

**CONVENZIONE OPERATIVA TRA L'AREA MARINA PROTETTA ISOLA DI BERGEGGI  
E IL DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA, DELL'AMBIENTE E DELLA VITA  
(DISTAV)**

# **MONITORAGGIO DELLA GROTTA MARINA DI BERGEGGI**

## **RELAZIONE FINALE ANNO 2023**

a cura di

**Annalisa Azzola e Monica Montefalcone**

Responsabile scientifico: Prof.ssa Monica Montefalcone

Seascape Ecology Lab., DiSTAV, Università degli Studi di Genova, Corso Europa 26,  
16132 Genova

**Genova, dicembre 2023**

## INDICE

1. PREMESSE	3
2. MATERIALI E METODI	4
2.1. Area di studio	4
2.2. Attività di campo	7
2.3. Raccolta dati	8
2.4. Analisi dei dati	10
2.4.1. Stato della comunità	10
2.4.2. Cambiamento nel tempo	13
3. RISULTATI	14
3.1. Forme di crescita	14
3.1.1. Stato della comunità	14
3.1.2. Cambiamento nel tempo	19
3.2. Gilde trofiche	23
3.2.1. Stato della comunità	23
3.2.2. Cambiamento nel tempo	27
4. CONCLUSIONI	31
Bibliografia	34
Allegato	39

## 1. PREMESSE

Al fine di attuare quanto previsto dalle Direttive Natura (Direttiva Habitat 92/43/CEE, Direttiva Uccelli 2009/147/CE) sugli habitat e le specie di particolare interesse comunitario e per la corretta gestione dei Siti di Interesse Comunitario/Zone Speciali di Conservazione (SIC/ZSC) che ricadono all'interno delle Aree Marine Protette (AMP), l'AMP 'Isola di Bergeggi' e il Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita (DiSTAV, Università degli Studi di Genova) hanno stipulato una convenzione operativa con l'obiettivo di monitorare la Grotta Marina di Bergeggi analizzando l'attuale stato della comunità bentonica e il suo cambiamento nel tempo, grazie alla disponibilità di una serie storica di dati iniziata nel 1986.

Le grotte marine sono tra gli ecosistemi a maggior interesse naturalistico e scientifico e rappresentano ambienti ad elevato valore ecologico in quanto sono *hotspot* di biodiversità, aree di rifugio per diversi organismi, e ospitano specie rare (Gerovasileiou & Bianchi, 2021). Per questi motivi, le grotte marine sono elencate dalla Direttiva Habitat dell'Unione Europea (92/43/CEE - codice habitat 8330 "Grotte marine sommerse o semisommerse") tra gli habitat ad interesse protezionistico. Inoltre, a livello Mediterraneo, le grotte marine sono citate dalla Convenzione di Barcellona nell'ambito del "Piano d'Azione per la Conservazione del Coralligeno e altre concrezioni calcaree", che considera le comunità di grotte semioscure (Ballesteros et al., 2008), e nel "Piano d'azione per gli habitat di profondità", che considera tra gli altri le grotte oscure e i canyon sottomarini (Pergent et al., 2015).

Le grotte marine sono ambienti peculiari che in alcuni casi possono essere caratterizzati da condizioni estreme e rappresentare quindi laboratori naturali (Harmelin et al, 1985). I principali fattori che influenzano la distribuzione delle comunità e degli organismi in grotta sono i gradienti di luce e di idrodinamismo, che si riducono lungo l'asse esterno-interno delle cavità. Muovendosi dall'ingresso delle grotte verso il fondo, si assiste ad una diminuzione della luce, che raggiunge livelli di oscurità totale nelle porzioni di grotta più confinate, e a una netta diminuzione nei valori di velocità di corrente delle masse d'acqua (Morri et al., 1994). In tali condizioni si assiste alla totale scomparsa degli organismi fotofili, in particolare dei vegetali, e alla dominanza di organismi sessili filtratori (Gerovasileiou et al., 2015 e riferimenti citati). Tale fenomeno comporta una brusca deplezione trofica (i.e., diminuzione di nutrienti e di plancton), che sembra essere uno dei fattori principali

responsabili della distribuzione degli organismi bentonici nelle grotte marine (Gerovasileiou & Bianchi, 2021).

Il confinamento e le caratteristiche ambientali delle grotte marine sommerse rendono questi habitat particolarmente sensibili ai cambiamenti dei fattori ambientali, quali ad esempio il riscaldamento globale, ed estremamente vulnerabili agli impatti antropici locali (Montefalcone et al., 2023).

Il monitoraggio nel tempo, tramite l'analisi di lunghe serie storiche di dati, delle comunità bentoniche delle grotte marine rappresenta, quindi, un importante strumento per la valutazione dello stato ecologico di questi habitat e per l'analisi degli effetti degli impatti antropici locali e globali (Montefalcone et al., 2018).

Obiettivo del presente monitoraggio è quello di definire lo stato attuale della comunità bentonica della Grotta Marina di Bergeggi e di analizzare il suo cambiamento nel tempo, grazie alla disponibilità di dati storici che sono stati raccolti con regolarità a partire dal 1986 (Parravicini et al., 2010; Montefalcone et al., 2018). La comunità bentonica è indagata da un punto di vista morfo-funzionale, attraverso l'utilizzo di descrittori ecologici quali le forme di crescita (*growth forms*), che considerano la morfologia degli organismi bentonici e quindi la loro struttura tridimensionale, e le gilde trofiche (*trophic guilds*), che analizzano invece gli aspetti funzionali delle diverse strategie trofiche utilizzate dagli organismi.

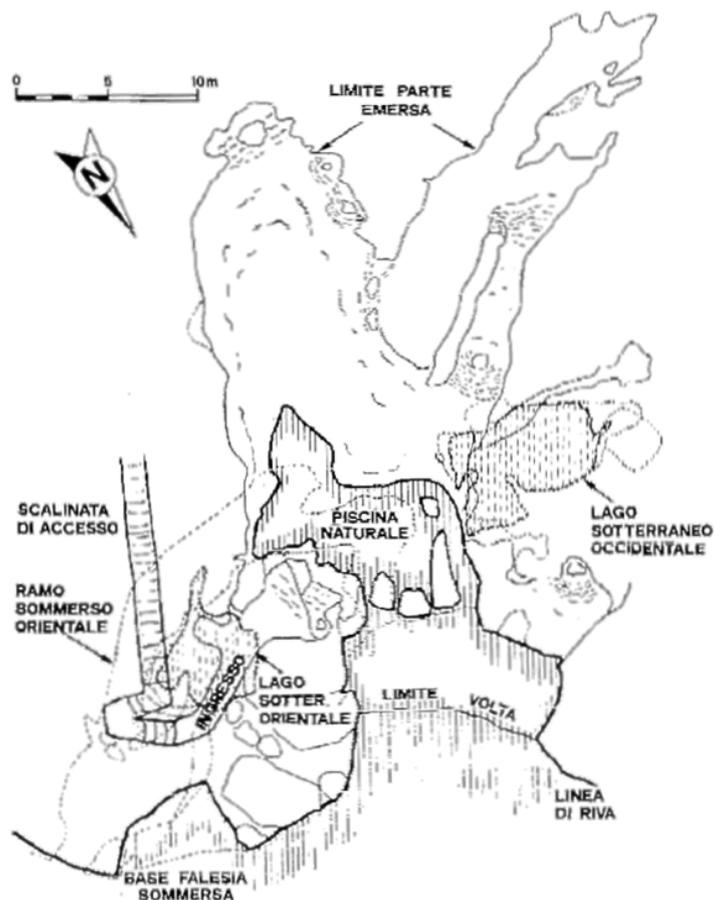
## **2. MATERIALI E METODI**

### **2.1. Area di studio**

La Grotta Marina di Bergeggi si apre nella falesia rocciosa che si estende per circa 500 m da Punta Grotte sino alla spiaggia di Bergeggi. La grotta presenta una pianta ampia e articolata che comprende una parte in ambiente emerso e una parte in ambiente sommerso (Bianchi et al., 1988; Sgorbini et al., 1988; Bianchi e Morri, 1994; Morri et al., 1994; Cicogna et al., 2003; Parravicini et al., 2010; Montefalcone et al., 2018) (Fig. 1).

La parte sommersa della Grotta Marina, tra la superficie e 7 m di profondità, ha uno sviluppo lineare più limitato di quella emersa, ma presenta una notevole complessità morfologica (Morri et al., 1994). Topograficamente possono essere distinte due zone: il

settore occidentale e il ramo sommerso orientale. Il primo è costituito da una cavità chiusa comprendente un lago (Lago dal Buco). Il secondo si diparte dall'Antro di Remo e sbocca appena oltre la punta rocciosa che chiude a levante l'antro stesso; il ramo sommerso orientale comprende a sua volta tre parti, tra loro connesse: uno stretto e tortuoso Cunicolo, che comprende due piccole camere (Prima Camera e Camera delle Luci), un'ampia sala (il Salone), e un lago (Lago dei Limoni) (Bianchi et al., 2009) (Fig. 1).



**Figura 1.** Pianta della Grotta Marina di Bergeggi (Bianchi et al., 2009).

La tortuosità e la complessità della parte sommersa della Grotta Marina di Bergeggi determinano la presenza di gradienti di luce, di idrodinamismo, di sedimentazione e – a causa dell'infiltrazione di acque dolci – di salinità, che si traducono in una particolare distribuzione della fauna presente. Dal punto di vista ecologico la parte sommersa della Grotta Marina di Bergeggi può essere suddivisa in tre ambienti diversi: 1) la zona di mare prospiciente l'Antro di Remo (l'ingresso principale della grotta emersa); 2) la porzione del

settore sommerso orientale composta dal Cunicolo e dal Salone; 3) i due laghi interni. Nella zona di mare prospiciente l'Anfro di Remo il popolamento biologico è riferibile alla biocenosi delle grotte semioscure e presenta ancora molte affinità con i popolamenti caratteristici della falesia esterna. Addentrandosi nelle porzioni interne della grotta si assiste a un notevole cambiamento del paesaggio: la luce si attenua fino a valori pressoché nulli e, a seconda della morfologia della cavità, il movimento della massa d'acqua può subire rallentamenti o accelerazioni. Proprio quest'ultimo fenomeno costituisce uno dei principali fattori che governano la distribuzione degli organismi della Grotta Marina di Bergeggi: mentre la morfologia a tunnel del Cunicolo permette un continuo ricambio di acque, quella a fondo cieco del Salone limita maggiormente il ricambio idrico. Per questo motivo, sebbene il Salone e il Cunicolo ospitino entrambi un popolamento biologico riferibile alla biocenosi delle grotte oscure, tra questi due ambienti è possibile riscontrare alcune differenze. Il Cunicolo è infatti colonizzato per tutta la sua lunghezza da spugne, briozoi e numerosi serpulidi. Il continuo apporto di sostanza organica garantito dal movimento della massa d'acqua permette a questi organismi di avere una grande disponibilità alimentare che li rende in grado di occupare ampie superfici. Allontanandosi dall'ingresso, nell'ambito di circa dieci metri, si penetra in un sistema a fondo cieco, dove si assiste a una rapida diminuzione della concentrazione di nutrimento e, di conseguenza, del ricoprimento biologico. Le pareti del Salone presentano una fascia inferiore a spugne massive, una intermedia dominata da spugne incrostanti, cui nelle porzioni iniziali si aggiunge una peculiare fascia colonizzata dalla spugna *Petrosia ficiformis* (che qui assume la caratteristica forma "digitata" e la colorazione biancastra tipica degli ambienti di grotta), e una - presso il soffitto - a basso ricoprimento, con solo serpulidi. I due laghi interni si distaccano fortemente dal quadro ambientale che caratterizza il resto della grotta a causa del molto minore ricambio idrico di cui usufruiscono. Le loro caratteristiche sono simili, nonostante essi siano tra loro separati e privi di connessioni macroscopiche. Nel Lago dei Limoni, gli organismi in grado di colonizzare le pareti sono rappresentati da spirorbidi, serpulidi e briozoi, ma il ricoprimento biologico è molto basso e sulle pareti si possono osservare ampie zone di roccia nuda. Ancora più estrema è la situazione ecologica del Lago dal Buco. Pur non presentando diretta connessione con il mare, il Lago dal Buco è influenzato dall'ingresso di acque marine durante le mareggiate e dall'infiltrazione di acque dolci che permeano dalla volta. I pochi organismi presenti appartengono a serpulidi, brachiopodi e spugne. La scarsità di questi organismi fa sì che la roccia si presenti quasi priva di ricoprimento biologico: per

questo motivo il settore occidentale è classificato dal punto di vista biologico come “grotta marginale” (Bianchi et al., 2009).

L'analisi della serie storica di dati a disposizione per la Grotta Marina di Bergeggi dal 1986 (Parravicini et al., 2010; Montefalcone et al., 2018) ha permesso di evidenziare il cambiamento nel tempo a cui le comunità bentoniche sono state soggette negli ultimi 30 anni. Il cambiamento è avvenuto principalmente a causa della riduzione della copertura degli organismi sessili che sono stati sostituiti da turf algale e da sedimento. Questo cambiamento, iniziato attorno agli anni '90, è stato evidenziato sia dai risultati sulle forme di crescita (GF) sia da quelli sulle gilde trofiche (TG).

## **2.2. Attività di campo**

Le attività di rilevamento in mare per il monitoraggio della Grotta Marina di Bergeggi sono state realizzate in data 29 maggio 2023, con condizioni meteorologiche buone. I rilevamenti sono stati condotti in immersione subacquea con autorespiratore ad aria (ARA), da parte di operatori scientifici subacquei qualificati del DiSTAV (Università di Genova), utilizzando come normativa di riferimento per l'immersione scientifica il codice di pratica dell'UNESCO (*Scientific Diving: a general code of practice*, edizione del 1996 e aggiornamenti successivi) e adottando gli standard previsti dalla Comunità Europea (*ESD, European Scientific Diver*, e *AESD, Advanced European Scientific Diver*, MAST CT 96-6351, Maggio 1997) (<http://www.aioss.info/>).

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

Prof.ssa Monica Montefalcone

brevetto istruttore SDI-TDI e *Advanced European Scientific Diver*

brevetto Cave Diver CMAS

Docente di Ecologia DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Dr. Annalisa Azzola

brevetto istruttore FIPSAS e *European Scientific Diver*

brevetto Speleologia Subacquea 1 FIPSAS

Assegnista di ricerca DiSTAV, Università degli Studi di Genova

Gli operatori scientifici subacquei hanno svolto le attività di campo grazie al supporto del personale del Diving Center Nereo Sub. Il personale del diving presente sulla barca d'appoggio ha anche curato gli aspetti legati alla sicurezza in mare. La profondità delle immersioni è stata misurata con un computer da immersione, la cui precisione è di circa 30 cm. L'ingresso in grotta e tutte le attività di rilevamento svolte all'interno della grotta sono state effettuate seguendo le norme di sicurezza previste; in particolare è stato steso un filo d'Arianna dall'ingresso principale della grotta sino alle parti terminali del Cunicolo per facilitare l'uscita dalla grotta una volta terminato il rilevamento.

### **2.3. Raccolta dati**

Al fine di definire la composizione e la struttura della comunità bentonica della Grotta Marina di Bergeggi e valutare il suo cambiamento nel tempo, è stato realizzato un rilevamento fotografico tramite l'utilizzo di una macchina fotografica Canon EOSR con scafandro NIMAR Pro e un riquadratore rigido 20 cm × 20 cm, esattamente come era stato fatto nei rilevamenti passati. Lungo il sistema cavitario, sono stati rivisitati i 9 siti per i quali erano disponibili i dati storici, ed è stato inoltre condotto un rilevamento fotografico anche nel sito Lago del Buco. Il piano di campionamento ha previsto, all'interno di ognuno dei 10 siti, la raccolta di 5 repliche di fotoquadri, per un totale di 50 immagini fotografiche relative all'intera area di studio.

