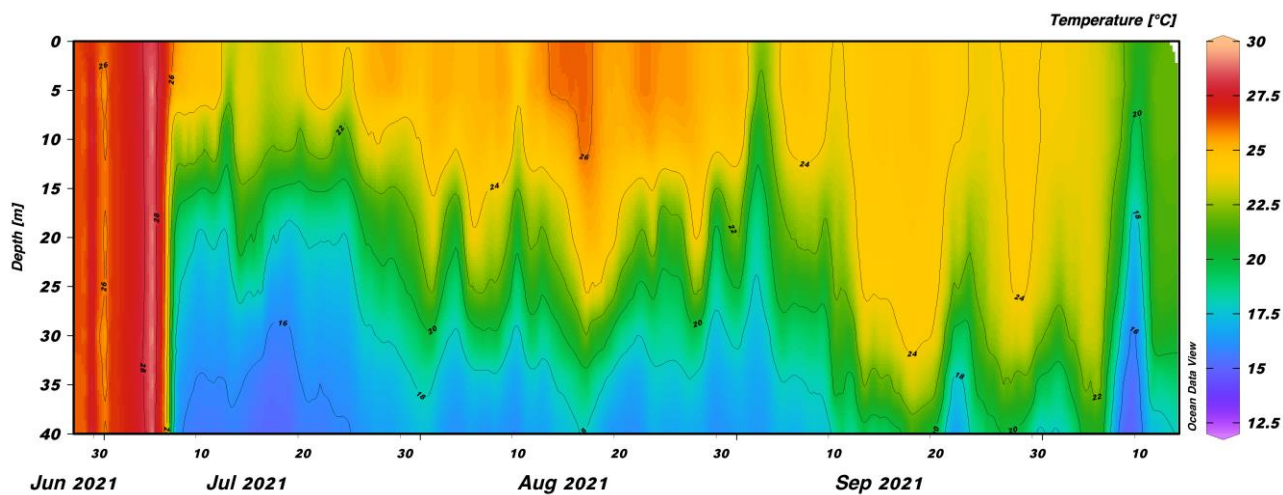


Figura 21. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Isola dell'Asinara per il periodo compreso tra il 28 giugno 2021 e il 12 ottobre 2021.

AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano

Nell'AMP Isola di Ventotene e Santo Stefano sono stati analizzati i dati di temperatura per il periodo tra maggio 2021 e settembre 2021 (Tab. 6) (Fig. 22).

Anche in quest'area dall'analisi grafica tramite il software ODV si osserva per i primi giorni di monitoraggio a maggio 2021 un'anomalia nei dati di temperatura (Fig. 23), verosimilmente dovuta a problemi tecnici dei sensori. Dal confronto con i dati resi disponibili dalla rete mediterranea T-MEDNet nella vicina stazione di Ischia (<https://t-mednet.org/t-sites/t-figures>) non è stata osservata un'anomalia termica in quel periodo, avvalorando quindi l'ipotesi di un problema ai sensori. Tuttavia, solo grazie ai monitoraggi futuri sarà possibile evidenziare eventuali andamenti anomali per l'anno 2021.

Tabella 6. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano per il periodo compreso tra maggio 2021 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE MEDIE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
5	23,70	3,19	28,06	13,75
10	23,01	3,10	27,63	13,97
15	23,11	1,84	29,75	17,66
20	20,32	2,43	25,68	16,36
25	17,72	1,30	28,09	13,90
30	17,08	1,19	22,63	13,99
35	16,76	1,45	28,18	13,98
40	16,40	1,24	28,70	13,92

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
Estate-21	20,24	3,91	29,75	14,95

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
mag-21	17,84	2,03	28,70	13,75
giu-21	18,27	2,95	26,53	14,95
lug-21	19,97	3,82	29,75	14,95
ago-21	20,64	4,00	28,00	15,16
set-21	20,95	3,74	26,51	15,62

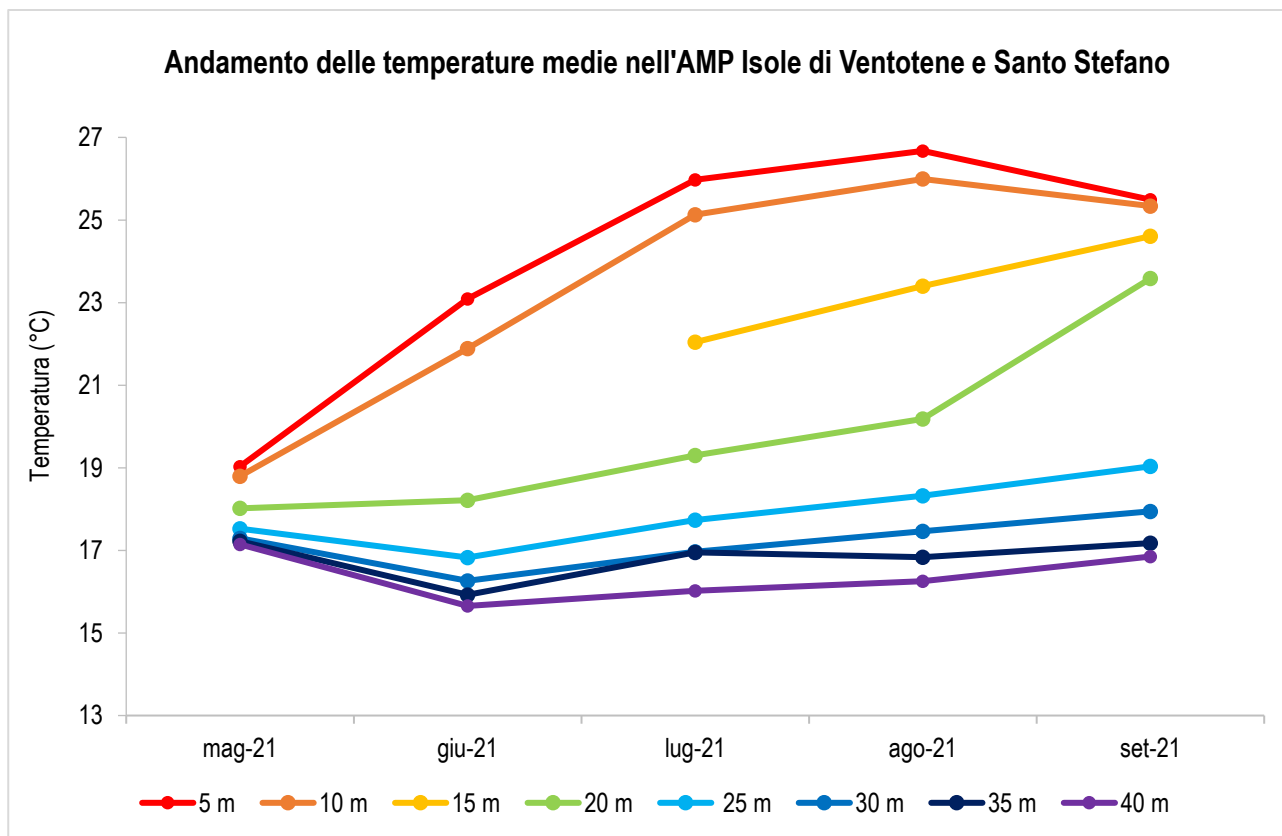


Figura 22. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo compreso tra luglio 2021 e settembre 2021 nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano. A 15 m ci sono stati problemi tecnici nel sensore nei mesi di maggio 2021 e settembre 2021.

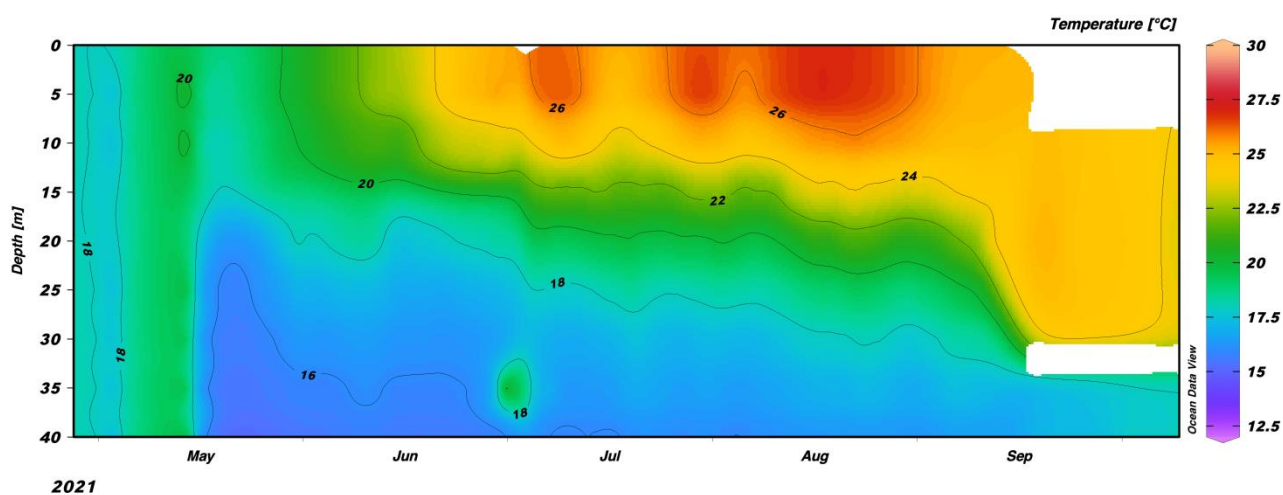


Figura 23. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Isole di Ventotene e Santo Stefano per il periodo compreso tra il 29 aprile 2021 e l'11 ottobre 2021. Le aree bianche indicano i periodi nei quali i sensori non hanno registrato i dati per problemi tecnici.

AMP Torre Guaceto

Nell'AMP Torre Guaceto sono stati analizzati i dati di temperatura per il periodo tra aprile 2021 e settembre 2021, ad eccezione delle profondità di 15, 30 e 40 m dove si è verificato un problema ai sensori (Tab. 7).

Nell'AMP Torre Guaceto ad aprile 2021 sono state registrate temperature di $\sim 14^{\circ}\text{C}$ su tutta la colonna d'acqua. A maggio è stato osservato un normale aumento di temperatura con valori di $\sim 17^{\circ}\text{C}$ (Fig. 24). Nel mese di giugno e luglio 2021, dall'analisi grafica tramite il software ODV, sono state osservate due anomalie termiche: una a inizio giugno con picchi di temperatura di $\sim 20^{\circ}\text{C}$ fino a 35 m di profondità, e una a metà luglio con picchi di temperatura di addirittura $\sim 26^{\circ}\text{C}$ fino a 35 m di profondità (Fig. 25). Tuttavia, anche per quest'area di studio solo tramite i futuri monitoraggi sarà possibile definire se queste siano state anomalie termiche o normali andamenti stagionali.

Tabella 7. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 20, 25, 35 m) nell'AMP Torre Guaceto per il periodo compreso tra aprile 2021 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stazioni (m)	Media ($^{\circ}\text{C}$)	dev.st	Max ($^{\circ}\text{C}$)	Min ($^{\circ}\text{C}$)
5	22,17	4,86	28,44	11,59
10	22,04	4,82	28,27	11,53
15	/	/	/	/
20	20,85	4,57	27,86	11,54
25	20,45	4,49	27,93	11,37
30	/	/	/	/
35	18,68	3,63	29,14	11,66
40	/	/	/	/

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stagioni	Media ($^{\circ}\text{C}$)	dev.st	Max ($^{\circ}\text{C}$)	Min ($^{\circ}\text{C}$)
Estate-21	23,78	3,70	28,44	15,17

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media ($^{\circ}\text{C}$)	dev.st	Max ($^{\circ}\text{C}$)	Min ($^{\circ}\text{C}$)
apr-21	14,48	1,68	27,93	11,37
mag-21	17,28	1,54	29,14	14,43
giu-21	20,51	2,11	26,05	15,17
lug-21	23,51	3,87	27,64	15,44
ago-21	24,53	3,95	28,44	15,83
set-21	24,63	1,54	26,83	16,44

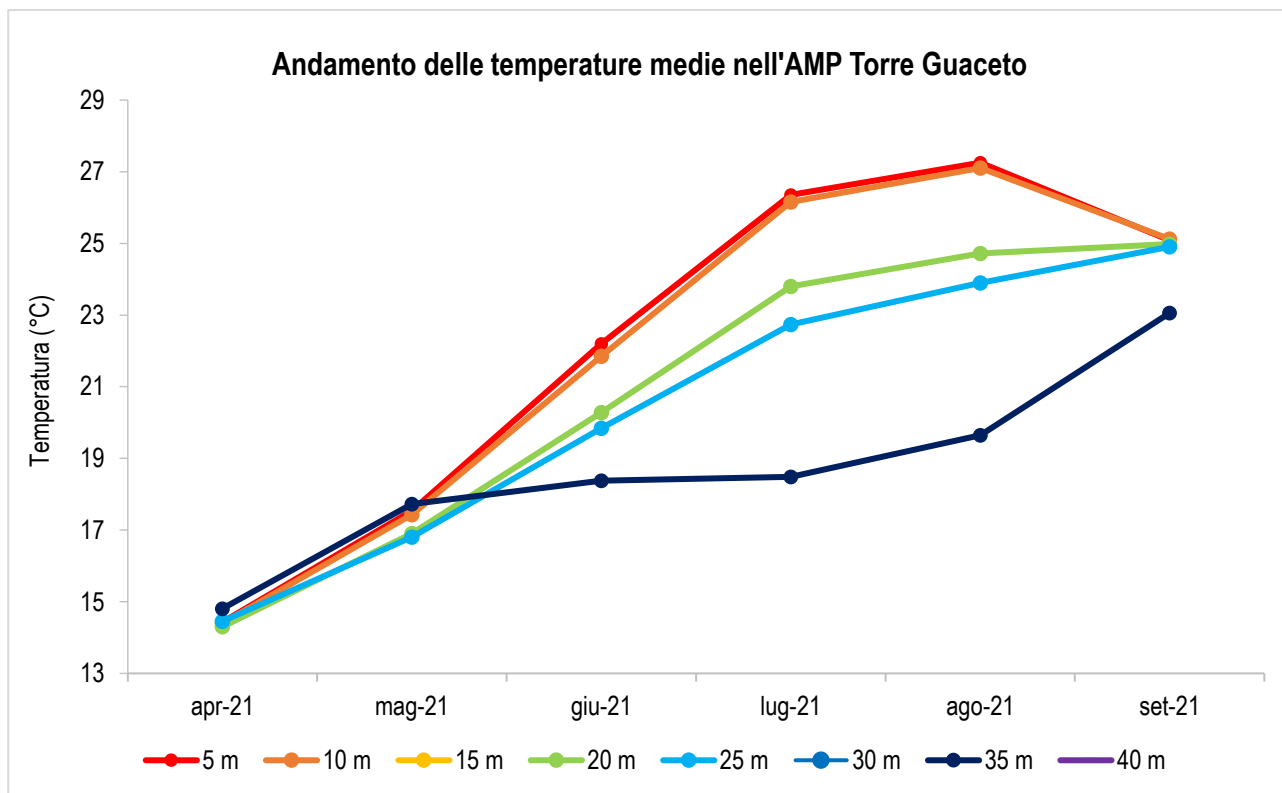


Figura 24. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 20, 25, 35 m) per il periodo compreso tra aprile 2021 e settembre 2021 nell'AMP Torre Guaceto. A 15, 30 e 40 m non si ha disponibilità di dati per problemi tecnici ai sensori.

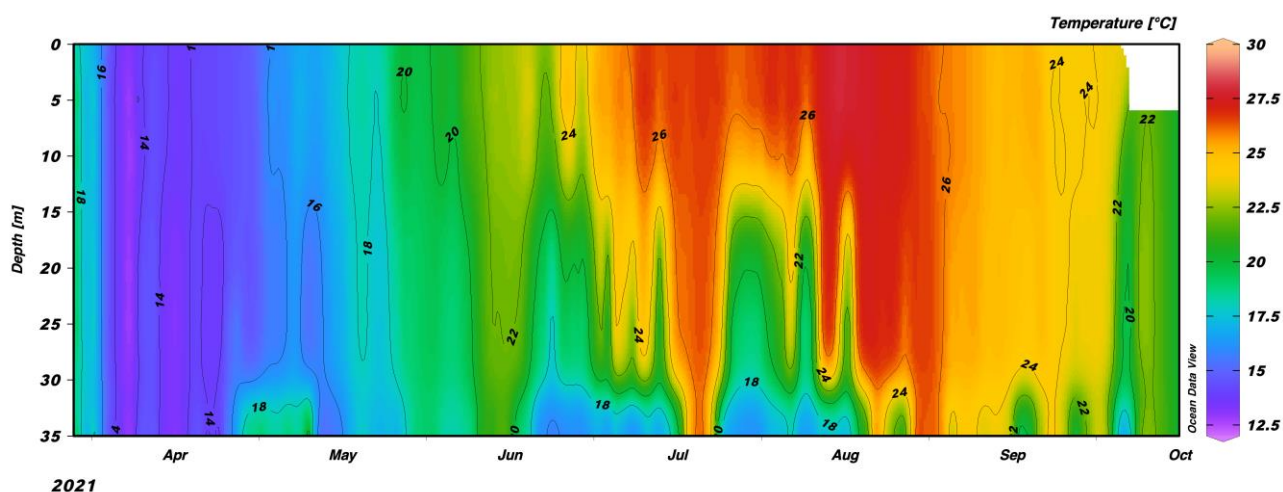


Figura 25. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Torre Guaceto per il periodo compreso tra il 30 marzo 2021 e il 12 novembre 2021. Le aree bianche indicano i periodi nei quali i sensori non hanno registrato i dati per problemi tecnici.

