



Università
di Catania

Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra e dell’Ambiente
Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali

**LE BIOCOSTRUZIONI A *SABELLARIA ALVEOLATA* (ANNELIDA,
POLYCHAETA) DI AREE COSTIERE DELLA SICILIA:
ARCHITETTURA, BIOCEMENTO E ASPETTI ECOLOGICI**

*Sabellaria alveolata (Annelida, Polychaeta) bioconstructions from Sicilian coastal
areas: architecture, biocement and ecological aspects*

DOTTORE

CLAUDIA DEIAS

COORDINATORE

PROF.SSA AGATA DI STEFANO

TUTOR

PROF.SSA ROSSANA SANFILIPPO

CO - TUTOR

PROF. ADRIANO GUIDO

PROF.SSA DONATELLA SERIO

CICLO XXXV

ANNO ACCADEMICO 2021/2022

Indice

1. INTRODUZIONE	4
2. GENERALITÀ	7
2.1. Inquadramento sistematico e caratteri diagnostici di <i>Sabellaria alveolata</i>	7
2.2. Distribuzione geografica e stratigrafica del genere <i>Sabellaria</i>	21
2.3. Le biocostruzioni a <i>Sabellaria</i>	26
2.4. Caratteristiche ecologiche delle biocostruzioni a <i>S. alveolata</i>	30
2.5. Le minacce e la normativa.....	31
3. MATERIALI E METODI	33
3.1. Aree di studio	33
3.1.1. Condizioni meteomarine	35
3.2. Studio bibliografico	40
3.3. Campagne di rilievo	41
3.4. Monitoraggio spazio-temporale delle biocostruzioni	42
3.5. Analisi chimico- fisiche delle acque circostanti le biocostruzioni	44
3.6. Analisi granulometriche del sedimento del fondale	47
3.7. Studi dei campioni: macrostruttura e microstruttura	49
3.8. Identificazione degli individui di <i>Sabellaria</i>	53
3.9. Studio e caratterizzazione del biocemento	54
3.9.1. Osservazioni al microscopio ottico in luce riflessa ed epifluorescenza	54
3.9.2. Osservazioni e analisi al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM)	54
3.9.3. Osservazioni e analisi alla Microsonda Elettronica (EMPA).....	57
3.10. Studio della fauna associata.....	59
3.11. Studio della flora macroalgale associata	59
4. RISULTATI	61
4.1. Determinazione della specie <i>Sabellaria alveolata</i>	61
4.2. Distribuzione geografica.....	63
4.3. Distribuzione stratigrafica	67
4.4. Struttura e composizione dei tubi	68
4.5. Modello di crescita e morfologie delle biocostruzioni	76
4.6. Evoluzione spazio-temporale delle biocostruzioni.....	83
4.7. Granulometria del sedimento del fondale circostante	94

4.7.1. Granulometria del sedimento delle biocostruzioni	96
4.8. Il biocemento dei tubi	98
4.8.1. Modalità di distribuzione e morfologia dei punti colla	98
4.8.2. Struttura interna dei punti colla	100
4.8.3. Composizione dei punti colla	102
4.9. Caratteristiche chimico- fisiche delle acque circostanti le biocostruzioni	109
4.10. I taxa associati alla biocostruzione	115
5. DISCUSSIONE	122
5.1. Distribuzione geografica.....	122
5.2. Distribuzione stratigrafica	123
5.3. Struttura e composizione dei tubi	123
5.4. Modello di crescita e morfologie delle biocostruzioni	126
5.5. Evoluzione spazio-temporale delle biocostruzioni.....	130
5.6. Il biocemento dei tubi	134
5.6.1. Modalità di distribuzione dei punti colla.....	135
5.7. Caratteristiche chimico- fisiche delle acque circostanti le biocostruzioni	135
5.8. I taxa associati alla biocostruzione	137
6. CONCLUSIONI	139
7. BIBLIOGRAFIA	142

1. INTRODUZIONE

I Sabellaridi, o *sandcastle worms*, sono una famiglia di anellidi policheti che vivono all'interno di tubi sabbiosi agglutinati, in fondali marini poco profondi. Si accrescono inizialmente aderendo su un substrato duro a condizione che nell'ambiente circostante sia presente la sabbia di cui l'animale ha bisogno per costruire i suoi tubi (Delbono *et al.*, 2003). I Sabellaridi si espandono successivamente, colonizzando fondi limitrofi a dominanza sabbiosa, formando delle biocostruzioni di diversa morfologia. Diffusi in diversi mari, incluso il Mar Mediterraneo, questi organismi possono formare aggregati molto numerosi, dove i tubi agglutinati contribuiscono a creare *reef* biocostruiti che si sviluppano sia orizzontalmente che verticalmente (Desroy *et al.*, 2011). La specie *Sabellaria alveolata*, appartenente a questa famiglia, è distribuita in Mediterraneo e Atlantico orientale dove forma biocostruzioni che possono formare *reef* alti fino a 1,8 m (Kirtley e Tanner, 1968; Dubois *et al.*, 2003, 2005; Noernberg *et al.*, 2010) ed estesi diversi ettari. In condizioni favorevoli i tubi crescono paralleli e a contatto tra loro formando aggregati di oltre 60.000 individui per m² (Dubois *et al.*, 2002). *Sabellaria alveolata* si insedia principalmente lungo coste moderatamente aperte ed esposte all'azione delle correnti e del moto ondoso. Come per gli altri Sabellaridi, i *reef* a *S. alveolata* sono delicati e si disgregano facilmente a causa dell'erosione marina.

In Mediterraneo *S. alveolata* forma biocostruzioni in fondali costieri dal mesolitorale all'infralitorale superiore fino a circa 5 m di profondità, dove l'idrodinamismo elevato permette la risospensione delle particelle di sedimento, necessarie al verme per la costruzione del tubo. Gli elementi del sedimento vengono cementati da un muco adesivo proteico secreto dall'animale stesso, che solidifica a contatto con l'acqua dopo pochi secondi, che viene applicato in minuscole porzioni sui granuli e posizionato sul bordo aperturale del tubo (Waite *et al.*, 1992; Zhao *et al.*, 2005).

I *reef* a Sabellaridi mostrano diversi punti di interesse, tra i quali:

- 1) La capacità di creare un substrato rilevato dal fondale avente una struttura complessa che presenta microcavità e interstizi. La loro presenza e sviluppo su un fondale mobile è importante perchè aumenta la complessità dell'habitat e promuove la biodiversità locale favorendo la comparsa di organismi associati sia animali che vegetali, analogamente a quanto osservato per altre biocostruzioni formate da alghe calcaree, vermetidi e coralli.
- 2) La capacità di interferire con la sedimentazione. Essi sequestrano dall'ambiente sedimento per cementarlo nei loro tubi, fungendo da veri e propri "serbatoi" di sabbia,

che viene eventualmente restituita al fondale quando la biocostruzione si disgrega per eventi idrodinamici particolarmente violenti. Inoltre, se il *reef* è attivo, in condizioni ottimali, si sviluppa costituendo un corpo rilevato dal fondo che smorza il moto ondoso proteggendo le aree costiere dall'erosione e favorendo la deposizione di sedimento più fine sul lato riparato. Ciò è in perfetta analogia con altre biocostruzioni, come le classiche scogliere coralline.

- 3) La capacità di secernere un biocemento che permette la coesione delle particelle di sabbia e conferisce alla struttura consistenza, stabilità e resistenza all'azione del moto ondoso. Ad oggi sono pochi gli studi condotti sulle caratteristiche strutturali, morfologiche e composizionali di questa secrezione proteica e sulla sua spiccata capacità adesiva. Interessanti sono i risvolti applicativi del biocemento sia in ambito ambientale che biomedico (Shao *et al.*, 2009) che meritano ulteriore sviluppo.

Non si conoscono testimonianze fossili di *reef* a *Sabellaria* e gli unici finora noti per il Miocene superiore (Tortoniano) della Spagna sudorientale, in associazione a coralli ermatipici (Garcin e Vachard, 1987, 1994) si sono rivelati non appartenere a Sabellaridi (vedi paragrafo 4.3. Risultati). La mancanza di ritrovamenti è presumibilmente dovuta alla scarsa potenzialità di fossilizzazione. Infatti, il biocemento, nonostante sia particolarmente forte, è costituito da sostanza organica soggetta a decomposizione durante le prime fasi della diagenesi. Conseguentemente, gli elementi agglutinati tendono a disgregarsi e a non lasciare traccia nel record fossile.

Ai fini dello studio di tesi, sono stati selezionati tre siti siciliani di nuovo ritrovamento che mostrano tre differenti morfologie delle biocostruzioni: a *crosta* (Portopalo di Capo Passero - SR), a *cuscinio* (Simeto - CT) e a *banco* (Falconara - CL).

La tesi è stata affrontata con un approccio multidisciplinare, prendendo in considerazione aspetti sistematici, ecologici, sedimentologici, geochimici e si prefigge di approfondire le ricerche su questi *reef*, evidenziando differenze tra le biocostruzioni in relazione alle diverse condizioni ambientali.

Obiettivi della ricerca

Lo studio dei tre campioni dei siti siciliani si è posto i seguenti obiettivi:

- 1) Conoscere meglio la distribuzione e l'estensione dei *reef* a *Sabellaria alveolata* nel suo areale, riportando nuovi record per le coste della Sicilia.
- 2) Approfondire gli aspetti riguardanti l'architettura macroscopica delle biocostruzioni e la struttura della parete dei singoli tubi agglutinati.
- 3) Investigare la natura del biocemento e la modalità di incollaggio degli elementi sabbiosi, anche in relazione ai parametri chimico-fisici dell'acqua circostante.
- 4) Individuare eventuali differenze tra i *reef* delle diverse aree campionate riguardo la morfologia/dimensione e la composizione degli elementi agglutinati, in relazione alla disponibilità di sedimento nei fondali limitrofi.
- 5) Approfondire gli aspetti ecologici delle biocostruzioni con la conoscenza degli organismi associati.
- 6) Investigare sulla conoscenza dei ritrovamenti fossili di *reef* a *Sabellaria*.

2. GENERALITÀ

2.1. Inquadramento sistematico e caratteri diagnostici di *Sabellaria alveolata*

La specie investigata *Sabellaria alveolata* (Linnaeus, 1767) rientra nel **Phylum Annelida** Lamarck, 1809. Questo comprende animali invertebrati vermiformi con una netta simmetria bilaterale e a sezione fondamentalmente circolare. Il corpo è privo di scheletro interno e la caratteristica che li distingue è la metameria, cioè la suddivisione del corpo in parti simili, o segmenti, disposti in serie lineare lungo un'asse. La metameria è rilevabile anche dall'esterno (Fig. 1) conferendo al corpo un aspetto anellato (dando il nome del phylum). Tale metameria, in gran parte degli Anellidi, è eteronoma, cioè i segmenti non sono tutti uguali tra loro nelle diverse zone del corpo, infatti esso appare diviso in tre parti: regione cefalica o prostomio, regione toracica e regione addominale. Il prostomio, porta gli occhi, tentacoli e palpi. La regione toracica è quella che comprende i segmenti o metameri che possono essere in numero variabile. La regione addominale infine comprende la parte terminale dei metameri che via via diminuiscono di diametro; all'estremità della regione addominale si apre l'ano. Il sistema muscolare è costituito da 4 robusti fasci longitudinali (atti alla contrazione) dati da 2 ventrali e 2 dorsali, fasci trasversali, fasci circolari e muscoli dei parapodi per il loro movimento. L'apparato circolatorio è dato da un sistema chiuso costituito essenzialmente da 2 principali vasi longitudinali (uno dorsale di maggiore diametro ed uno ventrale) che si ramificano formando reti capillari nella parete del corpo, dall'intestino e dei nefridi. Dall'asse dorsale si dipartono un paio di vasi per ogni metamero che, dopo essersi capillarizzati, confluiscono nel vaso ventrale. L'apparato escretore è costituito da un paio di grossi nefridi che si aprono all'esterno tramite un tubicolo che mette in comunicazione la cavità celomatica con l'esterno. Il sistema nervoso è costituito da una massa di gangli cerebriformi situati nel prostomio dalla quale si dipartono altri gangli uniti tra loro a formare una catena nervosa centrale situata ventralmente. Dalla massa cerebroide e dalla catena ventrale si dipartono i nervi periferici. La respirazione è cutanea ed avviene grazie alla rete di capillari superficiali. L'apparato digerente è molto semplice essendo costituito da un tubo dritto che inizia dalla bocca, continua con faringe a parete fortemente muscolosa, esofago, intestino e termina con l'ano.

L'evoluzione filogenetica del Phylum degli Anellidi evidenzia una soluzione ottimale per il conseguimento di una sempre migliore mobilità, soluzione raggiunta con la realizzazione di un'architettura nuova tale da consentire uno spostamento sempre più rapido

ed efficace. Ciò è stato reso possibile grazie alla comparsa di una struttura interna completamente nuova consistente in una cavità celomatica suddivisa in metameri (Figg. 1, 2), quale scheletro idrostatico. Conseguentemente si è modificata la cuticola esterna che è diventata più resistente; questa, oltre a svolgere un ruolo protettivo, ha successivamente consentito un maggiore sviluppo della muscolatura, alla quale la cuticola poteva offrire un più consistente appiglio (La Greca, 1990; Fauchald e Rouse, 1997).

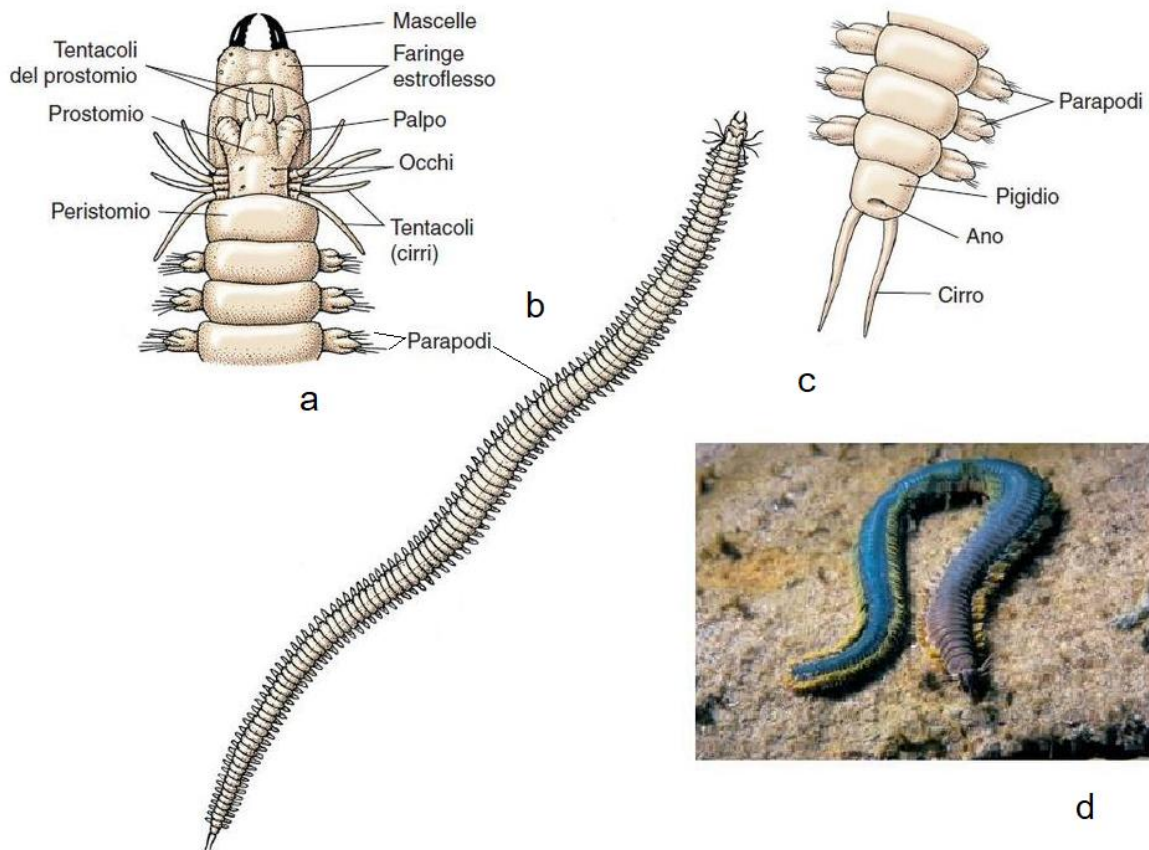


Fig. 1 – Caratteri diagnostici del Phylum Annelida. a) Porzione anteriore, con faringe estroflesso. b) Struttura esterna. c) Estremità posteriore. d) *Nereis diversicolor*: si notino i segmenti ben definiti, i parapodi lobosi e il prostomio con tentacoli (da La Greca, 1990, modificato).

La **Classe Polychaeta** Grube, 1850 è un taxon molto eterogeneo che comprende 13.000 specie di cui almeno 8.000 presenti nel Mar Mediterraneo, quasi tutte marine, che conducono vita libera o sono più o meno legate al substrato. Hanno corpo allungato, metamerico, di cui ogni segmento, ad eccezione di quello cefalico, reca un paio di espansioni muscolari laterali dette parapodi, generalmente distinte in un ramo dorsale (notopodio) e un ramo ventrale (neuropodio), sostenute da un'acicula, che portano setole e funzionano da appendici locomotorie (Fig. 2). Il loro nome deriva proprio dalla presenza di queste setole (lat. scient.

Polychaeta, comp. di poly- «poli-» e gr. χείτη «criniera»). Notopodio e neuropodio portano inoltre i cirri, che possono funzionare come organi di senso, o essere vascolarizzati e trasformati in branchie; nelle forme pelagiche sono modificati in membrane foliacee per il nuoto.

I Policheti possiedono tipicamente dimensioni variabili dai 5 a 10 cm, tuttavia non mancano individui di pochi millimetri o con lunghezza del corpo superiore al metro (Baccetti *et al.*, 1991; Rouse e Pleijel, 2001). Nel loro capo, detto prostomio, risiedono organi fotoricettori (occhi) e tattili (palpi, tentacoli e stereociglia), la bocca si trova sotto il prostomio, di fronte al primo dei due metameri modificati (peristomio) ed è munita di una faringe spesso estroflettibile.

A seconda delle modalità di vita si distinguono in erranti, che conducono vita libera, pelagici o striscianti sul fondo, e sedentari, che vivono per lo più entro tubi (da cui il nome di tubicoli) aderenti al substrato o scavati nel fondo.

Sono generalmente animali a sessi separati, con una riproduzione a fecondazione esterna e dall'uovo si origina una larva trocofora, liberamente natante. La loro sistematica è ancora problematica, ma vi è ormai accordo nell'abbandonare la tradizionale classificazione in Policheti Erranti (Errantia) e Policheti Sedentari (Sedentaria) che tuttavia risulta ancora di utilità pratica.

Dagli Archianellidi, acquistando metameria, sono derivati gli Anellidi Policheti effettuando un fondamentale passo in avanti riguardo la motilità che tanti gruppi avevano tentato di raggiungere: alcuni Turbellari, i Nemertei con la loro pseudometameria, i Molluschi (Monoplacofori) con tentativi bloccati dalla conchiglia. Gli Archianellidi si muovono sul fondo solo per mezzo delle setole, adatte a trovare appigli nell'ambiente circostante; la presenza di prominente laterali a ciascun segmento del corpo come supporto delle setole favorendone un migliore funzionamento, ha costituito nei Policheti un'importante acquisizione: nascono così i parapodi che divengono la struttura caratteristica dei Policheti e che consentono a questa classe, unitamente alla specializzazione della metameria e della muscolatura, di espandersi in tutti gli ambienti marini, uscendo dai fondi sabbiosi in cui sono relegati gli Archianellidi e potendo così sfruttare nuove e più importanti fonti di cibo.

Se i primi Anellidi vivevano sulla sabbia e sul fango di acque basse, i Policheti potrebbero rappresentare una linea che si è separata, da principio utilizzando le risorse di una esistenza epibentonica (sul fondo) per la quale i parapodi ed un capo più sviluppato

avrebbero costituito un adattamento specifico. Forse da molti diversi ceppi di policheti ancestrali che abitavano la superficie dei fondi mobili, è avvenuta la radiazione in altri ambienti e l'adozione di altri modi di vita sia epifaunale su fondi duri, sia infaunali su fondi molli e rocciosi, con la comparsa di diverse famiglie.

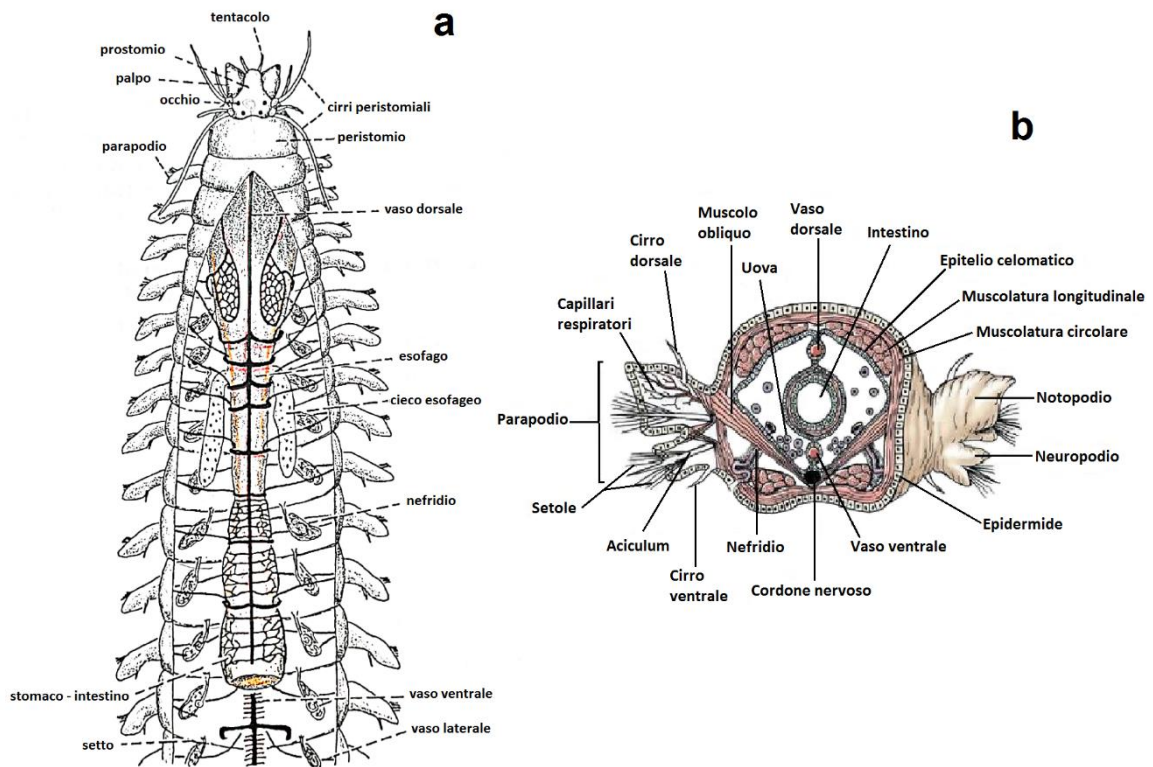


Fig. 2 – Caratteri generali e anatomia di un Polychaeta. a) Sezione longitudinale. b) Sezione trasversale di un singolo metamero (da La Greca, 1990, modificato).

In alcune famiglie di Policheti sedentari compare nel Paleozoico un adattamento alla vita sessile all'interno di tubi da essi costruiti (Policheti tubicoli). Il loro corpo è profondamente modificato per vivere dentro il proprio tubo: gli occhi, le mascelle e gli organi di senso prostomiali sono ridotti o assenti del tutto, la regione cefalica o prostomio mostra strutture speciali per l'assunzione del cibo e la respirazione come il ciuffo di filamenti branchiali attorno alla bocca (Fig. 3). In alcune specie i parapodi del primo e del secondo segmento sono trasformati in cirri, lunghe appendici sottili simili ad antenne o tentacoli. Questi vermi di solito si spostano nel tubo con contrazioni peristaltiche e hanno nella regione toracica parapodi ridotti provvisti di setole uncinatate per aggrapparsi alla parete del tubo. Tra i policheti sedentari tubicoli alcuni gruppi costruiscono il proprio tubo su substrato duro

(Serpulidae, Sabellariidae, Sabellidae); altri perforano substrati duri o scavano tane dentro il sedimento che rivestono di pareti di muco con o senza sedimento agglutinato (Terebellidae, Oweniidae, Pectinariidae). Si tratta di organismi sospensivori capaci di nutrirsi delle particelle sospese in acqua, catturate attraverso il movimento delle ciglia della corona branchiale e convogliate alla bocca (Fig. 4). Queste cinque famiglie hanno la capacità di agglutinare, tramite il cemento organico, sedimento sabbioso o fangoso all'interno del proprio tubo. L'esoscheletro o tubo nelle sopraelencate famiglie Sabellariidae, Pectinariidae, Oweniidae, Terebellidae e Sabellidae è prodotto da speciali ghiandole che secernono cemento organico, mentre la Famiglia Serpulidae secerne cemento minerale.

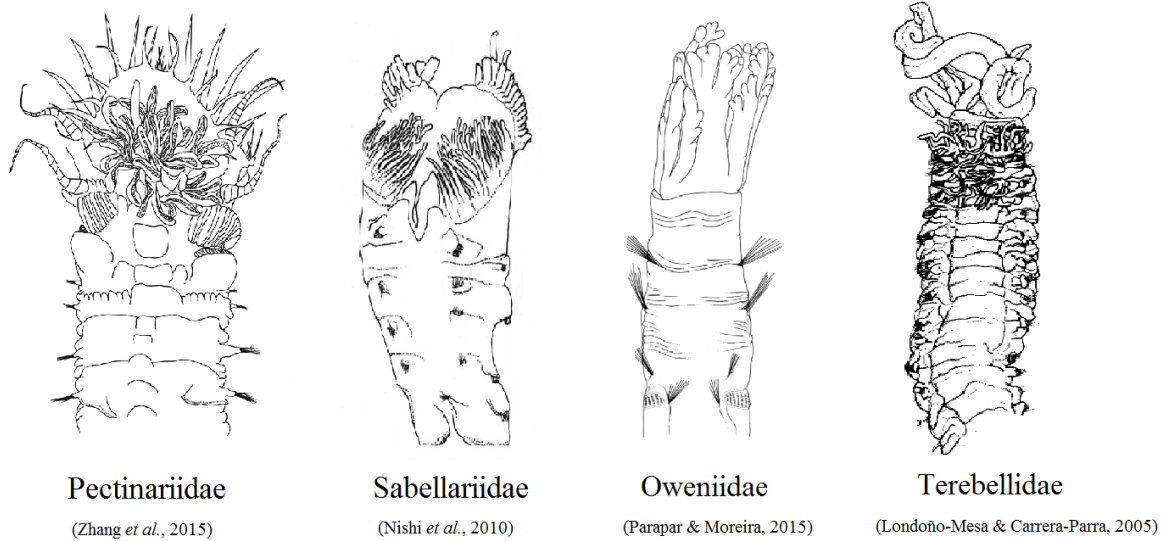


Fig. 3 – Esempi di differenti morfologie del capo di Policheti sedentari.

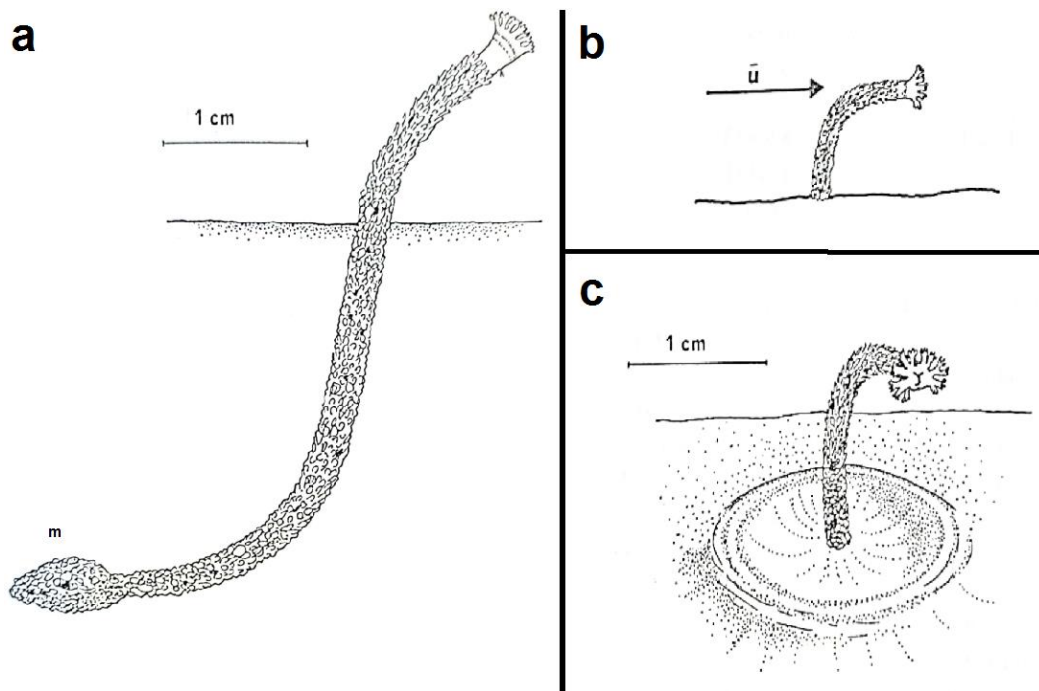


Fig. 4 – a) Owenide all'interno del proprio tubo in un fondale sabbioso- fangoso. Il manicotto (m) di sedimento agglutinato all'estremità inferiore, la forma ad "S" e l'estremità libera dai grani rivolta verso l'alto tendono ad agevolare l'ancoraggio al fondo. Gli individui presentano un doppio trofismo a seconda del particellato in sospensione: b) sospensivoro in acque mosse in cui il tubo è orientato nella direzione della corrente (\bar{u}) e c) depositivoro in condizioni di acque calme in cui il prostomio si piega e si muove sul fondo per raccogliere il sedimento e il materiale organico che viene trasportato alla bocca lasciando una depressione circolare imbutiforme attorno al proprio tubo (Da Gambi, 1987).

In letteratura pochissimi lavori sono destinati allo studio dei tubi di questi policheti. Recentemente, sono state descritte e confrontate le strutture interne dei tubi di Terebellidi e Pectinaridi. Questi mostrano una struttura semplice formata da un unico strato di sedimento agglutinato che, nei Terebellidi, è composto da sabbie eterogenee e/o fango uniti disordinatamente da muco proteico mentre, nei Pectinaridi, i fragili tubi sono composti da elementi simili tra loro uniti da un cemento schiumoso a formare un pavimento ordinato (Fig. 5) (Dean *et al.*, 2009; Merz, 2015; Shcherbakova e Tzetlin, 2016; Shcherbakova *et al.*, 2017).

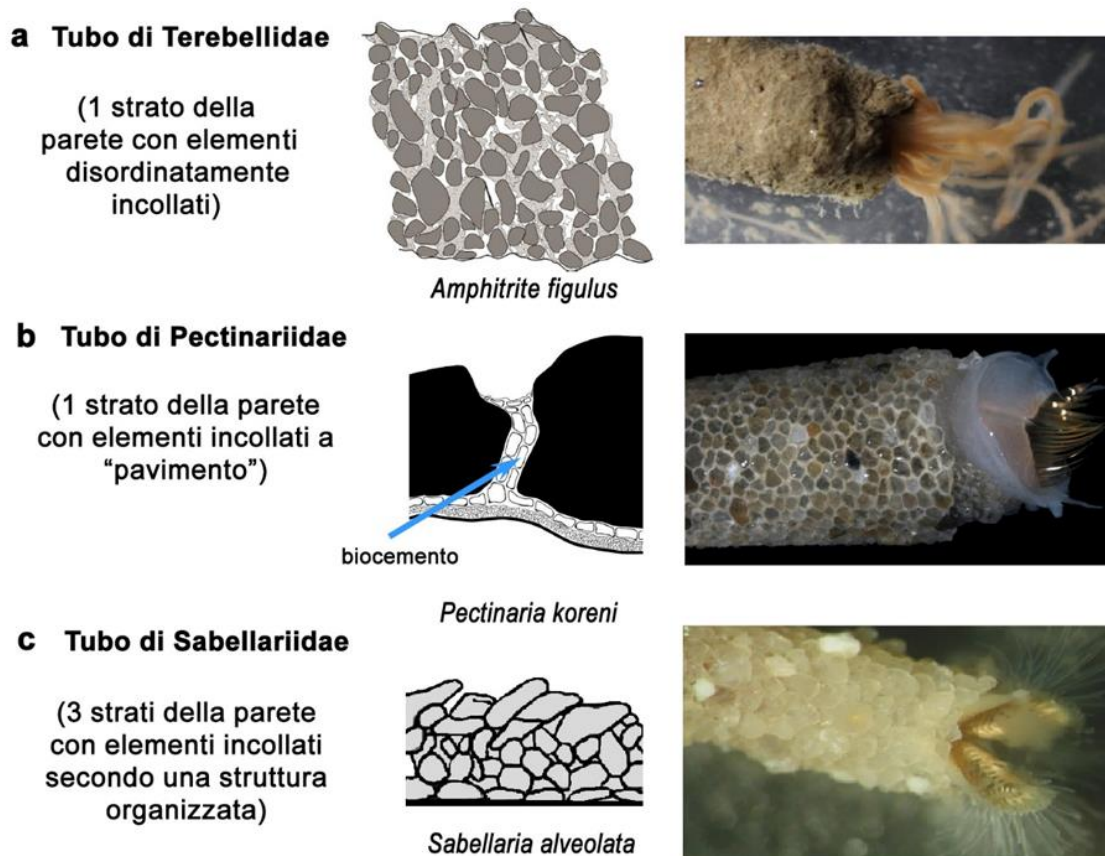


Fig. 5 – Sezioni schematiche della parete dei tubi di: a) Terebellidae; b) Pectinariidae (Shcherbakova e Tzetlin, 2016); c) Sabellariidae (Sanfilippo *et al.*, 2019).

Il tubo dei Sabellaridi segue un modello a tre strati, con distribuzione non casuale dei clasti al loro interno (Figg. 5; 6) (Vovelle, 1965; Gruet, 1972, 1982, 1984; Naylor e Viles, 2000; Dubois *et al.*, 2005; Fournier, 2013). Sia la natura del biocemento che questa complessa e organizzata struttura del tubo, necessitano di esser ulteriormente investigati e sono oggetto di approfondimento nella presente tesi.

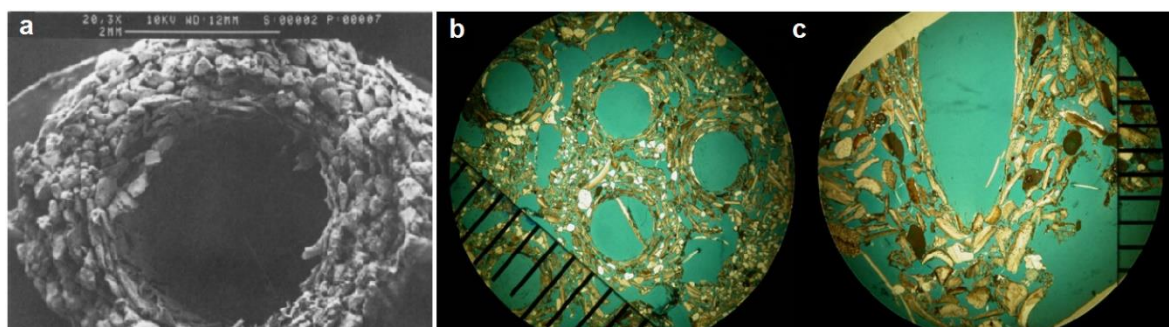


Fig. 6 – a) Sezione trasversale di un singolo tubo di *S. alveolata* che mostra la struttura embricata e l'uso preferenziale di grani piatti per lo strato interno del tubo (da Naylor e Viles, 2000). b-c)

Sezioni sottili che evidenziano l'organizzazione dei clasti in tubi di *S. alveolata* (Fournier, 2013) secondo un modello di strati concentrici.

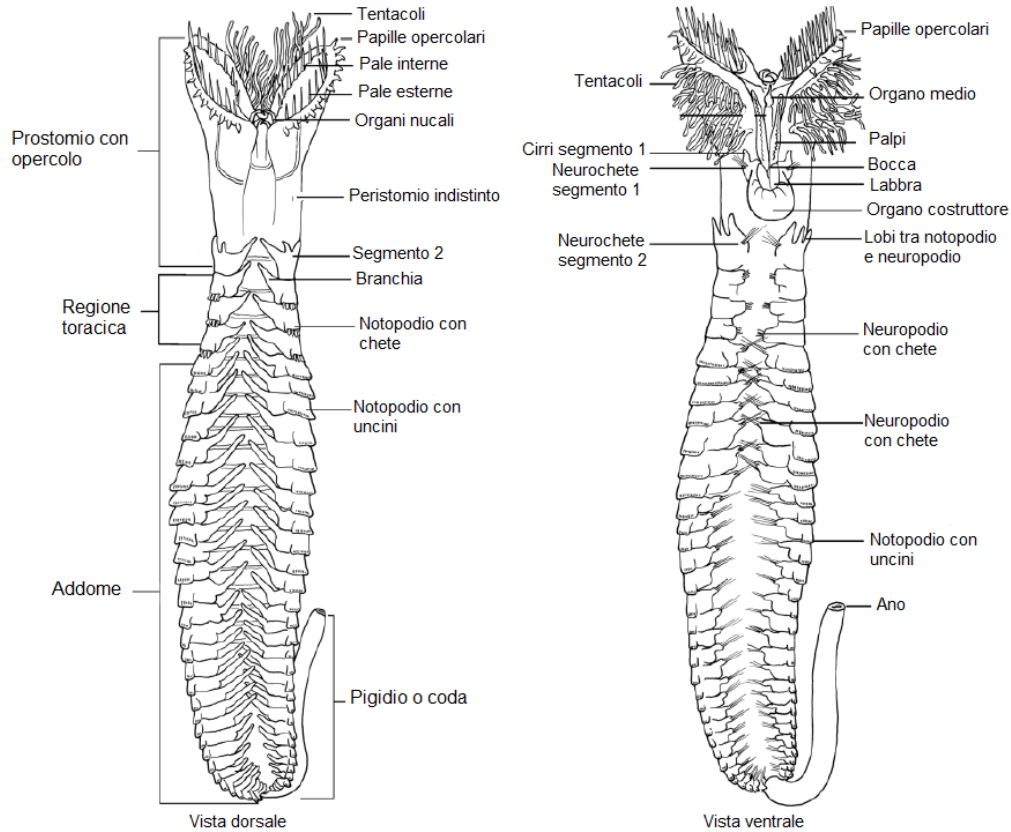


Fig. 7 – Distinzione delle parti del corpo dei membri della famiglia Sabellariidae (Capa *et al.*, 2012).