Di seguito è riportato l'elenco dei 10 siti monitorati, il quadro sinottico (Tab. 1), e la loro posizione all'interno del sistema cavitario (Fig. 2):

**Sito I1:** denominato "Antro di Remo", posizionato nel ramo sommerso orientale nelle vicinanze dell'ingresso principale della grotta

**Sito C2:** denominato "Prima Camera", posizionato nel ramo sommerso orientale subito dopo il sito dell'Antro di Remo e nella parte iniziale dello stretto Cunicolo

**Sito G1:** denominato "Cunicolo 1", posizionato nel ramo sommerso orientale subito dopo il sito della Prima Camera dove il cunicolo forma una curva

**Sito C2:** denominato "Camera delle Luci", posizionato nel ramo sommerso orientale subito dopo il sito della Prima Camera e nella parte mediana dello stretto Cunicolo

**Sito G2:** denominato “Cunicolo 2”, posizionato nel ramo sommerso orientale subito dopo il sito della Camera delle Luci e nella parte terminale del Cunicolo

**Sito I2:** denominato “Ingresso Salone”, posizionato all'estremo opposto dell'Antro di Remo, dove vi è un secondo ingresso della grotta

**Sito S1:** denominato “Salone 1”, posizionato nel ramo sommerso orientale nella parte iniziale dell'ampia sala

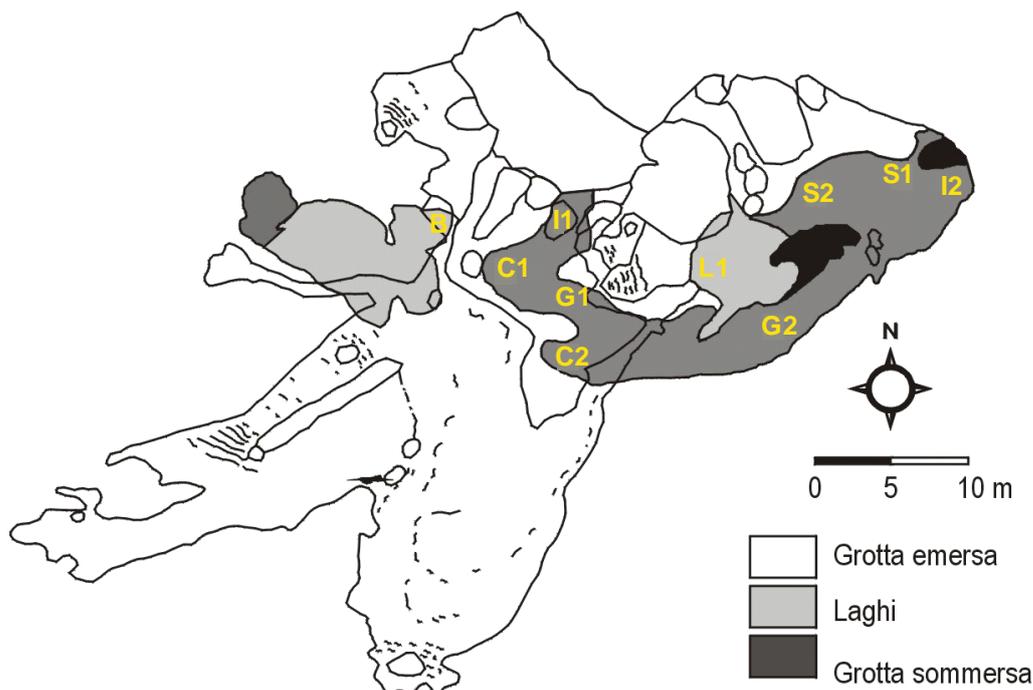
**Sito S2:** denominato “Salone 2”, posizionato nel ramo sommerso orientale subito dopo il sito del Salone 1 e nella parte terminale dell'ampia sala

**Sito L1:** denominato “Lago dei Limoni”, posizionato nel ramo sommerso orientale in corrispondenza del grande lago

**Sito B:** denominato “Lago del Buco”, posizionato nel settore occidentale della grotta

**Tabella 1.** Quadro sinottico dei siti che sono riportati in ordine dall'esterno verso l'interno della Grotta Marina di Bergeggi a partire dall'entrata dell'Antro di Remo (Lat. 44° 14,56' N, Long. 008° 26,72' E) o a partire dall'ingresso del Salone (Lat. 44° 14,55' N, Long. 008° 26,74' E).

SITO	Distanza da ingresso Antro di Remo (m)	Distanza da ingresso Salone (m)	Profondità (m)
I1: Antro di Remo	3		2,0
C1: Prima Camera	7		2,3
G1: Cunicolo 1	10		1,9
C2: Camera delle Luci	12		1,5
G2: Cunicolo 2	20		4,5
I2: Ingresso Salone		0	5,0
S1: Salone 1		5	5,0
S2: Salone 2		7	4,5
L1: Lago dei Limoni		15	2,0
B: Lago del Buco			0,2



**Figura 2.** Posizione dei 10 siti (in giallo le sigle dei siti come riportate in Tab. 1) dove sono state svolte le attività di campionamento fotografico all'interno della Grotta Marina di Bergoggi.

## 2.4. Analisi dei dati

### 2.4.1. Stato della comunità

Al fine di analizzare la composizione e la struttura della comunità bentonica della Grotta Marina di Bergoggi si è scelto di applicare lo stesso metodo di analisi utilizzato negli studi passati (Bianchi et al., 2009; Parravicini et al., 2010; Montefalcone et al., 2018), che ha previsto l'utilizzo di descrittori non tassonomici. Questi raggruppano gli organismi bentonici in categorie ecologiche morfo-funzionali quali: i) le forme di crescita (*growth forms*), e ii) le gilde trofiche (*trophic guilds*). L'utilizzo di tali descrittori permette, in fase di analisi, di raggruppare i diversi organismi rilevati nell'immagine in categorie ecologiche basate esclusivamente sull'occupazione dello spazio (forme di crescita) e sulle modalità di alimentazione (gilde trofiche), indipendentemente dal riconoscimento a livello di specie degli organismi. Tramite l'analisi visiva dei 50 fotoquadri raccolti è stato quindi rilevato il ricoprimento (cover %) per ogni descrittore presente.

## Forme di crescita

Per le forme di crescita sono stati presi in considerazione i descrittori proposti da Jackson (1979) e successivamente rivisti da Connell e Keough (1985). Questi ultimi riguardano le forme di crescita “incrostanti” che sono state ulteriormente suddivise in “determinate” e “indeterminate”. Tale suddivisione è legata al mantenimento della complessità morfologica (espressa, ad esempio, come rapporto tra superficie e perimetro) durante la crescita degli organismi: i primi non la modificano significativamente; i secondi possono invece espandersi diversamente nelle varie direzioni del piano o dello spazio.

Di seguito sono elencate le forme di crescita prese in esame:

- 1) Perforatori: organismi capaci di perforare la roccia carbonatica e dei quali risulta visibile solo una ridotta parte più esterna, come ad esempio le spugne perforanti del genere *Cliona*.
- 2) Massivi emisferici: organismi che hanno un'altezza più o meno uguale al raggio ( $h \approx r$ , dove  $h$  è l'altezza e  $r$  il raggio), come ad esempio alcuni poriferi (e.g., *Agelas oroides*) e i madreporari solitari (e.g., *Caryophyllia inornata*).
- 3) Massivi appiattiti: organismi con un'altezza minore del raggio ( $h < r$ ), come ad esempio alcuni poriferi (e.g., *Chondrosia reniformis*).
- 4) Massivi cupuliformi: organismi con un'altezza maggiore del raggio ( $h > r$ ), come ad esempio alcune ascidie (e.g., *Halocynthia papillosa*).
- 5) Massivi cilindrici prostrati: organismi con un'altezza molto minore del raggio ( $h \ll r$ ), come ad esempio il porifero *Petrosia ficiformis* che in grotta assume la tipica morfologia allungata.
- 6) Laminari eretti: organismi quali macroalghe (e.g., *Flabellia petiolata* e *Halimeda tuna*) e briozoi reteporiformi (e.g., *Reteporella grimaldii*).
- 7) Laminari prostrati: organismi quali alghe rodoficee (e.g., *Peyssonnelia squamaria* e *Lithophyllum stictaeforme*) che hanno un tallo di forma laminare ma prospiciente il substrato.
- 8) Stoloniali: comprendono forme lineari o ramificate parallele al substrato e incrostanti, come la maggior parte dei policheti serpulidi.
- 9) Incrostanti indeterminati: organismi che formano incrostazioni bidimensionali aderenti al substrato, come ad esempio le alghe corallinacee incrostanti (e.g., *Lithophyllum*

*incrustans*), alcuni poriferi (e.g., *Spirastrella cunctatrix*), briozoi incrostanti e ascidiacei coloniali.

- 10) Incrostanti determinati: come i precedenti formano incrostazioni bidimensionali aderenti al substrato ma presentano una morfologia di forma definita, e i principali rappresentanti sono gli spirorbidi, anellidi policheti che colonizzano il substrato con piccole ma numerose incrostazioni di forma circolare.
- 11) Arborescenti: organismi di forma eretta, solitamente regolarmente ramificata, con una zona ristretta della base di attacco al substrato, ad esempio le alghe frondose, gli idroidi, i briozoi (e.g., *Pentapora fascialis*).
- 12) Rampicanti: organismi con forma eretta lineari o irregolarmente ramificata, semieretta o ascendente, con una o più zone ristrette di attacco al substrato, ad esempio alghe filamentose e alcune specie di serpulidi (e.g., *Protula* spp.).

## **Gilde trofiche**

Per le gilde trofiche sono stati presi in esame gli organismi vegetali, che hanno una strategia alimentare di tipo autotrofo, e gli organismi animali eterotrofi. Nel caso degli organismi animali, in particolare, la categoria trofica è tipicamente definita dall'insieme di relazioni che esistono tra la natura del cibo, le dimensioni delle particelle ingerite e il meccanismo di assunzione (Bianchi e Morri, 1985; Gambi e Giangrande, 1985; Cocito et al., 1990, 1997). L'approccio dei gruppi trofici si basa quindi sulla suddivisione delle strategie eterotrofe considerando la strategia che gli organismi bentonici adottano per la cattura del cibo sospeso e disciolto nella colonna d'acqua: filtratori passivi, filtratori attivi, e filtratori misti (Riedl, 1966).

Di seguito sono elencate le gilde trofiche prese in esame:

- 1) Autotrofi: organismi vegetali fotosintetici, quali ad esempio le macroalghe.
- 2) Filtratori passivi: organismi che si limitano a trattenere il particolato sospeso nell'acqua e veicolato dalle correnti, come ad esempio gli cnidari.
- 3) Filtratori attivi ciliari non lofoforati: sono organismi che generano la corrente nutrizionale grazie a movimenti di sistemi di ciglia o di flagelli. In questo caso le ciglia o

i flagelli sono disposti lungo docce, come ad esempio per alcune specie di serpulidi e per gli spirorbidi.

- 4) Filtratori attivi ciliari lofoforati: come sopra sono organismi che generano corrente, ma in questo caso le ciglia o i flagelli sono organizzati in un organo speciale detto lofoforo, present ad esempio in alcuni briozoi e nei brachiopodi.
- 5) Pompanti attivi non muscolarizzati: sono sempre filtratori attivi ma in questo caso i sistemi di filtraggio sono racchiusi in camere apposite atte a operare un'azione di pompa, come ad esempio nei poriferi.
- 6) Pompanti attivi muscolarizzati: organismi filtratori attivi nei quali l'azione di pompare l'acqua è potenziata dalla muscolarizzazione delle camere, come ad esempio nei bivalvi e negli ascidiacei.
- 7) Filtratori misti: organismi che cambiano strategia trofica in funzione delle condizioni idrodinamiche e della concentrazione di particolato sospeso. Fanno parte di questa categoria i crostacei cirripedi (Crisp e Southward, 1961). I cirri possono effettuare un movimento battente veloce (filtrazione attiva) o limitarsi a una semplice estensione (filtrazione passiva).

Infine, nelle analisi delle immagini fotografiche è stata considerata la categoria "abiotico" che comprende le porzioni di substrato dove non è presente alcun organismo (può essere rappresentato da roccia nuda o da roccia ricoperta da sedimento).

#### **2.4.2. Cambiamento nel tempo**

I dati di ricoprimento (%) dei descrittori rilevati durante l'analisi dei fotoquadrati sono stati organizzati in due matrici (tempo x sito) x descrittore, una per le forme di crescita e una per le gilde trofiche. Sono stati quindi considerati tutti gli anni di rilevamento a cui è stato assegnato un codice: 1986 (a), 2004 (b), 2009 (c), 2013 (d), e 2023 (e). Inoltre, sono stati considerati tutti e 10 i siti rivisitati, a cui è stato attribuito il codice sopra definito (si veda la sezione 'Raccolta dati'). Al fine di analizzare il cambiamento nel tempo nella struttura della comunità bentonica, sulla matrice dati è stata effettuata l'analisi delle corrispondenze (CA), seguita da una un'analisi multivariata della varianza per permutazioni (PERMANOVA) a due vie considerando due fattori fissi ortogonali: 'tempo' e 'stazione'. Infine, i descrittori

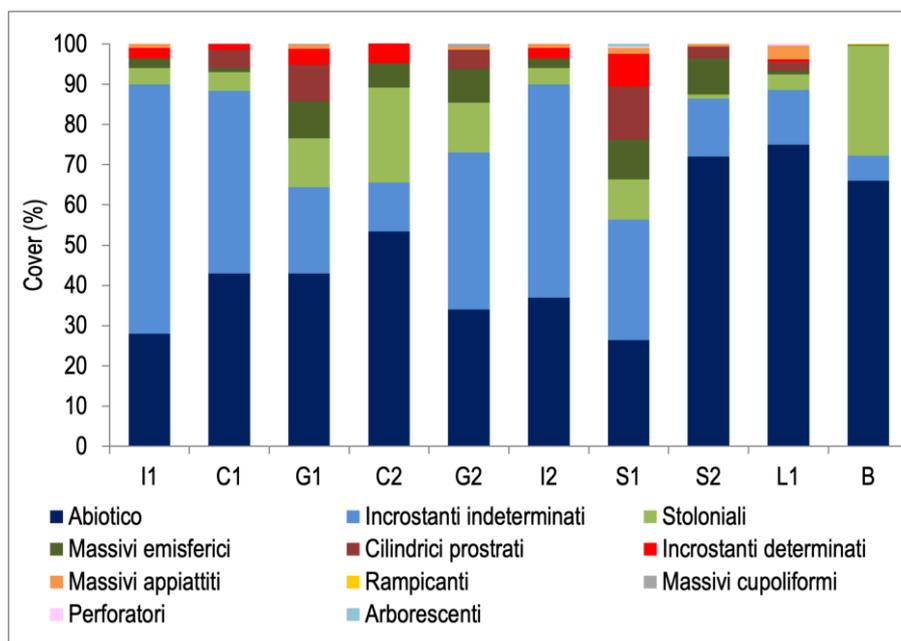
non tassonomici che hanno maggiormente contribuito al cambiamento nel tempo sono stati identificati tramite l'applicazione del test *Similarity Percentages* (SIMPER).

### 3. RISULTATI

#### 3.1. FORME DI CRESCITA

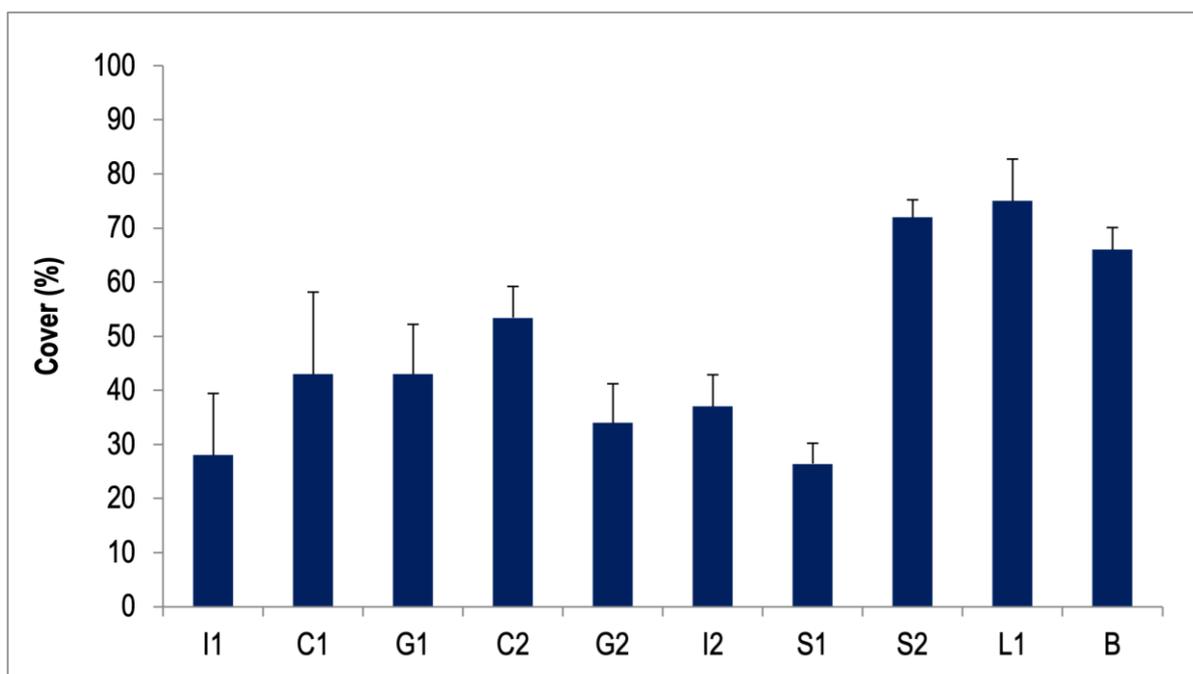
##### 3.1.1. Stato della comunità

L'analisi delle immagini ha permesso di individuare 10 forme di crescita nei 10 siti monitorati all'interno della Grotta Marina di Bergeggi: arborenti, cilindrici prostrati, incrostanti determinati, incrostanti indeterminati, massivi appiattiti, massivi cupoliformi, massivi emisferici, perforatori, rampicanti, e stoloniali (Fig. 3). Non sono invece state osservate le categorie dei laminari eretti e dei laminari prostrati. Tra i siti è stato osservato un gradiente nel ricoprimento (%) delle forme di crescita incrostanti indeterminati lungo il sistema cavitario (esterno-interno) della porzione a fondo cieco della grotta (Fig. 3), che tendono a diminuire passando dalle porzioni prossimali all'ingresso del Salone (I2) alle porzioni della grotta più confinate nel Lago dei Limoni (L1). La componente abiotica (i.e., roccia nuda e/o sedimento) mostra invece un graduale aumento passando dalle porzioni prossimali di entrambi ingressi (I1 e I2) alle porzioni della grotta più confinate nel Cunicolo (G2) e nel Lago dei Limoni (L1) (Fig. 3 e Fig. 4).