AMP Capo Carbonara

Nell'AMP Capo Carbonara è stato possibile monitorare l'andamento della temperatura da ottobre 2020 a settembre 2021, a eccezione dei mesi di aprile, maggio e giugno 2021 per problemi tecnici ai sensori. Nella stagione invernale del 2020 la temperatura media è

risultata di ~15°C con massime di ~17°C e minime di ~14°C. Per la stagione estiva del 2021 invece la temperatura media è risultata di ~23°C con massime di ~29°C e minime di ~15°C (Tab. 8).

Analizzando l'andamento delle temperature è stato possibile osservare come nei mesi autunnali e invernali (i.e., da ottobre a febbraio) alle maggiori profondità le temperature fossero più elevate rispetto alle profondità più superficiali, con i valori minimi registrati a febbraio 2021 di ~17°C a 5 m e di ~20°C a 40 m. Un andamento contrario è stato invece ovviamente osservato durante i mesi estivi con temperature più alte in superficie e più basse alle maggiori profondità (Fig. 26). Dall'analisi tramite il software ODV (Fig. 27) a giugno 2021 è stata osservata un'anomalia termica che potrebbe tuttavia essere dovuta a problemi ai sensori, come osservato anche per le AMP Isola dell'Asinara e Isole di Ventotene e Santo Stefano in differenti periodi dell'anno.

Tabella 8. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 m) nell'AMP Capo Carbonara per il periodo compreso tra ottobre 2020 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
5	20,82	4,96	31,76	13,96
10	20,72	4,87	31,13	13,98
15	20,40	4,71	30,83	13,89
20	20,09	4,48	31,16	13,99
25	19,55	4,19	30,96	13,95
30	18,96	3,86	30,86	13,98
35	18,36	3,69	31,06	13,96
40	18,15	3,68	31,69	13,97

TEMPERATURE MEDIE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
Inverno-20	14,75	0,59	16,67	13,89
Estate-21	23,06	3,75	29,07	15,27

TEMPERATURE MEDIE MENSILI				
Mesi	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
ott-20	21,50	1,70	26,99	14,61
nov-20	19,41	0,87	23,47	15,60
dic-20	16,39	0,74	18,34	14,74
gen-21	14,76	0,32	15,82	14,04
feb-21	14,37	0,15	14,74	13,89
mar-21	14,48	0,15	15,22	14,08
lug-21	23,99	3,93	29,07	15,27
ago-21	22,48	3,27	28,48	16,13

set-21	22,61	3,81	27,59	15,56
--------	-------	------	-------	-------

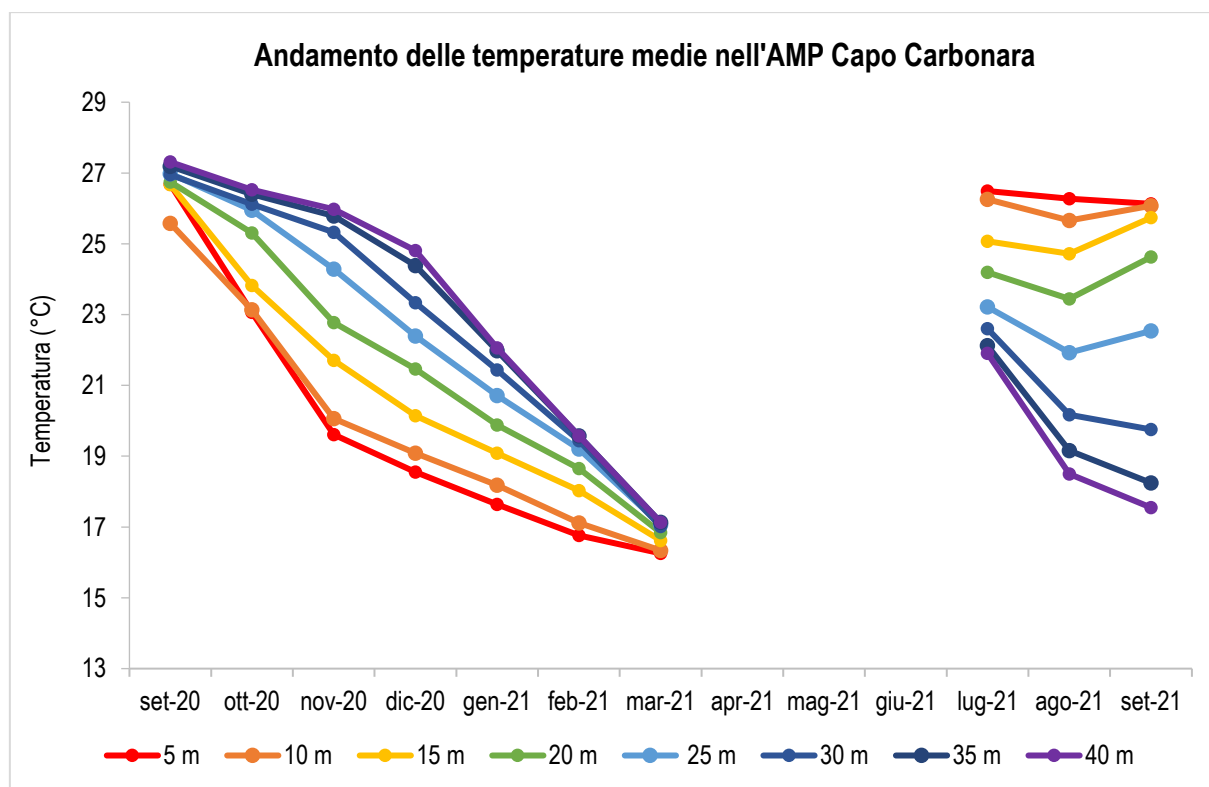


Figura 26. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo compreso tra settembre 2020 e settembre 2021 nell'AMP Capo Carbonara. Nel periodo compreso tra aprile 2021 e giugno 2021 i dati sono mancanti a causa di un problema tecnico ai sensori.

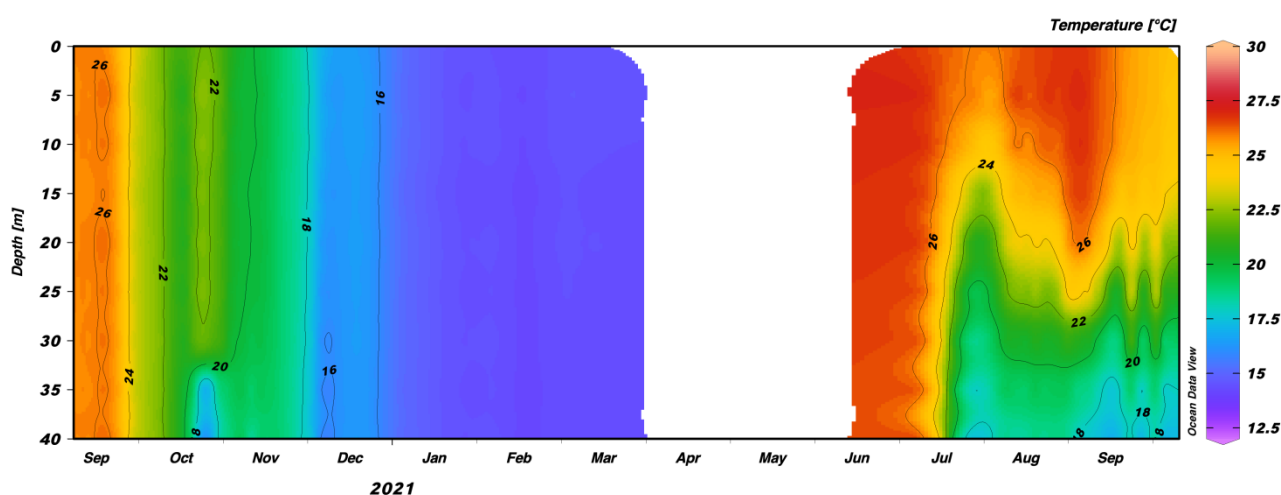


Figura 27. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Capo Carbonara per il periodo compreso tra l'8 settembre 2020 e il 6 ottobre 2021. Le aree bianche indicano i periodi nei quali i sensori non hanno registrato i dati per problemi tecnici.

AMP Plemmirio

Nell'AMP Plemmirio è stato possibile monitorare l'andamento della temperatura da luglio 2020 a settembre 2021. Nella stagione autunnale del 2020 la temperatura media è risultata di ~21°C con massime di ~29°C e minime di ~17°C. Per la stagione invernale del 2021 la temperatura media è risultata di ~16°C con massime di ~18°C e minime di ~14°C. Durante la primavera 2021 la temperatura è stata di ~16°C con massime di ~24°C e minime di ~14°C. Infine, nella stagione estiva 2021 sono state registrate temperature medie di ~22°C con massime che hanno raggiunto i ~29°C e minime di ~16°C (Tab. 9).

Analizzando l'andamento di temperatura è stato possibile osservare alte temperature ad agosto 2020, con medie di ~29°C su tutta la colonna d'acqua. Un valore così alto potrebbe essere dovuto a motivi tecnici legati ai sensori (come osservato anche in altre AMP). Dal mese di settembre 2020 le temperature hanno iniziato a diminuire in maniera omogenea su tutta la colonna d'acqua fino ad aprile 2021, mese in cui sono state registrate temperature medie di ~15°C. A maggio le temperature hanno ricominciato ad aumentare fino ad agosto 2021 quando sono state registrate temperature di ~27°C a 5 m e ~18°C a 40 m con un netto termocline (Fig. 28, 29). Questa rappresenta la principale differenza osservata dal confronto tra l'estate 2020 e 2021: sebbene infatti gli alti valori relativi ad agosto 2020 (come precedentemente detto) potrebbero essere attribuiti ad anomalie dei sensori, le temperature risultano omogenee lungo tutta la colonna d'acqua. Ulteriori monitoraggi saranno quindi necessari per evidenziare eventuali anomalie termiche e comprendere meglio il tipico andamento stagionale per quest'area di studio.

Tabella 9. Temperature medie, massime e minime annuali, stagionali e mensili registrate alle diverse profondità (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) nell'AMP Plemmirio per il periodo compreso tra agosto 2020 e settembre 2021. In tabella sono inoltre riportati i valori di deviazione standard (dev.st) riferiti ai valori medi.

TEMPERATURE TOTALI				
Stazioni (m)	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
5	20,88	4,60	30,57	14,54
10	20,55	4,42	31,79	14,20
15	20,19	4,17	30,57	14,54
20	19,69	3,91	30,77	14,54
25	19,23	3,65	30,78	14,29
30	18,73	3,30	30,91	14,59
35	18,29	3,02	30,81	14,57
40	17,86	2,80	30,84	14,54

TEMPERATURE STAGIONALI				
Stagioni	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
Autunno-20	20,86	2,13	29,47	16,75
Inverno-21	15,64	0,83	18,02	14,20
Primavera-21	16,31	1,74	24,25	14,29
Estate-21	21,96	3,24	28,66	15,83

TEMPERATURE MENSILI				
---------------------	--	--	--	--

Mesi	Media (°C)	dev.st	Max (°C)	Min (°C)
lug-20	27,41	2,36	31,82	21,36
ago-20	29,47	2,17	32,62	20,43
set-20	25,66	4,73	31,79	16,75
ott-20	21,82	1,91	27,22	16,96
nov-20	20,38	0,60	21,53	17,55
dic-20	18,17	0,82	21,17	16,52
gen-21	15,90	0,54	17,10	15,02
feb-21	15,04	0,17	15,65	14,20
mar-21	15,02	0,17	16,05	14,29
apr-21	15,32	0,29	17,03	14,68
mag-21	17,02	1,54	22,76	15,15
giu-21	21,70	2,83	27,74	16,21
lug-21	21,70	2,83	27,74	16,21
ago-21	21,92	3,40	28,66	15,95
set-21	23,89	2,30	27,29	17,34

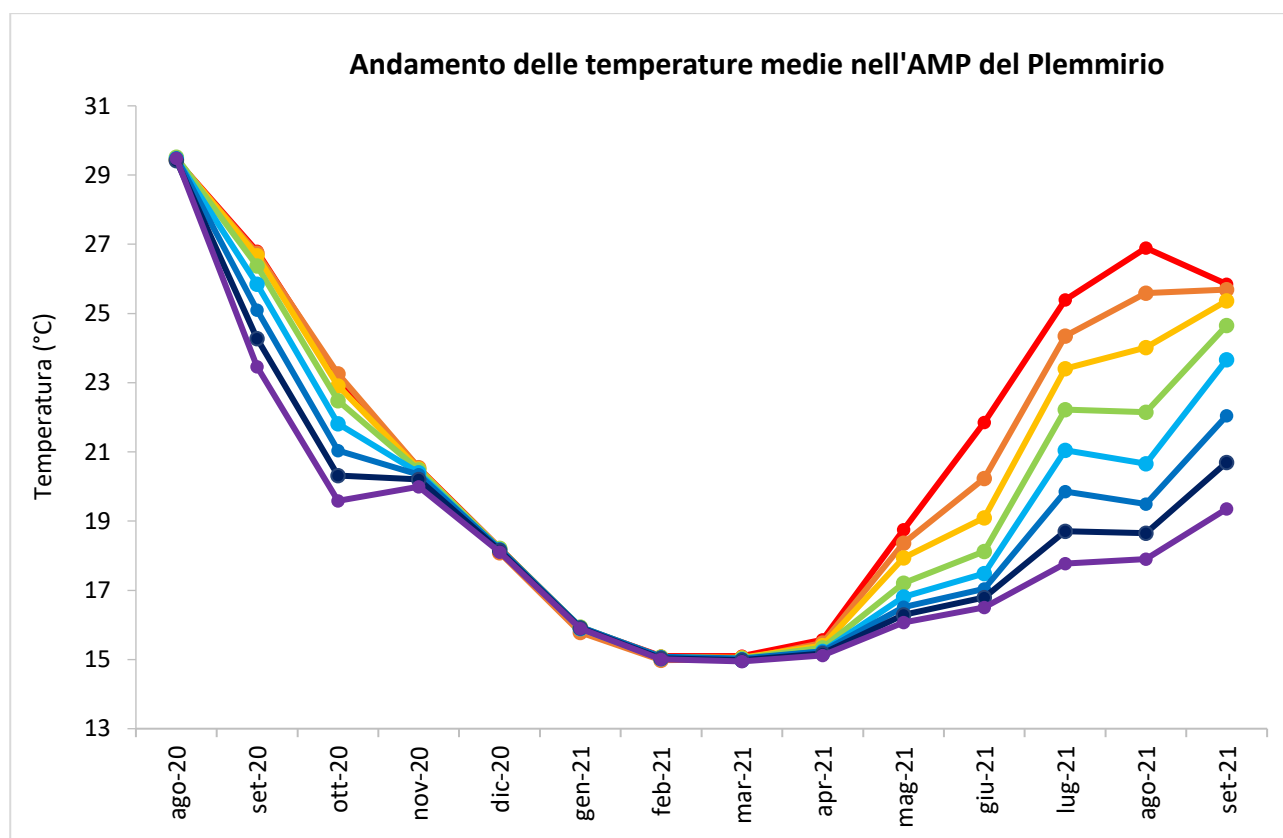


Figura 28. Valori medi mensili di temperatura (°C) a tutte le profondità indagate (i.e. 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 m) per il periodo compreso tra agosto 2020 e settembre 2021 nell'AMP Plemmirio.

