



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI GENOVA

**DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA,
DELL'AMBIENTE E DELLA VITA**

**CORSO DI LAUREA IN BIOLOGIA ED ECOLOGIA MARINA
(Classe LM-6)**

**INFLUENZA DEL GRADIENTE DI LUCE SUI
POPOLAMENTI SESSILI DELLA GROTTA AZZURRA DI
CAPO PALINURO: CONFRONTO A DISTANZA DI 26 ANNI**

Relatore:

Monica Montefalcone

Correlatore:

Carlo Nike Bianchi

Candidata:

Valentina Ferraro

ANNO ACCADEMICO 2020-2021

*A chi mi ha sopportato in silenzio.
A chi non mi ha dato sempre ragione.
A chi ho ingiustamente trattato male.
A chi mi ha sempre voluto bene.
A chi ha imparato a volermene.
A chi a volte se ne è dimenticato.
A chi, nonostante tutto, me ne vorrà.*

INDICE

RIASSUNTO	1
ABSTRACT	2
LE GROTTI MARINE.....	3
DEFINIZIONE E GENESI	3
ASPETTI EVOLUZIONISTICI.....	6
DISTRIBUZIONE ED IMPORTANZA	9
FATTORI AMBIENTALI	10
ZONAZIONE BIOLOGICA	12
CONFINAMENTO	17
COMPOSIZIONE FLORO-FAUNISTICA.....	18
ORGANIZZAZIONE TROFICA	19
MINACCE.....	20
DESCRITTORI NON TASSONOMICI.....	22
FORME DI CRESCITA.....	22
GILDE TROFICHE.....	25
SCOPO DELLA TESI	28
MATERIALI E METODI.....	30
AREA DI STUDIO: CAPO PALINURO.....	30
GROTTA AZZURRA: DESCRIZIONE GENERALE	32
RILEVAMENTO SUBACQUEO.....	40
ANALISI DELLE IMMAGINI: RICOPRIMENTO PERCENTUALE	43
CLASSIFICAZIONE DELLE FORME DI CRESCITA	46
CLASSIFICAZIONE DELLE GILDE TROFICHE	49
DISEGNO DI CAMPIONAMENTO E ANALISI STATISTICA DEI DATI.....	51
RISULTATI.....	55
FORME DI CRESCITA.....	55
GILDE TROFICHE.....	65
CONCLUSIONI	75
BIBLIOGRAFIA	78
RINGRAZIAMENTI	88

RIASSUNTO

Le grotte marine sono habitat unici ed estremamente vulnerabili, che mostrano un'elevata biodiversità ed eterogeneità, spesso minacciati da molteplici pressioni globali e locali. Le grotte marine, sebbene ampiamente distribuite lungo le coste del Mediterraneo, soffrono della mancanza di informazione quantitativa sulla loro struttura e sulla composizione delle comunità che ne ostacola una corretta gestione e conservazione. Grazie alla disponibilità di una serie di fotografie raccolte a distanza di 26 anni (1992 e 2018), ho valutato il cambiamento nel tempo e la distribuzione, in funzione del gradiente di luce esterno-interno, delle comunità bentoniche nella grotta Azzurra di Capo Palinuro (Mar Tirreno, Mediterraneo occidentale). Per descrivere la struttura e la composizione delle comunità, sono stati adottati descrittori non tassonomici, ovvero forme di crescita e gilde trofiche, che forniscono informazioni rispettivamente sulla struttura e sul funzionamento dell'ecosistema. I dati di copertura percentuale dei descrittori non tassonomici sono stati analizzati mediante tecniche multivariate e univariate per valutare le differenze nel tempo. Nel corso degli anni, si è assistito a un mantenimento dell'organizzazione trofica mentre si è osservato un cambiamento nell'organizzazione spaziale dei popolamenti della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Tale cambiamento è dovuto principalmente alla riduzione della copertura degli organismi con forma di crescita tridimensionale, accompagnato da un aumento delle forme bidimensionali (incrostanti), provocando così l'omogeneizzazione strutturale della comunità di grotta. Essendo le pressioni antropiche locali molto limitate in quest'area, tali cambiamenti sono verosimilmente dovuti al riscaldamento globale che ha causato un graduale ma continuo aumento delle temperature superficiali delle acque negli ultimi trent'anni. È quindi urgentemente necessario monitorare lo stato delle comunità delle grotte marine, utilizzando indicatori efficaci come i tratti biologici qui adottati (morfologia e strategia alimentare), che potrebbero fornire strumenti adatti per aiutare la gestione e la conservazione delle grotte marine.

ABSTRACT

Underwater marine caves are unique and vulnerable habitats that show high biodiversity and heterogeneity, which are often threatened by multiple global and local pressures. Marine caves, although widely distributed along the coasts of the Mediterranean, suffer from the lack of quantitative information on the structure and functioning of benthic communities, which hinder the evaluation and conservation of their state. Thanks to the availability of a series of photographs collected in the last 26 years (1992 and 2018), I assessed the change over time and the distribution, as a function of the external-internal light gradient, in the benthic communities of the Grotta Azzurra of Capo Palinuro (Tyrrhenian Sea, western Mediterranean). Non-taxonomic descriptors have been adopted, namely growth forms and trophic guilds, which provide information on the structure and functioning of the ecosystem, respectively. Percentage cover data of growth forms and trophic guilds were analyzed using multivariate and univariate statistical techniques. Over the years, the trophic organization was maintained but changes in the spatial organization of benthic assemblages of the cave were observed. These changes were mainly due to the decrease in the cover of the three-dimensional forms, accompanied by an increase in the two-dimensional forms (i.e., encrusting), thus causing the structural homogenization of the cave community. Being local pressures reduced in this area, observed changes are likely to be due to global warming that caused increased sea surface water temperatures in the last 30 years. There is an urgent need to monitoring the status of cave ecosystems, using effective indicators such as the biological traits here adopted (morphology and food strategy), which could provide effective tools to help the management and the conservation of marine caves.

LE GROTTI MARINE

Definizione e genesi

Con il termine “grotta” s’intende: una cavità di varia origine, in tutto o in parte occupata dal mare, accessibile all’uomo. Per essere definita tale, deve presentare sviluppo orizzontale e volumetrico significativi: un possibile criterio prevede che il rapporto tra i numeri che esprimono il volume totale (m^3) e l’area dell’ingresso (m^2) debba essere superiore a 1, e che la larghezza dell’ingresso non debba superare quella media interna (Bianchi et al., 1996).

Per un geologo: "una grotta marina è una cavità naturale, di dimensioni tali da permetterne l’esplorazione diretta da parte dell’uomo, che si apra attualmente, o si sia aperta in passato, a livello del mare o al di sotto di esso". Questa definizione permette di comprendere tutte le grotte marine, anche quelle che si sono sviluppate in un contesto ambientale assolutamente differente da quello attuale e si trovano magari oggi in cima ad una montagna.

In genere, le grotte vengono classificate in base all’agente naturale che le ha create e ciò, permette di distinguerle in grotte: tettoniche, carsiche, eoliche, marine, meteoriche e glaciali fra quelle d’origine secondaria, dovute cioè a fenomeni distruttivi (fratture, dislocazioni, erosioni, disfacimento e soluzioni), e grotte magmatiche e di scolamento lavico fra quelle d’origine primaria, legate cioè a fenomeni costruttivi.

Per quanto riguarda la genesi e l’evoluzione delle grotte marine è necessario tener conto di quanto possano aver influito le variazioni del livello del mare nel corso del tempo in seguito allo scioglimento dei ghiacci accumulatisi nelle calotte glaciali durante le glaciazioni.

È possibile individuare due categorie principali di grotte marine (FIGURA 1):

- Grotte di ingressione marina;
- Grotte marine in sensu stricto.

Al primo raggruppamento appartengono tutte quelle cavità in cui la presenza delle acque marine è il risultato di un ingresso, di quest’ultime, in una fase successiva alla formazione della cavità stessa; il mare non riveste quindi alcun ruolo nel processo di formazione di queste grotte, rappresentando al contrario un elemento di “fossilizzazione” dell’evoluzione della grotta e impedendone un ulteriore sviluppo. Le modalità di formazione delle grotte di ingressione marina possono essere molto diverse. L’elemento creatore può essere di volta in volta il vento (grotte eoliche), i movimenti tettonici con conseguenti spaccature e crolli nelle rocce (grotte tettoniche), fenomeni di natura vulcanica (grotte vulcaniche, a loro volta suddivisibili in tubi

di lava e cavità nei basalti colonnari). Un'attenzione particolare meritano le grotte carsiche, in cui responsabili della formazione della cavità sono le acque di origine meteorica che riescono, in tempi piuttosto lunghi, a sciogliere ed erodere le rocce carbonatiche nelle quali scorrono.

Le grotte carsiche rappresentano oltre l'80 % delle grotte marine attuali (Forti, 2003). Oltre ad essere le più estese tra tutte le grotte marine presentano un ulteriore punto di interesse negli speleotemi che testimoniano di un passato emerso e le rendono preziose, oltre che da un punto di vista scientifico, anche come importanti attrazioni turistiche.

A livello mondiale, il più famoso esempio di grotte continentali invase dalle acque marine è sicuramente fornito dai "buchi blu" delle Bahamas (Gascoyne et al., 1979); comunque anche lungo le coste italiane sono molto comuni gli esempi di grotte di ingressione marina, che possono essere incontrate fino a oltre 70 metri di profondità (Forti, 2003).

Le grotte marine in *sensu stricto* comprendono, invece, cavità il cui sviluppo è stato influenzato, per una parte preponderante se non addirittura totale, dalla presenza del mare sia in maniera passiva (semplice presenza) sia attiva (tramite azioni fisiche e/o chimiche). Il mare può in questi casi agire per semplice azione meccanica, come nel caso delle grotte da erosione dovute al moto ondoso lungo la linea di costa; può, miscelandosi con acque dolci di origine meteorica o a diversa salinità, determinare un'erosione di natura chimica dando origine alle cosiddette grotte di miscela; o può semplicemente essere il luogo in cui avvengono i processi di formazione della cavità: è questo il caso delle grotte biogeniche, legate all'azione di organismi biocostruttori (ad esempio le madrepora dei reef tropicali) o biodemolitori.

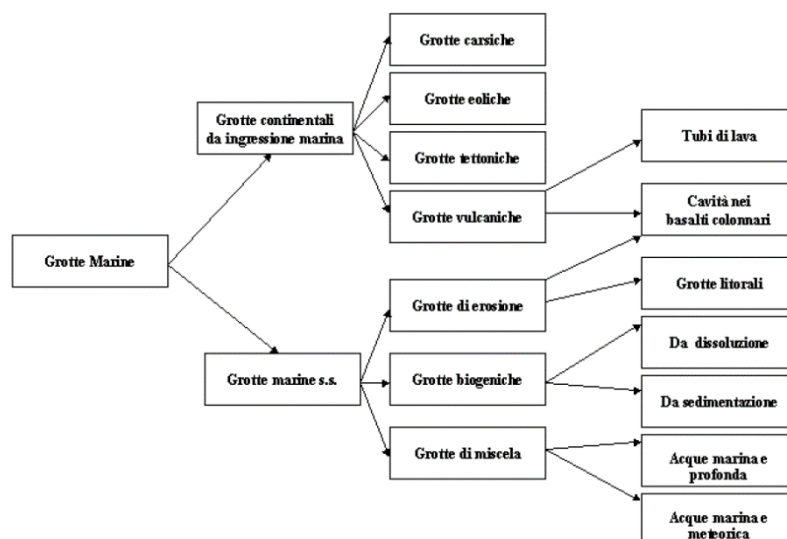


Figura 1: Classificazione delle grotte marine (da Forti, 2003).

Analizzando l'aspetto strutturale delle cavità di una grotta marina in relazione al livello marino è possibile suddividere tre principali tipologie (Cattaneo & Pastorino, 1974):

- Grotte adlitorali e sopralitorali;
- Grotte mesolitorali;
- Grotte infralitorali e circalitorali.

Le prime non sono a contatto diretto con il mare la cui influenza è limitata a eventi occasionali come le mareggiate. Le grotte mesolitorali sono situate al livello del mare e presentano una zona più o meno ampia completamente sommersa. Le grotte infralitorali e circalitorali sono le grotte subacquee vere e proprie: solitamente presentano una o più aperture sommerse e possono presentare diramazioni che in alcuni casi giungono oltre il livello del mare a presentare una parte subaerea.

Le grotte marine sono costituite da tre zone principali: l'esterno, l'ingresso e l'interno. Quest'ultimo, che costituisce di solito la zona più ampia e caratteristica, è costituito da diversi ambienti come il tetto, le pareti e il pavimento (FIGURA 2).

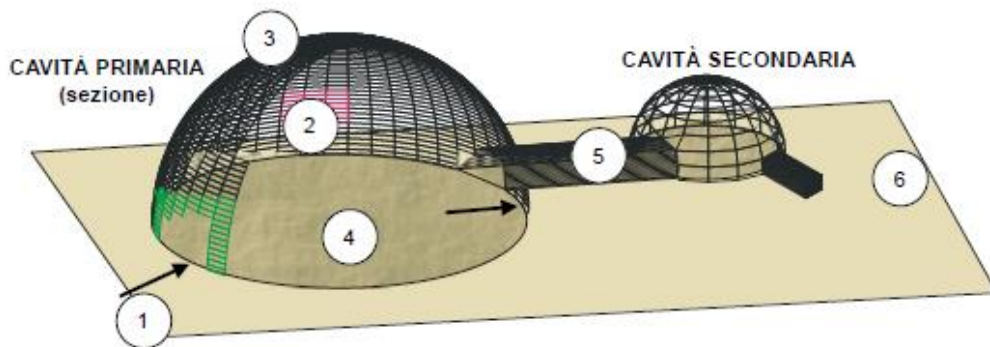


Figura 2: Schematizzazione della grotta tipo (1_ entrata; 2_ parete; 3_ tetto; 4_ pavimento; 5_ tunnel; 6_ diramazione secondaria a fondo cieco).

Aspetti evuzionistici

A differenza delle grotte terrestri, che sono conosciute ed esplorate dall'uomo da molti secoli, lo studio delle grotte marine è strettamente legato all'evoluzione della tecnica dell'immersione subacquea autonoma che inizia ad affermarsi, in campo scientifico, nel secondo dopoguerra. La storia dell'immersione nelle grotte marine in Italia ricalca, con qualche priorità, quella nel resto del mondo e, parallelamente, iniziano gli studi strettamente biologici. In Mediterraneo, i primi studi sulla biologia delle grotte sommerse si devono alla scuola francese di Marsiglia (Drach, 1948; Peres & Picard, 1949; Laborel & Vacelet, 1958; 1959; Corroy et al., 1958; Vasseur, 1964; Vacelet, 1964; 1967) che conduce alla formalizzazione delle cenosi presenti, definite successivamente biocenosi delle grotte semi-oscuere (GSO) e delle grotte oscure (GO) da Peres & Picard (1964).

Si sviluppano, naturalmente, studi di sistematica e faunistica non solo per addivenire ad una conoscenza tassonomica di quest'ambiente, ma anche per risolvere alcuni quesiti d'interesse generale, come la possibile colonizzazione di questo ambiente da parte degli organismi.

Tra i fenomeni più accreditati, che spiegano come possa essere avvenuta la colonizzazione delle grotte, vi è la "troglobiosi secondaria" definita tale da Cattaneo & Pastorino (1974): essa è dovuta ad una "risalita" di specie pre-adattate/profonde, certamente legata all'ampia possibilità di movimento verticale delle forme larvali o degli adulti, che in grotta vengono a trovare condizioni ambientali, per certi aspetti, paragonabili all'ambiente batiale (anche se fattori importanti quali temperatura, disponibilità di nutrimento ed idrodinamismo possono essere molto diversi) (FIGURA 3). È il caso di *Plesionika narwal*, un gambero ad affinità batiale che costituisce in grotta densi popolamenti, o di diverse specie d'antozoi e serpulidi (Zibrowius, 1971).

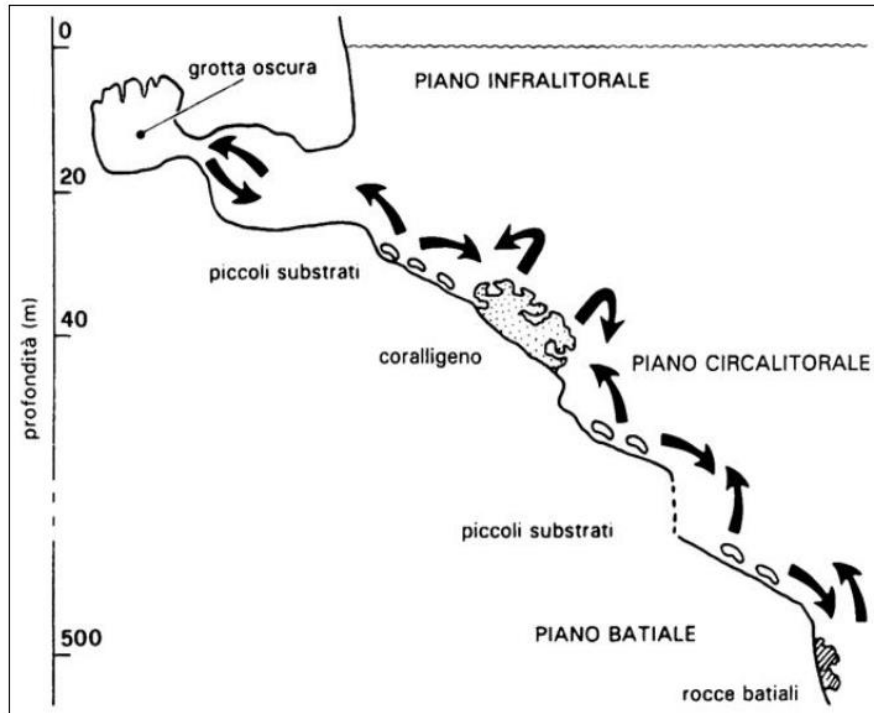


Figura 3: Rappresentazione schematica della colonizzazione delle grotte marine da parte di specie criptobiotiche e batifile (da Harmelin, 1986, modificato).

Il fenomeno della troglobiosi è spiegabile poiché le grotte presentano delle affinità e parallelismi con ambienti marini profondi di difficile accesso/gestione. La dipendenza, almeno parziale (Southward et al., 1996; Bianchi et al., 1998), dalla produzione chemiolitoautotrofa fa sì che gli ecosistemi delle grotte con risorgenze sulfuree presentino analogie con gli ecosistemi che si formano a grande profondità in prossimità di risorgenze idrotermali sulle dorsali medioceaniche (Laubier, 1986). Ci sono diversi altri aspetti che accomunano le grotte sottomarine agli ecosistemi profondi (Zibrowius, 1971; Boury-Esnault et al., 1993; Vacelet et al., 1994; Harmelin & Vacelet, 1997).

Un aspetto probabilmente legato anch'esso al metabolismo batterico è la formazione di patine e noduli metallici, essenzialmente ossidi di ferro e di manganese, che conferiscono il peculiare colore nerastro alle rocce profonde ed alle pareti delle parti più confinate delle grotte sottomarine (Laborel & Vacelet, 1958; Bianchi et al., 1988).

Più in generale, comunque, è il fenomeno della deplezione trofica che assimila le grotte alle grandi profondità marine, dove l'assenza di luce impedisce la produzione primaria e materia ed energia vengono importate dall'esterno, per fluitazione o gravità. In quest'ottica, le grotte sottomarine possono costituire un modello in scala ridotta, e facilmente accessibile allo studio,

degli ecosistemi marini di profondità, cioè di un ambiente che occupa oltre la metà della superficie del nostro pianeta.

Oltre al fenomeno della troglobiosi secondaria, la colonizzazione delle grotte marine può essere dovuta alla penetrazione di specie generaliste che sono entrate in grotta e, nel tempo, hanno dato luogo a specie tipiche di tale habitat (fenomeno della speciazione). Tutt'oggi i dati disponibili non sembrano confermare l'esistenza di specie esclusive (troglobie) in grotte mediterranee, se si escludono casi rarissimi. In grotta sono molto più comuni specie troglofile, presenti anche in ambienti criptici litorali o in ambienti profondi dove è meno facile osservarle. È possibile trovare specie relitte (arcaiche), come ad esempio *Petrobiona massiliana*, un porifero appartenente ad una famiglia che si pensava estinta alla fine del Cretaceo (Vacelet & Levi, 1958; Vacelet, 1964).

Nel complesso, le grotte marine si differenziano grandemente dal punto di vista evolutivo dalle grotte continentali (Delamare Deboutteville, 1960; 1971): mentre quest'ultime possiedono un popolamento povero in specie ed in individui, ma ricco in caratteri adattativi ed in endemismi, le grotte marine sono relativamente ricche di specie, rappresentate talvolta da numerosi individui, e mancano o quasi di specie esclusive o con adattamenti peculiari (Riedl, 1966).

Distribuzione ed importanza

Le grotte marine sommerse ospitano ecosistemi unici e vulnerabili e possono funzionare come isole ecologiche, ospitando comunità sensibili alla frammentazione, specie relitte e comunità simili a quelle che si trovano nei sistemi abissali (Sarà, 1976; Harmelin et al., 1985; Boury-Esnault et al., 1993; Bianchi et al., 1996; Rastorgueff et al., 2015; Gerovasileiou et al., 2016). Inoltre, sono considerate hotspot di biodiversità (ad esempio, le grotte del Mediterraneo ospitano il 45,7% di tutti i poriferi e quasi il 39,4% di tutte le specie di briozoi che abitano questo mare) (Okamura et al., 2001; Gerovasileiou & Voultziadou, 2012; 2014; Rosso & Di Martino, 2016; Garrabou et al., 2017; Rosso et al., 2019). Nel Mar Mediterraneo, questi habitat frammentati sono ampiamente distribuiti lungo le aree costiere rocciose e sono presenti in circa il 66% delle Aree Marine Protette esistenti (Abdulla et al., 2008; Giakoumi et al., 2013).

Le grotte marine sono incluse nell'Allegato I della Direttiva Habitat della Comunità Europea (1992), che elenca quegli habitat la cui conservazione richiede la designazione di aree protette, in quanto presentano un alto valore estetico e forniscono servizi importanti, come il sequestro di CO₂ e la stabilità del fondale marino (Martin et al., 2013). Le grotte sono elencate anche nel piano d'azione per la conservazione degli habitat e delle specie e sono considerate "habitat oscuri" sensibili che richiedono protezione (UNEP-MAP-RAC/SPA, 2015).

La penisola italiana è caratterizzata dalla presenza di un elevato numero di grotte marine, parzialmente o totalmente sommerse; attualmente ne sono note all'incirca un migliaio. Le aree geografiche italiane che presentano un maggiore sviluppo di grotte marine sono la Sardegna, la Campania, la Puglia, il Lazio meridionale (FIGURA 4).



Figura 4: Distribuzione delle grotte marine lungo le coste italiane (da Cicogna et al., 2003).

Fattori ambientali

Le grotte marine, ormai da decenni, attirano l'attenzione di molti ricercatori ed esploratori poiché sono un buon modello, in scala ridotta, delle grandi profondità marine ed un ideale "laboratorio naturale" per lo studio del ruolo e dell'influenza dei fattori ambientali marini sulle comunità animali e vegetali. In grotta, molti di questi fattori sono più facili da controllare, ed in pochi metri si determinano variazioni di luce, idrodinamismo o apporti trofici che nell'ambiente esterno possono interessare decine di metri di profondità (Cattaneo & Pastorino, 1974). Questi fattori sono i principali responsabili nel modellare le comunità di grotta.

La luce, ed in particolare la diminuzione della sua intensità man mano che si passa dall'esterno all'interno della grotta, è, molto probabilmente, il fattore maggiormente caratteristico. Rappresenta una condizione comune a tutte le cavità, seppure esista una certa variabilità dettata da una serie di fattori locali che comprendono: l'illuminazione alla superficie, la profondità, l'orientamento rispetto ai punti cardinali, l'angolazione dell'ingresso, l'inclinazione (Morri & Bianchi, 2003). L'importanza dell'estinzione della luce è stata messa in evidenza sin dalle prime ricerche, tanto che Peres & Picard (1964), nel loro famoso <<Manuel de biologie benthique>>, distinguono una biocenosi di grotta semi-oscuro (GSO) e una biocenosi di grotta oscura (GO).

Il confinamento idrologico, in larga misura, è il principale responsabile dell'instaurarsi dei gradienti biologici osservabili in grotta (Bianchi & Morri, 1994). Al ricambio idrico, inoltre, sono collegati una serie di fattori che determinano la qualità del mezzo acqueo in cui gli organismi vivono. Si tratta di fattori:

- Chimico-fisici: temperatura, salinità, tasso di sedimentazione, pH, concentrazione di ossigeno, ecc. (Morri et al., 1994);
- Biotici: allontanamento dei cataboliti; trasporto delle larve; apporto di nutrienti (Balduzzi et al., 1989).

L'entità dell'idrodinamismo in un dato punto della grotta è conseguenza di diverse variabili locali quali: l'esposizione e il profilo della costa, la profondità, la forma e la natura del substrato (Morri & Bianchi, 2003). La forma, in particolare, influenza la velocità dell'acqua che può accelerare (strette) o rallentare (slarghi); così come la taglia: grotte grandi con sale ampie risentono in maniera minore del confinamento, in quanto probabilmente la presenza di grandi

masse d'acqua permette l'instaurarsi di gradienti di densità e correnti interne (Bianchi et al., 2003). Inoltre, è stato dimostrato che affinché si instauri un popolamento di grotta è necessario che l'agitazione dell'acqua assuma valori compresi tra il 2 e il 10 % di quelli presenti in superficie.

La deplezione trofica è un'espressione che viene, generalmente, utilizzata nel sistema "grotta" per indicare la progressiva diminuzione delle risorse alimentari – sia in termini quantitativi che qualitativi - man mano che si passa dall'esterno all'interno della grotta. In termini qualitativi si riduce il valore nutritivo della materia organica poiché: aumenta il rapporto tra carbonio e azoto (C/N), quindi molto generalmente c'è più cellulosa che proteine; aumenta la quantità di materia organica complessa rispetto a quella semplice; diminuisce la proporzione tra clorofilla/feofitina, che determina un quantitativo inferiore di materia vegetale fresca rispetto a quella in decomposizione. Questo fenomeno si verifica sia per la progressiva estinzione della luce dall'esterno all'interno della grotta, causando la scomparsa delle alghe e inibendo quindi la produzione primaria, sia per la riduzione dell'idrodinamismo, che diminuisce l'apporto di nutrienti dall'esterno. Da dati sperimentali di Riedl (1966), Bianchi et al. (1998) hanno calcolato una relazione empirica tra volume della cavità e riserve nutritive in assenza di ricambio idrico: così, ad esempio, una grotta di 10 m³ ha al massimo riserve per un'ora, una di 1 m³ per soli 8 minuti (FIGURA 5).

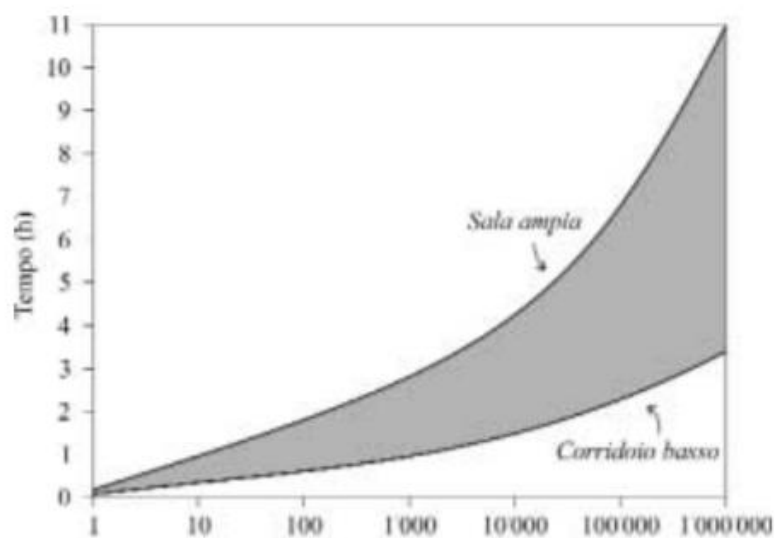


Figura 5: Durata delle risorse alimentari disponibili per gli organismi filtratori in relazione al volume ed alla forma di una grotta sottomarina (da Bianchi et al., 1998, modificato).

Attraverso diversi studi condotti in Mediterraneo è stato osservato che la riduzione qualitativa degli apporti alimentari è il principale fattore responsabile della modificazione dei popolamenti all'interno delle grotte sottomarine (Zabala et al., 1989). Tuttavia, possono verificarsi situazioni di attenuata deplezione trofica dovute a adattamenti fisiologici (scarsa specializzazione alimentare e resistenza al digiuno) e funzionali del sistema "grotta" (migrazione delle specie nictemerali, epibiosi e foresia e chemiolitoautotrofia) (Bianchi et al., 2003).

Una situazione opposta alla deplezione trofica è rappresentata dalla produzione chemiolitoautotrofa. Si tratta di una fonte di produzione primaria, non fotosintetica, ma autoctona della grotta determinata dalla presenza di risorgenze idrotermali – acque ricche in solfuri - all'interno della cavità che consentono lo sviluppo di cospicui tappeti di solfobatteri sulla roccia (Alvisi et al., 1994). I solfobatteri sono in grado di ottenere energia per il loro metabolismo dall'ossidazione dei solfuri in solfati impedendo, così, l'instaurarsi di condizioni oligotrofiche. Tale situazione è stata scoperta in alcune grotte marine di Capo Palinuro (Salerno), ed in particolare, nella Grotta Azzurra.

Zonazione biologica

Lo studio dei gradienti ambientali, associato ai parametri strutturali utilizzati per descrivere l'organizzazione delle comunità biologiche, ha evidenziato che il popolamento delle grotte presenta una marcata zonazione; vale a dire: le specie che lo compongono non sono distribuite omogeneamente all'interno delle cavità, ma prediligono settori distinti (Bianchi et al., 1996; Bianchi & Morri, 1999). L'evidenza di tale zonazione è stata riscontrata solo con lo sviluppo dell'immersione subacquea autonoma che ha consentito l'osservazione ed il campionamento diretti. I parametri strutturali considerati sono stati:

- Il ricoprimento degli organismi sessili, cioè la porzione di substrato da essi occupato. Tale parametro assume valori intorno al 100% nelle porzioni più esterne della grotta e si riduce, fino quasi a scomparire, man mano che ci si addentra all'interno. È stato osservato che nelle grotte a fondo cieco il ricoprimento biologico decade al diminuire della luce e dell'idrodinamismo; al contrario, nelle grotte a tunnel il ricoprimento si mantiene pressoché costante, seppur a fronte di forti variazioni di intensità luminosa, poiché l'idrodinamismo si mantiene sensibile (Morri & Bianchi, 2003) (FIGURA 6).