I Policheti appartenenti alla **Famiglia Sabellaridae** Johnston, 1865 vengono comunemente chiamati “sandcastle worms” per la capacità di produrre biocostruzioni costituite da tubi di sabbia agglutinata (Becker *et al.*, 2012).

Il corpo dei Sabellaridi (Fig. 7) è suddiviso in quattro sezioni distinte: capo, torace, addome e pigidio che, nei Sabellaridi, è solitamente molto allungato (Hutchings, 2000). Il capo, o prostomio, comprende un opercolo: organo mobile dai numerosi tentacoli utilizzati per pulire l'estremità del tubo in cui l'animale vive, capace di garantire, proprio insieme al tubo, protezione dai predatori e dal disseccamento (nei casi di emersione a seguito delle escursioni di marea) (Eckelbarger, 1976; Capa *et al.*, 2012). Il prostomio è indistinto dal peristomio, visibile solo come labbra attorno alla bocca, al quale sono associati palpi e organi nucali alla loro base. Alcuni Sabellaridi sono caratterizzati dalla presenza di un'appendice

prostomiale, l'organo mediano, cospicuo in alcune specie e piccolo in altre (Kirtley, 1994; Lechapt e Kirtley, 1996; Dos Santos *et al.*, 2014; Capa *et al.*, 2015).

I due generi più conosciuti, appartenenti a questa famiglia, sono *Sabellaria* e *Phragmatopoma* entrambi costruttori di reef molto simili. In particolare le specie più studiate sono *Sabellaria alveolata* (Linnaeus, 1767), tipica degli ambienti marini dell'Europa occidentale (Gruet, 1982), e la specie affine *Phragmatopoma californica* (Fewkes, 1889), vivente nell'Atlantico centro-occidentale e nel Pacifico orientale (Stewart *et al.*, 2004). Si distinguono per le loro differenti caratteristiche delle parti molli. Gli studi su *P. californica* sono principalmente incentrarsi sulla morfologia dell'organo costruttore e sulla nanostruttura e composizione del biocemento (Stewart *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2005) ma, riguardo al tubo, non ci sono lavori che ne descrivano la composizione e struttura.



Fig. 8 – a) Aggregati di tubi di *Phragmatopoma californica* a Natural Bridges (California). b) Dettaglio della parete dei tubi in *P. californica* (Foto di Allison J. Gong).

All'interno del **Genere *Sabellaria*** (Lamarck, 1818) la morfologia esterna dell'organo mediano è variabile. Esso può possedere forma conica, piatta o lobata ed essere circondato da una densa fila di ciglia che con il loro movimento creano una locale corrente utile al passaggio dell'acqua e alla nutrizione degli individui (Faroni-Perez *et al.*, 2016). La regione paratoracica è composta da 3-4 segmenti rudimentali con notopodi dalle chete semplici, da brevi e cilindrici neuropodi e da branchie dorsali allungate.

L'addome è caratterizzato dalla presenza di parapodi composti da un neuropodio corto e cilindrico, da un notopodio che si riduce e da branchie prolungate posizionate dorsalmente. L'addome è caratterizzato da una inversione di forma delle chete (sete): ad uncino nei

notopodi e capillari nei neuropodi (Dos Santos *et al.*, 2014) e all'estremità posteriore porta il pigidio con l'ano (Dos Santos *et al.*, 2014) (Fig. 7).

Il genere *Sabellaria* è rappresentato da numerose specie sospensivore sessili distribuite in tutto il mondo in aree intertidali o subtidali (Kirtley, 1994; Nishi *et al.*, 2010; Nishi *et al.*, 2015; Read e Fauchald, 2015) che vivono in aggregati di numerosi individui, i quali hanno la caratteristica di produrre tubi con sedimenti agglutinati da una colla organica secreta dagli organismi stessi (Fauchald, 1977).

Il genere si differenzia per un opercolo diviso in lobi simmetrici con pale ben sviluppate organizzate in tre file concentriche e per la presenza di tre segmenti paratoracici biramosi con sete appiattite (Fauvel, 1927; Kirtley, 1994; Nishi *et al.*, 2004; Capa *et al.*, 2012; Dos Santos *et al.*, 2014).

Le pale opercolari possono variare molto sia nella loro forma che nelle loro dimensioni, e costituiscono importanti indicatori ai fini della sistematica in quanto permettono di distinguere le singole specie l'una dall'altra.

L'opercolo è destinato alla chiusura del tubo nel quale l'anellide vive, nella sua parte sommitale. Tale estremità del corpo, oltre a proteggere l'organismo dall'ambiente esterno, ha una funzione sensoriale (Meyer *et al.*, 2019).

L'apparato sensoriale rivolto all'ambiente esterno comprende oltre alle chete, due lobi, dei filamenti tentacolari, un organo centrale e numerosi pigmenti. Esso ha capacità fotorecettive (*shadow reflex*) che prevedono, in caso di cambiamento repentino della luminosità, un ritorno istantaneo dell'animale all'interno del proprio tubo.

L'apparato sensoriale responsabile di questo riflesso è associato all'apparato responsabile della cattura e dell'agglutinamento del sedimento ai fini della costruzione del proprio tubo in quanto è riconducibile ad organi legati tra loro e coordinati dai nervi (Meyer *et al.*, 2019).

Lo stadio vitale primario del genere *Sabellaria* è una larva planctonica la quale, a un mese circa dalla nascita, si sviluppa fino a raggiungere lo stadio bentonico che l'organismo manterrà per il resto della sua vita.

Tutte le specie di *Sabellaria* hanno un opercolo subcircolare (Capa *et al.*, 2012), situato all'estremità anteriore di due lobi "peristomiali o opercolari" (Ebling, 1945). Ogni lobo peristomiale (Fig. 9) possiede ventralmente una fila di tentacoli (TF), posteriormente tre segmenti chitinosi, ognuno dei quali supporta una branchia cirriforme dorsale (B) e un notopodio a forma di lamella che, nei segmenti posteriori, diventa progressivamente più larga e possiede circa sei chete a forma di remo (DC). Ventralmente il parapodio forma una

cresta neuropodiale che sostiene un gruppo di chete (VC). Le labbra inferiori della bocca sono circondati dall'organo costruttore (BO) a forma di ferro di cavallo importante nello studio della crescita degli individui. Esso supporta un piccolo lobo chitinoso su ogni lato. Il quinto segmento post-peristomiale e il successivo segmento portano delle grandi branchie; il notopodio è rappresentato da una riga (U) che supporta una fila di numerosi ganci o uncini dentati. Ventralmente ad ogni riga il neuropodio è rappresentato da un piccolo ciuffo chitinoso sospeso sul lato esterno da un cirro (C).

L'opercolo è circondato alla base da un anello di papille coniche (P). Esso consiste di due dischi semilunari, ognuna comprendente tre file di pale a forma di mezza luna (Ebling, 1945).

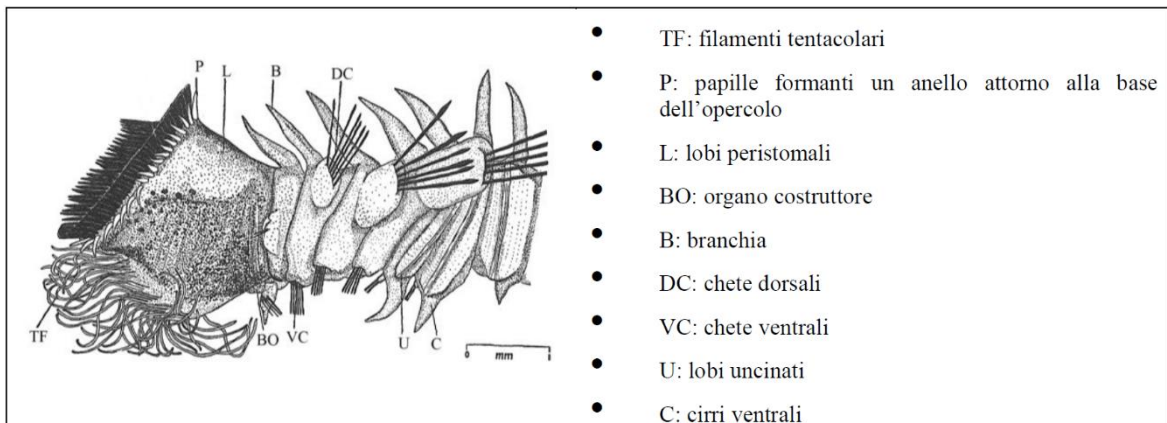


Fig. 9 – Vista laterale sinistra della regione anteriore di *Sabellaria alveolata* (Ebling, 1945).

Ogni disco è formato da pale distinte in esterne (O), medie (M) e interne (I) (Fig. 10). Le pale opercolari esterne (O) sono disposte in semicerchio con margini distali lisci o denticolati. Le pale mediane (M) sono rivolte verso l'esterno e mostrano margini appuntiti scavati o lisci. Le pale interne (I) di varia forma sono disposte come due anelli in una o due file (Capa *et al.*, 2012).

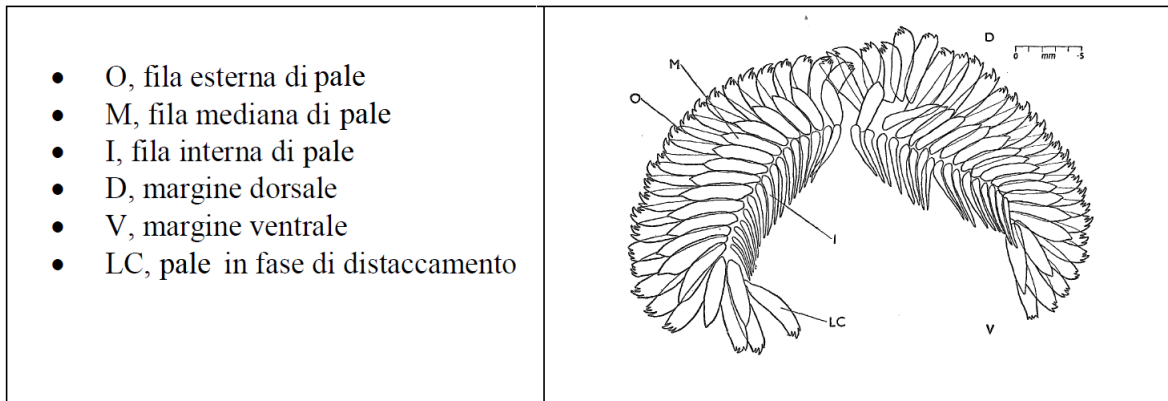


Fig. 10 – Vista superficiale dell’opercolo con tre file di pale (Ebling, 1945).

Specie *Sabellaria alveolata*

Sistematica:

Phylum: Annelida Lamarck, 1809

Classe: Polychaeta Grube, 1850

Sottoclasse: Sedentaria Lamarck, 1818

Famiglia: Sabellariidae Johnston, 1865

Genere: *Sabellaria* Lamarck, 1818

Specie: *Sabellaria alveolata* (Linnaeus, 1767)

Specie tipo: *Sabella alveolata* Linnaeus, 1767

Caratteri diagnostici dell'animale

Gli esemplari adulti hanno dimensioni che vanno da pochi mm a 2-5 cm di lunghezza (Wilson, 1971; Gruet, 1992). La corona opercolare è formata da 36 paia di pale chitinose esterne e 21 pale centrali (Fig. 11 a). Le pale esterne mostrano un margine distale composto da 3 denti ricurvi verso il margine sinistro (Fig. 11 b). Le pale medie hanno un margine obovato (ovale) mentre quelle interne presentano un margine genicolato.



Fig. 11 – a) Porzione anteriore dell’opercolo di *S. alveolata*. b) Particolare della pala esterna con margine ricurvo verso il lato sinistro (da Schimmenti, 2017).

Le notochete in *S. alveolata* hanno un aspetto di remo piatto-lanceolato e fanno parte di una fila trasversale di 6-8 grandi sete alternate a sottili sete di par numero, con una lunghezza superiore alla metà dell’estensione delle sete maggiori. Le sete mostrano un’estremità appuntita (Fig. 12 a). Le neurochete, diametralmente opposte alle chete dorsali, sono più piccole, lunghe e sottili, di numero pari a 14 (Fig. 12 b) (Hutchings *et al.*, 2012; Lezzi *et al.*, 2015).

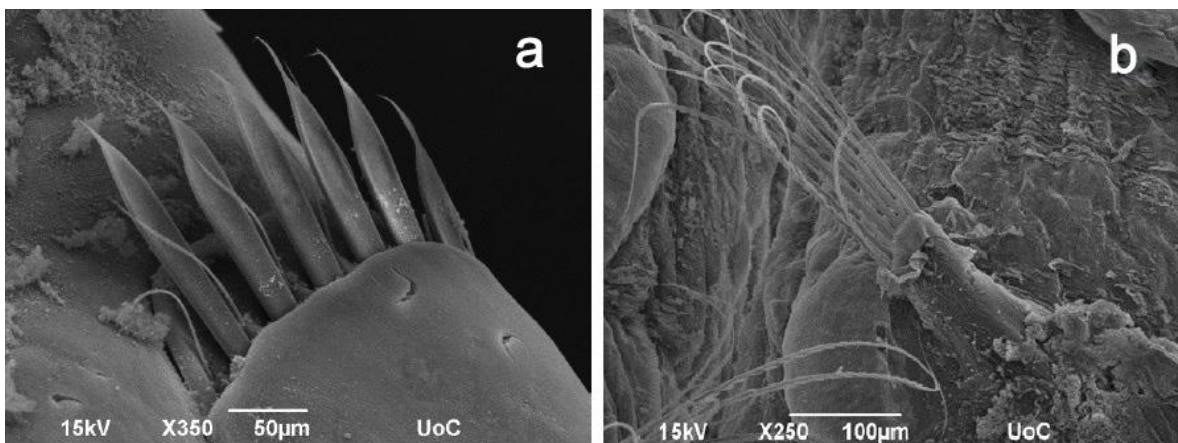


Fig. 12 – a) Notochete della porzione paratoracica del corpo di *S. alveolata*. b) Neurochete del terzo segmento paratoracico in *S. alveolata* (da Schimmenti, 2017).

L’apparato alimentare è composto da due parti inserite ventralmente sui due lobi presenti nel prostomio (Fig. 13, CL). Su ogni lobo vi è un solco primario (PG) che raccoglie

le particelle e i piccoli granelli di sabbia da condurre alla bocca. Ognuno dei due solchi primari è suddiviso in solchi secondari (SG) dotati di tentacoli (T) che muovendosi, creano correnti d'acqua che trasportano il fitoplacton verso la regione anteriore dell'animale (Fauchald, 1977). I tentacoli di *S. alveolata* sono lunghi 55-60 μm e riescono a trattenere particelle $> 4\mu\text{m}$ (Dubois *et al.*, 2005). In ogni lato dei tentacoli sono inserite una fila di ciglia frontali e due file di ciglia laterali. Tra le ciglia frontali sono visibili pori secretori di cellule mucose che grazie alla produzione di muco, trattengono le particelle e le convogliano fino ai solchi (PG). Da qui le particelle saranno condotte fino alle labbra boccali (L) dove verranno manipolate per l'espulsione dei granuli di sabbia che verranno invece trasportati fino all'organo costruttore per essere selezionati per la costruzione del tubo.

Dalla bocca le particelle più fini vengono poi trasportate ed ingerite lungo il tratto alimentare.

Le particelle ritenute non idonee né alla nutrizione né all'agglutinamento del guscio sono completamente espulse e nuovamente disperse nella massa d'acqua (Wells, 1970).

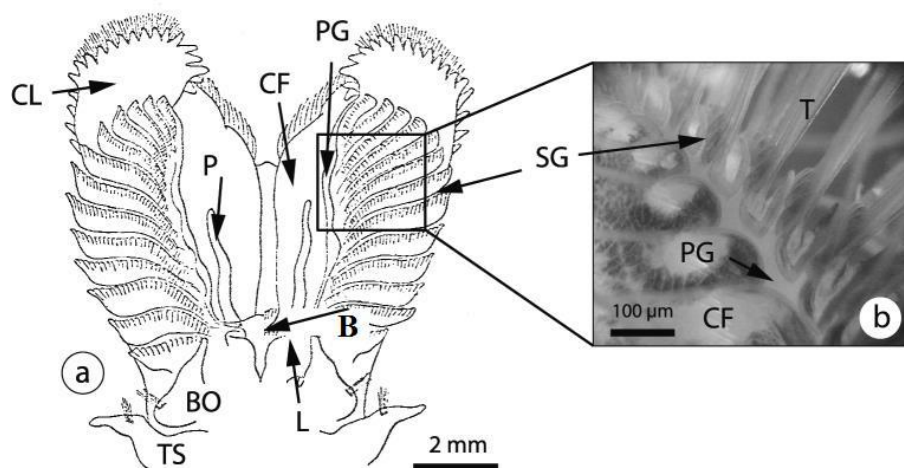


Fig. 13 – *Sabellaria alveolata*. (a) Visione ventrale della regione anteriore, tentacoli non mostrati. CL, Lobi cefalici centrali; CF, pavimento cefalico; PG, solco primario; SG, solco secondario; P, palpo; B, bocca; L, labbra interne ed esterne; BO, organo costruttore; TS, primo segmento toracico. (b) Fotografia dei (T) tentacoli di un individuo vivente (Dubois *et al.*, 2005).

2.2. Distribuzione geografica e stratigrafica del genere *Sabellaria*

Le biocostruzioni costruite dai policheti appartenenti alla famiglia Sabelliidae Johnston, 1865 sono distribuite nei mari temperati (Kirtley e Tanner, 1968; Vorberg, 2000) di tutto il mondo: India (Achary, 1969, 1974), Sud America (Fausto-Filho e Furtado, 1970; Bremec e Lana, 1994; Nahuelhua *et al.*, 2012), Brasile (Lana e Gruet, 1989) e America occidentale (Posey *et al.*, 1984) (Fig. 14).

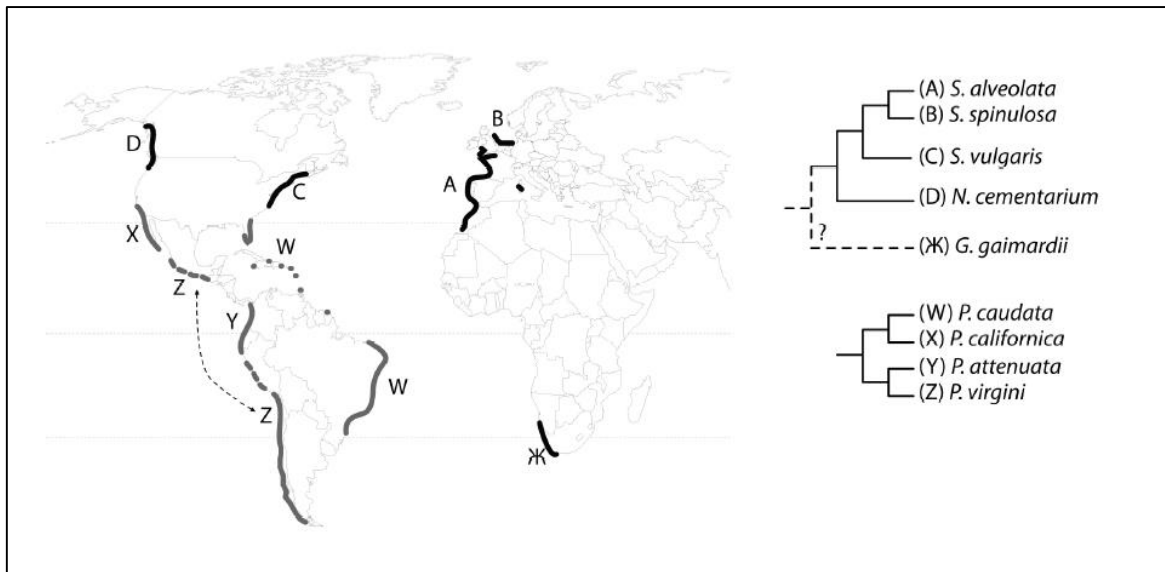


Fig. 14 – Biogeografia cladistica delle principali specie di biocostruzioni a Sabellaridi (Fournier, 2013).

Sulle coste europee, le più grandi biocostruzioni intertidali sono costruite dalla specie *Sabellaria alveolata* (Linnaeus, 1767), che è presente principalmente lungo le coste atlantiche orientali dalle Isole Britanniche settentrionali fino al Portogallo (Wilson, 1971; Gruet, 1982; Cunningham *et al.*, 1984; Dias e Paula, 2001; Dubois *et al.*, 2002, 2003, 2006; Firth *et al.*, 2015; Schlund *et al.*, 2016). Esse sono ampiamente distribuite lungo le coste irlandesi e britanniche, soprattutto sul versante sud-occidentale dell'isola, dove le acque appaiono relativamente più calde (Mettam, 1992; Bamber e Irving, 1997).

Tuttavia, le scogliere di *S. alveolata* più grandi d'Europa sono ospitate nella baia di Mont Saint Michel (Francia), una zona costiera del Canale occidentale della Manica (Gruet e Bodeur, 1997; Ayata *et al.*, 2009; Dubois *et al.*, 2009; Desroy *et al.*, 2011; Bajjouk *et al.*, 2020) dove creano sponde irregolari che coprono circa 100 ettari di estensione e nella costa atlantica francese a sud dell'isola di Noirmoutier in un delta di marea (Brunier *et al.*, 2022).

In acque atlantiche essi vengono infine segnalati lungo le coste del Marocco (Rouhi *et al.*, 2007).

Anche la specie congenerica *S. spinulosa*, descritta per il Mare del Nord, è ampiamente distribuita nelle zone di acque temperato-fredde, formando scogliere generalmente di più piccola entità (Gubbay, 2007). Questa forma scogliere ad alta densità di individui nelle coste meridionali e quelle orientali del Regno Unito e nel Galles (Jones, 1972; Hiscock, 1984; George e Warwick, 1985; Collins, 2003; Hendrick, 2007; Hendrick *et al.*, 2011). Altri aggregati si trovano in Scozia, Irlanda, Mar del Nord e Mare dei Wadden (McIntosh, 1922; Walker e Rees, 1980; Vorberg, 2000; Hendrick e Foster-Smith, 2006; Benson *et al.*, 2013) (Fig. 15).

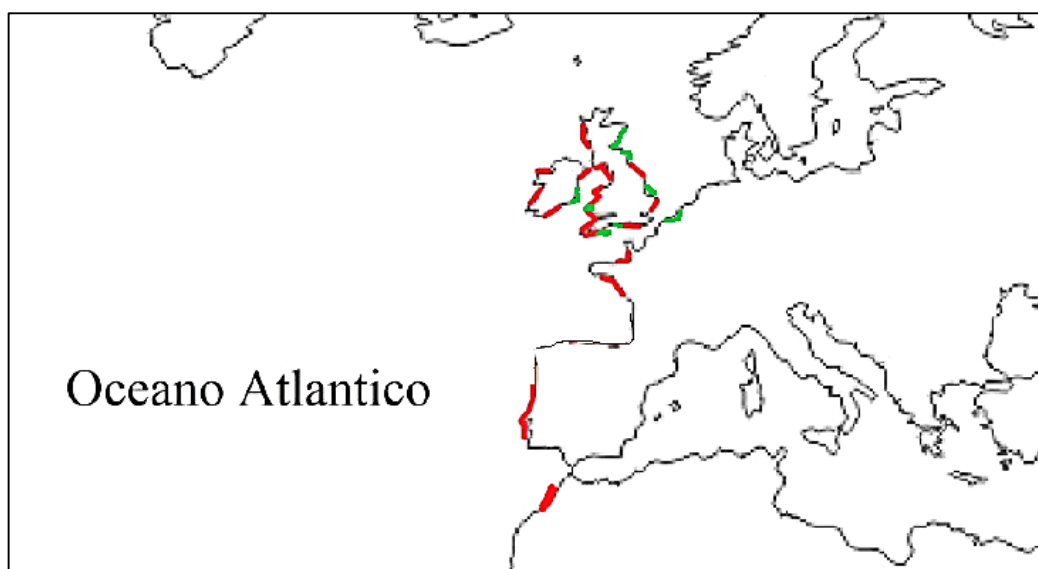


Fig. 15 – Distribuzione *Sabellaria alveolata* (in rosso) e *S. spinulosa* (in verde) nell'Atlantico (da Schimmenti, 2017, modificato).

Studi effettuati nell'ambito geografico del Mar Mediterraneo hanno evidenziato la presenza oltre a *S. alveolata* e *S. spinulosa* anche di una terza specie, *S. alcocki* Gravier, 1906 descritta originariamente per l'Oceano Indiano (Castelli *et al.*, 2008). Tra esse solo *S. alveolata* sembra essere in grado di costruire formazioni imponenti. Le altre due specie, secondo la letteratura corrente, non costruiscono scogliere ma solo modesti aggregati. Unica eccezione di reef a *S. spinulosa* è rappresentata da estesi aggregati rinvenuti nelle coste adriatiche del Gargano (costa settentrionale della Puglia) (Lezzi *et al.*, 2015). Sebbene *S. alcocki* sia stata considerata esclusiva dell'Oceano Indiano (Nishi *et al.*, 2010; Hutchings *et al.*, 2012) e non sia stata riportata tra le specie presenti nel Mar Mediterraneo (Coll *et al.*,

2010), forse per errata determinazione, è inserita nella checklist del litorale italiano (Castelli *et al.*, 2008) e continua ad essere segnalata nelle carte faunistiche del Mediterraneo (Parapar *et al.*, 1992; Çinar *et al.*, 2006, 2008). Di conseguenza, la sua distribuzione geografica è ancora da chiarire e le segnalazioni richiedono verifica (Lezzi *et al.*, 2015).

Le testimonianze più antiche sulla presenza di biocostruzioni a *S. alveolata* nel Mediterraneo risalgono a fine '800 nel Golfo di Napoli (Lo Bianco, 1888, 1893). Altre antiche segnalazioni sono state fatte nelle coste di Agrigento (Molinier e Picard, 1953; Giordani-Soika, 1956), nel Mar Tirreno (Giordani-Soika, 1956; Taramelli-Rivosecchi, 1961) e nelle coste francesi (Bellan, 1964). Segnalazioni più recenti riguardano il Golfo di Castellammare (Trapani) (Sparla *et al.*, 1992) e delle coste spagnole (Garcin e Vachard, 1994; Porras *et al.*, 1996).

In Italia, la distribuzione geografica della specie *S. alveolata* va dal Mar Ligure, a nord (Delbono *et al.*, 2003) fino alla costa siciliana che affaccia sul Canale di Sicilia (Schimmenti *et al.*, 2016; Bertocci *et al.*, 2017). Le colonie più cospicue sono presenti nelle coste tirreniche laziali (Nicoletti *et al.*, 2001; La Porta *et al.*; 2006, 2009; Bonifazi *et al.*, 2019) (Fig. 16).

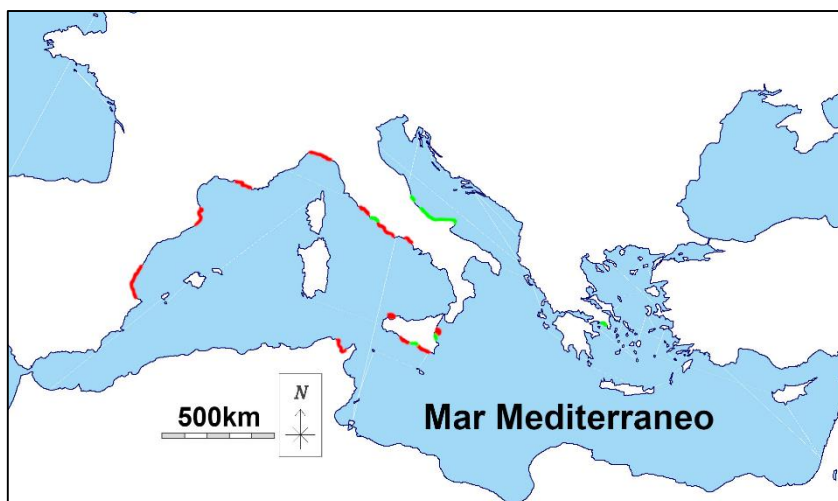


Fig. 16 – Distribuzione *Sabellaria alveolata* (in rosso) e *S. spinulosa* (in verde) nel Mediterraneo.

Nonostante questa ampia distribuzione geografica, le biocostruzioni a *Sabellaria* sono limitate e discontinue. Questo probabilmente perché la loro formazione dipende da precise caratteristiche dell'habitat come la presenza di substrati rocciosi su cui insediarsi, di sabbia nelle vicinanze e una persistente turbolenza dell'acqua, che garantisce la presenza continua

di granelli di sabbia in sospensione necessari all'animale per costruire il tubo (Dubois *et al.*, 2005). Inoltre, le biocostruzioni a *S. alveolata* sono delle strutture effimere e dinamiche che modificano frequentemente la loro estensione in quanto sono periodicamente soggette all'erosione delle onde e al possibile smantellamento da forti temporali (Wilson, 1971).

Come tutti gli organismi biocostruttori, i Sabellaridi hanno potere litogenetico in quanto con la crescita dei loro aggregati di tubi, costituiscono un corpo scheletrico che contribuisce ad accrescere il volume della roccia che lo ingloba. Nonostante questi *reef* a Sabellaridi possano avere dimensioni notevoli, i loro record fossili sono ancora sconosciuti.

Le presunte segnalazioni antiche, risalenti al Paleozoico, come quelli del Cambriano (Glaessner, 2018) e del Devoniano (Webby, 1968) dell'Antartide, sono di incerta attribuzione.

Testimonianze fossili di piccole “*Hermelles*” a *Sabellaria* sarebbero per il Miocene superiore (Tortoniano) della Spagna sud-orientale, a San Miguel de Salinas, nella Cordigliera Betica (Garcin e Vachard, 1987, 1994), associate a coralli ermatipici (Garcin e Vachard, 1994) (Fig. 17). Tuttavia, questo affioramento sembra anch'esso non corrispondere ad un reale *reef* a *Sabellaria* (vedi paragrafo 4.3. Risultati).

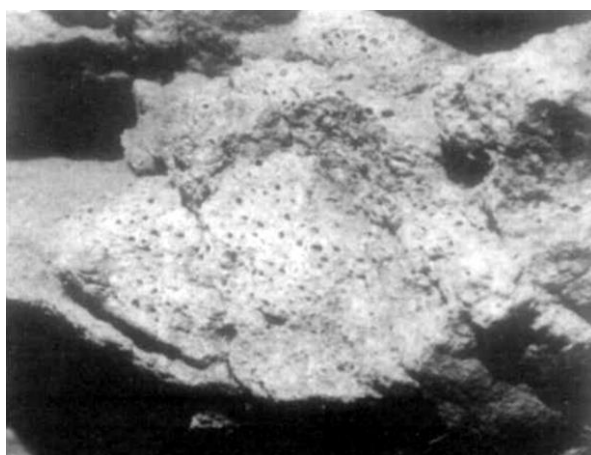


Fig. 17 – “*Hermelles*” di San Miguel de Salinas, Spagna (da Garcin e Vachard, 1987).

Dalla Sicilia provengono altri pochi record fossili a *Sabellaria*: quelli pleistocenici negli Iblei sudorientali (Barrier *et al.*, 1989) e segnalazioni inedite degli stessi Autori per l'area di Augusta a Faro Santa Croce. Anche questi, sono risultati essere *reef* di altro tipo (vedi paragrafo 4.3. Risultati).

La potenzialità di fossilizzazione di un *banco* a *Sabellaria* dipende dalla velocità con la quale avviene il seppellimento. Se questo è più rapido della decomposizione del biocemento,

il *reef* sarà inglobato integro nel sedimento. Nella successiva fase tafonomica (*fossil diagenesis*) potranno agire le soluzioni circolanti che depositeranno dei sali tra i granuli, cementandoli, garantendo così la fossilizzazione della biocostruzione nella sua tridimensionalità. Questa eccezionale modalità di fossilizzazione del *reef* a *Sabellaria* lascia aperta una ipotesi sulla possibilità di futuri ritrovamenti.

2.3. Le biocostruzioni a *Sabellaria*

Numerosi organismi marini sono in grado di creare con i loro scheletri mineralizzati o agglutinando elementi litici delle strutture biocostruite. Si tratta di strutture tridimensionali che forniscono habitat a una grande diversità di specie sessili e mobili (Jones *et al.*, 1994). Le morfologie, le dimensioni, l'organizzazione interna, la complessità, la natura e le funzioni di queste biocostruzioni sono diverse. Questi organismi appartengono a molti gruppi tassonomici attuali o estinti (Fournier, 2013).

Il caso più notevole è rappresentato dai coralli ermatipici (Sheppard *et al.*, 2009) ma anche altri taxa animali hanno una tale capacità, comprese le spugne (Bell *et al.*, 2013), i molluschi (Gutiérrez *et al.*, 2003), i policheti (Naylor e Viles, 2000) e i briozoi (Wood *et al.*, 2012).

Policheti tubicoli della Famiglia Sabellaridae (Annelida) possono aggregarsi a formare con i loro tubi biocostruzioni su fondali poco profondi, purché in condizioni ambientali idonee (Achary, 1974).

Le più grandi biocostruzioni a Sabellaridi sono costruite dalle specie *Sabellaria alveolata* e *S. spinulosa* presenti lungo le coste dell'Atlantico europeo e del Mediterraneo.

S. alveolata è una specie nota per la sua capacità di costruire reef agglutinando sedimento sabbioso, piccoli clasti e resti di gusci di altri organismi che costituiscono i tubi all'interno del quale l'organismo vive.

Il sedimento agglutinato viene incollato a costituire la parete del tubo tramite uno speciale biocemento. Questo è un adesivo prodotto da un tessuto ghiandolare situato nei primi tre segmenti paratoracici (Fig. 18). Le ghiandole contengono due principali tipi di cellule secretorie dalle quali si producono i "granuli omogenei" chiamati così per la loro composizione uniforme e i "granuli eterogenei" che presentano inclusioni dense di calcio e magnesio (Vovelle, 1965; Gruet *et al.*, 1987; Wang *et al.*, 2010). Tutte e due le cellule secretorie risultano essere presenti più o meno alle stesse proporzioni e, i granuli che contengono hanno entrambi un diametro di circa 2-4 μm (Vovelle, 1965). Sono presenti anche altri tipi di granuli che hanno dimensioni più piccole dal diametro minore di 1 μm (Fig. 18).

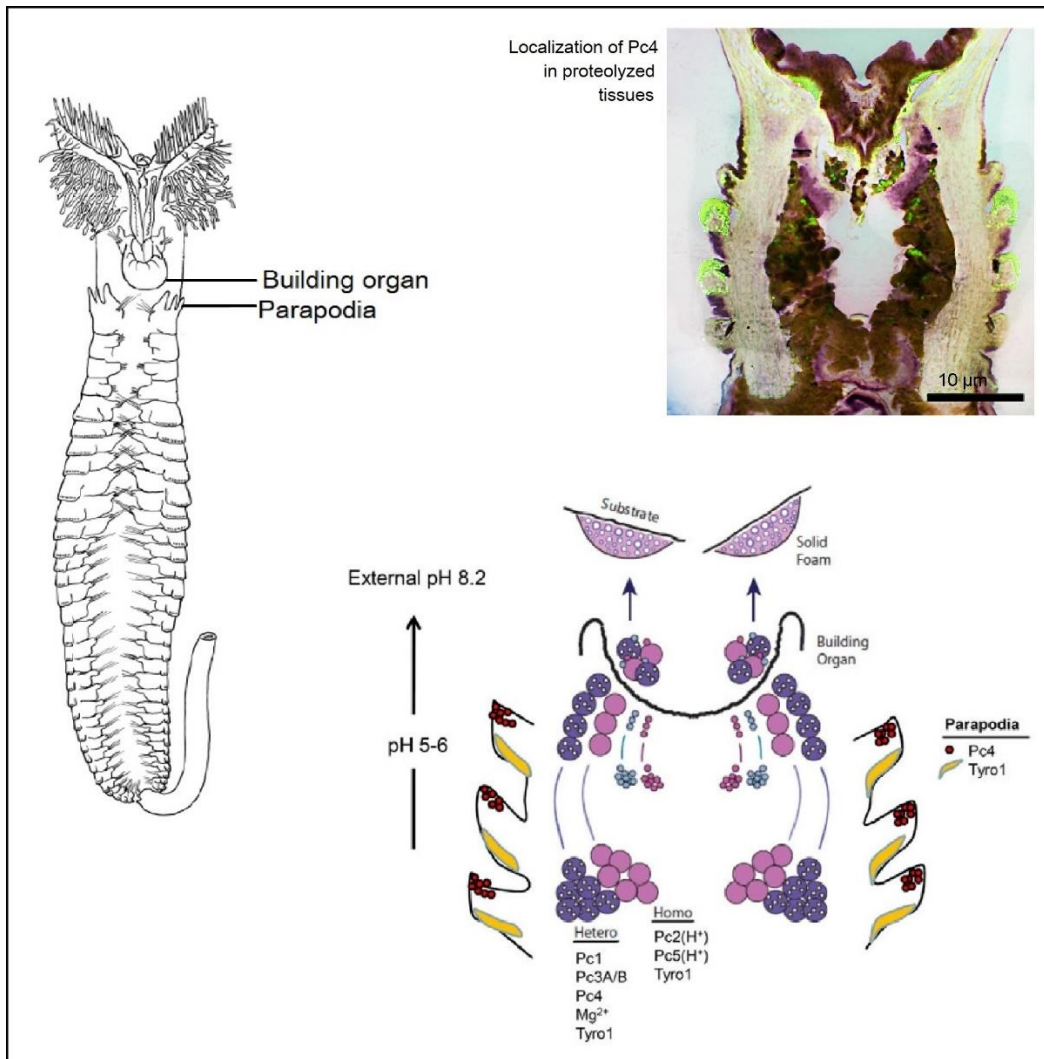


Fig. 18 – Organo costruttore responsabile della formazione del biocemento nei Sabellaridi. Il biocemento si forma da granuli secreti che, una volta fuoriusciti dal verme, induriscono a contatto con l'acqua di mare (da Wang *et al.*, 2010, modificato).

I granuli eterogenei (contenenti Ca e Mg) e quelli omogenei delle cellule secretorie si allineano separatamente all'interno di canali attraverso i quali fuoriescono nell'organo costruttore. Il biocemento quindi, prima di fuoriuscire dall'animale, è costituito da componenti attivi separati che successivamente, appena fuoriusciti, reagiscono per formare legami simili agli adesivi bicomponenti epossidici. Tali reazioni chimiche che avvengono tra le catene proteiche mescolate a formare un agglomerato viscoso, sarebbero indotte dalle interazioni ioniche ed elettrostatiche con l'acqua di mare. La colla appena secreta è fluida, ma in 30 secondi polimerizza trasformandosi in una schiuma solida formata da numerose piccole bolle (Stevens *et al.*, 2007). La polimerizzazione avviene grazie alla differenza di pH tra i granuli secreti (pH \approx 5) e l'acqua di mare (pH \approx 8,2) formando dei legami covalenti

(Stevens *et al.*, 2007). Alla polimerizzazione probabilmente concorre anche la differenza di temperatura e la presenza di determinati ioni (Na^+ , Cl^- , Mg^{2+}), portando alla formazione di coacervati.