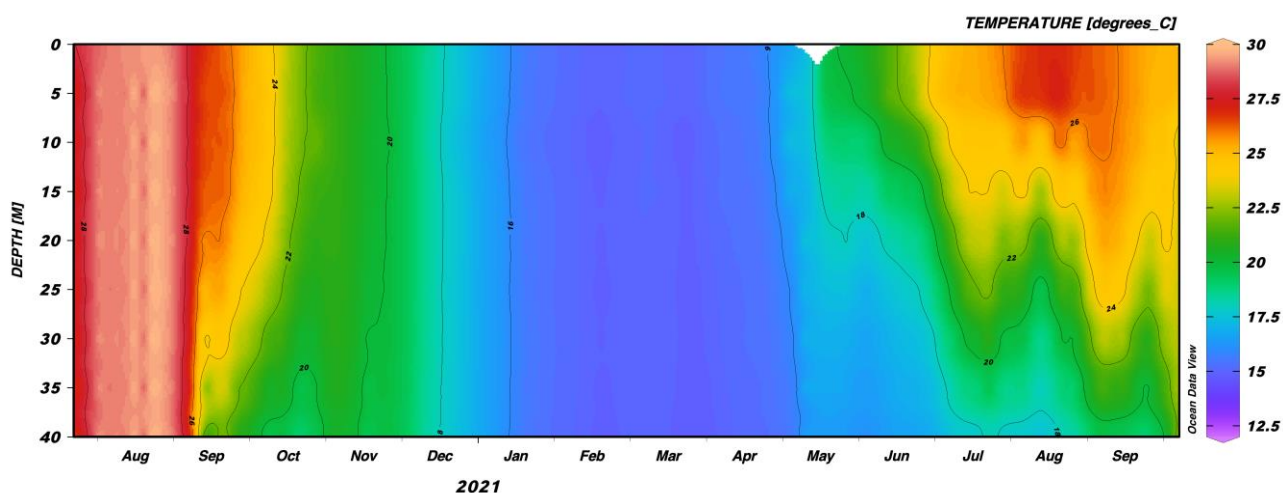


Figura 29. Andamento della temperatura (°C) sulla colonna d'acqua nell'AMP Plemmirio per il periodo compreso tra il 23 luglio 2020 e il 5 ottobre 2021. Le aree bianche indicano i periodi nei quali i sensori non hanno registrato i dati per problemi tecnici.

Confronto tra le diverse aree

Di seguito sono confrontati graficamente gli andamenti medi di temperatura tra le diverse aree di monitoraggio ad ogni profondità indagata (Fig. 30-37).

Andamenti simili si osservano per l'AMP Portofino e l'Isola d'Elba. In generale, i maggiori valori di temperatura sono stati ovviamente registrati nelle aree più a sud secondo un gradiente latitudinale con i maggiori valori di temperatura nelle AMP Capo Carbonara e Plemmirio e con i minori valori di temperatura nell'AMP Miramare, Portofino e nell'area dell'Isola d'Elba.

Le maggiori differenze tra gli andamenti di temperatura nelle diverse aree di monitoraggio si riscontrano dai 20 m di profondità in giù per l'AMP Plemmirio, dove i valori di temperatura da luglio 2020 a settembre 2020 risultano particolarmente più alti rispetto alle altre aree di monitoraggio (Fig. 33-37).

É interessante notare che, come per l'AMP Capo Carbonara, da ottobre 2020 a marzo 2021 dai 15 m di profondità si registrano temperature medie più alte anche nell'area marina più a sud, ovvero nell'AMP Plemmirio (Fig. 32-37).

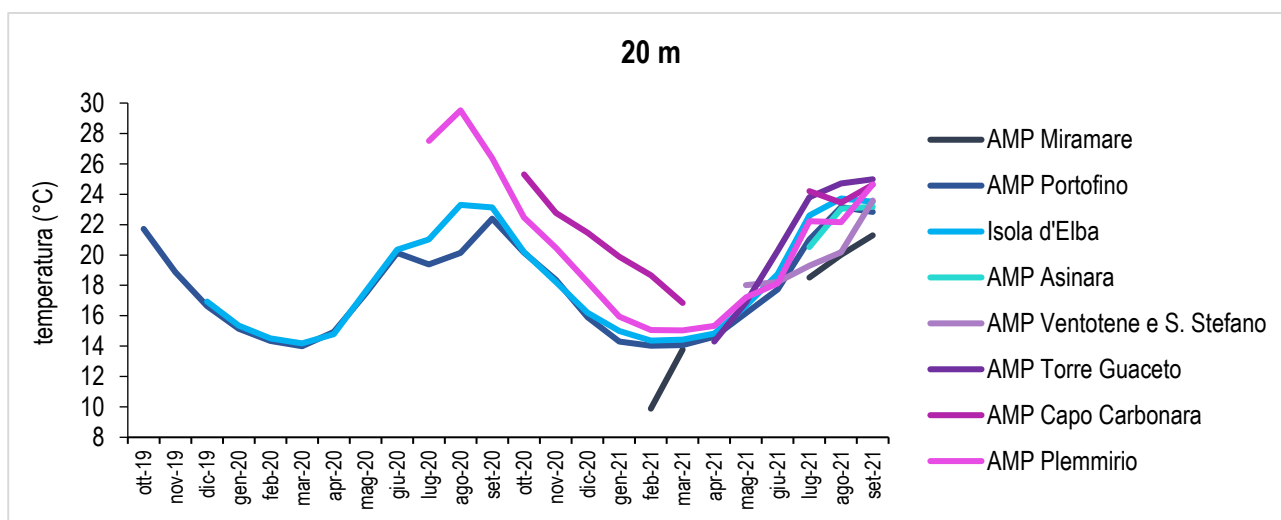


Figura 33. Valori medi mensili di temperatura (°C) a 20 m per tutte le aree monitorate.

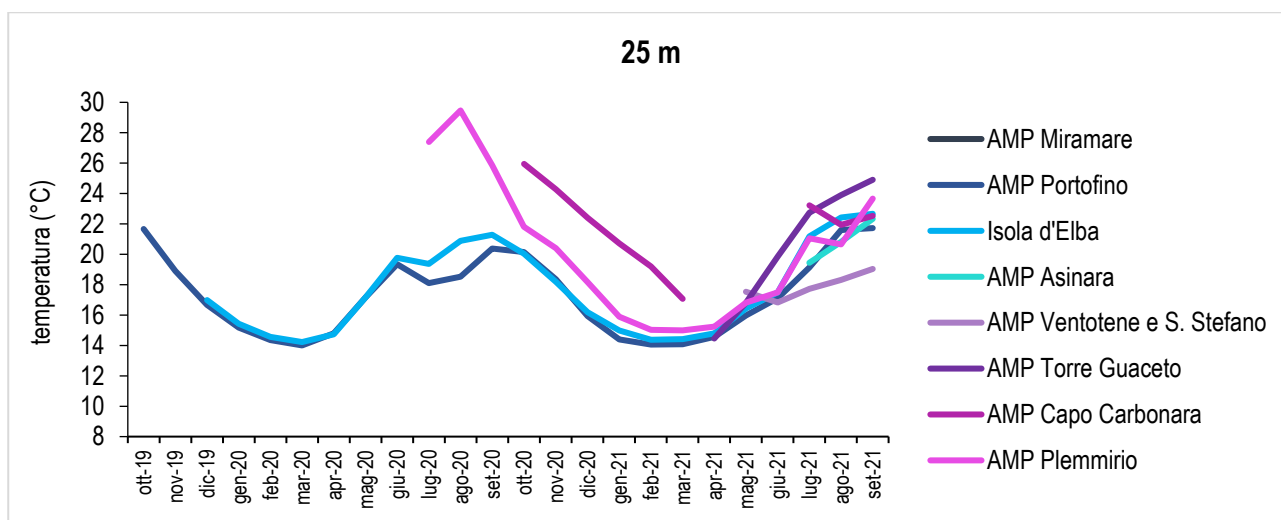


Figura 34. Valori medi mensili di temperatura (°C) a 25 m per tutte le aree monitorate.

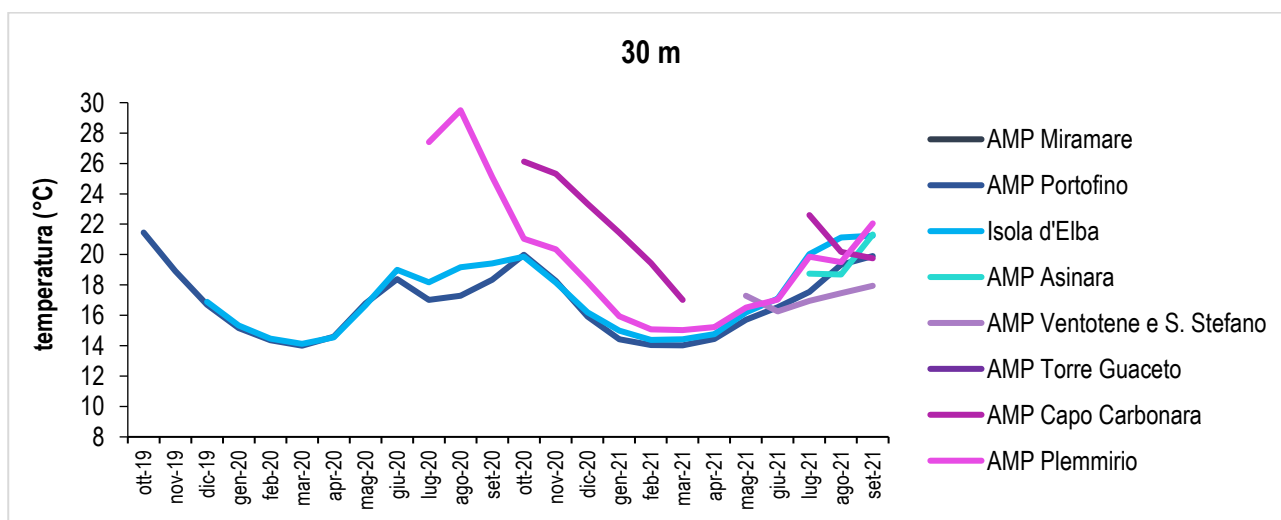


Figura 35. Valori medi mensili di temperatura (°C) a 30 m per tutte le aree monitorate.

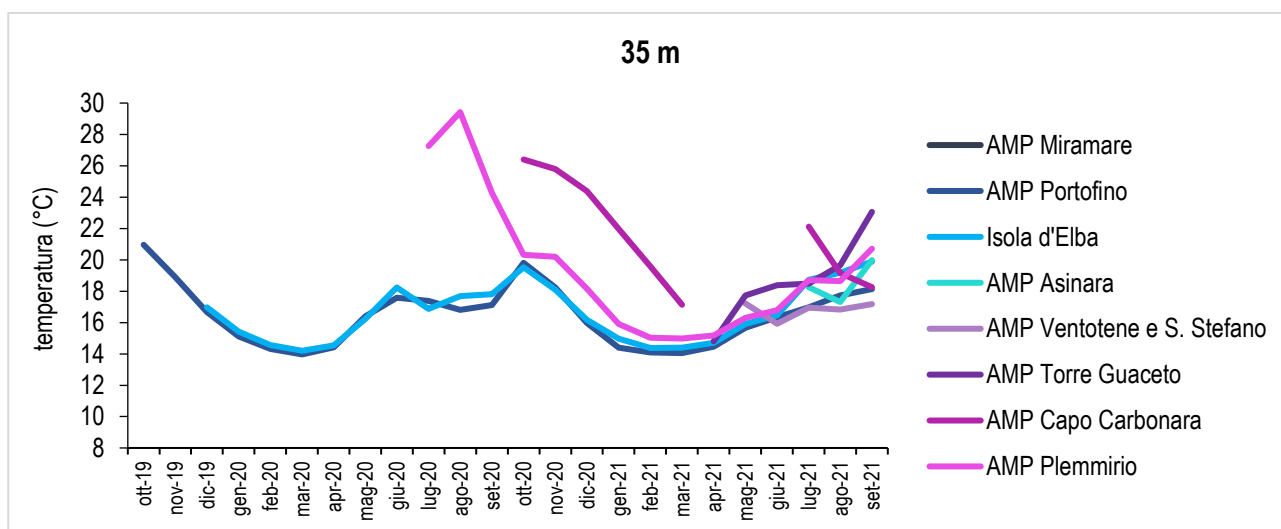


Figura 36. Valori medi mensili di temperatura (°C) a 35 m per tutte le aree monitorate.

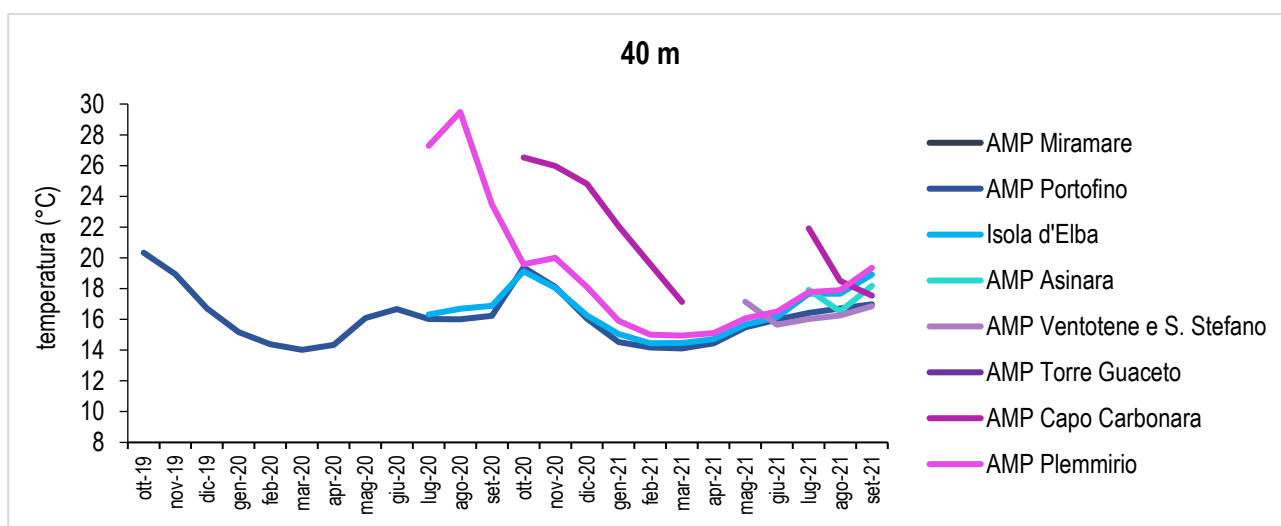


Figura 37. Valori medi mensili di temperatura (°C) a 40 m per tutte le aree monitorate.

STUTTURA E STATO ECOLOGICO DELLE COMUNITÀ

L'analisi della struttura e della composizione delle comunità bentoniche dell'AMP Capo Carbonara e dell'AMP Torre Guaceto ha permesso una prima caratterizzazione degli ecosistemi di scogliera in queste 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, che è risultato in generale buono in tutte le aree di studio.

AMP Torre Guaceto

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a giugno 2021, per l'AMP Torre Guaceto sono state rilevate un totale di 82 specie bentoniche sessili tra le quali 34 specie vegetali e 48 specie animali. Di queste ultime il 35% (N=17) è rappresentato da poriferi, il 27% (N=13) da cnidari, il 13% (N=6) da briozoi, il 10% (N=5) da anellidi, il 6% (N=3) da echinodermi, il 4% (N=2) da molluschi, e il 4% (N=2) da cordati (Fig. 38).

I valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H'), risultano compresi tra 2 e 3,5 a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $H'=2,92$; 20 m: $H'=3,64$; 30 m: $H'=2,44$; 40 m: $H'=3,47$), evidenziando sempre un buono stato ecologico delle comunità di scogliera nell'AMP Torre Guaceto (Fig. 39).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano alti a tutte le profondità indagate ad eccezione dei 30 m (i.e., 10 m: $D'=0,95$; 20 m: $D'=0,98$; 30 m: $D'=0,65$; 40 m: $D'=0,98$), a indicare quindi una comunità molto dominata da poche specie e, di conseguenza, un basso livello di equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Torre Guaceto (Fig. 40).

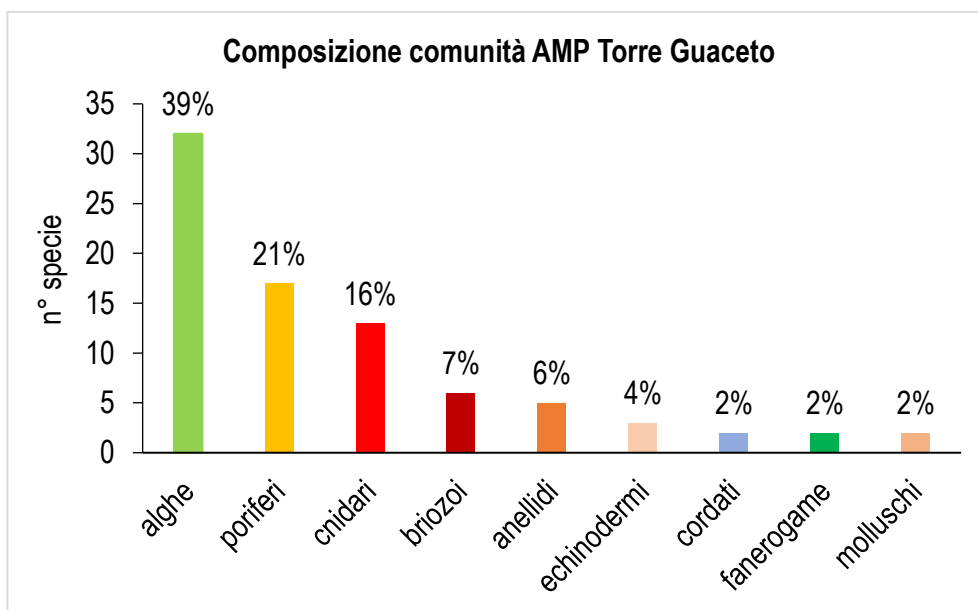


Figura 38. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Torre Guaceto. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

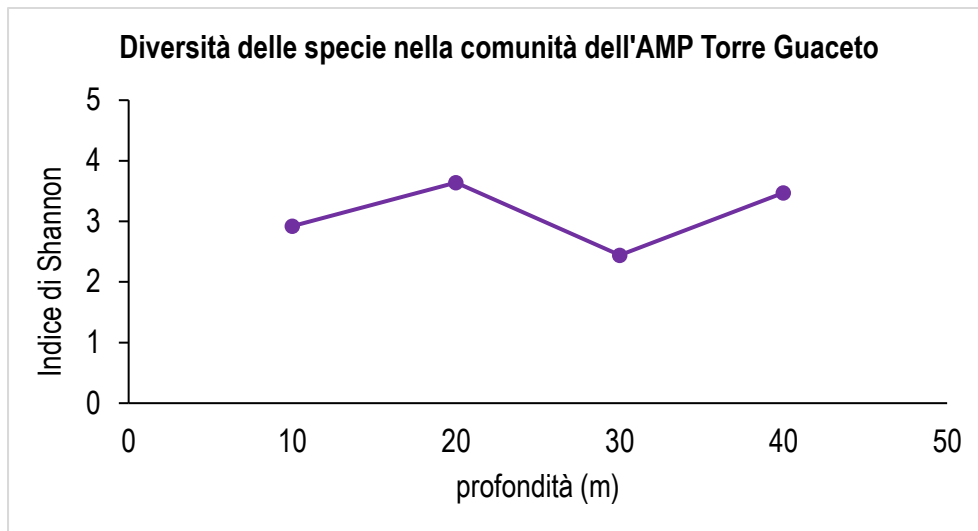


Figura 39. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Torre Guaceto.