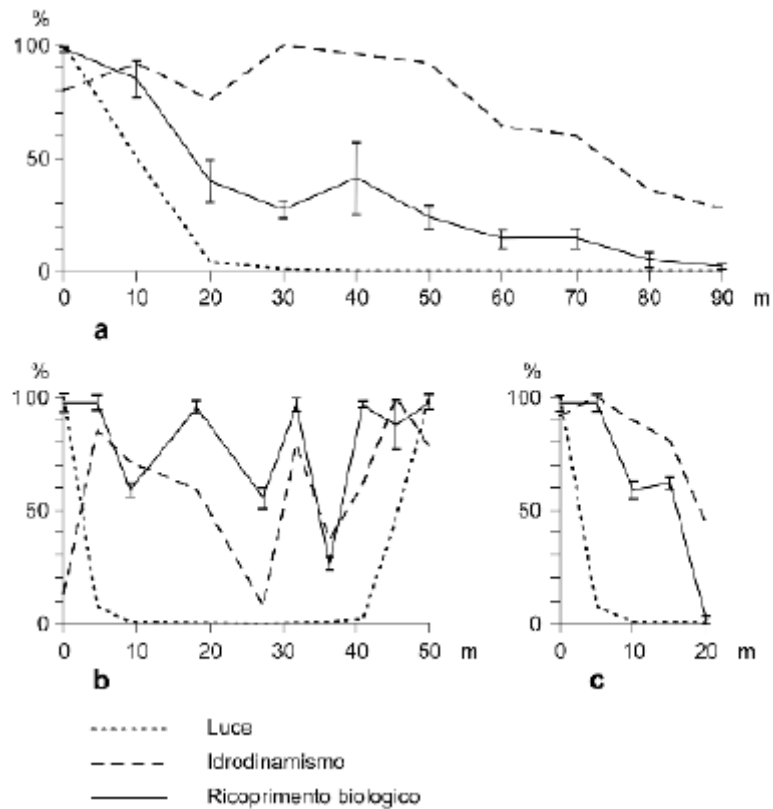


Figura 6: Confronto tra l'andamento del ricoprimento biologico del substrato (percentuale, valore medio \pm errore standard) ed i gradienti di luce ed idrodinamismo (entrambi espressi come percentuale del valore massimo osservato) dall'esterno all'interno in grotte diverse:

- Grotta della Cala di Mitigliano (a fondo cieco);
- Grotta Marina di Bergeggi, porzione a tunnel;
- Grotta Marina di Bergeggi, porzione a fondo cieco

(grafici elaborati sulla base dei dati di Balduzzi et al., 1989, e di Morri et al., 1994).

- La ricchezza specifica diminuisce dall'esterno verso l'interno delle grotte a fondo cieco, anche se gli andamenti sono spesso irregolari a causa della disposizione a chiazze (patchiness) degli organismi (Harmelin et al., 1985) (FIGURA 7).
- La stratificazione del popolamento mostra lo stesso andamento dei parametri sopra descritti. Come si osserva nella FIGURA 8, all'esterno il popolamento presenta tipicamente uno strato elevato mentre man mano che si passa da GSO, zona di transizione e GO, tale stratificazione decresce fino ad apparire come uno strato laminare con tubi di serpulidi che conferiscono una leggera elevazione.

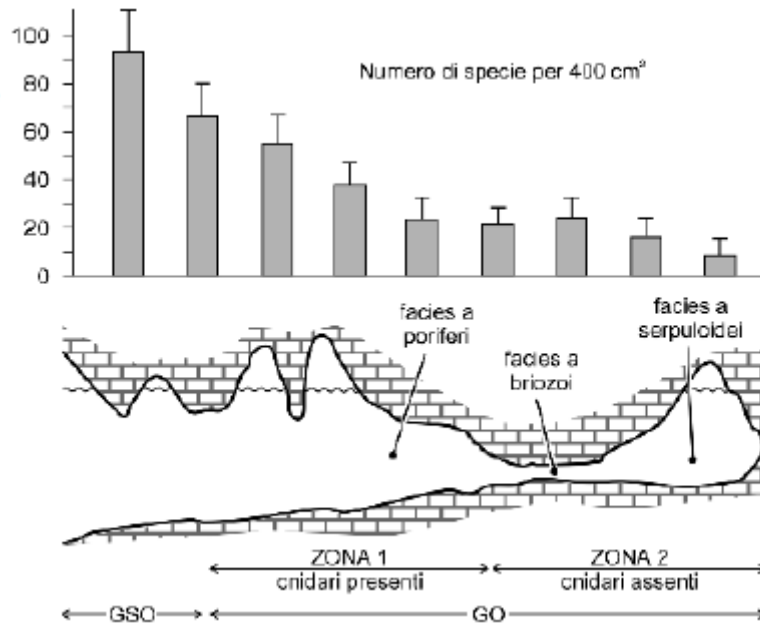


Figura 7: Andamento della ricchezza specifica (numero di specie per 400 cm², media + errore standard) e caratteristiche fisionomiche delle comunità biologiche sessili nella Grotta della Cala di Mitigliano, una cavità a fondo cieco lunga oltre 80 m. GSO = biocenosi di grotta semi-oscuro; GO = biocenosi di grotta oscura (da Balduzzi et al., 1989, modificato).

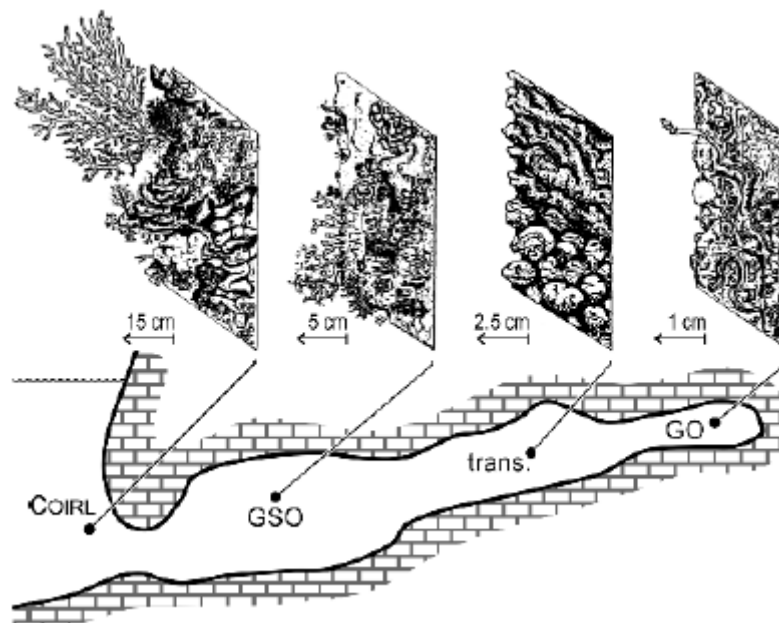


Figura 8: Modificazione della fisionomia del popolamento e riduzione dello strato elevato (notare la differenza di scala) dall'esterno all'interno di una grotta a fondo cieco: COIRL: Coralligeno dell'orizzonte inferiore della roccia litorale; GSO: biocenosi di grotta semi-oscuro; trans.: popolamento di transizione; GO: biocenosi di grotta oscura (da Harmelin et al., 1985, modificato).

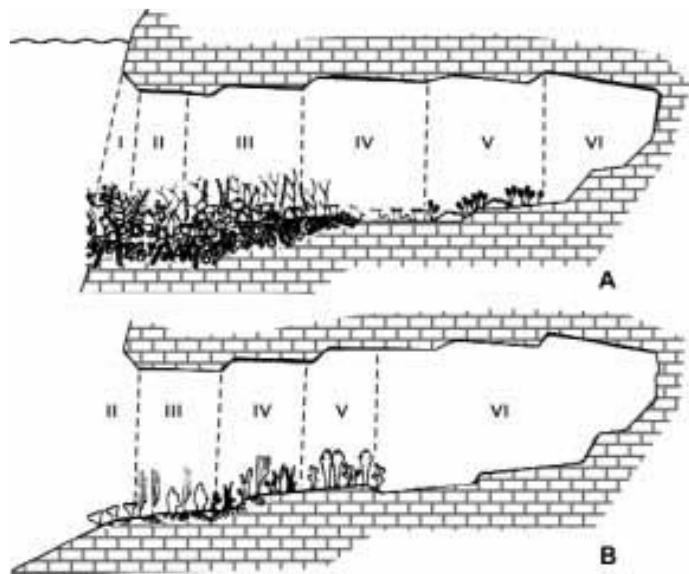
I principali modelli di zonazione biologica nelle grotte marine mediterranee sono due e si devono, principalmente, al contributo dato dalla scuola francese e austriaca.

Nel 1966 Riedl utilizzò gli idrozoi – una classe di cnidari con caratteristiche di descrittori ambientali efficaci (Morri & Bianchi, 1982) – la distribuzione delle alghe, e la fisionomia generale del popolamento per definire 6 zone biotiche differenti (FIGURA 9):

- I. Zona del fitale ombroso;
- II. Zona dell'ingresso della grotta;
- III. Zona del contingente anteriore;
- IV. Zona del contingente centrale
- V. Zona del contingente posteriore;
- VI. Il quarto vuoto.

Figura 9: Zone biotiche in una grotta marina superficiale, situata a 1-5 m di profondità (A), ed in una profonda, a 15-40 m (B)

(Da Riedl, 1966, modificato).



La distribuzione dei popolamenti tiene conto della profondità, della dimensione e della forma della grotta (Bianchi & Morri, 2003). Generalmente, le zone precedentemente descritte sono ben riconoscibili nelle grotte a fondo cieco, al contrario, nelle grotte a tunnel è difficile riconoscerle poiché l'idrodinamismo si mantiene pressoché costante mentre la luce può essere molto variabile – intensa nei pressi degli ingressi e debole/assenti nelle altre zone – a seconda della lunghezza del tunnel.

Peres & Picard hanno riconosciuto due tipologie di biocenosi di grotta: le biocenosi delle grotte semi-oscuere (GSO) e le biocenosi delle grotte oscure (GO) entrambe a composizione esclusivamente animale. Tra le due tipologie di biocenosi può essere presente una zona di transizione.

La biocenosi GSO si trova nella porzione più prossima all'ingresso delle grotte marine ma anche all'esterno di queste, in zone scarsamente illuminate come ad esempio tetti e strapiombi o in fessure del coralligeno. La biocenosi GSO si distingue tuttavia da quest'ultima per l'assenza di componente vegetale, che è invece il maggior elemento costitutivo dell'ambiente coralligeno. È dominata dalle spugne e dagli antozoi e due specie in particolare appartenenti a questi gruppi: *Aplysina cavernicola* e *Corallium rubrum* (Morri & Bianchi, 2003). La biocenosi GSO può presentarsi, a seconda delle caratteristiche ambientali locali, sotto diverse facies riconoscibili fisionomicamente.



Aplysina cavernicola e *Corallium rubrum* – da Biologia marina.org

La biocenosi GO, caratterizza le porzioni più interne delle grotte a fondo cieco, o cunicoli secondari ad oscurità totale. Il popolamento e il ricoprimento sono molto scarsi e la roccia appare quasi nuda. Spesso è presente una patina nerastra composta di ossidi di ferro e manganese, risultato dell'attività batterica. È dominata da poriferi (tra i quali *Petrobiona massiliana*), madreporari (*Guynia annulata*), briozoi e serpulidi.



Petrobiona massiliana e *Guynia annulata* – da Naturamediterraneo.com

Confinamento

Il termine confinamento applicato all'ecologia delle grotte sottomarine è stato usato da [Harmelin \(1980\)](#), in relazione alle differenze riscontrate nel popolamento di grotte oscure a tunnel – e quindi interessate da attiva circolazione idrica – confrontato con quello di grotte oscure a fondo cieco. Il confinamento, dunque, esprime un concetto di natura idrodinamica e che pertanto può essere misurato dalla velocità di corrente e dal ricambio idrico ([Morri et al., 2003](#)).

Sulla base di ciò, [Bianchi & Morri \(1994\)](#), hanno definito una scala di confinamento basata sulla zonazione dell'epibenthos sessile, con particolare riguardo a composizione (gruppi trofici e forme di crescita), organizzazione spaziale, ricoprimento totale del substrato. Sono state, dunque definite 6 zone: zona I, esterno; zona II, avangrotta; zona III, grotta vivificata; zona IV, grotta confinata; zona V, grotta molto confinata; zona VI, grotta estrema. Gli stessi [Bianchi & Morri \(1994\)](#) hanno generalizzato le 6 zone bionomiche e ne hanno utilizzato i limiti topografici come misura del grado di confinamento:

- Grado 0: Ambiente esterno, e si situa a monte della zona I.
- Grado 1: Transizione tra zona I e zona II ed è marcato dalla semplificazione del popolamento, soprattutto a carico del suo strato elevato.
- Grado 2: Radicale modificazione del popolamento, che comincia ad assumere un'inequivocabile fisionomia di grotta (tra zona II e zona III).
- Grado 3: Scomparsa o severa riduzione dei filtratori passivi, segnatamente di quelli eretti (tra zona III e zona IV).
- Grado 4: Scomparsa o severa riduzione delle forme massive (tra zona IV e zona V).
- Grado 5: Scomparsa (tra zona V e zona VI) delle forme incrostanti a crescita indeterminata.
- Grado 6: Scomparsa della fauna sessile: al di là di questo grado di confinamento si perviene alla condizione di quelle che vengono chiamate grotte marginali ([Riedl & Ozretic, 1969](#)) o grotte anchialine ([Iliffe, 1987](#)), caratterizzate dalla mancanza di comunicazione diretta con il mare.

Composizione floro-faunistica

La composizione floro-faunistica delle diverse grotte può risultare assai diversa e, tali differenze, sono collegabili, soprattutto, a fattori biogeografici. Tuttavia, in linea generale, in tutte le grotte si riscontrano andamenti simili dei principali gruppi, anche se le singole specie possono differire.

I vegetali risentono del gradiente di luce tipico dell'ambiente di grotta e, per tal motivo, si incontrano solo nei pressi dell'ingresso. Man mano che l'intensità luminosa diminuisce la componente fotofila (= amante della luce) viene sostituita dalla quella sciafila (= amanti di luce tenue) (TABELLA 1). In grotta non si trova nessuna specie di fanerogama, anche se *Posidonia oceanica* può essere molto abbondante davanti all'ingresso di molte cavità (Bianchi & Morri, 1994).

TABELLA 1: Esempi di scomparsa di differenti alghe al diminuire dell'intensità luminosa all'ingresso delle grotte (da Bianchi, 2003, modificato).

	S	DS	O	MO	B
<i>Cystoseira</i>	+	-	-	-	-
<i>Dictyopteris</i>	+	+	-	-	-
<i>Flabellia, Halimeda</i>	+	+	+	-	-
<i>Peyssonnelia</i>	+	+	+	+	-
Corallinacee incrostanti, <i>Palmophyllum</i>	+	+	+	+	+

Le specie animali che si possono trovare in grotta sono rappresentate da quasi tutti i *phyla* marini e comprendono sia forme vagili che sessili (TABELLA 2).

TABELLA 2: Principali tipi zoologici di macrofauna rinvenibile nelle grotte marine. + = presente; * = importante (da Bianchi, 2003).

	Forme vagili	Forme sessili	Note
Protozoi		+	abbondanza di <i>Miniacina</i>
Poriferi		*	dominanti per ricchezza ed abbondanza
Cnidari		*	idrozoi ed antozoi (madreporari, ceriantari, corallo rosso)
Molluschi	+	+	gasteropodi, pochi bivalvi
Anellidi	+	*	soprattutto policheti serpuloidi
Artropodi	*	+	soprattutto crostacei (decapodi e misidacei)
Briozoi		*	soprattutto forme incrostanti
Brachiopodi		+	solo specie di piccole dimensioni
Echinodermi	+		occasionalmente
Tunicati		+	occasionalmente
Vertebrati	*		pesci (uccelli e mammiferi solo in grotte emerse)

Organizzazione trofica

L'ambiente di grotta è caratterizzato da una diminuzione delle risorse alimentari sia in termini quantitativi che qualitativi. Tale situazione comporta, da parte degli organismi, la necessità di adattarsi ad un'organizzazione trofica anomala, poiché oltre a mancare il primo livello trofico dei produttori primari, sono soggetti ad un apporto alimentare aperiodico (Bibloni et al., 1984) (FIGURA 10). Ciò determina una scarsa specificità per l'alimentazione, una elevata resistenza al digiuno (come risposta adattativa alla scarsità di cibo) e una forte competitività per lo spazio (per esempio, la ricerca dei siti migliori per la filtrazione), caratteristiche importanti del popolamento delle cavità (Culver, 1985).

L'apporto energetico è costituito da materia organica in sospensione, disciolta (DOM) o particellata (POM), sia morta sia vivente (plancton); un ulteriore apporto proviene dagli organismi che occasionalmente penetrano nelle cavità lasciandovi i loro escrementi o le loro spoglie (Bianchi, 2003). Per tale ragione, la componente predominante nell'ambiente di grotta è rappresentata dai produttori secondari, soprattutto filtratori o sospensivori, che vivono grazie alla materia organica importata dall'esterno. Si distinguono sia filtratori attivi (poriferi, molluschi bivalvi, policheti, serpulidi ecc.) che passivi (cnidari). Essi costituiscono il livello principale in termini sia di biomassa sia di ricchezza specifica.

Consumatori e detritivori sono poco rappresentati; i primi si nutrono della materia organica direttamente prodotta in grotta soprattutto dai produttori secondari; sui secondi non si hanno molte informazioni a riguardo della loro possibilità di alimentarsi direttamente di sostanza organica particolata morta o se necessitano prima dell'intervento demolitore dei microrganismi (Russo, 2000).

I migratori rappresentano una componente importante della vita di grotta. Tra questi ritroviamo soprattutto i misidacei, ma anche specie vagili come: crostacei (*Plesionika narval*, *Palinurus elephas*, *Scyllarus arctus* e *Homarus gammarus*); cefalopodi come *Octopus macropus*; pesci come *Apogon imberis*, *Phycis phycis* e *Sciaena umbra* che lasciano la grotta durante la notte per nutrirsi. Altri pesci, come molte specie di sparidi, serranidi e gobidi, utilizzano le grotte come "rifugio" diurno o notturno. La presenza di tali popolazioni migranti, talvolta numericamente consistenti, può rappresentare un'importante via di importazione di sostanza organica dall'esterno sotto forma di materiale fecale, determinando in certi casi condizioni locali di miglioramento trofico (Bianchi & Morri, 1994), ma, nel bilancio complessivo, può anche rappresentare una perdita di energia per il sistema di grotta.

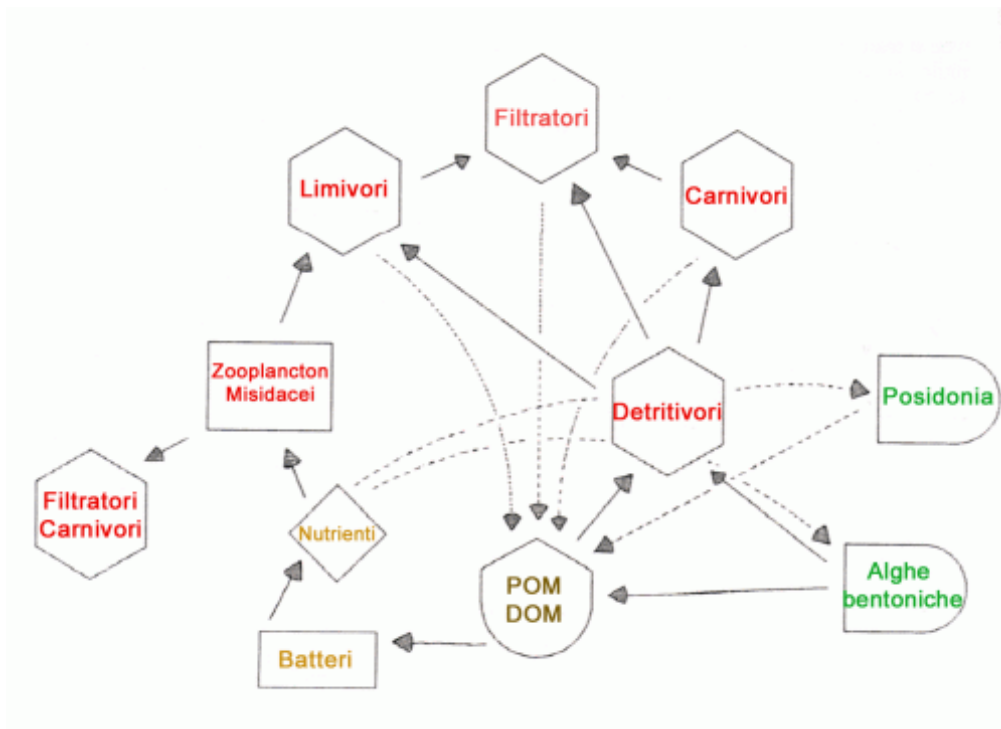


Figura 10: Schema generale di una rete trofica in una grotta marina
(Abbiati et al., 1992).

Minacce

L'alto valore estetico e la ricchezza di peculiarità biologiche delle comunità di grotte sottomarine possono essere degradati da diverse minacce: disturbi meccanici (movimenti d'acqua deleteri, subacquei), riscaldamento dell'acqua, deposito di sedimenti, raccolta di specie commerciali, urbanizzazione e deflussi di rifiuti (Chevaldonné & Lejeusne, 2003; Parravicini et al., 2010; Giakoumi et al., 2013). Tali minacce dipendono molto dalla loro posizione (distanza da costa, presenza di fiumi, vicinanza di grandi popolazioni centri e complessi industriali), la loro profondità, la loro morfologia (pendenza, substrato, struttura) e l'uso a cui sono destinate (sfruttamento delle risorse).

Numerose sono le località che ospitano cavità famose ed importanti, ma le principali aree caratterizzate da grandi sistemi di grotte che generano anche autonomamente un considerevole flusso turistico si trovano soprattutto in Sardegna, Campania e Puglia. In Campania, il massiccio di Capo Palinuro, che ospita oltre 30 cavità costiere di cui molte accessibili solo ai sub, costituisce una delle aree speleologiche più studiate del nostro paese; caratterizzato da una forte presenza di centri di immersione che trovano proprio la loro principale giustificazione, oltre alla bellezza e ricchezza dei fondali, soprattutto nella presenza delle grotte sommerse.

A fianco di questa caratteristica di forte attrattiva turistica e conseguentemente di capacità di generare e spostare flussi turistici creando ricchezza, le grotte possono tuttavia, causa la loro elevatissima sensibilità ambientale, rischiare di diventare le prime vittime del fenomeno dello sviluppo turistico selvaggio e incontrollato.

Ma il turismo non rappresenta l'unica minaccia; un inquinamento di origine esterna, infatti, potrebbe provocare effetti devastanti nel delicato equilibrio di un ecosistema come quello delle grotte, per lo più dipendente dai flussi trofici provenienti dall'esterno e di conseguenza, estremamente vulnerabile ad inquinanti provenienti per la stessa via. La presenza di scarichi fognari, o peggio ancora industriali, non controllati e non immessi nel sistema di depurazione, può provocare gravi forme di inquinamento nella cavità marine, sia proveniente dall'esterno, veicolato dal moto ondoso o dalle correnti, sia da inquinamenti del sistema di acque sotterranee che è all'origine della formazione delle cavità calcaree, dovuti al percolamento da pozzi neri o all'inquinamento da reflui. Ugualmente allarmante la minaccia legata al rischio di sversamenti di idrocarburi dovuti ad incidenti o ad attività illegali quali il lavaggio delle cisterne o lo scarico di acque di sentina, fenomeno molto diffuso in un'area come quella mediterranea ad altissima densità di traffici petroliferi.

Oltre ai fenomeni di impatto diretto quali l'inquinamento organico e quello dovuto agli sversamenti di idrocarburi, lo sfruttamento di risorse viventi (raccolta di corallo rosso, pesca a strascico, pesca con palangari o reti a maglie, attrezzi da pesca persi o abbandonati), attività di ricerca (sismica, campionamento), la presenza eccessiva di natanti nelle grotte parzialmente emerse e di visitatori subacquei in quelle sommerse. Occorre quindi cominciare a pensare seriamente alla protezione della risorsa costituita da questi ambienti, utilizzando i vari strumenti di tutela messi a disposizione dalla legislazione nazionale, comunitaria e internazionale (istituzione di AMP e, laddove presenti, una migliore gestione).

DESCRITTORI NON TASSONOMICI

I descrittori non tassonomici, nonché la morfologia (forme di crescita “growth forms”- GF) e la strategia trofica (gilde trofiche “feeding guilds”- FG) sono stati proposti dalla comunità scientifica recentemente per monitorare i potenziali impatti sulle comunità bentoniche delle grotte perché richiedono meno informazioni, risorse e competenze tassonomiche. Le grotte sono ecosistemi unici e vulnerabili (Sarà, 1979) di cui si hanno pochi dati sull’impatto da fonti naturali o antropogenici sia a livello globale (cambiamenti climatici e acidificazione delle acque) sia regionale/locale (inquinamento delle coste, costruzione di infrastrutture, attività subacquee ecc).

Forme di crescita

Con l’espressione “growth forms” s’intende la capacità, da parte delle diverse specie, di occupare il substrato. Generalmente, a seconda delle caratteristiche della grotta, la stessa specie può presentare forme di crescita differenti pur mantenendo la stessa gilda alimentare (Parravicini et al., 2010).

Il modello di classificazione delle forme biologiche marine, adottato nel presente lavoro, è il risultato di una rielaborazione del modello proposto da Jackson (1979), riferito a substrati duri della zona sublitorale, da lui stesso riveduto e in seguito modificato da Connell & Keough (1985). Tali modifiche riguardano una maggiore definizione delle categorie “sheets” e “mounds” che sono state ulteriormente suddivise in “determinate” ed “indeterminate”. La divisione tra queste ultime due categorie è legata al mantenimento della forma durante la crescita: raggiunta una certa taglia le forme determinate non modificano le loro dimensioni; al contrario le indeterminate possono continuare il loro accrescimento modificando la forma.

Tenendo conto del rapporto tra l’altezza (h) e il raggio (r) dell’organismo sono state identificate le forme di crescita indicate nella TABELLA 3.

TABELLA 3: CLASSIFICAZIONE DELLE FORME DI CRESCITA

BIDIMENSIONALI	
RUNNERS (stoloniali)	Sono organismi incrostanti con forma lineare o ramificata parallela e aderente al substrato.
SHEETS (incrostanti)	<u>Determinati</u> : organismi con portamento incrostante, aderenti al substrato, con forma del corpo regolare. <u>Indeterminati</u> : organismi con portamento incrostante, aderenti al substrato, con forma del corpo irregolare e indeterminata.
PLATES (laminari)	<u>Prostrati</u> : forme in parte attaccate al substrato ed in parte proiettate nella colonna d'acqua sovrastante di aspetto laminare. Appartengono a tale categoria le alghe rodoficee incrostanti. <u>Eretti</u> : sono tutte le macroalghe con portamento eretto e forma appiattita e laminare, e i briozoi reteporiformi.
TRIDIMENSIONALI	
MOUNDS (massivi)	<u>Determinati</u> Emisferici ($h=r$) : organismi con crescita nelle tre dimensioni, solitamente attaccati ai substrati lungo la maggior parte dell'area basale, di forma regolare. <u>Indeterminati</u> Appiattiti ($h<r$) : organismi con crescita principale sul piano, senza una forma determinata e regolare, solitamente attaccati al substrato lungo la maggior parte dell'area basale. Cupoliformi ($h>r$) : organismi con crescita principale in altezza, con una forma tipicamente a cupola. Cilindrici prostrati ($h<<r$) : organismi con crescita sul piano e con andamento prostrati, senza una forma determinata e regolare. Unica di questa categoria è <i>Petrosia ficiformis</i> (in grotta spesso si trova allungata e biancastra).
VINES (rampicanti)	Forme erette lineari o irregolarmente ramificate, semierette o ascendenti con una o più zone ristrette di attacco al substrato.
THREES (arborescenti)	Forme erette ramificate con estensione verticale, con un'area ristretta di attacco al substrato.
BUSHES (cespugliosi)	Forme erette ramificate dalla base con un'area ristretta di attacco al substrato.

I processi che avvengono in grotta agiscono da selettori nei confronti di taxa completamente diversi - come ad esempio poriferi, cnidari, ascidie – andando a regolarne la distribuzione, l'abbondanza e la sopravvivenza. Tali processi fanno sì che organismi filogeneticamente diversi adottino strategie tra loro convergenti.

[Jackson \(1979\)](#), ha osservato che la morfologia adottata dalle diverse specie dipende dalla loro capacità di sopravvivere in un ambiente in cui lo spazio può diventare un fattore limitante.

La competizione spaziale può essere considerata sia in termini di conquista del substrato (ambiente bidimensionale) sia della colonna d'acqua (ambiente tridimensionale). Per far fronte a tale situazione, i diversi organismi tendono ad utilizzare strategie morfologiche e funzionali diverse al fine di poter conquistare una zona di substrato in cui poter accrescersi, procurarsi cibo e difendersi dall'espansione di altri individui adiacenti.

Tuttavia, laddove la competizione si mostra più accentuata si instaurano fenomeni di epibiosi (overgrowth). Alcuni organismi sono in grado di colonizzare la superficie di altri organismi sino a opprimerli completamente provocandone la morte. In questo caso, oltre ai meccanismi di competizione per lo spazio, risultano fondamentale la competizione nutrizionale ([Best & Thorpe, 1986](#)).

Altri organismi come molluschi bivalvi (*Lithophaga lithophaga*) e spugne perforanti del genere *Cliona* spp. hanno evoluto la capacità di perforare la roccia (borers) permettendo loro di conquistare lo spazio non più nell'ambiente bidimensionale, ma in quello tridimensionale.

Un fattore importante per la conquista dello spazio è la distinzione tra animali solitari e coloniali. Gli organismi coloniali (poriferi, briozoi, ascidiacei) sono efficaci competitori e possono occupare porzioni di substrato maggiori rispetto agli organismi solitari come serpulidi, brachiopodi e bivalvi ([Jackson, 1977](#)).

Gli organismi solitari essendo poveri competitori per lo spazio dipendono maggiormente dalle condizioni ambientali per potersi insediare e accrescersi in ambienti particolari ([Jackson & Winston, 1982](#)). Essi si adattano più facilmente alle perturbazioni ambientali e sono in grado di colonizzare nuovi substrati per primi (specie pioniere).