La microstruttura porosa dell'adesivo, con vacuoli sferici di dimensioni da 2 a 6 micron (*solid foam*: Le Cam *et al.*, 2011) sarebbe dovuta alla tendenza dei granuli eterogenei a gonfiare durante la solidificazione formando le bolle, come osservato da Stevens *et al.* (2007) e Wang e Stewart (2012). Secondo gli stessi autori i granuli omogenei invece, rimangono concentrati intorno alle pareti delle bolle.

Secondo i pochi studi di letteratura esistenti, la composizione della colla solida vede come elementi dominanti magnesio, fosforo e calcio, con tracce rilevanti di ferro e manganese (Gruet, 1982; Gruet *et al.*, 1987; Stewart *et al.*, 2004).

Non esistono studi sul biocemento delle biocostruzioni a *S. alveolata* presente in Mediterraneo.

Dopo aver costruito il tubo di sabbia agglutinata con il biocemento, il verme riveste il suo interno con una guaina formata da una sottile pellicola chitinosa o da una fitta trama di fibre chitinose (Vovelle, 1965; Gruet, 1982). Poco si sa sull'origine o sulla composizione di questa pellicola organica; alcune delle proteine strutturali secrete nel biocemento possono esserne dei componenti (Wang e Stewart, 2012).

Gli organismi formano colonie con molteplici individui e il contributo dei tubi costruiti da ciascun animale genera sia spessori che estensioni importanti (Gruet, 1982). Questi tubi spesso, se densamente aggregati, formano strutture che nell'insieme ricordano le celle esagonali degli alveari e da ciò deriva il nome inglese della *S. alveolata*, "*honeycomb worm*" (Gruet, 1982; Gruet *et al.*, 1987).

I tassi di crescita di queste biocostruzioni dipendono molto dalle condizioni ambientali. In un ambiente favorevole, cioè in presenza di abbondanza di sabbia in sospensione, acqua alta e temperature intorno ai 20°C, come si è osservato in Francia settentrionale, la crescita è rapida e si registrano aumenti medi della lunghezza del tubo fino a 12 cm all'anno (Gruet, 1982).

Lo sviluppo di tali biocostruzioni è assicurato dal gregario insediamento di larve di *S. alveolata* su un substrato solido che può essere rappresentato da una scogliera preesistente, un grande masso, un sasso o da una conchiglia. Essi possono colonizzare anche substrati artificiali come pannelli e barriere frangiflutti (Gibb *et al.*, 2014; Firth *et al.*, 2015). *S.*

alveolata si insedia principalmente lungo coste moderatamente aperte ed esposte all'azione delle correnti e del moto ondoso, laddove l'idrodinamismo sia tale da mettere la sabbia in sospensione ma, nello stesso tempo, non sia troppo forte da causare l'erosione dei *reef* (Gruet, 1972).

Le biocostruzioni di *Sabellaria* possono essere relativamente instabili e subire un ciclo naturale di sviluppo e decomposizione, possono formarsi in tempi relativamente brevi e variare nella forma. La struttura e la morfologia delle biocostruzioni a *Sabellaria* sono principalmente influenzate da correnti e dalle condizioni ambientali (Gruet, 1972, 1982, 1986; Porras *et al.*, 1996; Dubois *et al.*, 2002).

La colonizzazione della *Sabellaria* avviene contemporaneamente alla metamorfosi delle larve pelagiche che diventano adulti bentonici. Questo processo è spesso indotto chimicamente dalla presenza, nelle vicinanze, di gusci agglutinati già prodotti da individui della stessa specie e facilita la crescita di colonie massive (Pawlik, 1988).

Inizialmente la colonizzazione del substrato avviene con individui i cui tubi incrostanti si ripiegano con andamento irregolare formando una *crosta* di debole spessore. Successivamente i tubi tendono a sollevarsi dal substrato e crescere verticalmente subparalleli tra loro con una struttura ordinata "a canne d'organo" (Gruet, 1972, 1892), analogamente a quanto osservabile in altri policheti come i serpulidi (ten Hove e Van den Hurck, 1993). Dai dati di letteratura le biocostruzioni segnalate in Mediterraneo mostrano morfologie *a fungo* di alcuni decimetri di altezza o formano *banchi* alti fino a un metro ed estesi anche diverse decine di metri (Delbono *et al.*, 2003).

Le biocostruzioni a *S. alveolata* in Mediterraneo sono state oggetto di numerosi studi riguardanti principalmente aspetti genetici e biologici dell'animale (Lezzi *et al.*, 2015; Schimmenti *et al.*, 2015) oltre che ad aspetti sedimentologici (La Porta *et al.*, 2006; Lisco *et al.*, 2021) ed ecologici (La Porta e Nicoletti, 2009; Iacofano *et al.*, 2015; Schimmenti *et al.*, 2016; Bertocci *et al.*, 2017; Bonifazi *et al.*, 2018, 2019; Lo Bue *et al.*, 2022). L'architettura della biocostruzione è stata trattata solo da Delbono *et al.* (2003) che ne descrivono sommariamente le morfologie. Solo recentemente queste sono state illustrate con moderne tecniche di rilevamento e restituzione (Ventura *et al.*, 2020). La struttura del tubo, invece, non è stata investigata ad eccezione dei recenti studi condotti da Lisco *et al.* (2020, 2021) dove vengono illustrati i tubi all'interno della biocostruzione e gli spazi che intercorrono tra essi ("aree di intertubo") spesso riempiti da sedimento sciolto o scarsamente cementato.

2.4. Caratteristiche ecologiche delle biocostruzioni a *S. alveolata*

Nelle regioni costiere temperate, gli organismi biocostruttori, come i Sabellaridi, agiscono come ingegneri dell'ecosistema creando e modificando gli habitat (Jones *et al.*, 1994). Le loro strutture tridimensionali ospitano numerosi invertebrati bentonici come osservato in diversi areali geografici: India (Achary, 1969, 1974), Sud America (Fausto-Filho e Furtado, 1970), Mediterraneo (Molinier e Picard, 1953; Rivosecchi, 1961; Bellan, 1964; Porras, 1996); costa pacifica americana (Posey, 1984), costa atlantica europea (Portogallo: Dias e Paula, 2001; Francia: Gruet, 1970, 1972, 1977, 1982, 1986).

Sabellaria alveolata è un importante organismo costruttore di mari temperati (Naylor e Viles, 2000). La sua importanza ecologica è ampiamente riconosciuta ed è dovuta principalmente alla capacità di generare una complessità topografica da piccola a grande scala e creare numerose nicchie spaziali e trofiche per la colonizzazione di molte specie di invertebrati e vertebrati marini (Dubois *et al.*, 2002, 2006; Desroy *et al.*, 2011; Bonifazi *et al.*, 2019). Le barriere biogene da essa costruite offrono infatti rifugio e alimentazione per un gran numero di specie marine e formano localmente hotspot di biodiversità (Holt *et al.*, 1998; Dubois *et al.*, 2002, 2006; Cocito, 2004; Plicanti *et al.*, 2016). Gli organismi associati a queste biocostruzioni appartengono a differenti taxa come policheti serpulidi ed erranti, molluschi, foraminiferi, spugne e crostacei (Dias e Paula, 2001; Dubois *et al.*, 2006; Cole e Chapman, 2007). La maggior parte delle specie sono comuni anche in altri habitat bentonici, ma ci sono specie che usano i *banchi* a *Sabellaria* come habitat esclusivi o preferenziali (Killeen e Light, 2000; Schimmenti *et al.*, 2016) dove la macrofauna associata generalmente più varia e abbondante di quella delle aree circostanti (Desroy *et al.*, 2011; Dubois *et al.*, 2002).

Se presenti nel piano intertidale e in una fase di bassa marea le biocostruzioni a *Sabellaria* sono in grado di mantenere al loro interno un elevato livello di umidità che favorisce la protezione degli organismi associati contro la disidratazione (Dias e Paula, 2001; Ataide *et al.*, 2014).

I reef di *S. alveolata* sono in grado inoltre di fornire importanti benefici all'ecosistema in cui si sviluppano, come il filtraggio di grandi volumi di acqua, la stabilizzazione di sedimenti e la capacità di diminuire l'erosione delle coste interagendo con le onde in arrivo e riducendo così la forza che esse esercitano sulla costa (Gruet e Bodeur, 1994; Delbono *et al.*, 2003; Dubois *et al.*, 2006; Ayata *et al.*, 2009; Desroy *et al.*, 2011).

2.5. Le minacce e la normativa

Le scogliere a *Sabellaria* rappresentano sistemi altamente dinamici esposti a diverse minacce, comprese le perturbazioni naturali e il crescente disturbo diretto o indiretto correlato alle attività dell'uomo come la coltura dell'ostrica e la pesca, che possono causare gravi danni alla struttura delle biocostruzioni (Dubois *et al.*, 2002, 2006, 2007).

Anche il disturbo fisico prodotto dal calpestio è responsabile di una significativa riduzione della estensione e integrità di *S. alveolata* (Plicanti *et al.*, 2016).

Contemporaneamente, le biocostruzioni sono soggette a danni fisici causati da eventi meteorologici particolarmente violenti come tempeste, variazioni elevate di temperature e acidificazione (Muller e Stone, 2001; Wolff *et al.*, 2016). *Sabellaria* è in grado di costruire tubi per riparare piccole aree danneggiate della biocostruzione entro poche settimane o mesi (Cunningham *et al.*, 1984; Vorberg, 2000; Plicanti *et al.*, 2016), ma impatti più pesanti possono richiedere anni fino a decenni (Firth *et al.*, 2015) o mostrare modifiche permanenti alla struttura (Gibb *et al.*, 2014). Il ruolo funzionale svolto dai reef a Sabellaridi e le minacce di diversa gravità a cui sono soggetti li rendono molto preziosi e anche habitat marini vulnerabili che devono essere considerati dalla legislazione dell'Unione Europea (UE). Il loro ripristino e la loro conservazione, infatti, è stata proposta in piani d'azione come la Direttiva degli Habitat europei (“Direttiva del Consiglio 92/43/CEE sulla Conservazione degli Habitat Naturali e della Fauna Selvatica e Flora”) dove sono inseriti nell'allegato I. Le scogliere a Sabellaridi (tipo 1170) sono qui definite come “concrezioni biogene sottomarine, o esposte con la bassa marea, che sorgono dal fondo del mare nella zona sublitorale ma che possono estendersi nella zona litoranea dove vi è una zonazione ininterrotta di comunità vegetali e animali” e vengono considerate tra gli “habitat naturali di interesse comunitario la cui conservazione richiede la designazione di aree speciali di conservazione” (Holt *et al.*, 1998).

Le scogliere a *Sabellaria* vengono anche inserite nella Direttiva Quadro sulle Acque (Direttiva, 2000/60/CE) e nel quadro della strategia per l'ambiente marino Direttiva (Direttiva, 2008/56/CE). Inoltre, sono incluse nella Lista Rossa Europea degli Habitat (Gubbay *et al.*, 2016) che ha lo scopo di fornire una panoramica sul tipo, sulla portata e sullo stato degli habitat marini bentonici in tutta Europa. Purtroppo, queste scogliere, soprattutto nel Mar Mediterraneo, sono elencate come "Dati insufficienti" e necessitano quindi di un'indagine completa e specifica.

In particolare, le scogliere di *Sabellaria* segnalate lungo la costa italiana coprono migliaia di km² (IUCN, 2016), ma mancano in gran parte dati empirici e quantitativi. Precedenti studi nella regione mediterranea si focalizzano su scale molto locali fornendo così informazioni insufficienti e frammentarie per identificare la distribuzione attuale, le dinamiche e le minacce dei *reef* a *Sabellaria* e per valutare le loro esigenze di conservazione e orientarle in strategie di gestione e protezione efficaci.

Un esempio europeo molto noto di gestione e conservazione delle biocostruzioni al fine di acquisire le conoscenze mancanti riguardo aspetti legati alla loro biodiversità ed evoluzione, è Mont Saint-Michel. Qui i *reef* sono stati delimitati per essere tutelati da interferenze antropiche, e sono stati analizzati e monitorati per determinarne lo stato di salute, vista la crescente importanza del sito inteso come patrimonio biologico da preservare (Dubois *et al.*, 2002; Desroy *et al.*, 2011).

3. MATERIALI E METODI

3.1. Aree di studio

Le biocostruzioni investigate nella presente tesi di dottorato si collocano nella Sicilia orientale e meridionale lungo tratti di costa caratterizzati da fondali sabbiosi con affioranti substrati duri più o meno estesi.

Il ritrovamento di queste biocostruzioni è stato il frutto di ricerche effettuate durante i mesi successivi alla tesi di laurea magistrale lungo la costa siciliana (estate 2019) e si aggiunge ai ritrovamenti già noti in letteratura che si riferiscono al settore costiero sudoccidentale e occidentale della Sicilia (vedi Sanfilippo *et al.*, 2020).

In particolare, le aree di nuovo ritrovamento investigate sono tre:

- 1) Foce del Simeto (CT)
- 2) Portopalo di Capo Passero (SR)
- 3) Falconara (Butera, CL)

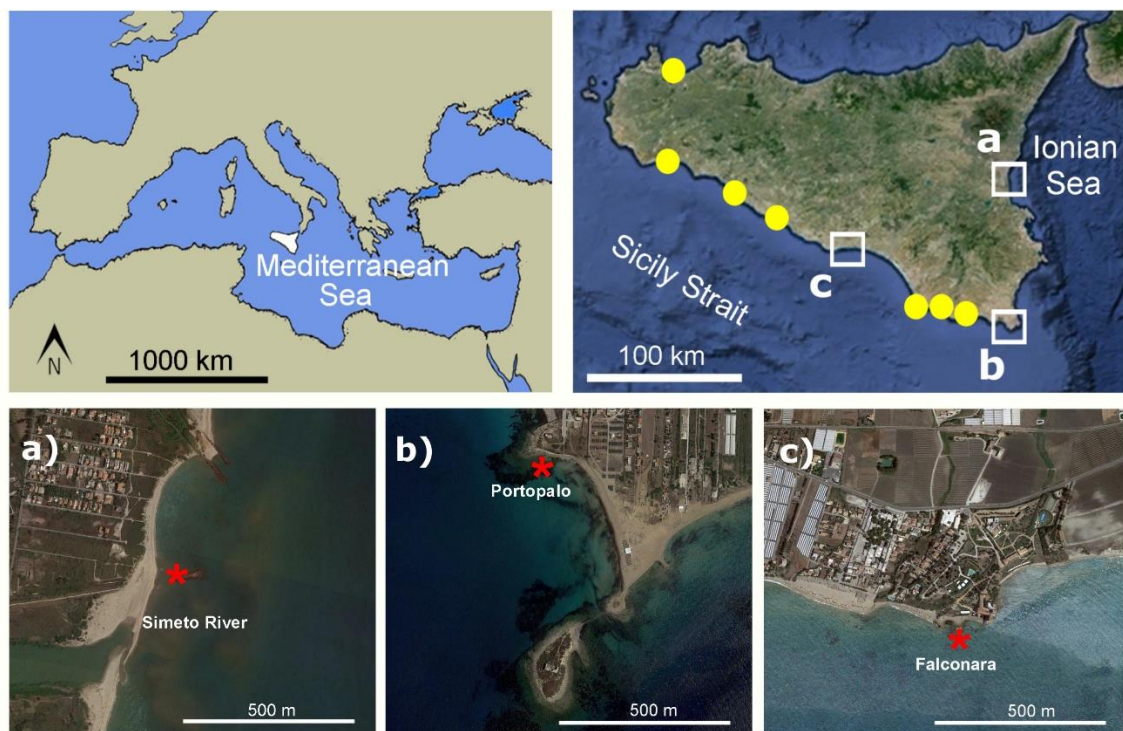


Fig. 19 – Ubicazione delle aree di studio (riquadri bianchi) nel contesto dei ritrovamenti a *Sabellaria alveolata* siciliani già noti in letteratura (punti gialli): a) Foce del Simeto, b) Portopalo, c) Falconara. Gli asterischi indicano i siti di campionamento.

1) Foce del Simeto (CT)

L'area comprende un settore di spiaggia bassa sabbiosa antistante la foce del fiume Simeto. Questa, insieme agli ambienti limitrofi, è un'area di forte interesse naturalistico sia per aspetti geomorfologici che faunistici e floristici. Attualmente è tutelata dal punto di vista naturalistico essendo stata istituita Riserva Naturale Orientata nel 1984 al fine di salvaguardare gli ambienti naturali di particolare interesse che vi ricadono e favorire ed incrementare le condizioni per la sosta e la nidificazione della avifauna e il restauro della vegetazione mediterranea (D.A. 14/03/1984) e rientra tra le Zone Speciali di Conservazione (Z.S.C.) e le Zone di Protezione Speciale (Z.P.S.).

I fondali antistanti la riva sono sabbioso-fangosi, e degradano molto debolmente verso il largo, con una profondità di 1 metro a circa 50 metri al largo dalla costa. Circa 80 metri al largo è presente un isolotto naturale in gran parte circondato da scogli frangiflutti posizionati a difesa della forte erosione.

Le biocostruzioni a *Sabellaria* sono distribuite lungo un cordolo sabbioso sommerso che collega la riva all'isolotto e intorno al margine occidentale di questo nel punto di coordinate 37°24'11.4"N, 15°05'30.3"E (Fig. 19 a).

I fondali antistanti la foce del Simeto, che riversa grande quantità di sedimento con portate medie annue di 25 m³/s, mostrano durante quasi tutto l'anno elevata torbidità (Chiocci e Casalbore, 2011; Di Stefano *et al.*, 2013). Ciò ha ridotto notevolmente la visibilità e reso difficoltose e le operazioni di monitoraggio delle biocostruzioni richiedendo osservazioni più ravvicinate al fondo e tempi più lunghi.

2) Portopalo di Capo Passero (SR)

L'area ricade nella propaggine più meridionale della Sicilia vicino l'Isola delle Correnti che rappresenta uno spartiacque tra il mare Ionio e il Canale di Sicilia. Comprende una costa che degrada dolcemente verso sud, caratterizzata da ampie baie sabbiose miste a fango interrotte da sporgenze calcaree cenozoiche dominate dai popolamenti a *Cystoseira* s.l. e coperte, in parte, da sedimenti sabbiosi biogenici.

Le biocostruzioni a *Sabellaria* sono distribuite sul substrato roccioso appena sommerso in corrispondenza della linea di costa nel punto di coordinate 36°39'3.9"N 15°04'37.6"E (Fig. 19 b). Quest'area è caratterizzata da intenso idrodinamismo per la sua peculiare posizione ed è sottoposta durante tutto l'anno a venti intensi, forti correnti e moto ondoso in direzione della costa. Ciò determina acque agitate in prossimità del fondo con conseguente rimescolamento del sedimento lungo la colonna d'acqua.

3) Falconara (Butera, CL)

L'area ricade in un settore costiero più ampio che è un Sito di Interesse Comunitario (S.I.C) per la presenza degli ultimi cordoni dunali presenti nella Sicilia meridionale. In particolare, l'area è situata nel settore occidentale del Golfo di Gela tra Licata e Manfria e comprende una costa caratterizzata da piccole baie sabbiose interrotte da spuntoni rocciosi. Il rilievo roccioso di Falconara sul quale si erge il Castello di Falconara si proietta verso il mare per alcuni metri. Nella sua propaggine più meridionale è situato un grosso scoglio (13 x 23 m). Questo è articolato e frastagliato e presenta una galleria che si apre verso il largo con la volta alta circa 2 m.

La biocostruzione a *Sabellaria* è situata all'interno della galleria e localmente intorno allo scoglio stesso nel punto di coordinate 37°06'28.1"N 14°03'06.9"E (Fig. 19 c).

Tutta la fascia costiera in cui ricade l'area è soggetta ad arretramento a causa della forte esposizione al moto ondoso e della presenza di insediamenti urbani e agricoli che hanno occupato gli spazi degli antichi cordoni dunali, un tempo presenti lungo quasi tutto il litorale (PAI, 2004; Martino *et al.*, 2011).

3.1.1. Condizioni meteomarine

1) Foce del Simeto

L'area è principalmente influenzata da venti dei quadranti meridionali che spirano verso nord così come rilevato per gli ultimi venti anni (Menna *et al.*, 2019; Soukissian e Sotiriou, 2022) con velocità media annua di 12,6 Km/h (Soukissian e Sotiriou, 2022) e una forza di sollecitazione media annua del vento corrispondente a 0,01 Nm⁻² (Menna *et al.*, 2019) (Fig. 20 a). Le medie variano stagionalmente mostrando valori più bassi in estate con una velocità del vento di 9,5 Km/h e massimi in inverno con 14,4 Km/h.

Le correnti marine dominanti (Fig.20 b) sono dovute alla presenza del vortice ciclonico *Messina Rice* (MRV), che genera flussi superficiali diretti verso sud in prossimità dell'area di studio con un'intensità che raggiunge i 5 cm/s (Menna *et al.*, 2019).

Nei tre anni di monitoraggio (dal 2020 al 2022) durante tutte le stagioni prevalgono venti con intensità da brezza tesa, e meno frequentemente venti moderati e venti tesi o forti (scala di Beaufort) che soffiano in genere dal mare verso la costa (Fig. 21). Durante i mesi autunnali ed invernali i venti si verificano per circa il 30-40% dei giorni mentre durante i mesi primaverili ed estivi soffiano per circa il 10-20% dei giorni. In particolare, gli episodi di

vento forte si sono verificati solo nei mesi di marzo 2020, ottobre 2021 e novembre 2022 (Fig. 21) (sito web: Windy.app).

Nei periodi caratterizzati da vento da moderato a forte, il mare si presenta con altezza delle onde proporzionale all'intensità del vento, dando luogo al cosiddetto "mare vivo".

Nei tre anni di monitoraggio (dal 2020 al 2022) durante tutte le stagioni prevalgono mari calmi con moto ondoso leggero o nullo e onde che non superano i 50 cm, e meno frequentemente mari mossi e agitati, fino a molto grossi. Durante i mesi autunnali ed invernali queste condizioni si verificano per circa il 30-40% dei giorni mentre durante i mesi primaverili ed estivi per circa il 10-20% dei giorni. In particolare, gli episodi di mare molto agitato o grosso si sono verificati nei mesi di marzo 2020, settembre 2020, ottobre 2021 e novembre 2022.

2) Portopalo di Capo Passero

L'area è principalmente influenzata da venti dei quadranti occidentali che spirano verso est (Menna *et al.*, 2019; Soukissian e Sotiriou, 2022) con velocità media annua di 19,8 Km/h (Soukissian e Sotiriou, 2022) e forza di sollecitazione media annua del vento corrispondente a $0,025 \text{ Nm}^{-2}$ (Menna *et al.*, 2019) (Fig. 20 a). Le medie variano stagionalmente mostrando valori più bassi in estate con una velocità del vento di 14,4 Km/h e massimi in inverno con 23,4 Km/h.

Le correnti marine dominanti (Fig.20 b), invece, appartengono al vortice ciclonico Maltese *Maltese Channel* (MCC) e alla diramazione della corrente principale Algerina (*Algerian Current*, AC) che, in corrispondenza della parte più occidentale del Canale di Sicilia, dà origine all'*Atlantic Ionian Stream*" (AIS). Queste correnti si muovono da ovest verso est con un'intensità che raggiunge i 20 cm/s (Menna *et al.*, 2019).

Nei tre anni di monitoraggio (dal 2020 al 2022) durante tutte le stagioni ad eccezione dei mesi di giugno e luglio prevalgono venti di brezza tesa e moderati e meno frequentemente venti tesi o forti (scala di Beaufort) che soffiano dal mare verso la costa (Fig. 21). Durante i mesi invernali, autunnali e primaverili i venti si verificano per circa il 40-80% dei giorni mentre solo durante l'estate i venti soffiano per circa il 20-30% dei giorni. In particolare, gli episodi di vento forte si sono verificati nei mesi di marzo 2020, settembre 2020, febbraio 2021, aprile 2021, novembre 2021, dicembre 2021, gennaio 2022, marzo 2022 e novembre 2022 (Fig. 21) (sito web: Windy.app).

Nei periodi caratterizzati da vento da moderato a forte, il mare si presenta con altezza delle onde proporzionale all'intensità del vento.

Nei tre anni di monitoraggio (dal 2020 al 2022) durante tutte le stagioni prevalgono condizioni di mare mosso (con altezza delle onde maggiori di 50 cm e fino a 125 cm) e meno frequentemente mari mossi e agitati, fino a molto grossi. Quasi tutto l'anno ad eccezione dei mesi estivi, queste condizioni si verificano per circa il 40-80% dei giorni mentre durante l'estate per circa il 20-30% dei giorni. In particolare, gli episodi di mare molto agitato o grosso si sono verificati nei mesi di marzo 2020, settembre 2020, febbraio 2021, aprile 2021, novembre 2021, dicembre 2021, gennaio 2022, marzo 2022 e novembre 2022.

3) Falconara

L'area è principalmente influenzata da venti dei quadranti occidentali che spirano verso est (Menna *et al.*, 2019; Soukissian e Sotiriou, 2022) con velocità media annua di 18 Km/h (Soukissian e Sotiriou, 2022) e forza di sollecitazione media annua del vento corrispondente a $0,02 \text{ Nm}^{-2}$ (Menna *et al.*, 2019) (Fig. 20 a). Le medie variano stagionalmente mostrando valori più bassi in estate con una velocità del vento di 13,68 Km/h e massimi in inverno con 21,6 Km/h.

La corrente marina dominante (Fig.20 b) corrisponde all'*Atlantic Ionian Stream*' (AIS) che genera spostamenti da ovest verso est con un'intensità che raggiunge i 15 cm/s (Menna *et al.*, 2019).

Nei tre anni di monitoraggio (dal 2020 al 2022) durante tutte le stagioni prevalgono venti di brezza tesa e moderati e meno frequentemente venti tesi o forti (scala di Beaufort) che soffiano obliquamente dal mare verso la costa (Fig. 21). Durante tutte le stagioni i venti si verificano per circa il 30-70% dei giorni mentre. In particolare, gli episodi di vento forte si sono verificati nei mesi di febbraio 2020, marzo 2020, settembre 2020, gennaio 2021, novembre 2021, dicembre 2021, gennaio 2022, febbraio 2022, marzo 2022 (Fig. 21) (sito web: Windy.app).

Nei periodi caratterizzati da vento da moderato a forte, il mare si presenta con altezza delle onde proporzionale all'intensità del vento.

Nei tre anni di monitoraggio (dal 2020 al 2022) durante tutte le stagioni prevalgono condizioni di mare mosso (con altezza delle onde maggiori di 50 cm e fino a 125 cm) e meno frequentemente mari mossi e agitati, fino a molto grossi. Quasi tutto l'anno queste condizioni si verificano per circa il 30-70% dei giorni mentre durante l'estate per circa il 10-30% dei giorni. In particolare, gli episodi di mare molto agitato o grosso si sono verificati nei mesi di febbraio 2020, marzo 2020, settembre 2020, gennaio 2021, novembre 2021, dicembre 2021, gennaio 2022, febbraio 2022, marzo 2022.

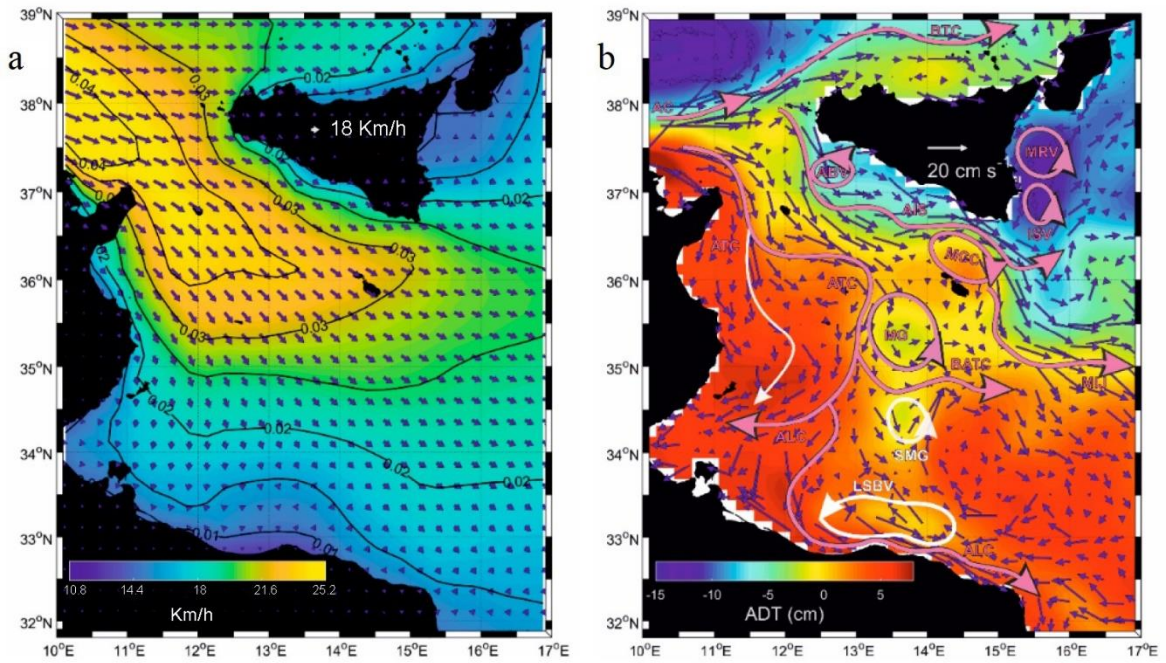
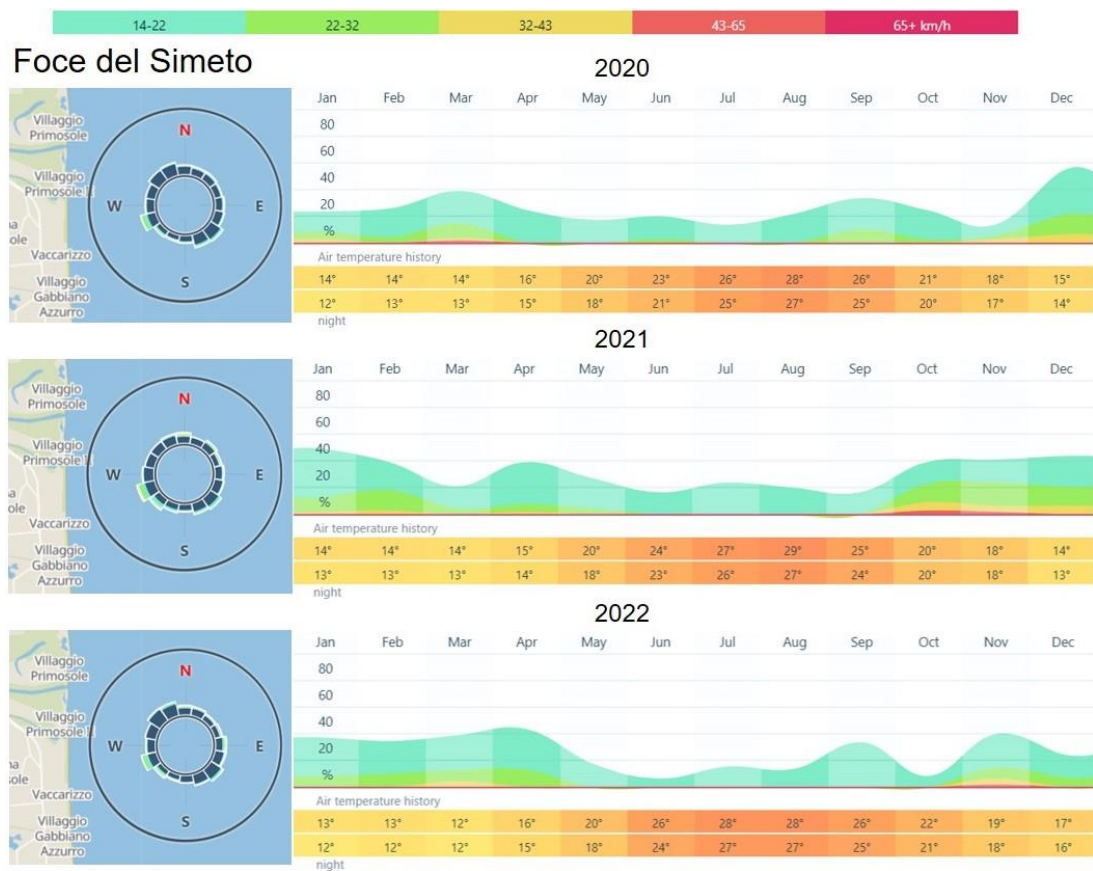


Fig. 20 – a) Valori medi annui di intensità (km/h), direzione (frecche) e forza di sollecitazione dei venti (N/m^2) del Mediterraneo b) Valori medi annui dell'intensità delle correnti principali del Mediterraneo espressi in cm/s (da Menna *et al.*, 2019, modificato).



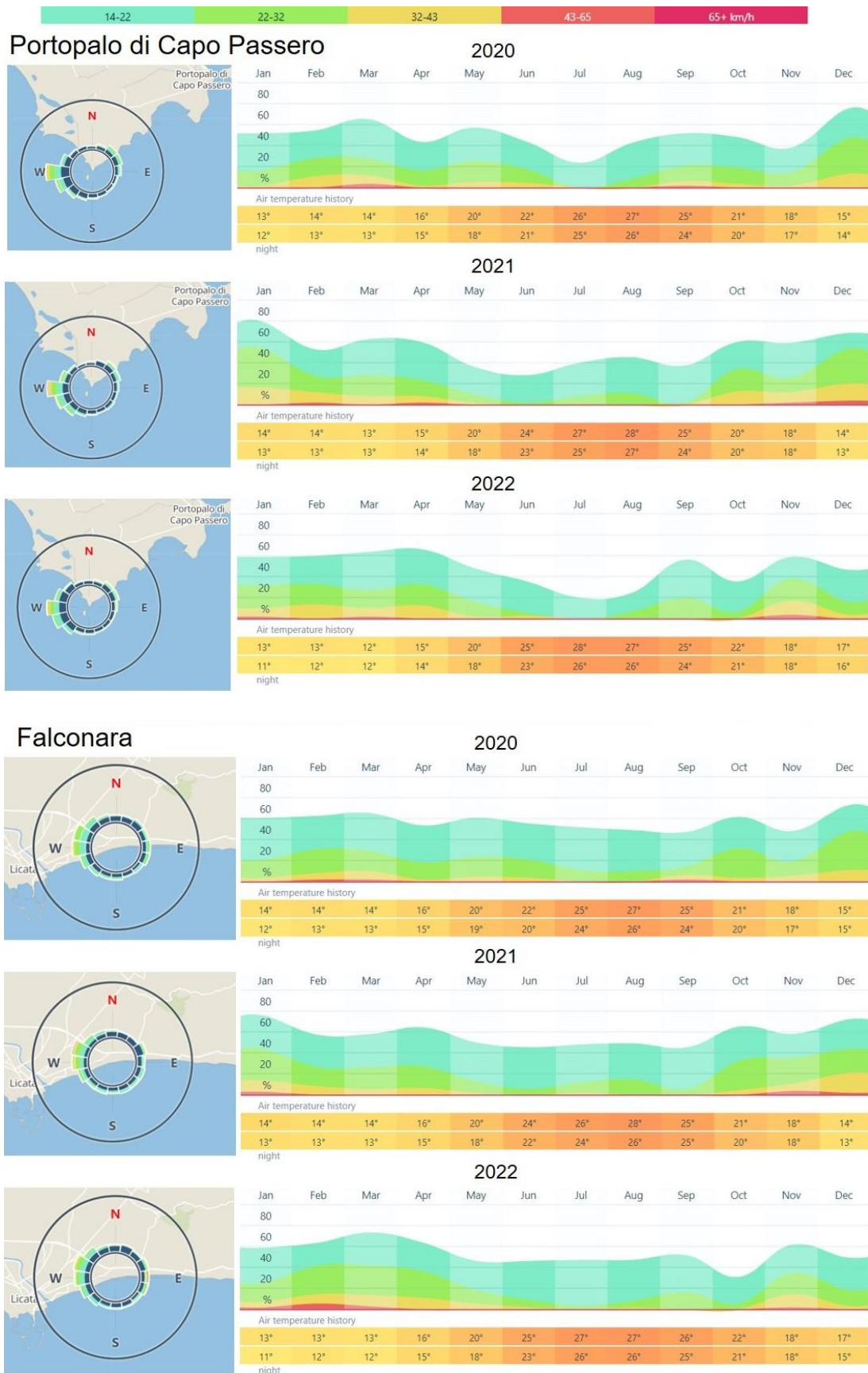
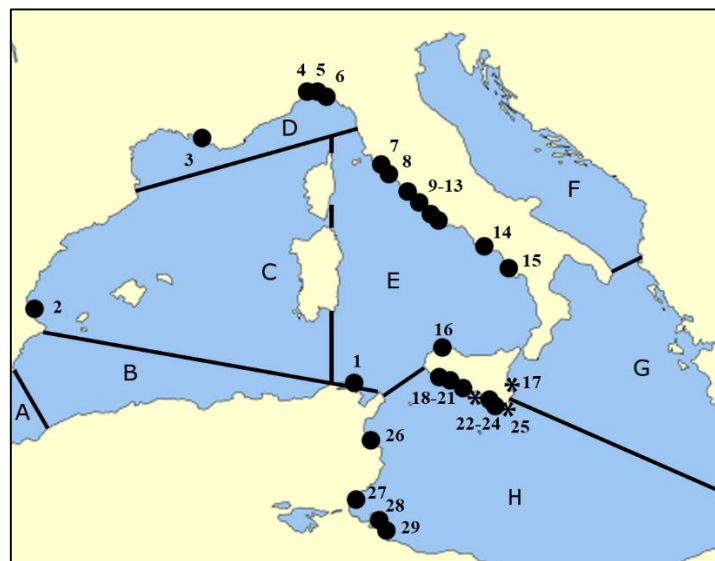


Fig 21 – Statistiche del vento e del tempo per i tre siti di studio con informazioni sulla velocità media locale del vento e sulla temperatura dell'aria. Il diagramma sulla mappa mostra la direzione dominante del vento e include i dati medi per ogni anno (dal sito <https://windy.app/it>).

3.2. Studio bibliografico

I primi mesi del dottorato (novembre 2019-febbraio 2020) sono stati caratterizzati da un'intensa fase di ricerca bibliografica e lettura critica, passaggio fondamentale ai fini di un'ideale ricostruzione dello stato dell'arte. È stata creata una cartella contenente tutti gli articoli scientifici relativi alle biocostruzioni a *Sabellaria* in Mediterraneo fino ad ora conosciuti e i possibili articoli utili al progetto di ricerca. Essi sono stati raggruppati per argomento e catalogati. È stato così possibile: 1) ottenere con maggiore facilità i dati storici relativi alle segnalazioni di *S. alveolata* e 2) fare una revisione e un aggiornamento della distribuzione geografica in Mediterraneo.