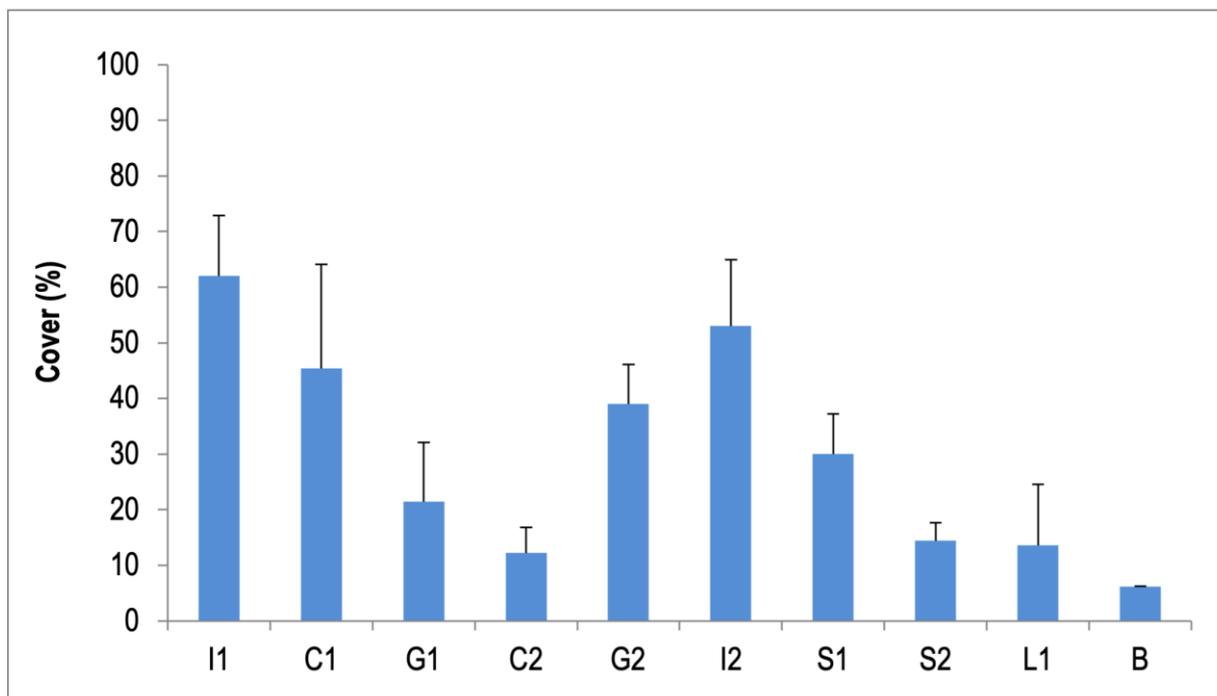


**Figura 3.** Ricoprimento percentuale (cover %) delle forme di crescita nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.

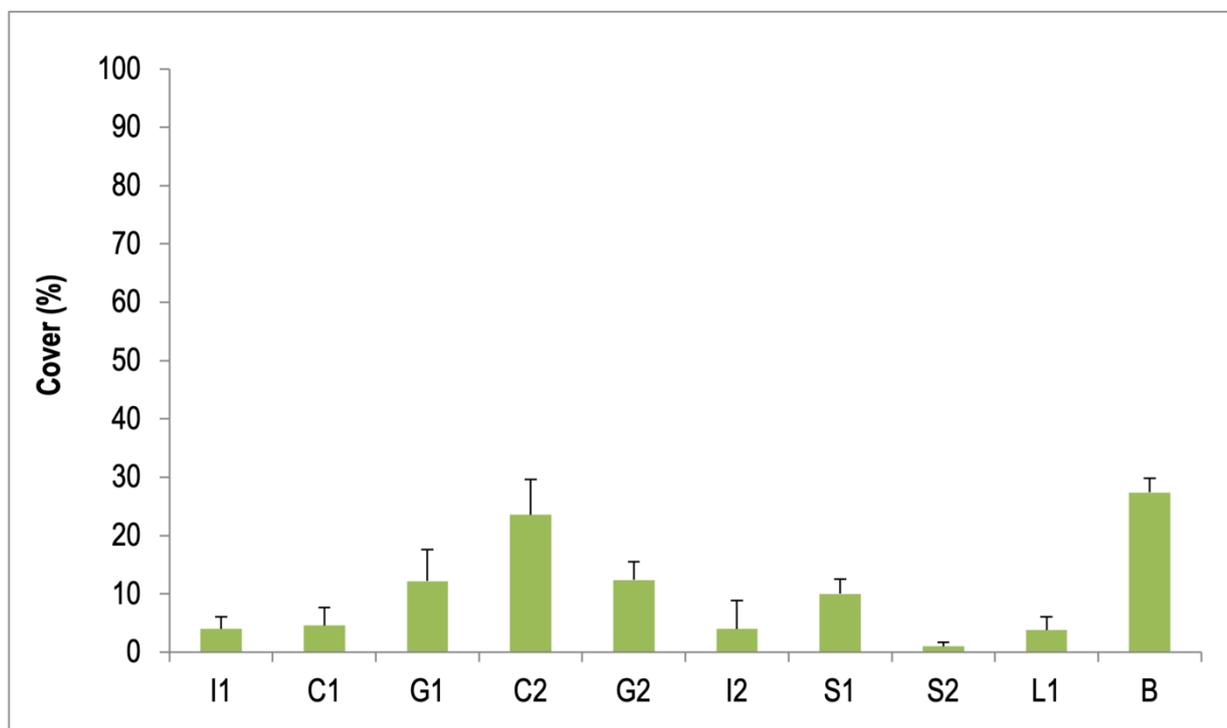
Le categorie più rappresentate in tutti i 10 siti sono quelle dell'abiotico (i.e., roccia nuda e sedimento) e degli incrostanti indeterminati. Per il descrittore abiotico il valore medio di ricoprimento varia da un minimo di  $26 \pm 7\%$  nel sito I1 a un massimo di  $75 \pm 7\%$  nel sito L1 (Fig. 4); per il descrittore incrostanti indeterminati il valore medio di ricoprimento varia da un minimo di  $12 \pm 5\%$  nel sito C2 a un massimo di  $62 \pm 8\%$  nel sito I1 (Fig. 5). A seguire, le altre forme di crescita più rappresentate in tutti i siti sono gli stoloniali, caratterizzati principalmente dai serpulidi, i massivi emisferici, e i cilindrici prostrati. I primi (stoloniali) mostrano dei valori medi di ricoprimento che variano da un minimo di  $1 \pm 1\%$  nel sito S2 a un massimo di  $27 \pm 5\%$  nel sito B (Fig. 6); i massivi emisferici mostrano dei valori medi che variano da un minimo di  $1 \pm 1\%$  nei siti C1 e L1 a un massimo di  $10 \pm 3\%$  nel sito S1, fatta eccezione per il sito B dove risultano mancanti (Fig. 7); infine, i cilindrici prostrati mostrano dei valori medi che variano da  $2 \pm 2\%$  nel sito L1 a  $13 \pm 7\%$  nel sito S1, fatta eccezione per i siti I1, C2, I2 e B dove risultano mancanti (Fig. 8). Le categorie di forme di crescita incrostanti determinati e massivi appiattiti non raggiungono mai valori di ricoprimento maggiori del 10% (Fig. 8, Fig. 9). Infine, le restanti forme di crescita arborecenti, laminari eretti, laminari prostrati, massivi cupoliformi, perforatori, e rampicanti non raggiungono mai valori di ricoprimento maggiori dell'1% e possono quindi ritenersi trascurabili.



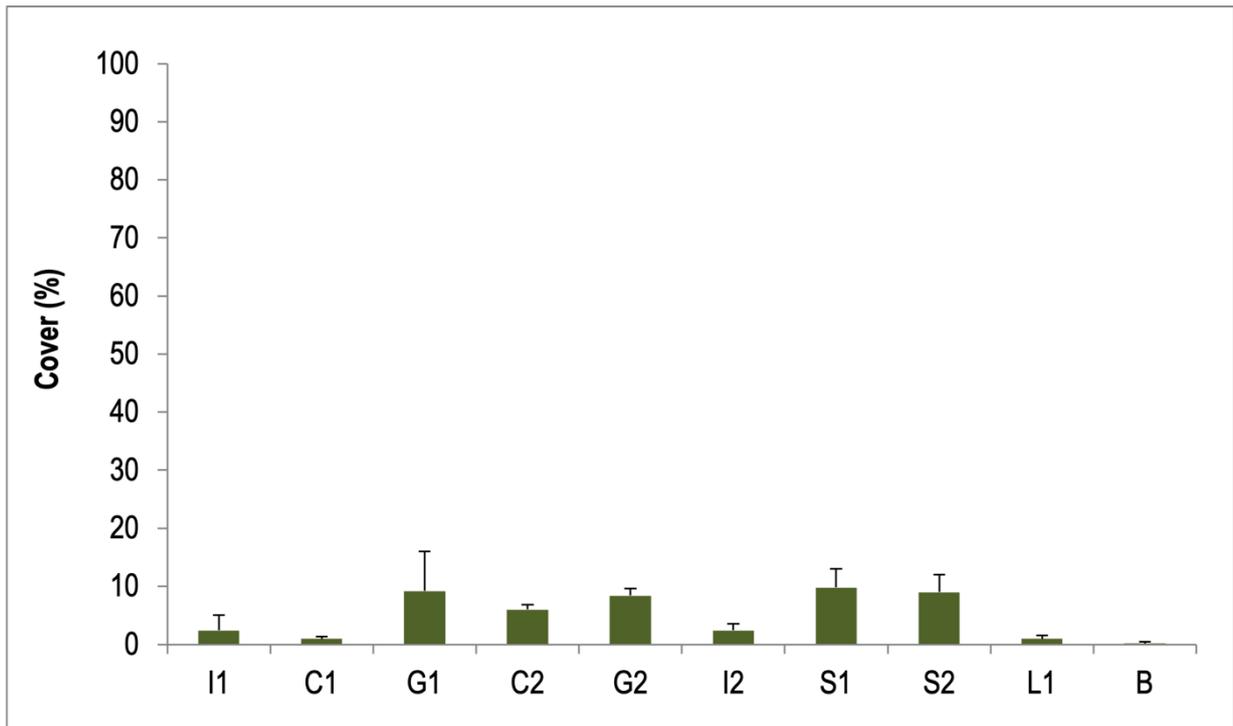
**Figura 4.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “abiotico” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



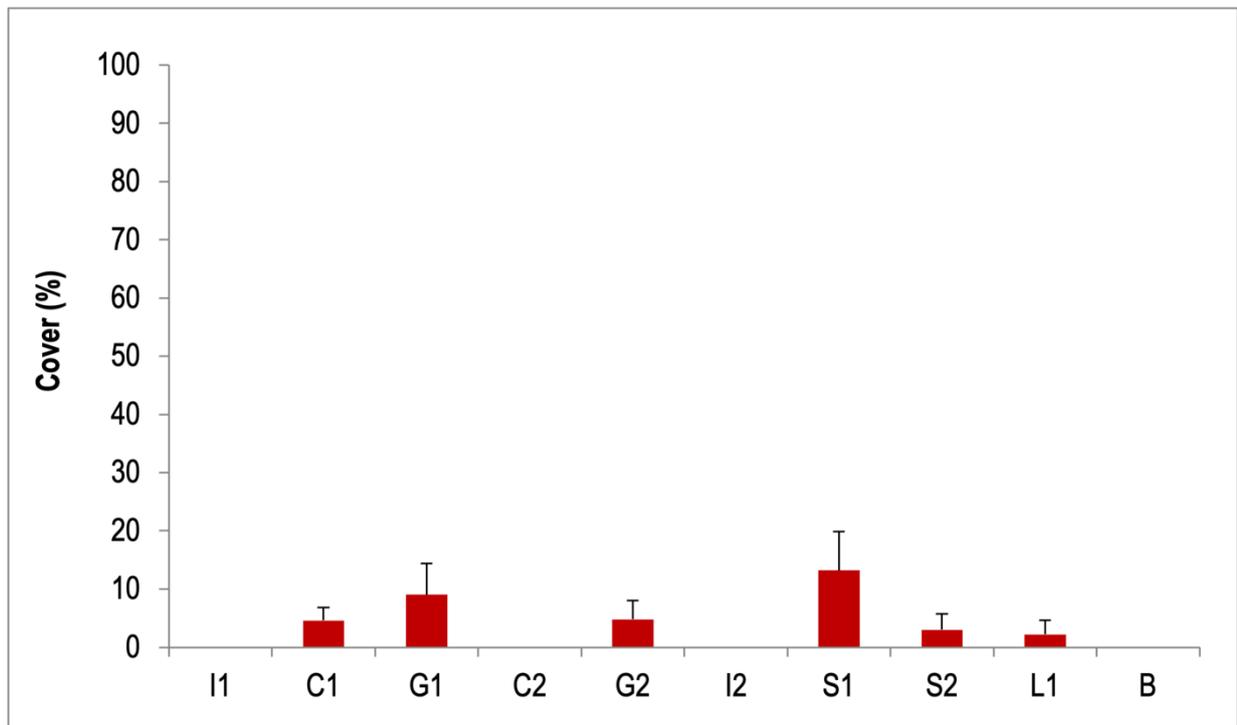
**Figura 5.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della forma di crescita “incrostanti indeterminati” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



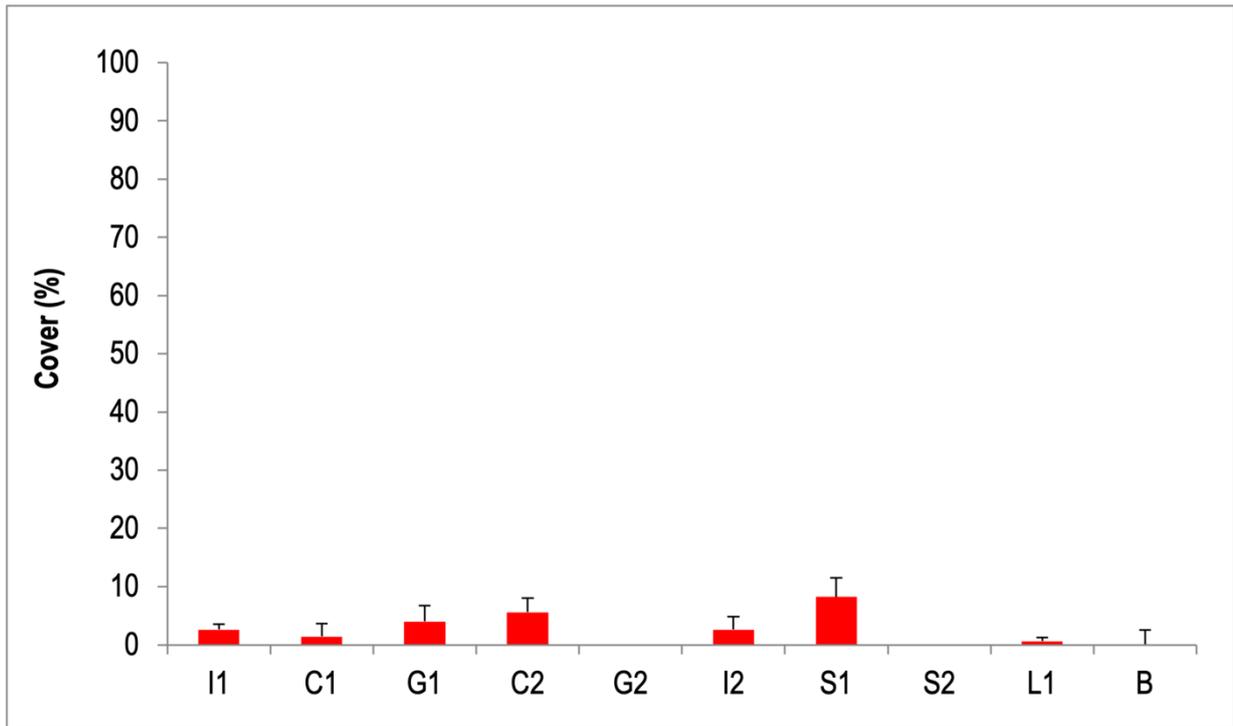
**Figura 6.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della forma di crescita “stoloniali” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