Un ruolo importante è svolto anche da fattori abiotici, quali idrodinamismo, luce, tasso di sedimentazione che vanno ad influire sulle diverse forme di crescita.

Secondo il modello sviluppato da [Jackson \(1979\)](#) i forti movimenti dell'acqua o l'instabilità del substrato sono deleteri per i plates (laminari) e per i trees (arborescenti), soprattutto per quelli a scheletro inflessibile; al contrario alti tassi di sedimentazione e predazione sono più dannosi per organismi che giacciono o sono molto vicini al substrato come per i runners (stoloniali), gli sheets (incrostanti), i mounds (massivi) e per i vines (rampicanti).

Gilde trofiche

Con l'espressione "feeding guild" s'intende la capacità da parte degli organismi di sfruttare diversi meccanismi di alimentazione per ottenere il cibo (Cocito et al., 1997). Questo permette di distinguere gli organismi in:

1. Autotrofi
2. Filtratori passivi
3. Filtratori attivi ciliati (lofoforati e non lofoforati)
4. Pompanti attivi (muscolarizzati e non muscolarizzati)
5. Filtratori misti
6. Spugne mixotrofe

Gli autotrofi comprendono tutti quegli organismi in grado di produrre composti organici complessi sfruttando la reazione della fotosintesi (alghe, piante e fitoplancton). Nelle grotte marine gli autotrofi (soprattutto macroalghe) si trovano nelle zone in prossimità degli ingressi e tendono a diminuire, fino a scomparire completamente, addentrandosi lungo l'asse esterno interno. Nelle parti più interne, infatti, l'energia luminosa non è sufficiente per sostenere i processi di fotosintesi e l'unico apporto di sostanza organica è garantito dai movimenti della massa d'acqua (Ott & Svoboda, 1976).

Le particolari caratteristiche dell'acqua permettono l'esistenza di una strategia alimentare esclusiva nel mondo acquatico: la filtrazione. Questo tipo di strategia trofica comprende la filtrazione di grandi quantità d'acqua per catturare il particolato in essa sospeso. Sulla base dei meccanismi d'acquisizione del cibo, vengono distinte due tipologie di filtrazione: attiva e passiva. Il flusso di corrente permette sia di ricavare cibo e ossigeno sia di eliminare le scorie metaboliche.

I filtratori passivi sono organismi, tipo gli cnidari, in grado di trattenere il particolato sospeso nell'acqua e veicolato dalle correnti. Sono caratteristici di ambienti ad alta energia idrodinamica o comunque esposti a correnti, dove quindi il materiale organico è costantemente risospeso e condotto all'animale dal movimento dell'acqua. Il gioco delle correnti assicura alle colonie momenti di importante alimentazione come quando la corrente monta e porta con sé plancton ecco che lo scheletro idrostatico si riempie d'acqua, la colonia si gonfia e i polipi disposti ai margini della colonia possono alimentarsi correttamente. Quando invece la corrente cala lo scheletro della colonia si sgonfia e i polipi non si alimentano più.

Al contrario, i filtratori in grado di creare una corrente nutrizionale intorno ad essi sono definiti filtratori attivi e per questa loro caratteristica si trovano anche in aree a minor ricambio idrico. Il fatto che ci sia o meno una corrente d'acqua esterna ai loro corpi ha poca influenza sulle loro attività nutrizionali, dato che questi organismi hanno sempre una continua e regolare azione di pompaggio (Barnes, 1985).

I filtratori attivi sono costituiti da due categorie principali, quella dei filtratori attivi pompanti e quella dei filtratori attivi ciliari.

Ai ciliari appartengono tutti quegli organismi che utilizzano le ciglia per muovere l'acqua e per trasferire, con l'ausilio di secrezioni di muco, le particelle catturate verso la bocca. Il battito delle ciglia produce un flusso d'acqua che attraversa i tentacoli; le ciglia trattengono le particelle che vengono riunite e inviate alla bocca.

La categoria dei ciliari viene, a sua volta, suddivisa in due sottocategorie (lofoforati e non lofoforati). I briozoi, ad esempio, sono un importante gruppo di ciliari lofoforati che catturano le particelle mediante il lofoforo, organo costituito da tentacoli cigliati a forme di campana o cono. Viceversa, i serpulidi non hanno ciglia o flagelli organizzati in un organo specifico, come i briozoi, ma lungo docce e, per tal motivo, vengono definiti ciliati non lofoforati.

I pompanti attivi usano delle camere apposite atte ad operare un'azione di pompa che permette loro di generare una corrente nutrizionale. La categoria dei pompanti attivi viene ulteriormente suddivisa in due sottocategorie (muscolarizzati e non muscolarizzati). Appartengono ai pompanti attivi muscolarizzati quegli organismi, come ascidie e molluschi bivalvi, che sono in grado di potenziare l'azione di pompa, esercitate dalle camere, grazie alla muscolarizzazione delle stesse. Al contrario, i poriferi non presentando questa muscolarizzazione delle camere sono stati inclusi nella sottocategoria dei pompanti attivi non muscolarizzati. Un ulteriore gruppo è rappresentato dalle spugne che ospitano endosimbionti fotosintetici, come *Petrosia ficiformis*, incluse tra le spugne mixotrofe.

Infine, è stata creata una categoria a sé per i crostacei cirripedi (balanidi) inclusi nei filtratori misti (Crisp & Southward, 1961; Riedl, 1966; Jorgensen, 1966; Trager et al., 1990). Questi organismi mostrano una varietà di comportamenti alimentari in funzione delle condizioni idrodinamiche e della concentrazione di particelle alimentari presenti nella massa d'acqua. Tali comportamenti si esplicano in cambiamenti nel movimento del cirro che variano dal normale movimento battente a quello veloce (filtrazione attiva) o alla semplice estensione. Quest'ultimo comportamento, utilizzato in condizioni di forte flusso idrodinamico può essere considerato come una strategia di filtrazione passiva, in quanto consiste nella semplice opposizione dell'apparato di cattura perpendicolarmente alla direzione del flusso d'acqua.

Analizzando i gruppi trofici presenti nelle grotte marine, si riscontra che il gruppo predominante dal punto di vista qualitativo è quello dei filter-feeders o sospensivori. Si tratta organismi in grado di catturare il cibo anche se questo presenta concentrazioni molto basse nell'acqua (Gili & Coma, 1998), ma che per poter avere accesso al nutrimento devono colonizzare principalmente la volta e le pareti, dove le correnti impediscono la sedimentazione del particolato. Il pavimento, al contrario, essendo caratterizzato da alti tassi di sedimentazione è costituito prevalentemente da organismi deposivori, sospensivori-deposivori e limivori.

I filtratori si nutrono principalmente di phytoplankton e zooplancton, nonché di batteri e materia organica disciolta (DOM) (TABELLA 4).

TABELLA 4: Dieta dei principali taxa (DOM = materia organica disciolta) (modificato da Gili & Coma, 1998).

Taxa	Dieta
Poriferi	DOM, batteri, fitoplancton
Cnidari	DOM, batteri, fitoplancton e zooplancton
Molluschi bivalvi	Batteri, fitoplancton
Anellidi policheti	DOM, fitoplancton
Tunicati ascidiacei	DOM, batteri, fitoplancton

La principale risorsa di cibo per i filtratori è il plancton, che però in grotta è 1/100 di quello esterno (Riedl, 1966). Gli attivi consumano quasi tutti microplancton, i passivi invece possono mangiare anche plancton di taglia maggiore (Ott & Svoboda, 1976). Attingendo a taglie differenti data la loro specializzazione, i due gruppi non competono per le stesse risorse trofiche. In ultima analisi, considerando tra le diverse tipologie di meccanismo adottato per la cattura del cibo, la superficie effettiva degli apparati filtratori, possiamo dividere i sospensivori in organismi superficie dipendenti e non. I primi tendono a massimizzare il loro rapporto superficie volume (Jackson, 1979; Zabala & Ballestreros, 1989) mentre i secondi investono minore energia metabolica nell'accrescimento e nella creazione di una superficie maggiore di filtrazione mentre tendono a massimizzare la capacità di cattura delle prede.

SCOPO DELLA TESI

Lo scopo della presente tesi è quello di valutare i cambiamenti avvenuti a distanza di 26 anni (dal 1992 al 2018) sui popolamenti bentonici sessili della Grotta Azzurra di Capo Palinuro e di come tali comunità risentano dell'influenza del gradiente di luce.

Il lavoro è stato svolto presso il DISTAV (Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e della Vita) dell'Università degli studi di Genova e nasce dall'esigenza di costruire una serie storica di dati per la Grotta Azzurra di Capo Palinuro monitorata solo nel 1992, prima del presente lavoro.

La ricerca, svolta nel 2018, vuole fornire indicazioni sulla distribuzione dei popolamenti sessili presenti all'interno della grotta marina per poi confrontare i dati ottenuti con quelli risalenti al 1992, monitorando così lo stato di salute del sito attraverso valutazioni della variabilità temporale dei popolamenti sessili.

Lo studio dei popolamenti sessili di grotta è avvenuto attraverso l'analisi del ricoprimento biologico su immagini ottenute mediante campionamento fotografico, utilizzando descrittori non tassonomici, di tipo morfo-funzionali, che raggruppano gli organismi bentonici sessili in categorie ecologiche: le forme di crescita (growth forms) e le gilde trofiche (trophic guilds).

Mediante tali approcci ho voluto determinare i cambiamenti temporali di distribuzione degli organismi bentonici sessili grazie all'analisi dei campioni fotografici ottenuti durante l'indagine condotta nel 2018 e nel 1992.

Tali cambiamenti sono verosimilmente imputabili sia ad una pressione locale che globale.

Nella terrazza d'ingresso, settore oggetto del presente lavoro, l'unica pressione antropica locale che la grotta ha da sempre è l'entrata dei gozzi dei turisti poiché la costa è abbastanza naturale, così come la città di Palinuro non è molto sviluppata. Dunque, appare evidente come le visite turiste siano l'unica pressione in atto a cui, naturalmente, si aggiunge anche una pressione globale rappresentata dai continui cambiamenti climatici in atto (FIGURA 11).

L'andamento a lungo termine (1991-2019) delle anomalie nei valori massimi della temperatura superficiale del mare (STT) al largo di Palinuro (39 ° Lat. N e 14 ° Long. E) è stato tracciato dai dati satellitari della US National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA) (i dati possono essere liberamente scaricati da <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/>). Paradossalmente, nonostante i cambiamenti climatici in atto il 1992 è stato un anno più caldo rispetto al 2018 a Palinuro.

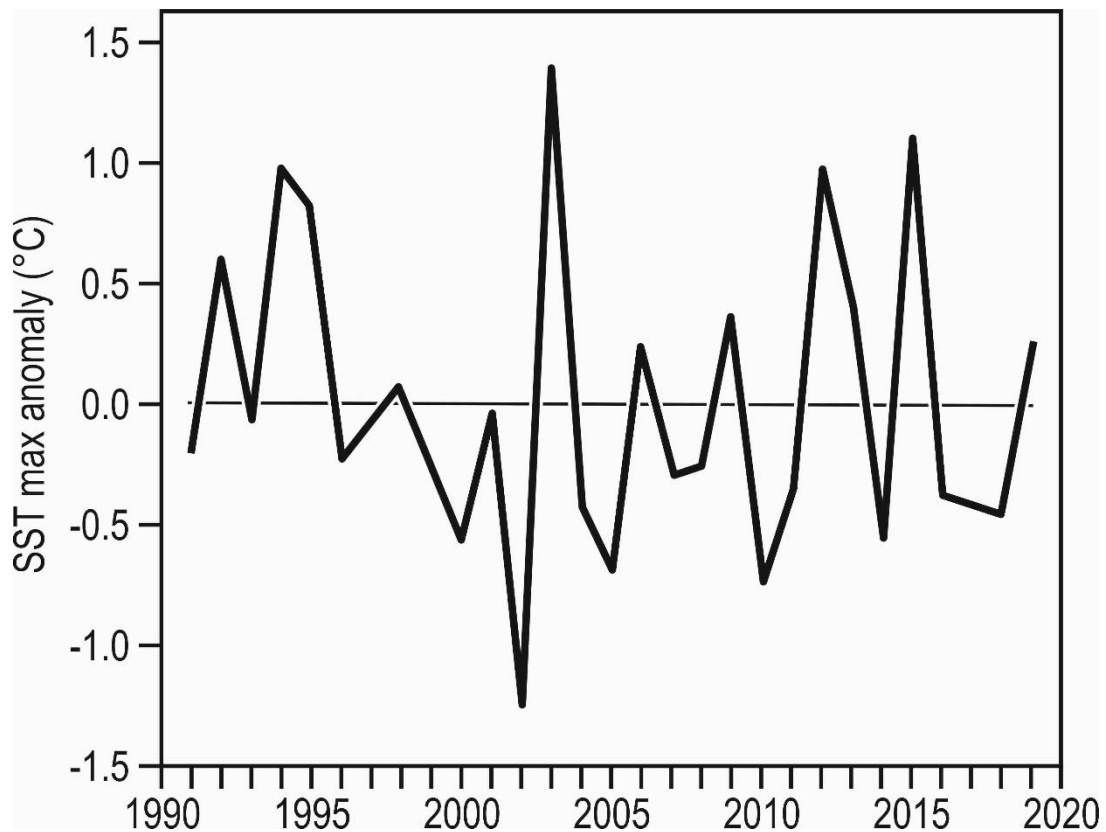


Figura 11: Anomalie termiche a Palinuro. SST = temperatura superficiale massima in termini di °C di anomalia rispetto alla media stagionale dal 1990-2020

(<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/>).

Nell'arco di 26 anni sono avvenute una serie di anomalie termiche che, dunque possono essere la causa di eventuali cambiamenti osservati nei popolamenti della grotta. Gli effetti di queste anomalie termiche sono stati descritti anche da Gambi & Barbieri (2010; 2012). Nel 2008, un evento di mortalità di massa, dovuto ad un'anomalia termica, è stato segnalato per la prima volta nella Grotta Azzurra di Capo Palinuro (costa del Cilento, SA) e ha interessato esclusivamente la popolazione locale di *Eunicella cavolini*, che però rappresenta uno degli organismi più abbondanti e vistosi all'interno della grotta (Gambi et al., 2010).

È noto che il riscaldamento globale e le pressioni umane locali combinano i loro effetti sul biota marino e identificare i principali motori del cambiamento osservato nelle comunità bentoniche è spesso difficile (Morri & Bianchi, 2001). Pertanto, la presente tesi ha l'obiettivo di valutare il cambiamento avvenuto nel tempo, attraverso l'utilizzo di descrittori non tassonomici, relazionandolo alle pressioni antropiche locali e i cambiamenti climatici in atto.

MATERIALI E METODI

Area di studio: Capo Palinuro

Capo Palinuro è un promontorio roccioso della costa della Campania Meridionale, nel comune di Palinuro e Centola in provincia di Salerno (SA) (FIGURA 12).

Il promontorio è costituito da rocce calcaree che scendono a strapiombo sul mare Tirreno, per circa 2 km e ospita oltre 30 cavità costiere di cui molte accessibili solo ai subacquei. Costituisce una delle aree speleologiche più studiate del nostro paese; caratterizzato da una forte presenza di centri di immersione che trovano proprio la loro principale giustificazione, oltre alla bellezza e ricchezza dei fondali, soprattutto nella presenza delle grotte sommerse.

Sia lungo le pareti che nelle numerose cavità sommerse di Capo Palinuro sono conservati i resti di cinque antichi livelli del mare, rappresentati da forme (terrazzi e solchi battenti) e depositi (sedimenti e cementati).

La maggior parte delle cavità di Capo Palinuro si è formata in ambiente subaereo attraverso processi di dissoluzione carsica, pertanto, la posizione di quelle sommerse è dovuta alla successiva risalita del livello del mare. Una delle principali caratteristiche delle grotte di Capo Palinuro è la presenza di numerosi tipi diversi di acque: marine, meteoriche fredde, profonde calde, sulfuree. L'azione, singola o combinata, dei vari tipi di acque, ha provocato nel tempo la formazione delle grotte, molte delle quali sono andate successivamente incontro a sommersione da parte del mare. Le esplorazioni sistematiche delle cavità subaeree sono state compiute in massima parte dal Circolo Idrologico e Speleologico Friulano all'inizio degli anni '80. Quelle sottomarine sono state esplorate in un primo tempo dallo stesso Circolo, e successivamente, negli anni fine '80-inizio '90, da subacquei operanti presso il Centro Pesciolino Sub (F. Barbieri, M. Oliverio, M. Alvisi).

Una peculiarità di alcune grotte presenti nel promontorio di Capo Palinuro è la presenza di sorgenti sulfuree ad alta temperatura (Alvisi & Colantoni, 1994). Si contano almeno 13 sorgenti di questo tipo in tutta l'area di Capo Palinuro, soprattutto tra il porto di Palinuro e Cala Fetente (Alvisi et al., 1994b). Le acque sulfuree sgorgano da sorgenti idrotermali che convogliano queste acque ricche di solfuri originatesi in profondità nella crosta terrestre.

Tra le numerose cavità che Capo Palinuro presenta, la Grotta Azzurra è quella più nota ed è ogni anno meta di subacquei e turisti che la visitano grazie anche ad un servizio di barche che fanno base nel vicino porto di Palinuro (Alvisi et al., 1994).

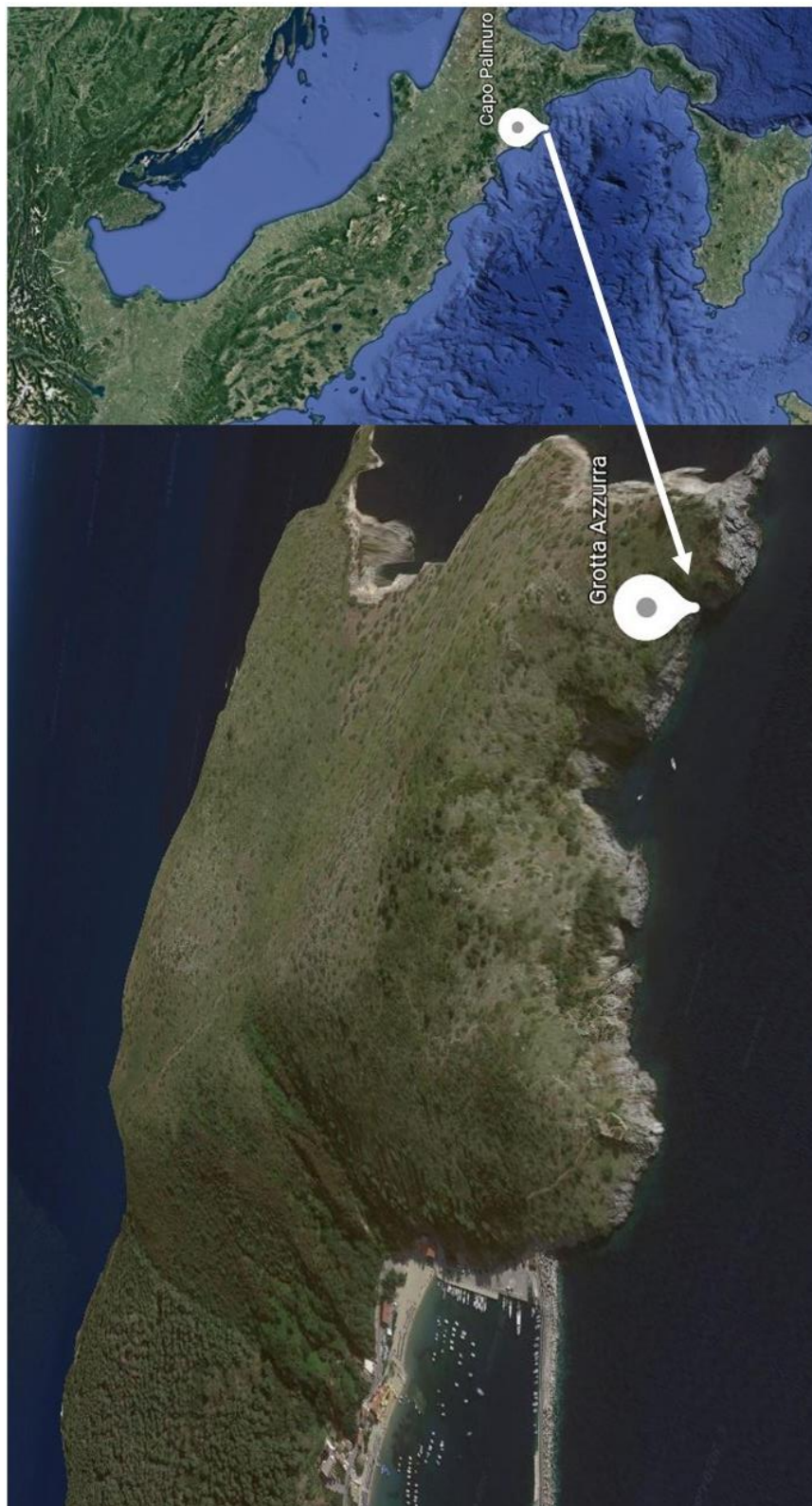


Figura 12: Posizione della Grotta Azzurra di Capo Palinuro (da Google Earth).

Grotta Azzurra: descrizione generale

La grotta Azzurra di Capo Palinuro è una larga cavità di circa 120,000 m³ in volume, che si apre lungo la costa di Punta della Quaglia, all'estremo nord-occidentale del Promontorio di Capo Palinuro e che raggiunge una profondità massima di quasi 33 m.

La grotta, oggetto di questo studio, deve il suo nome e il suo fascino allo spettacolare colore azzurro delle sue acque, un fenomeno che si verifica per merito della luce solare proveniente da un sifone subacqueo che dal fondo della grotta sbuca sul lato opposto di Punta Quaglia. Si caratterizza inoltre per la presenza di sorgenti idrotermali sulfuree, stalattiti e stalagmiti calcaree. Particolarmente suggestiva e simpatica una speciale formazione calcarea che affiora dall'acqua somigliante alla testa di un delfino (FIGURA 13).

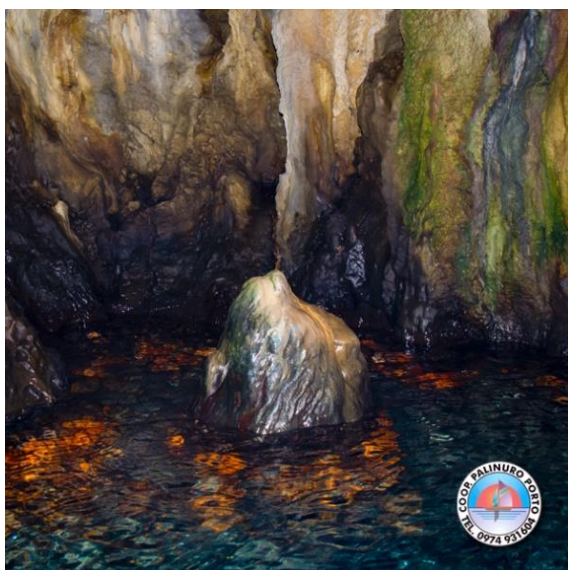


Figura 13: Formazione calcarea somigliante alla testa di un delfino e *Astroides calycularis* (da Palinuro Porto srl).

La grotta si sviluppa su diversi livelli, sia sommersi che emersi e vi si accede attraverso due opposti ingressi: il principale è in parte subaereo (percorribile in barca) e in parte subacqueo (-19,5 m) mentre il secondario è solo subacqueo (-33 m) (Colantoni et al., 1994).

L'ingresso principale è il punto di partenza per la visita della parte subacquea della cavità, infatti, al termine del tratto percorribile in barca si approda in una galleria ampia alcuni metri e profonda 19,5 m che conduce nella parte centrale della grotta sommersa (Alvisi et al., 1994).

La galleria è uno dei punti più suggestivi della grotta: subito sotto il pelo dell'acqua si nota un coloratissimo tappeto arancione di celenterati bentonici (*Astroides calycularis*, FIGURE 13-14) che insieme al chiarore azzurro del secondo ingresso ed alle tinte grigioverdi delle pareti emerse produce uno spettacolo policromatico d'incomparabile bellezza (Alvisi et al., 1994).

Figura 14: Colonie di *Astroides calycularis*, con i polipi dal caratteristico colore aranciato, nella Grotta Azzurra di Capo Palinuro (SA). I polipi solitari di colore giallo, visibili sulla sinistra dell'immagine, appartengono invece a *Leptopsammia pruvoti* (Foto di C.N. Bianchi & C. Morri).



La galleria emersa si mantiene sub-orizzontale per circa 20 m fin quando entra in un ampio salone centrale: da qui il fondo digrada velocemente tra grossi massi di crollo fino a ritornare sub-orizzontale ad una quota di -29,5 m dalla quale si accede all'ampio portale subacqueo del secondo ingresso.

Dal lato sud-est della sala centrale e al termine del tunnel principale si trova un laghetto, a forma di L e le cui acque hanno un aspetto biancastro lattiginoso, da cui si diparte un pozzo allagato che porta verticalmente alla sottostante sala, definita Sala della Neve (FIGURA 15).

La Sala della Neve è caratterizzata dalla presenza di alcune sorgenti sulfuree (acque ricche di acido solfidrico) e sono proprio quest'ultime le responsabili del colore biancastro-lattiginoso assunto dalle acque del laghetto. La temperatura dell'acqua nelle zone sulfuree è superiore rispetto a quella tipica di grotta (19°C) e arriva a raggiungere valori costanti di 23-24°C. Queste acque, essendo calde e non salate e quindi meno dense, 'galleggiano' sull'acqua marina, fluendo contro la volta della cavità, mentre all'interfaccia tra acque marine e acque idrotermali si forma una chemiocline permanente (FIGURA 16). L'acqua sulfurea si stratifica rispetto all'acqua di mare dando luogo a una netta differenza nei popolamenti bentonici: dove è presente acqua di mare vi è ricoprimento biologico caratteristico, dove invece è presente quella sulfurea, presso la volta della cavità, è presente uno strato bianco di solfobatteri (Alvisi et al., 1994a).

Le pareti della cavità interessate dall'acqua sulfurea sono ricoperte da una spessa pellicola, talora molto sfilacciata, bianca di solfobatteri e flocculi che spesso si staccano dal soffitto per effetto delle bolle scaricate dai subacquei. Ne deriva una sorte di nevicata che dà il nome alla sala. Apparentemente, questi fiocchi di materia organica costituiscono il nutrimento di una ricca comunità ad elevata biomassa, sia di detritivori (*Ophioderma longicaudum*) sia di filtratori (*Pinna nobilis*, *Antedon mediterranea*, policheti sabellidi), vivente sul pavimento della sala (Cinelli et al., 1994).

Sin dalle prime esplorazioni condotte all'interno della Grotta Azzurra ci si rese conto della presenza di una ricca fauna, caratteristica del tutto insolita. Tipicamente le grotte sottomarine presentano popolamenti faunali molto scarsi e sparpagliati con una graduale diminuzione del numero di specie e del ricoprimento degli organismi lungo il gradiente esterno-interno. Diversi autori identificarono la poca disponibilità di cibo come il fattore responsabile di questo impoverimento (ipotesi della deplezione trofica). Per l'assenza di luce mancano i produttori primari e le grotte marine sono zone di sola produzione secondaria.

È stato ipotizzato (Abbiati et al., 1992), che l'insolita ricchezza faunale della Grotta Azzurra di Capo Palinuro è correlata con la presenza di sorgenti sulfuree, e sfrutta la produzione primaria chemiosintetica di batteri ossidanti lo zolfo. Le aree che sfruttano queste reazioni di chemiosintesi sono note per essere habitat biologicamente complessi e molto produttivi (Tarasov et al., 1990).

Così come la ricchezza specifica, un altro fenomeno che sembra essere correlato alla presenza di acque sulfuree, è la dimensione di alcuni organismi. È stato osservato che gli esemplari di alcune specie che vivono in grotta sono apparentemente più grandi di quelli della stessa specie che vivono fuori dalla grotta o vicino all'ingresso (Abbiati et al., 1992; Cinelli et al., 1994).

Gli organismi filtratori non soffrono della deplezione trofica grazie alla produzione primaria chemiosintetica che migliora localmente le condizioni trofiche (Southward, 1989). Due delle specie tipiche di tale grotta che hanno mostrato dimensioni maggiori se confrontati con esemplari che vivono fuori o dentro la grotta, ed in particolare nelle zone più confinate, sono stati: *Geodia cydonium* e il corallo *Astroides calycularis* (Morri et al., 1994). Ciò fornisce alcuni indizi di una migliore condizione trofica della grotta garantita dal fatto che questi esemplari potrebbero sfruttare, come fonte di energia supplementare, la produzione primaria chemiosintetica da parte dei batteri che ossidano lo zolfo: le spugne sono note per essere in grado di nutrirsi di batteri (Reiswig, 1975) e i coralli possono utilizzare diverse fonti trofiche (Schlichter, 1982). Tuttavia, non tutti gli organismi sembrano nutrirsi di materia batterica:

così diversi effetti delle sorgenti idrotermali, come una maggiore circolazione dell'acqua nelle parti più confinate della grotta, sono stati suggeriti come fattori che producono la maggiore ricchezza biotica nella Grotta Azzurra (Bianchi et al., 1998).

Tra le specie rinvenute nella grotta Azzurra di Capo Palinuro si ha: *Nausithoe planulophora* (scifozoa) e *Pachycerianthus solitarius* (ceriantario) (Morri & Bianchi, dati non pubblicati). Altre specie di madreporari sono *Astroides calycularis*, *Caryophyllia inornata*, *Caryophyllia smithii*, *Hoplangia durotrix*, *Leptopsammia pruvoti*, *Madracis pharensis*, *Paracyanthus pulchellus*, *Phyllangia mouchezii*, *Polycyanthus muelleriae* (Bianchi & Morri, 1994; Morri, dati non pubblicati).

Come discusso nelle note introduttive, le comunità di grotta risentono dell'influenza di fattori ambientali (luce, idrodinamismo e deplezione trofica) e per tal motivo si distribuiscono in funzione di tali parametri.

Basandosi su misure di corrente e su un'accurata topografia, che ha permesso di ricostruire in dettaglio la geometria della cavità, Bianchi et al. (1998) hanno potuto calcolare il bilancio idrico della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Nelle parti a tunnel della grotta, ovvero nel Tunnel d'Ingresso e nel Salone Centrale, il ricambio dell'acqua è causato dal flusso tra i due ingressi contrapposti. Con mare leggermente mosso, si ha completo ricambio dell'acqua in meno di mezz'ora; in condizioni di calma piatta, il ricambio completo può richiedere alcune ore (TABELLA 5). Nella Sala della Neve, a fondo cieco, il ricambio dell'acqua avviene solamente per diffusione. Una particella d'acqua che viaggi lungo l'intero perimetro della Sala della Neve impiega più di due ore e mezzo con mare calmo, ma solo un quarto d'ora in presenza di una velocità di corrente di 10 cm s^{-1} . Se si accetta che il tasso di ricambio idrico sia un'adeguata stima del confinamento, i calcoli di Bianchi et al. (1998) indicano che nemmeno la parte a fondo cieco della Grotta Azzurra, cioè la Sala della Neve, è confinata. Questo risultato suggerisce che il confinamento non dipende solo dalla forma della cavità (cioè a fondo cieco piuttosto che a tunnel) ma anche dalla taglia: grotte grandi con sale ampie risentono in maniera minore del confinamento, in quanto probabilmente la presenza di grandi masse d'acqua permette l'instaurarsi di gradienti di densità e di correnti interne.