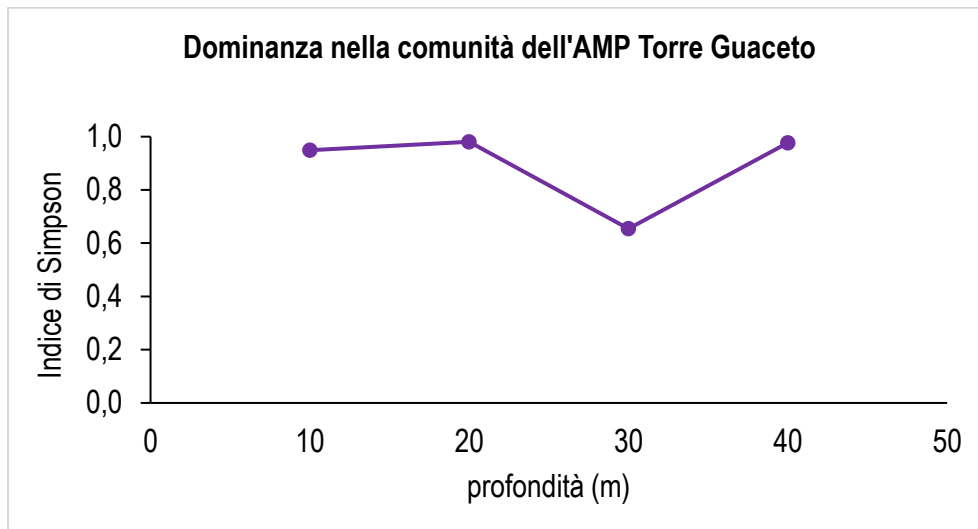


Figura 40. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Torre Guaceto.

AMP Capo Carbonara

Nell'ambito dei monitoraggi condotti a maggio 2021, per l'AMP Capo Carbonara sono state rilevate un totale di 101 specie bentoniche sessili tra le quali 33 specie vegetali e 68 specie animali. Di queste ultime il 26% (N=18) è rappresentato da poriferi, il 24% (N=16) da cnidari, il 15% (N=10) da briozoi, il 15% (N=10) da echinodermi, il 9% (N=6) da anellidi, il 6% (N=4) da molluschi, il 4% (N=3) da artropodi, l'1% (N=1) da cordati (Fig. 41).

I valori relativi alla diversità della comunità, misurata attraverso l'indice di Shannon (H'), risultano compresi tra 3 e 4 a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $H'=3,79$; 20 m: $H'=4,44$;

30 m: $H'=4,42$; 40 m: $H'=4,21$), evidenziando uno stato ecologico elevato delle comunità di scogliera nell'AMP Capo Carbonara (Fig. 42).

Per quanto riguarda la dominanza della comunità, i valori dell'indice di Simpson (D') risultano alti a tutte le profondità indagate (i.e., 10 m: $D'=0,98$; 20 m: $D'=0,99$; 30 m: $D'=0,99$; 40 m: $D'=0,98$) a indicare quindi una comunità molto dominata da poche specie e, di conseguenza, un basso livello di equitabilità tra le specie che compongono la comunità di scogliera dell'AMP Capo Carbonara (Fig. 43).

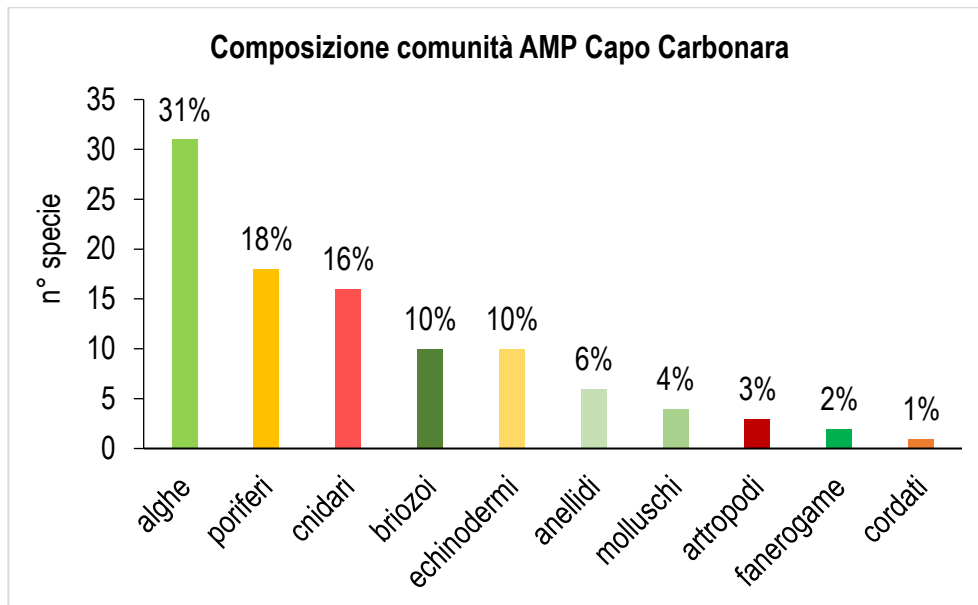


Figura 41. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità dell'AMP Capo Carbonara. Sono inoltre riportati i valori percentuali di ogni gruppo sull'intera comunità.

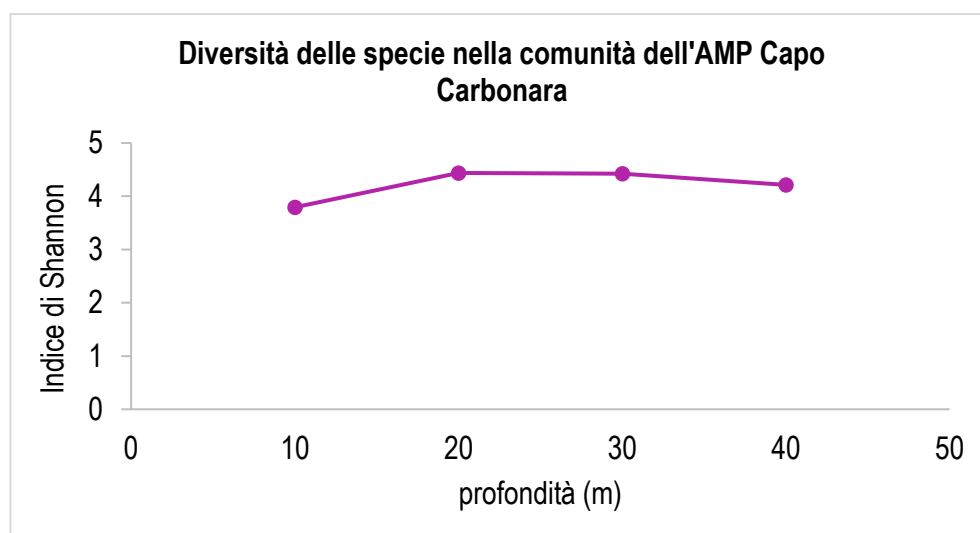


Figura 42. Grafico dell'andamento dell'indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Capo Carbonara.

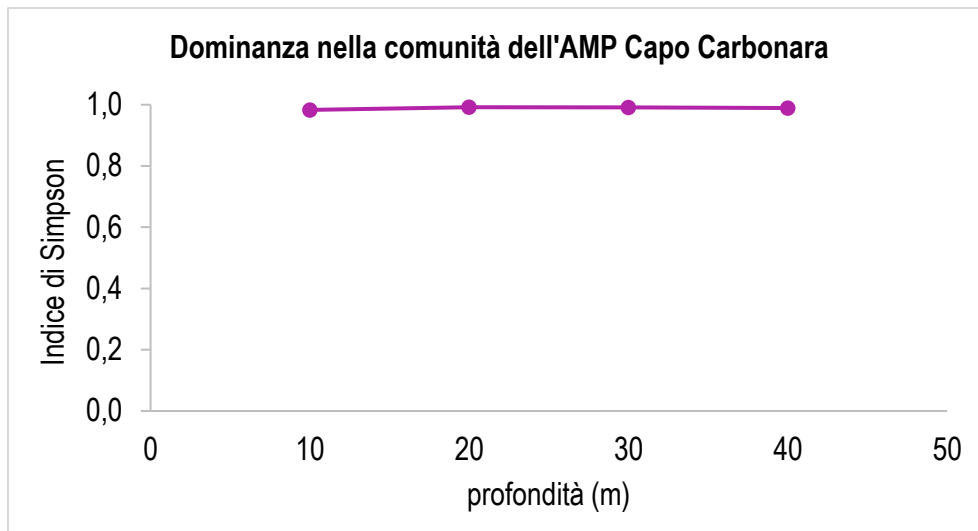


Figura 43. Grafico dell'andamento dell'indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nell'AMP Capo Carbonara.

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

Il confronto della composizione e della struttura delle comunità bentoniche nelle cinque aree di studio monitorate nell'ambito dei due anni di progetto ha permesso di evidenziare come i maggiori valori di biodiversità, in termini di numero di specie, siano stati rilevati nell'AMP Capo Carbonara (N=101), seguita dall'AMP Torre Guaceto (N=82), dall'AMP Plemmirio (N=71) e all'Isola d'Elba (N=70), e infine dall'AMP Portofino (N=38). I gruppi più rappresentati in termini di numero di specie sono le alghe, i poriferi, gli cnidari e i briozoi (Fig. 44).

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'Isola d'Elba, l'AMP Torre Guaceto e l'AMP Plemmirio. Una moderata qualità ecologica è stata invece rilevata nell'AMP Portofino (Fig. 45).

Gli alti valori di dominanza rilevati in tutte e cinque le aree monitorate indicano che le comunità, per quanto ricche, siano anche fortemente dominate da alcune specie e, di conseguenza, possano essere meno resilienti (Fig. 46). A fronte di un impatto, infatti, le comunità con bassi valori di equitabilità sono maggiormente 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).

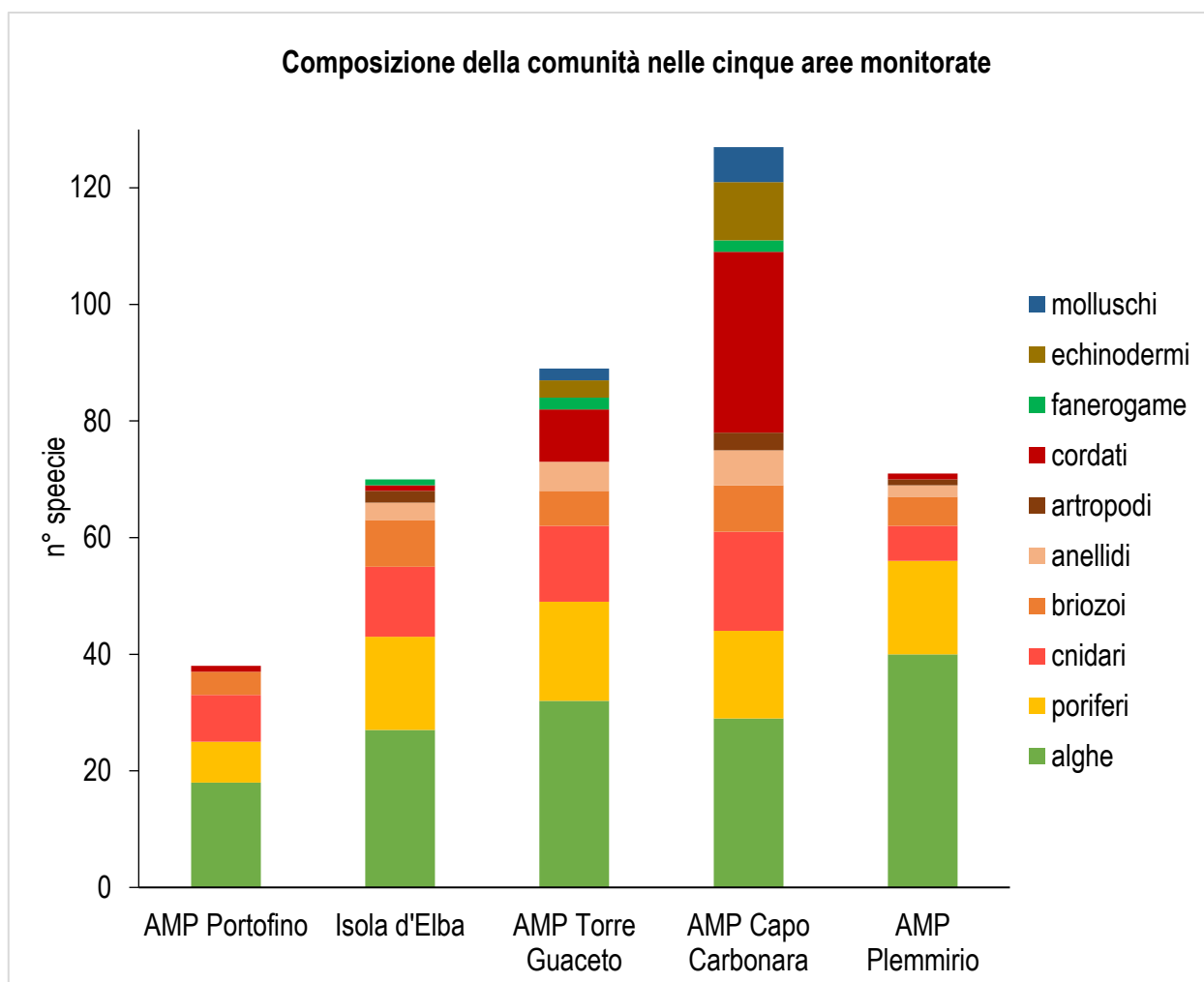


Figura 44. Numero di specie per ogni taxon vegetale e animale che compone la comunità bentonica nelle cinque aree di studio.

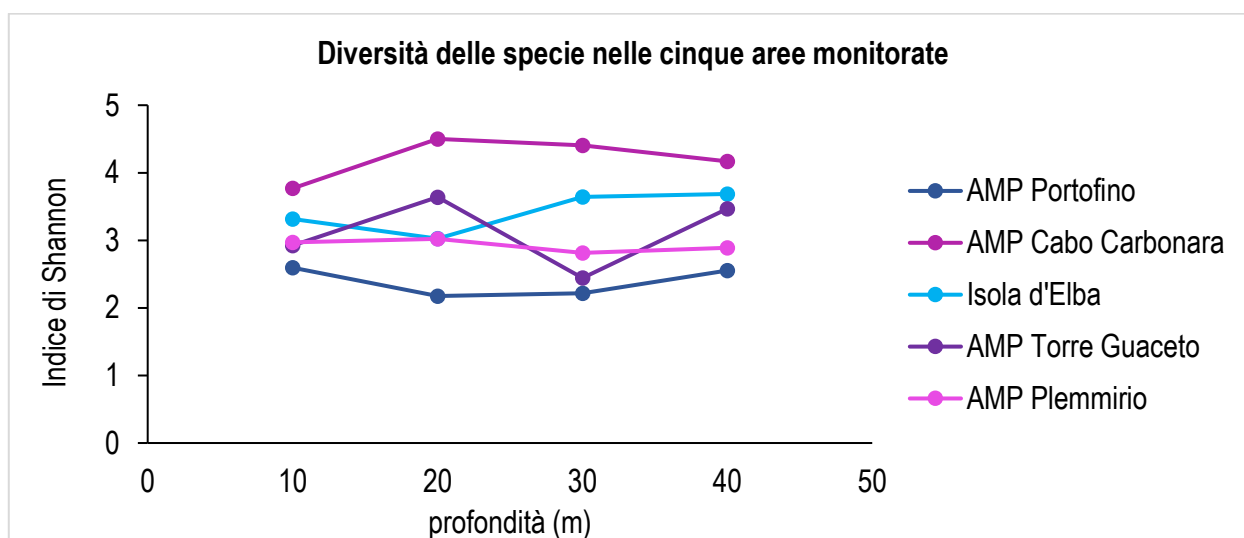


Figura 45. Grafico dell'andamento dell'Indice di Shannon lungo il gradiente batimetrico nelle cinque aree monitorate.