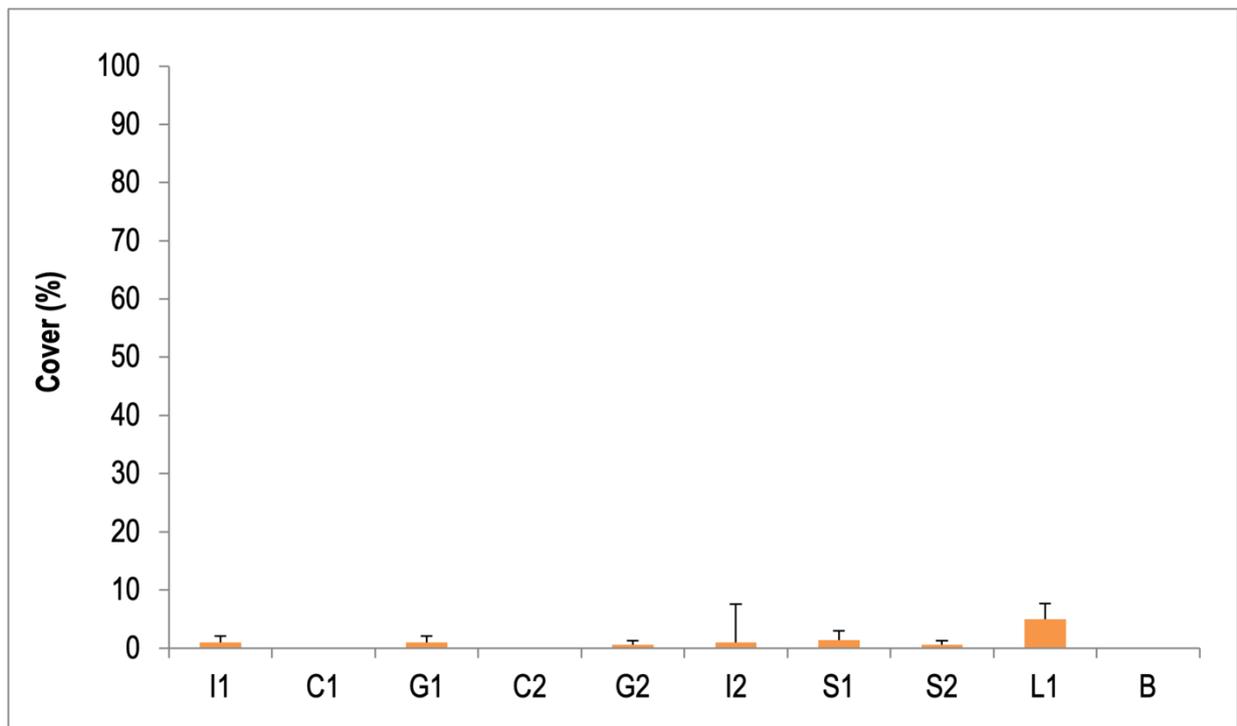
**Figura 7.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della forma di crescita “massivi emisferici” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



**Figura 8.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della forma di crescita “cilindrici prostrati” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



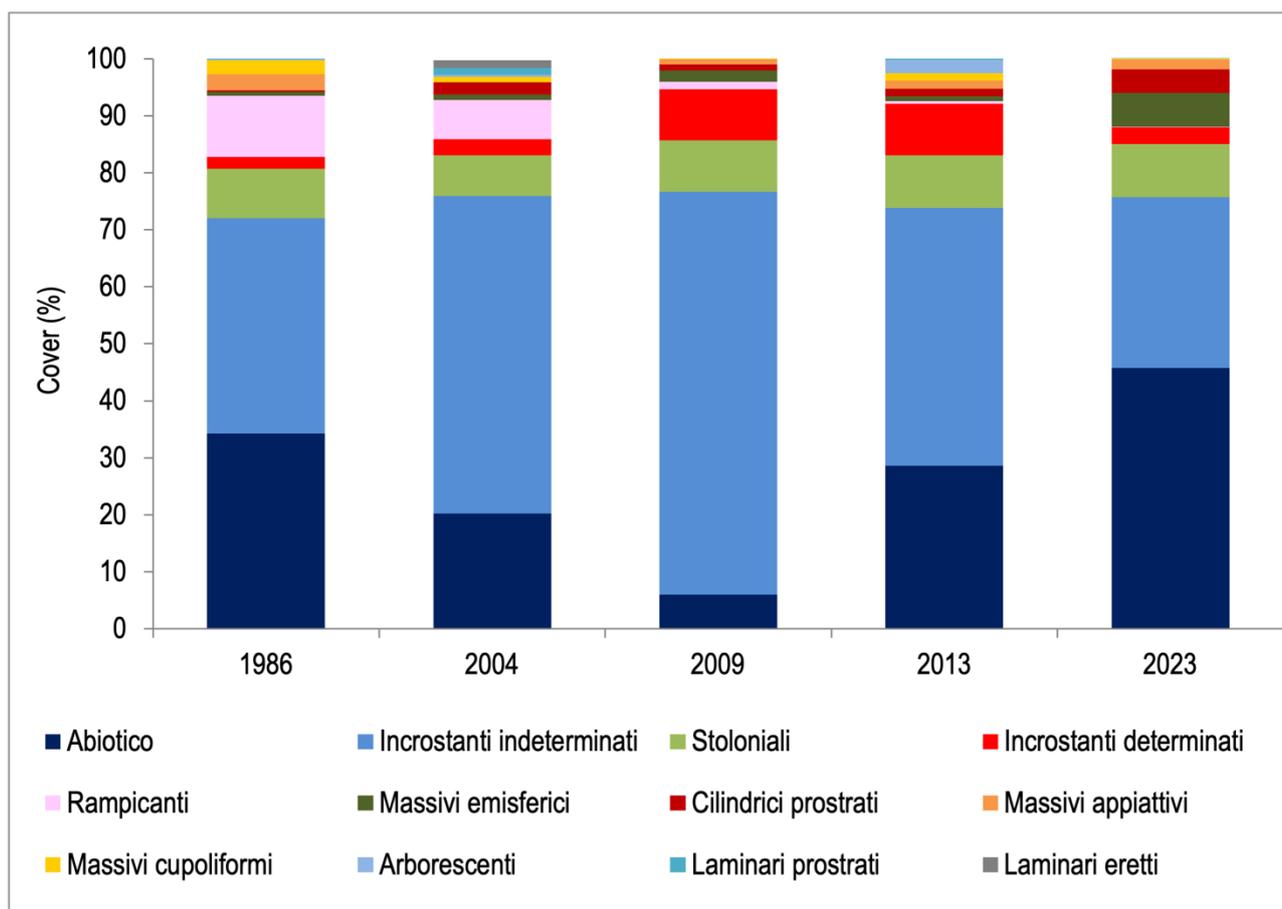
**Figura 9.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della forma di crescita “incrostanti determinati” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



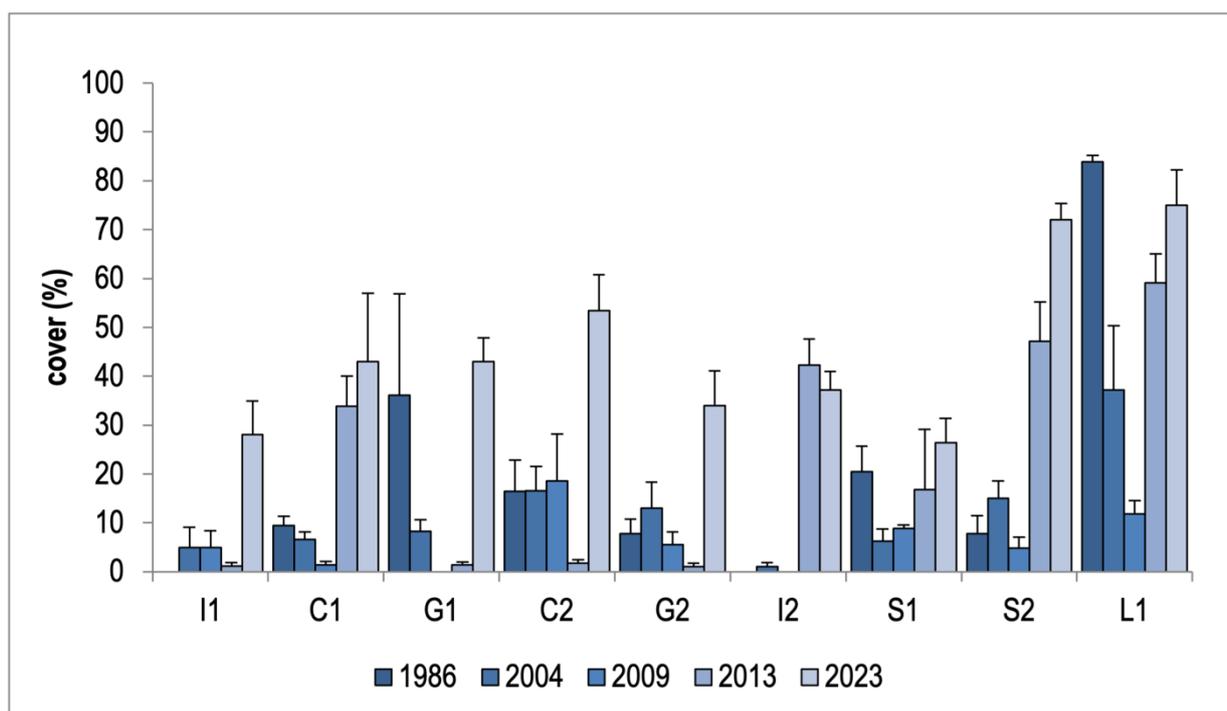
**Figura 10.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della forma di crescita “massivi appiattiti” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.

### 3.1.2. Cambiamento nel tempo

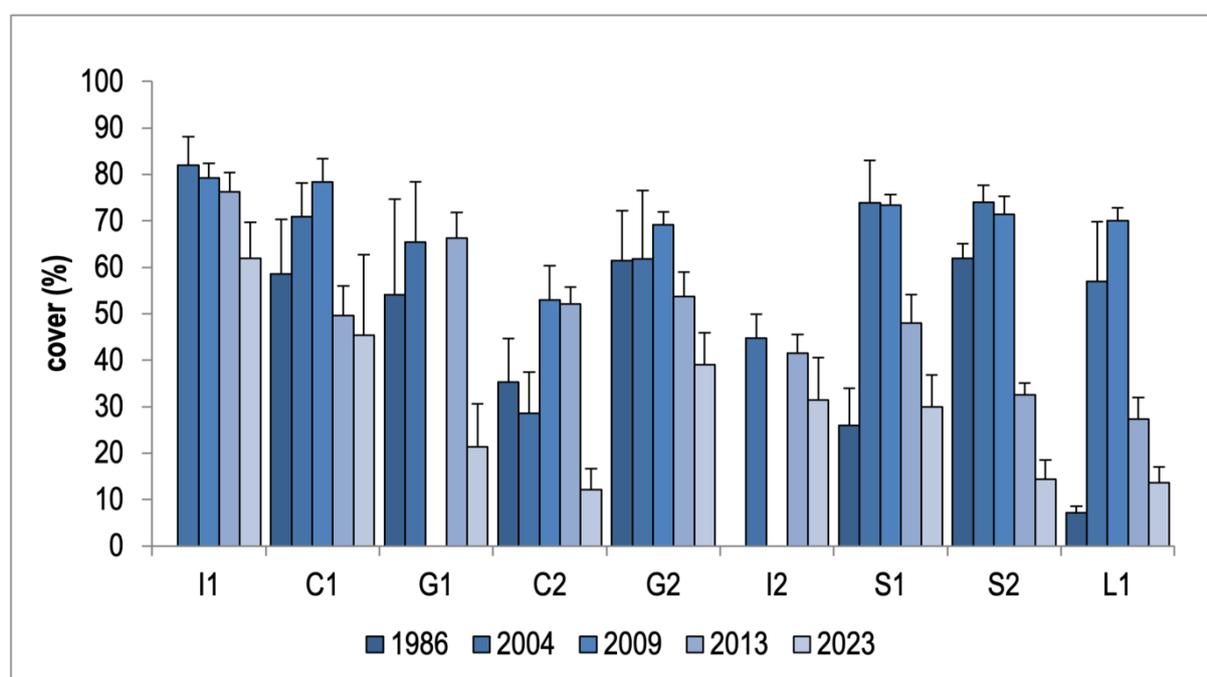
L'analisi del cambiamento nel tempo delle forme di crescita ha permesso di osservare l'andamento del ricoprimento (%) dei descrittori dal 1986 al 2023 (Fig. 11). In particolare, il descrittore 'abiotico' si era ridotto dal 1986 al 2009, per poi aumentare nuovamente nel 2013 e poi ancora nel 2023 (Fig. 11, Fig. 12). Questo andamento è risultato opposto a quello degli incrostanti indeterminati che sono aumentati dal 1986 al 2009 e poi diminuiti dal 2009 al 2023 (Fig. 11, Fig. 13), facendo così aumentare la copertura della roccia nuda. Gli organismi stoloniali sono invece rimasti costanti nel tempo (Fig. 11, Fig. 14), mentre un aumento fino al 2009 e poi una successiva diminuzione fino al 2023 è stata osservata per gli incrostanti determinati (Fig. 11, Fig. 15). Infine, è stata osservata una graduale riduzione dei rampicanti dal 1986 al 2023 (Fig. 11, Fig. 16).



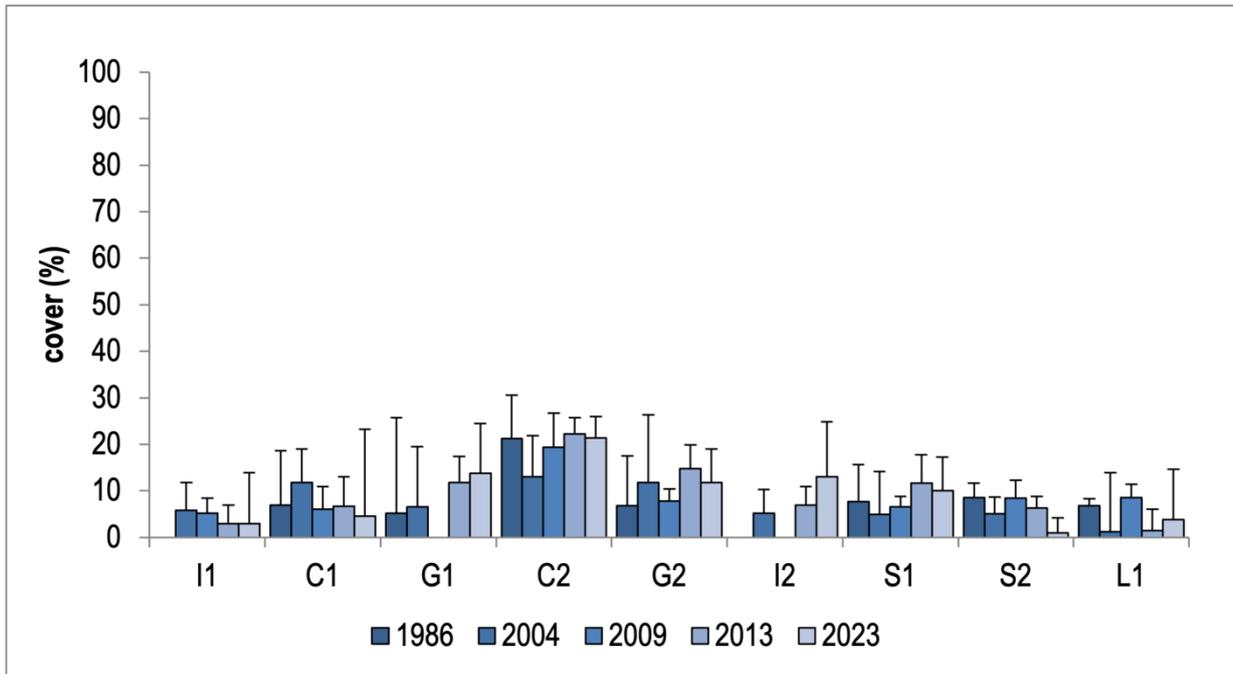
**Figura 11.** Valori medi di ricoprimento delle forme di crescita nei 5 anni di monitoraggio nella Grotta Marina di Bergeggi.