Tabella 5: Tempi di ricambio idrico calcolati nelle diverse zone della Grotta Azzurra in funzione della velocità di corrente (Bianchi et al., 1998).

	Turn-over time		
	$V = 10 \text{ cm s}^{-1}$	$v = 5 \text{ cm s}^{-1}$	$v = 1 \text{ cm s}^{-1}$
Tunnel d'Ingresso (3,400 m ³)	6' 26"	12' 53"	1 h 03'
Salone Centrale (34,600 m ³)	14' 21"	28' 41"	2 h 23'
Sala della Neve (8,000 m ³)	15' 30"	31'	2 h 35'

Anche la luce agisce sul popolamento di grotta sia direttamente sia indirettamente, favorendo la crescita delle alghe. Secondo Riedl (1966), il limite per lo sviluppo delle alghe si situa intorno a 0.5-1% dell'illuminazione di superficie. Recenti osservazioni e misure effettuate da Southward et al. (1996) presso l'ingresso della Grotta Azzurra di Capo Palinuro (FIGURA 17), indicano che con illuminazione pari al 17 % di quella di superficie, i popolamenti sono ancora dominati da alghe fotofile, in particolare da feoficee (*Dictyota* spp.); al 3 %, il popolamento algale diventa sciafilo, con dominanza di rodoficee (*Peyssonnelia* spp. e corallinacee incrostanti), mentre al di sotto dello 0.8 % il popolamento è esclusivamente animale, con spugne, idroidi, madreporari, briozoi ed ascidie coloniali.

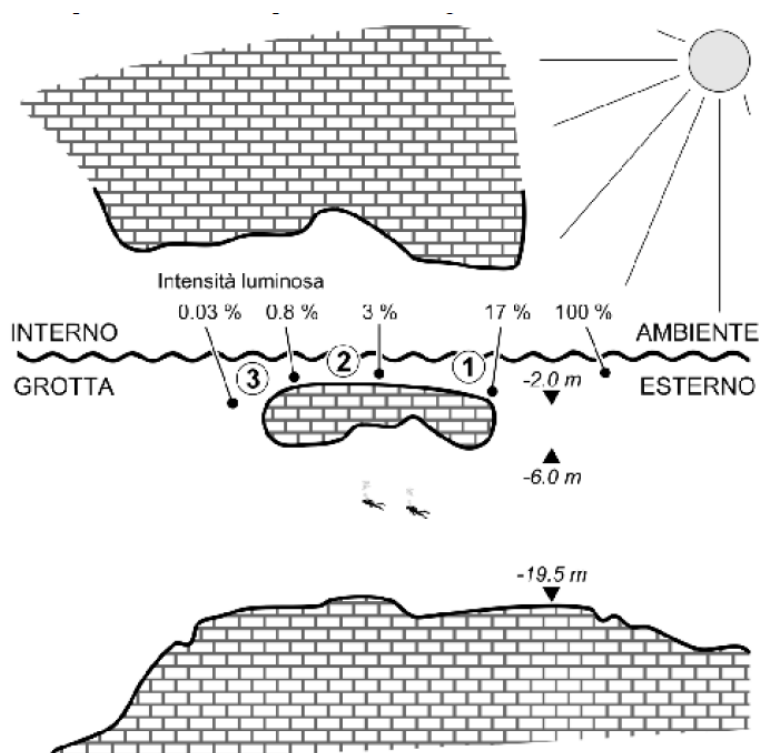


Figura 17: Zonazione biologica in relazione all'illuminazione all'ingresso della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. L'intensità luminosa è espressa come percentuale del valore di superficie. 1. comunità ad alghe fotofile; 2. popolamento algale sciafilo (rodoficee incrostanti); 3. popolamento esclusivamente animale (Morri & Bianchi, 2003).

Non tutta la luce che arriva alla superficie del mare penetra al di sotto della superficie stessa condizionandone la possibilità, soprattutto delle alghe, di colonizzare anche gli ambienti più profondi e, per analogia, anche le porzioni abbastanza oscure delle grotte sottomarine.

Le misure di luce effettuate nella Grotta Azzurra di Capo Palinuro (FIGURA 18) dimostrano inequivocabilmente quanto diminuisca drasticamente la luce misurata dall'imboccatura alla parte interna della grotta.

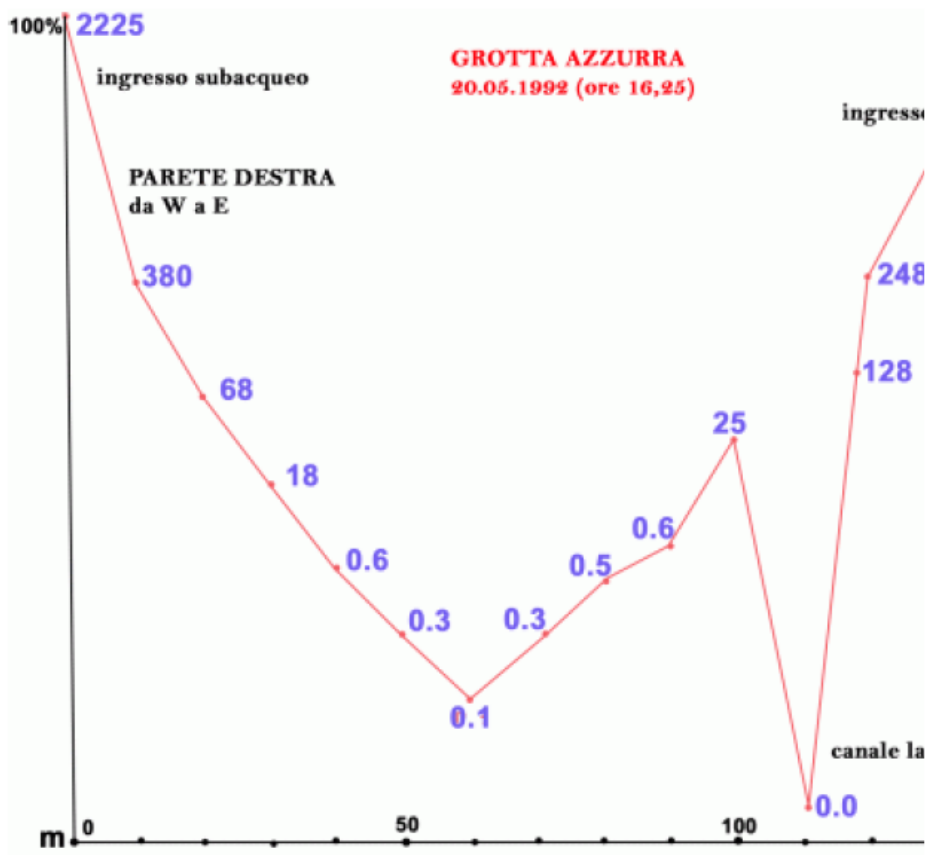


Figura 18: Misure di luce effettuate alla Grotta Azzurra di Capo Palinuro (SA) lungo il gradiente di profondità dall'ingresso principale a quello secondario (Cinelli et al., 1994).

Campionamenti preliminari delle comunità bentoniche della Grotta Azzurra, hanno permesso di identificare le principali zone biologiche a confinamento crescente (Abbiati et al., 1992; Cinelli et al., 1994).

- Zona 0, immediatamente al di fuori della grotta è caratterizzata dalla presenza di densi popolamenti algali fotofili (dominati da *Dictyota dichotoma*).
- Zona 1, all'entrata della grotta nella quale si assiste a una riduzione dell'illuminazione e una comparsa di alghe rosse incrostanti e sciafile.
- Zona 2, salone centrale, la luce è estremamente debole e non sono presenti alghe. A causa della sua forma a tunnel le correnti sono sensibili ed è probabile che lo scambio idrico sia efficiente. Questo può spiegare la ricchezza e la composizione dei popolamenti bentonici in questa zona, dominata dai filtratori passivi come *Eunicella cavolini* e il grande idroide *Eudendrium racemosum*.
- Zona 3, zona di transizione identificabile in alcune parti della grotta completamente oscura, dove il ricoprimento animale si riduce come anche la ricchezza specifica.
- Zona 4, parte più interna della grotta anch'essa completamente buia corrisponde alla cosiddetta Sala della Neve. Qui si accumulano acque calde (e quindi meno dense) e sulfuree a formare una cupola sulla volta, mentre sopra il termoclino (fortemente percettibile dal subacqueo) è presente una mat di batteri *Beggiatoa* filamentosi (FIGURA 19) (Bianchi et al., 1994).

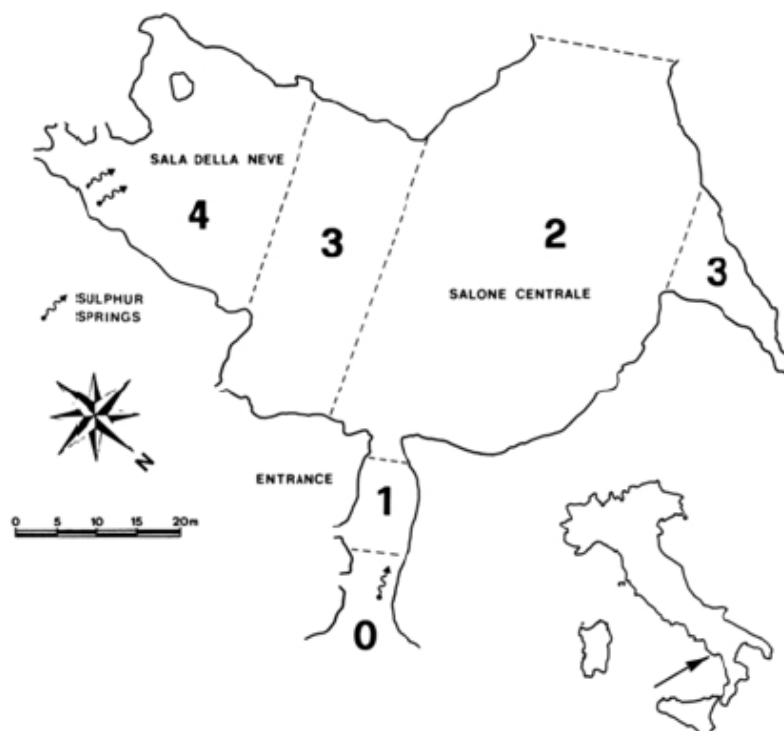


Figura 19: Mappa della Grotta Azzurra di Capo Palinuro: i numeri indicano le diverse le maggiori zone biologiche (da Alvisi et al., 1994b).

Rilevamento subacqueo

Il monitoraggio della Grotta Marina di Capo Palinuro (SA) è stato svolto attraverso rilevamenti fotografici. In ambiente di grotta è infatti risultata particolarmente indicata la tecnica fotografica, la quale, usando strumenti semplici ed efficaci, è diventata un mezzo indispensabile per le ricerche di bionomia bentica (Pansini & Pronzato, 1982). Tale tecnica, presenta una serie di vantaggi e svantaggi, come descritto nella TABELLA 6. Oltre che a scopo di documentazione, la fotografia subacquea trova ampie applicazioni nella valutazione delle modalità di distribuzione spaziale e/o di evoluzione temporale di popolazioni e/o popolamenti (Pronzato, 1997).

Tabella 6: Vantaggi e svantaggi della tecnica fotografica in ambiente acquatico
(Bianchi et al., 2003).

VANTAGGI	Valutazioni obiettive. Ripetibilità. Collezione di riferimento. Possibilità di automazione. Rapidità di lavoro sott'acqua. Ampia area di campionamento. Impatto nullo sull'ecosistema.
SVANTAGGI	Scarsa precisione tassonomica. Difficoltà di lettura ed interpretazione dell'immagine a posteriori.
IMPIEGO	Studi di cicli o variazioni temporali. Lavori a profondità elevate.

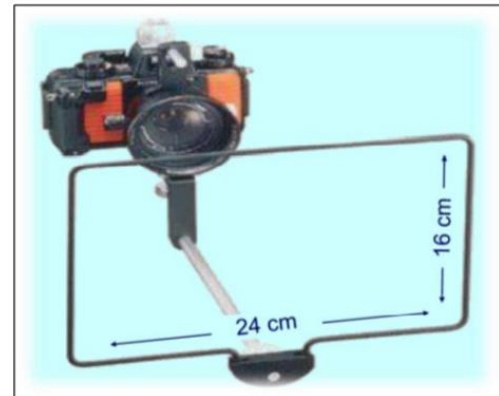
I rilevamenti fotografici sono stati eseguiti nel maggio del 2018 a distanza di 26 anni lungo transetti fotografici illustranti l'intero ambiente e con le stesse modalità adottate nel maggio del 1992 al fine di ottenere dati tra loro confrontabili.

I 4 transetti esaminati nei rispettivi anni sono (Mori, 1994) (FIGURE 20-21):

1. ORIZZONTALE NORD (ON)
2. ORIZZONTALE SUD (OS)
3. GIRO suddiviso in:
 - a. PARETE (GP)
 - b. SALA NEVE (GN)
 - c. INGRESSO (GI)
4. PARETE PROFONDA

Tali transetti sono stati effettuati per mezzo di immersioni subacquee con autorespiratore ad aria, l'utilizzo di una macchina fotografica subacquea, e, per avere una costante unità di campionamento, un riquadro con le stesse dimensioni di quello utilizzato nel 1992 (24 cm x 16 cm) (George, 1980) (FIGURA 22).

Figura 22: Riquadro 24 cm x 16 cm utilizzato come unità di campionamento (da George, 1980).



La forma e la taglia dell'unità di campionamento influenzano l'accuratezza e la precisione delle stime, la percezione della realtà ecologica esaminata e l'efficienza del programma di studio (Bianchi, 2003). Per la caratterizzazione dei popolamenti sono stati presi in considerazione, in particolare, il ricoprimento percentuale del fondo, con particolare riferimento ai gruppi trofici ed alle forme di crescita dominanti ed il ricoprimento totale del substrato (distinto in sedimento e substrato nudo).

I due transetti, oggetto della presente tesi, ON e OS, si trovano nel terrazzino d'ingresso. Una zona soggetta ad una pressione locale esercitata dal passaggio dei gozzi che frequentemente portano i turisti a visitare la grotta. A cui si aggiunge anche una pressione globale rappresentata dai continui cambiamenti climatici in atto. Tali transetti, nel 2018, sono stati condotti, rispettivamente, in entrata e uscita (viceversa nel 1992) ad una profondità di circa 2 m. Al termine del percorso si sono ottenuti 14 rilevamenti fotografici per ON e 15 per OS (dati inversi nel 1992).

Il GP percorre la parete e la seconda uscita, il GN si dirige dalla zona più interna della sala della neve alla seconda uscita e, il GI dall'esterno dell'entrata principale all'interno. Questi transetti sono stati eseguiti ad una profondità media di 10m e sono composti rispettivamente da 8, 19 e 24 rilevamenti fotografici. Il transetto definito "parete profonda" (PP) si estende da una profondità di 24 m fino a 0 m ed è costituito da 37 immagini.

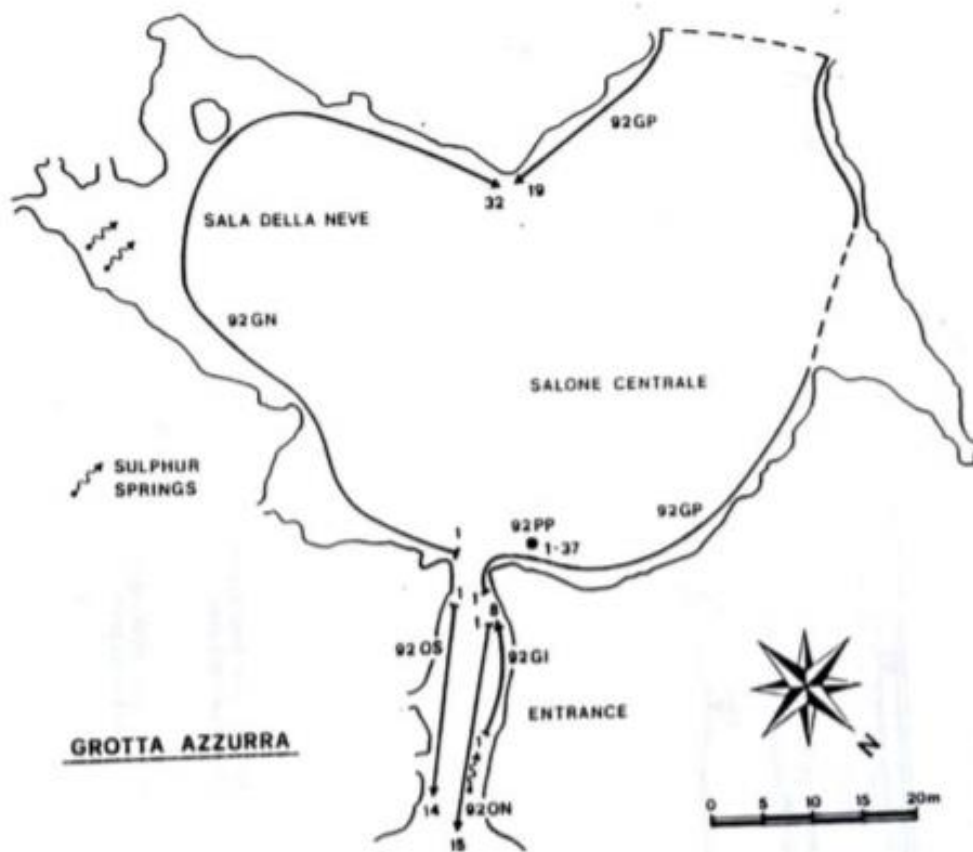


Figura 20: Grotta Azzurra: rappresentazione grafica dei transetti fotografici (da Mori, 1994).

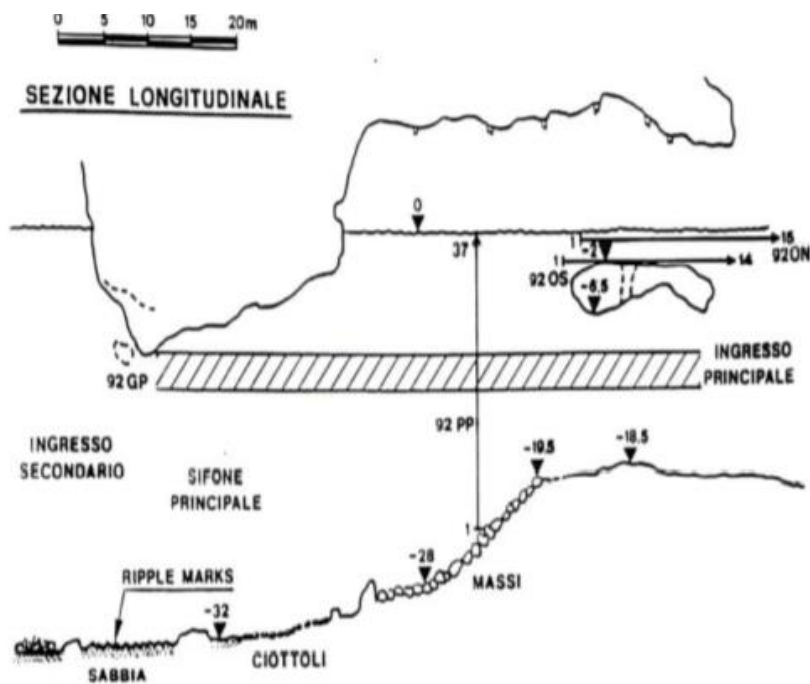


Figura 21: Grotta Azzurra: Sezione longitudinale dell'ingresso principale e rappresentazione grafica del transetto batimetrico "PP" (da Mori, 1994).

Analisi delle immagini: ricoprimento percentuale

I rilevamenti fotografici, ottenuti nel 2018 (come descritto nel paragrafo precedente), sono stati analizzati e, per ciascuna fotografia, è stata calcolata il cover % dei vari organismi utilizzando descrittori non tassonomici: forme di crescita e gilde trofiche.

Per cover intendiamo la porzione di substrato non nudo, vale a dire coperta da un insediamento biotico. È un attributo del fondale; per definizione, non può mai essere superiore al 100 %. Questo metodo risulta essere molto rapido e semplice ma anche soggettivo.

Per facilitare la stima della copertura è stata utilizzata una guida riportante degli esempi di percentuali di ricoprimento (FIGURA 23). Esistono anche dei software che consentono di analizzare le immagini, ad esempio NIH-image.

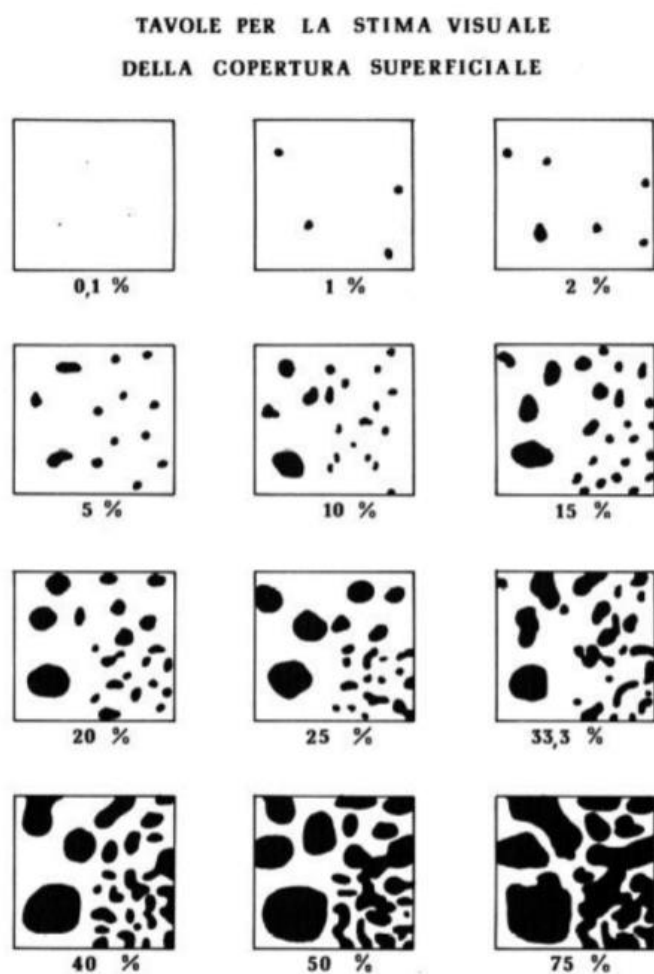


Figura 23: Tavole per la stima visiva della copertura % degli organismi (materiale reperito dal corso di Scienze Subacquee).

A ciascuna forma di crescita e gilda trofica è stata dunque attribuita una percentuale di ricoprimento in ciascuna foto (FIGURA 24), il tutto tabulato su Excel. Parallelamente sono stati recuperati i dati dei corrispettivi transetti dal lavoro svolto nel 1992 e riportati anch'essi su Excel. Sono state dunque realizzate due matrici (una per le forme di crescita e una per le gilde trofiche) impostate come mostrato nella FIGURA 25 riportata a titolo d'esempio.

Oltre a stimare il ricoprimento percentuale delle forme di crescita e delle gilde trofiche, è stata anche stimata la percentuale degli organismi morti e dei fattori abiotici: sedimento e substrato nudo.

- Substrato nudo (bare substrate): non è presente alcun organismo, si riconosce la roccia madre sullo sfondo;
- Sedimento: non è presente alcun organismo, si riconosce la sabbia sullo sfondo.

ANNO	FOTO	DESCRITTORI NON TASSONOMICI (FORME DI CRESCITA – GILDE TROFICHE)	SOMMA
1992	ON1		
	ON2		
	ON3		
		
	OS1		
	OS2		
	OS3		
		
	2018	ON1	
	ON2		
	ON3		
		
	OS1		
	OS2		
	OS3		
		

Figura 25: Impostazione matrice Excel iniziale costruita sia per le forme di crescita che gilde trofiche.

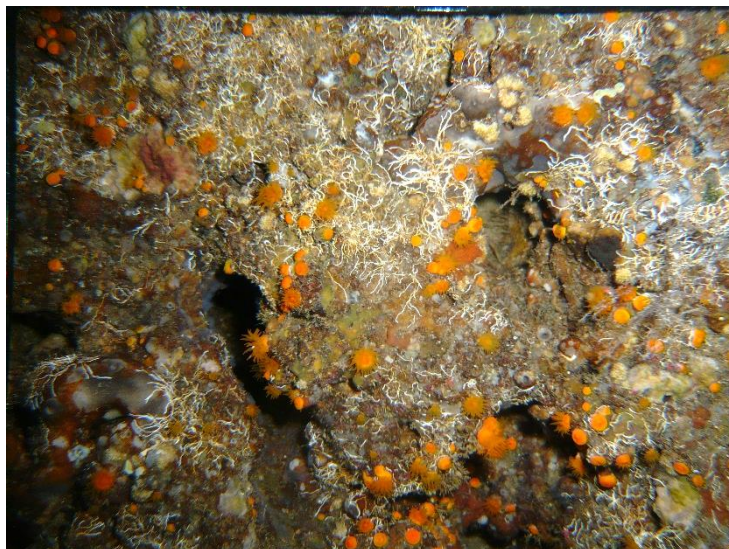


Figura 24: Esempi di immagini fotografiche analizzate (Montefalcone, 2018).

Classificazione delle forme di crescita

Le forme di crescita utilizzate per tale studio sono state (FIGURA 26):

1. **Perforatori:** organismi capaci di perforare la roccia carbonatica, visibili solo in parte (quando estroflettono l'oscuro).
2. **Massivi emisferici determinati ($h=r$):** organismi con crescita nelle tre dimensioni, solitamente attaccati al substrato lungo la maggior parte dell'area basale, di forma regolare.
3. **Massivi appiattiti indeterminati ($h<r$):** organismi con crescita principale sul piano, senza una forma determinata e regolare, solitamente attaccati al substrato lungo la maggior parte dell'area basale.
4. **Massivi cupoliformi indeterminati ($h>r$):** organismi con crescita principale in altezza, con una forma tipicamente cupoliforme.
5. **Massivi cilindrici prostrati indeterminati ($h\ll r$):** organismi con crescita sul piano e con andamento prostrato, senza una forma determinata e regolare.
6. **Laminari prostrati:** sono le alghe rodoficee incrostanti;
7. **Laminari eretti:** sono tutte le macroalghe con portamento eretto e forma appiattita e laminare, e i briozoi retoporiformi.
8. **Arborescenti:** forme erette, solitamente regolarmente ramificate, con una zona ristretta di attacco al substrato.
9. **Cespugliosi:** organismi a portamento cespuglioso.
10. **Incrostanti determinati:** organismi con portamento incrostante bidimensionale, aderenti al substrato, con forma del corpo regolare.
11. **Stoloniali (runners):** sono organismi incrostanti con forma lineare o ramificata parallela e aderente al substrato.
12. **Incrostanti indeterminati:** organismi con portamento incrostante bidimensionale, aderenti al substrato con forma del corpo irregolare e indeterminata.
13. **Rampicanti (vines):** forme erette lineari o irregolarmente ramificate, semierette o ascendenti con una o più zone ristrette di attacco al substrato.

In questo studio, oltre a queste categorie che sono quelle utilizzate nei lavori precedenti (Parravicini et al., 2010; Nepote et al., 2017; Montefalcone et al., 2018; Sempere-Valverde et al., 2019), sono state considerate altre due categorie: *Astroides calycularis* e *Parazoanthus axinellae*. Si tratta di due cnidari sessili che rientrano tra i massivi emisferici determinati; tuttavia, in questo studio sono stati analizzati separatamente in quanto, poiché facilmente riconoscibili e tipici degli ambienti di grotta, hanno permesso di evidenziare eventuali cambiamenti nel popolamento delle due specie nei due anni considerati.

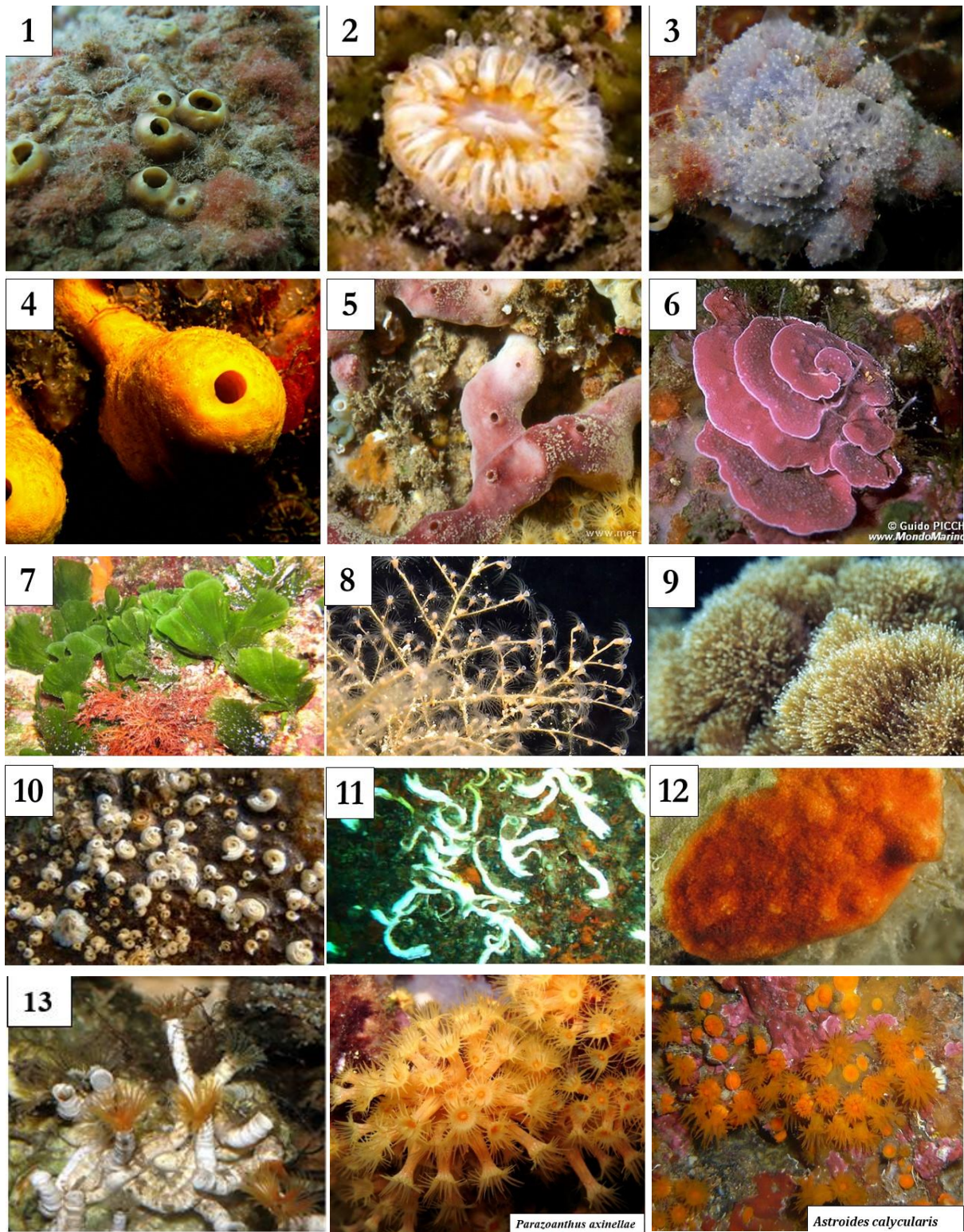


Figura 26: Forme di crescita: 1_perforatori; 2_massivi emisferici determinati; 3_ massivi appiattiti indeterminati; 4_ massivi cupoliformi determinati; 5_ massivi cilindrici prostrati; 6_laminari prostrati; 7_laminari eretti; 8_arborescenti; 9_cespugliosi; 10_incrostanti determinati; 11_stoloniali; 12_incrostanti indeterminati; 13_rampicanti; specie caratteristica: *Parazoanthus axinellae* e *Astroides calycularis* .