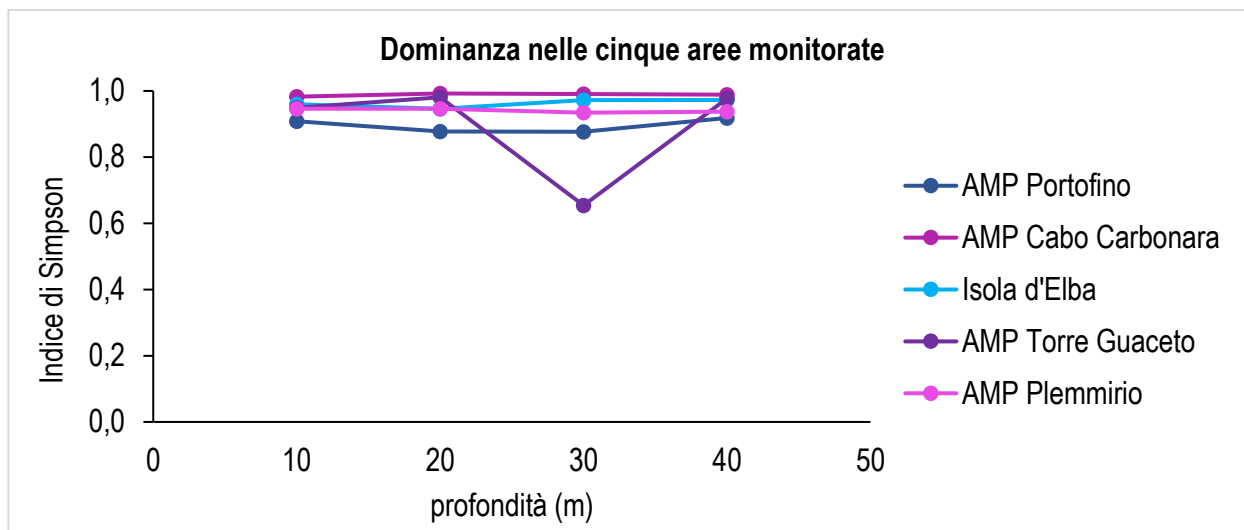


Figura 46. Grafico dell'andamento dell'Indice di Simpson lungo il gradiente batimetrico nelle cinque aree monitorate.

CAMBIAMENTO NEL TEMPO

La disponibilità di dati storici a partire dagli anni '90 all'Isola d'Elba e dal 2000 nell'AMP Capo Carbonara ha permesso di valutare come le comunità bentoniche delle scogliere rocciose di queste due aree siano cambiate nel tempo.

Isola d'Elba

L'analisi del cambiamento nel tempo della comunità bentonica dell'Isola d'Elba è stata condotta nell'ambito del primo anno di progetto (Montefalcone & Azzola, 2020) e le traiettorie temporali avevano mostrato un cambiamento irreversibile negli ultimi 30 anni per le stazioni a 10 m e 20 m e un chiaro segnale di ritorno alla condizione iniziale per la stazione a 40 m. A 30 m, invece, la comunità sembrava stesse tornando alla condizione iniziale nel 2010, ma i dati del 2020 mostrano un nuovo cambio di direzione mostrando nuovamente un cambiamento probabilmente irreversibile. Le analisi relative ai dati raccolti nell'ambito del secondo anno di progetto non hanno evidenziato differenze significative rispetto a quanto osservato nel 2020.

AMP Capo Carbonara

L'analisi delle corrispondenze (CA) applicata alla matrice dei dati di comunità nell'Area Marina Protetta Capo Carbonara ha fornito due assi significativi (test Lebart, $p < 0,05$), che spiegano rispettivamente il 31,5% e il 19,8% della variazione totale. Il primo asse, in particolare, rappresenta il gradiente di profondità, mentre il secondo asse rappresenta il gradiente temporale (Fig. 47).

La distanza tra i punti rappresentati attraverso la CA, che indicano i centroidi delle repliche per ogni anno di studio alle diverse profondità, mostra come la struttura delle comunità di scogliera rocciosa sia cambiata a tutte le fasce batimetriche indagate negli ultimi 20 anni (Fig. 47).

In generale, i maggiori cambiamenti nel tempo possono essere attribuiti prevalentemente all'arrivo delle specie termofile, che non erano state osservate nei rilevamenti condotti da Bianchi & Morri (2001), quali: *Centrostephanus longispinus*, *Epinephelus costae*, *Hermodice carunculata*, *Peltaster placenta*, *Sparisoma cretense*, e *Tricleocarpa fragilis*. Tuttavia, tra le specie che sono presenti nel 2020 e che non erano state osservate nel 2000 vi sono soprattutto le specie ittiche, che sono aumentate del 23,8% rispetto al 2000. Questo aumento potrebbe, in parte, essere riconducibile al diverso periodo di monitoraggio (i.e., dicembre per il 2000, maggio per il 2020) ma più verosimilmente all'aumento della fauna ittica come conseguenza dell'effetto riserva dell'AMP.

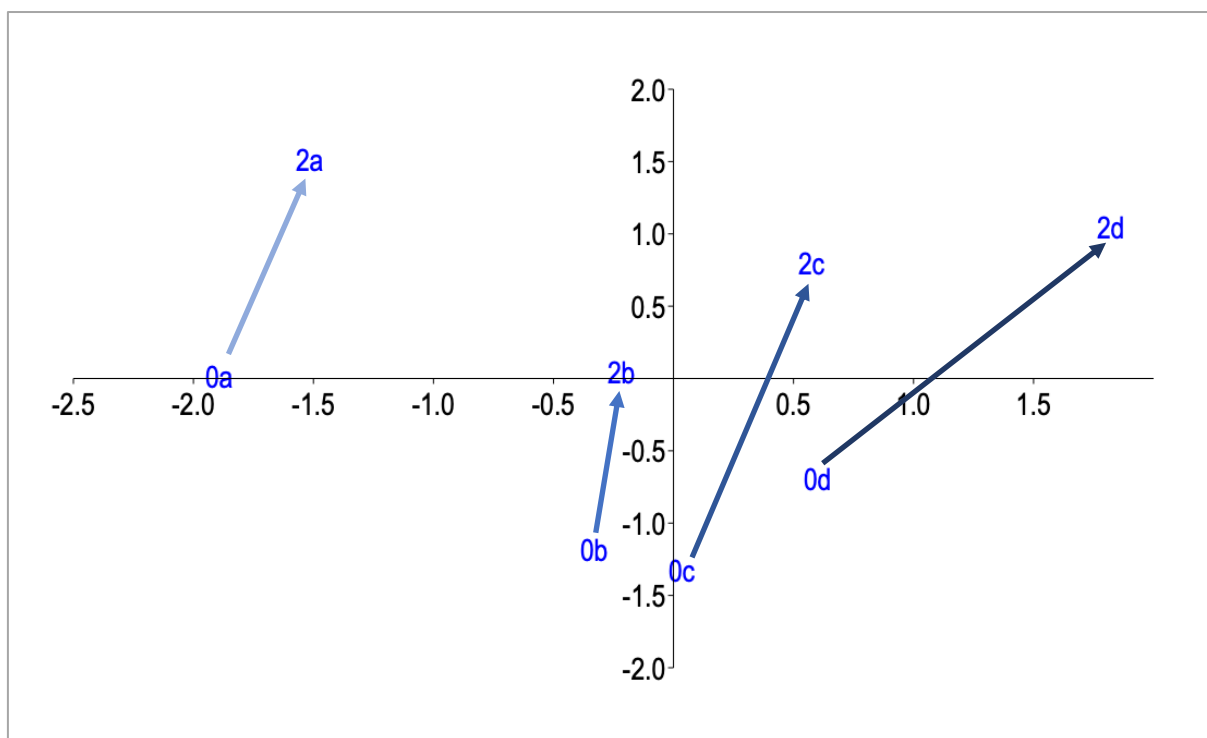


Figura 47. Analisi delle corrispondenze (CA) sulla comunità di scogliera di Capo Carbonara nei due differenti periodi di monitoraggio, 2000 e 2020, e alle varie profondità. Il primo asse (orizzontale) spiega il 31,5% della varianza totale mentre il secondo asse (verticale) il 19,8%. Il codice dei punti, rappresentanti i centroidi per ogni anno di studio alle diverse profondità, è composto da: i) un numero che indica il periodo di raccolta dati (0=2000; 2=2020); e ii) una lettera che indica la fascia batimetrica (a=0-3 m; b=3-18 m; c=18-30 m; d>30 m). Le frecce evidenziano la traiettoria di cambiamento temporale.

MONITORAGGIO MORIE DI MASSA

Nel corso dei monitoraggi condotti nei primi due 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 nel 2020 e nel 2021. Questo risultato è coerente con i dati resi disponibili dalla rete mediterranea T-MEDNet nella quale, negli anni 2020 e 2021, è stata segnalata solamente una moria della specie *Eunicella singularis* in Algeria tra i 15 m e i 25 m di profondità (Benabdi Mouloud, <https://t-mednet.org/mass-mortality/mass-mortality-events>).

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 e il relativo grado di impatto (i.e., basso, moderato, severo).

Isola d'Elba

Confrontando i dati raccolti nei primi due anni di progetto Mare Caldo è stato possibile osservare un aumento della mortalità in diverse specie target. A giugno 2020, alle profondità di 30 m e 40 m, solo il 10% delle colonie di *Paramuricea clavata* riportavano segni di necrosi mentre nel 2021 la percentuale è raddoppiata raggiungendo il 19% di colonie con segni di impatto. Un incremento significativo della percentuale di moria è risultato anche per le alghe corallinacee incrostanti, lungo tutta la colonna d'acqua, per le quali i segni di sbiancamento sono aumentati del 20% rispetto al 2020. Per la gorgonia gialla *Eunicella cavolini* e il madreporario coloniale *Cladocora caespitosa* non sono state invece osservate, tra i due anni di monitoraggio, differenze significative nelle percentuali di colonie con necrosi. Tuttavia, entrambe le specie continuano a mostrare il 25% e il 60% di colonie impattate, rispettivamente. Un risultato interessante è relativo alla gorgonia bianca *Eunicella singularis* che nel 2020 era apparsa la specie più sensibile (raggiungendo in alcuni siti percentuali di mortalità del 50%) mentre nel 2021 non sono stati osservati segni di necrosi su tutte le colonie monitorate, che sono quindi apparse sane seppur di piccole dimensioni. Ulteriori segni di impatto sono stati osservati, per la prima volta nel 2021, sul madreporario solitario *Balanophyllia europea* e sui poriferi *Agelas oroides* e *Ircinia oros*. Per queste specie, tuttavia, le osservazioni sono state puntiformi e solo attraverso i futuri monitoraggi sarà possibile stabilire se l'impatto sarà da attribuire all'innalzamento della temperatura. Anche quest'anno, come nel 2020, sono state osservate le grosse conchiglie di individui morti del bivalve *Pinna nobilis*, che nel 2018 e 2019 erano state colpite da una moria di massa dovuta a un consorzio di patogeni la cui diffusione in tutto il Mediterraneo è stata favorita dall'aumento di temperatura dell'acqua (Tab. 10).

Tabella 10. Risultati del monitoraggio delle morie di massa all'Isola d'Elba. 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%.

Cannelle							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Balanophyllia europea</i>	3-9	B	5	5	95	100	Sbiancamento
<i>Caryophyllia inornata</i>	6	/	0	0	40	40	
<i>Cladocora caespitosa</i>	15	M	40	2	3	5	Sbiancamento
<i>Eunicella cavolini</i>	30	/	0	0	9	9	
<i>Eunicella singularis</i>	25-30	/	0	0	14	14	
<i>Paramuricea clavata</i>	33-37	B	17	17	84	101	Necrosi
<i>Paramuricea clavata</i>	37-44	B	29	26	64	90	Necrosi
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m²)	Superficie non impattata (m²)	Superficie rilevata (m²)	Note
Alghe corallinacee	16	S	68	4,5	2,1	6,6	Sbiancamento
Alghe corallinacee	20-27	S	81	3,8	0,9	4,7	Sbiancamento
<i>Lithophyllum</i> sp.	36	M	40	1,8	2,6	4,4	Sbiancamento

Formiche della Zanca							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Balanophyllia europea</i>	4-10	B	5	5	95	10	Sbiancamento
<i>Caryophyllia inornata</i>	5	/	0	0	7	7	
<i>Eunicella cavolini</i>	25-30	M	59	24	17	41	Necrosi
<i>Eunicella cavolini</i>	36-49	S	75	6	2	8	Necrosi
<i>Eunicella singularis</i>	32-43	/	0	0	5	5	
<i>Paramuricea clavata</i>	38-49	B	22	20	73	93	Necrosi

Scoglietto							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Balanophyllia europea</i>	5	B	8	3	33	36	Sbiancamento
<i>Cladocora caespitosa</i>	3	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Cladocora caespitosa</i>	25	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Ircinia oros</i>	4	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Eunicella cavolini</i>	39-42	B	8	4	49	53	Necrosi
<i>Eunicella singularis</i>	30-42	/	0	0	7	7	
<i>Pinna nobilis</i>	20-27	S	100	3	0	3	Morie passate

<i>Spondilus</i> sp.	4	M	50	1	1	2	Morti
Specie	prof (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie rilevata (m ²)	Note
Alghe corallinacee	7-22	S	79	9,5	2,5	12	Sbiancamento
Alghe corallinacee	30-40	B	15	1,4	8,6	10	Sbiancamento

Picchi di Pablo							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Agelas oroides</i>	35	S	100	1	0	1	Sbiancamento
<i>Balanophyllia europea</i>	5	B	3	4	120	124	Sbiancamento
<i>Cladocora caespitosa</i>	33	/	0	0	1	1	
<i>Eunicella cavolini</i>	15-20	B	22	4	14	18	Necrosi
<i>Eunicella cavolini</i>	22-30	/	0	0	13	13	
<i>Eunicella cavolini</i>	33-38	B	7	3	40	43	Necrosi
<i>Eunicella singularis</i>	33	/	0	0	1	1	
<i>Paramuricea clavata</i>	33-38	B	10	9	84	93	Necrosi
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie rilevata (m ²)	Note
Alghe corallinacee	15-25	M	37	1,7	2,9	4,6	Sbiancamento
Alghe corallinacee	36-38	M	46	6	7	13	Sbiancamento

AMP Torre Guaceto

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target nell'AMP Torre Guaceto (Tab. 11) mostrano segnali di impatto su un numero esiguo di cnidari rispetto a quanto osservato nelle altre aree di studio. Tuttavia, bisogna ricordare che le comunità bentoniche dell'AMP Torre Guaceto sono caratterizzate principalmente da popolamenti algali e da spugne, organismi che tipicamente sono meno soggetti all'impatto delle anomalie termiche. I popolamenti a gorgonie, normalmente utilizzate come specie target per la valutazione degli effetti dell'innalzamento della temperatura, sono invece poco comuni all'interno dell'AMP. È stata comunque osservata la presenza della gorgonia gialla (*Eunicella cavolini*) che è risultata poco abbondante e di piccole dimensioni (circa 15-20 cm di altezza), con rari segnali di necrosi. Non avendo a disposizione dati storici non è possibile determinare se questa specie sia diminuita nel tempo.

Gli effetti del riscaldamento delle acque sono stati invece osservati per il madreporario coloniale mediterraneo *Cladocora caespitosa*, di cui circa il 40% delle colonie monitorate riportano segni di sbiancamento. Segnali di mortalità sono stati inoltre osservati per le alghe corallinacee che mostrano segni di sbiancamento per circa il 50% tra i 3 m e i 10 m di

profondità e per circa il 40% tra i 20 m e i 30 m di profondità. Infine, sono stati osservati segni di necrosi in alcune colonie del briozoo *Smittina cervicornis* a circa 30 m di profondità.

Tabella 11. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Torre Guaceto. 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%.