Questo studio bibliografico ha permesso di realizzare un elenco di tutte le segnalazioni in letteratura dei ritrovamenti di *S. alveolata* in Mediterraneo e i dati sono stati riportati, tramite programma Adobe Photoshop 8, nel Mediterraneo all'interno dei diversi settori biogeografici (Fig. 22).



Settore biogeografico	
A	Mare di Alborán
B	Spagna meridionale e coste tunisine settentrionali
C	Mare delle Baleari
D	Golfo di Leone e Mar Ligure
E	Mar Tirreno
F	Mar Adriatico
G	Mar Ionio
H	Canale di Sicilia, Plaetau Tunisino e Golfo di Sirte

Fig. 22 – Distribuzione geografica di *S. alveolata* nel Mar Mediterraneo. Le lettere indicano i diversi settori biogeografici, i pallini neri rappresentano i record della letteratura. I tre asterischi indicano i siti investigati nella presente tesi (Simeto, Portopalo e Falconara).

Durante i primi mesi del secondo anno di dottorato (novembre 2020-gennaio 2021) è stata svolta un'ulteriore ricerca delle pubblicazioni scientifiche nelle quali sono descritte le biocostruzioni a *Sabellaria alveolata* del Mediterraneo.

La distinzione e descrizione delle differenti tipologie morfologiche di biocostruzioni e la loro distribuzione nei settori biogeografici del Mediterraneo sono state effettuate attraverso una analisi critica dei lavori esistenti (Tab. 1) e sono state discusse nel paragrafo 4.2. dei Risultati.

Località (Regione)	Fonte
Morfologia a crosta	
Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria)	Delbono <i>et al.</i> (2003)
Marina di San Nicola (Lazio)	Ventura <i>et al.</i> (2020)
Portopalo di Capo Passero (Sicilia)	Sanfilippo <i>et al.</i> (2020)
Morfologia a cuscino	
Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria)	Delbono <i>et al.</i> (2003)
Tor Caldara, Torre Paola (Lazio)	La Porta e Nicoletti (2009)
Marina di San Nicola (Lazio)	Ventura <i>et al.</i> (2020)
Triscina, Eraclea Minoa, Donnalucata (Sicilia)	Schimmenti <i>et al.</i> (2016)
Foce del Simeto (Sicilia)	Sanfilippo <i>et al.</i> (2020)
Morfologia a banco	
Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria)	Delbono <i>et al.</i> (2003)
Tor Caldara, Lavinaio (Lazio)	Taramelli- Rivosecchi (1961)
Tor Caldara (Lazio)	Gravina <i>et al.</i> (2020)
Marina di San Nicola (Lazio)	Ventura <i>et al.</i> (2020)
Ostia Lido (Lazio)	Casoli <i>et al.</i> (2019)
Ostia Lido (Lazio)	Lisco <i>et al.</i> (2020)
Ostia Lido (Lazio)	Bonifazi <i>et al.</i> (2019)
Punta delle Quaglie (Lazio)	La Porta e Nicoletti (2009)
Pozzuoli (Campania)	Lo Bianco (1888)

Tab. 1 – Località in cui sono state segnalate le diverse morfologie di crescita e relativi riferimenti bibliografici.

3.3. Campagne di rilievo

Per ogni sito di campionamento sono state svolte tre campagne di rilievi annuali con cadenza stagionale. Durante queste campagne sono stati effettuati: rilievi subacquei delle biocostruzioni con osservazioni dirette e documentazione video/fotografica; campionamenti delle acque per le successive analisi geochimiche nel Laboratorio Chimico e Chimico-Ambientale del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra di Rende (CS) (DiBEST) dell'Università della Calabria; analisi dei parametri chimico-fisici delle acque circostanti le biocostruzioni; campionamenti manuali non invasivi di frammenti di biocostruzione, campionamenti del sedimento alla base della biocostruzione, campionamenti della fauna associata alla biocostruzione e campionamenti algologici.

3.4. Monitoraggio spazio-temporale delle biocostruzioni

In ciascun sito sono stati svolti rilievi subacquei con osservazioni dirette e documentazione video/fotografica (fotocamera digitale compatta Nikon Coolpix W300 e GoPro 8Heroblack) delle tre biocostruzioni nei rispettivi siti di studio al fine di definire la loro estensione areale e documentarne la variazione temporale.

Nel sito di Portopalo, inoltre, è stato effettuato, in data 30 settembre 2020, il rilievo con drone (DJI -Mavic 2 Pro) (Fig. 23 a) per documentare l'estensione delle biocostruzioni dopo l'effetto dell'impatto antropico estivo e delle prime forti mareggiate. I dati acquisiti da questo rilievo hanno permesso di ricostruire un modello 3D digitale dell'area di studio grazie all'uso del programma Agisoft Metashape Pro. Inoltre, in campo, sono stati acquisiti con un GPS di precisione Garmin Oregon 600 dei punti di controllo di coordinate note (Tab. 2) che hanno permesso di "calibrare" le foto aeree e quindi di ottenere i punti che delimitano l'estensione della biocostruzione (Tab. 3). Questi punti georeferenziati sono stati riportati sul modello generato con Agisoft Metashape Pro (Fig. 23 b).

		Latitudine	Longitudine
Point 22	Fine stradina	36.651252762499055	15.077415369451046
Point 23	Muretto	36.65126890169393	15.077468007802965
Point 24	Palo	36.65115216144135	15.077039524912834



Tab. 2 – Coordinate punti di controllo acquisiti con GPS di precisione.

	Latitudine	Longitudine
Point 1	36.651074	15.077116
Point 2	36.651071	15.077175
Point 4	36.651133	15.077013
Point 5	36.651147	15.077074
Point 6	36.651130	15.077210
Point 7	36.651084	15.077204
Point 8	36.651083	15.077080
Point 10	36.651127	15.077105

Tab. 3 – Coordinate acquisite con il programma Agisoft Metashape Pro dei punti che delimitano l'estensione della biocostruzione di Portopalo in autunno 2020.

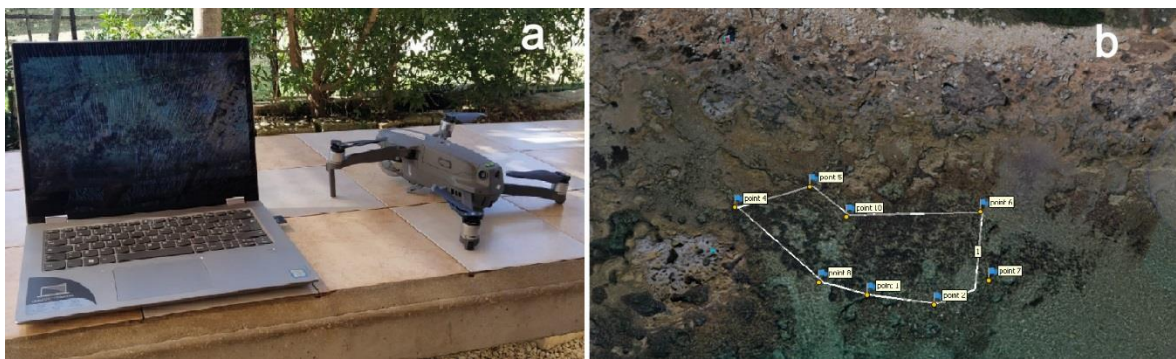


Fig. 23 – a) Drone DJI -Mavic2 Pro. b) Ortofoto del modello 3D ricostruita dal software dell'area di Portopalo con punti georeferenziati delimitanti la biocostruzione in autunno 2020.

I dati raccolti dalle osservazioni dirette, per i tre siti, nelle date indicate in Tab. 4, sono stati riportati su mappa digitale quadrettata che utilizza come base foto aeree ricavate da Google Earth “calibrate” utilizzando i punti di controllo di coordinate note ottenute con il GPS (vedi paragrafo 4.6. Risultati).

	2020	2021	2022
Simeto	12/10/2020	20/07/2021	31/07/2022
Portopalo	02/07/2020	22/07/2021	24/07/2022
	30/09/2020		
Falconara	25/07/2020	16/07/2021	28/07/2022

Tab. 4 – Date relative al rilevamento dell'estensione delle biocostruzioni nei siti del Simeto, Portopalo e Falconara.

3.5. Analisi chimico- fisiche delle acque circostanti le biocostruzioni

	Autunno		Primavera		Estate	
	1	2	1	2	1	2
Simeto	12/10/2020	08/10/2021	29/04/2021	15/05/2022	20/07/2021	31/07/2022
Portopalo	30/09/2020	10/10/2021	08/05/2021	14/05/2022	22/07/2021	24/07/2022
Falconara	26/09/2020	16/10/2021	24/04/2021	30/04/2022	16/07/2021	28/07/2022

Tab. 5 – Date analisi parametri chimico-fisici e prelievi acque effettuate per ogni sito.

Con cadenza stagionale, per ciascun sito, nelle date riportate in Tab. 5, sono stati prelevati con un becher di vetro, 2 campioni di acqua circostanti le tre biocostruzioni (“Campione 1”, “Campione 2”). Su ciascuno dei 2 campioni sono stati misurati *in situ*, attraverso l'utilizzo della sonda multi-parametrica XS Tester PC 5, i parametri chimico-fisici intrinsecamente instabili o comunque utili per le successive analisi di laboratorio comprendenti temperatura, pH, conducibilità, solidi dissolti totali (TDS), salinità (Fig. 24) e l'alcalinità totale per titolazione acidimetrica (Fig. 25) utilizzando HCl 0.05N come titolante e il metilarancio come indicatore (Kit Visocolor HE Alkalinitat AL 7). A tal fine è stato utilizzato un apposito microdosimetro che consente di operare su piccoli volumi d'acqua (0.5 mL).

Per la calibrazione del pH-metro sono stati utilizzati due soluzioni tampone con valore nominale di pH pari a 4.01 e 7.00 a 25 °C.

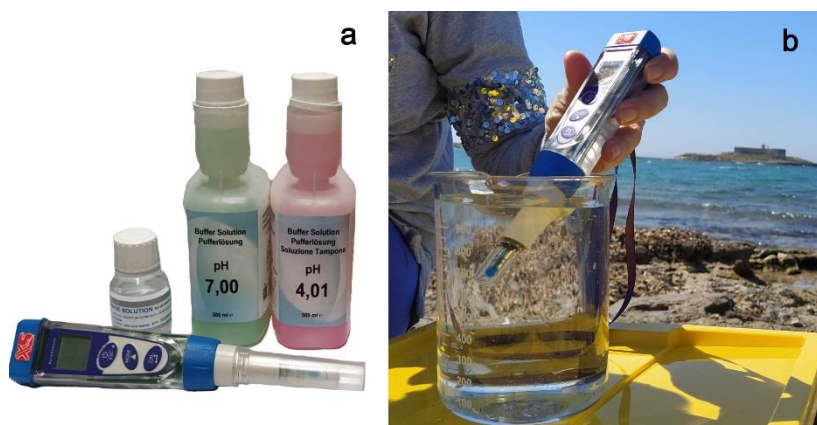


Fig. 24 – a) Kit per la taratura della sonda multiparametrica. b) Misurazione parametri chimico-fisici mediante sonda XS Tester PC 5.

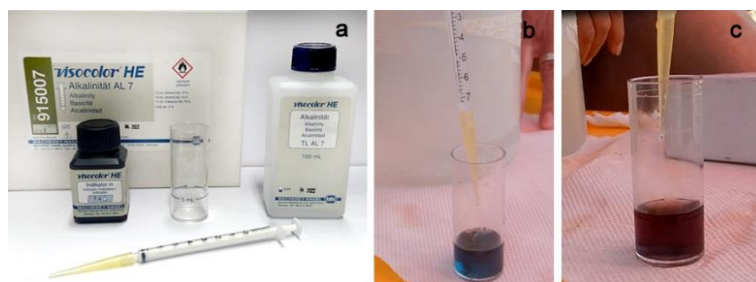


Fig. 25 – a) Kit per il calcolo dell'alcalinità totale per titolazione acidimetrica. b-c) Viraggio ottenuto per la misurazione dell'alcalinità totale *in situ*.

Dagli stessi campioni sono state prelevate differenti aliquote per le successive analisi geochimiche di laboratorio in termini di costituenti maggiori e costituenti in traccia (Fig. 26). In dettaglio, sono state prelevate:

- 1 aliquota da 50 ml, preventivamente filtrata ($0.45 \mu\text{m}$) per rimuovere particelle e solidi sospesi, per la determinazione dei costituenti anionici.
- 1 aliquota da 50 ml preventivamente filtrata ($0.45 \mu\text{m}$) e acidificata ($1\% \text{HNO}_3$) per la determinazione dei costituenti cationici e per la SiO_2 disciolta.
- 1 aliquota da 25 ml preventivamente filtrata ($0.45 \mu\text{m}$) e acidificata ($1\% \text{HNO}_3$) per la determinazione dei costituenti in traccia.

Le aliquote, per la determinazione dei cationi, SiO_2 disciolta e tracce, sono state acidificate per prevenire sia l'adsorbimento dei metalli sulle pareti del contenitore sia fenomeni di precipitazione. Tutti i campioni sono stati conservati in bottiglie di polietilene a temperature di circa 4°C fino alle successive analisi di laboratorio.

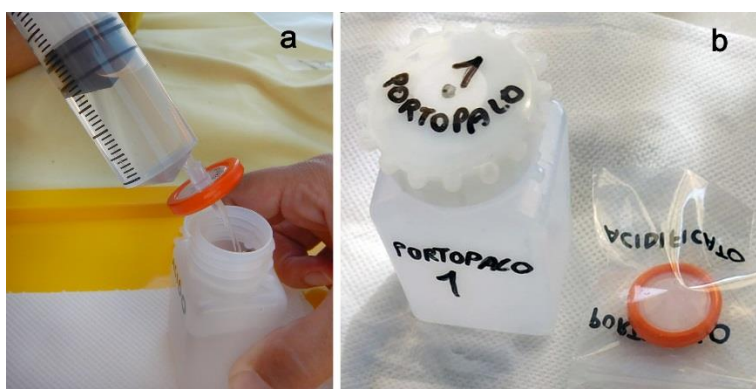


Fig. 26 – Filtraggio dei campioni di acqua di mare in contenitori in polietilene.

In seguito, i campioni raccolti sono stati spediti ai Laboratori Chimico e Chimico-Ambientale e di Spettrometria di Massa, del DiBEST, UniCal, dove sono state effettuate le successive analisi.

I principali soluti disciolti sono stati determinati mediante cromatografia ionica HPLC (High Performance Liquid Chromatography) attraverso l'uso di un Thermo Scientific Dionex™ ICS-1100 equipaggiato di due colonne Dionex IOnPac AS23 e Dionex IonPac CS12A rispettivamente per la determinazione dei costituenti anionici (F^- , Cl^- , Br^- , SO_4^{2-} e NO_3^-) e cationici (K^+ , Na^+ , Li^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ e Mg^{2+}) mentre, gli elementi in tracce sono stati determinati mediante uno spettrometro di massa (quadrupole inductively coupled plasma-mass spectrometer [ICP-MS]) della PerkinElmer/SCIEX, ELAN DRC-e. Durante lo stesso giorno di campionamento la SiO_2 disciolta è stata misurata tramite spettrofotometria VIS a seguito di reazione con molibdato di ammonio in ambiente acido (e previa aggiunta di acido ossalico per eliminare l'interferenza di As e P), per formare un complesso silico-molibdico di colore giallo, la cui assorbanza è stata letta a 410 nm (Nollet e De Gelder, 2007).

La qualità dei dati per i componenti maggiori è stata valutata attraverso il bilancio di carica. È stata accettata una deviazione tra la somma delle concentrazioni dei cationi e quella degli anioni, entrambi espresse in unità equivalenti, di $\pm 5\%$ rispetto alla somma totale delle cariche. La qualità dei dati per gli elementi in tracce è stata controllata utilizzando la soluzione standard NIST1643f. Sono state accettate deviazioni massime del 10% rispetto alle concentrazioni certificate.

I dati ottenuti, in termini sia di concentrazioni assolute che di rapporti, sono stati confrontati con i valori riscontrati nei biocementi con l'intento di individuare possibili correlazioni fra essi.

3.6. Analisi granulometriche del sedimento del fondale

Ai fini di fare un confronto della granulometria dei fondali circostanti le tre biocostruzioni, è stato effettuato, per ogni sito, il prelievo di un campione di sedimento alla base delle biocostruzioni.

I campioni, prelevati nei tre siti nella campagna primaverile del 2022, sono stati raccolti in sacchetti di plastica per poi essere analizzati nel Laboratorio di Sedimentologia del Dipartimento di Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali (DipBioGeo) dell'Università di Catania.

I sedimenti sono stati versati su una base rigida ricoperta da fogli di carta assorbente muniti di etichetta con luogo e data di raccolta e sono stati messi in stufa a 70° C per tre giorni per l'asciugatura (Fig. 27). Una volta asciutti sono stati pesati su una bilancia di precisione (Fig. 28).



Fig. 27 – Sedimento raccolto nel fondale circostante le biocostruzioni preparato su una base rigida per l'asciugatura in stufa nel Laboratorio di Sedimentologia del DipBioGeo.



Fig. 28 – Misurazione del peso del sedimento asciutto.

Per le analisi sedimentologiche si è usata una batteria di setacci (serie ASTM), con maglia decrescente da 16 mm a 63 µm. L'intera batteria è stata sottoposta all'azione di un agitatore meccanico per un periodo di circa 30 minuti, al fine di ottenere la completa vagliatura del materiale (Fig. 29).



Fig. 29 – Agitatore meccanico per la vagliatura del sedimento.

Successivamente è stata fatta la stima del peso di ogni singola frazione trattenuta all'interno di ogni setaccio su una bilancia di precisione, ed è stata valutata la percentuale rispetto al peso totale iniziale per ogni singola classe granulometrica di appartenenza distinguendo tra granulo, sabbie molto grossolane, grossolane, medie, fini e molto fini (scala Wentworth). Per calcolare la percentuale trattenuta ad ogni setaccio è stata effettuata la seguente operazione:

$$\% \text{trattenuto} = \frac{P_{\text{trattenuto}}}{P_{\text{tot}}} 100$$

Infine, sono stati elaborati i dati raccolti e sono stati rappresentati graficamente con istogrammi di frequenza.

3.7. Studi dei campioni: macrostruttura e microstruttura

Al fine di descrivere le morfologie delle biocostruzioni nei siti investigati, oltre alle osservazioni e documentazioni video/fotografiche *in situ* finalizzate alla caratterizzazione morfologica delle biocostruzioni e alla loro distribuzione nel fondale, sono state effettuate ulteriori foto in Laboratorio con fotocamera digitale compatta Nikon Coolpix W300.

Nelle date indicate in Tab. 6 sono stati prelevati, con l'ausilio di un piccolo martello e di uno scalpello, in maniera non invasiva, dei campioni di biocostruzioni in ciascuno dei tre siti, contestualmente ai rilievi subacquei.

Simeto					
29/04/2021			20/07/2021		
n. pezzi	dm ³	n. pezzi	dm ³	n. pezzi	dm ³
10	2,851	9		1,115	

Portopalo					
02/07/2020		08/05/2021		22/07/2021	
n. pezzi	dm ³	n. pezzi	dm ³	n. pezzi	dm ³
3	0,244	1	0,586	2	0,1

Falconara					
25/07/2020		16/07/2021		28/07/2022	
n. pezzi	dm ³	n. pezzi	dm ³	n. pezzi	dm ³
2	2,677	5	3,555	1	0,432

Tab. 6 – Date dei prelievi di porzioni di biocostruzioni. Per ciascun sito è indicato il numero di porzioni raccolte e il volume totale in dm³.

L'architettura del frame e la struttura dei tubi delle tre biocostruzioni campionate sono state studiate presso il Laboratorio di Paleoecologia del DipBioGeo. I campioni raccolti sono stati debolmente sciacquati in acqua corrente quindi messi ad asciugare per una settimana. La geometria generale delle biocostruzioni è stata descritta attraverso osservazioni sia sulle foto acquisite che sui campioni direttamente osservati allo stereomicroscopio Stemi 305 (Zeiss) (Fig. 30).



Fig. 30 – Osservazioni dei campioni raccolti allo stereomicroscopio.

Unendo le informazioni macroscopiche acquisite durante le osservazioni subacquee (documentazione fotografiche) e quelle microscopiche acquisite in laboratorio (foto e osservazioni allo stereomicroscopio), è stato messo a punto, tramite programma Adobe Photoshop 8.0.1, un modello che rappresenti queste tre differenti morfologie.

Contemporaneamente, alcuni tubi accuratamente selezionati sono stati staccati dai campioni con l'aiuto di piccole lamette e aghi e sono stati osservati al microscopio ottico Zeiss Discovery V8 munito di fotocamera AxioCam 208 color, per lo studio della struttura della parete del tubo e la modalità di incollaggio degli elementi agglutinati (Fig. 31).

Sono stati misurati il diametro esterno, interno, lo spessore del tubo e la granulometria dei sedimenti all'interno della parete. Nel paragrafo 4.4 dei Risultati vengono riportati i valori medi corrispondenti a circa 50 misurazioni per parametro. La stima qualitativa della composizione è stata calcolata su un campione di circa 50 tubi.



Fig. 31 – Osservazioni al microscopio ottico provvisto di fotocamera.

Ulteriori osservazioni sono state effettuate su frammenti di tubi opportunamente selezionati (superficie esterna e sezioni trasversali e longitudinali), montati su *stubs*, al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM) Tescan Vega 2 LMU, presso il Laboratorio di Microscopia Elettronica del DipBioGeo.

Porzioni molto piccole (in totale circa 230 ml in volume occupato all'interno di un becher con acqua) dei campioni raccolti nell'estate 2021 a Falconara e al Simeto, una volta essiccati, sono stati pesati con una bilancia elettronica e sono stati disgregati all'interno di un becher contenente acqua e perossido di idrogeno a 130 vol. (Fig. 32). Gli elementi disgregati sono stati asciugati in stufa a 70° per sette giorni (Fig. 33).



Fig. 32 – a) Porzioni di biocostruzione selezionate per essere disgregate in b) acqua e perossido di idrogeno per le analisi granulometriche.



Fig. 33 – Sedimento delle biocostruzioni disgregato e asciugato in stufa a 70°C.

I sedimenti sono stati poi setacciati con la batteria di setacci serie ASTM, con maglie rispettivamente di 2,83 mm, 2 mm, 1,41 mm, 1mm, 707 µm, 500 µm, 355 µm, 250 µm, 177 µm, 125 µm, 90 µm e 63 µm come indicato in Blott e Pye (2012). La frazione trattenuta su

ciascun setaccio è stata pesata e si è calcolata la percentuale in peso distinguendo tra granulo, sabbie molto grossolane, grossolane, medie, fini e molto fini. I valori di ogni singola pesata così ottenuti vengono riferiti alle classi granulometriche appartenenti alla scala Wentworth.

Infine, sono stati elaborati i dati raccolti e sono stati rappresentati graficamente con istogrammi di frequenza.

Per il sito di Portopalo non è stato effettuato questo tipo di analisi perché la biocostruzione, nel 2021 si è fortemente ridotta e il campionamento sarebbe stato fortemente impattante.

3.8. Identificazione degli individui di *Sabellaria*

Da porzioni dei piccoli blocchi raccolti nelle date indicate in Tab. 6, sono stati prelevati individui vivi di *Sabellaria* ai fini della identificazione specifica. Nel Laboratorio di Paleoecologia del DipBioGeo, il materiale è stato delicatamente rotto manualmente (Fig. 34 a) per consentire di prelevare con maggiore facilità allo stereomicroscopio Zeiss Axioplan II, gli individui di *Sabellaria* dai loro tubi (Fig. 34 b-c). I vermi *Sabellaria* sono stati inseriti all'interno di provette in vetro riempite con etanolo in concentrazioni del 96% v/v utilizzato come mezzo fissante (Fig. 34 d). Si è ottenuta così una collezione permanente di riferimento utilizzabile anche per eventuali analisi genetiche.

Alcuni di questi esemplari sono stati selezionati per osservazioni delle parti dure chitinee allo stereomicroscopio e al microscopio elettronico a scansione Tescan Vega 2 LMU (Fig. 35). I vermi, posti su *stubs* e sottoposti ad un trattamento di metallizzazione, sono stati identificati a livello di specie utilizzando i caratteri morfologici indicati da Fauvel (1927) e Kirtley (1994).

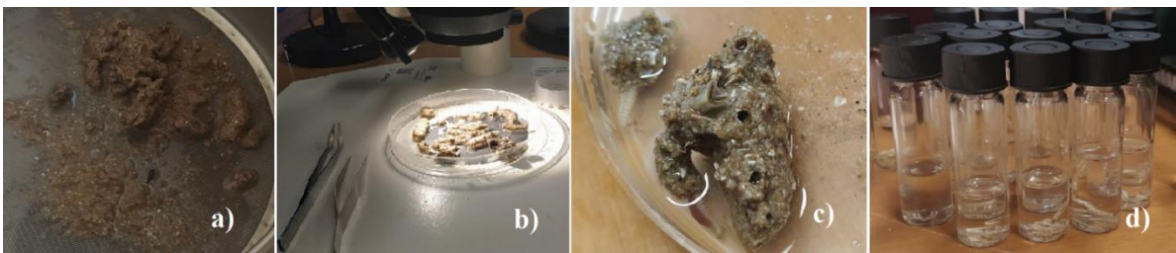


Fig. 34 – Passaggi effettuati per il prelievo di individui di *Sabellaria*: a) rottura manuale dei frammenti di biocostruzione su setaccio; b-c) osservazione allo stereomicroscopio ed estrazione con pinzette di *Sabellaria*; d) fissazione in etanolo al 96% degli esemplari raccolti.



Fig. 35 – Osservazioni al SEM dei caratteri diagnostici di *Sabellaria* per l'identificazione della specie.

3.9. Studio e caratterizzazione del biocemento

Lo studio del biocemento ha riguardato le seguenti fasi:

3.9.1. Osservazioni al microscopio ottico in luce riflessa ed epifluorescenza

Porzioni di tubi sono stati esaminati al microscopio ottico Axioplan Imaging II/ HBO 100 (Zeiss) e in epifluorescenza per localizzare il biocemento, studiarne la morfologia, l'abbondanza, e indagare sulla sua modalità di distribuzione con maggiore facilità grazie al contrasto di fluorescenza tra le particelle di sabbia e la composizione ricca di materia organica di cui è composto. Il microscopio ad epifluorescenza sfrutta il fenomeno dell'emissione di luce nel visibile discriminando alcune lunghezze d'onda. La fluorescenza, indotta da una lampada a vapore di mercurio connessa al microscopio, crea un'emissione nel visibile che passa attraverso un filtro posto tra l'obiettivo e l'oculare. I filtri usati sono tarati su differenti lunghezze d'onda (BP 436/10nm / LP 470 nm per il verde; BP 450/490 nm / LP 520 nm per il giallo). I campioni osservati sono stati fotografati con AxioCam HRc tramite programma AxioVision LE64 (Fig. 36).

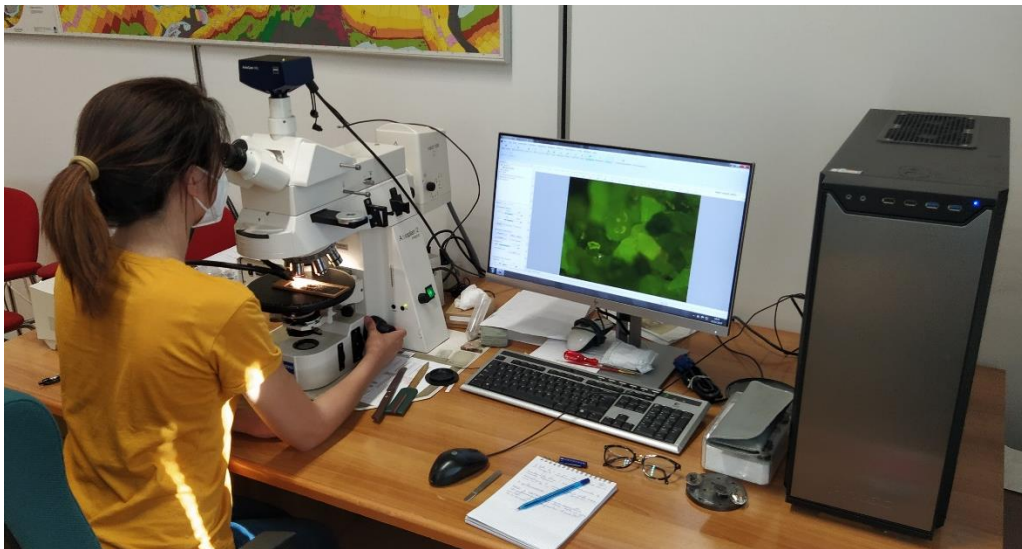


Fig. 36 – Osservazioni in epifluorescenza al microscopio ottico Axioplan Imaging II (Zeiss) presso il DiBEST.

3.9.2. Osservazioni e analisi al Microscopio Elettronico a Scansione (SEM)

Il SEM, ovvero il microscopio elettronico a scansione, è uno strumento dotato di un altissimo potere di risoluzione che consente di osservare campioni ad alto ingrandimento. Il microscopio elettronico, a differenza di quanto avviene nel microscopio ottico, non utilizza

come fonte d'illuminazione la radiazione elettromagnetica nel visibile ma impiega un fascio di elettroni capace di produrre un'immagine ad alta risoluzione.

I componenti principali del SEM sono: la sorgente elettronica, che genera un fascio di elettroni; la colonna in cui viaggiano gli elettroni emessi, che contiene delle lenti per la focalizzazione del fascio; la camera delle analisi, che contiene i campioni da analizzare ed i rilevatori.

Gli elettroni sono prodotti in cima alla colonna, essi vengono accelerati verso il basso da una forte differenza di potenziale e passano attraverso una combinazione di lenti e aperture che producono un raggio sottile (probe) di elettroni il quale colpisce la superficie del campione. Il fascio elettronico ad alta energia (20 eV) che interagisce con la superficie del campione genera una serie di segnali che vengono rilevati da appositi detector. In particolare, per ogni punto scandito si producono diversi segnali, tra i principali possiamo ricordare gli elettroni secondari, gli elettroni retrodiffusi e i raggi X. Gli elettroni secondari (SE), sono gli elettroni legati ai livelli atomici più esterni, che ricevono dal fascio incidente un'energia addizionale sufficiente ad allontanarli. Hanno un'energia compresa tra 0 e 50 eV, sono emessi dagli spessori superficiali del campione (~10nm) e sono frequentemente utilizzati per lo studio della morfologia superficiale. Gli elettroni retrodiffusi (BSE), rappresentano quella porzione di elettroni del fascio che viene riflessa con energia che va da 50 eV fino a quella di incidenza. Sono portatori di segnali principalmente composizionali e morfologici; essi provengono da profondità massime di alcuni μm . La quantità di BSE dipende, oltre che dalla morfologia della superficie, anche dal numero atomico medio del materiale presente nel piccolo volume irradiato dal fascio. L'immagine ricostruita dal computer tramite i BSE rispecchia la variazione del numero atomico medio all'interno del campione e permette quindi di individuare i minerali che ne costituiscono le diverse parti.

Osservazione della microstruttura e analisi chimiche degli elementi maggiori sono state eseguite su punti colla presenti all'interno della parete del tubo. Il biocemento, oggetto di analisi, utilizzato per incollare i grani della parete dei frammenti è stato individuato su sezioni trasversali di tubi selezionati e su parti di essi frantumati meccanicamente con un piccolo bisturi (Fig. 37 a) presso il DiBEST dell'UniCal. I campioni, collocati su *stubs*, sono stati metallizzati tramite uno Sputter - Carbon Coater QUORUM Q150T-ES che ha permesso di applicare un fine strato di grafite ultrapura dello spessore di circa ± 5 nm sui campioni (Fig. 37 b).

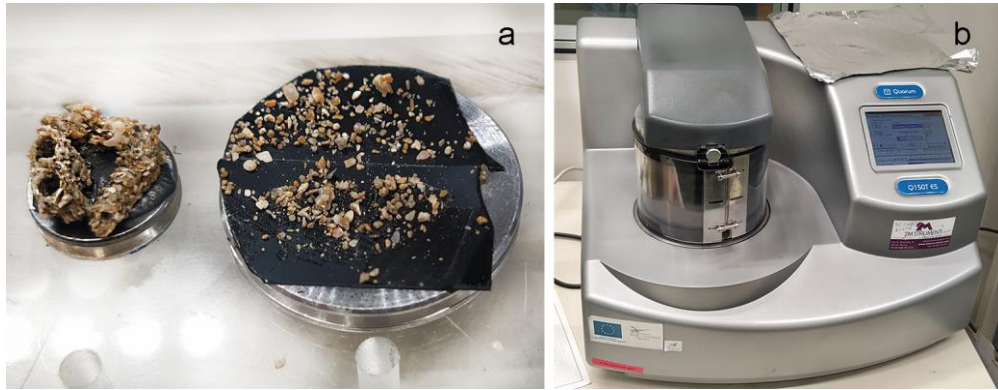


Fig. 37 – a) Sezioni trasversali e porzioni di tubi frantumati per le osservazioni del biocemento al SEM del DiBEST-UniCal. b) Successivo processo di metallizzazione dei campioni.

I campioni metallizzati sono stati disposti su appositi porta campioni, ed analizzati micro-morfologicamente al SEM (UHR-SEM) – ZEISS CrossBeam 350 presso il Laboratorio di Microscopia Elettronica e il Laboratorio di Geobiologia del DiBEST dell'UniCal. I singoli punti colla sono stati fotografati con Camera EBSD -EDAX Clarity – HIKARI Super –AMETEK sia in BSE (Backscattered-Electron) per ottenere immagini che forniscono informazioni composizionali dei campioni che in SE (Secondary Electron) per informazioni micro e nano-morfologiche (Fig. 38).

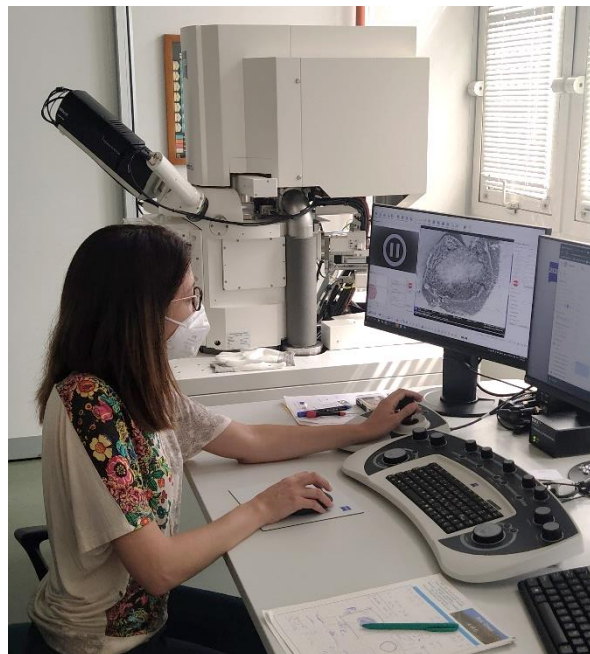


Fig. 38 – Osservazioni e analisi EDS del biocemento al Microscopio Elettronico del DiBEST-UniCal.

Analisi degli elementi sono state svolte sul biocemento di ogni campione tramite spettrometro EDS EDAX OCTANE Elite Plus - Silicon drift type a 123 eV di risoluzione. I dati ottenuti sulle % in massa dei singoli elementi sono stati riportati su tabella Excel.

Su determinati punti colla selezionati per tutti e tre i siti sono state effettuate mappe al fine di valutare la distribuzione e la concentrazione semiquantitativa dei principali elementi del biocemento nei tubi di *S. alveolata*.

3.9.3. Osservazioni e analisi alla Microsonda Elettronica (EMPA)

La microsonda elettronica è uno strumento mediante il quale è possibile effettuare analisi chimiche, sia qualitative (individuando gli elementi presenti) sia quantitative (abbondanza degli elementi presenti), su volumi estremamente ridotti, dell'ordine di pochi micron, di campioni solidi opportunamente preparati. Si tratta di una tecnica non distruttiva in quanto lascia inalterato il campione. L'analisi alla microsonda sfrutta i raggi X caratteristici (fotoni) che ogni elemento emette quando viene bombardato con elettroni di adeguata energia. L'energia ionizzante è costituita da un fascio di elettroni accelerato e collimato sul campione con energia tipica dell'ordine di 10 - 30 keV ed un'intensità di corrente che varia tra 2 e 100 nA. Dal bombardamento vengono prodotti diversi segnali sotto forma di fotoni (tra i principali ricordiamo gli elettroni secondari, gli elettroni retrodiffusi e i raggi X). I fotoni emessi sono radiazioni di natura elettromagnetica (compresi tra l'ultravioletto ed i raggi γ con λ da 0.1 a 100 Å) caratterizzate da una lunghezza d'onda (λ), espressa in Å, e da una energia (E) inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, espressa in volt (eV). Attraverso la misura dell'intensità di queste emissioni e, tenendo presente sia dei fenomeni legati alle interazioni degli elettroni incidenti sia di quelli legati alle interazioni dei raggi X con la materia, è possibile risalire alla concentrazione degli elementi emettenti. I raggi X, caratteristici degli elementi che compongono il campione in esame, possono essere registrati e discriminati sulla base della lunghezza d'onda (WDS) o dell'energia (EDS). L'intensità di queste radiazioni è proporzionale alla concentrazione dell'elemento nel campione. La microanalisi ai raggi X dà informazioni specifiche circa la composizione degli elementi del campione in termini di quantità e distribuzione.

Le analisi WDS hanno permesso di valutare la concentrazione quantitativa dei vari elementi su punti colla selezionati di tubi di *Sabellaria alveolata* provenienti dai tre siti indagati e di effettuare un confronto sulla possibile variabilità della composizione chimica del biocemento in funzione dei diversi parametri chimico-fisici dei tre ambienti.

Tramite tali analisi è stato possibile inoltre fare un confronto con le analisi delle acque e valutare se il frazionamento degli elementi nel biocemento è in equilibrio con la soluzione acquosa. Tale indagine è del tutto innovativa ed ha permesso di investigare possibili nuovi *proxies* biologici utili nel monitoraggio ambientale e nelle ricostruzioni paleoambientali. I campioni, precedentemente metallizzati, sono stati analizzati con una sonda JXA-8230 Electron Probe Microanalyzer (Fig. 39).



Fig. 39 – Osservazioni e analisi EDS e WDS del biocemento all'EPMA del DiBEST-UniCal.