Classificazione delle gilde trofiche

Le gilde trofiche utilizzate per tale studio sono state (FIGURA 27):

1. **Autotrofi**: tutte le macroalghe fotosintetiche;
2. **Filtratori passivi** (es. cnidari): trattengono il particolato sospeso nell'acqua e veicolato dalle correnti;
3. **Filtratori attivi ciliati lofoforati** (es. briozoi): organismi che generano la corrente nutrizionale grazie a movimenti di sistemi di ciglia o di flagelli organizzati in un organo speciale detto lofoforo;
4. **Filtratori attivi ciliati non lofoforati** (es. serpulidi e spirorbidi): organismi che generano la corrente nutrizionale grazie a movimenti di sistemi di ciglia o di flagelli disposti lungo le docce;
5. **Filtratori misti** (es. crostacei cirripedi): cambiano strategia trofica in funzione delle condizioni idrodinamiche e della concentrazione di particolato sospeso;
6. **Pompanti attivi non muscolarizzati** (poriferi): organismi che generano la corrente nutrizionale tramite camere apposite;
7. **Spugne mixotrofe**: spugne che ospitano organismi endosimbionti fotosintetici, come *Petrosia ficiformis*;
8. **Pompanti attivi muscolarizzati** (ascidie e bivalvi): organismi che generano la corrente nutrizionale grazie ad apposite camere con funzione di pompa potenziata dalla muscolarizzazione delle stesse.

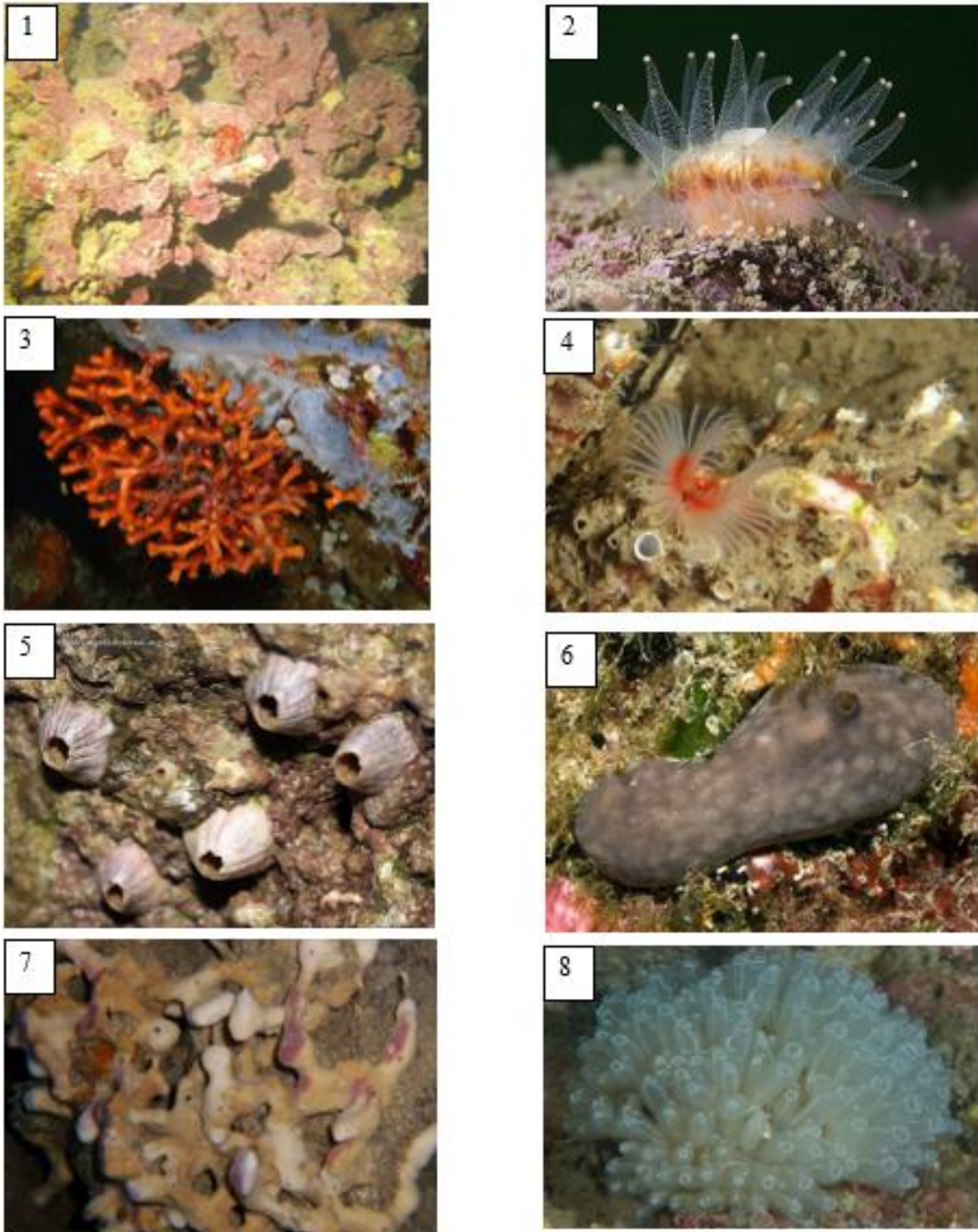


Figura 27: Gilde trofiche: 1_autotrofi; 2_filtratori passivi; 3_filtratori attivi ciliati lofoforati; 4_filtratori attivi ciliati non lofoforati; 5_filtratori misti; 6_pompanti attivi non muscolarizzati; 7_ spugne mixotrofe; 8_ pompanti attivi muscolarizzati.

Disegno di campionamento e analisi statistica dei dati

All'interno del settore entrata (VEDI FIGURA 20) sono stati scelti cinque siti di campionamento posti a distanza crescente dall'ingresso principale della grotta. Ciascun sito è rappresentato da due stazioni di campionamento (Nord e Sud) ognuna delle quali contenente 3 repliche fotografiche condotte sempre alla stessa profondità (2 m) (FIGURA 28).

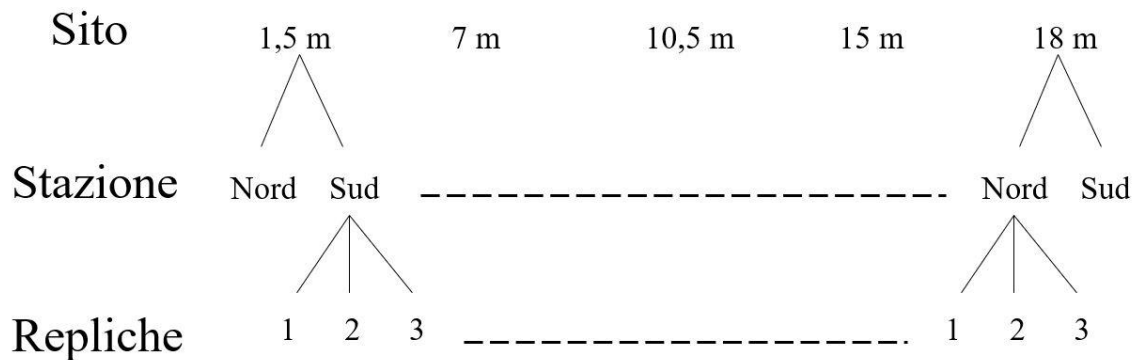


Figura 28: Disegno di campionamento condotto nella Grotta Azzurra di Capo Palinuro (2018): sito_ distanza (m) dall'ingresso principale della grotta; stazione_ transetto orizzontale nord e sud; repliche_ rilevamenti fotografici.

Anche se operativamente, come descritto poco fa, sono state scelte due stazioni (nord e sud) per ogni sito queste, in fase di analisi ed elaborazione dati, sono diventate due repliche di un'unica realtà. Pertanto, mediando tra loro i valori di cover delle sei repliche di ciascun sito (3 repliche a Nord e 3 a Sud) si è ottenuto un valore medio più o meno deviazione standard per ciascun descrittore, sia delle forme di crescita che delle gilde trofiche.

Ciò ha permesso di individuare cinque stazioni sequenziali con un gradiente esterno-interno (1_stazione interna, 5_stazione esterna) misurato come distanza (m) dall'ingresso principale della Grotta Azzurra di Capo Palinuro (FIGURA 29).

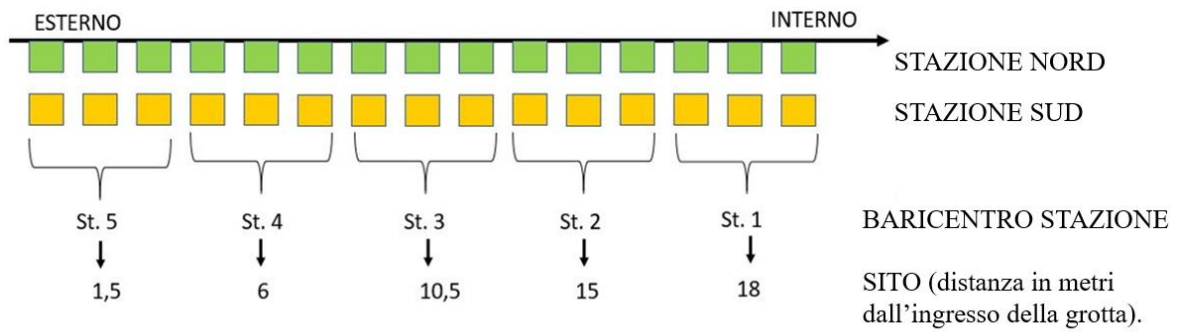


Figura 29: Stazioni di campionamento sequenziali con gradiente esterno-interno; 5_ stazione esterna; 1_ stazione interna.

Lo stesso schema è stato applicato per i corrispettivi i rilevamenti fotografici del 1992 per poter procedere con le analisi di confronto.

Procedendo in tal modo, si sono costruite altre due matrici Excel (una per le gilde trofiche e una per le forme di crescita) riportanti per entrambi gli anni, il valor medio di ogni descrittore non tassonomico ciascuno corrispondente ad una singola stazione (FIGURA 30).

**DESCRITTORI NON TASSONOMICI
(FORME DI CRESCITA- GILDE TROFICHE)**

ANNO	STAZIONE	
1992	1	
	2	
	3	
	4	
	5	
2018	1	
	2	
	3	
	4	
	5	

Figura 30: Impostazione matrice Excel finale utilizzata per le analisi di confronto.

I dati di ricoprimento ottenuti dalle foto sono stati trasformati con il software Excel tramite la formula $\arcsen\sqrt{x}/100$, in modo da normalizzarli e poter procedere le analisi statistiche (Legendre & Legendre, 1998).

Dopo la trasformazione dei dati sono state costruite due matrici di somiglianza basate sull'indice di Bray-Curtis (Anderson, 2001). La configurazione multivariata di entrambi i set di dati, gilde trofiche e forme di crescita, è stata visualizzata tramite ordinazione di scala multidimensionale non metrica (nMDS). Questo tipo di analisi permette di mappare i campioni in uno spazio a due dimensioni tale per cui le distanze fra i campioni ne riflettano la dissimilarità. Per effettuare questo tipo di analisi è stato utilizzato il software R.

Il gradiente di luce è stato evidenziato con un grafico a dispersione riportante i punteggi dell'asse 1 dell'nMDS (corrispondenti al gradiente esterno-interno delle comunità bentoniche sessili della Grotta Azzurra) in funzione della percentuale di luce. I dati di intensità luminosa utilizzati si riferiscono, sia per il 1992 che per il 2018, alle misure effettuate da Southward et al. (1996) presso l'ingresso della Grotta Azzurra di Capo Palinuro (FIGURA 17).

La matrice tridimensionale dei descrittori \times stazioni \times anni è stata elaborata come una matrice bidimensionale descrittori \times [stazioni \times anni] o 'matrice degli stati', in quanto descrive lo 'stato' mostrato negli anni dalle singole stazioni (Gambi & Fresi, 1982) per tracciarne le traiettorie temporali.

È stato quindi ottenuto un plot con le cinque stazioni del 1992 e del 2018 insieme a dei punteggi dei due assi di ciascun punto corrispondenti ai centroidi di ogni stazione. Più campioni si hanno e più sarà difficile posizionare i punti nello spazio in modo che queste distanze riflettano le loro dissimilarità. Questo può provocare uno stress, o distorsione, nel plot motivo per cui è stato valutato la bontà di adattamento della regressione (R^2). Per visualizzare lo stress associato al plot dell'MDS si utilizzano gli shepard plot (o stress plot) che sono delle rappresentazioni nelle quali viene posizionato sull'asse delle x la dissimilarità calcolata tra i campioni e sull'asse delle y la distanza che è stata inserita nell'MDS. Si osserva come si distribuiscono i punti rispetto a queste due variabili e si valuta la bontà della regressione: più i punti sono distribuiti sulla diagonale e più la rappresentazione sarà quella di una buona regressione. Il valore di stress da un'indicazione di quanto la nostra rappresentazione sia corretta (<0.05 rappresentazione eccellente; <0.1 rappresentazione buona; <0.2 rappresentazione utile ma da prendere con cautela; > 0.3 rappresentazione non significativa).

È stata eseguita un'analisi permutazionale della varianza (PERMANOVA) al fine di confrontare i due anni di campionamento (1992 e 2018) e verificare l'ipotesi nulla che i centroidi delle stazioni definiti dallo spazio di misura siano equivalenti per entrambi gli anni.

Parallelamente è stata calcolata, sia per le forme di crescita sia per le gilde trofiche, la deriva temporale per ogni stazione; per fare ciò è stata avviata un'analisi statistica mantenendo separate le due stazioni di campionamento (Nord e Sud) per entrambi gli anni. È stato quindi ottenuto un nuovo plot con le stazioni nord e sud del 1992 e del 2018 insieme e dei punteggi dei due assi di ciascun punto, ovvero di ciascuna stazione. Questi punteggi sono stati utilizzati per calcolare la deriva temporale per ciascuna stazione, nord e sud, nei rispettivi anni utilizzando il teorema di Pitagora. È stata dunque calcolata la deriva temporale media e la deviazione standard. Con i dati così ottenuti è stato costruito un istogramma che mostra graficamente l'ampiezza della deriva temporale di ciascuna stazione.

Le derivate temporali sono un modo per visualizzare e quantificare la traiettoria del cambiamento. Graficamente è possibile visualizzarlo tramite delle frecce che collegano le corrispettive stazioni in entrambi gli anni; quantitativamente attraverso l'ampiezza delle barre verticali che costituiscono l'istogramma.

All'analisi statistica è stata affiancata un'analisi descrittiva al fine di fornire informazioni sulla distribuzione dei dati. Dunque, sia per le forme di crescita che le gilde trofiche sono stati realizzati degli istogrammi per valutare l'andamento dei ricoprimenti medi percentuali dei descrittori nel tempo. Al fine di verificare, statisticamente, se il valor medio di ciascun descrittore, misurato nel 2018, differiva significativamente dal rispettivo misurato nel 1992 è stato eseguito un T-test.

Similmente, sono stati realizzati degli istogrammi per ciascun descrittore riportanti il valore di ricoprimento percentuale medio più o meno deviazione standard, del 1992 e 2018, in funzione delle cinque stazioni. Quest'analisi è stata eseguita al fine di osservare un possibile gradiente interno-esterno e/o le differenze, in termini di ricoprimento, nelle diverse stazioni.

RISULTATI

Forme di crescita

L'analisi delle immagini per mezzo delle forme di crescita ha portato all'individuazione di 12 growth forms: *Astroides calycularis*, massivi emisferici determinati, massivi appiattiti indeterminati, massivi cupoliformi determinati, massivi cilindrici prostrati, laminari prostrati, laminari eretti, arborescenti, cespugliosi, runners, incrostanti determinati ed indeterminati. A queste categorie si affiancano il sedimento ed il substrato nudo.

Dall'analisi multivariata è stato ottenuto un nMDS rappresentante la distribuzione spaziale, in base alla loro similarità, delle 5 stazioni a distanza crescente dall'ingresso principale della grotta (St.5_1,5m; St4_6m; 16 m; St3_10,5m; St2_15m; St1_18m) del 1992 (triangolo) e del 2018 (stellina) (GRAFICO 1). Da questo emerge una separazione tra i punti stazione del 1992 (nella parte bassa del nMDS) e i punti stazione del 2018 (nella parte alta del nMDS). Tale separazione è stata messa in evidenza anche con il valore di *P-value* restituito dal test PERMANOVA pari a 0,014 (<0,05) ad indicare che i due anni mostrano differenze statisticamente significative. Inoltre, dall'ovale contenente le 5 stazioni di ciascun anno è possibile osservare come il diametro sia molto maggiore per i dati del 1992 rispetto a quelli del 2018. Questo dimostra una maggiore dispersione dei dati nel 1992 e un'omogeneizzazione nel 2018 (GRAFICO 1). Quanto appena detto, viene messo in evidenza anche dall'nMDS contenente tutte le repliche di ciascuna stazione in cui, nonostante l'inevitabile variabilità fra le stesse, l'omogeneizzazione della comunità bentonica della Grotta Azzurra di Capo Palinuro rimane comunque evidente (Grafico 2).

Con diversi colori vengono, invece, rappresentate le 5 stazioni e, per entrambi gli anni, si osserva un gradiente dalla stazione più esterna (nella parte sinistra del nMDS) a quella più interna (nella parte destra del nMDS) (GRAFICO 3). Ciò ha permesso di individuare la variabile tempo sull'asse Y, data la netta separazione delle stazioni dei due anni lungo questo asse, e il gradiente esterno-interno (corrispondente alla luce) sull'asse X, data la posizione delle stazioni (GRAFICO 4). Andando ad investigare come le comunità sessili della grotta azzurra risentono dell'influenza della luce è possibile osservare (GRAFICO 5) che, in entrambi gli anni, la correlazione è molto forte. Quindi di fatto i popolamenti sessili si distribuiscono all'interno della grotta in funzione dell'intensità luminosa disponibile.

Possiamo ritenere corretta la rappresentazione restituita dall'nMDS in quanto il valore di stress associato è pari a 0,05 a limite tra una rappresentazione buona ed eccellente. Infatti, i punti sono ben distribuiti sulla diagonale ad indicare la rappresentazione di una buona regressione (GRAFICO 6).

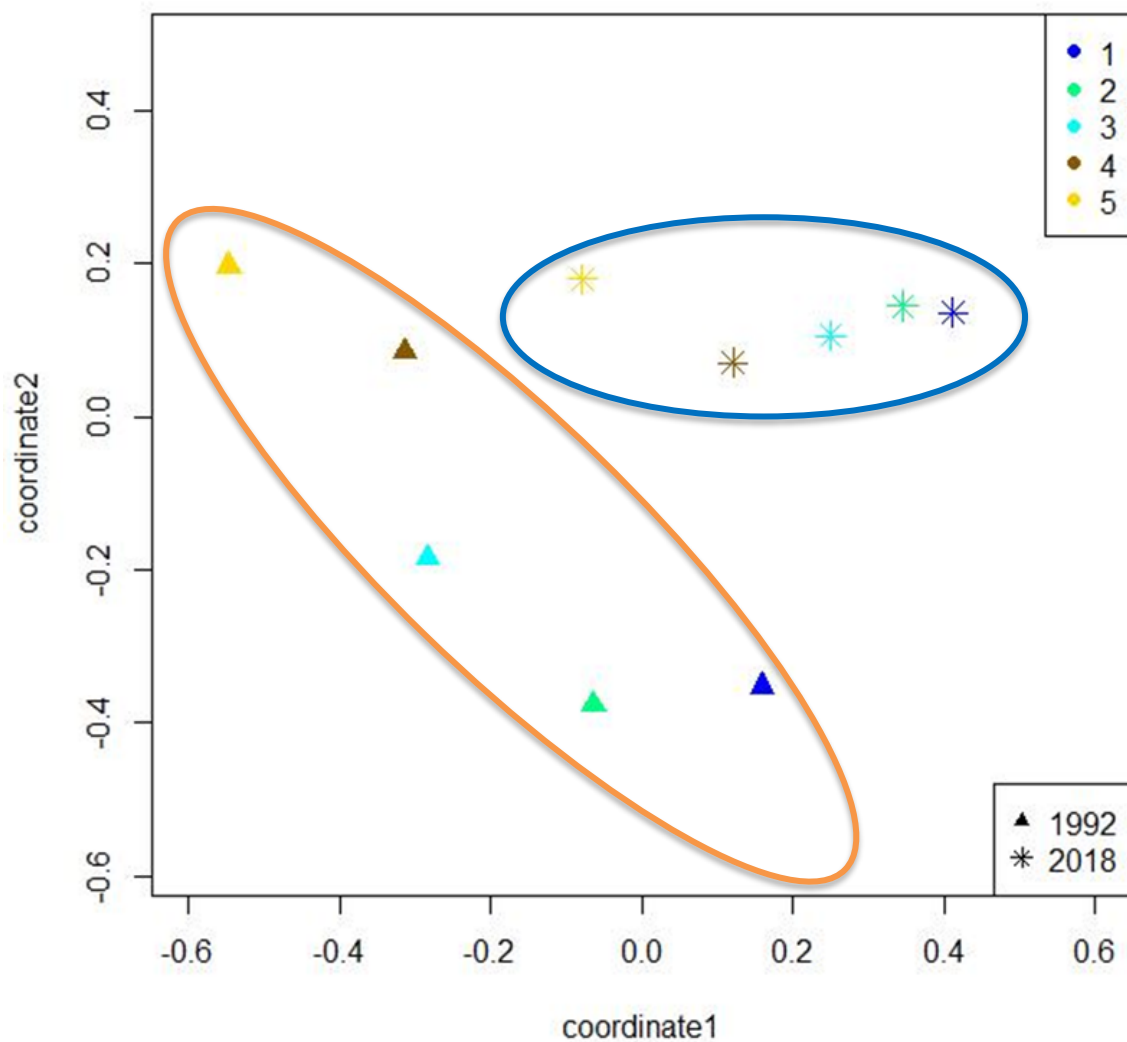


GRAFICO 1: nMDS delle stazioni topografiche individuate all'entrata della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Realizzato per le Forme di Crescita.

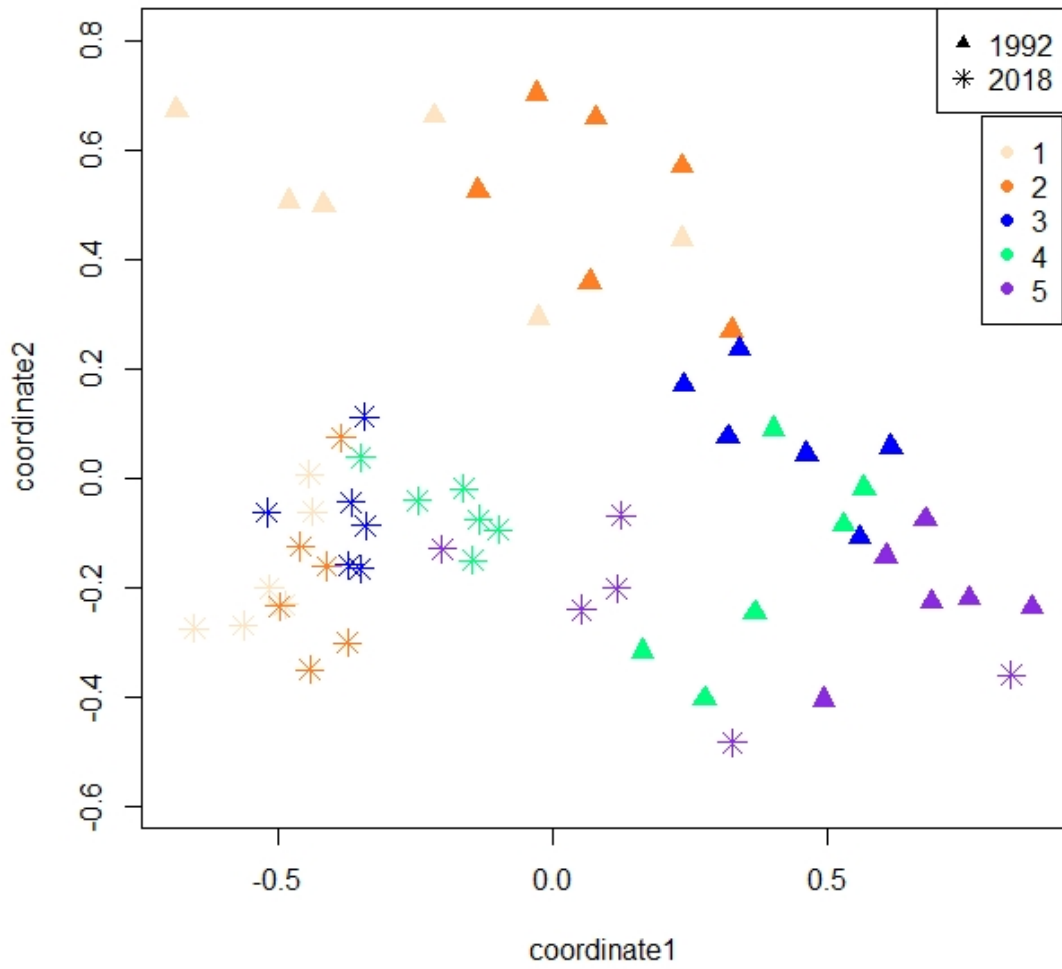


GRAFICO 2: nMDS delle stazioni topografiche, contenente i valori di tutte le repliche, individuate all'entrata della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Realizzato per le Forme di Crescita.

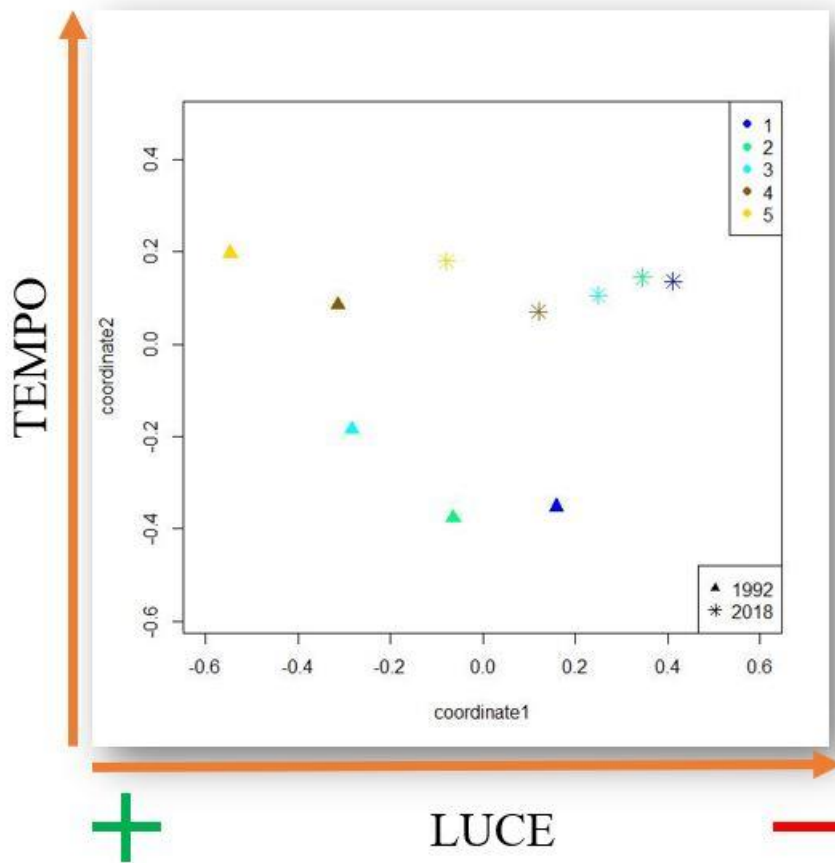
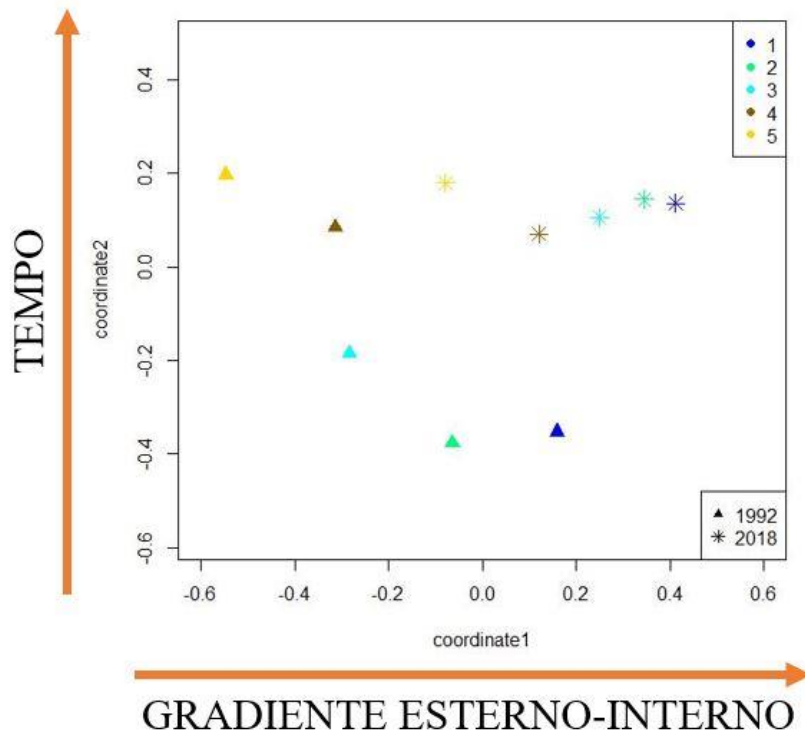


GRAFICO 3-4: nMDS delle stazioni topografiche individuate all'entrata della Grotta Azzurra di Capo Palinuro e interpretazione degli assi.