Stazione 5-10 m							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	3-7	S	70	7	3	10	Sbiancamento
<i>Balanophyllia europea</i>	3-7	M	50	2	2	4	Sbiancamento
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m²)	Superficie non impattata (m²)	Superficie rilevata (m²)	Note
Alghe corallinacee	3	S	60	1,8	1,2	3	Sbiancamento
Alghe corallinacee	6-7	2	73	2,2	0,8	3	Sbiancamento

Stazione 10-15 m							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	10	B	11	1	8	9	Sbiancamento
<i>Pinna nobilis</i>	10	S	100	1	0	1	Morie passate
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m²)	Superficie non impattata (m²)	Superficie rilevata (m²)	Note
Alghe corallinacee	10-12	S	95	2,85	0,15	3	Sbiancamento
Alghe corallinacee	15	S	77	1,55	0,45	2	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	15	S	75	1,50	0,50	2	

Stazione 20 m							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Myriapora truncata</i>	20	S	90	0,18	0,02	1	Necrosi
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m²)	Superficie non impattata (m²)	Superficie rilevata (m²)	Note
Alghe corallinacee	20	S	60	3,05	1,95	5	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	20	M	42	5,05	6,95	12	

Stazione 26 m							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate	Note
<i>Cladocora caespitosa</i>	26	B	20	1	4	5	Sbiancamento

<i>Eunicella cavolini</i>	26	/	0	0	13	13	Necrosi
<i>Eunicella singularis</i>	26	B	6	1	16	17	Necrosi
<i>Smittina cervicornis</i>	26	M	33	0,10	0,2	1	Necrosi
<i>Smittina cervicornis</i>	26	M	33	0,05	0,1	1	Necrosi
<i>Smittina cervicornis</i>	26	M	35	0,08	0,15	1	Necrosi
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie rilevata (m ²)	Note
Alghe corallinacee	26	S	63	3,8	2,2	6	Sbiancamento
<i>Peyssonnelia</i> sp.	26	M	45	0,90	1,10	2	

Stazione 40 m							
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie rilevata (m ²)	Note
Alghe corallinacee	40	/	0	0	8	8	

AMP Capo Carbonara

I dati sul monitoraggio delle morie di massa delle specie target nell'AMP Capo Carbonara (Tab. 12) mostrano segnali di impatto soprattutto alle profondità intermedie (i.e., 20-30 m). Per la specie *Eunicella cavolini* (gorgonia gialla), presente in tutti i siti monitorati, il 70% delle colonie riportano segni di necrosi; per la specie *Eunicella singularis* (gorgonia bianca), presente a queste profondità in due siti, la percentuale di colonie in necrosi raggiunge addirittura il 90%. Le poche colonie di gorgonie sane presenti alle profondità di 20-30 m sono di piccole dimensioni (i.e., 10-15 cm), evidenziando come si siano verosimilmente verificati fenomeni di reclutamento dalle colonie più profonde successivamente le morie. Oltre la profondità di 30-40 m, invece, le colonie di *Eunicella cavolini* sono più abbondanti mentre quelle di *Eunicella singularis* sono presenti in tre dei quattro siti monitorati. In profondità le colonie con segni di necrosi sono circa il 10% del totale delle colonie monitorate, e qui raggiungono anche dimensioni maggiori (i.e., 30-40 cm) rispetto a quelle più superficiali.

Per la gorgonia rossa *Paramuricea clavata* la sua presenza tra i 20-30 m di profondità è stata rilevata solo nel sito di Santa Caterina, dove il 60% delle colonie mostra segni di impatto. Alle maggiori profondità (i.e., 30-40 m) questa specie è stata osservata solo in due siti su quattro dove, seppure costituendo popolamenti più ricchi, sono risultate di piccole dimensioni e impattate nel 60% delle colonie. Una drastica riduzione della gorgonia rossa nell'AMP Capo Carbonara era già stata recentemente segnalata dai ricercatori dell'Università di Sassari, che avevano registrato negli anni 2018, 2019 e 2020 la perdita di più della metà delle colonie (Piazzi et al. 2021).

Un altro importante segnale attribuibile agli effetti delle ondate di calore è relativo alle alghe corallinacee incrostanti per le quali, in tutti i siti monitorati a partire dai 3 m fino ai 35 m di profondità, è stato osservato uno sbiancamento che varia tra il 30% e il 70%. Questo impatto sulle alghe corallinacee non era stato osservato durante il monitoraggio del 2020, facendo quindi supporre che questi organismi abbiano sofferto dell'ondata di calore avvenuta ad agosto 2020.

Segni di sbiancamento, seppur di minore portata, sono stati inoltre osservati sul madreporario solitario *Balanophyllia europea*, con una mortalità del 20% circa, e sul madreporario coloniale *Claodocora caespitosa*, per la quale su tutte le colonie monitorate sono stati osservati fenomeni di sbiancamento.

I risultati relativi al monitoraggio sulle morie di massa degli organismi bentonici evidenziano gli effetti negativi delle ondate di calore avvenute principalmente nelle estati 2018 e 2020, durante le quali nel mese di agosto erano state registrate temperature superficiali dell'acqua che hanno superato di circa 1°C la temperatura media mensile degli ultimi 20 anni. Gli organismi più colpiti sono state le diverse specie di gorgonie, per la maggior parte ricoperte ancora ad oggi da organismi epibionti animali e vegetali, a indicare come gli effetti dei passati eventi di mortalità siano ancora visibili a distanza di anni.

Tabella 12. Risultati del monitoraggio delle morie di massa nell'AMP Capo Carbonara. 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%.

Isola dei Cavoli						
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate
<i>Balanophyllia europea</i>	6	B	22	11	39	50
<i>Eunicella cavolini</i>	20-30	M	36	9	16	25
<i>Eunicella cavolini</i>	33/35-40	B	10	10	90	100
<i>Eunicella singularis</i>	20-30	S	81	66	15	81
<i>Eunicella singularis</i>	33/35-40	B	10	10	90	100
<i>Myriapora truncata</i>	9	B	20	2	8	10
<i>Paramuricea clavata</i>	35-40	S	80	80	20	100
<i>Spondylus</i> sp.	11	S	100	1	0	1
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m²)	Superficie non impattata (m²)	Superficie monitorata (m²)
Alghe corallinacee incrostanti	5-10	M	58%	2,3	1,7	4
Alghe corallinacee incrostanti	15-30	M	85%	1,7	0,3	2

Scoglio del Buttiglione						
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate
<i>Balanophyllia europea</i>	9	/	0	0	10	10
<i>Eunicella cavolini</i>	20	S	93	28	2	30
<i>Eunicella cavolini</i>	25-46	B	10	10	90	100

<i>Eunicella singularis</i>	30-40	B	10	10	90	100
<i>Spondylus</i> sp.	21	S	100	1	0	1
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie monitorata (m ²)
Alghe corallinacee incrostanti	9	B	19	0,30	15,70	16
<i>Lithophyllum stictaeforme</i>	19	B	30	0,30	0,70	1

Secca Santa Caterina						
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate
<i>Eunicella cavolini</i>	33-37	B	24	18	57	75
<i>Eunicella singularis</i>	33-38	B	8	2	22	24
<i>Paramuricea clavata</i>	23-26	S	60	60	40	100
<i>Paramuricea clavata</i>	31-33	B	15	15	85	100
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie monitorata (m ²)
Alghe corallinacee incrostanti	30-35	S	70	2,1	0,9	3
Alghe corallinacee incrostanti	24	S	70	0,8	0,2	1
<i>Lithophyllum stictaeforme</i>	24-27	S	75	1,5	0,5	2

Secca del Berni						
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% colonie impattate	N° colonie impattate	N° colonie non impattate	N° colonie monitorate
<i>Balanophyllia europea</i>	11	M	56	44	35	79
<i>Caryophyllia inornata</i>	11	/	0	0	1	1
<i>Cladocora caespitosa</i>	17	S	100	4	0	4
<i>Eunicella cavolini</i>	20	M	50	1	1	2
Specie	Prof. (m)	Grado di impatto	% superficie impattata	Superficie impattata (m ²)	Superficie non impattata (m ²)	Superficie monitorata (m ²)
Alghe corallinacee incrostanti	11-15	S	83	2,5	0,5	3
<i>Lithophyllum stictaeforme</i>	20	M	40	0,8	0,2	1

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

Nell'ambito dei due anni di progetto e considerando tutte le aree monitorate, indipendentemente dal diverso livello di protezione e dalla diversa latitudine, per tutte le aree di studio sono stati osservati fenomeni di morie su colonie animali e organismi vegetali.

L'AMP Capo Carbonara è risultata 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. 48). Allo stesso modo in quest'area sono stati rilevati i maggiori segnali di impatto per le colonie di gorgonie delle specie *Eunicella singularis* e *Paramuricea clavata* (Fig. 48). Per la specie *Eunicella cavolini*, invece, la maggior percentuale di impatto è stata osservata all'Isola d'Elba (Fig. 48).

Nell'Area Marina Protetta Plemmirio, sulle specie cospicue di cnidari bentonici presenti (e.g., *Astroides calycularis*, *Leptopsammia pruvoti*), non sono stati osservati segni di sofferenza.

Per quanto riguarda le alghe calcaree incrostanti, i maggiori impatti sono stati osservati nell'AMP Capo Carbonara (68% delle alghe Corallinacee monitorate) e nell'AMP Torre Guaceto (43% delle alghe Corallinacee e 41% di *Peyssonnelia* sp. monitorate) (Fig. 49).

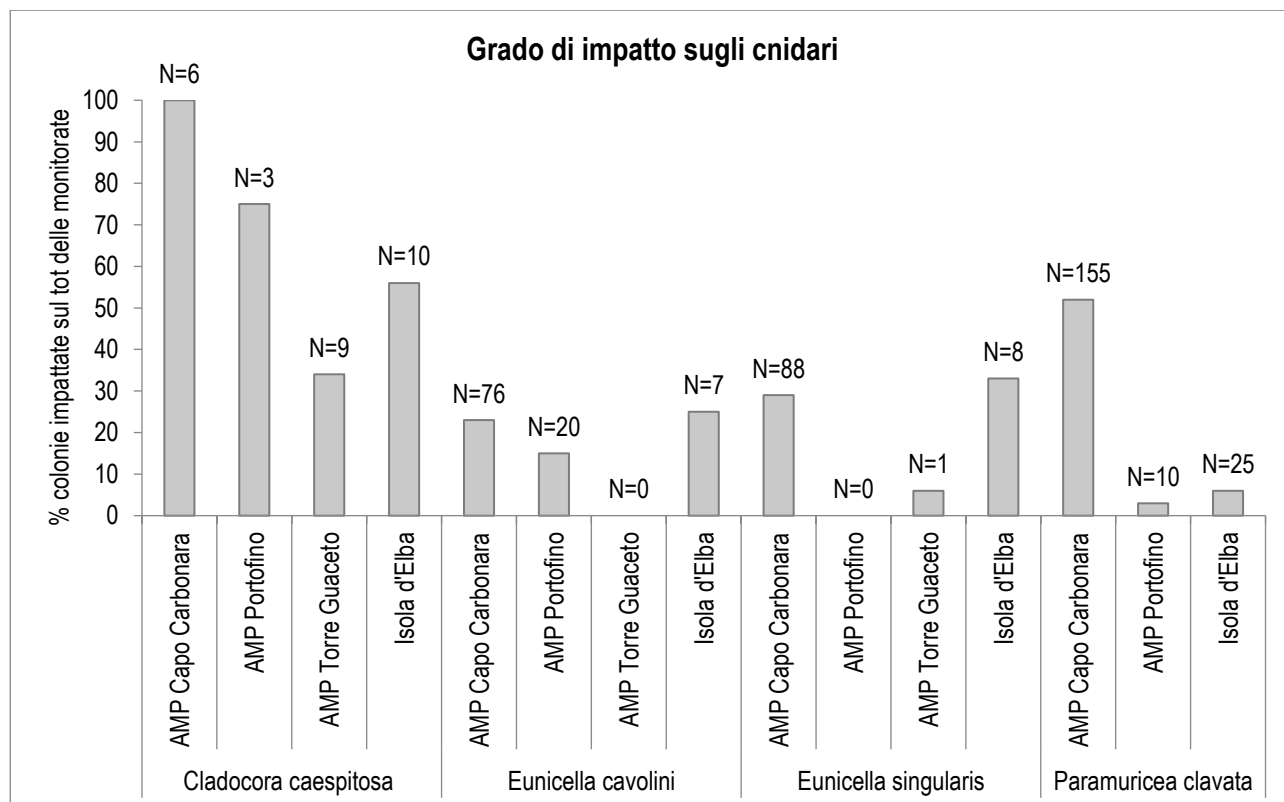


Figura 48. Percentuale (%) di colonie di Cnidari riportanti segni di necrosi o sbiancamento nelle quattro aree di monitoraggio dove sono presenti le specie: AMP Portofino, Isola d'Elba, AMP Torre Guaceto e AMP Capo Carbonara. Nell'AMP Plemmirio non sono presenti le specie qui indicate.

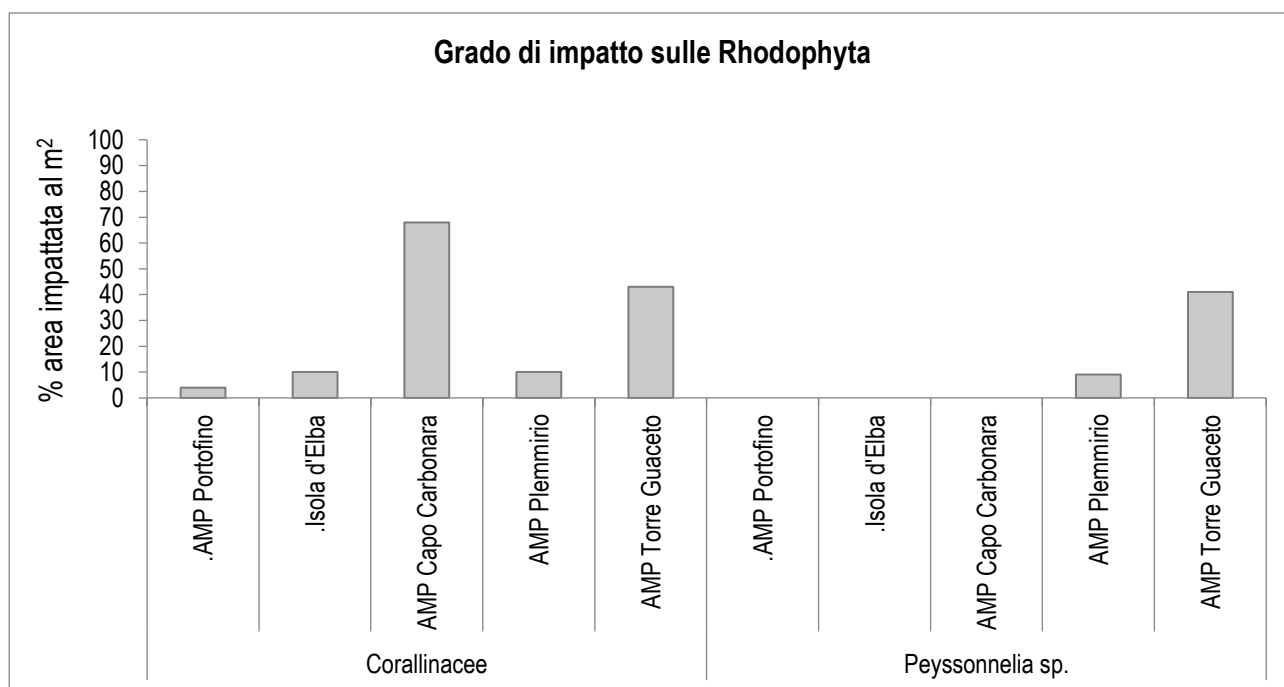


Figura 49. Percentuale (%) di alghe calcaree sbiancate nelle cinque aree di studio: AMP Portofino, Isola d'Elba, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara e AMP Plemmirio.



Figura 50. Colonia di *Paramuricea clavata*, all'Isola d'Elba, che mostra segni di necrosi. Foto di Lorenzo Moscia.

MONITORAGGIO SPECIE TERMOFILE

I dati relativi alle specie termofile mostrano un generale gradiente latitudinale con maggiori abbondanze da nord verso sud. Una maggiore presenza di specie termofile si osserva infatti nelle AMP Capo Carbonara e Plemmirio, dove naturalmente abbondano le specie native termofile ma sono anche diverse le specie aliene provenienti dal canale di Suez e dall'Atlantico. È tuttavia interessante notare che tra queste due aree l'AMP Capo Carbonara risulta quella più ricca di specie termofile. A queste due aree seguono l'AMP Torre Guaceto, l'Isola d'Elba e l'AMP Portofino, secondo il crescente gradiente latitudinale (Fig. 51).