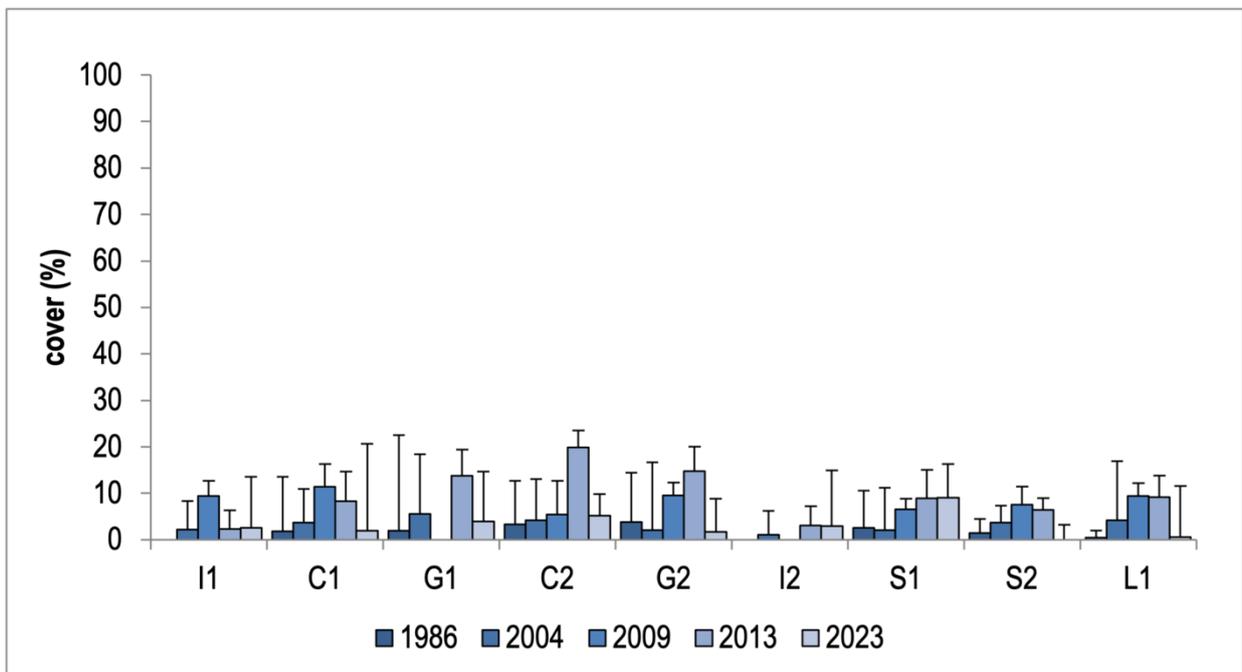
**Figura 12.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “abiotico” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.



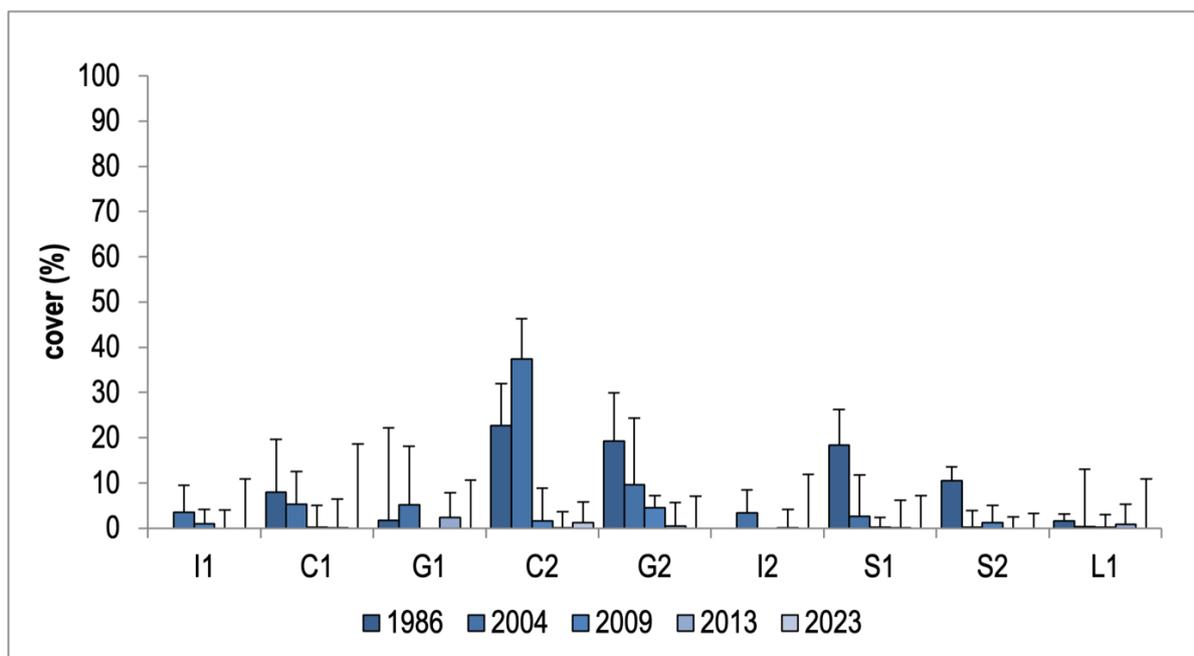
**Figura 13.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della categoria “incrostanti indeterminati” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.



**Figura 14.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della categoria “stoloniali” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergoggi.



**Figura 15.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della categoria “incrostanti determinati” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergoggi.

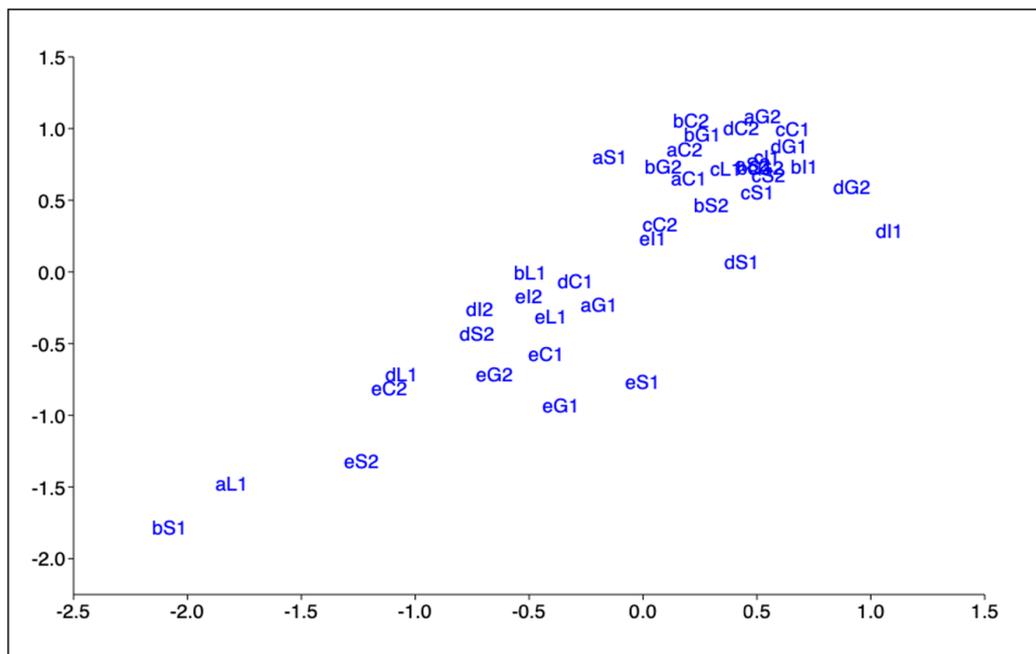


**Figura 16.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) della categoria “rampicanti” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.

L'applicazione della CA alla matrice relativa alle forme di crescita non ha evidenziato una netta distinzione delle repliche secondo un gradiente spaziale (i.e., disposizione dei siti all'interno della grotta) e nemmeno temporale, nonostante si possa osservare una maggiore distanza tra le repliche del 2023 (sulla sinistra) rispetto a quelle degli altri anni lungo l'asse primario (Fig. 11). Questo risultato è coerente con i risultati della PERMANOVA che hanno mostrato un'interazione significativa tra i fattori 'tempo' e 'sito', evidenziando differenze significative tra alcuni siti all'interno della grotta nel tempo (Tab. A1, in Allegato). Osservando le traiettorie temporali (e quindi le distanze) dei punti corrispondenti a ciascun sito della grotta nel tempo, i siti più confinati del Cunicolo 2 (G2) e del Lago dei Limoni (L1) sono quelli che mostrano i maggiori cambiamenti dal 1986 al 2023.

L'applicazione dell'analisi SIMPER ha mostrato che il descrittore che maggiormente influisce sulle differenze nel tempo è quello degli incrostanti indeterminati, seguito dall'abiotico fino al 2013, mentre tra il 2013 e il 2023 è risultato l'abiotico il descrittore più importante nello spiegare le differenze osservate, seguito dagli incrostanti indeterminati.

Sono risultati, inoltre, importanti anche i descrittori dei rampicanti e degli stoloniali (Tab. A2, in Allegato).



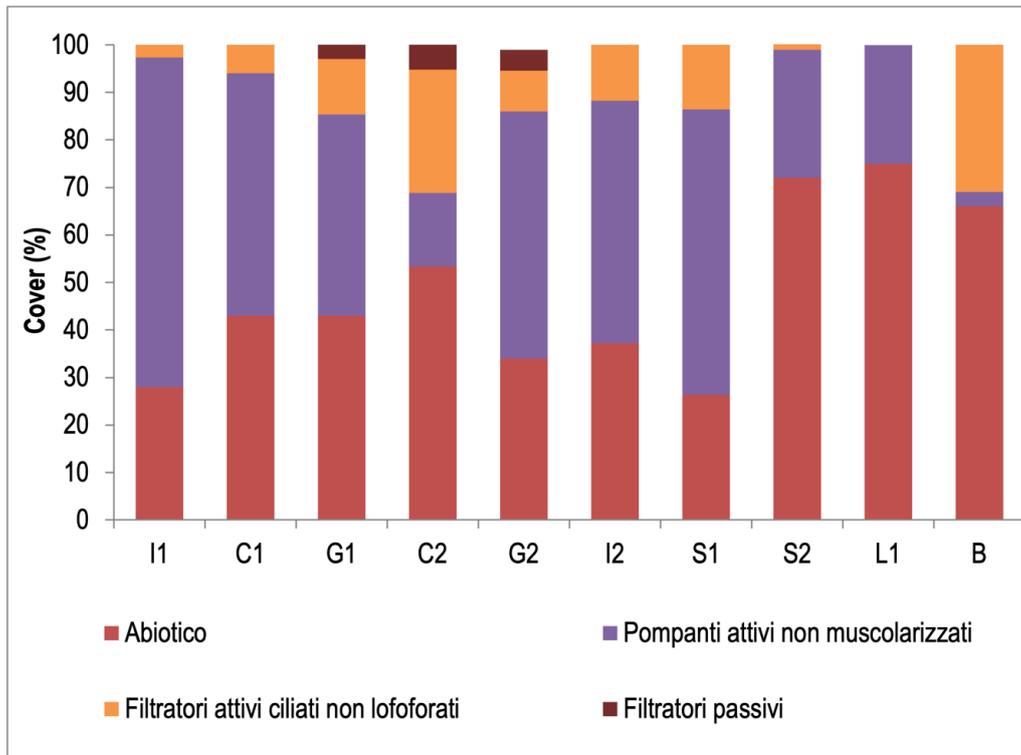
**Figura 17.** Analisi delle corrispondenze (CA) applicata ai dati di ricoprimento (%) delle forme di crescita rilevate nei siti della Grotta Marina di Bergeggi nei diversi anni di monitoraggio. Le repliche sono rappresentate tramite codice alfanumerico con il tempo (a: 1986, b: 2004, c: 2009, d: 2013, e: 2023), seguito dal sito (I1: Antro di Remo, C1: Prima Camera, G1: Cunicolo 1, C2: Camera delle Luci, G2: Cunicolo 2, I2: Ingresso Salone, S1: Salone 1, S2: Salone 2, e L1: Lago dei Limoni).

## 3.2. GILDE TROFICHE

### 3.2.1. Stato della comunità

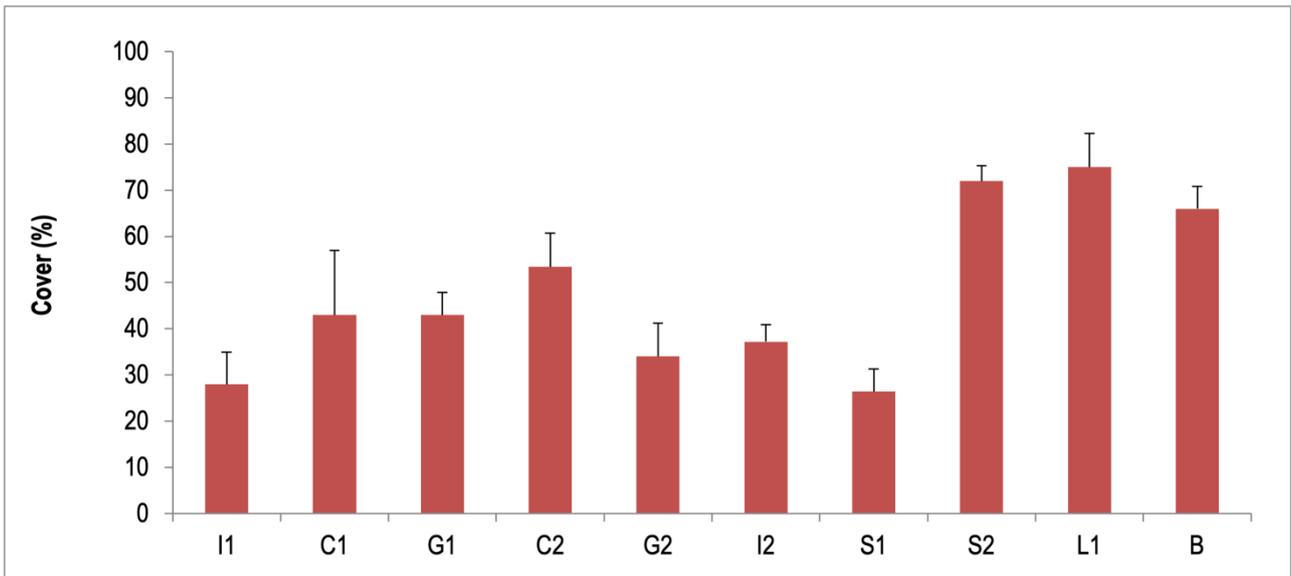
L'analisi delle immagini ha permesso di individuare 4 gilde trofiche nei 10 siti monitorati all'interno della Grotta Marina di Bergeggi: filtratori attivi ciliati non lofoforati, filtratori passivi, pompanti attivi muscolarizzati, e pompanti attivi non muscolarizzati (Fig. 18). Non sono, invece, state osservate le categorie degli autotrofi, dei filtratori attivi ciliati lofoforati, e dei filtratori misti. Per i siti presenti nella porzione di grotta a fondo cieco (in ordine I2, S1, S2, e L1) è stato osservato un gradiente lungo il sistema cavitario nel ricoprimento (%) della componente abiotica che aumenta procedendo dalle zone prospicienti l'ingresso (I2) verso le parti più interne e confinate della grotta (L1) (come già evidenziato in precedenza

con le forme di crescita), a scapito dei pompanti attivi non muscolarizzati e dei filtratori attivi ciliati non lofoforati (Fig. 18).