I dati raccolti sono stati inseriti all'interno di tabelle Excel che ne riportano le % in massa degli elementi presenti. Successivamente gli elementi maggiori sono stati rapportati tra di loro e inseriti all'interno di un grafico a dispersione per definire la correlazione tra i diversi biocementi dei tre siti investigati e per e per confrontarli con le analisi delle acque.

3.10. Studio della fauna associata

Durante le campagne di rilievo, la documentazione video/fotografica e la raccolta di alcuni campioni di biocostruzione hanno permesso di effettuare un riconoscimento visivo dei principali organismi animali, sia sessili che vagili, associati.

Nel Laboratorio di Paleoecologia del DipBioGeo, sono stati osservati allo stereomicroscopio i taxa incrostanti, come briozoi e serpulidi, e quelli presenti sulla superficie della struttura o nelle sue piccole cavità. Per alcuni campioni sono state effettuate foto di dettaglio tramite Stereomicroscopio Zeiss Axioplan II provvisto di telecamera AxioCam Axiovision.

Per ogni campione osservato è stata svolta attività di *sorting* con l'ausilio di strumentazione da laboratorio (pinzette, aghi, ecc.).

Una volta completata l'estrazione, i campioni sono stati messi in alcol in concentrazioni del 96%, all'interno di barattoli in polietilene e sono stati conservati in frigo per le successive attribuzioni sistematiche.

3.11. Studio della flora macroalgale associata

Durante le campagne di rilievo, in ciascuno dei tre siti, sono stati svolti campionamenti e acquisizioni video/fotografiche subacquee con GoPro 8Heroblack e fotocamera digitale compatta Nikon Coolpix W300 per documentare la presenza di organismi vegetali sulle biocostruzioni a *Sabellaria* e successivamente procedere all'identificazione delle specie presso il laboratorio di Algologia del DipBioGeo.

- Per il sito del Simeto, è stato effettuato un unico campionamento nell'estate 2021 (20/07/2021). Le alghe sono state raccolte sulle biocostruzioni a *Sabellaria*, a circa 40 cm di profondità e ad una distanza di 40 metri dalla linea di costa in prossimità degli scogli frangiflutti dell'isolotto antistante.
- Per il sito di Portopalo sono stati effettuati campionamenti stagionali dal Luglio 2020 a Luglio 2021 (01/07/2020; 01/10/2020; 11/01/2021; 07/05/2021; 30/07/2021) grazie al supporto della Prof.ssa Donatella Serio. Le alghe sono state raccolte a 50 cm di profondità sulle *croste* di *Sabellaria* a ridosso della linea di costa.
- Per il sito di Falconara le macroalghe sono state raccolte durante i rilievi primaverili ed estivi del 2022 (30/04/2022; 28/07/2022) a 60 cm di profondità sulle biocostruzioni a *Sabellaria* a circa 4 metri di distanza dalla linea di costa.

Le macroalghe sono state raccolte utilizzando un coltellino o una piccozza per staccare i talli completi di base. Subito dopo la raccolta, i campioni sono stati conservati in una soluzione al 20% di alcool etilico e 70% acqua di mare per il successivo studio in Laboratorio. L'identificazione di tutte le specie presenti nei campioni è stata eseguita utilizzando lo stereomicroscopio e il microscopio ottico Zeiss Axioplan, seguendo la metodologia standardizzata riportata in Cormaci *et al.* (2003). Poiché i caratteri diacritici per il riconoscimento delle specie algali riguardano spesso la struttura interna del tallo o la struttura di particolari apparati vegetativi e/o riproduttivi, sono state effettuate sezioni sottili a mano utilizzando lame di rasoio e allestiti preparati temporanei. In alcuni casi, i preparati sono stati colorati con soluzione acquosa all'1% di blu di anilina acidificato con HCl all'1% per evidenziare le sinapsi o con soluzione iodo-iodurata (Lugol) per evidenziare l'apparato plastidiale e i pirenoidi. In alcuni casi, si è resa necessaria la dissociazione di parti del tallo utilizzando una soluzione acquosa di acido nitrico al 10%, per contare il numero delle cellule pericentrali.

Inoltre, nel caso di alghe interamente o parzialmente calcificate, per procedere all'osservazione dei caratteri diacritici, porzioni del tallo sono state preventivamente decalcificate utilizzando acido nitrico al 10%.

Completata l'analisi floristica, è stata compilata una tabella in Microsoft Excel in cui viene riportata la lista delle specie identificate con l'indicazione del sito di raccolta e i dati relativi.

4. RISULTATI

4.1. Determinazione della specie *Sabellaria alveolata*

Gli animali vivi trovati all'interno dei tubi campionati sono stati attribuiti alla specie *S. alveolata*, secondo i criteri diagnostici forniti da Fauvel (1927), Fauchald (1977), Kirtley (1994), Capa *et al.* (2012) and Nishi *et al.* (2015), sulla base della forma delle pale opercolari esterne, il loro margine distale e l'assenza di spine nucali, tutti caratteri che permettono la distinzione da *S. spinulosa* e *S. alcocki*.

L'opercolo è diviso in due lobi simmetrici recanti tre file di pale disposte in due semicerchi concentrici (Fig. 40). Le pale esterne mostrano una superficie liscia leggermente ricurva e un margine distale seghettato con 2-3 (Falconara e Portopalo) (Fig. 41) o 5-6 (Simeto) (Fig. 42) uncini ricurvi e uno grande centrale.

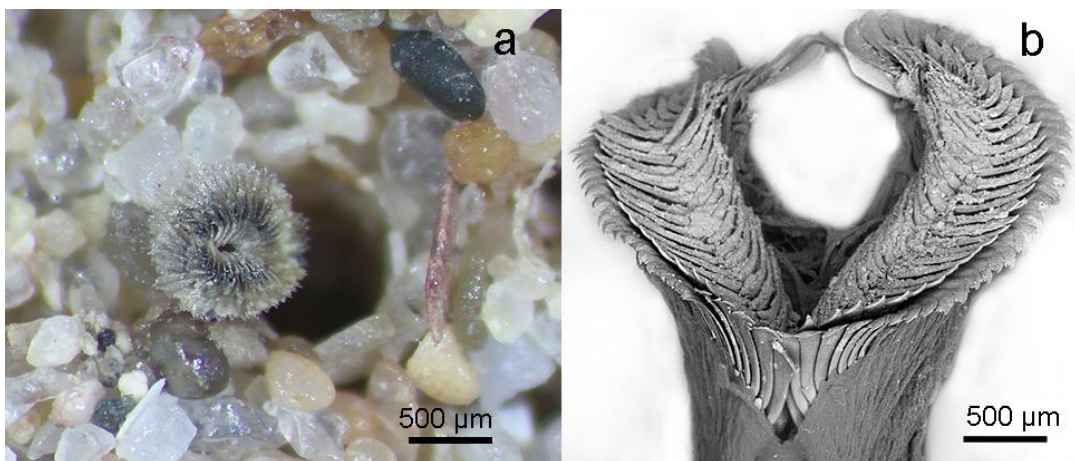


Fig. 40 – a) Osservazioni al Microscopio ottico dei caratteri diagnostici di *S. alveolata* per l'identificazione della specie. b) Foto al SEM della corona opercolare dell'animale. Località: a) Falconara; b) Simeto.

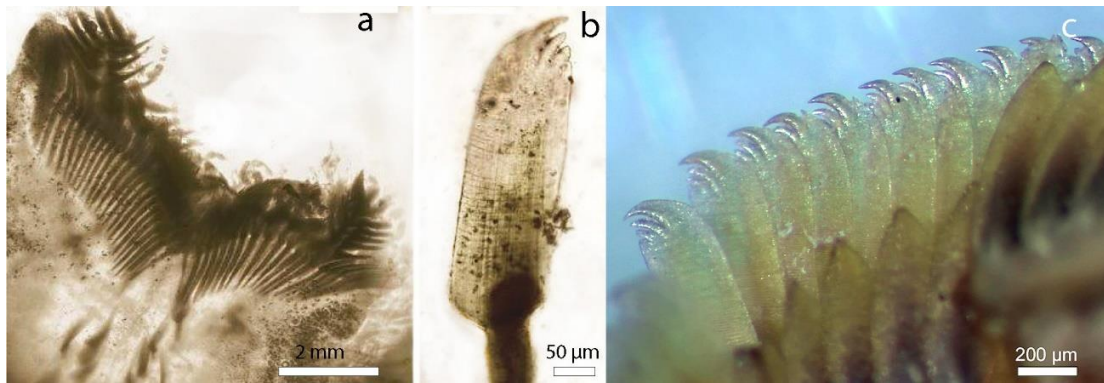


Fig. 41 – a) Vista dorsale dell'estremità anteriore di *S. alveolata* con la corona opercolare. b) Pala esterna recante un dente centrale liscio indicativo della specie. c) Margine distale delle pale esterne caratterizzato da piccoli uncini ricurvi e uno grande centrale. Località: a-b) Portopalo; c) Falconara.

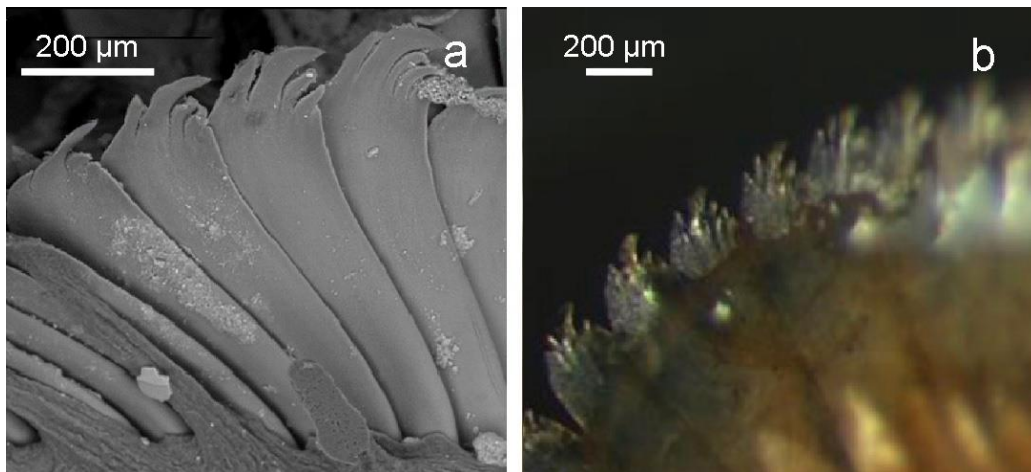


Fig. 42 – Pale esterne di *S. alveolata* dal margine distale caratterizzati da piccoli uncini ricurvi e uno grande centrale. Località: Simeto.

Le pale medie, rivolte verso l'esterno, e quelle interne, rivolte verso il centro dell'opercolo, sono costituite da sottili lame concave, disposte con incastri incrociati. Ogni lama ha un aspetto pennato prodotto da una carena mediana asimmetrica che separa due lobi rugosi.

4.2. Distribuzione geografica

Le biocostruzioni a *S. alveolata* sono distribuite nel bacino occidentale del Mediterraneo, principalmente nelle coste che si affacciano sul Canale di Sicilia e nel Mar Tirreno. È proprio nel Mar Tirreno in cui abbiamo la prima segnalazione, nell'area di Pozzuoli, risalente a fine Ottocento con Lo Bianco (1888) mentre, la maggior parte delle successive segnalazioni è a partire dagli ultimi venti anni sempre nel settore costiero Tirrenico e in particolare in quello laziale (vedi Tab. 7). Infatti, il maggior numero di ritrovamenti con biocostruzioni a *S. alveolata* di dimensioni maggiori e più durature nel tempo, si ha nelle coste laziali la cui presenza era già conosciuta negli anni Cinquanta per Civitavecchia. Ugualmente recenti sono i ritrovamenti nel Golfo di Gabes e in altre aree costiere tunisine, mentre non sono stati finora segnalati record nel Mediterraneo orientale e nel Mar Adriatico.

I ritrovamenti di *Sabellaria alveolata* per la Sicilia, ad esclusione di quello di Castellammare del Golfo, sono quelli della costa meridionale, da quello storico alla foce del fiume San Leone a quelli più recenti di Sampieri, Marina di Ragusa e Scoglitti.

I tre siti, oggetto della presente tesi, si aggiungono alle segnalazioni già note per la Sicilia. Queste ricadono nel Settore biogeografico H (Canale di Sicilia) per i siti di Portopalo e Falconara e Settore biogeografico G per la Foce del Simeto (Fig. 43; Tab. 7).

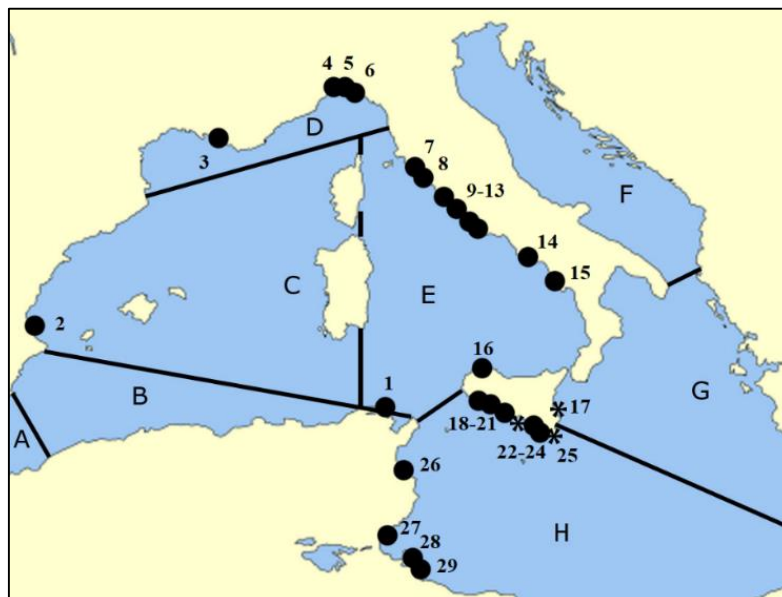


Fig. 43 – Distribuzione geografica di *S. alveolata* nel Mar Mediterraneo. Le lettere indicano i diversi settori biogeografici, i pallini neri rappresentano i record della letteratura. I tre asterischi indicano i siti investigati nella presente tesi (Simeto, Portopalo e Falconara).

	Settore biogeografico	Sito	Riferimento bibliografico
A	Mare di Alborán	nessuno	
B	Spagna meridionale e coste tunisine settentrionali	1 Biserta (Tunisia)	Rabaoui <i>et al.</i> (2009)
C	Mare delle Baleari	2 Golfo di Valencia (Spagna)	Ibáñez Genis (1973), Campoy (1982), Porras <i>et al.</i> (1996)
D	Golfo di Lione e Mar Ligure	3 Marsiglia (Francia) 4 Quarto (Genova-Liguria) 5 Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria) 6 Sestri Levante (Liguria)	Bellan (1964) Issel (1918) Delbono <i>et al.</i> (2003) Delbono <i>et al.</i> (2003)
E	Mar Tirreno	7 Punta delle Quaglie (Viterbo - Lazio) 8 Civitavecchia (Lazio) 9 Ostia Lido (Roma-Lazio) 10 Tor Caldara (Anzio-Lazio) 11 Lavinio (Anzio- Lazio) 12 Torre Paola (Latina- Lazio) 13 Circeo (Latina- Lazio) 14 Golfo di Napoli (Campania) 15 Salerno, Policastro (Campania) 16 Castellammare del Golfo (Trapani - Sicilia)	Nicoletti <i>et al.</i> (2001), La Porta <i>et al.</i> (2006), La Porta & Nicoletti (2009) Giordani-Soika (1956), Somaschini (1988) Bonifazi <i>et al.</i> (2019), Casoli <i>et al.</i> (2019), Lisco <i>et al.</i> (2020), Ventura <i>et al.</i> (2020) Taramelli-Rivosecchi (1961), Nicoletti <i>et al.</i> (2001), LaPorta <i>et al.</i> (2006), La Porta & Nicoletti (2009) Taramelli-Rivosecchi (1961), Gambi <i>et al.</i> (1996), Nicoletti <i>et al.</i> (2001) La Porta <i>et al.</i> (2006), La Porta & Nicoletti (2009) Chimenz Gusso <i>et al.</i> (1995), Nicoletti <i>et al.</i> (2001) Lo Bianco (1888, 1893), Giordani-Soika (1956) Giordani-Soika (1956) Sparla <i>et al.</i> (1992)
F	Mar Adriatico	nessuno	
G	Mar Ionio	17 Foce del Simeto	Sanfilippo <i>et al.</i> (2020)
H	Canale di Sicilia, Plaetau Tunisino e Golfo di Sirte	18 Triscina (Trapani- Sicilia) 19 Eraclea Minoa (Agrigento- Sicilia) 20 Agrigento (Sicilia) 21 Foce San Leone (Agrigento- Sicilia) 22 Scoglitti, Punta Braccetto (Ragusa- Sicilia) 23 Donnalucata, Marina di Ragusa (Ragusa - Sicilia) 24 Sampieri (Ragusa- Sicilia) 25 Portopalo (Siracusa - Sicilia) 26 Monastir (Tunisia) 27 Golfo di Gabès (Tunisia) 28 Djerba (Tunisia) 29 Bahiret el Bibane (Tunisia)	Iaciofano <i>et al.</i> (2015), Schimmenti <i>et al.</i> (2016), Bertocci <i>et al.</i> (2017) Iaciofano <i>et al.</i> (2015), Schimmenti <i>et al.</i> (2016), Bertocci <i>et al.</i> (2017) Giordani-Soika (1956) Molinier & Picard (1953) Sanfilippo <i>et al.</i> (2020), Lo Bue <i>et al.</i> (2022) Iaciofano <i>et al.</i> (2015), Schimmenti <i>et al.</i> (2016), Bertocci <i>et al.</i> (2017) Lo Bue <i>et al.</i> (2022) Sanfilippo <i>et al.</i> (2019, 2020) Sanfilippo <i>et al.</i> (2020) Rabaoui <i>et al.</i> (2009) Ayari <i>et al.</i> (2009) Wesenberg-Lund (1939), Ayari <i>et al.</i> (2009) Wesenberg-Lund (1939), Ayari <i>et al.</i> (2009)

Tab. 7 – Distribuzione geografica nel Mar Mediterraneo e relativi riferimenti bibliografici dei record mediterranei di *S. alveolata*.

Alcuni lavori, controllati per ottenere i dati relativi alle segnalazioni nel Mediterraneo, per lo più quelli più antichi, non sono esaustivi perché si limitano ad elencare *S. alveolata* omettendo qualsiasi informazione sulla presenza di individui isolati rispetto alle biocostruzioni vere e proprie, o non forniscono descrizioni relative la morfologia e la loro estensione. Solo nelle pubblicazioni degli anni più recenti vengono fornite informazioni più accurate da cui si evince anche la morfologia di crescita (Tab. 8; Fig. 44): la morfologia a *crosta* è molto rara essendo segnalata solo per le coste della Liguria e quelle laziali alle quali si aggiunge quella siciliana di Portopalo di Capo Passero. La morfologia a *cuscino* è segnalata nel litorale laziale di Anzio e Latina e lungo le coste siciliane di Triscina, Eraclea Minoa e Donnalucata. A queste si aggiunge quella presente nella foce del Simeto.

La morfologia a *banco* è la più diffusa, specialmente lungo le coste laziali dove le biocostruzioni raggiungono notevoli estensioni e altezze di oltre 1 metro.

Non si conoscono dati di letteratura che riportano la presenza di questa morfologia di biocostruzione, che viene segnalata per la prima volta nella presente tesi in località Falconara.

Località (Regione)	Fonte
Morfologia a crosta	
Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria)	Delbono <i>et al.</i> (2003)
Marina di San Nicola (Lazio)	Ventura <i>et al.</i> (2020)
Portopalo di Capo Passero (Sicilia)	Sanfilippo <i>et al.</i> (2020)
Morfologia a cuscino	
Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria)	Delbono <i>et al.</i> (2003)
Tor Caldara, Torre Paola (Lazio)	La Porta e Nicoletti (2009)
Marina di San Nicola (Lazio)	Ventura <i>et al.</i> (2020)
Triscina, Eraclea Minoa, Donnalucata (Sicilia)	Schimmenti <i>et al.</i> (2016)
Foce del Simeto (Sicilia)	Sanfilippo <i>et al.</i> (2020)
Morfologia a banco	
Chiavari, Golfo del Tigullio, Lavagna (Liguria)	Delbono <i>et al.</i> (2003)
Tor Caldara, Lavinaio (Lazio)	Taramelli- Rivosecchi (1961)
Tor Caldara (Lazio)	Gravina <i>et al.</i> (2020)
Marina di San Nicola (Lazio)	Ventura <i>et al.</i> (2020)
Ostia Lido (Lazio)	Casoli <i>et al.</i> (2019)
Ostia Lido (Lazio)	Lisco <i>et al.</i> (2020)
Ostia Lido (Lazio)	Bonifazi <i>et al.</i> (2019)
Punta delle Quaglie (Lazio)	La Porta e Nicoletti (2009)
Pozzuoli (Campania)	Lo Bianco (1888)

Tab. 8 – Località in cui sono state segnalate le diverse morfologie di crescita e relativi riferimenti bibliografici.

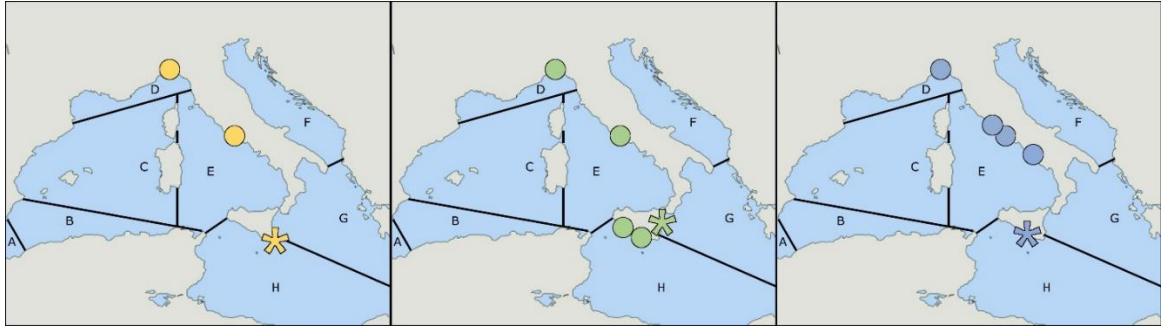


Fig. 44 – Distribuzione geografica delle tre morfologie di biocostruzioni riconosciute in letteratura (Sanfilippo *et al.*, 2020). Tipologia a *crosta* (punti gialli), a *cuscino* (punti verdi) e a *banco* (punti blu). Tipologie riscontrate nei siti di studi della tesi: a *crosta* (asterisco giallo), a *cuscino* (asterisco verde) e a *banco* (asterisco blu).

4.3. Distribuzione stratigrafica

Durante questi tre anni di dottorato è stata indagata l'effettiva presenza in Sicilia di reef fossili a *Sabellaria*. Le ricerche sul campo non hanno avuto risultato ed anche i pochi ritrovamenti segnalati da Barrier *et al.* (1989) negli iblei Sud orientali e nell'area di Augusta a Faro Santa Croce (Barrier, pers. com.) sono risultate appartenere ad altri policheti, in particolare ai serpulidi (Fig. 45).

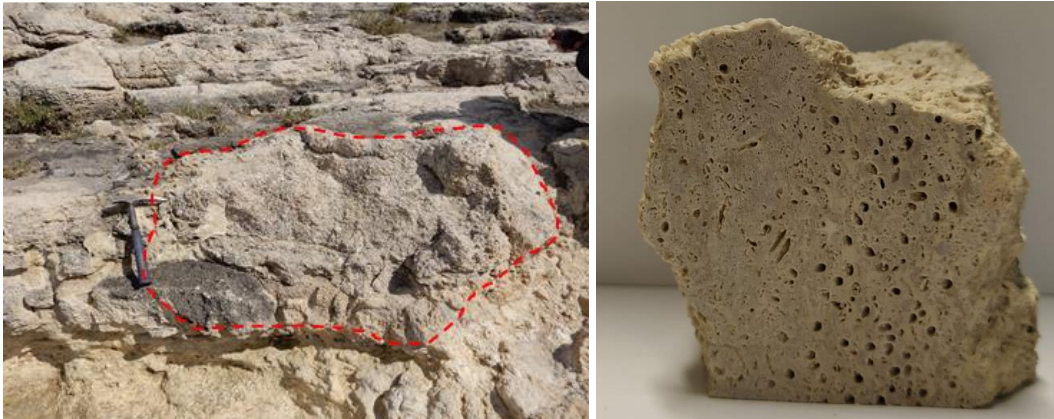


Fig. 45 – Affioramento di Faro Santa Croce e porzione di biocostruzione formata da tubi privi di sedimento agglutinato ma con pareti a struttura cristallina carbonatica tipica dei serpulidi.

Il mio progetto di dottorato ha previsto anche di studiare l'affioramento a “*Hermelles*” del Miocene superiore descritto per la Spagna sud orientale (San Miguel de Salinas), da Garcin e Vachard nel 1994 ma ciò non è stato possibile in seguito alle difficoltà operative legate al sopraggiunto lockdown dovuto all'emergenza COVID-19. Tuttavia, colloqui col Prof. Yves Gruet (Nantes, Francia), esperto di *Sabellaria alveolata*, hanno permesso di appurare che, anche in questo caso, l'affioramento fossile spagnolo non è attribuibile a biocostruzioni a *Sabellaria*.

4.4. Struttura e composizione dei tubi

I tubi aggregati a formare le biocostruzioni dei tre siti esaminati sono costituiti da sedimento agglutinato da piccolissime porzioni di biocemento secreto dall'animale (vedi paragrafo 4.8. Risultati). Dal punto di vista granulometrico il sedimento corrisponde a sabbie medie e grosse, eterogeneo per forma e composizione, con elementi litici (solitamente quarzo o feldspati) (Fig. 46) e/o organogeni (elementi biogenici come piccole conchiglie e frammenti di bivalvi e gasteropodi, spine di echinoidi, foraminiferi, ecc.) (Fig. 47). Gli elementi agglutinati, che il verme cattura direttamente dall'acqua circostante, riflettono la composizione dei sedimenti limitrofi alle biocostruzioni stesse essendo presi in carico da correnti e moto ondoso.

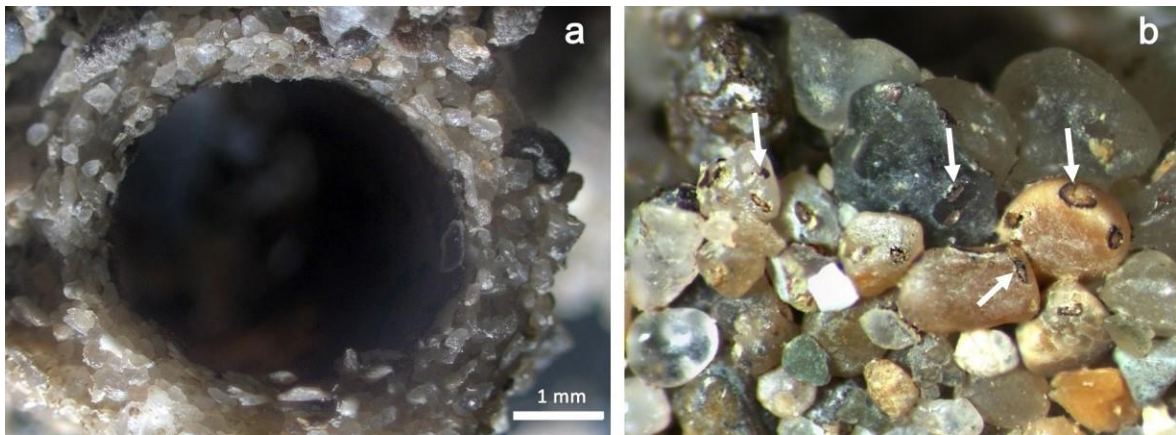


Fig. 46 – a) Apertura del tubo composta da elementi litici agglutinati. b) Particolare della parete del tubo con sedimento litico agglutinato. Sono visibili le porzioni di biocemento sui granuli (frecche bianche). Località: Simeto.

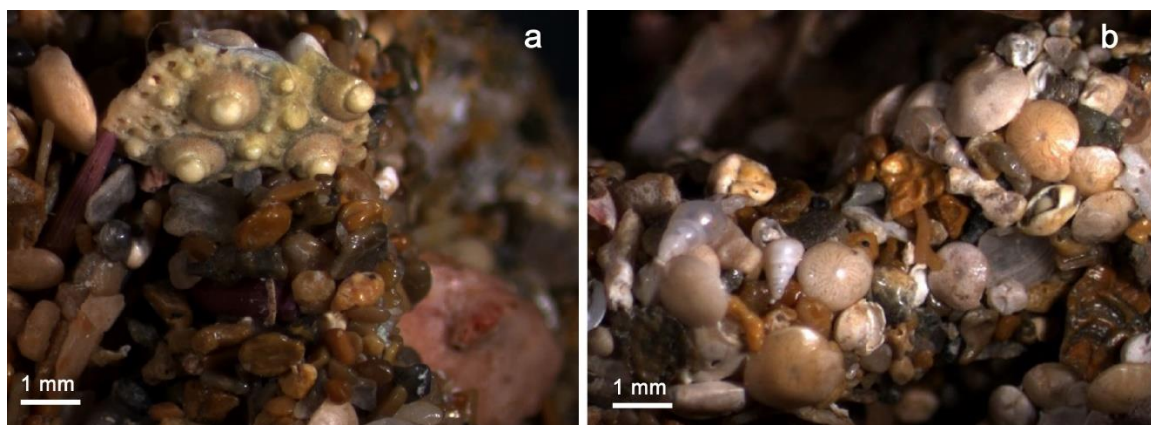


Fig. 47 – Elementi organogeni agglutinati esternamente al tubo. a) Piastra di echinoide *Paracentrotus lividus* (Lamarck, 1816) (in alto) e foraminifero *Miniacina miniacea* (Pallas, 1766) (rosato, in secondo piano in basso). b) Foraminiferi, appartenenti al genere *Elphidium*, piccoli gasteropodi e briozoi. Località: Portopalo.

Le dimensioni del tubo e del sedimento che lo costituisce sono proporzionali alla taglia degli individui che lo producono e in particolare alle dimensioni dell'organo costruttore, deputato al posizionamento e all'incollaggio dei granuli, che riesce a manipolare elementi di dimensione proporzionale alla sua grandezza. I tubi degli individui adulti sono lunghi in media 6-7 cm con un diametro esterno in media di circa 6 mm in prossimità dell'apertura e sezione da circolare (Fig. 48 a) a localmente sub-quadrangolare (Fig. 48 b) in corrispondenza di porzioni maggiormente esposte a correnti.

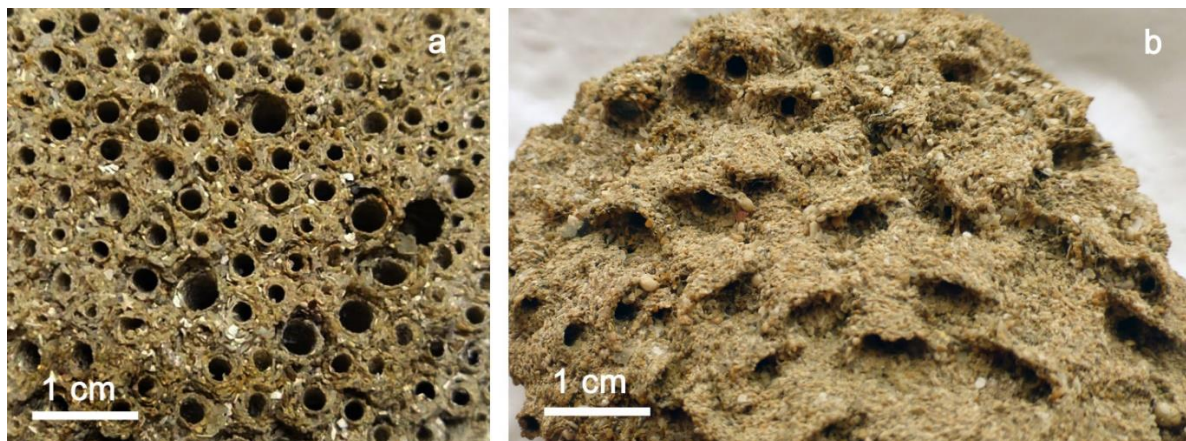


Fig. 48 – a) Tubi a sezione circolare provenienti da una porzione centrale della biocostruzione. b) Tubi leggermente appiattiti a sezione sub-quadrangolare sulla superficie esterna di una biocostruzione a *crosta*. Località: a) Falconara; b) Portopalo.

Il diametro del tubo aumenta lievemente con la crescita ed è massimo in corrispondenza dell'apertura. Lo spessore del tubo è anche questo massimo in corrispondenza dell'apertura e negli esemplari adulti è di circa 2 mm. Il lume interno del tubo ha un diametro all'apertura in media di 3 mm (Fig. 49). Questa mostra frequentemente un colletto svasato esterno, chiamato “collaretto aperturale” che si proietta anteriormente per qualche millimetro (Fig. 50 a). Esso può sporgere maggiormente sul lato dorsale formando un tetto (Fig. 50 b). Inoltre, lungo il margine interno del tubo, è presente un collaretto più piccolo.

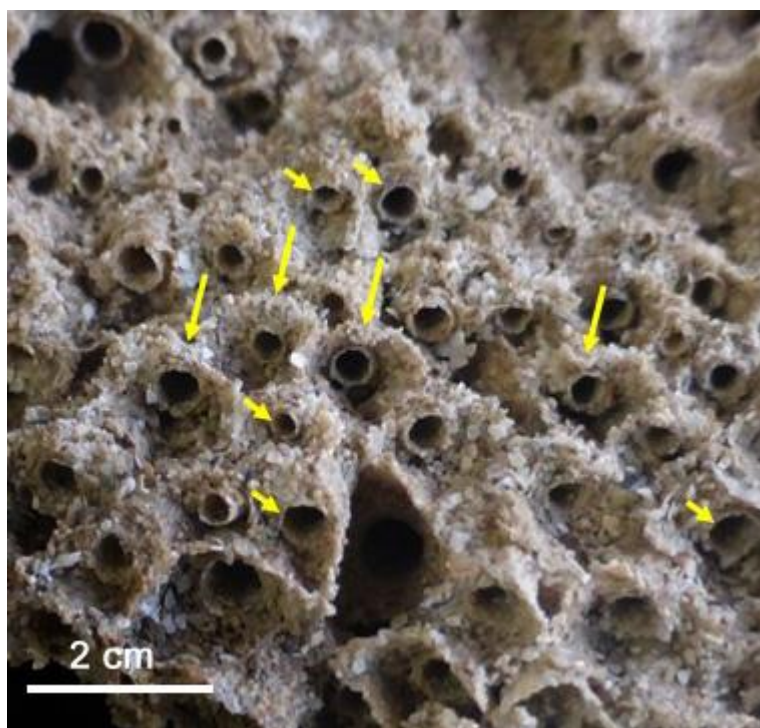


Fig. 49 – Dettaglio delle porzioni distali dei tubi che presentano i collaretti aperturali (freccie lunghe) e intorno al proprio lume, i collaretti interni (freccie corte).

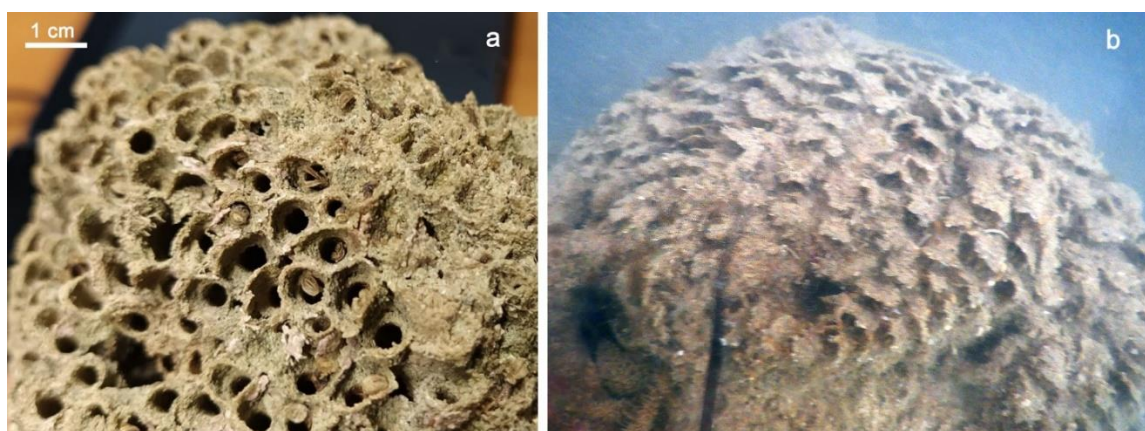


Fig. 50 – Collaretti aperturali: a) Simmetrici con individui di *S. alveolata* all'interno. b) Fortemente asimmetrici. Località: a) Simeto; b) Falconara.

Osservazioni allo stereomicroscopio e al SEM sui tubi delle biocostruzioni campionate nei tre siti studiati, hanno permesso di descrivere la struttura interna della loro parete. I risultati hanno evidenziato la presenza di tre strati (Fig. 51):

- Uno **strato interno** (Fig. 52), molto sottile, costituito da elementi appiattiti e di piccole dimensioni, disposti adiacenti tra loro in modo da formare una sorta di pavimento.

Raramente si riscontrano elementi tozzi, ma con una superficie appiattita che è rivolta verso il lume del tubo.

- Uno **strato intermedio** (Fig. 52), più spesso, con elementi di dimensioni variabili, principalmente con forme da poco spigolose ad arrotondate (quasi isodiametriche).
- Uno **strato esterno** (Figg. 52; 53), sottile e discontinuo, con elementi di maggiore granulometria scarsamente ordinati, molto eterogenei per forma (solitamente appiattiti), divergenti verso l'apertura, a formare una struttura embricata.

Una sottile pellicola organica secreta dal verme, spessa da 1 a pochi μm , riveste la parete interna del tubo (Fig. 54 a) generalmente formando uno strato uniforme. Raramente può essere più spessa e discontinua costituita da fasci di fibre (Fig. 54 b).