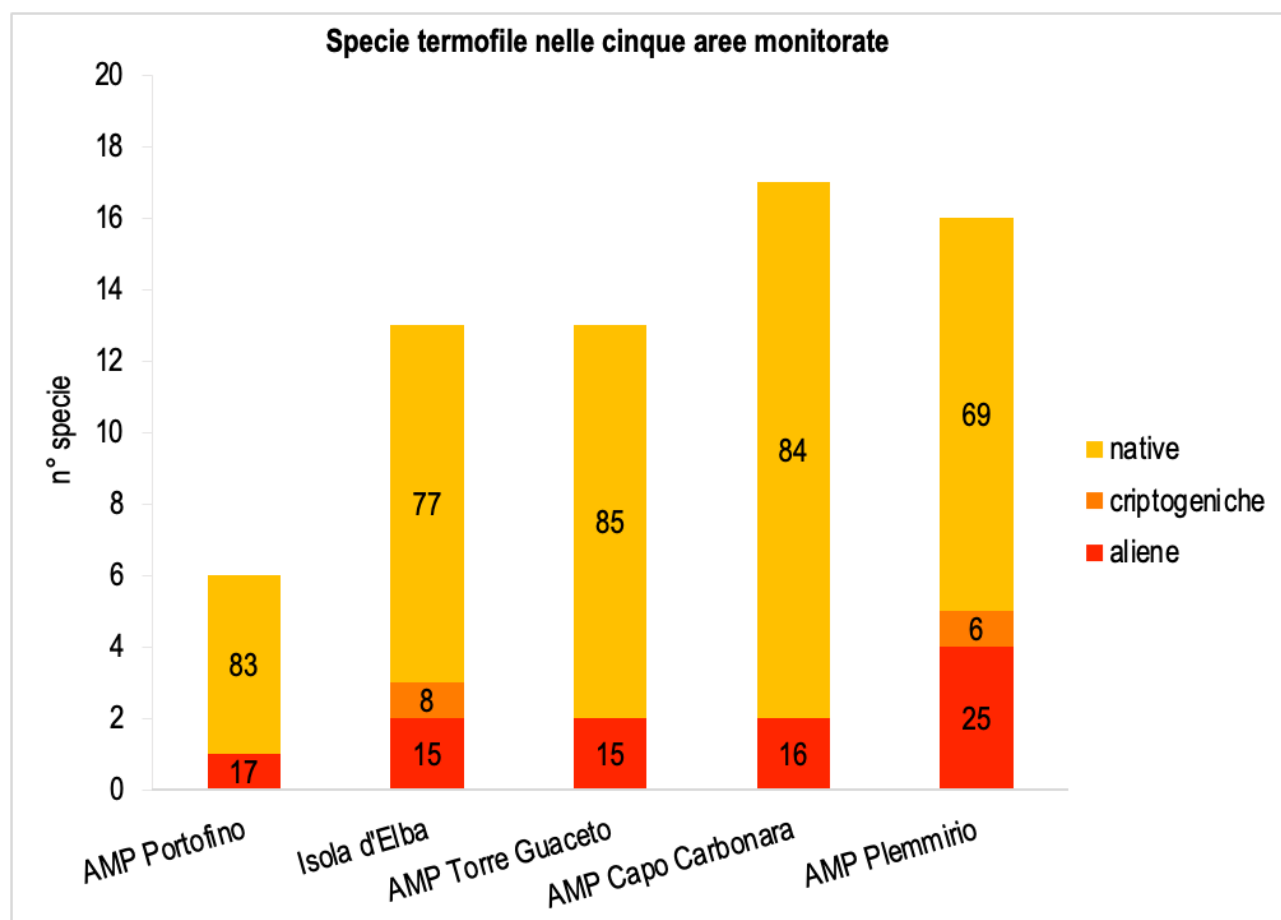


Figura 51. Numero di specie termofile aliene, criptogeniche e native in ogni area di studio. Sono inoltre riportati i valori percentuali (%) di ogni categoria sul totale delle specie termofile.

Isola d'Elba

Nell'ambito dei monitoraggi condotti nel secondo anno di progetto le specie termofile osservate nell'area dell'Isola d'Elba sono state: *Calcinus tubularis*, *Centrostephanus longispinus*, *Ophidiaster ophidianus*, *Penicillus capitatus*, *Pennaria disticha*, *Sphyaena viridensis*, *Thalassoma pavo*, e *Tricleocarpa fragilis* (Tab. 13).

Come già evidenziato nell'ambito del primo anno di monitoraggio, sono risultate particolarmente abbondanti *Caulerpa cylindracea*, *Caulerpa prolifera*, *Hacelia attenuata* e *Pseudochlorodesmis furcellata*. I nuovi dati confermano che le specie termofile all'Isola d'Elba rappresentano il 13% della comunità bentonica (Montefalcone & Azzola 2020).

Di particolare importanza è stato il rinvenimento nel sito dello Scoglietto di due individui della specie aliena *Lamprohaminoea ovalis* (Fig. 52), mai rilevata prima in quest'area. Questa osservazione rappresenta la segnalazione più a nord del Mar Mediterraneo occidentale per questa specie, evidenziando come l'areale di distribuzione delle specie aliene e termofile sia in continua espansione (Azzola et al. 2022b).

Tabella 13. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile all'Isola d'Elba. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Cannelle			
specie	prof (m)	indice di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	10-22	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	30-36	3	A
<i>Penicillus capitatus</i>	6	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	10-15	3	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	16-22	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	33-40	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Hacelia attenuata</i>	10	3	N
<i>Hacelia attenuata</i>	16	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	23-28	2	N
<i>Hacelia attenuata</i>	44	1	N
<i>Oculina patagonica</i>	5	1	A
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	12	2	N
Formiche dello Zanca			
specie	prof (m)	indice di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	21	1	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	21	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	24-30	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	30-36	2	A

<i>Caulerpa cylindracea</i>	36-43	3	A
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	43-53	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Calcinus tubularis</i>	5	1	N
<i>Centrostephanus longispinus</i>	48-53	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	21-24	2	N
<i>Hacelia attenuata</i>	29	2	N
<i>Hacelia attenuata</i>	38-53	8	N
<i>Thalassoma pavo</i>	3-5	12	N
<i>Thalassoma pavo</i>	13	3	N
Scoglietto			
specie	prof (m)	indice di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	3-5	1	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	12-24	3	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	40-43	3	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	3-5	2	N
<i>Caulerpa prolifera</i>	12-26	2	N
<i>Caulerpa prolifera</i>	24	3	N
<i>Laurencia obtusa</i>	3	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	4-10	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	24	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Centrostephanus longispinus</i>	43	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	18	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	40-43	3	N
<i>Lamprohaminoea ovalis</i>	26	2	A
<i>Sphyraena viridensis</i>	26	30	N
<i>Thalassoma pavo</i>	4-10	20	N
Picchi di Pablo			
specie	prof (m)	indice di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	11	1	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	18-22	3	A

<i>Caulerpa cylindracea</i>	24-27	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	34-36	3	A
<i>Laurencia obtusa</i>	1	1	N
<i>Laurencia obtusa</i>	4	1	N
<i>Pennaria disticha</i>	1	1	A
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	3-6	2	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	18-22	1	N
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	28-30	1	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	3-15	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Centrostephanus longispinus</i>	33	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	9-13	2	N
<i>Hacelia attenuata</i>	28-36	18	N

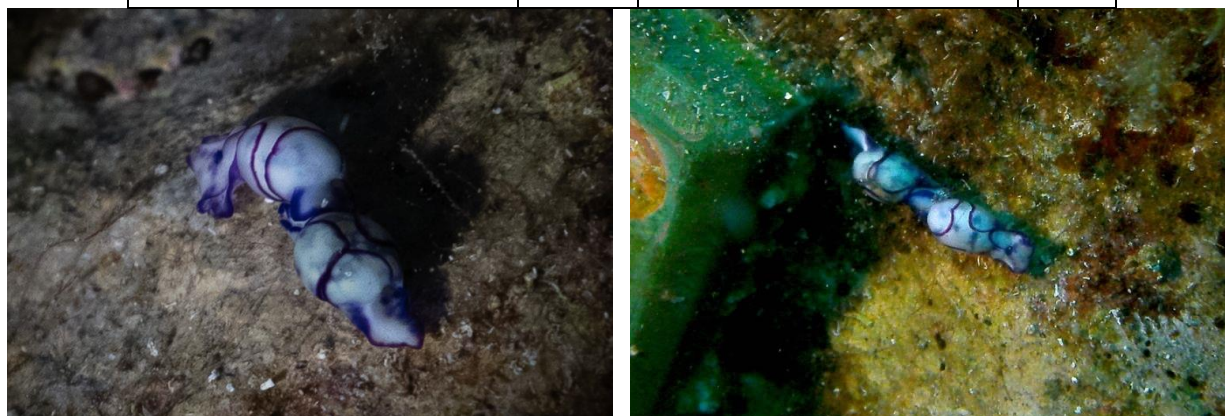


Figura 52. Individui della specie aliena *Lamprohaminoea ovalis* osservati nel sito Scoglietto a Porto Ferrai (Isola d'Elba). La segnalazione fatta dell'ambito dei monitoraggi per il progetto Mare Caldo rappresenta la prima in quest'area. Foto di Lorenzo Moscia sulla sinistra e di Monica Montefalcone sulla destra.

AMP Torre Guaceto

Per l'AMP Torre Guaceto nell'ambito dei monitoraggi sono state rilevate un totale di 11 specie termofile (Tab. 14), di cui due aliene (15%) e undici native (85%).

Delle undici specie termofile native rilevate, 4 (42%) sono specie animali (*Axinella cannabina*, *Hacelia attenuata*, *Hermodice carunculata*, *Thalassoma pavo*), e 7 (58%) sono specie vegetali (*Acrosymphiton purpuriferum*, *Caulerpa prolifera*, *Codium vermilaria*, *Dasycladus vermicularis*, *Tricleocarpa fragilis*, *Pseudochlorodesmis furcellata*).

Le specie aliene osservate sono *Caulerpa cylindracea*, osservata dai 3 m fino ai 40 m di profondità e dominante a 20 m e a 30 m, e *Lophocladia lallemandii*, particolarmente abbondante attorno ai 10-20 m di profondità.

In generale, la comunità bentonica di scogliera di Torre Guaceto è costituita dal 13% di specie termofile native, dal 2% da specie termofile aliene e dall'85% di specie native (Fig. 53).

Tabella 14. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Torre Guaceto. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Stazione 5-10 m			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Acrosymphiton purpuriferum</i>	6-7	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	3	1	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	6-7	2	A
<i>Caulerpa prolifera</i>	3	1	N
<i>Codium vermilaria</i>	3	2	N
<i>Dasycladus vermicularis</i>	3	3	N
<i>Lophocladia lallemandii</i>	6-7	2	A
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	6-7	3	N
Stazione 10-15 m			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Acrosymphiton purpuriferum</i>	14-15	1	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	10	2	A
<i>Liagora viscida</i>	10	1	N
<i>Lophocladia lallemandii</i>	14-15	3	A
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	14-15	3	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	14-15	2	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Axinella cannabina</i>	15	2	N
Stazione 20 m			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	17-22	3	A
<i>Liagora viscida</i>	17	2	N

<i>Lophocladia lallemandii</i>	17-20	3	A
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	20	3	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	22	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Axinella cannabina</i>	20	20	N
<i>Hermodice carunculata</i>	20	1	N
<i>Thalassoma pavo</i>	17	2	N
Stazione 26 m			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	26	2	A
<i>Lophocladia lallemandii</i>	26	3	A
<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>	26	2	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	26	2	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Axinella cannabina</i>	26	20	N
<i>Hacelia attenuata</i>	26	2	N
Stazione 40 m			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Lophocladia lallemandii</i>	39	1	A
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Axinella cannabina</i>	39	60	N

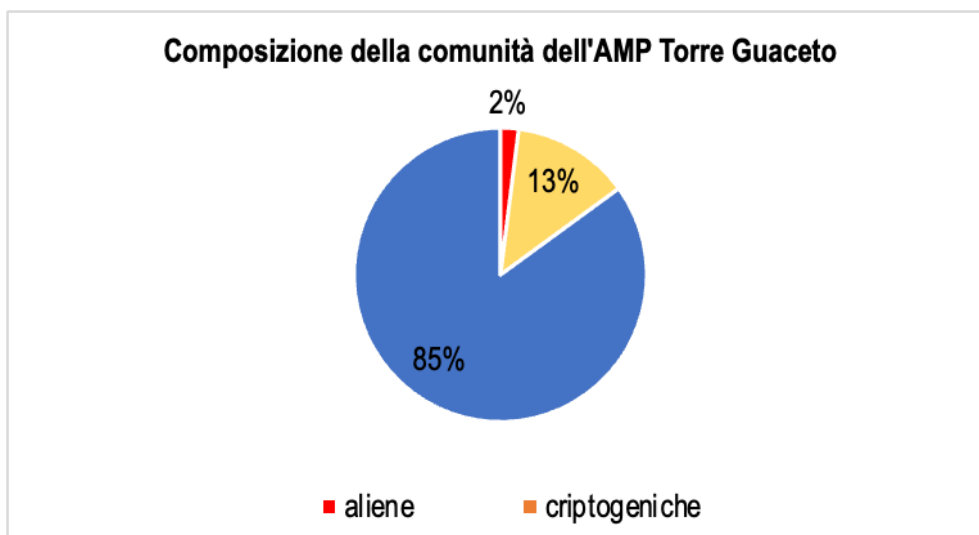


Figura 53. Composizione della comunità bentonica nell'AMP Torre Guaceto. In blu le specie native.

AMP Capo Carbonara

Nell'AMP Capo Carbonara sono state rilevate un totale di 18 specie termofile (Tab. 15, Fig. 55, 56) di cui 3 aliene (17%) e 15 native (83%).

Delle 15 specie termofile native rilevate, 12 (80%) sono specie animali di cui 5 appartenenti alla fauna ittica (*Balanophyllia regia*, *Centrostephanus longispinus*, *Epinephelus costae*, *Hacelia attenuata*, *Hermodice carunculata*, *Ophidiaster ophidianus*, *Peltaster placenta*, *Phyllangia americana moucazeii*, *Sparisoma cretense*, *Sphyraena viridensis*, *Synodus saurus*, *Thalassoma pavo*, *Tricleocarpa fragilis*), e 3 (20%) sono specie vegetali (*Anadyomene stellata*, *Dasycladus vermicularis*, *Tricleocarpa fragilis*).

Di particolare rilievo è risultata l'abbondanza del vermocane, *Hermodice carunculata*, (Fig. 57), raramente osservato durante i precedenti monitoraggi condotti dal DiSTAV, ma oggi ampiamente diffuso in tre dei quattro siti monitorati. È stato inoltre osservato un aumento della specie termofila nativa *Epinephelus costae*, non osservata in passato ma oggi abbondante in particolare nel sito della Secca di Santa Caterina.

Infine, l'alga aliena *Caulerpa cylindracea* è stata osservata in tutti i siti monitorati a tutte le profondità, con maggiore abbondanza tra i 20 m e i 30 m.

In generale, la comunità bentonica di scogliera dell'AMP Capo Carbonara è rappresentata dal 2% di specie termofile aliene, dal 12% di specie termofile native e dall'86% di specie native (Fig. 54).

Tabella 15. Dati relativi al monitoraggio sulle specie termofile nell'AMP Capo Carbonara. Lo 'status' indica l'origine delle specie distinta in aliena (A), criptogenica (C), e nativa (N).