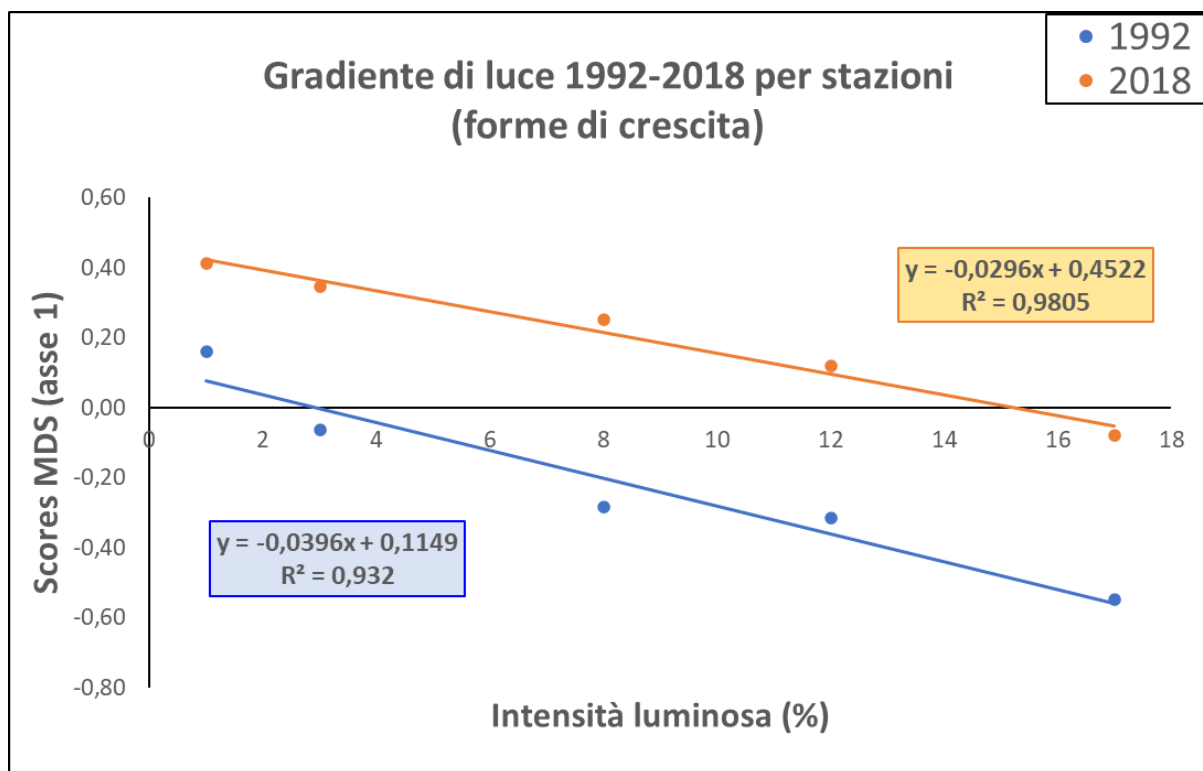


GRAFICO 5: grafico a dispersione riportante i punteggi dell'asse 1 dell'nMDS (corrispondenti al gradiente esterno-interno delle comunità bentoniche sessili della Grotta Azzurra) in funzione della percentuale di luce. Realizzato per le Forme di Crescita.

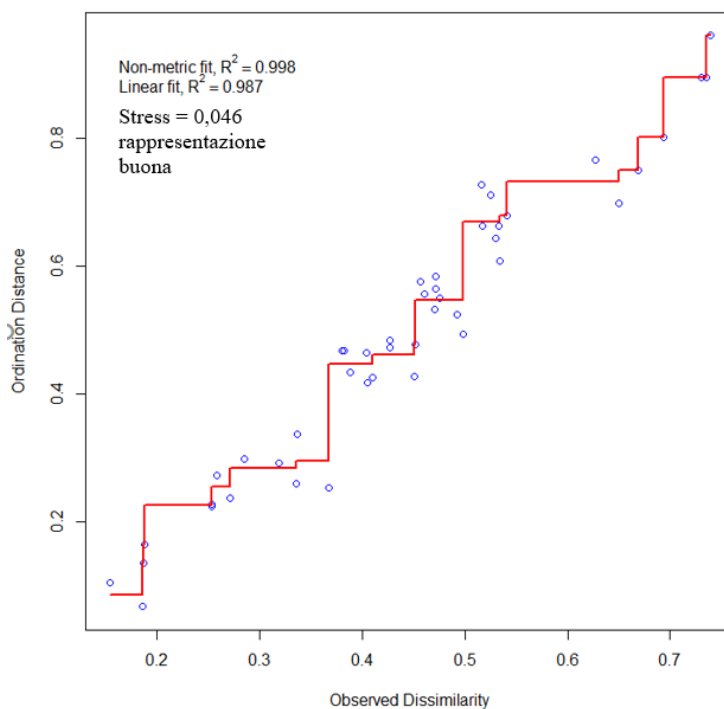


GRAFICO 6: Shepard plot: rappresentazione grafica della bontà di adattamento dei dati inseriti nell'nMDS. Realizzato per le Forme di Crescita.

Parallelamente, come descritto nel paragrafo “disegno di campionamento ed analisi statistica dei dati”, sono state calcolate le derivate temporali tra le rispettive stazioni di campionamento nei due anni. Graficamente è possibile visualizzarlo tramite delle frecce che collegano le corrispettive stazioni in entrambi gli anni (GRAFICO 7); quantitativamente attraverso l’ampiezza delle barre verticali che costituiscono l’istogramma (GRAFICO 8).

Dalle frecce, raffiguranti le derivate temporali, è possibile osservare come quest’ultime vadano tutte nella stessa direzione (dal 1992 al 2018) anche se, la lunghezza, apparentemente sembrerebbe mostrare un maggior cambiamento procedendo dalle stazioni più esterne verso quelle più interne. Tuttavia, andando a quantificare questo cambiamento tramite il teorema di Pitagora, e visualizzandolo tramite l’istogramma che riporta la deriva temporale media \pm deviazione standard in funzione delle 5 stazioni, in realtà tutte le stazioni hanno subito un simile cambiamento, non mostrando differenze significative.

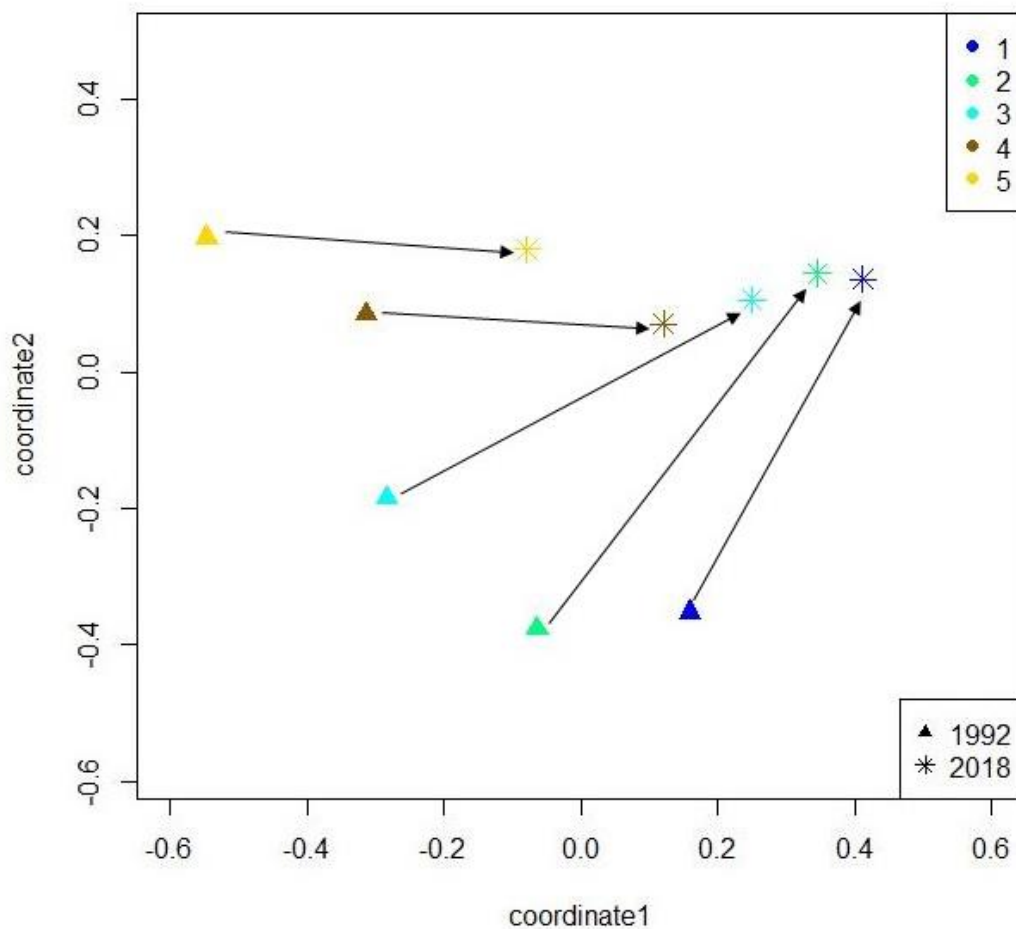


GRAFICO 7: rappresentazione grafica delle derivate temporali tra stazioni.

Realizzato per le Forme di Crescita.

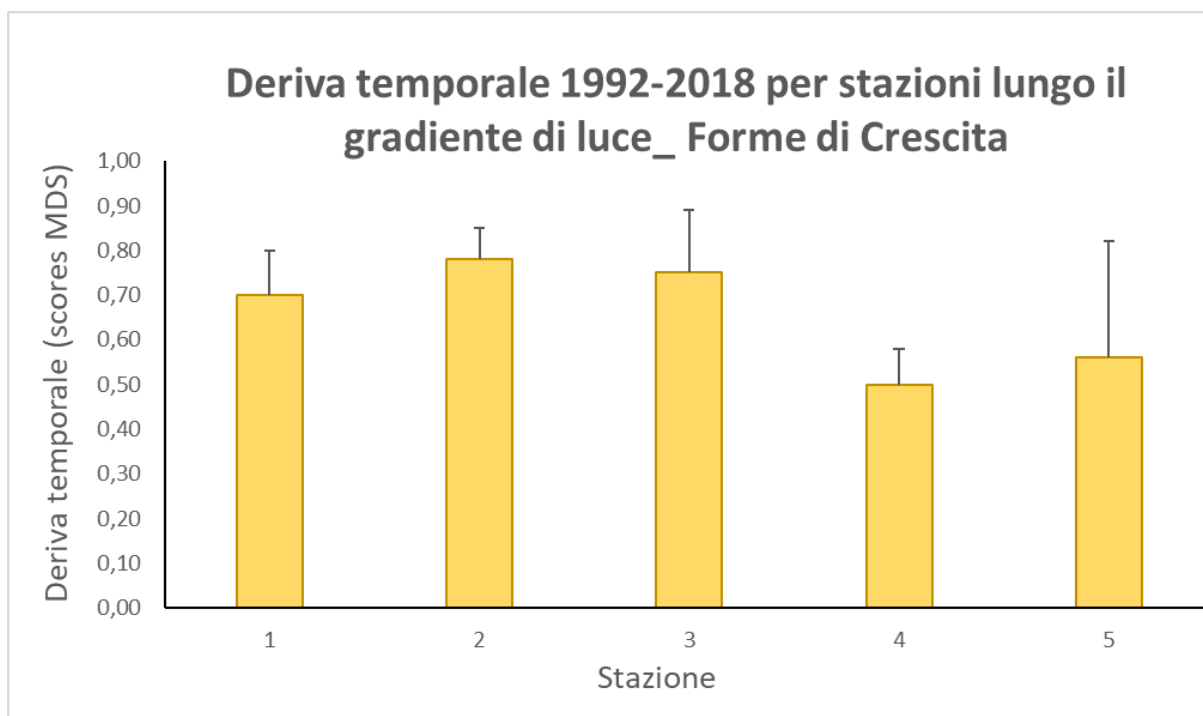


Grafico 8: istogramma della deriva temporale 1992-2018 nelle cinque stazioni della Grotta Azzurra di Capo Palinuro lungo il gradiente di luce. Realizzato per le Forme di Crescita.

Per andare ad analizzare nello specifico quali siano tra le forme di crescita quelle che hanno subito maggiori cambiamenti è stato costruito un istogramma sulle medie dei valori di ricoprimento.

Dall'istogramma (GRAFICO 9) con i ricoprimenti medi percentuali delle forme di crescita per gli anni 1992 (giallo) e 2018 (verde) e i relativi T-test condotti, emerge che le categorie che nel corso dei 26 anni hanno mostrato differenze statisticamente significative sono state: *Astroides calycularis*, massivi appiattiti indeterminati, massivi cupoliformi determinati, cespugliosi, runners ed incrostanti sia determinati che indeterminati. A queste categorie si aggiunge il sedimento.

In particolare, la copertura delle categorie *Astroides calycularis*, massivi appiattiti indeterminati, runners ed incrostanti indeterminati è aumentata dal 1992 al 2018.

Al contrario, il ricoprimento di sedimento, massivi cupoliformi determinati, incrostanti determinati e cespugliosi, è diminuito. Il ricoprimento delle categorie substrato nudo, perforatori, arborescenti, laminari prostrati ed eretti è rimasto simile nei due anni.

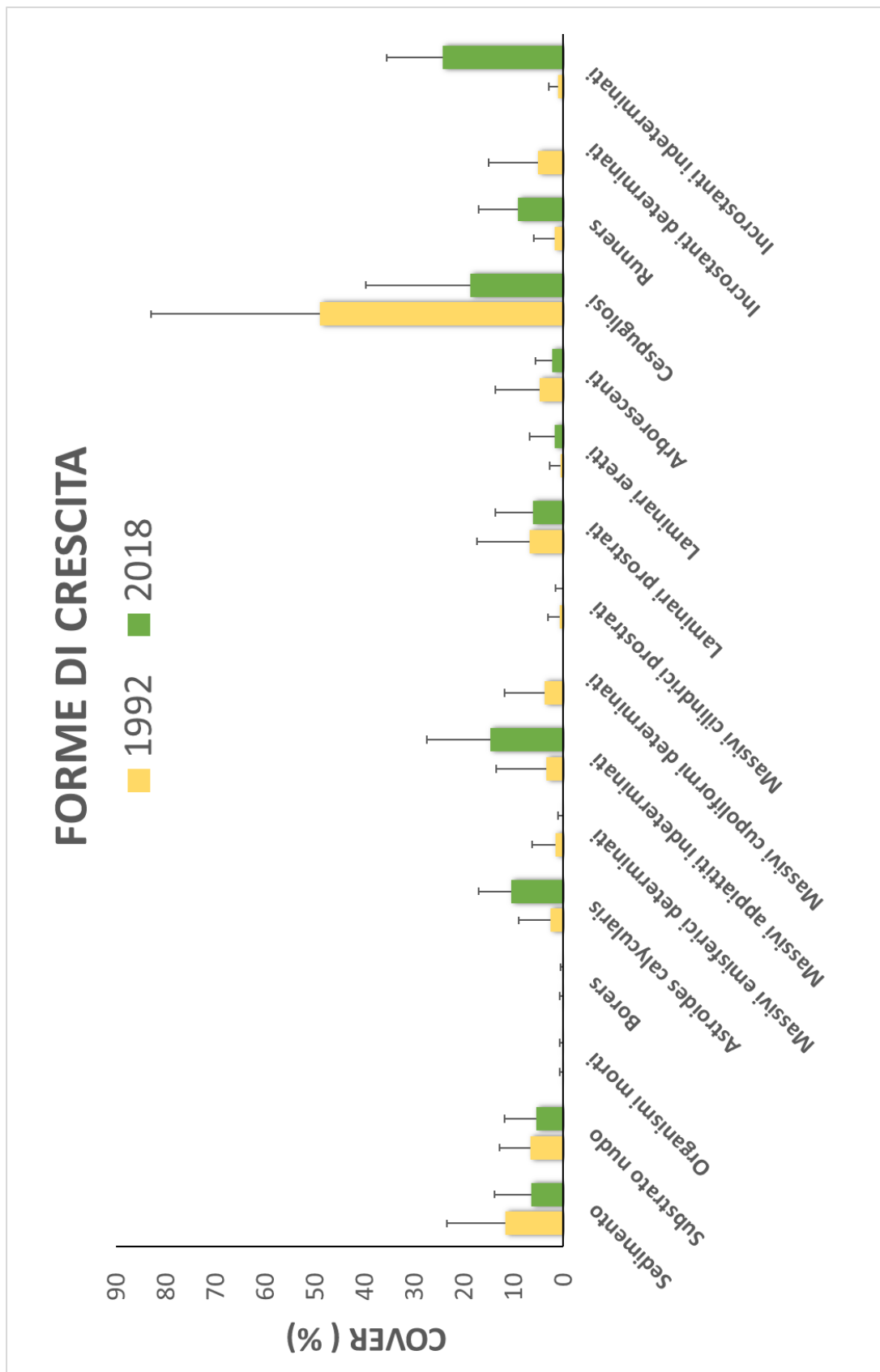
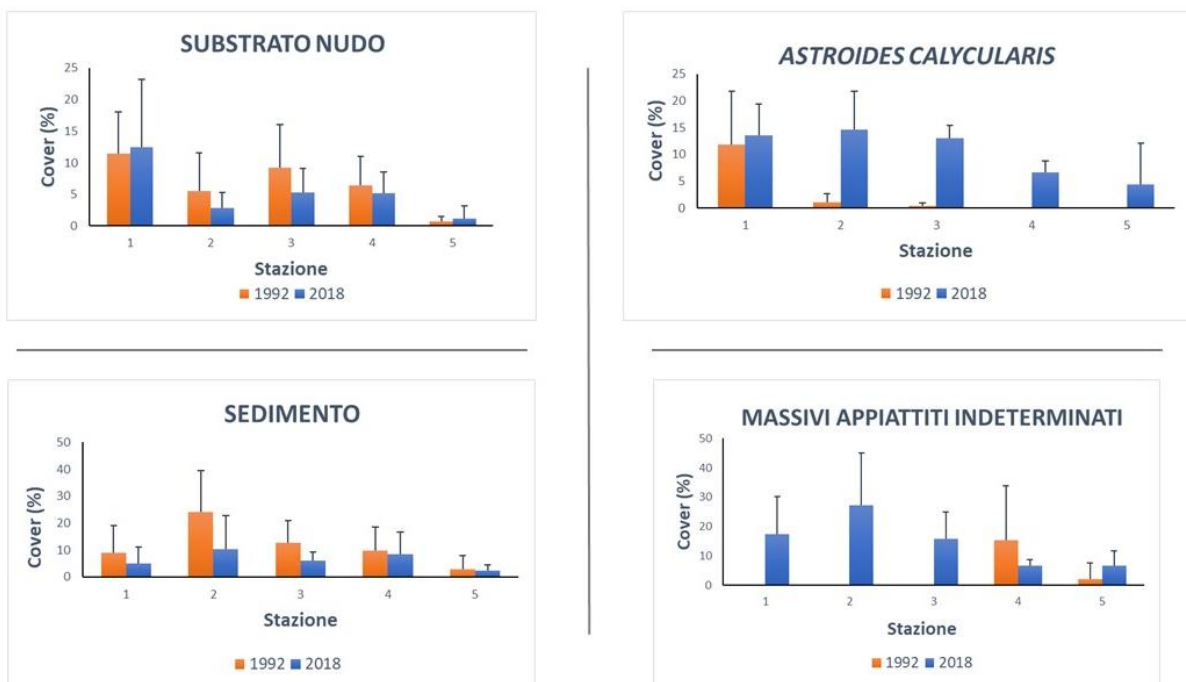


GRAFICO 9: istogramma raffigurante per le forme di crescita l'andamento, nel tempo, del ricoprimento medio percentuale e deviazione standard di ciascun descrittore.

Un'ulteriore analisi eseguita è stata investigare quale tra le forme di crescita riscontrate mostrasse un gradiente interno-esterno e/o differenze, in termini di ricoprimento, nelle diverse stazioni. Dunque, sono stati realizzati degli istogrammi per ciascun descrittore riportanti il valore di ricoprimento percentuale medio più o meno deviazione standard, del 1992 e 2018, in funzione delle cinque stazioni (GRAFICO 10). Si evince una netta diminuzione del ricoprimento, procedendo dall'interno all'esterno della grotta, per le seguenti categorie: *Astroides calycularis* e Runners; al contrario un netto aumento verso le stazioni più esterne dei cespugliosi. Le altre categorie non sembrano mostrare questo gradiente interno-esterno, ma semplicemente confermare quanto osservato nel GRAFICO 9.

Un aspetto interessante, ma tutto da investigare per la mancanza di informazioni a supporto, è che i laminari prostrati sembrerebbero essere shiftati dalle stazioni più interne verso quelle più esterne. Ricordando che tale categoria comprende soprattutto alghe rosse incrostanti e sciafile, questo potrebbe essere dovuto ad una maggiore torbidità dell'acqua che potrebbe aver portato le stazioni interne ad una condizione di insufficienza luminosa per garantire la sopravvivenza delle alghe sciafile (le quali sono alghe amanti della penombra ma se anche quella penombra scompare loro muoiono).



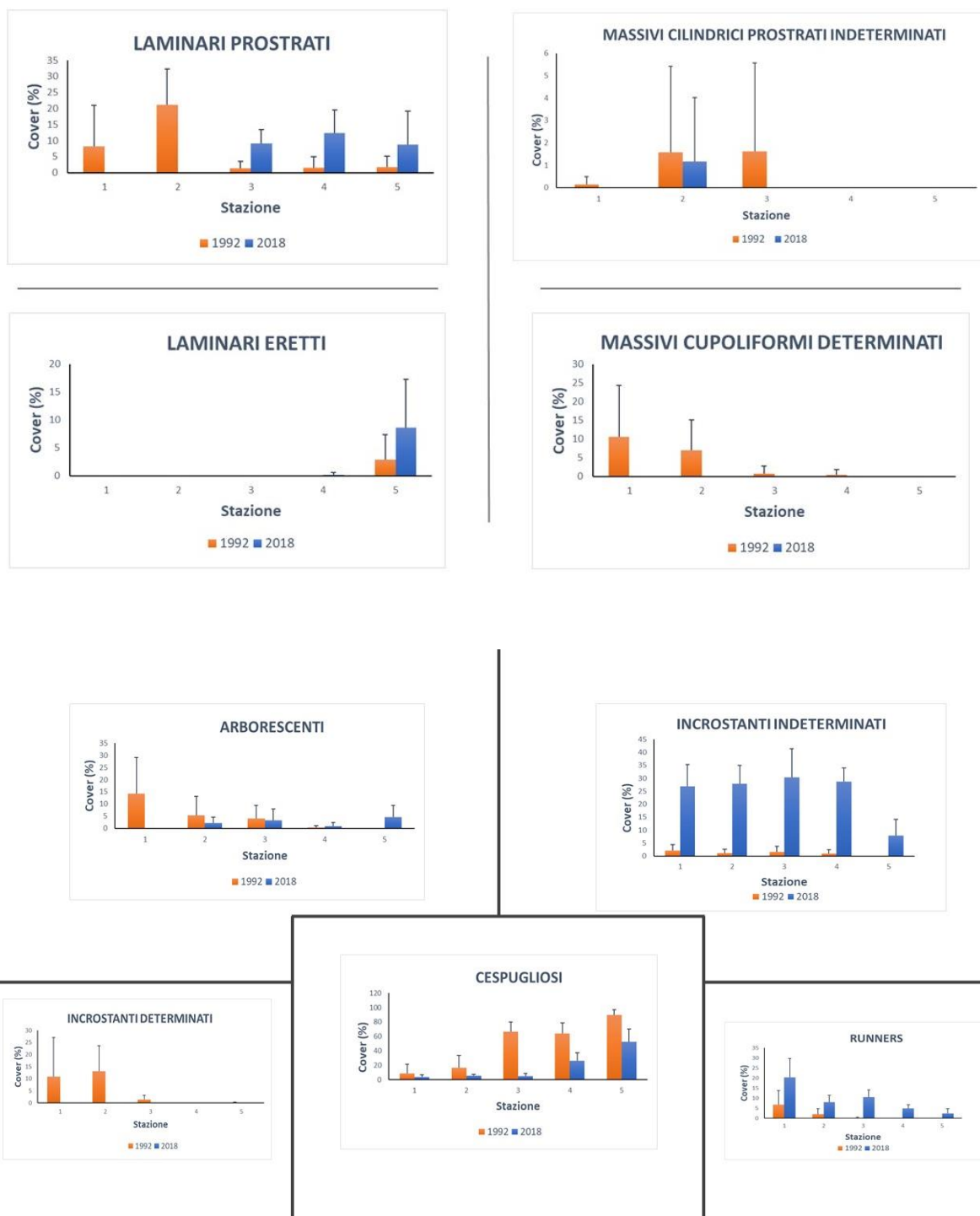


Grafico 10: istogrammi realizzati per ciascun descrittore riportanti il valore di ricoprimento percentuale medio più o meno deviazione standard, del 1992 e 2018, in funzione delle cinque stazioni.

Gilde trofiche

L'analisi delle immagini per mezzo delle gilde trofiche ha portato all'individuazione di 7 categorie: autotrofi, filtratori passivi, filtratori attivi ciliati lofoforati, filtratori attivi ciliati non lofoforati, pompanti attivi non muscolarizzati, pompanti attivi muscolarizzati e spugne mixotrofe. A queste si affiancano le categorie sedimento e substrato nudo.

Dall'analisi multivariata è stato ottenuto un nMDS rappresentante la distribuzione grafica, in base alla loro similarità, delle 5 stazioni a distanza crescente dall'ingresso principale della grotta (St.5_1,5m; St4_6m; 16 m; St3_10,5m; St2_15m; St1_18m) del 1992 (triangolo) e del 2018 (stellina) (GRAFICO 11). A differenza delle forme di crescita, per le gilde trofiche emerge una lieve separazione tra i punti stazione del 1992 (nella parte bassa del nMDS) e i punti stazione del 2018 (nella parte alta del nMDS). Anche il valore di *P-value* restituito dal test PERMANOVA, pari a 0,122 ($>0,05$), indica che i due anni, dal punto di vista trofico, non mostrano differenze significative. Dall'ovale contenente le 5 stazioni di ciascun anno, è possibile osservare come il diametro sia maggiore per i dati del 1992, rispetto a quelli del 2018, anche se non così tanto come mostrato dalle forme di crescita (GRAFICO 11). Quanto appena detto, viene messo in evidenza anche dall'nMDS contenente tutte le repliche di ciascuna stazione in cui, nonostante l'inevitabile variabilità fra le stesse, l'omogeneizzazione, seppure presente, risulta meno evidente rispetto alle forme di crescita. Come già osservato per il cambiamento temporale, i valori di ricoprimento % assegnati alle repliche del 2018 sembrano essere contenuti tra le repliche del 1992 per il mantenimento dell'organizzazione trofica (GRAFICO 12).

Con diversi colori vengono, invece, rappresentate le 5 stazioni e, per entrambi gli anni, si osserva un gradiente dalla stazione più interna (nella parte sinistra del nMDS) a quella più esterna (nella parte destra del nMDS) (GRAFICO 13). Ciò ha permesso di individuare la variabile tempo sull'asse Y, data la netta separazione delle stazioni dei due anni lungo questo asse, e il gradiente luce sull'asse X, data la posizione delle stazioni (GRAFICO 14). Andando ad investigare come le comunità sessili della grotta azzurra, da un punto di vista trofico, risentono dell'influenza della luce è possibile osservare (GRAFICO 15) che, in entrambi gli anni, la correlazione è molto forte. Quindi di fatto i popolamenti sessili, anche da un punto di vista trofico, si distribuiscono all'interno della grotta in funzione dell'intensità luminosa disponibile. Possiamo ritenere corretta la rappresentazione restituita dall'nMDS in quanto il valore di stress associato è pari a 0,06, infatti, i punti sono ben distribuiti sulla diagonale ad indicare la rappresentazione di una buona regressione (GRAFICO 16).