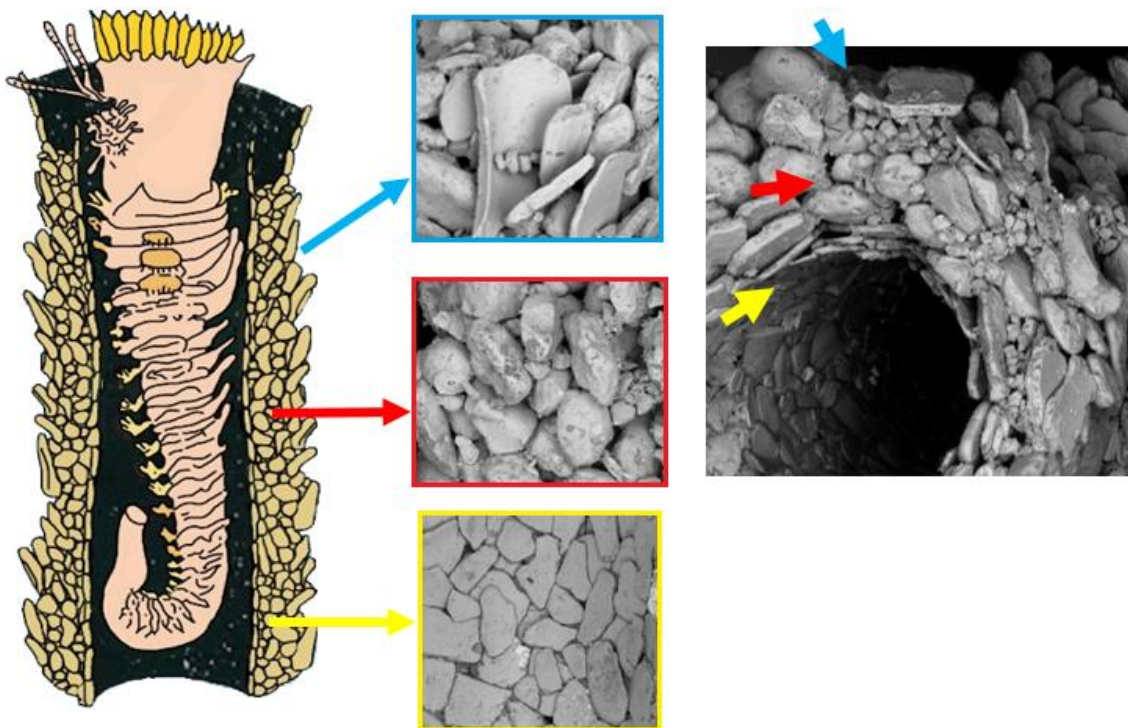


Fig. 51 – Ricostruzione grafica della struttura della biocostruzione: sezione longitudinale dei tubi con struttura interna della parete: strato interno (freccia gialla); strato intermedio (freccia rossa), strato esterno (freccia blu) (da Sanfilippo *et al.*, 2019, modificato).

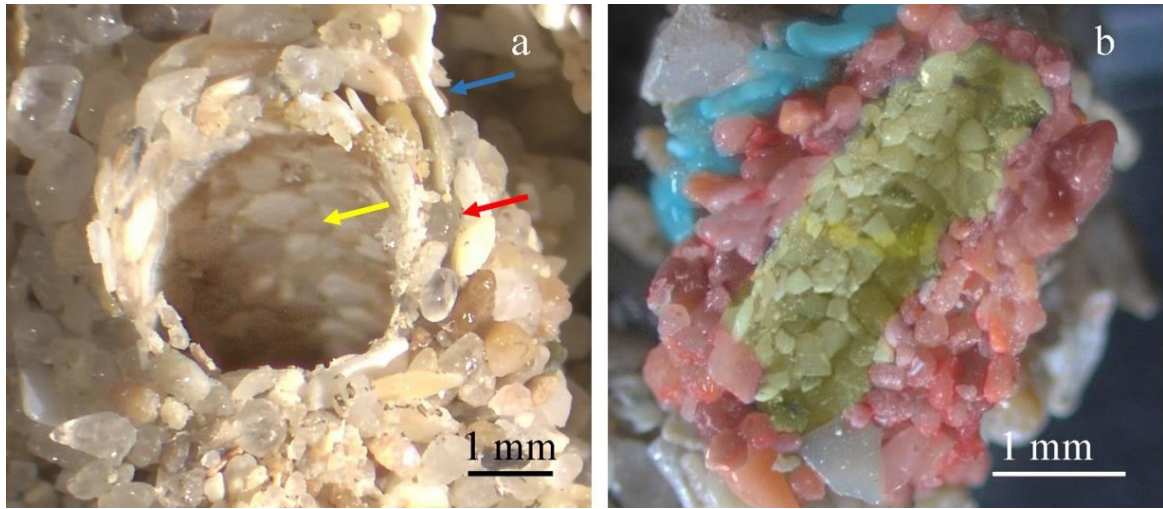


Fig. 52 – a) Tratto anteriore del tubo. b) Sezione longitudinale con i tre strati costituenti la parete: strato interno (giallo), strato intermedio (rosso) ed esterno (azzurro). Località: Portopalo.



Fig. 53 – Superficie esterna di un tubo con elementi dello strato esterno discontinuo tra cui: a) bivalvi interi; b) frammenti di guscio. Località: Falconara.

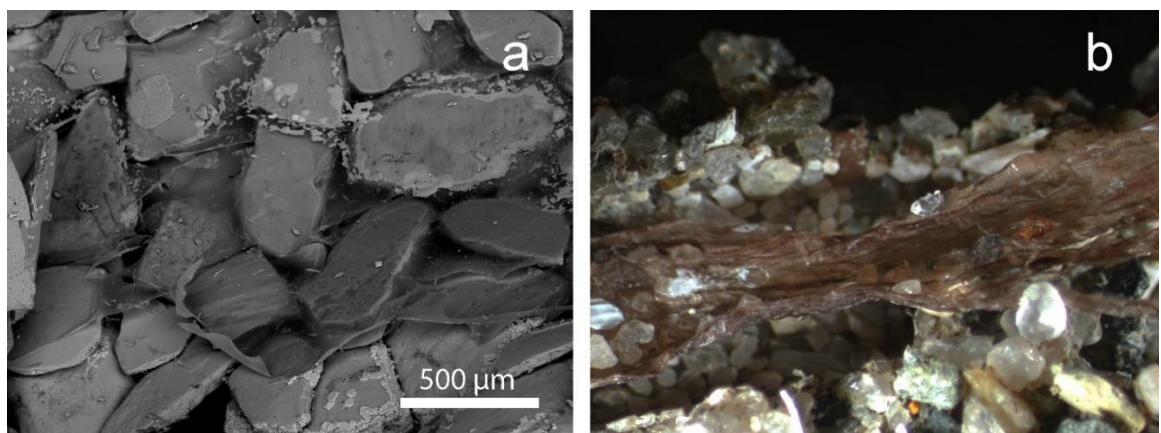


Fig. 54 – a) Strato interno di natura organica costituito da una sottile pellicola che riveste la parete interna del tubo o b) da una pellicola più spessa discontinua formata da fasci di fibre. Località: a) Falconara; b) Simeto.

Osservazioni su tubi di differenti età hanno permesso di ricostruire il modello di accrescimento del tubo che avviene secondo la seguente modalità:

- inizialmente si forma lo strato interno che si mantiene dello stesso spessore durante la crescita;
- successivamente si forma lo strato mediano, il più spesso, che aumenta il proprio spessore con la crescita;
- negli individui adulti e maturi compare lo strato esterno, che si mantiene di spessore invariato.

Le osservazioni relative alle singole località studiate sono di seguito riportate (Tab. 9):

Portopalo: I tubi hanno una sezione esterna ellittica o sub-quadrata. Il diametro esterno all'apertura è compreso tra 2,5 e 6 mm, quello interno tra 1 e 3 mm. La parete del tubo è spessa da 1,5 a 3 mm.

Nello strato interno gli elementi sono di forma laminare con dimensioni comprese tra 0,1 mm e 0,7 mm; lo strato intermedio con elementi isodiametrici, di dimensioni compresi tra 0,2 mm e 0,8 mm; lo strato esterno con elementi appiattiti di dimensioni comprese tra 0,4 mm e 2,4 mm.

Ogni tubo termina con un collaretto aperturale asimmetrico, molto sporgente sul lato dorsale. Le particelle sabbiose agglutinate sono costituite principalmente da clasti carbonatici e subordinati grani litici (quarzo e feldspati).

Gli elementi litici prevalgono nello strato intermedio mentre in quello interno e in quello esterno prevalgono gli elementi di natura organogena. In particolare, nello strato esterno sono stati riconosciuti piccoli gusci di invertebrati marini come gusci di foraminiferi appartenenti ai generi *Elphidium* e *Miniacina*, conchiglie di gasteropodi giovanili (*Turritella* e altre specie) e frammenti di bivalvi, aculei e piastre di echinoidi (gen. *Paracentrotus*) e porzioni di carapace di granchi (Fig. 47).

Simeto: I tubi hanno una sezione esterna circolare o ellittica. Il diametro esterno all'apertura è compreso tra 2,5 e 9 mm, quello interno tra 0,5 e 6 mm. La parete del tubo è spessa da 2 a 3 mm. Nello strato interno gli elementi sono di forma laminare o tozza (con almeno una parte della superficie appiattita) con dimensioni comprese tra 0,25 mm e 0,5 mm; lo strato

intermedio con elementi isodiametrici, di dimensioni compresi tra 0,25 mm e 0,9 mm; lo strato esterno con elementi di varia forma di dimensioni comprese tra 0,4 mm e 1 mm.

Ogni tubo termina con un collaretto aperturale simmetrico, in alcuni casi allungato dorsalmente.

Le particelle sabbiose agglutinate sono costituite principalmente da grani litici con una maggiore dominanza di elementi vulcanici e pochi clasti carbonatici.

Gli elementi litici prevalgono in tutti e tre gli strati. Il sedimento organogeno è costituito da piccoli gusci di invertebrati (foraminiferi, ostracodi, bivalvi, gasteropodi) e bioclasti originati dalla loro frammentazione.

Falconara: I tubi hanno una sezione esterna circolare. Il diametro esterno all'apertura è compreso tra 2 e 5 mm, quello interno tra 1 e 3 mm. La parete del tubo è spessa da 1 e 2 mm. Nello strato interno gli elementi sono di forma laminare con dimensioni comprese tra 0,2 mm e 0,6 mm; lo strato intermedio con elementi isodiametrici, di dimensioni comprese tra 0,2 mm e 0,9 mm; lo strato esterno con elementi principalmente appiattiti, di dimensioni compresi tra 0,4 mm e 3,2 mm.

Le particelle sabbiose agglutinate sono costituite principalmente da grani litici (quarzo e feldspati) e subordinati clasti carbonatici. Gli elementi litici prevalgono nello strato intermedio ed esterno mentre in quello interno prevalgono gli elementi di natura organogeni. Nello strato esterno sono stati riconosciuti valve di bivalvi intere o frammenti (Fig. 53).

	diámetro esterno	diámetro interno	spessore parete	composizione elementi
Portopalo	2,5-6	1-3	1,5-3	organogena
Simeto	2,5-9	0,5-6	2-3	litica
Falconara	2-5	1-3	1-2	organogena/ litica

Tab. 9 – Caratteri dimensionali (in millimetri) e composizione dei tubi.

I tubi esaminati presentano diametro esterno con valori massimi da 5 a 9 mm e diametro interno con valori massimi da 3 a 6 mm. Nei tubi del Simeto si sono registrati i valori dimensionali maggiori. Lo strato interno si mantiene di spessore costante; lo strato intermedio si accresce di spessore nei tubi più grandi; lo strato esterno si mantiene costante

nella crescita anche se, nel caso del Simeto è discontinuo e localmente assente. Lo spessore della parete è quindi proporzionale alla dimensione dei tubi di tutti e tre i siti.

La composizione degli elementi è mista con percentuali differenti nei tre siti: al Simeto prevalgono nettamente, con oltre l'80%, gli elementi litici; a Falconara la quantità di elementi litici (55%) è quasi equivalente a quella degli organogeni (45%); a Portopalo prevalgono gli elementi organogeni con il 70%.

Lo strato interno della parete dei tubi presenta principalmente elementi del sedimento piatti nei siti di Falconara e Portopalo mentre nel sito del Simeto sono presenti anche elementi tozzi e isodiametrici. Tuttavia, questi mostrano comunque un lato dalla superficie appiattita che il polichete dispone rivolta verso il lume del tubo (Fig. 55).

Lo strato intermedio risulta in tutti e tre i siti costituito da elementi isodiametrici di varie dimensioni.

Lo strato esterno è spesso discontinuo e costituito sia da elementi piatti che isodiametrici.

Il diametro massimo degli elementi varia da 0,5 a 0,6 mm nello strato interno, da 0,8 a 0,9 mm nello strato intermedio e da 1 a 3,2 mm nello strato esterno. Nello strato esterno dei tubi di Falconara son stati riconosciuti gli elementi di dimensioni maggiori come conchiglie e grossi frammenti organogeni.

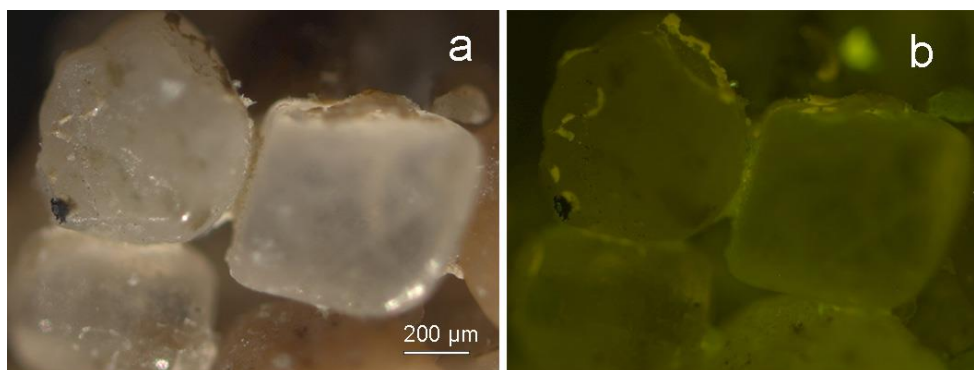


Fig. 55 – a) Elementi tozzi dello strato interno incollati in modo da esporre la superficie piatta verso il lume interno del tubo. b) Biocemento evidenziato dalla epifluorescenza. Località: Simeto.

4.5. Modello di crescita e morfologie delle biocostruzioni

Osservazioni sul campo hanno permesso di ricostruire il **modello di crescita** delle biocostruzioni a *Sabellaria*. Sono state distinte quattro fasi successive che testimoniano progressivi stadi di sviluppo nel tempo:

- Fase iniziale: La colonizzazione iniziale dei primi tubi di *Sabellaria*, avviene su substrati duri come roccia affiorante o blocchi rocciosi del fondale. I tubi sono isolati tra loro e incrostano il substrato per tutta la loro lunghezza crescendo con andamento sinuoso (Fig. 56 a).
- Fase intermedia: Si aggiungono nuovi esemplari a formare una sottile crosta continua che ricopre completamente il substrato. Questa è formata da aggregati di tubi affiancati tra loro e localmente sovrapposti in maniera caotica (Fig. 56 b).
- Fase matura: I tubi tendono a sollevarsi dalla roccia incrostata per crescere adiacenti e subparalleli tra loro in una struttura più ordinata. I tubi hanno tutti sviluppo perpendicolare al substrato (struttura a canna d'organo"), o più raramente obliquo (Fig. 56 c).
- Fase senescente: Gli individui sono morti e le biocostruzioni appaiono erose e con superficie irregolare e cariata, con tubi distalmente non integri e privi di margine aperturale. Frammenti di aggregati si disperdono intorno le biocostruzioni (Fig. 56 d).

In condizioni sfavorevoli alla formazione delle biocostruzioni, dove il sedimento in sospensione è scarso (ai margini dell'areale di crescita) non si arriva alla fase matura della biocostruzione e i tubi permangono nella fase iniziale o nella fase intermedia.

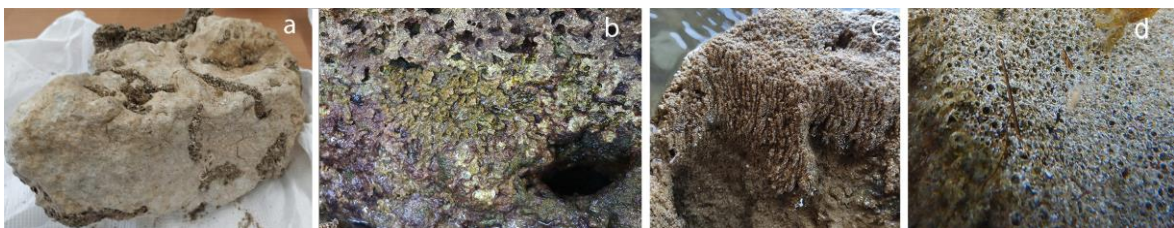


Fig. 56 – Fasi di sviluppo delle biocostruzioni a *Sabellaria alveolata*. a) Fase iniziale: prima colonizzazione da parte di individui isolati su blocco carbonatico del fondale di Portopalo. b) Fase intermedia: aggregato di tubi che ricoprono completamente una porzione di parte rocciosa dello scoglio di Falconara. c) Fase matura: aggregato con struttura ordinata formata da numerosi tubi adiacenti e paralleli tra loro (a “canna d’organo”) con sviluppo perpendicolare rispetto al substrato. d) Fase senescente: aggregato con superficie abrasa e cariata, numerosi tubi vuoti e non integri.

La fase matura corrispondente allo sviluppo completo della biocostruzione, in base alle condizioni ambientali, può portare a tre differenti **morfologie**, riscontrate nei tre siti campionati: 1) morfologia a *crosta* (o *veneer*), 2) morfologia a *cuscino/fungo* e 3) morfologia a *banco* (Fig. 57):

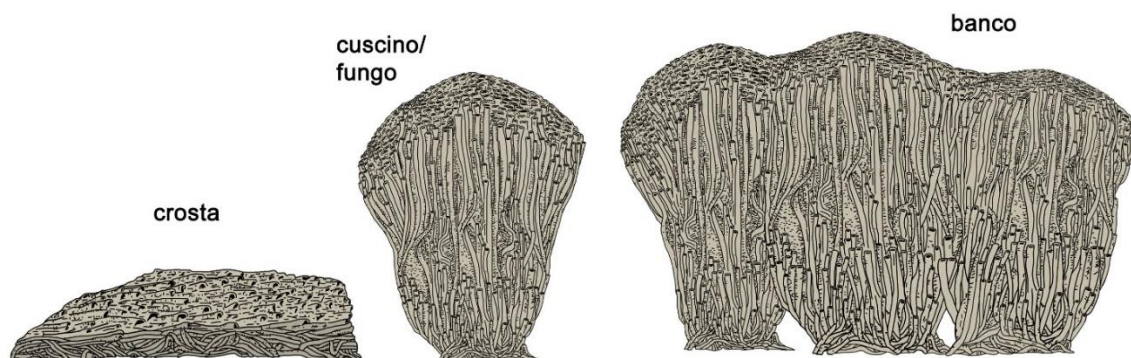


Fig. 57 – Modelli schematici delle tre morfologie delle biocostruzioni a *S. alveolata*.

1) Morfologia a crosta (Fig. 57)

Aggregati di tubi formanti strutture a *crosta* dello spessore di 10-20 cm. I tubi inizialmente incrostano il substrato in maniera irregolare (fase intermedia), per poi accrescersi dritti e subparalleli tra di loro formando un angolo molto acuto essendo con la parte distale prostrata e le aperture isorientate. In superficie i tubi isorientati determinano la tipica struttura a “nido d’ape”. In sezione i tubi hanno alla base un andamento caotico, più in alto sono prostrati quasi subparalleli al substrato.

L’esempio di Portopalo di Capo Passero

Nell’area di studio le biocostruzioni a *crosta* crescono su fondali rocciosi, in prossimità di un litorale sabbioso, da circa 0,30 a 1 m di profondità, a circa 1 m di distanza dalla linea di costa fino a 7 m al largo. Le *croste* sul fondale sono isolate e localmente coalescenti, formando, nell’insieme, un tappeto discontinuo di forma irregolare (a “mosaico”). Le *croste* hanno uno spessore da 5 a 20 cm e larghezza fino a 60 cm. Frammista alla biocostruzione è associata una ricca comunità algale che, con le sue chiome, ne nasconde in parte la presenza (Fig. 58 a).

I tubi hanno le aperture isorientate rivolte verso la linea di riva. Hanno una sezione trasversale da circolare a sub-quadrangolare e sono lunghi fino a 7 cm con una larghezza del lume di circa 2 mm e un diametro esterno fino a 6 mm all’apertura. Ogni tubo termina con

un orlo asimmetrico, di solito molto sporgente sul lato dorsale appiattito, formando una sorta di tetto sopra l'apertura (Fig. 58 b).

Grazie alla composizione sabbiosa di tali *croste*, queste sono facilmente confondibili con la copertura di sedimento detritico del fondale, ma se ne distinguono per la presenza delle aperture che formano il caratteristico aspetto a “nido d'ape” sulla superficie.



Fig. 58 – a) *Croste* di *S. alveolata* sul fondale intensamente colonizzato anche da alghe verdi e brune. Le aperture dei tubi sono rivolte verso la riva. b) Dettaglio della superficie esterna della biocostruzione a *crosta* con tubi prostrati e appiattiti dorsalmente formanti il tipico disegno regolare detto “a nido d’ape”.

2) Morfologia a cuscino o a fungo (Fig. 57)

Aggregati di tubi formanti strutture a *cuscino* o a *fungo* alte fino a 50 cm. I tubi inizialmente incrostano il substrato in maniera irregolare (fase intermedia), per poi accrescersi dritti e subparalleli tra di loro creando una tipica struttura a “canne d’organo”.

In superficie i tubi isorientati determinano la tipica struttura a “nido d’ape”. In sezione i tubi hanno alla base un andamento caotico, per poi continuare subparalleli e perpendicolari rispetto al substrato. I tubi si biforcano per scissiparità verso l’alto con la crescita ed altri di nuova generazione sono affiancati lateralmente ad una certa altezza. Sono osservabili diverse generazioni di crescita, identificabili da una linea di discontinuità tra una generazione e la successiva.

Tra un tubo e l’altro è possibile trovare piccole aree (area di intertubo) occupate da sedimento incoerente scarsamente cementato.

L’esempio della Foce del Simeto

Nell’area di studio le biocostruzioni a *cuscino* crescono su fondali sabbioso-fangosi, lungo il cordolo di sedimento che collega la riva all’isolotto (Fig. 59 a), da circa 0,80 a 1 m

di profondità, a circa 45 m di distanza dalla linea di costa fino all'isolotto stesso (60-70 m al largo), dove si sviluppano sul lato ovest, rivolto verso la costa.

Le biocostruzioni sono isolate, distanti 1-2 m tra loro, per poi infittirsi e diventare localmente coalescenti più in prossimità dell'isolotto. Sono alte da 30 a 50 cm, con diametro alla base di circa 30 cm.

I tubi si allargano leggermente durante la crescita. Hanno una sezione trasversale circolare o ellittica e sono lunghi fino a 9 cm con una larghezza del lume in media di 4 mm e un diametro esterno fino a 9 mm all'apertura. Ogni tubo termina con un orlo circolare o leggermente asimmetrico.

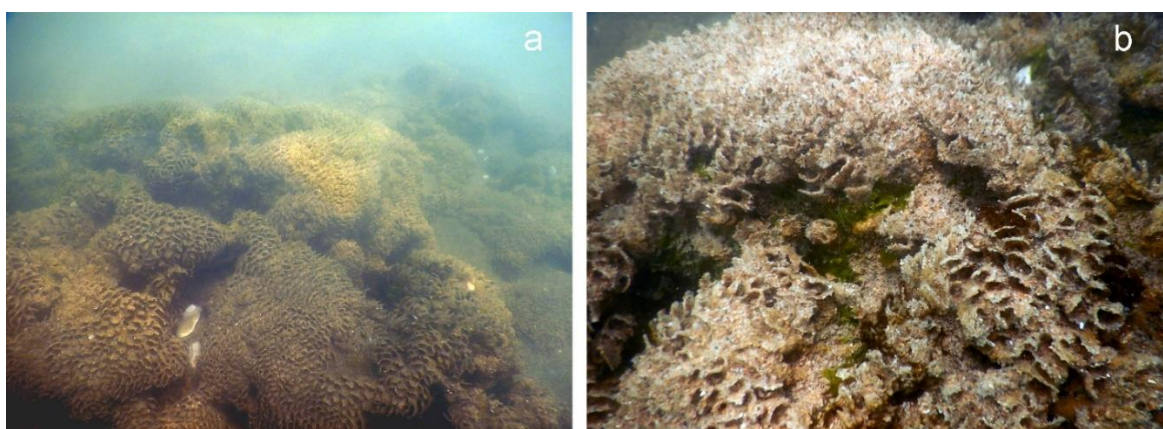


Fig. 59 – a) *Cuscini* coalescenti sul fondale sabbioso antistante l'isolotto. b) Particolare della superficie esterna con aperture dei tubi localmente degradate e ricoperte da fango e sabbia.

Intorno alle biocostruzioni in crescita si osservano frammenti decimetrici sparsi sul fondale.

Sono poche le biocostruzioni con individui vivi e in crescita; più frequentemente queste hanno un aspetto degradato (Fig. 59 b) con aperture rotte e numerosi epifaunali come gli incrostanti serpulidi, briozoi e ostreidi (Fig. 60 a) oltre a numerosi mitili (Fig. 60 b). La porzione sommitale delle biocostruzioni è molto colonizzata dall'alga verde *Ulva lactuca* (Fig. 61 a) e localmente ricoperta da tasche di fango. Attorno all'isolotto, invece, i *cuscini* sono in crescita e privi di sedimento, con individui mostrandoti le aperture integre (Fig. 61 b).

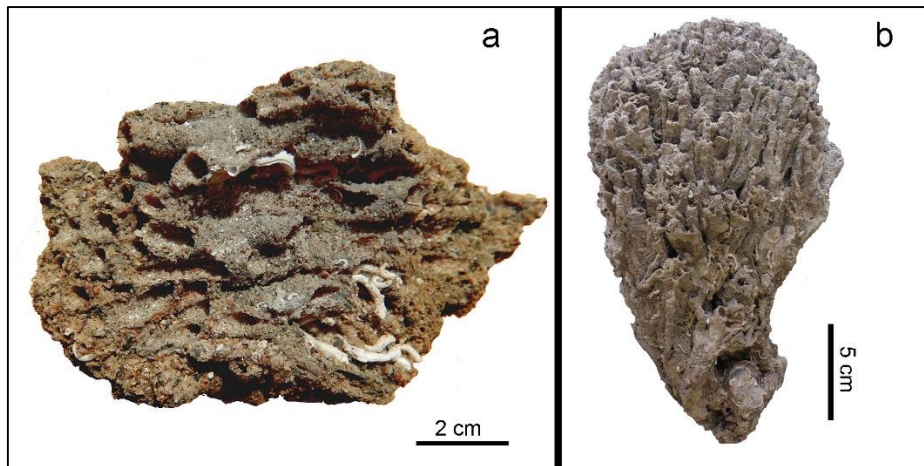


Fig. 60 –a) Piccolo frammento presente sul fondale con tubi rotti e incrostazioni di serpulidi e briozoi. b) Biocostruzione a *fungo* con porzione superiore in crescita. Sulla base, costituita da tubi vuoti, si osserva la colonizzazione da parte di bivalvi mitilidi.

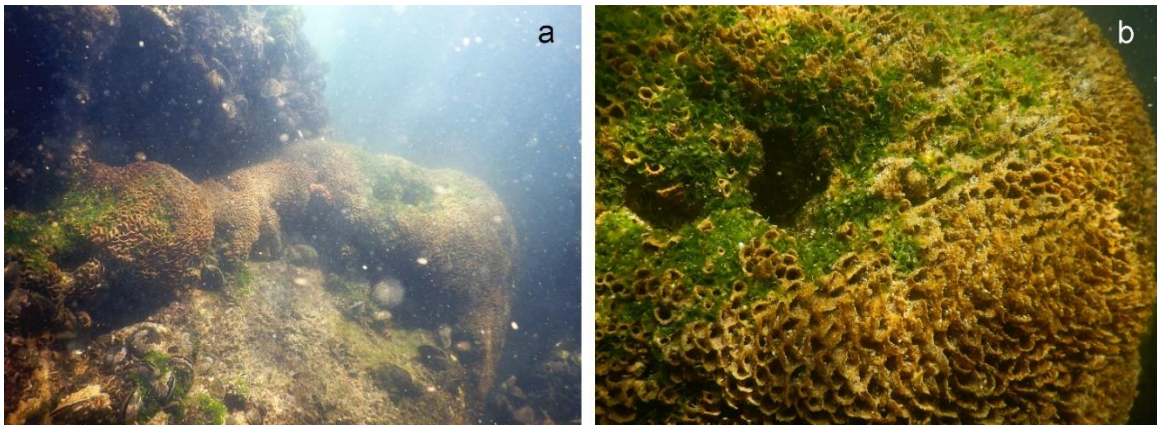


Fig. 61 – a) *Cuscini* coalescenti sui massi artificiali addossati all'isolotto. b) Particolare della superficie esterna della biocostruzione con aperture dei tubi adiacenti e localmente colonizzata da alghe verdi.

3) Morfologia a banco (Fig. 57)

Aggregati di tubi formanti strutture a *banco* alte fino a 1 m. I tubi inizialmente incrostano il substrato in maniera irregolare (fase intermedia), per poi accrescersi dritti e subparalleli tra di loro creando una tipica struttura a “canne d’organo”.

In superficie i tubi isorientati determinano la tipica struttura a “nido d’ape”. Tra un tubo e l’altro è possibile trovare piccole aree (area di intertubo) occupate da sedimento incoerente scarsamente cementato. In sezione i tubi hanno alla base un andamento caotico, per poi continuare subparalleli e perpendicolari rispetto al substrato. Sono osservabili diverse

generazioni di crescita, identificabili da una linea di discontinuità tra una generazione e la successiva.

La coalescenza dei *cuscini* determina una tipica morfologia della superficie esterna (*brain-like*), con depressioni subcircolari irregolarmente distribuite. Questo aspetto è già stato descritto da Schimmenti *et al.* nel 2016 per l'area di Triscina ed Eraclea Minoa.

L'esempio di Falconara

Nell'area di studio le biocostruzioni a *banco* crescono su fondali sabbioso-fangosi all'interno di una galleria naturale che da 0,60 a 0,90 m di profondità attraversa un grosso masso distante 4 m dalla linea di costa.

La biocostruzione costituita da un'unica struttura a *banco* occupante quasi completamente lo spazio all'interno della galleria (Fig. 62 a) e da grandi *cuscini* coalescenti al di fuori a pochi metri di distanza.

Il *banco* è alto da 60 a 90 cm ed è composto da *cuscini* coalescenti con un diametro alla base di 80-100 cm.

I tubi sono strettamente adiacenti (Fig. 62 b) e solo raramente sono separati da aree di intertubo poco ampie. Hanno una sezione trasversale circolare e sono lunghi fino a 7 cm con un diametro del lume di circa 2 mm e un diametro esterno fino a 5 mm all'apertura. Ogni tubo termina con un orlo generalmente circolare, raramente asimmetrico.

Il *banco* ha, nel suo complesso, un aspetto integro, con tubi completi e individui in crescita nella parte sommitale (Fig. 63) e solo localmente presenta parti erose e tane utilizzate da pesci e granchi come rifugio (Fig. 64 a), in particolare nella porzione basale, dove alcune porzioni sono abrase e distrutte (Fig. 64 b).



Fig. 62 – a) Superficie distale del *banco* con struttura a “nido d’ape” dei tubi aggregati. b) Dettaglio della porzione sommitale della biocostruzione con aperture circolari e integre.



Fig. 63 – Visione laterale della superficie distale del *banco*: La porzione sommitale di più recente sviluppo emerge in condizioni di bassa marea.

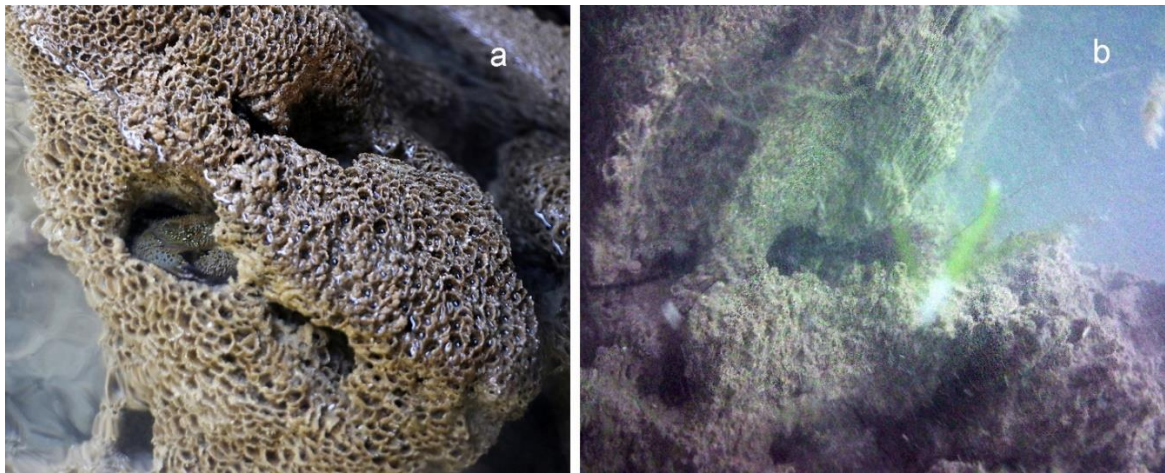


Fig. 64 – a) Granchio all'interno di una tana scavata nella biocostruzione. b) Parte basale sommersa della biocostruzione a *banco* in acque leggermente torbide, con porzioni rotte, tubi localmente abrasi e colonizzati da alghe.

4.6. Evoluzione spazio-temporale delle biocostruzioni

I rilievi subacquei hanno permesso di riconoscere un'elevata variazione delle estensioni e delle dimensioni delle biocostruzioni sui fondali, confermando i dati di letteratura: si tratta di strutture effimere altamente dinamiche e strettamente dipendenti da fattori edafici e idrodinamici.

Le osservazioni svolte nell'arco dei tre anni di monitoraggio sono di seguito riportate per ciascuno dei tre siti di studio:

Portopalo (Fig. 72)

Primo rilievo (2020): Le biocostruzioni a *Sabellaria* coprono una stretta area rocciosa subparallela alla costa di circa 140 m² lunga circa 20 metri, che cresce su superfici coperte da una fitta vegetazione algale (Fig. 65 a). Le croste formano un tappeto di forma irregolare e discontinua con spessori di 5-20 cm e larghezze fino a 60 cm. Nelle porzioni riparate dalle fronde di *Ericaria giacconei*, i tubi di *S. alveolata* mostrano aperture integre con collaretti intatti e bordi ben sviluppati (Fig. 65 b). Al contrario, in porzioni di biocostruzione esposte all'idrodinamismo, non protetti dai talli di *Ericaria*, le croste sono abrase superiormente e i tubi sono incompleti del loro tratto più distale (Fig. 66).



Fig. 65 – a) Fondale con croste di *Sabellaria* delimitate e ricoperte da una fitta comunità algale. b) Talli di *Ericaria giacconei* circondati da *S. alveolata*. La porzione sommitale della crosta è in crescita con aperture integre e collaretti ben sviluppati.



Fig. 66 – Porzioni di *crosta* non riparate dalle fronde algali con tubi incompleti e aperture prive di collaretti.

Secondo rilievo (2020): Le biocostruzioni a *Sabellaria* coprono una stretta area rocciosa subparallela alla costa che si riduce a circa 100 m² lunga circa 14 metri, dove ancora è presente una fitta vegetazione algale mentre il suo limite inferiore verso il largo è sempre a circa 7 m. Nella parte centrale dell'areale le *croste* sono integre e raggiungono dimensioni di circa 50 x 50 cm parzialmente coperte da *Caulerpa* sp.pl. che agevola la sedimentazione e le protegge (Fig. 67 a). Nel settore occidentale si sviluppa con *croste* meno continue. Marginalmente le *croste* mostrano porzioni rotte, e sono generalmente più piccole e frammentate. Ciò è dovuta all'impatto antropico in seguito all'intenso calpestio dei bagnanti (*trampling*) soprattutto durante la stagione estiva (Fig. 67 b).

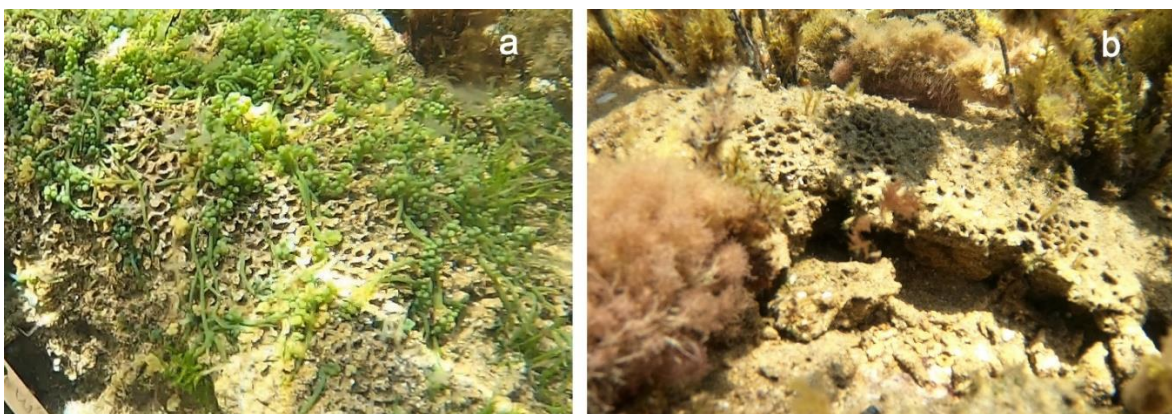


Fig. 67 – a) *Crosta* coperta da una fitta rete di stoloni di *Caulerpa*. b) Biocostruzione parzialmente distrutta per evidente *trampling*.

Terzo rilievo (2021): Le biocostruzioni a *Sabellaria* si sono ridotte ulteriormente coprendo una stretta area rocciosa subparallela alla costa di circa 40 m² lunga circa 8 metri, ancora coperta da una fitta vegetazione algale. Le *croste* si sono ridotte anche verso il largo non spingendosi oltre i 6 m. Perdurano le biocostruzioni più grandi presenti nella porzione più centrale ma queste mostrano superfici abrase con tubi vuoti (Fig. 68 a), privi della parte distale e del tratto aperturale (Fig. 68 b). Ciò sarebbe in parte dovuto a ripetuti urti meccanici in seguito ai forti eventi meteomarinari invernali. Frequentemente i tubi sono colonizzati da altri organismi animali (nemertini, policheti erranti, crostacei) e vegetali (alghe verdi) (Fig. 69).