Isola dei Cavoli			
specie	prof (m)	indice di abbondanza (classe)	status
<i>Anadyomene stellata</i>	3-18	2	N
<i>Anadyomene stellata</i>	18-30	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	3-30	1	A
<i>Dasycladus vermicularis</i>	10-30	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Balanophyllia regia</i>	5	1	N
<i>Hacelia attenuata</i>	6-9	2	N
<i>Hermodice carunculata</i>	20-28	2	N
<i>Ephinephelus costae</i>	10	2	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	20-25	2	N
<i>Thalassoma pavo</i>	4-15	27	N
<i>Sparisoma cretense</i>	9	2	N
<i>Sphyaena viridensis</i>	10	30	N
<i>Thalassoma pavo</i>	10-15	40	N
Secca di Santa Caterina			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Anadyomene stellata</i>	3-18	2	N
<i>Anadyomene stellata</i>	18-30	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	15	1	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	30	2	A
<i>Caulerpa cylindracea</i>	40	3	A
<i>Dasycladus vermicularis</i>	10-30	1	N
<i>Phyllangia americana moucazeii</i>	35	1	N
<i>Tricleocarpa fragilis</i>	15	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Centrostephanus longispinus</i>	33-45	2	N
<i>Epinephelus costae</i>	15-20	11	N
<i>Hermodice carunculata</i>	17-25	8	N

<i>Ophidiaster ophidianus</i>	8-15	3	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	25-35	3	N
<i>Sphyraena viridensis</i>	6	80	N
<i>Thalassoma pavo</i>	4-10	60	N
<i>Peltaster placenta</i>	40	1	N
Secca del Berni			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Anadyomene stellata</i>	3-18	2	N
<i>Anadyomene stellata</i>	18-30	2	N
<i>Caulerpa cylindracea</i>	18	1	A
<i>Dasycladus vermicularis</i>	10-20	1	N
<i>Lophocladia lallemanii</i>	6	1	N
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Hacelia attenuata</i>	10-15	2	N
<i>Hermodice carunculata</i>	22-25	3	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	10-19	3	N
<i>Sparisoma cretense</i>	6-7	3	N
<i>Sphyraena viridensis</i>	6	1	N
<i>Synodus saurus</i>	20	1	N
<i>Thalassoma pavo</i>	3-15	35	N
Scoglio del Buttiglione			
specie	prof (m)	indici di abbondanza (classe)	status
<i>Caulerpa cylindracea</i>	15-20	1	A
specie	prof (m)	abbondanza (N)	status
<i>Centrostephanus longispinus</i>	45	1	N
<i>Hermodice carunculata</i>	17-25	8	N
<i>Ophidiaster ophidianus</i>	21	1	N
<i>Sphyraena viridensis</i>	5	100	N
<i>Thalassoma pavo</i>	5-21	22	N

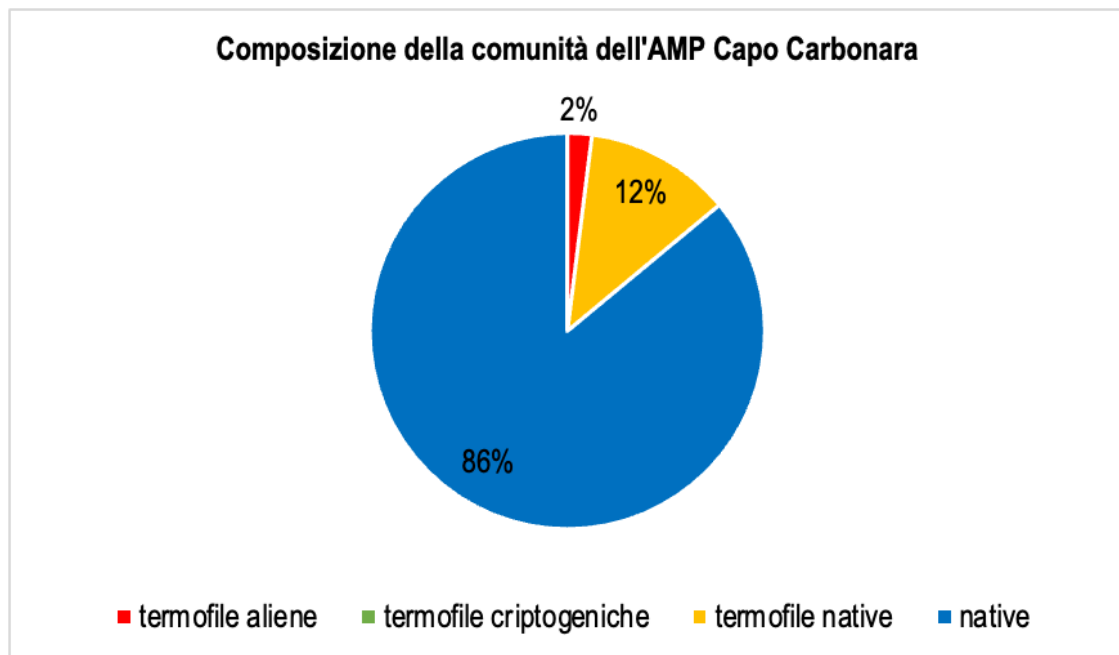


Figura 54. Composizione della comunità bentonica nell'AMP Capo Carbonara.



Figura 55. Esemplare della specie termofila *Hacelia attenuata*. Foto di Lorenzo Moscia scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti nell'AMP Capo Carbonara per il progetto Mare Caldo.



Figura 56. Esemplare della specie termofila *Sphyraena viridensis*. Foto di Lorenzo Moscia scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti nell'AMP Capo Carbonara per il progetto Mare Caldo.



Figura 57. Esemplare della specie termofila *Hermodice carunculata*. Foto di Lorenzo Moscia scattata nell'ambito dei monitoraggi condotti nell'AMP Capo Carbonara per il progetto Mare Caldo.

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il continuo aumento delle temperature degli oceani, a fronte dei cambiamenti climatici, è ormai ampiamente documentato a livello globale (von Schuckmann et al. 2019) e rappresenta una delle maggiori minacce per gli ecosistemi marini. Ad oggi, gli studi sugli effetti del riscaldamento globale si sono basati prevalentemente sull'analisi della temperatura superficiale dell'acqua (*Sea Surface Temperature*, SST), per la quale la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), ad esempio, dispone di serie storiche di dati satellitari a partire dagli anni '50 (<https://www.noaa.gov/>). Tuttavia, la SST risulta un parametro ovviamente insufficiente per comprendere gli effetti dell'aumento delle temperature sugli ecosistemi marini alle maggiori profondità (Ceccherelli et al. 2020).

Per questo motivo, nell'ambito del progetto Mare Caldo, ci si è posti l'obiettivo di monitorare l'andamento delle temperature sulla colonna d'acqua fino a 40 m di profondità tramite l'installazione di *temperature data loggers*. Nell'ambito dei primi due anni di progetto sono stati analizzati i dati per otto aree di studio per le quali sono state osservate diverse anomalie termiche. Tuttavia, perché queste possano essere definite 'reali anomalie', e non normali andamenti stagionali o errori strumentali, sarà necessario disporre di almeno due anni di dati che permettano il confronto tra i valori di temperatura da un anno all'altro.

Nell'ambito del progetto Mare Caldo, il confronto tra gli andamenti di temperatura nei due anni di monitoraggio (i.e., 2020, 2021) è stato possibile solo per l'AMP Portofino e per l'Isola d'Elba. In entrambe queste aree è stata osservata una reale anomalia termica a giugno 2020 che ha interessato la colonna d'acqua fino a circa 20-25 m, evidenziando come il riscaldamento atmosferico possa avere effetti fino ad elevate profondità. Questo risultato è conforme ai dati riportati a livello mediterraneo dalla rete T-MEDNet (<https://t-mednet.org/>) per diverse aree della Spagna (Tabarca, Cap de Creus, Medes) e della Francia (Banyuls Sur Mer, Cap de Creus, Villefranche), dove anche in queste aree l'anomalia ha raggiunto le maggiori profondità. Questi risultati permettono di ipotizzare che nell'estate 2020 l'intero bacino nord-ovest del Mediterraneo sia stato soggetto ad una anomalia termica.

Al fine di valutare quali siano gli effetti dell'aumento delle temperature sugli ecosistemi di scogliera, nell'ambito dei primi due anni del progetto Mare Caldo sono state condotte attività di monitoraggio biologico in cinque aree di studio: AMP Portofino, Isola d'Elba, AMP Torre Guaceto, AMP Capo Carbonara 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. Dal confronto è emersa una differente composizione delle comunità bentoniche: nelle AMP Torre Guaceto e Plemmirio le comunità a tutte le profondità sono dominate prevalentemente da popolamenti algali e da spugne, mentre nelle AMP Portofino e Capo Carbonara e all'Isola d'Elba le comunità coralligene a 30 m e 40 m sono dominate dai popolamenti a gorgonie.

Le aree a maggiore biodiversità sono risultate l'AMP Capo Carbonara (101 specie) e l'AMP Torre Guaceto (82 specie), seguite dall'AMP Plemmirio (71 specie), dall'Isola d'Elba (70 specie) e infine dall'AMP Portofino dove è stato rilevato il minor numero di specie (38

specie). Questi valori si riflettono nei risultati ottenuti dall'applicazione dell'indice di diversità di Shannon, che ha mostrato un elevato stato ecologico ($3 < H' < 4$) per l'AMP Capo Carbonara, un buono stato ecologico per le AMP Torre Guaceto e Plemmirio e per l'Isola d'Elba, e un basso stato ecologico ($H' \sim 2,5$) per l'AMP Portofino. L'indice di dominanza di Simpson ha invece mostrato un elevato valore di dominanza, e quindi una scarsa equitabilità tra le specie, per tutte le aree di studio. Questo risultato evidenzia, come già sottolineato nella relazione finale dell'anno scorso, che le misure protezionistiche adottate su scala locale, quali ad esempio l'istituzione di aree marine protette, non siano purtroppo sufficienti al fine di mantenere un buono stato ecologico degli habitat marini.

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. 2015). Nell'ambito del primo anno del progetto Mare Caldo era stato analizzato il cambiamento nel tempo nella struttura delle comunità dell'AMP Portofino e dell'Isola d'Elba, aree per le quali si disponeva di dati storici a partire dagli anni '50 e '90, rispettivamente. Per entrambe le aree di studio era stato evidenziato un significativo cambiamento dovuto alla perdita di specie strutturanti (e.g., le alghe dei generi *Sargassum* e *Cystoseira* che formavano foreste algali e diverse specie di gorgonie) e all'insediamento di specie termofile, native e aliene, entrambi effetti diretti dell'innalzamento delle temperature.

Nell'ambito del secondo anno del progetto Mare Caldo è stato analizzato il cambiamento nel tempo per l'AMP Capo Carbonara. Il confronto con i dati storici del 2000 (Bianchi & Morri 2001) ha evidenziato anche in quest'area un cambiamento significativo nella struttura e nella composizione delle comunità bentoniche a tutte le profondità indagate. I maggiori cambiamenti sembrano essere avvenuti in conseguenza all'aumento delle specie termofile, a conferma del continuo fenomeno di espansione verso le maggiori latitudini di queste specie indicatrici del cambiamento climatico. I risultati relativi al cambiamento nel tempo delle comunità dell'AMP Capo Carbonara confermano quindi, ancora una volta, come l'aumento della temperatura sia diventato una forzante del cambiamento degli ecosistemi marini. In questo contesto, risulta quindi necessario il continuo monitoraggio delle morie di massa e della presenza delle specie termofile.

A partire dagli anni '80-'90, a seguito del primo repentino aumento della temperatura superficiale dell'acqua, sono risultati sempre più frequenti gli eventi di morie di massa (Garrabou et al. 2009). Durante le attività di monitoraggio condotte nei primi due anni del progetto Mare Caldo, nelle cinque aree di studio non sono stati rilevati eventi di morie di massa paragonabili a quelli degli anni '90. Questo risultato è conforme a quanto osservato a livello mediterraneo tramite i monitoraggi della rete T-MEDNet che, per gli anni 2020 e 2021, riporta un solo evento di moria della specie *Eunicella singularis* in Algeria nel 2020 (<https://t-mednet.org/>). Tuttavia, in tutte le aree di studio sono stati osservati, per alcune specie target, fenomeni di sbiancamento o necrosi riconducibili all'effetto dell'aumento delle temperature.

Sulle cinque aree monitorate l'AMP Portofino è l'area dove sono stati registrati i minori valori di impatto, sia per quanto riguarda le specie di gorgonie sia per le alghe calcaree. L'AMP

Capo Carbonara e l'Isola d'Elba sono risultate le aree dove si sono osservati i maggiori impatti sulle gorgonie. In particolare, per le specie *Eunicella cavolini* e *Eunicella singularis*, in entrambe le aree circa il 20-30% delle colonie osservate mostrano segni di necrosi. Per la specie *Paramuricea clavata*, invece, l'AMP Capo Carbonara è risultata l'area dove sono stati osservati i maggiori impatti, con il 50% delle colonie che mostrano 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, dove il 45% di superficie di alghe corallinacee incrostanti e di *Peyssonnelia* sp. sono risultate sbiancate e in necrosi. Nell'area dell'Isola d'Elba, nonostante i segnali siano minori rispetto alle altre aree di studio, il monitoraggio nei due anni di progetto Mare Caldo ha permesso di osservare un generale aumento dei segnali di mortalità dal 2020 al 2021. Questo risultato evidenzia come il trend in aumento positivo delle temperature abbia continui effetti sulle comunità bentoniche difficilmente arrestabili.

Nell'ambito dei monitoraggi condotti nel 2020, primo anno di progetto, nell'AMP Portofino e all'Isola d'Elba, erano stati osservate elevate quantità di mucillagine sul fondo e sugli organismi arborescenti che, in alcuni casi, raggiungevano valori del 70-80% di ricoprimento. Diversamente, nell'ambito dei monitoraggi del secondo anno di progetto, la mucillagine non è stata osservata in quantità rilevante. Gli eventi mucilluginosi sono spesso correlati alle ondate di calore (Danovaro et al. 2009), e la scarsa quantità rilevata nel 2021 potrebbe essere spiegata dalle temperature in media più basse registrate nell'estate del secondo anno di progetto sia per l'AMP Portofino sia per l'Isola d'Elba.

Le attività di monitoraggio condotte sulle specie termofile hanno permesso di confermare il generale gradiente latitudinale già evidenziato nell'ambito del primo anno di progetto, con il maggior numero di specie termofile rilevate nelle aree più a sud. In particolare, nell'AMP Plemmirio le specie termofile rappresentano il 19% delle specie componenti la comunità di scogliera, mentre nell'AMP Capo Carbonara rappresentano il 13% delle specie componenti la comunità. In queste aree le specie termofile native sono naturalmente presenti in abbondanza; tuttavia, l'analisi del cambiamento nel tempo per l'AMP Capo Carbonara ha permesso di evidenziare come il loro esponenziale aumento negli ultimi 20 anni abbia comportato drastici cambiamenti nella struttura della comunità bentonica di scogliera.

Contrariamente alla logica del gradiente latitudinale, il numero di specie termofile osservate per l'Isola d'Elba (15 specie) è risultato uguale al numero di specie osservato per l'AMP Torre Guaceto (15 specie). Questo risultato è tuttavia coerente con lo spostamento verso nord-ovest delle isoterme, a fronte dei cambiamenti climatici, che vede il Mar Tirreno maggiormente soggetto all'innalzamento delle temperature rispetto al Mar Adriatico (Pisano et al. 2020). Nell'ambito del secondo anno di monitoraggio, inoltre, all'Isola d'Elba è stato di particolare importanza il rinvenimento della specie *Lamprohaminoea ovalis*, mai segnalata prima in quest'area. Per questa specie è stata dimostrata un'espansione verso nord-ovest correlata allo spostamento delle isoterme. La segnalazione fatta nell'ambito dei monitoraggi del progetto Mare Caldo fornisce un'ulteriore prova degli effetti del riscaldamento globale anche nei settori più a nord del Mediterraneo (Azzola et al. 2022b).

In conclusione, i risultati del secondo anno del progetto Mare Caldo confermano come gli effetti del cambiamento climatico e delle anomalie termiche siano 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. Tuttavia, pur essendo validi strumenti di conservazione, 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 due 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., Atzori F., Bianchi C.N., Cadoni N., Frau F., Mora F., Morri C., Oprandi A., Orrù P.E., Montefalcone M. (2022a). Variability between observers does not hamper detecting change over time in a temperate reef. *Marine Environmental Research*, under review.
- Azzola A., Furfaro G., Trainito G., Doneddu M., Montefalcone M. (2022b). Sea water warming favours the northward range expansion of Lessepsina species in the Mediterranean Sea: the cephalaspidean *Lamprohaminoea ovalis*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, under review.
- Bianchi, C.N., Morri, C. (2001). Relazione sui risultati dei rilevamenti bionomici subacquei effettuati nell'Area Marina Protetta di Capo Carbonara (Sardegna sud-orientale) a fini di naturalismo subacqueo. Relazione tecnica, Comune di Villasimius.
- Ceccherelli G., Pinna F., Pansini A., Piazzì L., La Manna G. (2020). The constraint of ignoring the subtidal water climatology in evaluating the changes of coralligenous reefs due to heating events. *Scientific Reports*, 10 (1): 1-13.
- Danovaro R., Fonda Umani S., Pusceddu A. (2009). Climate change and the potential spreading of marine mucilage and microbial pathogens in the Mediterranean Sea. *PLoS One*, 4 (9): e7006.
- Garrabou J., Coma R., Bensoussan N., Bally M., Chevaldonné P., Cigliano M., ..., Ledoux J.B. (2009). Mass mortality in North western Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave. *Global Change Biology*, 15 (5): 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: 528-538.
- Gatti G., Bianchi C.N., Parravicini V., Rovere A., Peirano A., Montefalcone M., Massa F., Morri C. (2015). Ecological change, sliding baselines and the importance of historical data: lessons from combining observational and quantitative data on a temperate reef over 70 years. *PLoS One*, 10 (2): e0118581.
- Hammer Ø., Harper D.A.T., Ryan P.D. (2001). PaSt: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4: 4.
- 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.
- Pasolli L. (2011). Effetti della protezione sul popolamento ittico costiero dell'Area Marina Protetta "Plemmirio". Tesi di Laurea Magistrale in Biologia Marina, Facoltà di Scienze MM.FF.NN., Università degli Studi di Padova.
- Piazzì L., Atzori F., Cadoni N., Cinti M.F., Frau F., Pansini A., Pinna F., Stipcich P., Ceccherelli G. (2021). Animal forest mortality: Following the consequences of a

gorgonian coral loss on a mediterranean coralligenous assemblage. *Diversity*, 13 (3): 133.

Pisano A., Marullo S., Artale V., Falcini F., Yang C., Leonelli F. E., Santolieri R., Buongiorno Nardelli B. (2020). New evidence of Mediterranean climate change and variability from Sea Surface Temperature observations. *Remote Sensing*, 12 (1): 132.

von Schuckmann K., Le Traon P., Smith N., Pascual A., Djavidnia S., et al. (2019). Copernicus Marine Service Ocean State Report, Issue 3. *Journal of Operational Oceanography*, 12.