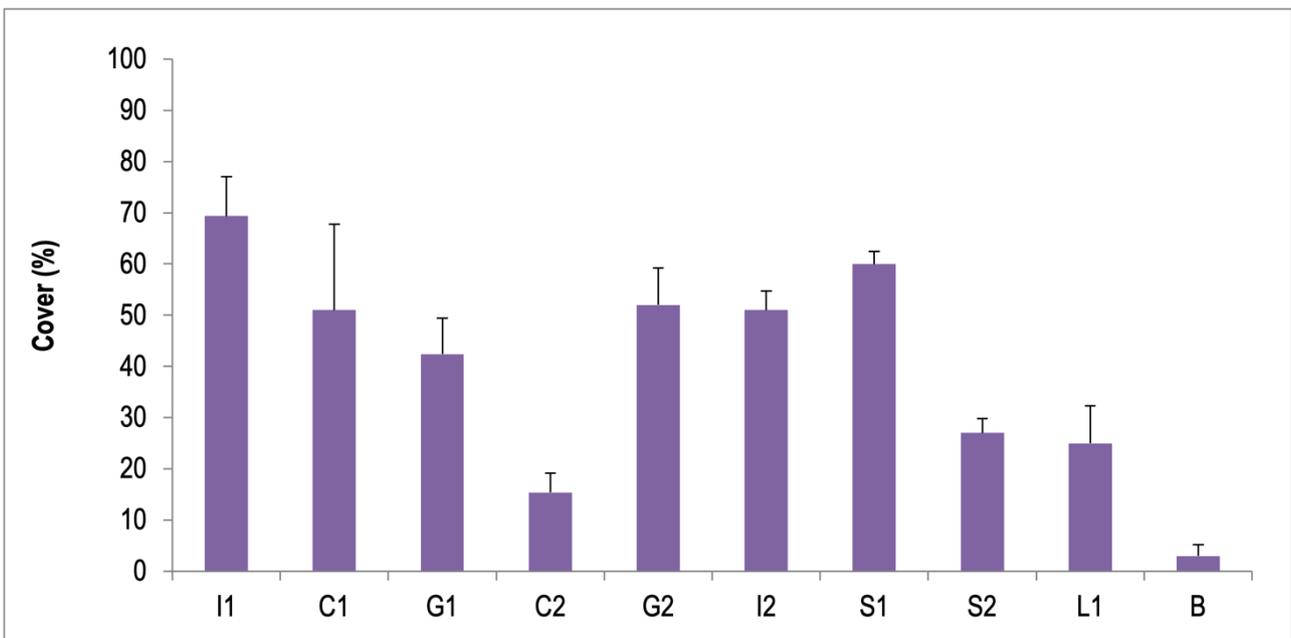


**Figura 18.** Ricoprimento (cover %) delle gilde trofiche nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.

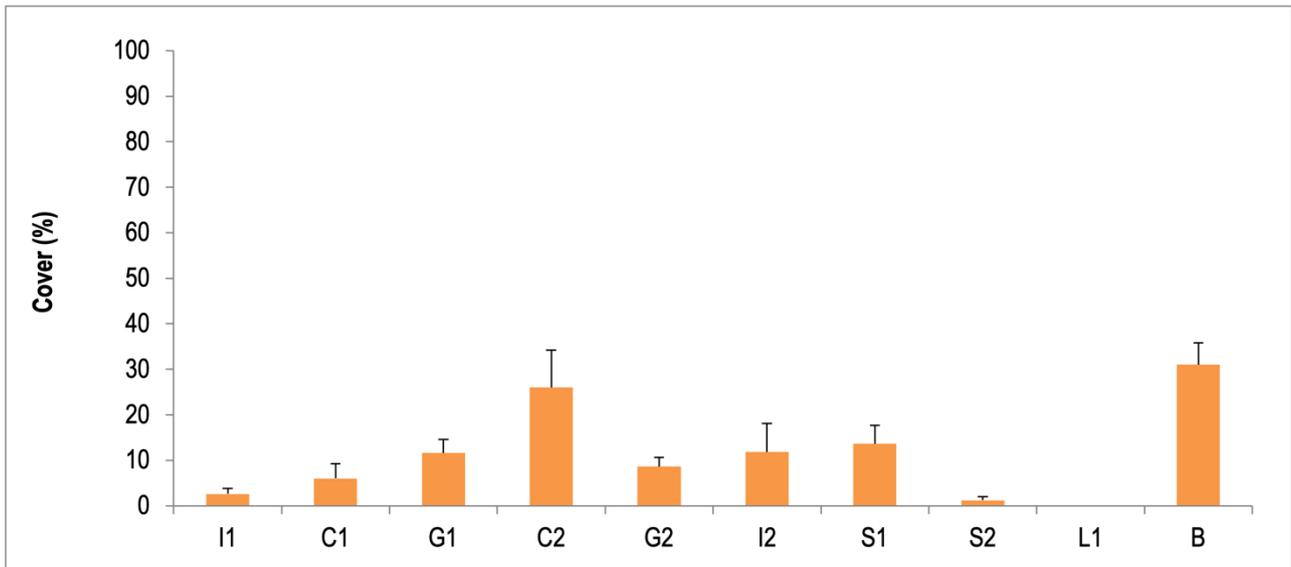
Le categorie più rappresentate in tutti i siti sono quelle dell'abiotico e dei pompanti attivi non muscolarizzati. Per il descrittore abiotico il valore medio di ricoprimento varia da un minimo di  $26 \pm 5\%$  nel sito S1 a un massimo di  $75 \pm 5\%$  nel sito L1 (Fig. 19); per il descrittore dei pompanti attivi non muscolarizzati il valore medio di ricoprimento varia da un minimo di  $3 \pm 2\%$  nel sito B a un massimo di  $69 \pm 8\%$  nel sito I1 (Fig. 20). A seguire, le altre gilde trofiche più rappresentate in tutti i siti sono i filtratori attivi ciliati non lofoforati, con valori medi di ricoprimento che variano da un minimo di  $1 \pm 1\%$  nel sito I2 a un massimo di  $31 \pm 2\%$  nel sito B (Fig. 21). La categoria dei filtratori passivi non raggiunge mai valori di ricoprimento maggiori al 10% (Fig. 22), mentre i pompanti attivi muscolarizzati non raggiungono mai valori di ricoprimento maggiori dell'1%.



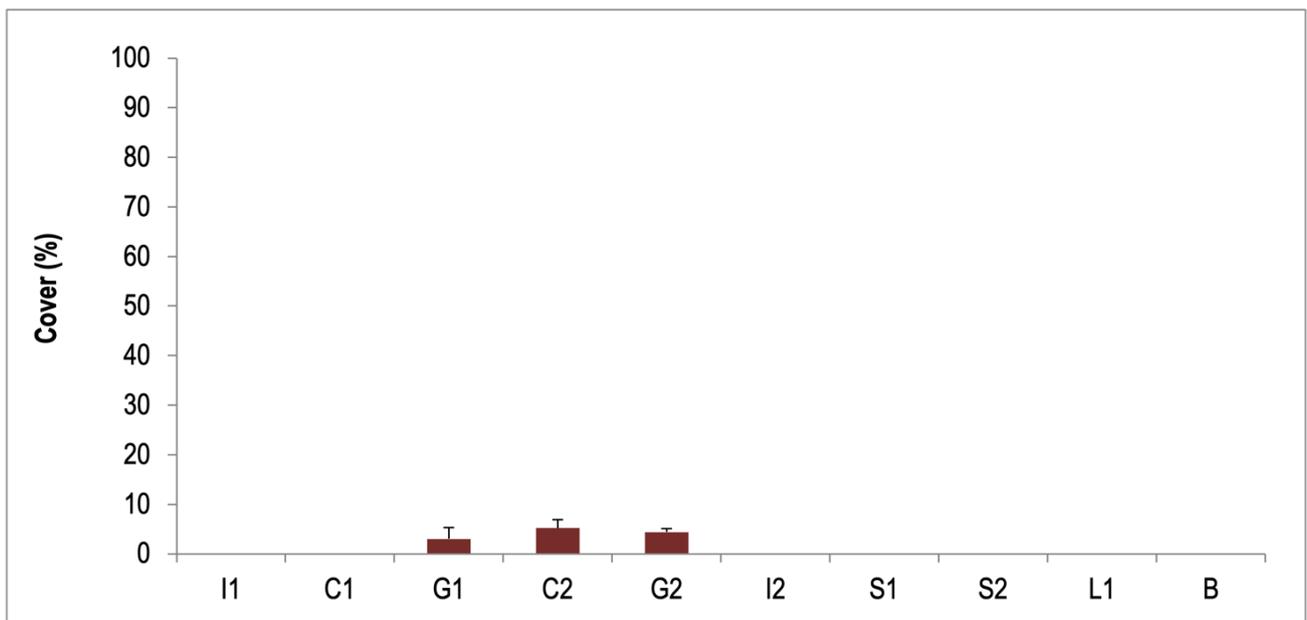
**Figura 19.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “abiotico” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergoggi.



**Figura 20.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “pompani attivi non muscolarizzati” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergoggi.



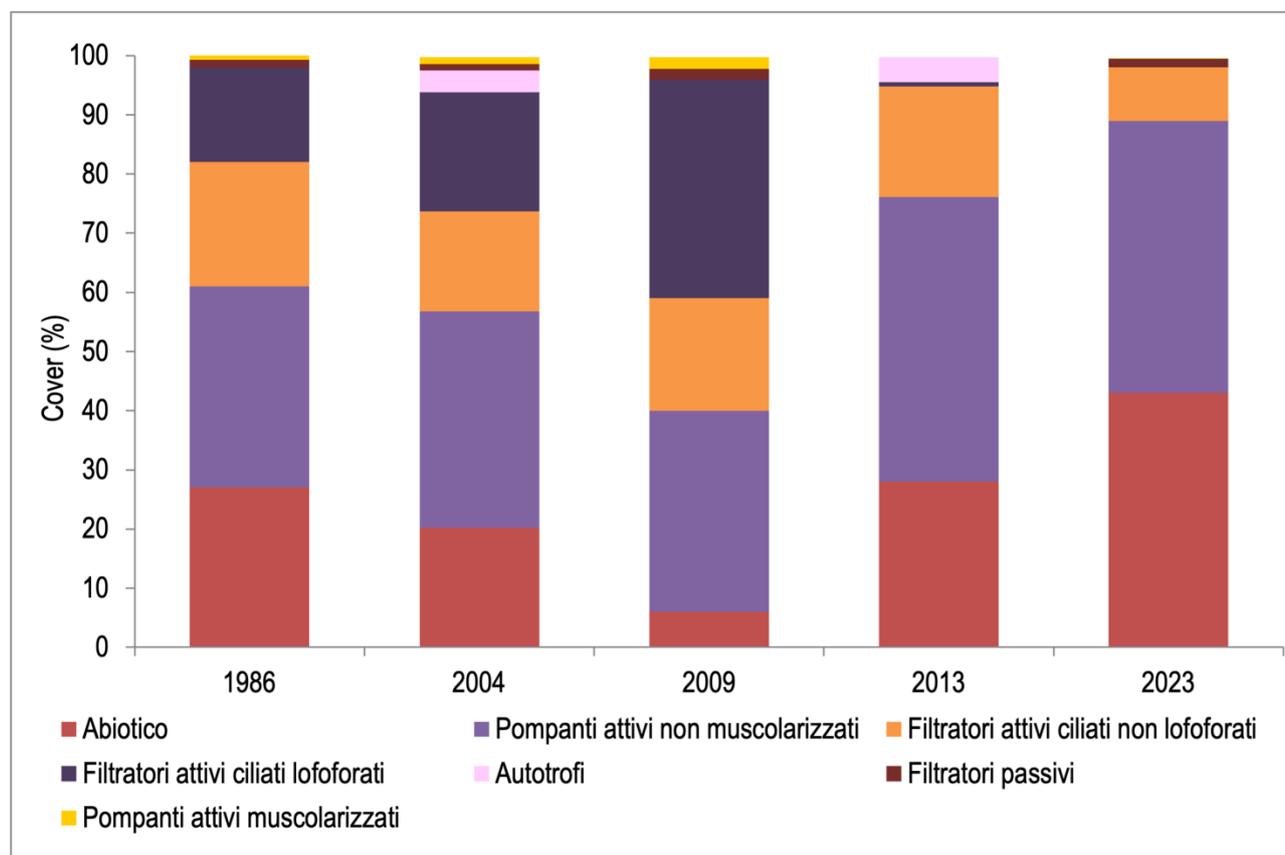
**Figura 21.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “filtratori attivi ciliati non lofoforati” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.



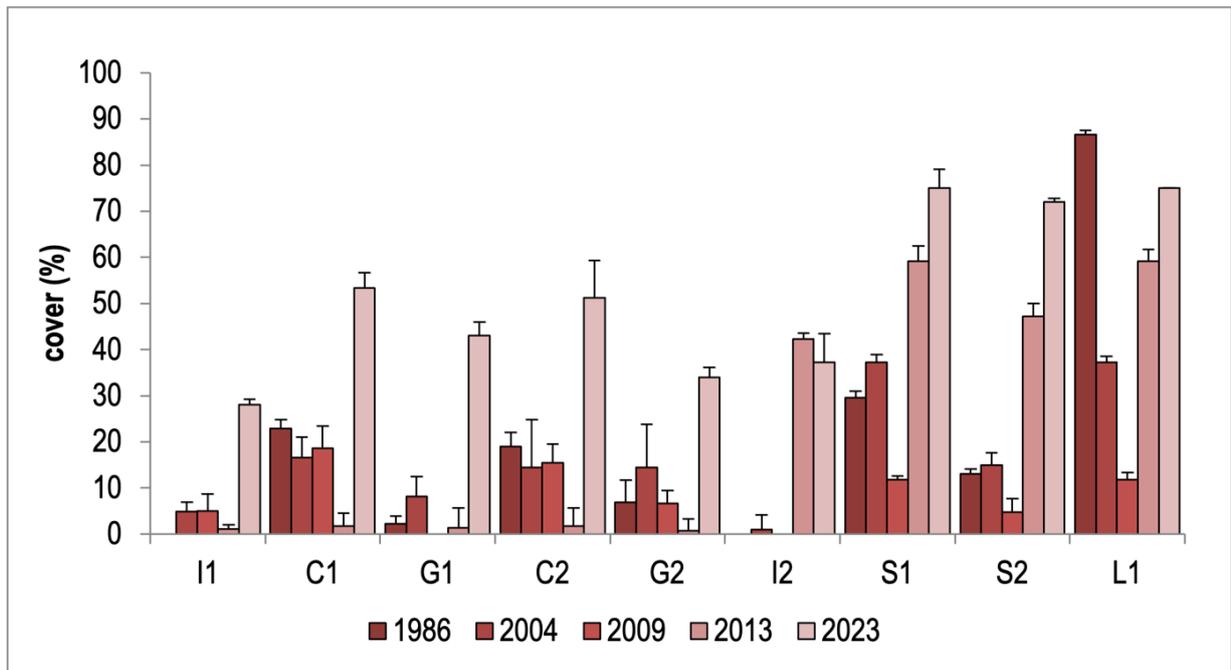
**Figura 22.** Valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “filtratori passivi” nei 10 siti monitorati nella Grotta Marina di Bergeggi.

### 3.2.2. Cambiamento nel tempo

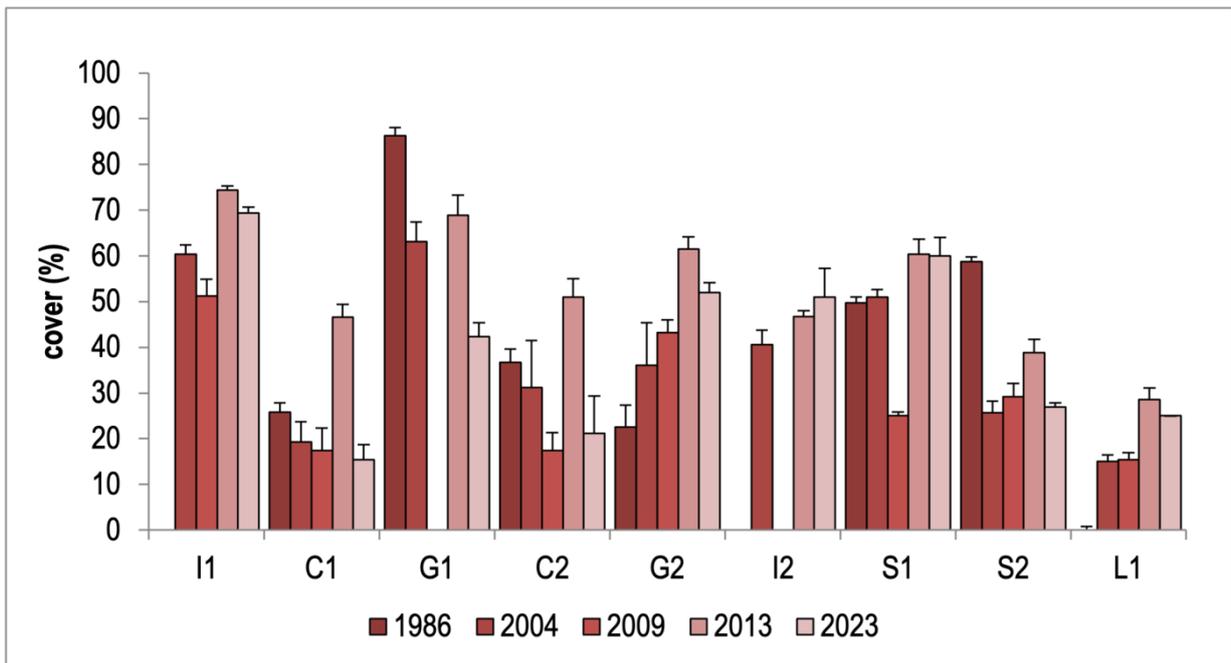
L'analisi del cambiamento nel tempo delle gilde trofiche ha permesso di osservare l'andamento del ricoprimento (%) dei descrittori dal 1986 al 2023 (Fig. 23). Come per le forme di crescita, ovviamente, la componente abiotica si è ridotta dal 1986 al 2009, per poi aumentare nuovamente nel 2013 e ancora nel 2023 (Fig. 23, Fig. 24). La categoria dei pompanti attivi non muscolarizzati è rimasta costante nel tempo (Fig. 23, Fig. 25). Una lieve riduzione è stata, invece, osservata per i filtratori attivi ciliati non lofoforati (Fig. 23, Fig. 25), mentre una drastica diminuzione nel tempo è stata osservata per i filtratori attivi ciliati lofoforati (Fig. 23, Fig. 27).