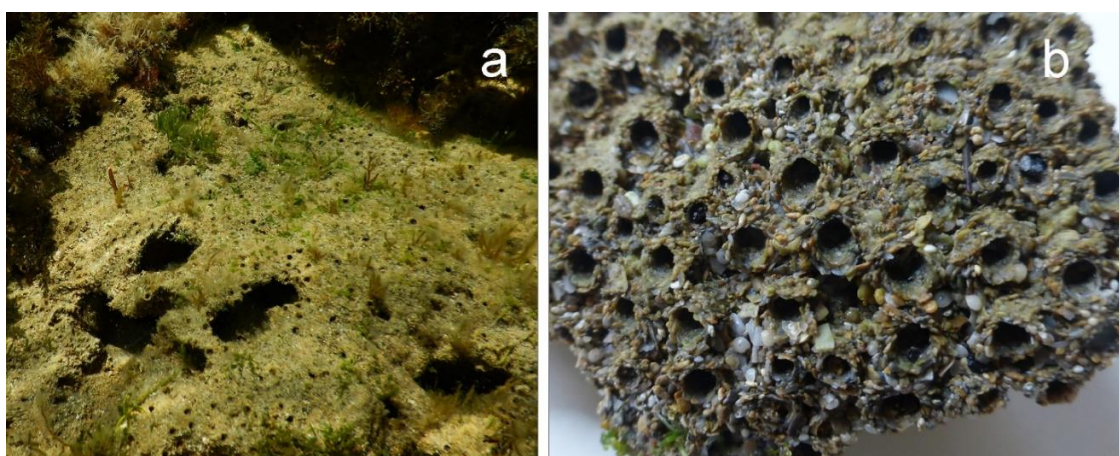


Fig. 68 – a) *Croste* rotte e abrase. b) Dettaglio della porzione sommitale con tubi rotti privi di collaretti aperturali.



Fig. 69 – Colonizzazione iniziale di *Caulerpa* con stoloni all'interno di un tubo vuoto.

Quarto rilievo (2022): le *croste* dei precedenti rilievi sono del tutto scomparse e il fondale roccioso è completamente insabbiato (Fig. 70 a). Sotto il manto algale è stata trovata solo un'incrostazione ormai distrutta e quasi totalmente abrasa di pochi cm di larghezza (Fig. 70 b). Più ad est, in un cordolo roccioso perpendicolare alla linea di costa, sommerso a 0,50 m di profondità di fronte alla stradina di ingresso alla spiaggia, a 2 metri di distanza dalla riva, una *crosta* continua di nuova formazione dallo spessore di 10-15 cm, si estende per circa 2 metri di lunghezza con tubi completi e collaretti asimmetrici ben sviluppati (Fig. 71). Questa biocostruzione si trova molto vicina al fondale sabbioso e quindi è molto soggetta, anche durante la stessa giornata, ad essere insabbiata completamente.

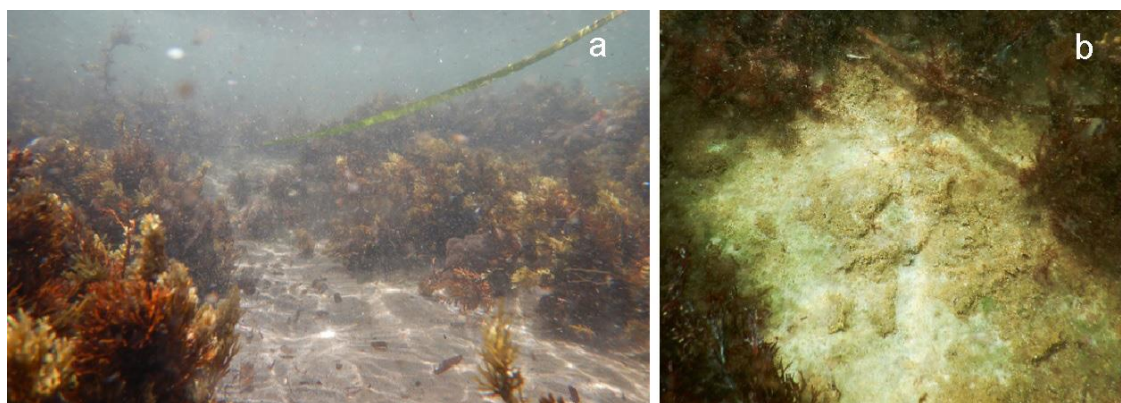


Fig. 70 – a) Copertura sabbiosa sul fondale roccioso. b) Localmente, il substrato roccioso mostra piccoli resti delle biocostruzioni a *crosta*, con tubi abrasati e quasi totalmente distrutti.



Fig. 71 – *Crosta* di nuova formazione su un cordolo roccioso perpendicolare alla linea di costa del nuovo areale limitrofo.

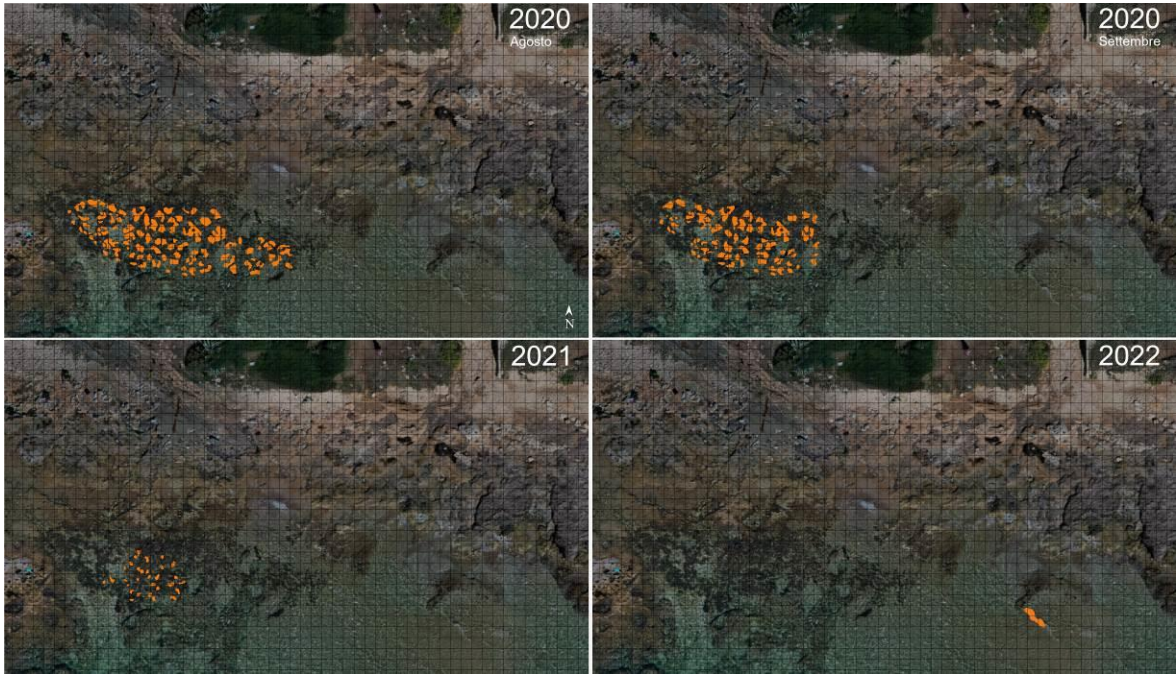


Fig. 72 – Mappa digitale riportante l’evoluzione delle estensioni delle biocostruzioni a *S. alveolata* nel 2020 (1° e 2° rilievo), 2021 (3° rilievo) e 2022 (4° rilievo) a Portopalo. Ogni quadrato corrisponde a 1 m² dell’area reale.

Simeto (Fig. 78)

Primo rilievo (2020): le biocostruzioni si concentrano principalmente su due aree distanti circa 40 m, una più a nord e l’altra lungo il cordolo di sabbia sommerso che collega la costa all’isolotto (Fig. 73).

Nel settore a nord, circa 70-80 m al largo, a 2 m di profondità sono presenti piccoli *cuscini* con diametro alla base di 30-40 cm e altezza di 30 cm e gruppi di *cuscini* coalescenti (1x2 m) alti 40-50 cm e distanti alcuni metri tra di loro (Fig. 74 a). Questi presentano un aspetto molto degradato e parti distrutte con numerosi frammenti sparsi sul fondale intorno. Alcuni di essi sono stati rinvenuti spiaggiati e presentano molte incrostazioni di altri organismi (serpulidi, briozoi e ostreidi) e assenza di individui di *Sabellaria* vivi (Fig. 75).

Nel settore lungo il cordolo di sabbia che collega la costa all’isolotto, a circa 45 m dalla linea di costa a 0,50-0,80 m di profondità si sviluppano piccoli *cuscini* isolati alti 30-40 cm distanti 1-2 m tra loro. Questi mostrano poche porzioni centrali con tubi completi e individui in crescita (Fig. 74 b) mentre le zone periferiche sono spesso infangate, prive di individui vivi di *Sabellaria* e colonizzate da alghe verdi. Al contrario, sui blocchi frangiflutti intorno all’isolotto crescono altre biocostruzioni che formano *cuscini*

coalescenti alti 50 cm con tubi integri, collaretti ben sviluppati e con individui vivi di *Sabellaria* (Fig. 76).



Fig. 73 – Isolotto antistante la costa intorno al quale cresce la biocostruzione a *S. alveolata*.

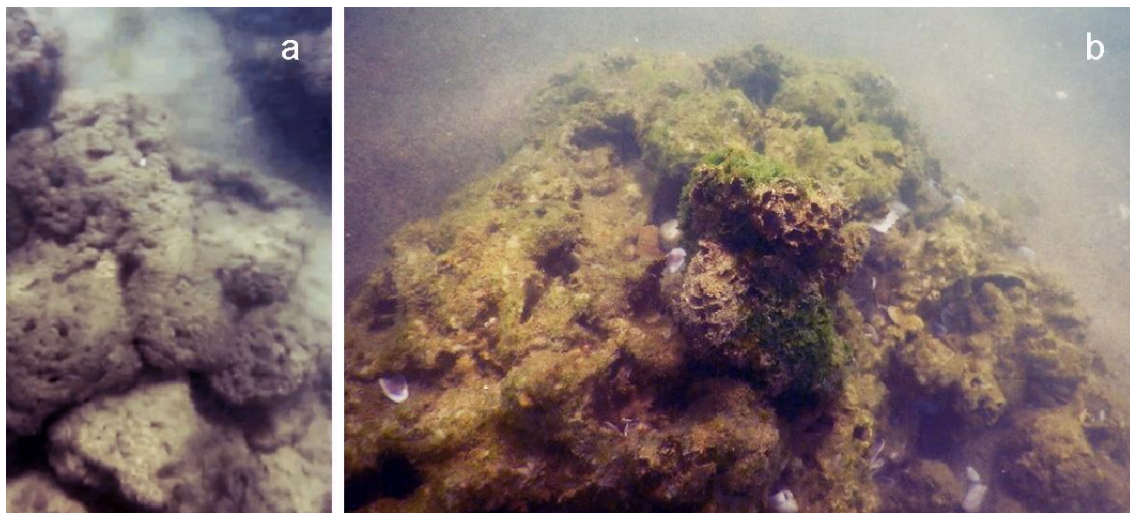


Fig. 74 – a) *Cuscini* coalescenti nell'area a nord, a circa 2 metri di profondità. b) *Cuscini* degradati con piccole porzioni in crescita nell'area del cordolo sabbioso.



Fig. 75 – Frammenti di biocostruzioni con incrostazioni di serpulidi e briozoi spiaggiati di fronte l'area a nord.



Fig. 76 – *Cuscini* coalescenti in crescita nel settore dei blocchi intorno all’isolotto. La superficie della biocostruzione ha le aperture integre con collaretti ben evidenti.

Secondo rilievo (2021): Le biocostruzioni a *cuscino* a nord dell’isolotto non sono più visibili perché del tutto distrutti o completamente insabbiati per via delle correnti e del moto ondoso. Le biocostruzioni lungo il cordolo sabbioso sommerso si sono ridotte in numero e dimensioni, anche queste probabilmente coperte dalla sabbia. Alcune presentano una superficie colonizzata da alghe ed organismi epifaunali. Al contrario *cuscini* tra i blocchi rocciosi dell’isolotto, si sono notevolmente sviluppati sia in estensione (fino a 4 m di lunghezza) che in altezza (50-60 cm), presentando molti individui vivi per lo più adulti (Fig. 77).

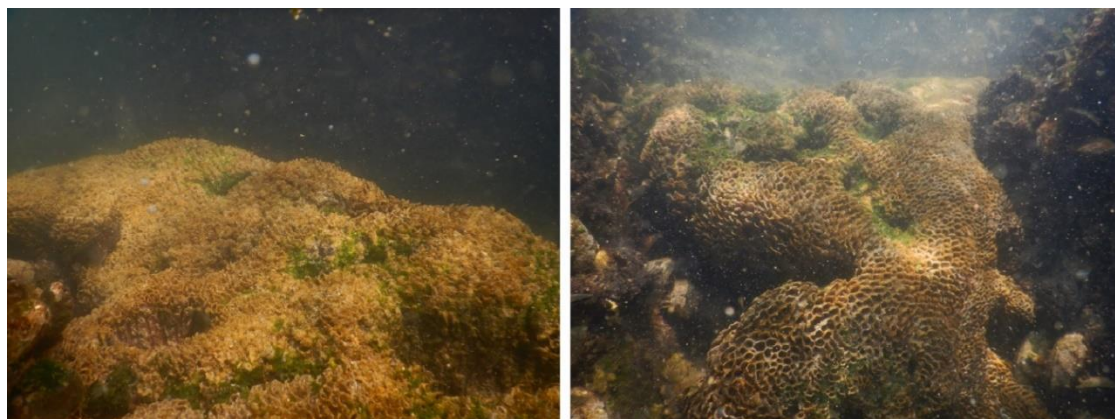


Fig. 77 – *Cuscini* coalescenti attorno l’isolotto e tipica struttura “brain-like”.

Terzo rilievo (2022): le biocostruzioni a *cuscino* lungo il cordolo sabbioso si sono ulteriormente ridotte, fino ad essere quasi del tutto insabbiate. Le biocostruzioni in prossimità dell’isolotto hanno mantenuto il loro aspetto integro e si sono espanse tra gli spazi vuoti degli scogli frangiflutti.



Fig. 78 – Mappa digitale riportante l’evoluzione delle estensioni delle biocostruzioni a *S. alveolata* nel 2020 (1° rilievo), 2021 (2° rilievo) e 2022 (3° rilievo) alla foce del Simeto. Ogni quadrato corrisponde a 1 m² dell’area reale.

Falconara (Fig. 86):

Primo rilievo (2020): le biocostruzioni si distribuiscono di fronte la piccola baia vicino al castello di Falconara principalmente in tre punti: all’interno di una galleria naturale sottostante uno scoglio dove mostrano una morfologia a *banco*; tra la riva e lo scoglio dove sono presenti morfologie a *cuscono* anche coalescenti tra loro a profondità di 20-30 cm; e su fondali a nord dello scoglio profondi pochi decimetri ospitanti *cusconi* coalescenti tra loro (Fig. 79). La biocostruzione a *banco*, presenta una morfologia ben strutturata con la parte apicale appena emersa dall’acqua, con altezza superiore a 90 cm, lunghezza di 6 metri e larghezza di circa 3 metri occupando quasi tutto lo spazio all’interno (circa 20 m²) (Fig. 80 a). I *cusconi* limitrofi, invece, di altezza di circa 60 cm e dimensioni di circa 4 x 1 m e 2,5 x 1,5 m. Solo localmente, entrambe le biocostruzioni, presentano alghe e tane scavate da pesci e granchi (Fig. 80 b).



Fig. 79 – Scoglio nel sito di Falconara dove, all’interno della sua galleria, affiora il *banco* a *S. alveolata*.

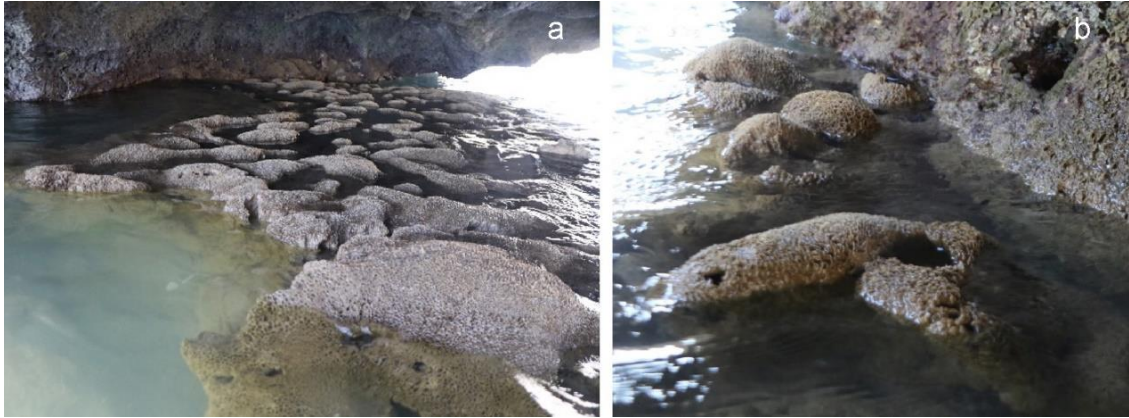


Fig. 80 – Il rilievo estivo del 2020 a Falconara. a) *Banco* al di sotto dello scoglio. b) *Cuscini* coalescenti. Entrambe le biocostruzioni presentano marginalmente tane scavate da granchi.

Secondo rilievo (2021): si osserva al di sotto dello scoglio una notevole riduzione del *banco* (altezza 60 cm, ampiezza 1,5x4 m, estensione 6 m²) dovuta alla forza erosiva del moto ondoso (Fig. 81) che ha fatto arretrare i suoi margini di circa 1 metro. Si è mantenuto soltanto il suo nucleo centrale pur ridotto in altezza di circa 20 cm e smantellato quasi completamente ai suoi margini con aggregati abrasivi e coperti da sedimento alti al massimo 40 cm (Fig. 82 a). Nei fondali tra la riva e lo scoglio i *cuscini* hanno subito anch'essi una riduzione diventando singoli *cuscini* separati dall'aspetto degradato (Fig. 82 b) e colonizzati da alghe. Anche nei fondali a nord dello scoglio, i *cuscini* coalescenti hanno ridotto la loro estensione per sviluppare più a nord altri *cuscini* coalescenti con tubi piccoli di neoformazione, alti 60 cm e di dimensioni 60 cm x 2 m (Fig. 83).



Fig. 81 – Parziale smantellamento del *banco* all'interno della galleria durante una mareggiata.

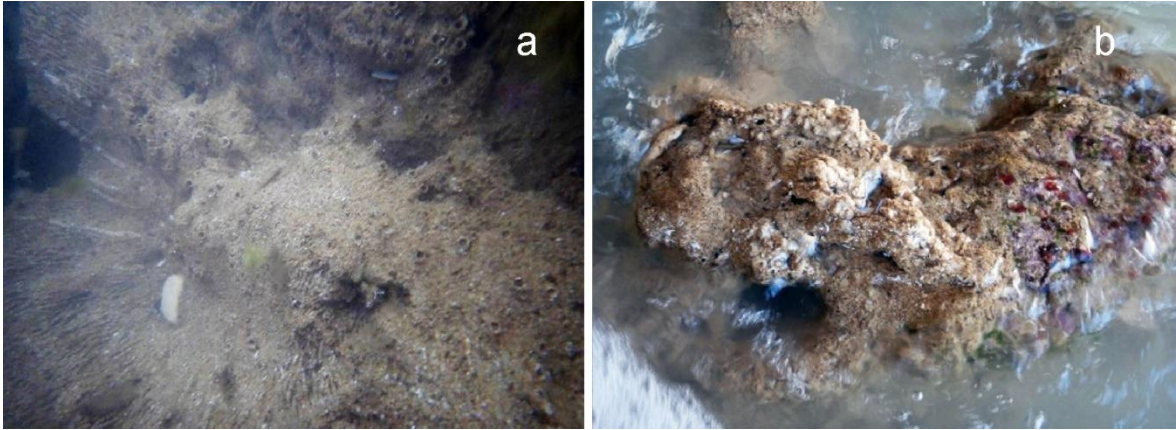


Fig. 82 – a) Parte basale del *banco* erosa e abrasa, coperta da fango e sabbia. b) *Cuscini* abrasati e colonizzati da alghe.



Fig. 83 – *Cuscini* coalescenti di nuova formazione nel fondale a nord dello scoglio.

Terzo rilievo (2022): sia il *banco* che i *cuscin* dei fondali tra la riva e lo scoglio, hanno mantenuto le dimensioni del 2021 mostrando però un aspetto ulteriormente deteriorato, con tubi separati tra loro da strette aree di intertubo (Fig. 84) e maggiore presenza di alghe al di sopra (Fig. 85). Nei fondali a nord dello scoglio invece, le biocostruzioni presenti nel 2021, sono del tutto sparite.

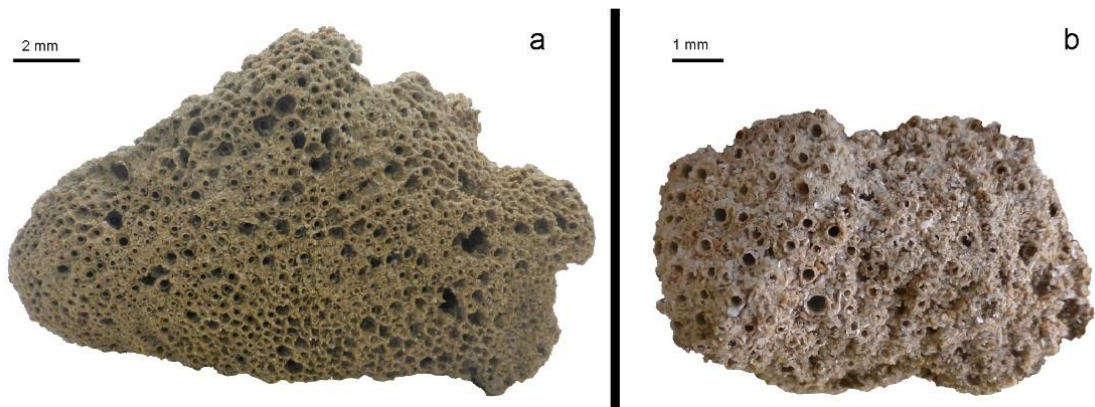


Fig. 84 – a) Porzione sommitale di un frammento di biocostruzione con collaretti aperturali integri e tubi adiacenti con rare e strette aree di intertubo raccolta durante il primo rilievo. b) Frammento di biocostruzione con collaretti aperturali abrasivi, mostranti solo i collaretti interni e aree di intertubo più frequenti con sedimento scarsamente cementato.

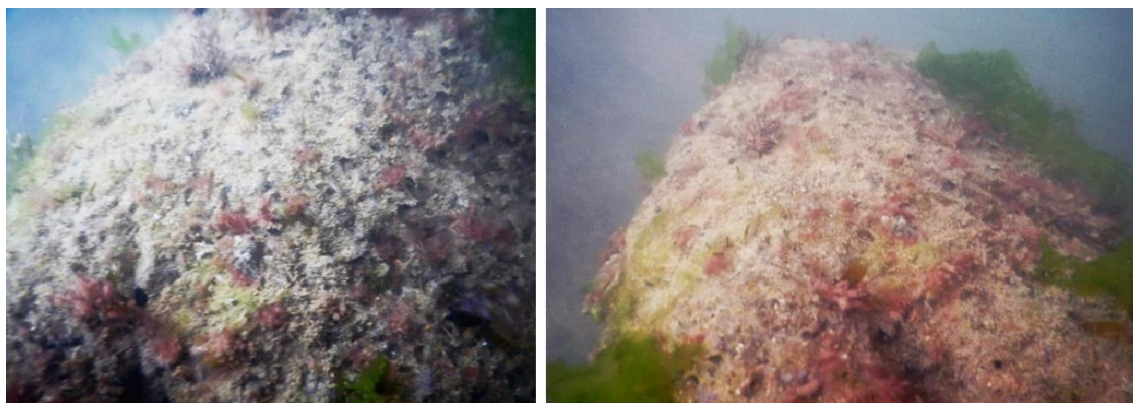


Fig. 85 – Cuscini abrasivi ricoperti da numerosi talli di alghe rosse (*Crouania francescoi*) e verdi (*Ulva lactuca*).

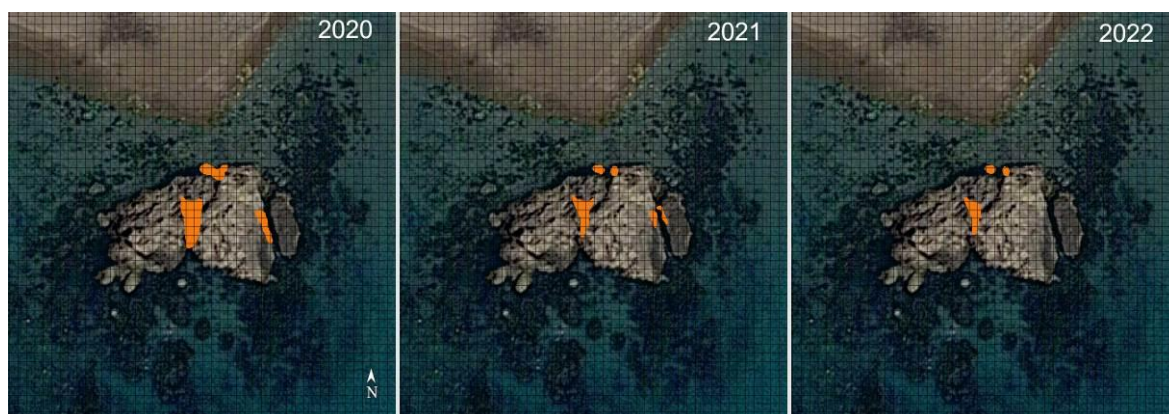


Fig. 86 – Mappa digitale riportante l'evoluzione delle estensioni delle biocostruzioni a *S. alveolata* nel 2020 (1° rilievo), 2021 (2° rilievo), 2022 (3° rilievo) a Falconara. Ogni quadrato corrisponde a 1 m² dell'area reale.

4.7. Granulometria del sedimento del fondale circostante

I sedimenti alla base delle biocostruzioni, mostrano distribuzioni granulometriche piuttosto simili (Tab. 10; Fig. 87): a Portopalo il sedimento è costituito da sabbia media; alla foce del Simeto prevalentemente da sabbia media e fine con basse percentuali sia di sabbie molto fini che grossolane; a Falconara da sabbia media e grossolana con basse percentuali di frazione fine e molto grossolana.

Granulometria	Portopalo	Simeto	Falconara
> 22,6 mm	0,00%	0,00%	0,00%
Ciottolo medio	0,00%	0,00%	0,00%
Ciottolo medio-fine	0,00%	0,00%	0,62%
Ciottolo fine	0,00%	0,00%	0,75%
Granulo	0,15%	0,10%	0,32%
Sabbia molto grossolana	1,07%	0,54%	1,60%
Sabbia grossolana	14,57%	5,98%	40,54%
Sabbia media	67,21%	49,54%	52,46%
Sabbia fine	16,83%	39,76%	2,94%
Sabbia molto fine	0,15%	4%	0,72%
< 62,5 μ	0,02%	0,08%	0,05%

Tab. 10 – Percentuali delle granulometrie del sedimento riscontrate nei tre siti distinte secondo la scala Wentworth.

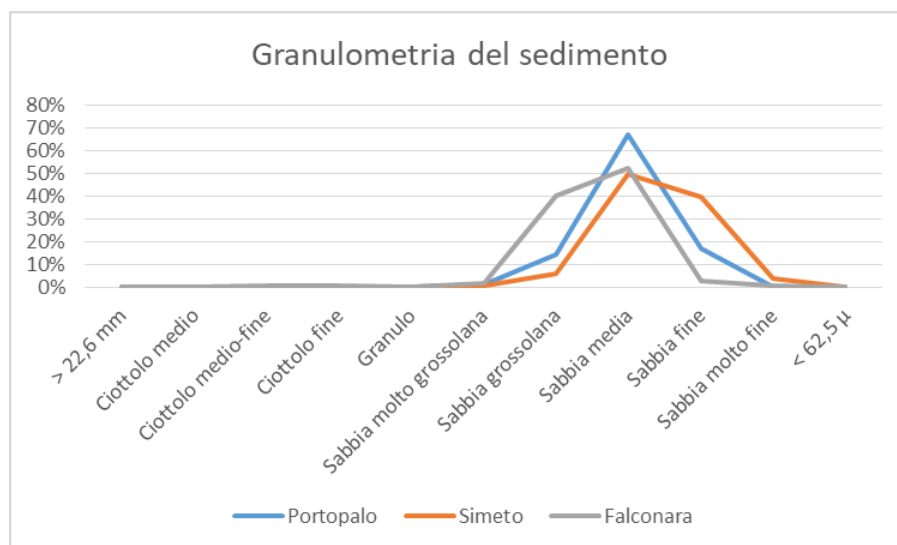


Fig. 87 – Confronto delle distribuzioni granulometriche dei sedimenti del fondo circostanti le biocostruzioni a *S. alveolata* dei siti esaminati.

Di seguito è riportata la composizione granulometrica, secondo la scala di Wentworth, dei campioni di sedimento investigati nei tre siti (Tab. 10):

Portopalo: il sedimento è prevalentemente composto da sabbia media (67,21%), con subordinata sabbia fine (16,83%) e sabbia grossolana (14,57%). Sono presenti minime percentuali anche di sabbia molto grossolana (1,07%), granuli (0,15%) e sabbia molto fine (0,15%). Solo 0,02% è sedimento di granulometria inferiore a 62,5 μm . Da un'analisi qualitativa il sedimento è composto per circa il 90% da elementi organogeni.

Simeto: il sedimento è una sabbia medio-fine essendo maggiormente composto da sabbia media (49,54%) e sabbia fine (39,76%), con percentuali molto subordinate di sabbia grossolana (5,98%) e sabbia molto fine (4%). Solo lo 0,54% è sabbia molto grossolana, lo 0,10% granuli e lo 0,08% di sedimento inferiore a 62,5 μm . Da un'analisi qualitativa il sedimento è composto per l'80% da elementi litici.

Falconara: il sedimento è una sabbia medio-grossa essendo maggiormente composto da sabbia media (52,46%), seguito da sabbia grossolana (40,54%). Sono molto subordinati la sabbia fine (2,94%), sabbia molto grossolana (1,60%), i ciottoli fini (0,75%), i ciottoli medio-fini (0,62%), i granuli (0,32%) e la sabbia molto fine (0,72%). Solo lo 0,05% di sedimento è inferiore a 62,5 μm . Questo risultato evidenzia che si tratta di sabbia medio-grossa. Da un'analisi qualitativa il sedimento è principalmente composto da elementi litici (60%).

Dalle analisi granulometriche i sedimenti alla base delle biocostruzioni ricadono nel campo delle sabbie medio-grosse a Falconara, delle sabbie medie a Portopalo e delle sabbie medio-fine al Simeto.

Il sedimento alla base della biocostruzione di Falconara, è costituita, oltre a sabbia medio-grossa anche da un'alta percentuale di elementi di granulometria maggiore. Infatti oltre alla sabbia grossa, sono presenti anche i ciottoli, che mancano negli altri due siti.

4.7.1. Granulometria del sedimento delle biocostruzioni

Dalle analisi granulometriche i sedimenti che costituiscono le biocostruzioni del Simeto e di Falconara ricadono nel campo delle sabbie medio-grosse (Tab. 11).

Granulometria	Simeto		Falconara	
	Biocostruzione	Sedimento	Biocostruzione	Sedimento
> 22,6 mm	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ciottolo medio	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Ciottolo medio-fine	0,00%	0,00%	0,00%	0,62%
Ciottolo fine	0,00%	0,00%	0,06%	0,75%
Granulo	0,00%	0,10%	0,21%	0,32%
Sabbia molto grossolana	1,85%	0,54%	1,32%	1,60%
Sabbia grossolana	49,95%	5,98%	36,78%	40,54%
Sabbia media	33,15%	49,54%	44,65%	52,46%
Sabbia fine	12,34%	39,76%	11,80%	2,94%
Sabbia molto fine	2,17%	4,00%	4,35%	0,72%
< 62,5 µm	0,54%	0,08%	0,83%	0,05%

Tab. 11 – Percentuali delle granulometrie del sedimento delle biocostruzione e del fondale circostante dei siti di Falconara e del Simeto secondo la scala Wentworth.

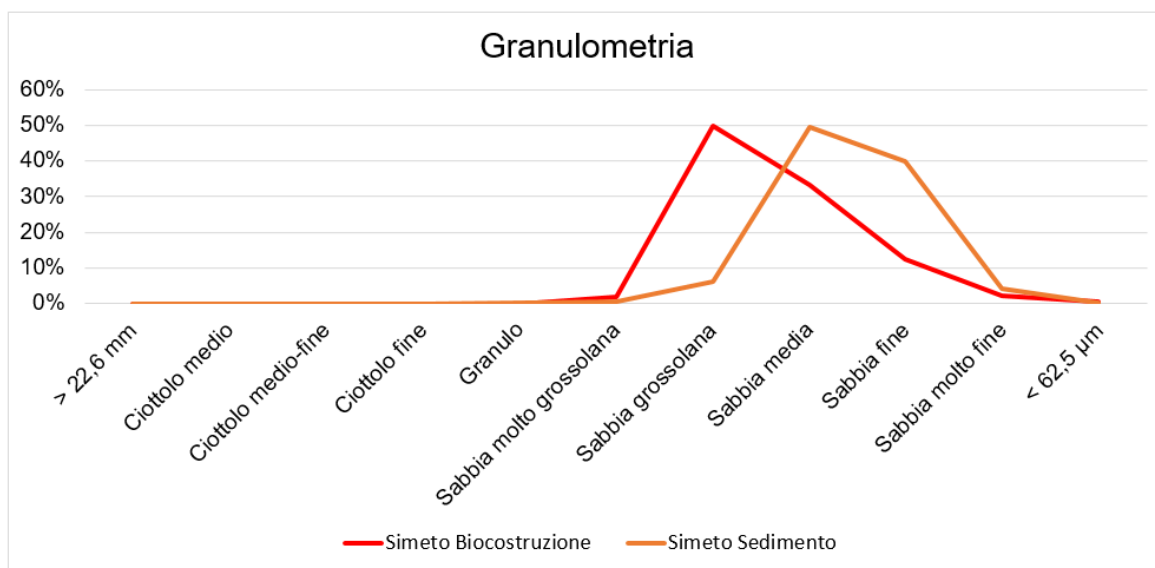


Fig. 88 – Confronto delle distribuzioni granulometriche del sedimento del fondo circostante la biocostruzione a *S. alveolata* e quelli della biocostruzione nel sito del Simeto.

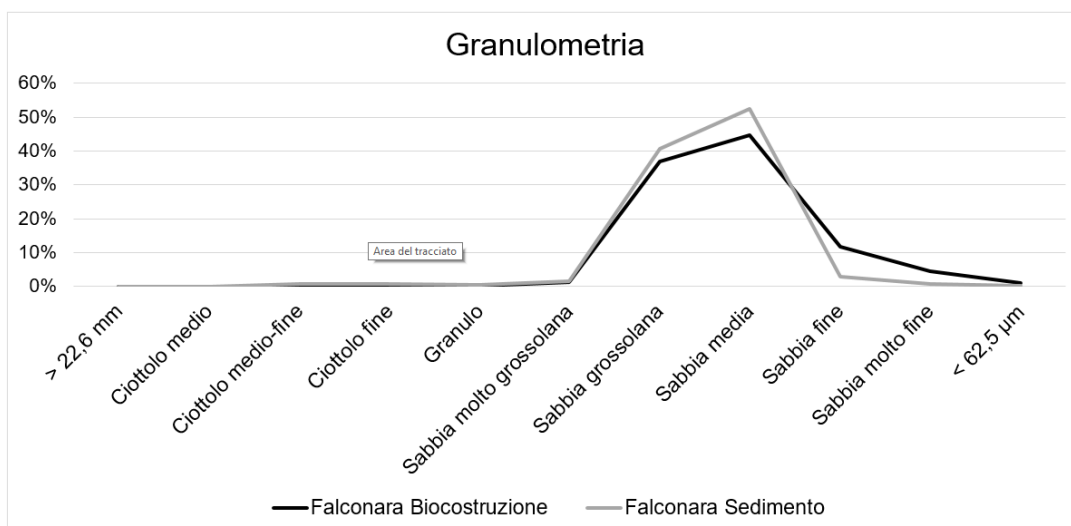


Fig. 89 – Confronto delle distribuzioni granulometriche del sedimento del fondo circostante la biocostruzione a *S. alveolata* e quelli della biocostruzione nel sito di Falconara.

Di seguito è riportata la composizione granulometrica, secondo la scala di Wentworth, del campione di sedimento della biocostruzione investigato (Tab. 11):

Nel sito del Simeto (Fig. 88) il sedimento della biocostruzione è una sabbia medio-grossa (sabbia media 33,15%, sabbia grossolana (49,95%). Subordinati sono: sabbia fine (12,34 %), sabbia molto fine (2,17%) e sabbia molto grossolana (1,85%). Lo 0,54% ha granulometria inferiore a 62,5 µm.

Nel sito di Falconara (Fig. 89) il sedimento della biocostruzione è una sabbia medio-grossa (sabbia media 44,65%, sabbia grossolana 36,78%). Subordinati sono: sabbia fine (1,32 %), granuli (0,21%) e ciottoli fini (0,06%). Lo 0,83% ha granulometria inferiore a 62,5 µm.

Dal confronto della granulometria del sedimento alla base della biocostruzione con quello del sedimento che compone la biocostruzione stessa, si evidenzia che:

Nel sito del Simeto (Fig. 88; Tab. 11) la sabbia grossolana è in maggiore percentuale nella biocostruzione (sabbie grosse e medie) mentre la sabbia fine è maggiore nel sedimento alla base (sabbie medie e fini). La composizione granulometrica della biocostruzione non rispecchia quindi quella del sedimento disponibile che si deposita sul fondale limitrofo.

Nel sito di Falconara (Fig. 89; Tab. 11) le curve granulometriche sono ben confrontabili. La composizione granulometrica della biocostruzione rispecchia notevolmente il sedimento disponibile alla base con una leggera differenza riguardante la maggiore presenza della sabbia grossolana e la minore della sabbia fine nella biocostruzione rispetto al sedimento alla base.

4.8. Il biocemento dei tubi

4.8.1. Modalità di distribuzione e morfologia dei punti colla

Nei tubi agglutinati delle biocostruzioni delle tre località studiate, il biocemento tra gli elementi sabbiosi mostra una diversa forma e distribuzione a seconda della morfologia dei granuli. Per la descrizione del biocemento si rimanda al paragrafo 2.3 Generalità.

Nei campioni analizzati il biocemento si presenta con piccoli punti colla, di colore da giallognolo a bruno chiaro e dimensioni al di sotto del millimetro, appena o per nulla individuabili ad occhio nudo. Quindi, il suo studio è stato effettuato allo stereomicroscopio ottico e al SEM.

Sono state distinte due morfologie:

- Spot (punti colla dal contorno subcircolare e dalla superficie concava a menisco): agglutinano elementi tozzi o isodiametrici. La morfologia è dovuta alla deformazione della goccia di colla ancora plastica che si espande leggermente attorno al punto di contatto dei granuli (Fig. 90).

Questa tipologia di biocemento è presente nello strato intermedio e in quello esterno.