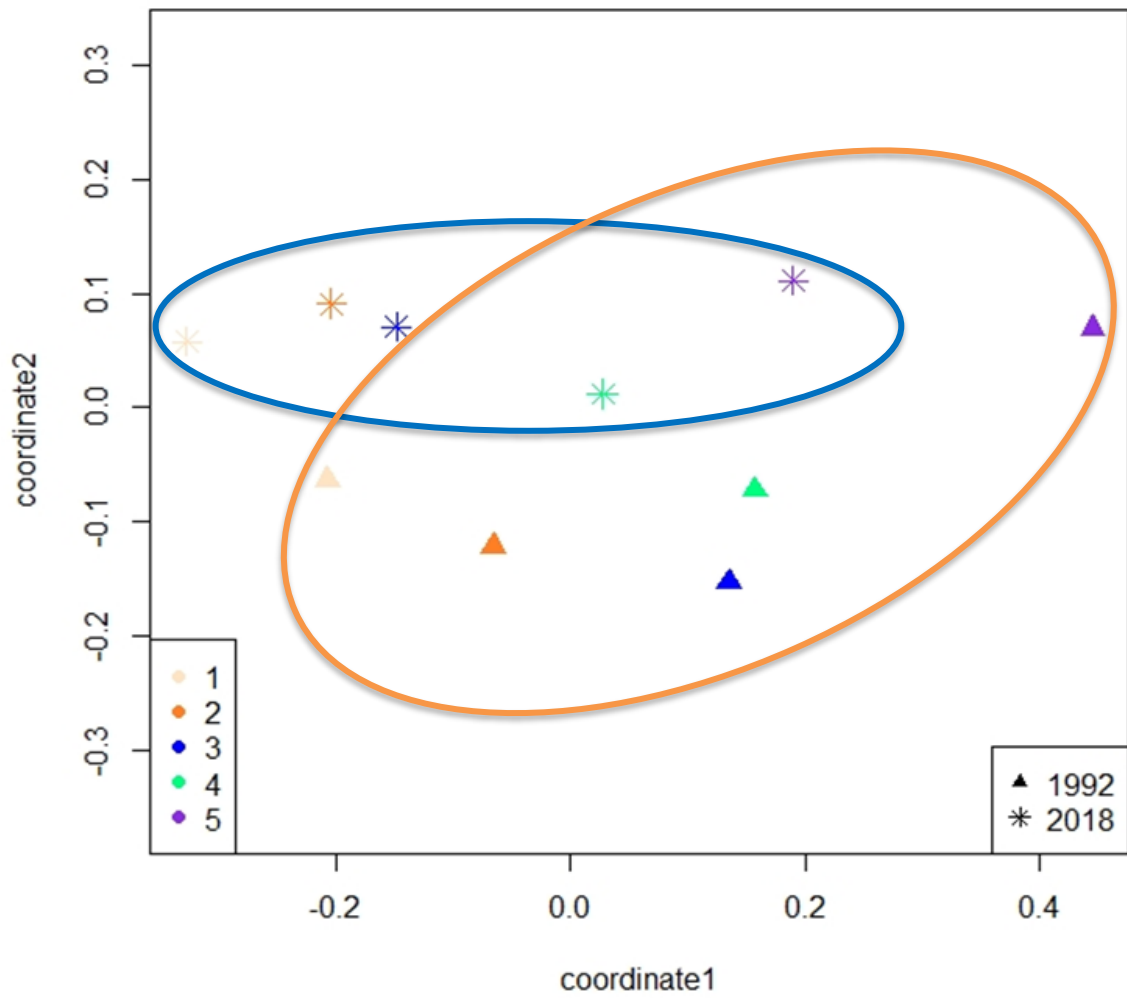


GRAFICO 11: nMDS delle stazioni topografiche individuate all'entrata della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Realizzato per le gilde trofiche.

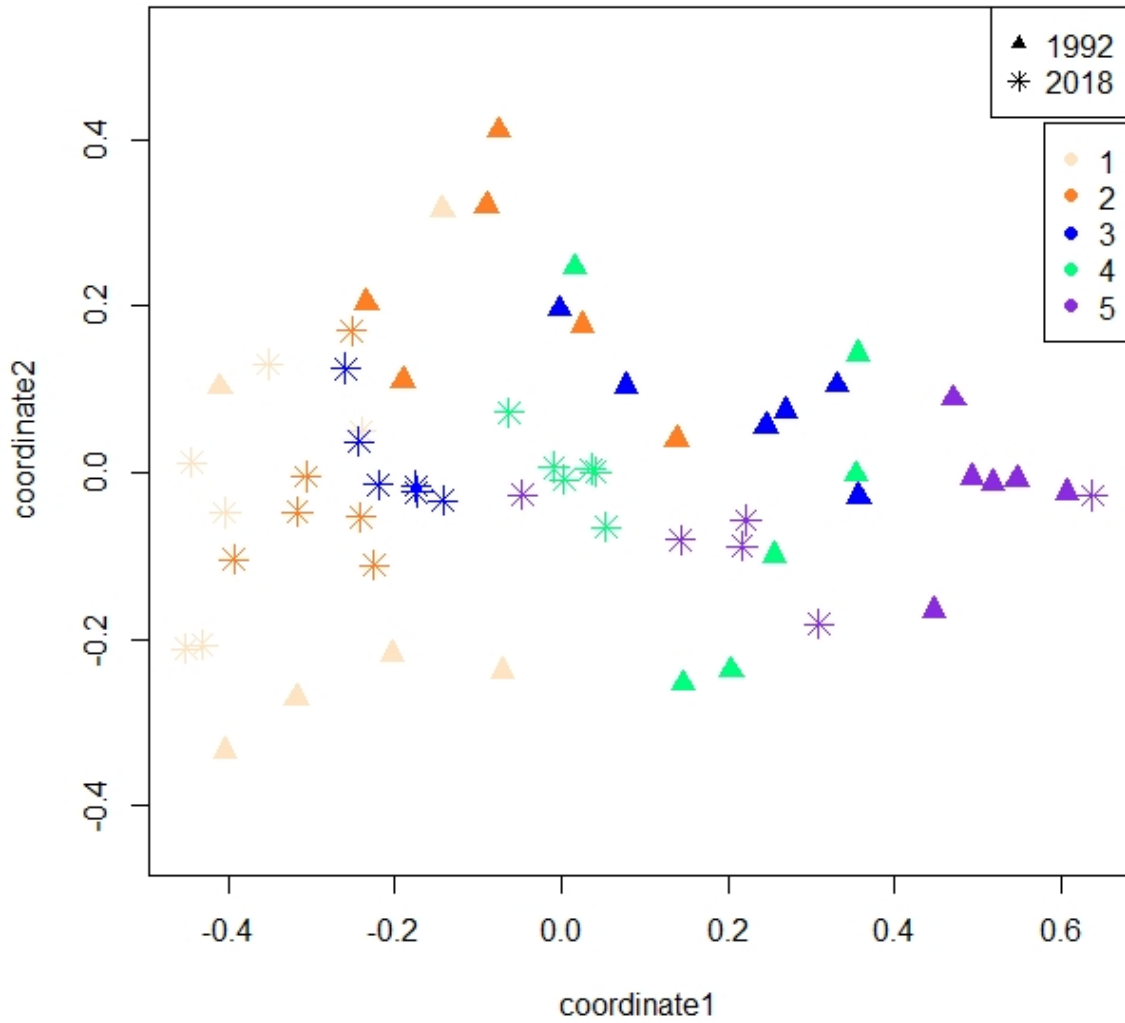


GRAFICO 12: nMDS delle stazioni topografiche, contenente i valori di tutte le repliche, individuate all'entrata della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Realizzato per le gilde trofiche.

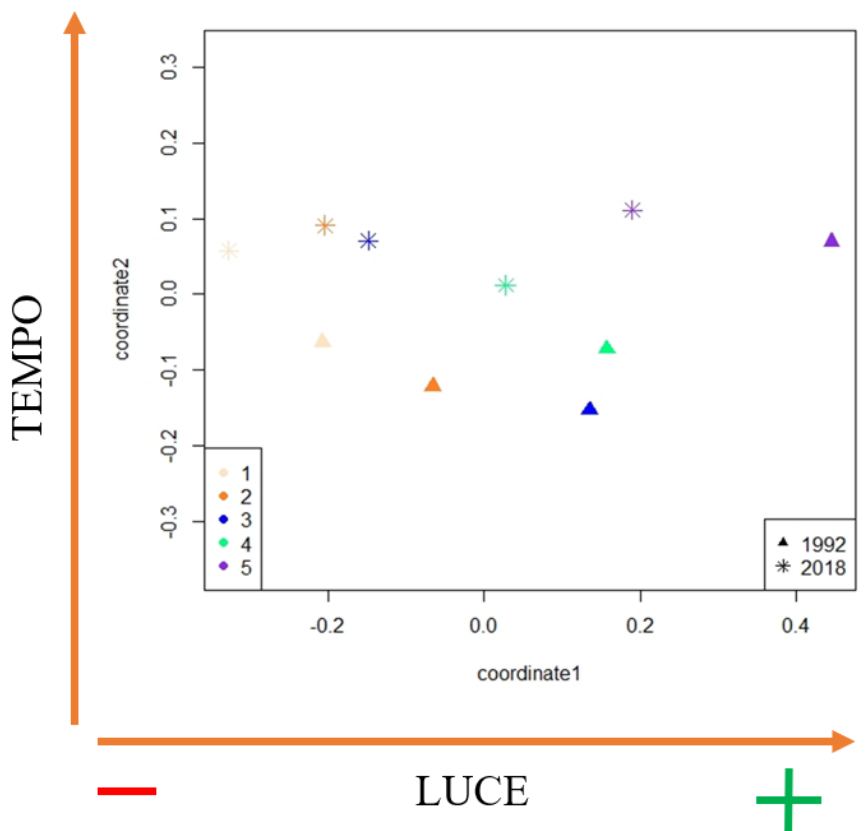
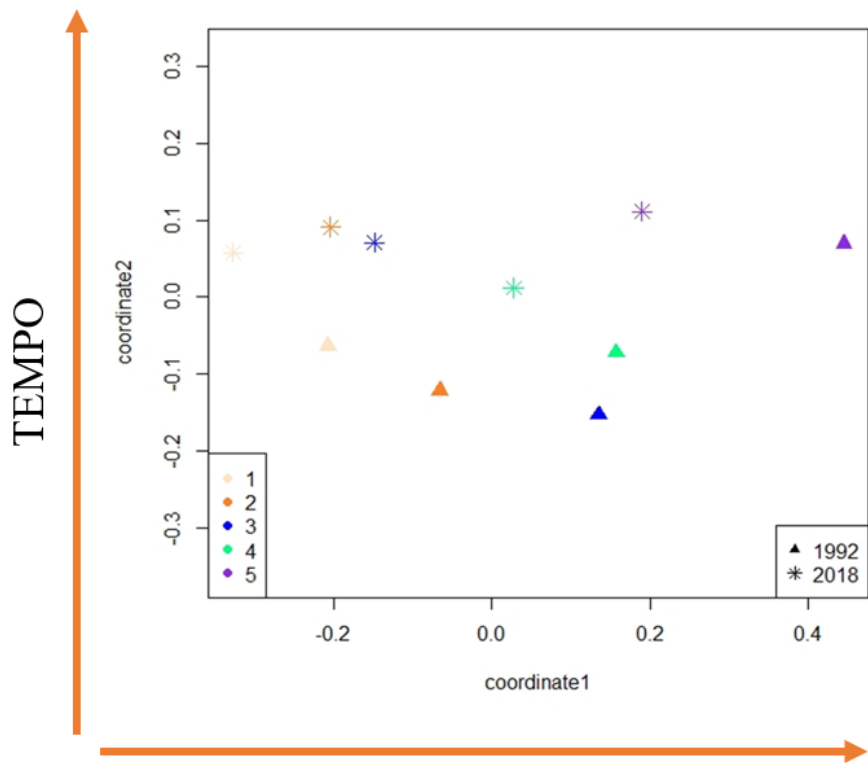


GRAFICO 13-14: nMDS delle stazioni topografiche individuate all'entrata della Grotta Azzurra di Capo Palinuro e spiegazione degli assi. Realizzato per le Gilde Trofiche.

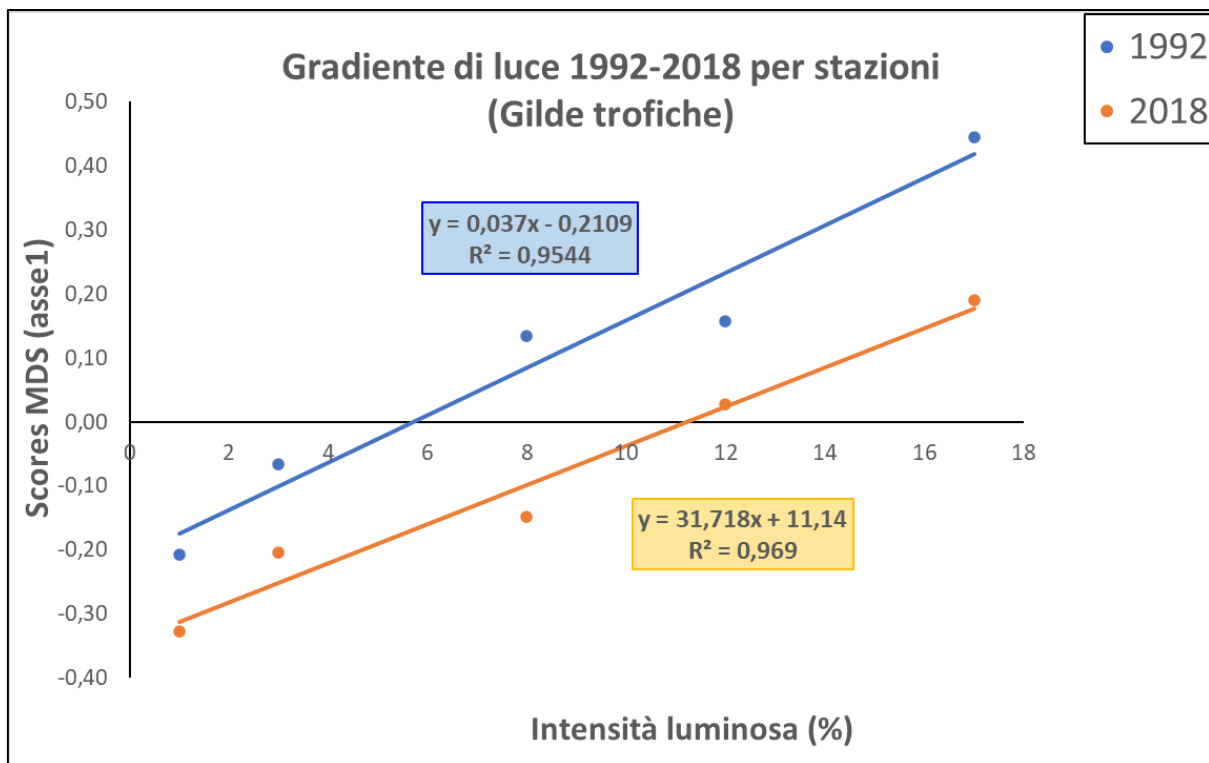


GRAFICO 15: grafico a dispersione riportante i punteggi dell'asse 1 dell'nMDS (corrispondenti al gradiente esterno-interno delle comunità bentoniche sessili della Grotta Azzurra) in funzione della percentuale di luce. Realizzato per le Gilde Trofiche.

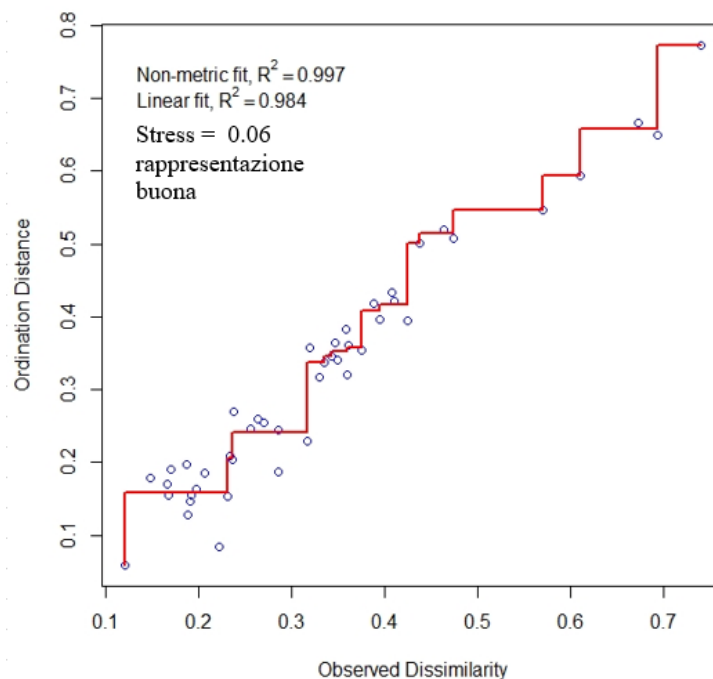


GRAFICO 16: Shepard plot: rappresentazione grafica della bontà di adattamento dei dati inseriti nell'nMDS. Realizzato per le Gilde Trofiche.

Come per le forme di crescita, anche per le gilde trofiche è stata calcolata la deriva temporale. Dalle frecce, raffiguranti le derivate temporali, è possibile osservare come quest'ultime vadano tutte nella stessa direziona (dal 1992 al 2018) anche se la lunghezza è variabile e non sembra mostrare nessun andamento specifico (GRAFICO 17). Quantificando questo cambiamento tramite il teorema di Pitagora, e visualizzandolo tramite l'istogramma che riporta la deriva temporale media \pm deviazione standard in funzione delle 5 stazioni tutte le stazioni hanno subito un simile cambiamento, leggermente maggiore nella stazione 3 (GRAFICO 18).

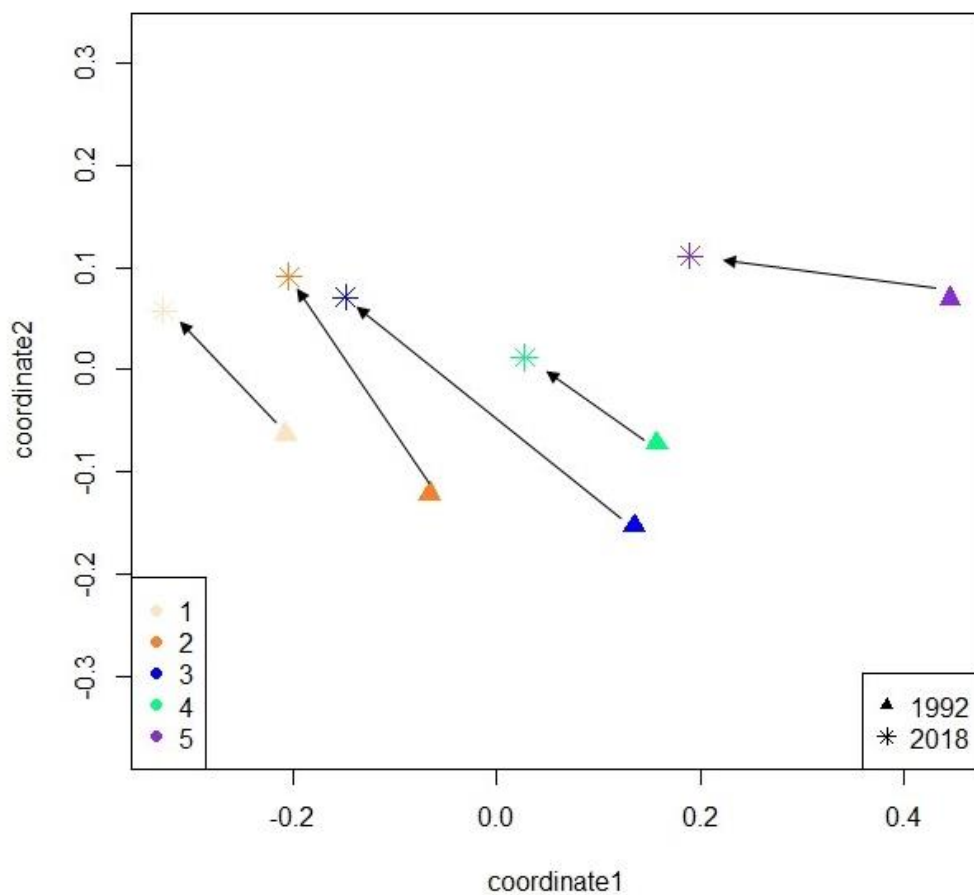


GRAFICO 17: rappresentazione grafica delle derivate temporali tra stazioni.

Realizzato per le Gilde Trofiche.

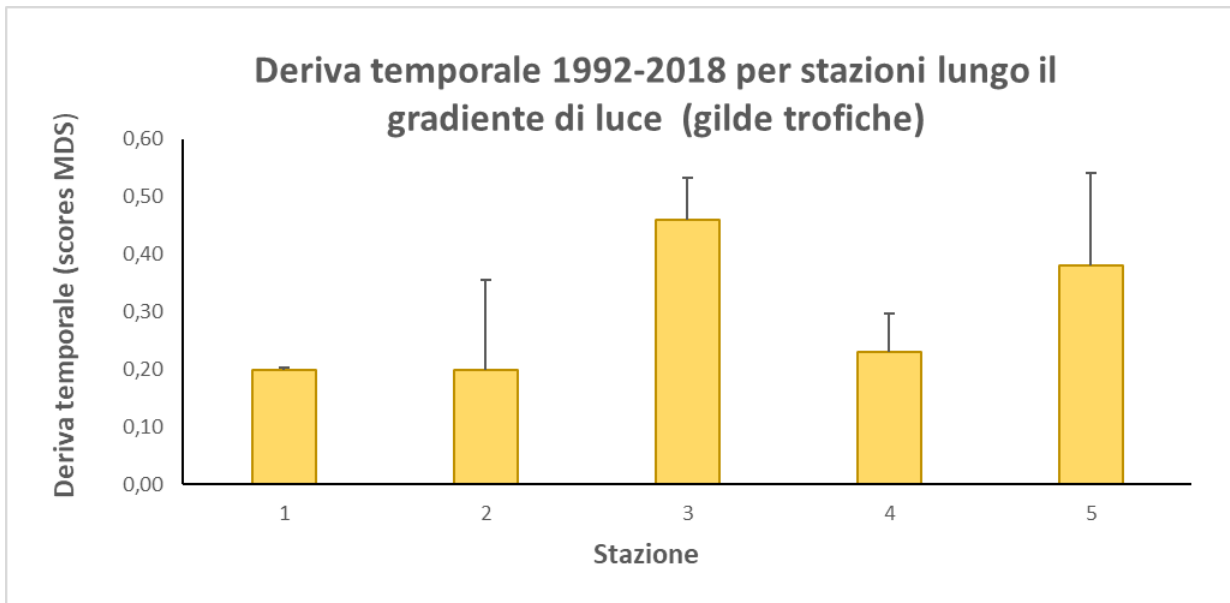


Grafico 18: istogramma della deriva temporale 1992-2018 nelle cinque stazioni della Grotta Azzurra di Capo Palinuro lungo il gradiente di luce. Realizzato per le Gilde Trofiche.

Per andare ad analizzare nello specifico quali siano tra le gilde trofiche quelle che hanno subito maggiori cambiamenti è stato costruito un istogramma sulle medie dei valori di ricoprimento. Dall'istogramma (GRAFICO 19) con i ricoprimenti medi percentuali delle gilde trofiche per gli anni 1992 (giallo) e 2018 (verde) e i relativi T-test condotti, emerge che le categorie che nel corso dei 26 anni hanno mostrato differenze statisticamente significative sono state: autotrofi, filtratori passivi e filtratori attivi ciliati lofoforati. A queste categorie si aggiunge il sedimento. In particolare, la copertura degli autotrofi è diminuita dal 1992 al 2018, al contrario i filtratori (passivi, attivi ciliati lofoforati/non lofoforati e pompanti attivi non muscolarizzati) sono aumentati nel tempo.

Il ricoprimento delle categorie substrato nudo, spugne mixotrofe e pompanti attivi muscolarizzati è rimasto simile nei due anni.

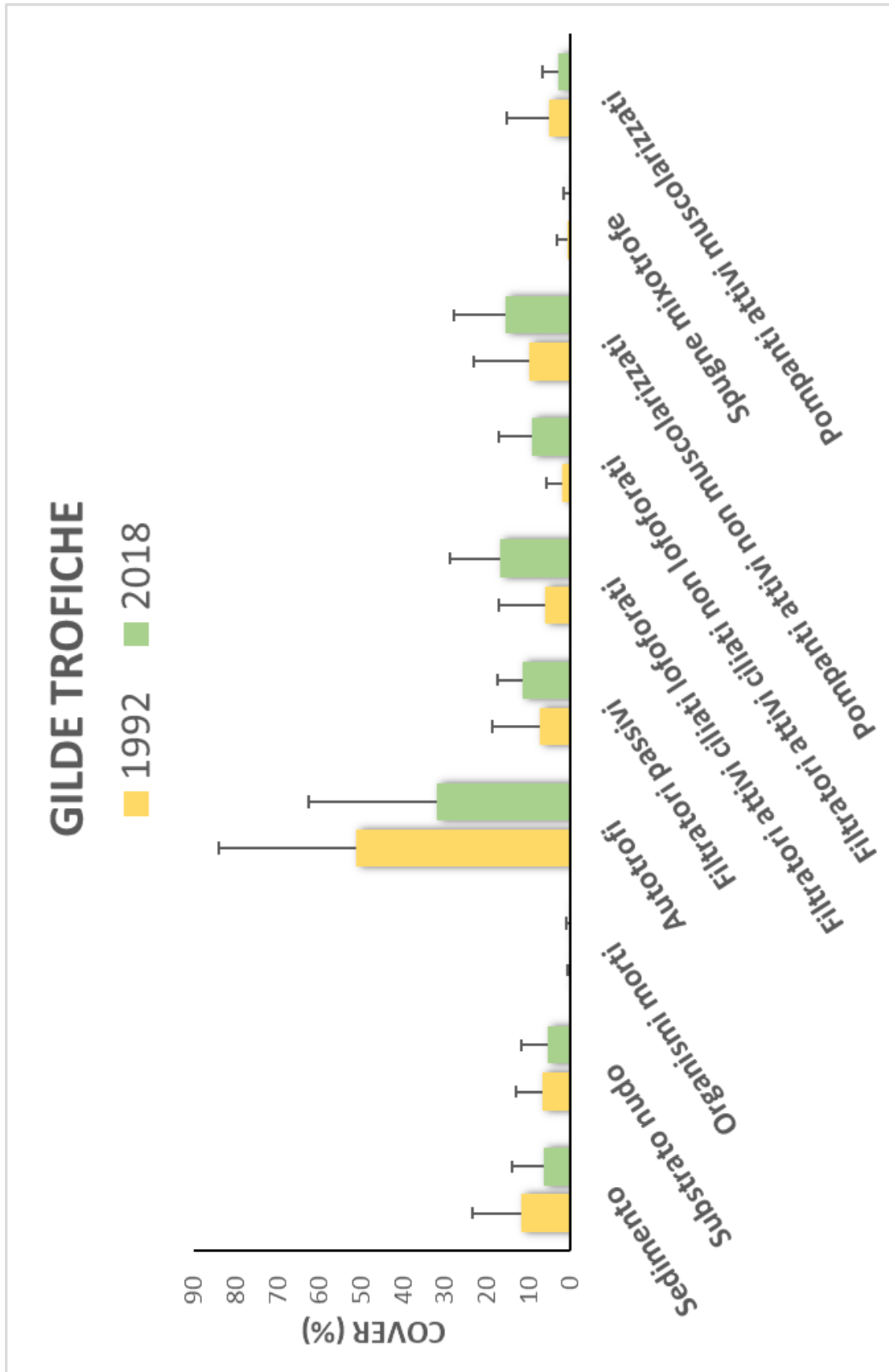


GRAFICO 19: istogramma raffigurante per le Gilde Trofiche l'andamento, nel tempo, del ricoprimento medio percentuale e deviazione standard di ciascun descrittore

Un'ulteriore analisi eseguita è stata investigare quale tra le gilde trofiche riscontrate mostrasse un gradiente interno-esterno e/o differenze, in termini di ricoprimento, nelle diverse stazioni. Dunque, sono stati realizzati degli istogrammi per ciascun descrittore riportanti il valore di ricoprimento percentuale medio più o meno deviazione standard, del 1992 e 2018, in funzione delle cinque stazioni (GRAFICO 20). Si evince una netta diminuzione del ricoprimento, procedendo dall'interno all'esterno della grotta, per i filtratori attivi ciliati non loforati; al contrario un netto aumento verso le stazioni più esterne degli autotrofi. Le altre categorie non sembrano mostrare questo gradiente interno-esterno, ma semplicemente confermare quanto osservato nel GRAFICO 19.

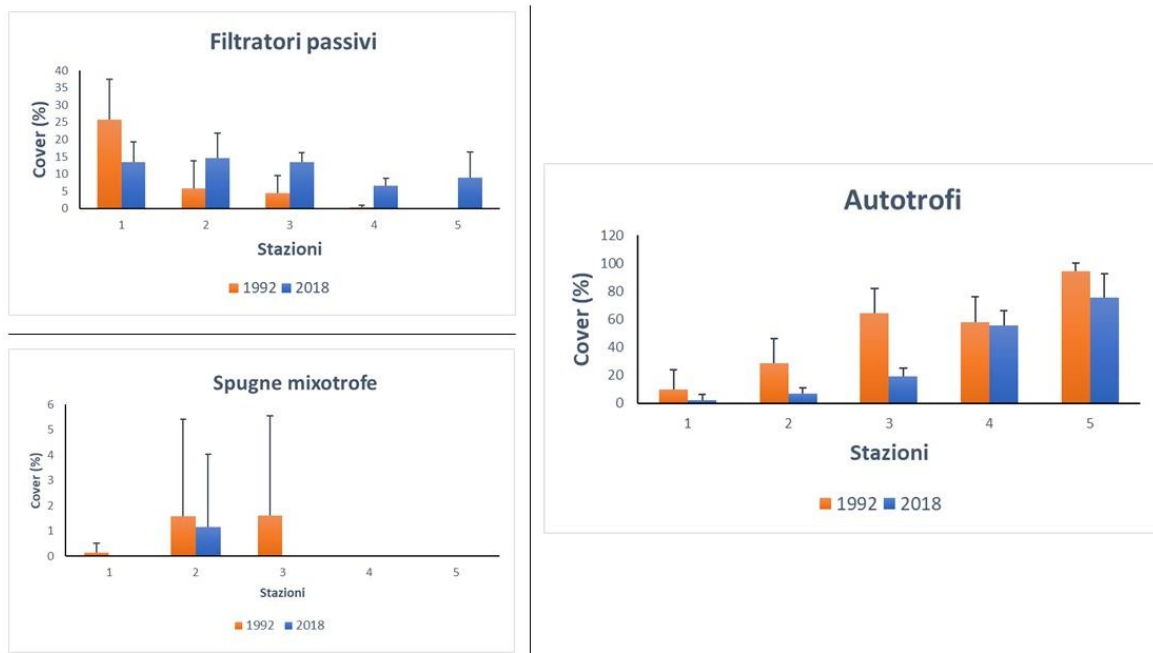


Grafico 20: istogrammi realizzati per ciascun descrittore riportanti il valore di ricoprimento percentuale medio più o meno deviazione standard, del 1992 e 2018, in funzione delle cinque stazioni. Realizzati per le Gilde Trofiche.