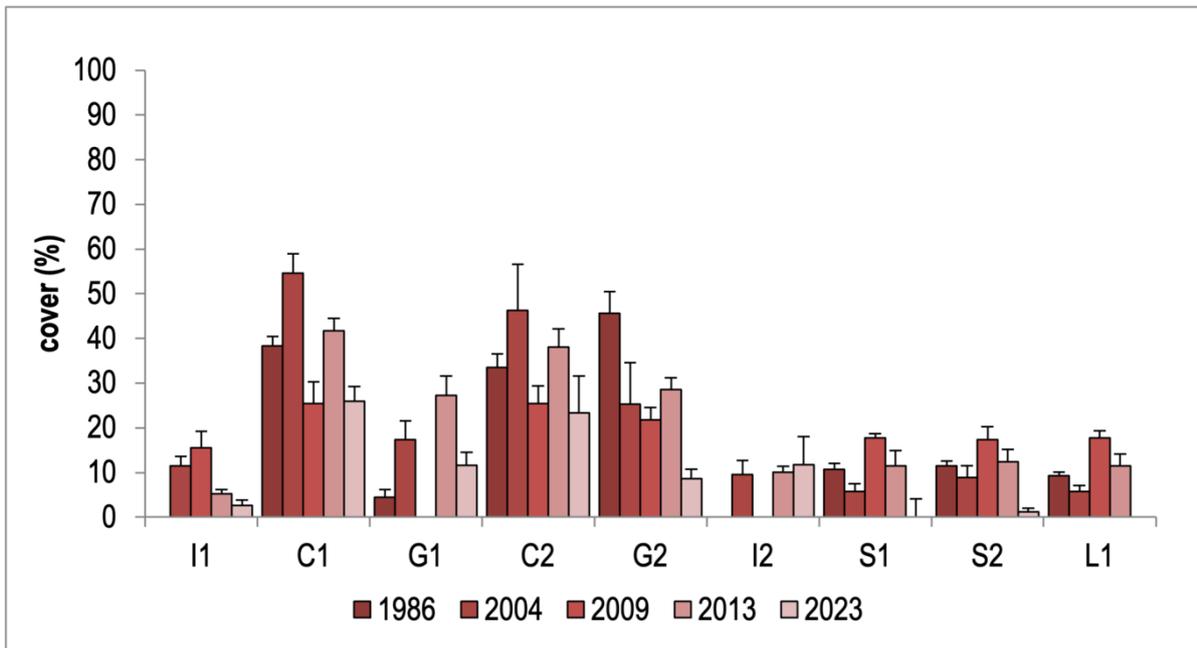
**Figura 23.** Valori medi di ricoprimento delle gilde trofiche nei 5 anni di monitoraggio nella Grotta Marina di Bergeggi.



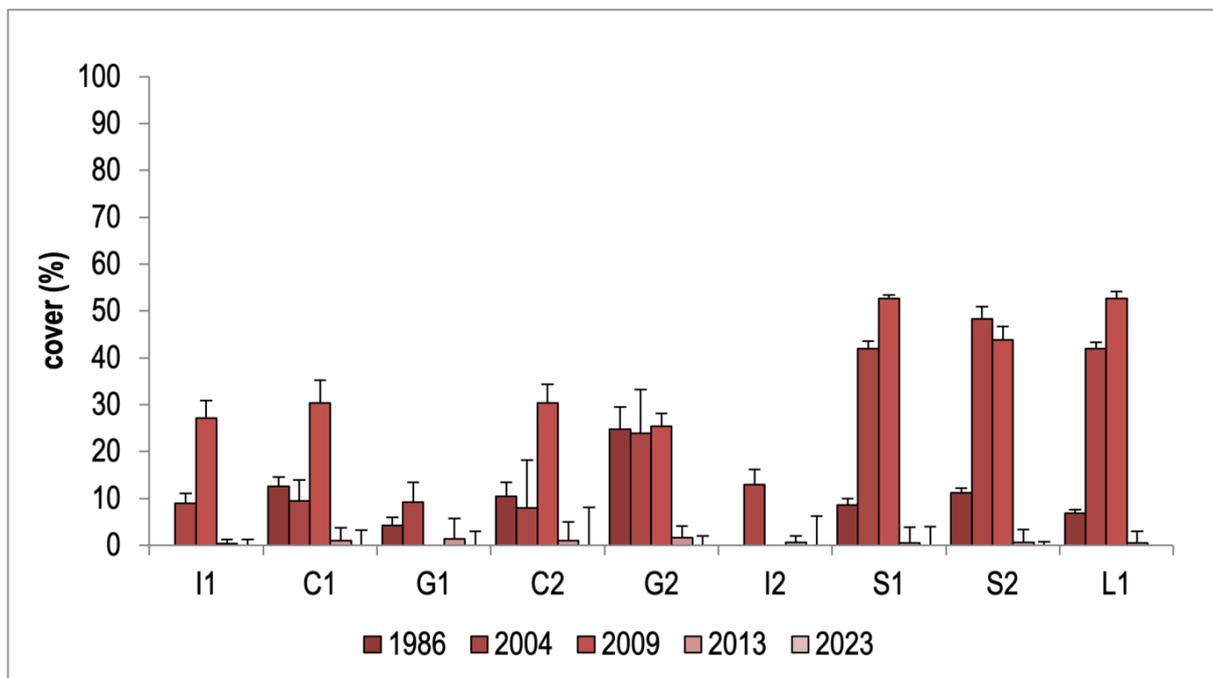
**Figura 24.** Confronto dei valori medi di ricoprimto (+ e.s.) del descrittore “abiotico” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.



**Figura 25.** Confronto dei valori medi di ricoprimto (+ e.s.) del descrittore “pompanti attivi non muscolarizzati” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.



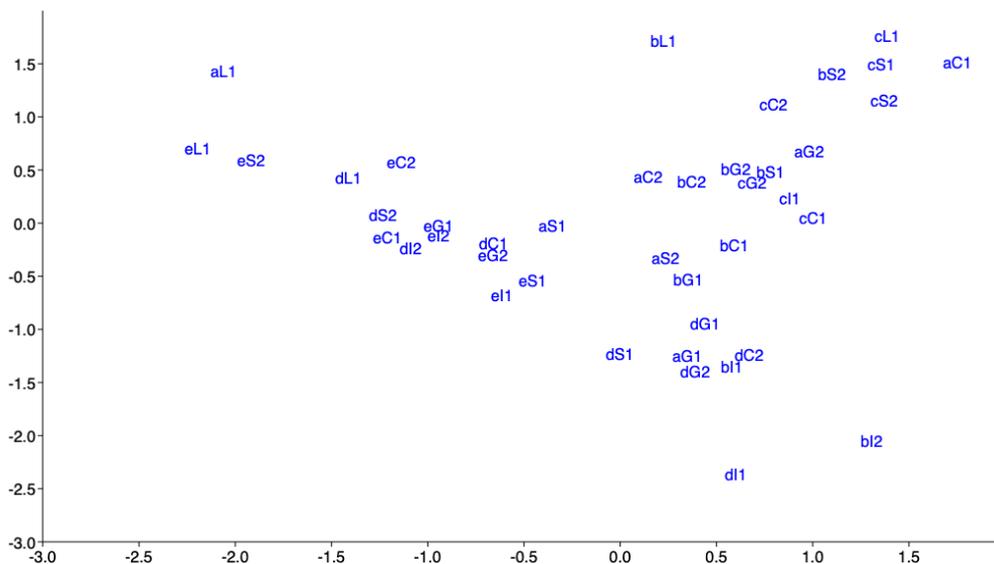
**Figura 26.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “filtratori attivi ciliati non lofoforati” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.



**Figura 27.** Confronto dei valori medi di ricoprimento (+ e.s.) del descrittore “filtratori attivi ciliati lofoforati” nei 10 siti monitorati negli anni 1986, 2004, 2009, 2013, e 2023 nella Grotta Marina di Bergeggi.

Anche per le gilde trofiche l'applicazione della CA non ha evidenziato una netta distinzione delle repliche secondo un gradiente spaziale e nemmeno temporale, sebbene anche in questo caso le repliche del 2023 sembrano discostarsi leggermente da quelle degli anni precedenti (Fig. 28). Anche per le gilde trofiche il risultato della CA è coerente con la PERMANOVA, che ha mostrato un'interazione significativa tra i fattori 'tempo' e 'sito', evidenziando differenze significative tra alcuni siti all'interno della grotta nel tempo (Tab. A3, in Allegato). Osservando le traiettorie temporali (e quindi le distanze) dei punti corrispondenti a ciascun sito della grotta nel tempo, il sito più confinato del Lago dei Limoni (L1) sembra essere quello ad avere subito i maggiori cambiamenti nel tempo dal 1986 al 2009, ma negli ultimi anni (2013 e 2023) i punti nello spazio si stanno riavvicinando alla condizione originaria osservata nel 1986 (Fig. 28).

L'analisi SIMPER ha evidenziato che il descrittore che maggiormente influisce sulle differenze nel tempo è la componente abiotica, seguito dai pompanti attivi non muscolarizzati e dai filtratori attivi ciliati lofoforati e non lofoforati (Tab. A4, in Allegato).



**Figura 28.** Analisi delle corrispondenze (CA) applicata ai dati di ricoprimento (%) delle gilde trofiche rilevate nei siti della Grotta Marina di Bergeggi. Le repliche sono rappresentate tramite codice alfanumerico con il tempo (a: 1986, b: 2004, c: 2009, d: 2013, e: 2023), seguito dal sito (I1: Antro di Remo, C1: Prima Camera, G1: Il Cunicolo 1, C2: Camera delle Luci, G2: Il Cunicolo 2, I2: Ingresso Salone, S1: Il Salone 1, S2: Il Salone 2, e L1: Lago dei Limoni).

## 4. CONCLUSIONI

Con l'obiettivo di definire lo stato della comunità bentonica della Grotta Marina di Bergeggi e analizzare il suo cambiamento nel tempo, nel presente studio sono stati ripercorsi i 10 siti identificati lungo un gradiente interno-esterno all'interno della grotta (in entrambe le porzioni a fondo cieco e a tunnel) e per i quali si disponeva di una serie storica di dati a partire dagli anni '80. I rilevamenti sono stati effettuati utilizzando lo stesso disegno di campionamento e la medesima tecnica applicata in passato, ovvero attraverso un campionamento fotografico, che risulta particolarmente efficace nell'analisi delle comunità bentoniche delle grotte marine (Morri et al., 2003). Quello fotografico è, infatti, un metodo rapido e soprattutto non distruttivo, ideale quindi per lo studio di habitat protetti (Bianchi et al., 2009).

Tramite l'utilizzo dei descrittori ecologici non tassonomici, quali le forme di crescita e le gilde trofiche, è stato possibile caratterizzare la struttura della comunità della Grotta Marina di Bergeggi evidenziandone gli aspetti morfo-funzionali. In particolare, dai risultati è emerso come la forma di crescita più rappresentata in tutti e 10 i siti della grotta sia quella degli incrostanti indeterminati (poriferi e briozoi incrostanti), seguita dagli organismi stoloniali (principalmente serpulidi), dai massivi emisferici (poriferi e madreporari solitari) e dagli incrostanti determinati (spirorbidi). Questo quadro ben rispecchia le generali strutture di comunità delle grotte marine sommerse, dove le forme di crescita dominanti sono gli incrostanti grazie alla loro elevata capacità di occupazione del substrato (McKinney e Jackson, 1989; Harmelin, 1997; Bell e Barnes, 2000; Bell, 2002).

I fattori ambientali che maggiormente incidono sulla struttura e la composizione delle comunità bentoniche di grotta sono, ovviamente, la luce e l'idrodinamismo che creano un gradiente ambientale dall'esterno verso l'interno, con una notevole diminuzione dei valori di ricoprimento degli organismi e con un decremento della ricchezza specifica (Bianchi e Morri, 1994). L'analisi della comunità della Grotta Marina di Bergeggi ha in realtà mostrato come lungo tutto il sistema cavitario non siano state osservate sostanziali differenze nei valori di ricoprimento delle varie forme di crescita. Tuttavia, un gradiente di confinamento è osservabile nella ampia sala muovendosi dall'ingresso (I2) al Salone (S1 e S2) fino al Lago dei Limoni (L1), dove i ricoprimenti biologici tendono a diminuire lungo la porzione della grotta a fondo cieco mentre aumenta il substrato nudo. Nella porzione a tunnel, dall'Antro di Remo (I1) al Cunicolo (C2), i ricoprimenti biologici delle principali forme di crescita tendono a mantenersi più omogenei nello spazio, probabilmente a causa

dell'elevata tortuosità del cunicolo nel quale i gradienti (i.e., luce e idrodinamismo) sono meno marcati (Morri et al., 1994; Bianchi et al., 2009). L'analisi delle gilde trofiche ha mostrato come le categorie più rappresentate in tutti e 10 i siti della grotta siano i filtratori attivi pompanti non muscolarizzati e i filtratori attivi ciliati non lofoforati. Come per le forme di crescita, anche in questo caso si osserva, ovviamente, un gradiente esterno-interno nella componente abiotica, che aumenta muovendosi dall'ingresso dell'ampia sala (I2) fino al Salone (S1 e S2) e poi al Lago dei Limoni (L1). Si osserva di conseguenza una riduzione dei ricoprimenti degli organismi, in particolare dei pompanti attivi non muscolarizzati e dei filtratori attivi ciliati non lofoforati. Questo può essere spiegato dalle insufficienti condizioni di luce e di idrodinamismo all'interno del sistema cavitario a fondo cieco che riducono la penetrazione dei filtratori passivi nelle parti interne e più confinate delle grotte (Balduzzi et al., 1989; Coma et al., 1995).

L'analisi del cambiamento nel tempo tramite il confronto dei dati storici (Bianchi et al., 2009; Parravicini et al., 2010; Montefalcone et al., 2018) ha permesso di esaminare la variabilità temporale della comunità bentonica della Grotta Marina di Bergeggi, evidenziando differenze significative tra la comunità attuale e quella osservata in passato (Parravicini et al., 2009). Sia per le forme di crescita sia per le gilde trofiche i maggiori cambiamenti sono stati osservati tra il 2009 e il 2013. Per quanto riguarda gli aspetti morfologici si è osservato in quegli anni un positivo decremento del descrittore abiotico a favore di un aumento degli organismi incrostanti indeterminati, mentre per quanto riguarda gli aspetti funzionali sono diminuiti gli organismi filtratori attivi ciliati lofoforati. Dal 2013 ad oggi, invece, si è verificato un ulteriore cambiamento dovuto all'aumento della componente abiotica a scapito della componente biotica. In generale, i maggiori cambiamenti sono stati osservati nelle porzioni più interne e confinate della grotta (i.e., Cunicolo 2 e Lago dei Limoni). Questo risultato è differente da quanto osservato per la Grotta Azzurra di Palinuro (Montefalcone et al., 2023) dove i maggiori cambiamenti sono stati invece osservati nei settori più esterni della grotta, mentre le comunità delle zone più interne sono risultate più stabili. La maggiore stabilità delle zone più confinate delle grotte marine può essere spiegata dalla teoria del confinamento (Bianchi et al., 1998), per la quale gli organismi sessili nelle zone più interne e buie di una grotta sono già selezionati ed evolutivamente adattati a vivere in condizioni ambientali estreme. Il diverso andamento nella Grotta Marina di Bergeggi, dove sono le comunità dei settori più interni ad essere cambiate maggiormente, è ascrivibile al fatto che questo habitat è maggiormente impattato dalle numerose pressioni antropiche locali (Montefalcone et al., 2018) rispetto alla Grotta

Azzurra di Palinuro. Benché, infatti, gli ecosistemi di grotta possano presentare una loro naturale evoluzione, le alterazioni osservate nella struttura della comunità della Grotta Marina di Bergeggi sono dovute principalmente all'aumento di sedimentazione, verosimilmente dovuta al progressivo ampliamento dell'area portuale e industriale di Vado Ligure, e soprattutto ai periodici ripascimenti dei litorali della zona (Parravicini, 2006; Montefalcone et al., 2018).

Inoltre, diverse aree della Liguria nel 1999 e nel 2003 sono state colpite da ondate di calore che hanno causato morie di massa di diverse specie bentoniche. Eventi di mortalità di massa locali legati ad anomalie termiche estive sono già stati segnalati in altre grotte marine (Zapata-Ramírez et al., 2016; Digenis et al., 2022; Garrabou et al., 2022). In particolare, tra le specie più colpite risulta la spugna *Petrosia ficiformis* che caratterizza i popolamenti della Grotta Marina di Bergeggi (Montefalcone et al., 2018).

Gli ecosistemi marini costieri sono sempre più soggetti alle pressioni antropiche locali e globali. In questo contesto l'analisi di lunghe serie storiche di dati è fondamentale per la comprensione del cambiamento nel tempo a cui stanno andando incontro gli habitat prioritari. Tuttavia, le serie storiche di dati sono raramente disponibili e quella relativa ai 30 anni di monitoraggi condotti nella Grotta Marina di Bergeggi rappresenta un esempio unico per questo tipo di habitat. Considerando la necessità di implementare la legislazione volta a conservare le grotte marine, il monitoraggio della Grotta Marina di Bergeggi risulta ancora più fondamentale al fine di comprendere sempre meglio la loro evoluzione nel tempo a fronte dei cambiamenti globali in atto.

## BIBLIOGRAFIA

- Balduzzi A., Bianchi C. N., Boero F., Cattaneo-Vietti R., Pansini M., Sarà M., 1989. The suspension-feeder communities of a Mediterranean Sea cave. *Scientia Marina*, 53: 387-395.
- Ballesteros E., Ben Mustapha K., Bitar G., Coma R., Garrabou J., Giaccone G., Harmelin J.-G., Laubier L., Linares C., Ramos A., Tunesi, L., 2008. Action Plan for the Conservation of the Coralligenous and Other Calcareous Bio-concretions in the Mediterranean Sea. Tunis: United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan (UNEP/MAP) – Regional Activity Centre for Specially Protected Areas (RAC/SPA).
- Bell J. J., 2002. The sponge community in a semi-submerged temperate sea cave: density, diversity and richness. *Pubblicazioni della Stazione Zoologica di Napoli: Marine Ecology*, 23: 297-311.
- Bell J. J., Barnes R. S. K., 2000. The influence of bathymetry and flow regime upon morphology of sublittoral sponge communities. *Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom*, 80: 707-718.
- Bianchi C. N., Cervasco M. G., Diviacco G., Morri C., 1988. Primi risultati di una ricerca ecologica sulla Grotta Marina di Bergeggi (Savona). *Bollettino dei Musei e degli Istituti Biologici dell'Università di Genova*, suppl. 52 (1986): 267-293.
- Bianchi C.N., Montefalcone M., Morri C., Parravicini V., (2009). Contratto di ricerca relativo al monitoraggio della Grotta Marina e delle biocenosi infralitorali di scogliera dell'Area Marina Protetta "Isola di Bergeggi". Relazione tecnica.
- Bianchi C. N., Morri C., 1985. I Policheti come descrittori della struttura trofica degli ecosistemi marini. *Oebalia*, 11, n. s.: 203-214.
- Bianchi C. N., Morri C., 1994. Studio bionomico comparativo di alcune grotte marine sommerse: definizione di una scala di confinamento. *Memorie dell'Istituto italiano di Speleologia*, ser. II, 6: 107-123.
- Bianchi C. N., Morri C., 2000. Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin*, 40 (5): 367-376.

- Cicogna F., Bianchi C. N., Ferrari G., Forti P. (a cura di), 2003. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Roma.
- Cocito S., Fanucci S., Niccolai I., Morri C., Bianchi C. N., 1990. Relationships between trophic organization of benthic communities and organic matter content in Tyrrhenian Sea sediments. *Hydrobiologia*, 207: 53-60.
- Cocito S., Sgorbini S., Bianchi C. N., 1997. Zonation of a suspension-feeder assemblage on a temperate rocky shoal: the influence of water current and bottom topography. In: *The response of marine organisms to their environments* (a cura di L. E. Hawkins & S. Hutchinson). University of Southampton, UK: 183-192.
- Coma R., Gili J. M., Zabala M., 1995. Trophic ecology of a benthic marine hydroid *Campanularia everta*. *Marine Ecology Progress Series*, 119: 211-220.
- Connel J. H., Keough M. J., 1985. Disturbance and patch dynamics of subtidal marine animals on hard substrata. In: *The ecology of natural disturbance and patch dynamics* (a cura di S. T. A. Pickett & P. S. White). Academic Press, San Diego: 1-472.
- Digenis, M., Arvanitidis, C., Dailianis, T., Gerovasileiou, V., 2022. Comparative study of marine cave communities in a protected area of the South-Eastern Aegean Sea, Greece. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10 (5): 660.
- Donato M., 2006. Variabilità spazio-temporale dei popolamenti sessili della Grotta Marina di Bergoggi (SV) attraverso descrittori morfofunzionali. Tesi di Laurea in Scienze Ambientali Marine, Università di Genova.
- Gambi M. C., Giangrande A., 1985. Caratterizzazione e distribuzione delle categorie trofiche dei policheti nei fondi mobili del golfo di Salerno. *Oebalia*, 11: 223-240.
- Garrabou, J., Gómez-Gras, D., Medrano, A., Cerrano, C., Ponti, M., Schlegel, R., Bensoussan, N., Turicchia, E., Sini, M., Gerovasileiou, V., Teixido, N., Mirasole, A., Tamburello, L., Cebrian, E., Rilov, G., Ledoux, J.B., Ben Souissi, J., Khamassi, F., Ghanem, R., Benabdi, M., Grimes, S., Ocaña, O., Bazairi, H., Hereu, B., Linares, C., Kersting, D.K., Rovira, G., Ortega, J., Casals, D., Pagès-Escalà, M., Margarit, N., Capdevila, P., Verdura, J., Ramos, A., Izquierdo, A., Barbera, C., Rubio-Portillo, E., Anton, I., López-Sendino, P., Díaz, D., Vázquez-Luis, M., Duarte, C., Marbà, N., Aspillaga, E., Espinosa, F., Grech, D., Guala, I., Azzurro, E., Farina, S., Gambi, M.C.,

Chimienti, G., Montefalcone, M., Azzola, A., Pulido Mantas, T., Frascchetti, S., Ceccherelli, G., Kipson, S., Bakran-Petricioli, T., Petricioli, D., Jimenez, C., Katsanevakis, S., Tuney Kizilkaya, I., Kizilkaya, Z., Sartoretto, S., Rouanet, E., Ruitton, S., Comeau, S., Gattuso, J., Harmelin, J.G., 2022. Marine heatwaves drive recurrent mass mortalities in the Mediterranean Sea. *Global Change Biol.* 28 (19), 5708–5725.

Gerovasileiou V., Bianchi C.N., 2021. Mediterranean marine caves: A synthesis of current knowledge. *Oceanography and Marine Biology An Annual Review*, 59: 1-88.

Gerovasileiou V., Chintiroglou C., Vafidis D., Koutsoubas D., Sini M., Dailianis T., Issaris Y., Akritopoulou E., Dimarchopoulou D., Voultziadou E., 2015. Census of biodiversity in marine caves of the Eastern Mediterranean Sea. *Mediterranean Marine Science*, 16: 245–265.

Harmelin J. G., 1997. Diversity of Bryozoans in a Mediterranean sublittoral cave with bathyal-like conditions: role of dispersal processes and local factors. *Marine Ecology Progress Series*, 153: 139-152.

Harmelin J.G., Vacelet J., Vasseur P., 1985. Les grottes sous-marines obscures: Un milieu extrême et un remarquable biotope refuge. *Téthys*, 11: 214–229.

Jackson J. B. C., 1979. Morphological strategies of sessile animals. In: *Biology and systematic of colonial organisms* (a cura di G. Larwood & B. R. Rosen). Academic Press, London: 499-555.

McKinney F. K., Jackson J. B. C., 1989. *Bryozoan evolution*. Unwin Hyman, Boston, MA.

Montefalcone M., De Falco G., Nepote E., Canessa M., Bertolino M., Bavestrello G., Bianchi C.N., 2018. Thirty year ecosystem trajectories in a submerged marine cave under changing pressure regime. *Marine Environmental Research*, 137: 98-110.

Montefalcone M., Ferraro V., Barbieri F., Morri C., Bianchi C.N., 2023. Ecological gradients in a marine cave revisited 26 years after. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293: 108517.

Montefalcone M., Parravicini V., Morri C., Bianchi C. N., 2009. Monitoraggio della Grotta Marina e delle biocenosi infralitorali di scogliera dell'Area Marina Protetta "Isola di Bergeggi" (D.M. 7 maggio 2007). Relazione intermedia. Resoconto delle attività di campo. Area Marina Protetta "Isola di Bergeggi", Bergeggi.

- Morri C., Bianchi C. N., Degl'Innocenti F., Diviacco G., Forti S., Maccarone M., Niccolai I., Sgorbini S., Tucci S., 1994. Gradienti fisico-chimici e ricoprimento biologico nella Grotta Marina di Bergeggi (Mar Ligure). *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, Bologna, 6 (II serie): 85-94.
- Morri C., Bussotti S., Guidetti P., Bianchi C. N., 2003. Tecniche di campionamento e misura. In: *Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia* (a cura di F. Cicogna, C. N. Bianchi, G. Ferrari e P. Forti). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, Roma: 337-345.
- Parravicini V., 2006. *Bionomia e cartografia dell'AMP "Isola di Bergeggi" (Mar Ligure)*. Tesi di Laurea Specialistica in Scienze Ambientali Marine, Curriculum Risorse Biologiche Marine, Università di Genova.
- Parravicini V., Guidetti P., Morri C., Montefalcone M., Donato M., Bianchi C. N. 2009. Consequences of sea water temperature anomalies on a Mediterranean submarine cave ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, in stampa.
- Parravicini V., Guidetti P., Morri C., Montefalcone M., Donato M., Bianchi C.N., 2010. Consequences of sea water temperature anomalies on a Mediterranean submarine cave ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 86(2): 276-282.
- Pergent G., Aguilar R., Ballesteros E., Bazairi H., Bianchi C.N., Bitar G., Borg J., Chevaldonné P., Daniel B., Gerovasileiou V. Harmelin J.-G., Mastrototaro F., Ouerghi A, Perez T., Pergent-Martini C., Sartoretto S., Schembri P., Tilot V., Tunesi L., Vacelet J., 2015. Action Plan for the Conservation of Habitat and Species Associated with Seamounts, Underwater Caves and Canyons, Aphotic Hard Beds and Chemo-synthetic Phenomena in the Mediterranean Sea. Dark Habitats Action Plan. Tunis: United Nations Environment Programme / Mediterranean Action Plan (UNEP/MAP) – Regional Activity Centre for Specially Protected Areas (RAC/SPA).
- Riedl R., 1966. *Biologie der Meereshöhlen*. Paul Parey, Berlin.
- Sgorbini S., Bianchi C. N., Degl'Innocenti F., Diviacco G., Forti S., Morri C., Niccolai I., 1988. Méthodologie d'une étude hydrobiologique dans la grotte marine de Bergeggi (Mer Ligure). *Rapports et procès-verbaux des Réunions de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, 31 (2): 119.

Sgorbini S., Cocito S., Bianchi C. N., 1996. Underwater photography as a tool to monitor the population dynamics of a clonal organism. *Atti dell'Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia*, 11: 819-826.

Zapata-Ramírez, P.A., Huete-Stauffer, C., Scaradozzi, D., Marconi, M., Cerrano, C., 2016. Testing methods to support management decisions in coralligenous and cave environments. A case study at Portofino. *Marine Environmental Research*, 118: 45–56.

## ALLEGATO

**Tabella A1.** Risultati della PERMANOVA applicata ai dati di ricoprimento (%) delle forme di crescita rilevate nella Grotta Marina di Bergeggi.

PERMANOVA					
Source	Ss	df	Ms	F	p
Anno	64541,9	4	16135	26,203	0,0001
Sito	151367	9	16819	27,312	0,0001
Interazione	72403,4	36	2011,2	3,2661	0,0001
Errore	104684	170	615,79		
Totale	3,93E+05	219			

**Tabella A2.** Risultati della SIMPER applicata ai dati di ricoprimento (%) delle forme di crescita rilevate nella Grotta Marina di Bergeggi.

Taxon	Av. dissim	Contrib. %	Cumul. %	Mean 1986	Mean 2004
Incrostanti indeterminati	13	31	31	43	54
Abiotico	12	30	61	26	22
Rampicanti	6	14	76	12	7
Stoloniali	2	6	82	9	7
Massivi cupoliformi	2	4	86	3	1
Massivi appiattivi	2	4	90	3	0
Incrostanti determinati	1	2	92	2	3
Laminari prostrati	1	2	94	0	1
Cilindrici prostrati	1	2	96	0	1
Laminari eretti	1	2	98	0	1
Massivi emisferici	0	1	99	1	1
Arborescenti	0	1	100	0	0
Perforatori	0	0	100	0	0

Taxon	Av. dissim	Contrib. %	Cumul. %	Mean 2004	Mean 2009
Incrostanti indeterminati	11	34	34	54	70
Abiotico	9	27	61	22	8
Rampicanti	3	11	71	7	1
Incrostanti determinati	3	8	80	3	8
Stoloniali	2	7	87	7	9
Cilindrici prostrati	1	3	90	1	1
Laminari eretti	1	2	92	1	0
Laminari prostrati	1	2	94	1	0

Massivi emisferici	1	2	97	1	2
Massivi cupoliformi	1	2	98	1	0
Arborescenti	0	1	99	0	0
Massivi appiattivi	0	1	99	0	0
Perforatori	0	1	100	0	0

<b>Taxon</b>	<b>Av. dissim</b>	<b>Contrib. %</b>	<b>Cumul. %</b>	<b>Mean 2009</b>	<b>Mean 2013</b>
Incrostanti indeterminati	11	35	35	70	50
Abiotico	10	33	69	8	23
Stoloniali	3	9	77	9	9
Incrostanti determinati	2	7	85	8	9
Arborescenti	1	4	89	0	3
Cilindrici prostrati	1	3	91	1	1
Massivi appiattivi	1	2	94	0	2
Rampicanti	1	2	96	1	0
Massivi emisferici	1	2	98	2	1
Massivi cupoliformi	1	2	100	0	1
Laminari prostrati	0	0	100	0	0
Laminari eretti	0	0	100	0	0
Perforatori	0	0	100	0	0

<b>Taxon</b>	<b>Av. dissim</b>	<b>Contrib. %</b>	<b>Cumul. %</b>	<b>Mean 2013</b>	<b>Mean 2023</b>
Abiotico	13	34	34	23	40
Incrostanti indeterminati	11	28	62	50	36
Incrostanti determinati	4	9	71	9	3
Stoloniali	3	9	80	9	9
Massivi emisferici	2	6	86	1	6
Cilindrici prostrati	2	6	92	1	4
Arborescenti	1	3	95	3	0
Massivi appiattivi	1	3	98	2	2
Massivi cupoliformi	1	1	99	1	0
Rampicanti	0	1	100	0	0
Laminari prostrati	0	0	100	0	0
Laminari eretti	0	0	100	0	0
Perforatori	0	0	100	0	0

**Tabella A3.** Risultati della PERMANOVA applicati ai dati di ricoprimento (%) delle gilde trofiche rilevate nella Grotta Marina di Bergeggi.

PERMANOVA					
Source	Ss	df	Ms	F	p
Anno	170204	4	42551	84,134	0,0001
Siti	141420	13	10878	21,509	0,0001
Interazione	384003	52	7384,7	14,601	0,0001
Errore	91035,6	180	505,75		
Totale	7,87E+05	249			

**Tabella A4.** Risultati della SIMPER ai dati di ricoprimento (%) delle gilde trofiche rilevate nella Grotta Marina di Bergeggi.

Taxon	Av. dissim	Contrib. %	Cumul. %	Mean 1986	Mean 2004
Abiotico	16	30	30	32	20
Pompanti attivi non muscolarizzati	16	30	60	33	37
Filtratori attivi ciliati lofoforati	9	17	77	15	20
Filtratori attivi ciliati non lofoforati	8	16	93	19	17
Autotrofi	2	4	96	0	4
Filtratori passivi	1	2	98	1	1
Pompanti attivi muscolarizzati	1	2	100	1	1
Filtratori misti	0	0	100	0	0

Taxon	Av. dissim	Contrib. %	Cumul. %	Mean 2004	Mean 2009
Abiotico	13	29	29	37	34
Pompanti attivi non muscolarizzati	12	27	56	20	36
Filtratori attivi ciliati lofoforati	9	20	76	20	8
Filtratori attivi ciliati non lofoforati	7	14	91	17	18
Autotrofi	2	4	95	4	0
Filtratori passivi	1	3	97	1	2
Pompanti attivi muscolarizzati	1	2	100	1	2
Filtratori misti	0	0	100	0	0

Taxon	Av. dissim	Contrib. %	Cumul. %	Mean 2009	Mean 2013
Abiotico	18	33	33	36	1
Pompanti attivi non muscolarizzati	14	26	58	34	48
Filtratori attivi ciliati lofoforati	13	24	83	8	28
Filtratori attivi ciliati non lofoforati	5	10	92	18	19
Autotrofi	2	4	96	0	4
Filtratori passivi	1	2	98	2	0
Pompanti attivi muscolarizzati	1	2	100	2	0

Filtratori misti	0	0	100	0	0
------------------	---	---	-----	---	---

<b>Taxon</b>	<b>Av. dissim</b>	<b>Contrib. %</b>	<b>Cumul. %</b>	<b>Mean 2013</b>	<b>Mean 2023</b>
Abiotico	17	41	41	28	46
Pompanti attivi non muscolarizzati	13	32	74	48	44
Filtratori attivi ciliati lofoforati	7	18	91	19	9
Filtratori attivi ciliati non lofoforati	2	5	97	4	0
Autotrofi	1	2	99	0	1
Filtratori passivi	0	1	100	1	0
Pompanti attivi muscolarizzati	0	0	100	0	0
Filtratori misti	0	0	100	0	0