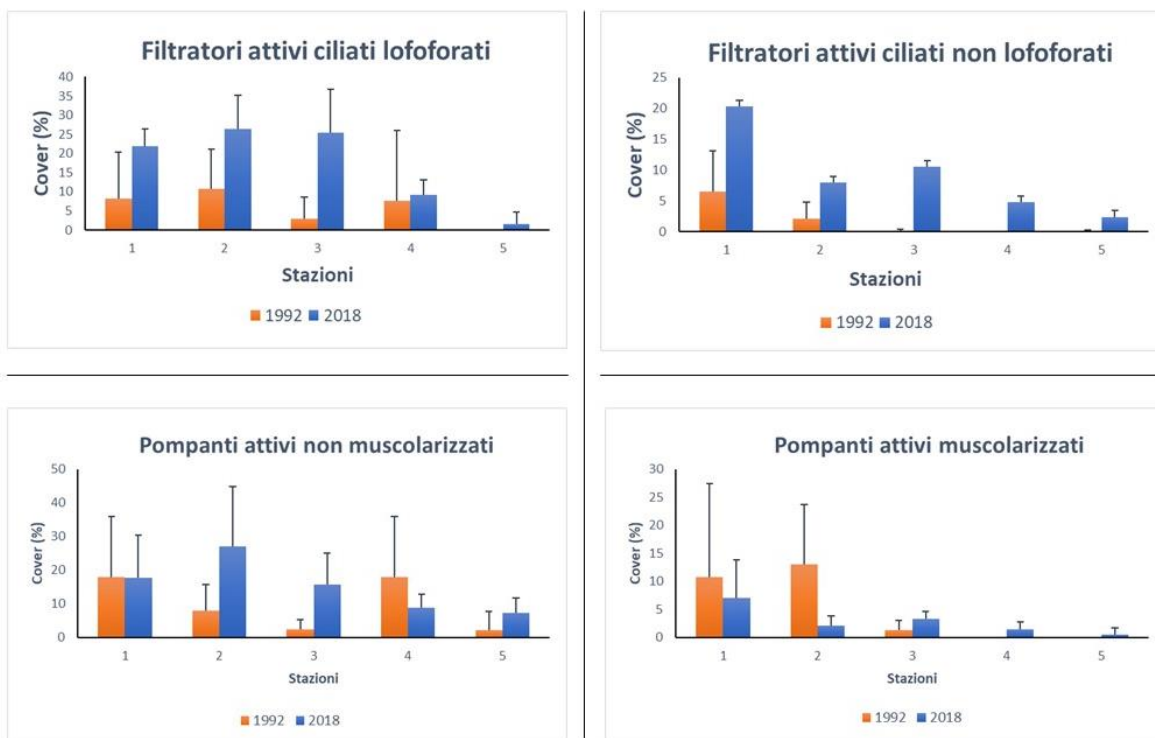


Grafico 20: istogrammi realizzati per ciascun descrittore riportanti il valore di ricoprimento percentuale medio più o meno deviazione standard, del 1992 e 2018, in funzione delle cinque stazioni. Realizzati per le Gilde Trofiche.

CONCLUSIONI

L'analisi condotta nel 1992 e 2018, a distanza di 26 anni, ha permesso di ottenere informazioni quantitative sulle comunità sessili che hanno delucidato l'evoluzione dell'ecosistema della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Nonostante la scarsità di studi ecologici a lungo termine nel Mar Mediterraneo (Bianchi, 2001), i cambiamenti avvenuti negli ultimi decenni sono ben documentati e dimostrano drammatiche modifiche nella composizione delle specie, nella struttura della comunità e nell'organizzazione trofica in molti ecosistemi marini (Parravicini et al., 2010; Bianchi et al., 2014; Gatti et al., 2015; 2017; Bertolino et al., 2016; Nepote et al., 2016). Nel caso delle grotte marine, è stato investito poco sforzo di ricerca rispetto ad altri habitat (Gerovasileiou et al., 2015) e pertanto il presente lavoro può quindi rappresentare una preziosa e unica base di riferimento per la protezione di questi fragili ecosistemi (Sarà 1974, 1976; Navarro-Barranco et al., 2015).

La Grotta Azzurra di Capo Palinuro ha conosciuto un generale trend di cambiamento nel corso dei 26 anni, evidenziato sia dalle forme di accrescimento sia, anche se in misura minore, dalle gilde trofiche. Dal nMDS rappresentante i punti stazione relativi sia alle forme di crescita sia alle gilde trofiche nel 1992 e nel 2018 emerge un gradiente temporale tra il 1992 e il 2018. Tale gradiente risulta essere molto netto se analizzato con le forme di crescita e, al contrario, presente ma debole per le gilde trofiche.

Le gilde trofiche, pur essendo dei buoni descrittori non tassonomici, non hanno mostrato differenze significative nei due anni esaminati suggerendo così che l'organizzazione trofica sia rimasta stabile nel tempo. Questo aspetto è spiegabile dal funzionamento stesso del sistema "grotta" che per sua natura continua a dipendere da fattori quali la luce e l'idrodinamismo. Questo fa sì che, anche se c'è stato un cambiamento legato al clima o agli impatti antropici locali, il funzionamento della grotta, comunque, si mantiene perché i ruoli trofici cercano di mantenersi all'interno di un habitat con caratteristiche così peculiari. Rimangono pertanto dominanti gli organismi filtratori con la sostituzione di organismi filtratori eretti tridimensionali con organismi filtratori incrostanti bidimensionali.

Come già osservato in una grotta marina stressata da pressioni antropiche locali (Nepote et al., 2017), i cambiamenti nelle strategie morfologiche sono più veloci dei cambiamenti nelle strategie trofiche.

Cambiare i tratti strutturali (forme di crescita) mantenendo inalterati quelli funzionali (gilde trofiche) dopo un forte stress ambientale può rappresentare una forma di dinamica compensatoria (Naeem, 1998; Fischer et al., 2001).

Dunque, è possibile affermare che nel corso degli anni si sia assistito ad un mantenimento dell'organizzazione trofica e viceversa ad un cambiamento nell'organizzazione spaziale dei popolamenti della Grotta Azzurra di Capo Palinuro. Tale cambiamento è dovuto alla perdita di tridimensionalità, ed in particolare, data la % invariata di substrato nudo dal 1992 al 2018, ad una sostituzione delle forme 3D con quelle bidimensionali con la stessa strategia di alimentazione. La copertura delle forme bidimensionali, come i runners (serpulidi), gli incrostanti (poriferi, ascidie, briozoi) e massivi (soprattutto poriferi) era più alta nel 2018 rispetto al 1992, mentre il contrario era vero per le forme tridimensionali: i cupoliformi sono scomparsi dalla grotta mentre i cespugliosi sono nettamente diminuiti. Le spugne incrostanti hanno già dimostrato di essere vincenti in ambienti stressati, essendo buoni concorrenti per lo spazio (Bell & Barnes, 2000; Bell, 2002; Nepote et al., 2017).

La perdita della complessa struttura dell'habitat ha portato all'omogeneizzazione strutturale della comunità di grotta, come illustrato dal declino della dispersione multivariata, se confrontiamo i punti stazione del 1992 (molto più dispersi) rispetto a quelli del 2018 (più radunati). Questa diminuzione della complessità spaziale può comportare una riduzione della diversità anche in ambiente di grotta, considerato un hotspot di biodiversità.

Come in un lavoro precedente sulla variabilità temporale nella grotta marina di Bergeggi prima e dopo le anomalie termiche del 1999 e 2003 (Parravicini et al., 2010), anche in questo studio, le differenze emerse nell'organizzazione strutturale della comunità non sono state ritrovate nella sua organizzazione trofica che è rimasta invariata.

I cambiamenti osservati possono essere dovuti sia ad una pressione locale sia globale. Nella terrazza l'unica pressione locale che la grotta ha da sempre è l'entrata dei gozzi dei turisti, poiché la costa è abbastanza naturale, così come la zona di Palinuro non è molto sviluppata. Dunque, appare evidente come le visite turiste siano l'unica pressione locale in atto. Tuttavia, fonti locali (Fabio Barbieri, comunicazione personale) mi hanno riferito che a loro parere dal 1992 ad oggi il numero di imbarcazioni che entrava allora corrisponde più o meno a quello attuale. Questo porta a ipotizzare che il cambiamento osservato nel tempo, come dimostrato nel presente lavoro, sia vero similmente imputabile al cambiamento globale.

È noto che il riscaldamento globale e le pressioni umane locali combinano i loro effetti sul biota marino e identificare i principali motori del cambiamento osservato nelle comunità bentoniche è spesso difficile (Morri & Bianchi, 2001).

Una maggiore omogeneizzazione biotica può ovviamente suggerire un'analogia maggiore omogeneizzazione delle condizioni ambientali all'interno della grotta. Tuttavia, a parte l'aumento riportato della temperatura dell'acqua del mare per la zona di Palinuro non si hanno altre informazioni sui fattori chimico-fisici che caratterizzano le acque di tale zona. Informazioni provenienti da altre località costiere del Mar Ligure (Morri & Bianchi, 2001; Parravicini et al., 2013; Gatti et al., 2015) hanno mostrato cambiamenti nella torbidità dell'acqua e del particolato sospeso tra gli anni '80 e '90 e negli anni recenti, supportando l'ipotesi che le condizioni abiotiche all'interno della grotta possano essere cambiate in modo analogo.

Chiaramente, saranno necessari studi a lungo termine per vedere se lo sviluppo degli organismi sessili tridimensionali in condizioni indisturbate riporterà la grotta al suo stato precedente. Si ritiene che le grotte sottomarine siano ecosistemi scarsamente resilienti (Harmelin, 1980; Lejeusne & Chevaldonne, 2006): comprendere la loro capacità di recupero dopo i disturbi è fondamentale per la loro gestione e conservazione.

Bibliografia

Abbiati M., Airoidi L., Alvisi M., Bianchi C.N., Cinelli F., Colantoni P., Morri C. (1992). *Preliminary observations on benthic communities in a submarine cave influenced by hydrothermal springs*. Rapports et Procès Verbaux des Réunions de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée, 33, 1-5.

Abdulla A., Gomei M., Hyrenbach D., Notarbartolo di Sciara G., Agardy T. (2008). *Challenges facing a network of representative marine protected areas in the Mediterranean: prioritizing the protection of underrepresented habitats*. ICES Journal of Marine Science, 66 (1), 22-28.

Alvisi M., Barbieri F., Colantoni P. (1994a). *Le grotte marine di Capo Palinuro*. Grotte Marine d'Italia. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 6 (2), 143-181

Alvisi M., Barbieri F., Bruni R., Cinelli F., Colantoni P., Grandi G.F., Maltoni P. (1994b). *La Grotta Azzurra di Capo Palinuro (Salerno)*. Grotte Marine d'Italia. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 6 (2), 51-56.

Alvisi M., Colantoni P., Forti P. (1994). *Principali aree d'interesse speleomarino lungo le coste italiane*. Grotte marine d'Italia. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, Bologna, 6, 9-13.

Anderson M.J. (2001). *A new method for non-parametric multivariate analysis of variance*. Austral Ecology, 26 (1), 32-46.

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 (2), 387-395.

Best M.A., Thorpe J.P. (1986). *Effects of food particle concentration on feeding current velocity in six species of marine Bryozoa*. Marine Biology, 93, 255-262.

Bianchi C.N. (2003). *Flora e Fauna: lineamenti generali e prospettive*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 137-146.

Bianchi C.N., Abbiati M., Airoldi L., Alvisi M., Benedetti-Cecchi L., Cappelletti A., Gemelli F., Colantoni P., R. Dando P., Morri C., Niccolai I., Picco P., Southward A., Southward E. (1998). *Hydrology and water budget of a submarine cave with sulphidic springs: The "Grotta Azzurra" of Capo Palinuro (Southern Italy)*. Atti del 12° Congresso dell'Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia, 2, 285-301.

Bianchi C.N., Boero F., Fonda Umani S., Morri C., Vacchi M. (1998). *Successione e cambiamento negli ecosistemi marini*. Biologia Marina Mediterranea, 5, 117-135.

Bianchi C. N., Cattaneo R., Cinelli F., Morri C., Pansini M. (1996). *Lo studio biologico delle grotte sottomarine del Mediterraneo: conoscenze attuali e prospettive*. Bollettino dei Musei e degli Istituti Biologici dell'Università di Genova, 60-61, 41-69.

Bianchi C.N., Cinelli F., Morri C. (1994). *The biology of a submarine cave with sulphur springs: The grotta Azzurra of Capo Palinuro, Southern Italy*. U.I.S. Cave Diving Magazine, 6, 1-3.

Bianchi C.N., Cevasco 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, 52, 267-293.

Bianchi C.N., Cocito S., Diviacco G., Dondi N., Fratangeli F., Montefalcone M., Parravicini V., Rovere A., Sgorbini S., Vacchi M., Morri C. (2018). *The park never born: Outcome of a quarter of a century of inaction on the sea-floor integrity of a proposed but not established Marine Protected Area*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 28, 1209-1228.

Bianchi C., Morri C. (1994). *Studio bionomico comparativo di alcune grotte marine sommerse: definizione di una scala di confinamento*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, 6 (2), 107-123.

Bianchi C.N., Morri C. (1999). *Biologia ed ecologia delle grotte sottomarine*. Speleologia marina. F. Barbieri (Ed.), Cavallermaggiore Gribaudo, 113-160.

Bianchi C.N., Morri C., Russo G.F. (2003). *Deplezione trofica*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 297-305.

Bibiloni M.A., Gili J.M., Ros J. (1984). *Les coves submarines de les illes Medes*. Ros J., Olivella I., Gili J.M. (Eds). *Els sistemes naturals de les illes Medes*. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona, 707-737.

Boury-Esnault N., Harmelin J.G., Vacelet J. (1993). *Les abysses méditerranéennes a vingt mètres de profondeur?*. *La recherche*, 24 (256), 848-851.

Cattaneo R., Pastorino M.V. (1974). *Popolamenti algali e fauna bentonica nelle cavità naturali della regione litorale mediterranea*. *Rassegna Speleologica Italiana*, 12, 272-281.

Chevaldonné P., Lejeusne C. (2003). *Regional warming-induced species shift in north-west Mediterranean marine caves*. *Ecology Letters*, 6 (4), 371-379.

Cinelli F., Colantoni P., Morri C., Bianchi C.N., Alvisi M., Airoidi L., Abbiati M. (1994). *The biota of the "Grotta Azzurra" of Capo Palinuro (Tyrrhenian Sea): general description and first observations on its trophic organization*. *Istituto Italiano di Speleologia Memoria*, 6 (2), 95-97.

Colantoni P. (1976). *Aspetti geomorfologici e genesi delle grotte sottomarine*. *Pubblicazioni della Stazione Zoologica di Napoli*, 40, 460-472.

Colantoni P. (1994). *Le grotte marine*. *Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia*, Bologna, 6 (2), 7-8.

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*. Hawkins L.E., Hutchinson S. (Eds). *The Response of Marine Organisms to Their Environments*. University of Southampton, UK, 183-192.

Connel J.H., Keough M.J. (1985). *Disturbance and patch dynamics of subtidal marine animals on hard substrata*. *The ecology of natural disturbance and patch dynamics*. Pickett S.T.A., White P.S. (Eds). Academic Press, San Diego, 1, 1-472.

Corroy G., Gouvernet C., Chouteau J., Sirivine A., Gilet R., Picard J. (1958). *Les résurgences sous-marines de la région de Cassis*. *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco*, 1131, 1-35.

Crisp D.J., Southward A.J. (1961). *Different types of cirral activity of barnacles*. Philosophical Translation of Royal Society, 243, 271-307.

Culver D.C. (1985). *Trophic relationships in aquatic cave environments*. Stygologia, 1 (1), 43-53.

Delamare Deboutteville C. (1960). *Biologie des eaux souterraines littorales et continentales*. Hermann, Paris, 1-740.

Delamare Deboutteville C. (1971). *La vie dans les grottes*. Presses Universitaires de France, Paris, Collection «Que sais-je?», 1430, 1-126.

Forti P. (2003). *Le cavità di origine continentale e la loro evoluzione marina*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 11-17.

Forti P. (2003). *Le grotte marine in senso stretto*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 59-72.

Fresi E., Cinelli F. (1982). *La discontinuità superficiale: appunti per una nuova interpretazione del benthos mediterraneo*. Bollettino dei Musei e degli Istituti Biologici dell'Università di Genova, 50, 1-194.

Gambi M.C., Barbieri F. (2012). *Population structure of the gorgonian Eunicella cavolini in the "Grotta Azzurra" cave off Palinuro, after the mass mortality event in 2008*. Biologia Marina Mediterranea, 19 (1), 174-175.

Gambi M.C., Barbieri F., Signorelli S., Saggiomo V. (2010). *Mortality events along the Campania coast (Tyrrhenian Sea) in summers 2008 and 2009 and relation to thermal conditions*. Biologia Marina Mediterranea, 17 (1), 126-127.

Gambi M.G., Fresi E., Giangrande A. (1982). *Descrittori efficaci di comunità bentoniche*. Naturalista Siciliano, 3 (4-6), 489 - 497.

Garrabou J.E., Sala C., Linares J.B., Ledoux I., Montero-Serra J.M., Dominici S., Kipson N., Teixidò E., Cebrian D., Kersting K., Harmelin J.G. (2017). *Re-shifting the ecological baseline for the overexploited Mediterranean red coral*. Scientific Reports, 7, 1-6.

- Gerovasileiou V., Dimitriadis C., Arvanitidis C., Voultziadou E. (2017). *Taxonomic and functional surrogates of sessile benthic diversity in Mediterranean marine caves*. Plos One, 12 (9), 1-20.
- Gerovasileiou V., Voultziadou E. (2012). *Marine caves of the Mediterranean Sea: a sponge biodiversity reservoir within a biodiversity hotspot*. Plos One, 7 (7), 1-17.
- Gerovasileiou V., Voultziadou E. (2016). *Sponge diversity gradients in marine caves of the eastern Mediterranean*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 96 (2), 407-416.
- Gerovasileiou V., Voultziadou E., Issaris Y., Zenetos A. (2016). *Alien biodiversity in Mediterranean marine caves*. Marine Ecology, 37 (2), 239–256.
- Giakoumi S., Sini M., Gerovasileiou V., Mazor T., Beher J., Possingham H. P., Karamanlidis A.A. (2013). *Ecoregion-based conservation planning in the Mediterranean: dealing with large-scale heterogeneity*. Plos One, 8 (10), 1-15.
- Gili J.M., Coma R., (1998). *Benthic suspension feeders: their paramount role in littoral marine food webs*. Trends in Ecology and Evolution, 13 (8), 316-321.
- Guarnieri G., Terlizzi A., Bevilacqua S., Fraschetti S. (2012). *Increasing heterogeneity of sensitive assemblages as a consequence of human impact in submarine caves*. Marine Biology, 159, 1155-1164.
- 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.E., Vasseur P. (1985). *Les grottes sous marines obscures: un milieu extrême et un remarquable biotope refuge*. Tethys, 11 (34), 214-219.
- Iliffe T.M. (1987). *Observations on the biology and geology of anchialine caves*. Curren H.A. (Ed.). Proceedings of the Third Symposium on the Geology of the Bahamas. CCFL Bahamian Field Station, 73-80.

- Jackson J.B.C. (1977). *Competition on marine hard substrata: the adaptative significance of solitary and colonial strategies*. *American Naturalist*, 111, 743-767.
- Jackson J.B.C. (1979). *Morphological strategies of sessile organisms*. *Biology and systematic of colonial organisms*. Larwood G., Rosen B.R. (Eds). Academic Press, London, 499-555.
- Jørgensen C.B. (1966). *Biology of suspension feeding*. Pergamon Press, New York, 1-357.
- Laborel J., Vacelet J. (1958). *Étude des peuplements d'une grotte sous-marine du golfe de Marseille*. *Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco*, 55 (1120), 1-20.
- Laborel, J., Vacelet, J. (1959). *Les grottes sous-marines obscures en Méditerranée*. *Comptes Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences*, 248 (18), 2619-2621.
- Laubier L. (1966). *Le Coralligène des Albères-Monographie biocénotique*. *Annales de l'Institut Oceanographique*, 43 (2), 1-137.
- Laubier L. (1986). *Des oasis au fond des mers*. Collection Science et Découvertes, Le Rocher, Monaco, 1-155.
- Legendre P., Legendre L. (1998). *Numerical Ecology, 2nd English edition*. Elsevier, Amsterdam, 1-853.
- Martin S., Charnoz A., Gattuso J.P. (2013). *Photosynthesis, respiration and calcification of the Mediterranean crustose coralline alga *Lithophyllum cabiochae* (Corallinales, Rhodophyta)*. *European Journal of Phycology*, 48, 163-172.
- Montefalcone M., De Falco G., Nepote E., Canessa M., Bertolino M., Bavestrello G., Morri C., Bianchi C.N. (2018). *Thirty year ecosystem trajectories in a submerged marine cave under changing pressure*. *Marine Environmental Research*, 137, 98-110.
- Morri C. (2003). *Confinamento idrologico*. *Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia*. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio, Rome, 291–296.
- Morri C., Bianchi C.N. (1982). *Contributo alla conoscenza degli Idrozoi lagunari italiani: distribuzione di Idropolipi lungo un gradiente ambientale nella laguna di Chioggia (Nord Adriatico)*. *Bollettino dei Musei e degli Istituti biologici dell'Università di Genova*, 270-274.

Morri C., Bianchi C.N. (2001). *Recent changes in biodiversity in the Ligurian Sea (NW Mediterranean): is there a climatic forcing*. Structure and Processes in the Mediterranean Ecosystems. Faranda F.M., Guglielmo L., Spezie G. (Eds). Springer-Verlag, Milan, Italy, 375-384.

Morri C., Bianchi C.N. (2003). *Zonazione biologica*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio, Rome, 257-265.

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 (2), 85-94.

Morri C., Bussotti S., Guidetti P., Bianchi C.N. (2003). *Tecniche di campionamento e misura*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrar G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della tutela del Territorio, Rome, 337-345.

Morri C., Cinelli F., Bianchi C.N. (1994). *Sessile epifauna gigantism in a submarine cave with sulphur springs*. U.I.S. Cave Diving, 6, 1-6.

Morri C., Montefalcone M., Gatti G., Vassallo P., Paoli C., Bianchi C.N. *An Alien Invader is the Cause of Homogenization in the Recipient Ecosystem: A Simulation-Like Approach*. DiSTAV (Department of Earth, Environmental and Life Sciences), University of Genoa, 16132 Genova, Italy.

National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA). <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/timeseries/>

Nepote E., Bianchi C.N., Morri C., Ferrari M., Montefalcone M. (2017). *Impact of a harbour construction on the benthic community of two shallow marine caves*. Marine Pollution Bulletin, 114, 35-45.

Okamura B., Harmelin J.G., Jackson J.B.C. (2001). *Refuges revisited. Enemies versus flow and feeding as determinants of sessile animal distribution and form*. Jackson J.B.C., Lidgard S., McKinney F.K. (Eds). Evolutionary patterns: growth, form and tempo in the fossil record. University of Chicago Press, Chicago & London, 61-93.

- Ott J.A., Svoboda A. (1976). *Sea caves as model systems for energy flow studies in primary hard bottom communities*. Pubblicazioni della Stazione Zoologica di Napoli, 40, 477- 485.
- Pansini M., Pronzato R. (1982). *Distribuzione ed ecologia dei poriferi nella grotta di Mitigliano (Penisola sorrentina)*. Bollettino dei Musei e Istituti Biologici Università Genova, 50, 287-293.
- 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, 276-282.
- Parravicini V., Morri C., Ciribilli G., Montefalcone M., Albertelli G., Bianchi C.N. (2009). *Size matters more than method: visual quadrats versus photography in measuring human impact on Mediterranean rocky reef communities*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 81, 359-367.
- Pérès J.M., Picard J. (1949). *Notes sommaires sur le peuplement des grottes sous marines de la région de Marseille*. Séances Society Biogéography, 26 (227), 42-45.
- Pérès J.M., Picard J. (1964). *Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée*. Station Marine d'Endoume, 47, 1-137.
- Rastorgueff P.A., BellanSantini D., Bianchi C.N., Bussotti S., Chevaldonné P., Guidetti P., Harmelin J.G., Montefalcone M., Morri C., Perez T., Ruitton S., Personnic S., Vacelet J. (2015). *An ecosystem based approach to evaluate the ecological quality of Mediterranean undersea caves*. Ecological Indicators, 54, 137-152.
- Riedl R. (1966). *Biologie der Meereshöhlen*. Paul Parey, Hamburg and Berlin, 1-636.
- Riedl R., Ozretic B. (1969). *Hydrobiology of marginal caves. Part I. General problems and introduction*. Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie, 54 (5), 661-683.
- Rosso A., Di Martino E. (2016). *Bryozoan diversity in the Mediterranean Sea: an update*. Mediterranean Marine Science, 17 (2), 567-607.
- Rosso A., Gerovasileiou V., Sanfilippo R., Guido A. (2019). *Bryozoan assemblages from two submarine caves in the Aegean Sea (Eastern Mediterranean)*. Marine Biodiversity, 49 (2), 707-726.

Russo F.G., Bianchi C.N. (2003). *Organizzazione trofica*. Grotte marine: cinquant'anni di ricerca in Italia. Cicogna F., Bianchi C.N., Ferrari G., Forti P. (Eds). Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio, 313-320.

Sarà M. (1974). *Il popolamento delle grotte marine e sua protezione*. Atti del IV Simposio nazionale sulla Conservazione della Natura. Cacucci, Bari, 1, 51-59.

Sarà M. (1976). *Il popolamento delle grotte marine: interesse di una salvaguardia*. Pubblicazione Stazione Zoologica di Napoli, 40, 502-505.

Sarà M. (1978). *Il popolamento delle grotte marine: interesse di una salvaguardia*. Pubblicazioni della Stazione Zoologica di Napoli, 40, 502-505.

Sempere-Valverde J., Lorenzo Á.S., Espinosa F., Gerovasileiou V., Sánchez-Tocino L., Navarro-Barranco C. (2019). *Taxonomic and morphological descriptors reveal high benthic temporal variability in a Mediterranean marine submerged cave over a decade*. Hydrobiologia, 839 (1), 177-194.

Southward A.J., Kennicut M.C., Abbiati M., Airoidi L., Cinelli F., Bianchi C.N., Morri C., Southward E.C. (1996). *On the biology of submarine caves with sulphur springs: appraisal of $^{13}C/^{12}C$ ratios as a guide to trophic relations*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 76, 265-285.

Tarasov V.G., Propp M.V., Propp L.N., Zhirmunsky A.V., Namsaraev B.B., Gorlenko V.M., Starynin D.A. (1990). *Shallow-water gasohydrothermal vents of Ushishir Volcano and the ecosystem of Kraternaya Bight (the Kurile Islands)*. Marine Ecology, 11 (1), 1-23.

Trager G.C., Hwang J.S., Strickler J.R. (1990). *Barnacle suspension feeding invariable flow*. Marine Biology, 105, 117-127.

UNEP-MAP-RAC/SPA (2015). *Action Plan for the Conservation of Habitat and Species Associated with Seamounts, Underwater Caves and Canyons, Aphotic Hard Beds and Chemosynthetic Phenomena in the Mediterranean Sea*. Dark Habitats Action Plan. RAC/SPA, Tunis.

Vacelet J. (1964). *Étude monographique de l'éponge calcaire Pharétronide de Méditerranée, Petrobiona massiliana, Vacelet et Lévi*. Les Pharétronides actuelles et fossils, Endoume, 50 (34), 1-125.

Vacelet J. (1994). *Porifera*. Encyclopaedia biospeleologica. Juberthie C., Decu V. (Eds). Société de Biospéologie, Saint-Girons (France), 1, 35-38.

Vacelet J., Levi C. (1958). *Un cas de survivance, en Méditerranée, du groupe d'éponges fossiles des Pharetronides*. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 246, 318-320.

Woodin S.A., Jackson J.B.C. (1979). *Interphyletic Competition Among Marine Benthos*. American Zoologist, 19, 1029-1043.

Zabala M., Ballesteros E. (1989). *Surface dependent strategies and energy flux in benthic marine communities or, why corals do not exist in the Mediterranean*. Scientia Marina, 53 (1), 3-17.

Zabala M., Riera T., Gili J.M., Barange M., Lobo A., Peñuelas J. (1989). *Water flow, trophic depletion, and benthic macrofauna impoverishment in a submarine cave from the Western Mediterranean*. Marine Ecology, 10 (3), 271-287.

Zibrowius H. (1971). *Remarques sur la faune sessile des grottes sousmarines et de l'étage bathyal en Méditerranée*. Station Marine d'Endoume, Marseille, 20 (3), 243-245.

RINGRAZIAMENTI

Nella vita ordinaria noi raramente ci rendiamo conto che riceviamo molto di più di ciò che diamo, e che è solo con la gratitudine che la vita si arricchisce (Dietrich Bonhoeffer).

Non mi piace dire “grazie di tutto”, fa sembrare che siamo arrivati alla fine, invece per me questo è solo l’inizio.

Vorrei ringraziare la prof.ssa M. Montefalcone, relattrice di questa tesi di laurea, e i proff. C.N. Bianchi e C. Morri, oltre che per l’aiuto fornitomi durante questo lavoro e la grande conoscenza che mi hanno donato in questi anni, per la disponibilità e precisione dimostratemi durante tutto il periodo di stesura. Senza di Loro questo lavoro non avrebbe preso vita!

Un grande ringraziamento a mia nonna con la quale ho vissuto questi cinque anni e che mi ha dato la possibilità di coronare il mio sogno. A Lei non finirò mai dire “grazie” per la pazienza che ha dimostrato e l’affetto che mi ha donato!

Ringrazio tutti i miei zii, ma in particolare loro: zia Tina e zio Gianca. Sono stati per me una seconda famiglia facendomi sentire costantemente a casa anche a 1000 km di distanza!

Ringrazio la mia migliore amica, per me come una sorella, Valentina. Tu hai sempre creduto in me e nelle mie potenzialità ricordandomi quanto io valessi anche quando, a volte, lo dimenticavo!

Ringrazio colui che mi ha sostenuto, sopportato e mi è rimasto accanto nonostante la distanza: la mia “Rovina”. Mi hai dimostrato la tua pazienza giorno per giorno e che il tempo non conta per il cuore!

Ringrazio mia cognata, che in questi lunghi cinque anni mi è stata accanto quotidianamente ripetendomi sempre “Dai cognà, tieni duro che presto ci rivedremo”. È stata per me una fonte di incoraggiamento infinita!

Un grazie di cuore ai miei compagni, con cui ho condiviso l’intero percorso universitario. Con loro ho condiviso i momenti più difficili ma anche quelli di spensieratezza che mi hanno dato modo di andare avanti senza sentire, costantemente, quella sensazione di ansia sulle spalle!

Infine, ma non per importanza, ringrazio la mia famiglia: mia madre, mio padre e mio fratello che mi hanno sempre sostenuto, sia moralmente che economicamente, appoggiando ogni mia decisione, fin dalla scelta del mio percorso di studi contribuendo così alla mia formazione personale!

E sento di ringraziare, in particolare, te PAPA', perché se ho realizzato questo mio sogno lo devo a te che fin da bambina hai trasmesso in me l'amore incondizionato per il mare!

Voglio ringraziare anche me stessa per l'impegno costante che ho dimostrato al fine di raggiungere questo traguardo e terminare con una citazione che, ormai da tempo, mi rappresenta:

“Dopo l'istante magico in cui i miei occhi si sono aperti nel mare, non mi è stato più possibile vedere, pensare, vivere come prima” (Jacques-Yves Cousteau).