- Strip (strisce di colla molto sottili): agglutinano elementi appiattiti delimitandone i bordi (Fig. 91). Questa tipologia di biocemento è presente nello strato esterno e in tutto lo strato interno.

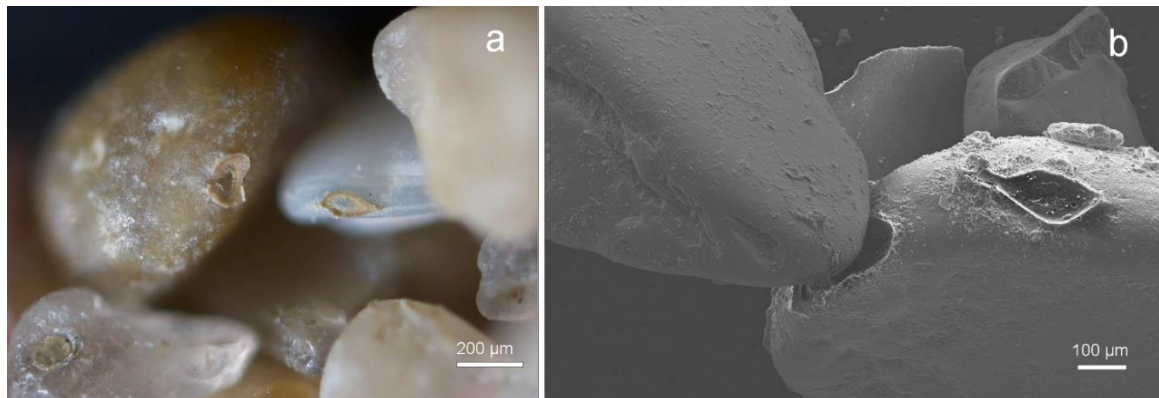


Fig. 90 – a) *Spot* o punti colla con tipica superficie a menisco e margini rilevati, su granuli isodiametrici dello strato intermedio. b) Dettaglio dei punti colla. Località: Falconara.

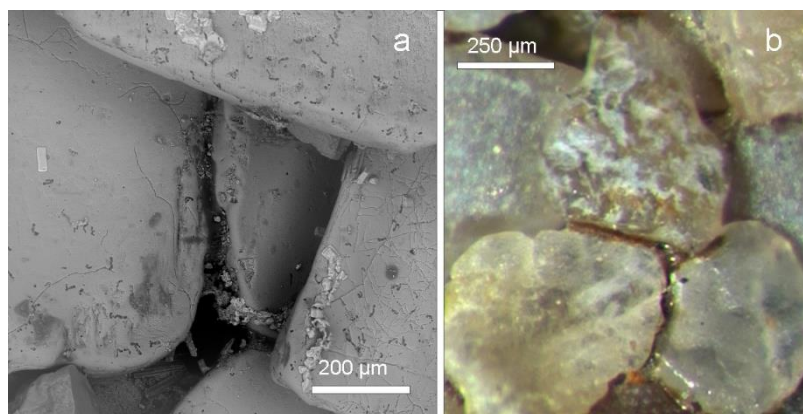


Fig. 91 – Strato esterno della parete del tubo con gli elementi appiattiti incollati tra loro da strisce di colla lungo le linee di contatto. Località: Simeto.

La modalità di distribuzione dei punti colla è uguale in tutti i campioni osservati mentre vi sono delle leggere differenze nella dimensione e soprattutto nella loro abbondanza sui singoli elementi di sedimento (Tab. 12).

Gli spot di colla hanno in media un diametro minore nei campioni del Simeto (ca. 60 µm) e maggiore a Portopalo (ca. 100 µm). Gli strip di colla hanno in media lunghezza leggermente minore a Falconara (ca. 170 µm) rispetto a Portopalo e al Simeto (circa 200 µm). Nei campioni di quest'ultimo sito, inoltre, il biocemento forma spesso *strip* continui lungo tutti i bordi degli elementi appiattiti.

Lo spessore del biocemento è molto variabile, può misurare più di 30 µm nei bordi e poche decine di nanometri nella sua parte centrale.

Il biocemento è distribuito in maniera costante in tutti e tre gli strati della parete ma è più abbondante tra i grani dei tubi di Portopalo e del Simeto mentre è meno presente nei tubi di Falconara (Tab. 12; Fig. 92). Infatti i singoli grani presentano in media un maggior numero di punti colla a Portopalo (8) e al Simeto (6) e pochissimi punti colla a Falconara (3-4).

	Spot su granuli		Strip su granuli
	Diametro	Numero	Lunghezza
Portopalo	100	4-8	200
Simeto	60	4-6	200
Falconara	80	3-4	170

Tab. 12 – Valori dimensionali (in µm) dei punti colla e numero medio degli spot presenti su un singolo grano.

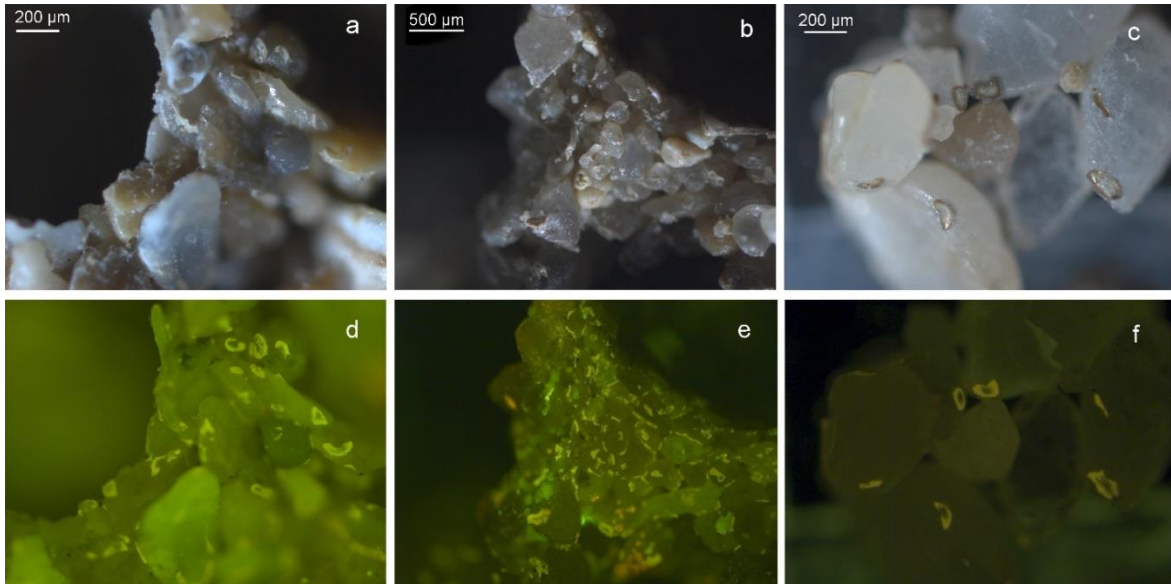


Fig. 92 – Distribuzione dei punti colla nelle pareti dei tubi di *S. alveolata* al microscopio ottico. a-b) Grani della zona aperturale con numerosi punti colla. c) Grani della parete con pochi punti colla. La loro distribuzione e abbondanza è meglio evidenziata in epifluorescenza (d-e-f). Località: a-d) Portopalo; b-e) Simeto; c-f) Falconara.

Gli *spot* di colla, solo nel sito di Falconara, presentano una superficie esterna dalla colorazione bruno rossiccia (Fig. 93).



Fig. 93 – a) Punto colla a *spot* su granulo con superficie esterna di colorazione scura. b-c) Solo la sostanza proteica del biocemento appare giallo brillante in epifluorescenza. Località: Falconara.

4.8.2. Struttura interna dei punti colla

In tutti i campioni dei tre siti, i punti colla hanno una microstruttura identica indipendentemente dalla posizione lungo il tubo in cui si trovano. Questa, sia negli *spot* che negli *strip*, è assimilabile ad una schiuma solida che mostra numerosi vacuoli sferici uniformemente distribuiti di diametro variabile da 0,2 μm a 10 μm (Fig. 94). Tale struttura

è ben visibile sulla superficie del punto colla che aderiva al granulo. La superficie esterna del punto colla lateralmente alla zona di adesione dei granuli, invece, appare liscia e compatta (Fig. 94 e).

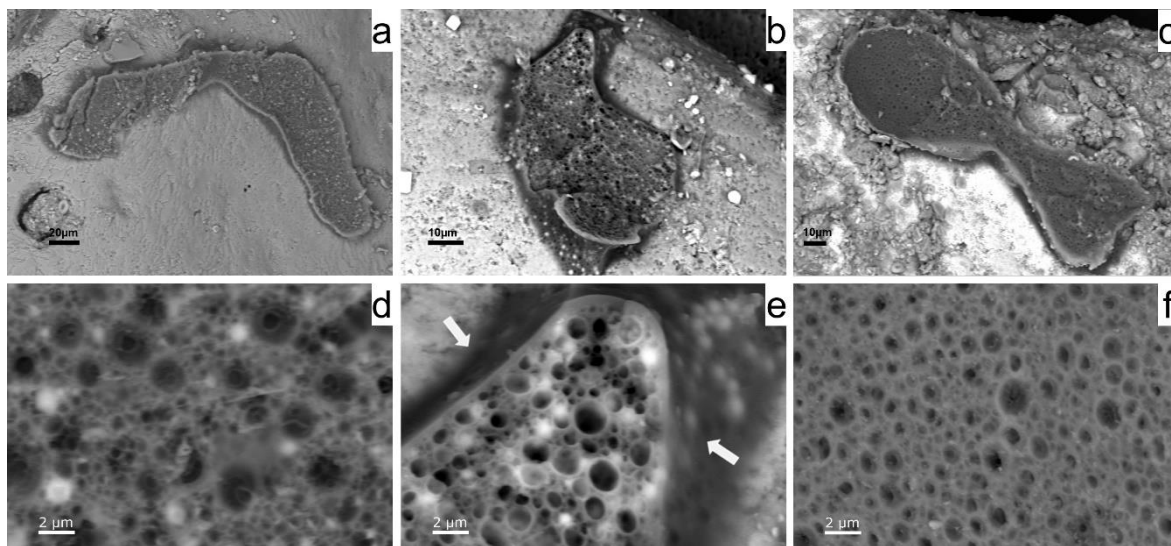


Fig. 94 – Punti colla sui granuli: dettaglio della superficie esterna (frecche bianche) e della struttura vacuolare del biocemento osservato che presenta un aspetto molto simile in tutti e tre i siti. Località: a-d) Portopalo; b-e) Simeto; c-f) Falconara.

Localmente sia nel biocemento di Portopalo che in quello del Simeto sono stati ritrovati all'interno delle bolle piccoli cristalli di Cloruro di Sodio (NaCl) derivati dalla precipitazione diretta dalle acque marine (Fig. 95 a). A Portopalo, inoltre, sono presenti argille e/o diatomee sopra la superficie del biocemento o in prossimità (Fig. 95 b).

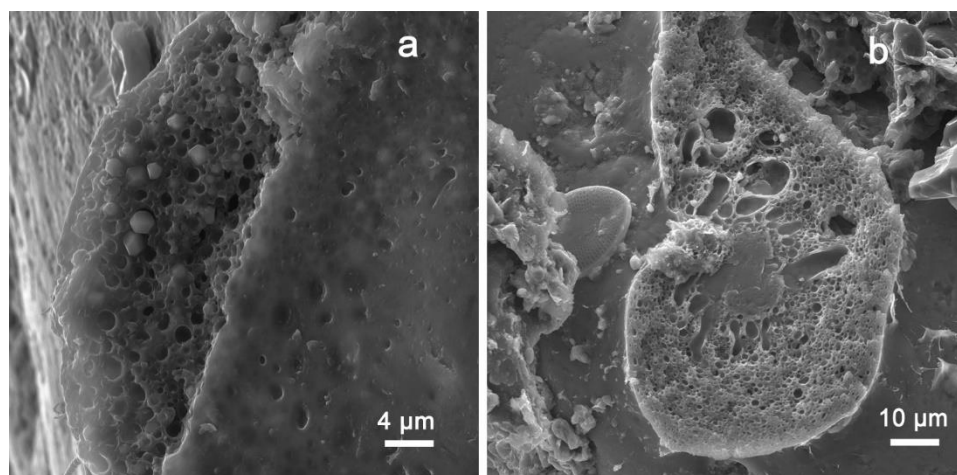


Fig. 95 – a) Cristalli cubici di sale all'interno delle bolle del biocemento. Località: Simeto. b) Biocemento dalla forma a menisco, fango e diatomea su un granulo di sediment. Località: Portopalo.

4.8.3. Composizione dei punti colla

È stata analizzata la composizione media degli elementi maggiori su numerosi punti colla (Fig. 96) e al fine di dedurne la loro concentrazione e distribuzione spaziale sono state effettuate delle mappe (Fig. 97).

	C	N	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Fe
Portopalo	42,801	12,182	22,088	3,245	3,097	0,262	0,38	2,859	0,796	4,904	0,198	7,124	0	0,057
Simeto	44,697	13,077	22,307	1,52	3,22	0,109	0,307	6,336	0,788	2,787	0,124	4,703	0	0,021
Falconara	38,306	10,971	29,43	1,946	1,991	1,41	3,075	4,026	0,662	2,166	0,272	5,458	0,014	0,739

Tab. 13 – Composizione media, in percentuale di peso, del biocemento analizzato sui campioni di Portopalo, Simeto e Falconara.

I principali elementi costantemente osservati nel biocemento dei tre siti sono C, N, Na, Mg, P, Cl, K e Ca (Figg. 96, 97; Tab. 13). Inoltre, sono state riscontrate alcune tracce di Al, Si e Fe la cui presenza non è riconducibile al biocemento ma all'influenza che il substrato ha su di esso.

Le variazioni nei dati quantitativi sono da ricondurre allo spessore e al grado di porosità delle porzioni di colla studiate. Na e Cl derivano da microcristalli di Cloruro di Sodio inclusi nella struttura porosa della colla mentre altri elementi risultano essere componenti della matrice organica della colla: Mg, Ca, K sono probabilmente complessati al biocemento; P e N fanno parte della struttura covalente del biocemento. Lo zolfo è stato rilevato in piccole quantità all'interno del biocemento non superando mai l'1,06% in peso.

La metallizzazione con grafite rende impossibile qualsiasi considerazione sulla presenza/quantità di C. La natura organica del materiale secreto è dato acquisito da precedenti ricerche in letteratura.

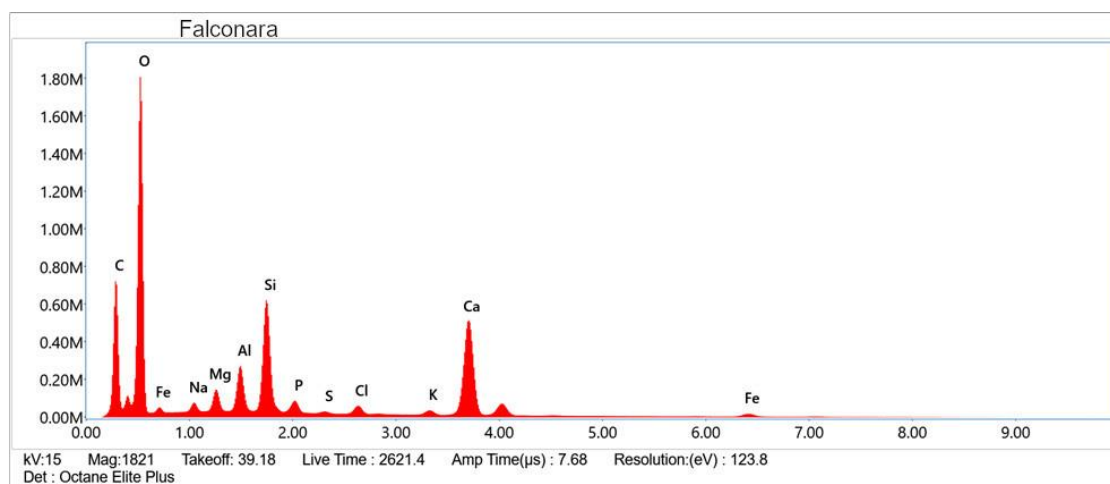
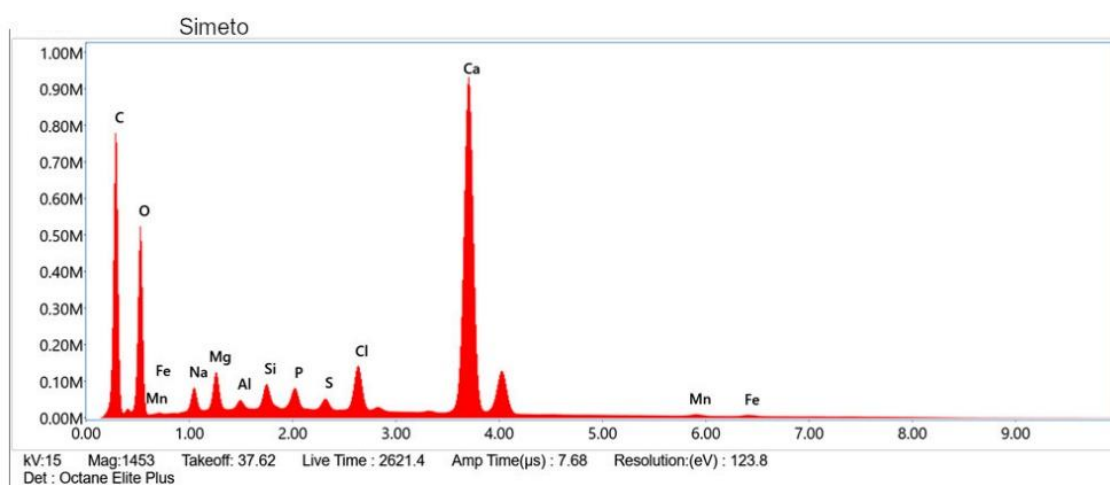
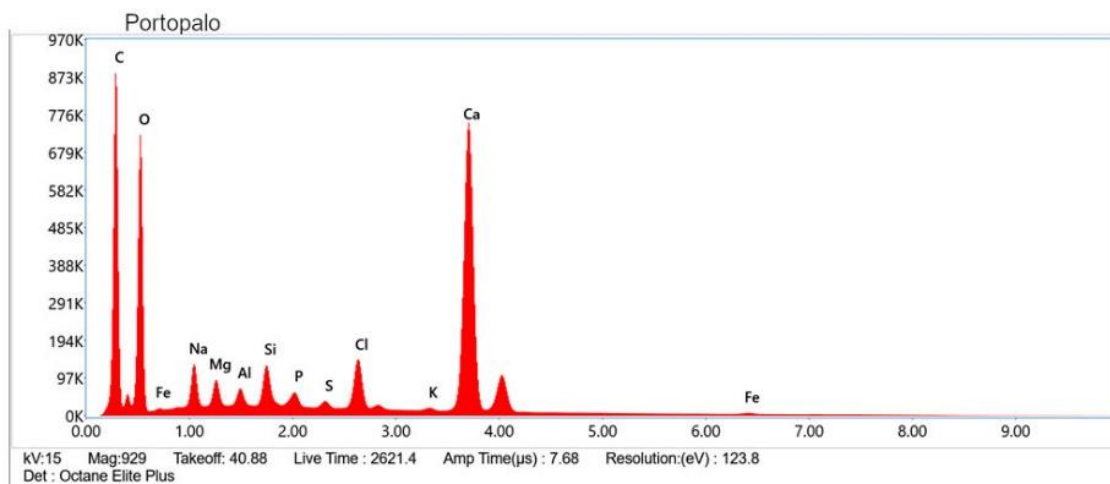
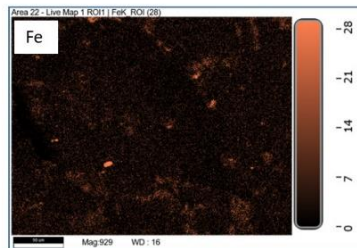
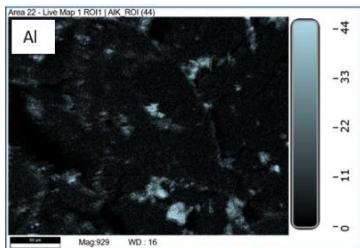
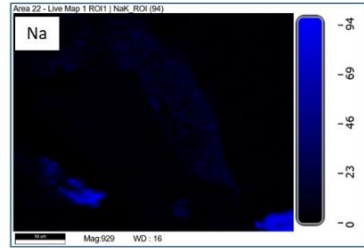
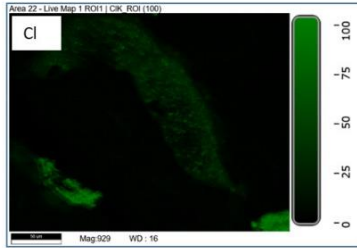
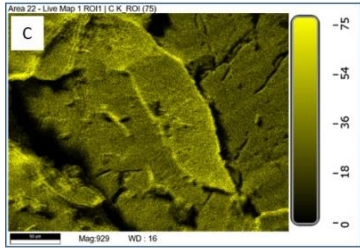
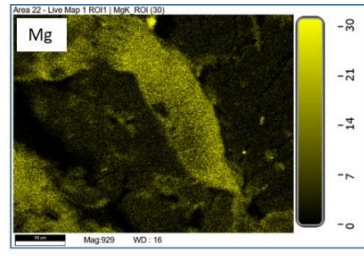
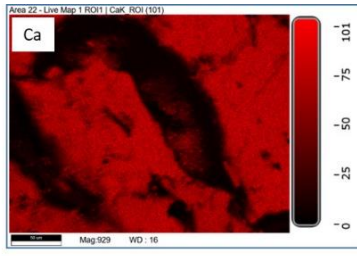
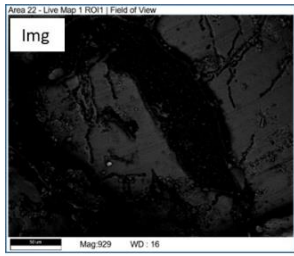
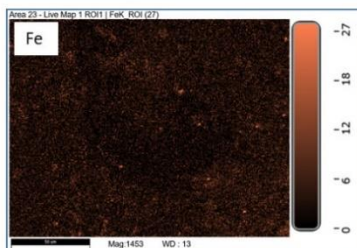
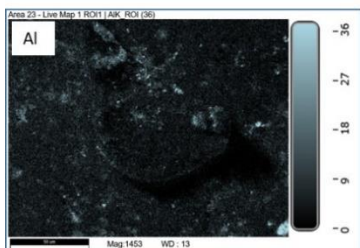
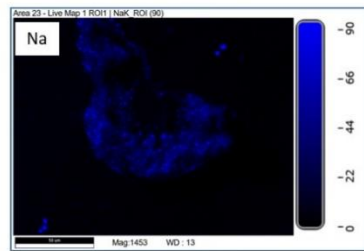
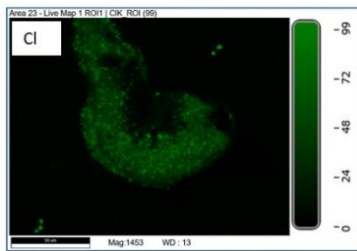
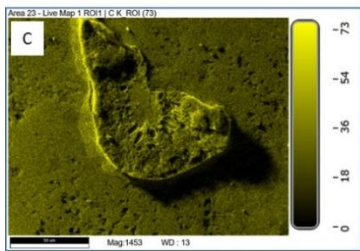
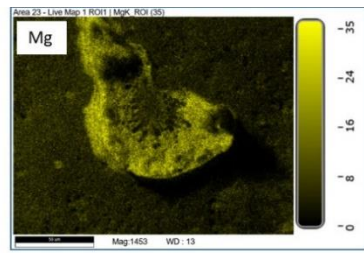
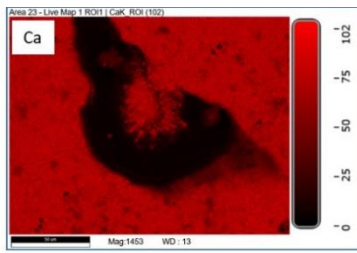
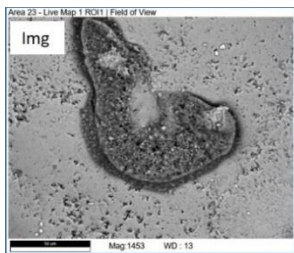


Fig. 96 – Spettro EDS del biocemento di *S. alveolata* campionata nei tre siti.



Portopalo



Simeto

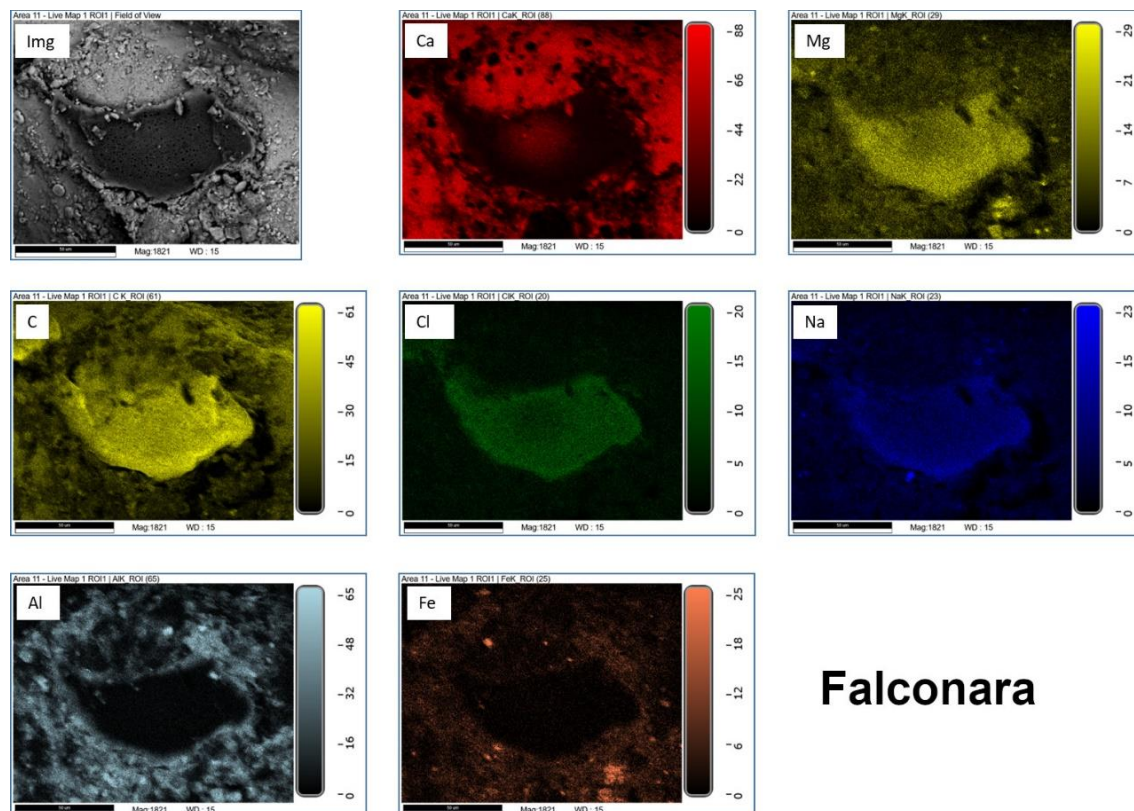


Fig. 97 – Mappe WDS che mostrano la distribuzione e la concentrazione semiquantitativa dei principali elementi nel biocemento della *S. alveolata*. In alto a sinistra: scansione SEM per riferimento.

In linea generale, i valori medi della massa percentuale degli elementi nel biocemento dei diversi siti di campionamento sono simili. Na, Cl e Ca sono più elevati a Portopalo, P è più abbondante al Simeto.

Al fine di verificare le differenze composizionali del biocemento dei tre siti investigati, sono stati messi in relazione i rapporti tra Magnesio e Calcio con il Fosforo (Tab. 14).

Portopalo		Simeto		Falconara	
P/Mg	P/Ca	P/Mg	P/Ca	P/Mg	P/Ca
0,26	0,02	1,80	1,80	1,95	1,06
0,72	0,39	1,69	2,05	2,23	1,24
1,16	0,43	1,89	2,08	1,78	0,34
1,10	2,00	2,11	1,33	2,26	0,63
0,82	1,54	2,99	1,24	1,78	1,89
0,79	0,20	1,84	2,08	2,07	1,18
0,76	1,02	1,63	1,12	0,92	0,17
1,38	1,84	1,96	1,90	1,83	1,46
1,00	1,17	1,73	2,10	1,96	1,23
0,93	1,29	2,06	0,55	-	-

Tab. 14 – Rapporto degli elementi maggiori presenti nel biocemento.

Nei tre siti i rapporti tra gli elementi maggiori hanno dato i seguenti intervalli di valori:

- Portopalo: il rapporto P/Mg è compreso tra 0,2 e 1,3; il rapporto P/Ca è compreso tra 0,01 e 2.
- Simeto: il rapporto P/Mg è compreso tra 1,6 e 2,9; il rapporto P/Ca è compreso tra 0,5 e 2,09.
- Falconara: il rapporto P/Mg è compreso tra 0,9 e 2,2; il rapporto P/Ca è compreso tra 0,1 e 1,8.

I valori dei rapporti P/Mg e P/Ca su un diagramma binario hanno permesso di valutare analogie e differenze tra i biocementi dei tre siti (Fig. 98).

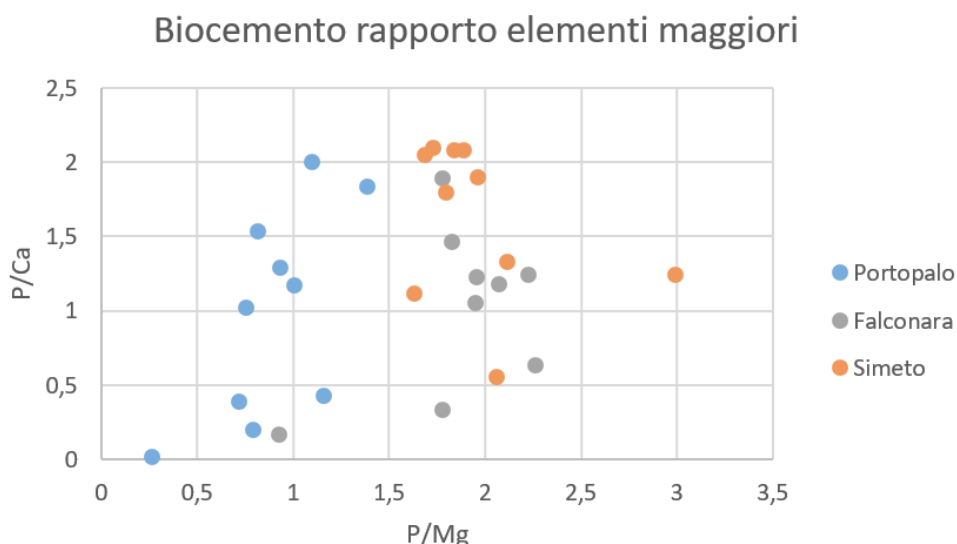


Fig. 98 – Diagramma di dispersione dei rapporti tra gli elementi maggiori.

Il biocemento di Portopalo mostra una maggiore dispersione dei punti e si discosta dalla composizione media osservata nei biocementi di Simeto e Falconara, che invece mostrano una parziale sovrapposizione. Il biocemento di Portopalo mostra una maggiore concentrazione in Mg rispetto agli altri due siti, mentre ha una concentrazione in Ca variabile ma confrontabile soprattutto con quello di Falconara. Il biocemento del Simeto presenta una leggera variabilità rispetto a Falconara e a Portopalo in quanto tende ad avere minore concentrazione di Ca. Queste variabilità sono legate alle differenze tra gli ambienti di formazione del biocemento infatti, laddove vi è una minore concentrazione in Ca (Simeto) vi sono maggiori elementi silicoclastici.

Dal rapporto $Ca/(Ca+Mg)$ calcolato sia sui valori medi delle acque che del biocemento dei tre siti (Tab. 15; Fig. 99), si nota che: il biocemento analizzato con maggiore concentrazione di Ca è quello di Falconara (0,73), seguito da Portopalo (0,70) e Simeto (0,59). Viceversa, il biocemento analizzato con maggiore concentrazione di Mg è quello del Simeto, seguito da Portopalo e Falconara.

Ca/(Ca+Mg)	Portopalo	Simeto	Falconara
Acque	0,32	0,34	0,30
Biocemento	0,70	0,59	0,73

Tab. 15 – Rapporti calcolati sui valori medi ottenuti dalle analisi delle acque e del biocemento di Ca e Mg. I valori prossimi tra 0,5 e 1 indicano una maggiore concentrazione di Ca, i valori tra 0 e 0,5 indicano maggiore concentrazione di Mg.

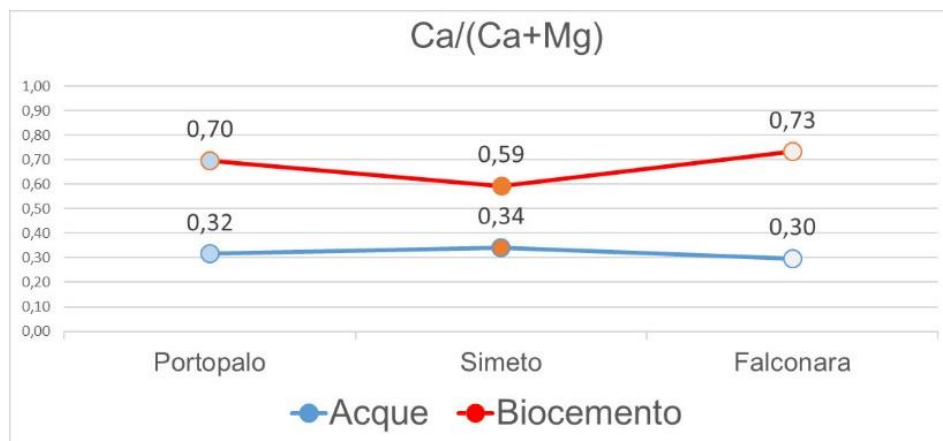


Fig. 99 – Grafico di confronto degli elementi Ca e Mg nel biocemento e nelle acque circostanti le biocostruzioni nei tre siti. Si nota una tendenza inversa delle concentrazioni nel biocemento rispetto alle acque.

Gli elementi in traccia presenti nel biocemento analizzato sono: B, U, Sr, Zn, Ni, Cu, Cr, Rb. Distribuiti nei tre siti di campionamento secondo quanto riportato in Tab. 16:

	B	Se	Rb	Sr	Cu	Zn	U	Cr	Ni
Portopalo	0,299	b.d.l.	b.d.l.	0,016	0,006	0,018	0,038	0,002	0,012
Simeto	0,103	b.d.l.	0,005	0,018	0,010	0,014	0,023	0,004	0,003
Falconara	0,308	0,002	0,004	0,011	0,009	0,008	0,010	0,005	0,011

Tab. 16 – Medie delle masse percentuali degli elementi in traccia nel biocemento campionato nell'estate 2021.

Si è notato che:

Nel biocemento di Portopalo vi è la più alta percentuale in massa di Zn, U e Ni.

Nel biocemento del Simeto vi è la più alta percentuale in massa di Rb, Cu e Sr.

Nel biocemento di Falconara vi è la più alta percentuale in massa di B, Se e Cr.

4.9. Caratteristiche chimico- fisiche delle acque circostanti le biocostruzioni

I parametri chimico-fisici delle acque circostanti le biocostruzioni dei tre siti, misurati sul campo nell'arco dei tre anni (2020- 2021- 2022), sono stati confrontati tra di loro (Tab. 17). Da questo confronto si è evidenziato che nelle acque di mare:

- I valori più bassi di salinità (25,30 g/l, estate 2022), pH (8,16, primavera 2022), conducibilità (40,55 mS/cm primavera 2022) e TDS (28,85 ppt, primavera 2022) sono stati registrati nel sito del Simeto.
- I valori più alti di salinità (31,85 g/l, estate 2022), pH (8,55, autunno 2020), conducibilità (49,9 mS/cm, estate 2022) e TDS (35,5 ppt, estate 2022) sono stati registrati nel sito di Portopalo.
- Il valore di alcalinità più basso è stato registrato nel sito di Portopalo con 134,2 ppm di HCO₃ (primavera 2021) mentre il più alto è stato registrato nel sito del Simeto con 228 ppm (estate 2021).

I valori di deviazione standard più alti per temperatura, salinità, conducibilità e TDS sono stati registrati nel sito di Falconara mentre quelli più alti di pH e alcalinità sono stati riscontrati rispettivamente per Portopalo e Simeto.

	Portopalo			Simeto			Falconara		
	MIN	MAX	Dev.St.	MIN	MAX	Dev.St.	MIN	MAX	Dev.St.
Temperatura (°C)	21,3	29,1	5,5	20,7	29,1	5,9	18,0	29,7	8,3
Salinità (g/l)	28,35	31,85	2,47	25,30	28,55	2,30	26,60	31,60	3,54
pH	8,17	8,55	0,27	8,16	8,35	0,13	8,18	8,41	0,16
Conducibilità (mS/cm)	45,05	49,90	3,43	40,55	45,20	3,29	43,15	49,65	4,60
TDS (ppt)	32,00	35,50	2,47	28,85	32,15	2,33	30,60	35,05	3,15
Alcalinità (ppm)	134,2	195,2	43,1	164,7	231,8	47,4	158,6	195,2	25,9

Tab. 17 – Valori minimi e massimi dei parametri chimico-fisici misurati *in situ*. In rosso sono evidenziati gli estremi riscontrati per ogni parametro. In grassetto le deviazioni standard maggiori di ogni parametro nei tre siti.

Medie	Portopalo	Simeto	Falconara
Temperatura (°C)	25,0	24,1	22,6
pH	8,34	8,22	8,28
Salinità (g/l)	30,00	27,24	29,32
Conducibilità (mS/cm)	47,17	43,39	46,40
TDS (ppt)	33,54	30,84	32,92
Alcalinità (ppm)	163,7	194,2	171,8

Tab. 18 – Medie dei valori misurati sul campo nei tre siti.

Complessivamente, dai valori medi delle misurazioni nei tre siti monitorati si è osservato che: (i) La temperatura è variata da un minimo di 22,6° C a un massimo di 25° C; (ii) il pH da un minimo di 8,22 a un massimo di 8,34; (iii) La salinità da un minimo di 27,24 g/l a 30 g/l; (iv) La conducibilità da 43,39 mS/cm a 47,17 mS/cm; (v) il TDS da un minimo di 30,84 ppt a un massimo di 33,54 ppt e (vi) l'alcalinità da 163,7 ppm a 194,2 ppm.

I valori medi di temperatura, pH e conducibilità rispecchiano complessivamente quelli dell'acqua di mare media (Nordstrom *et al.*, 1979) (Fig. 100).

I Costituenti maggiori presenti nelle acque analizzate sono: Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄ e HCO₃.

Di seguito sono riportati i valori medi in ppm calcolati sui campioni prelevati dall'autunno 2020 all'autunno 2021 (Tab. 19; Fig. 100).

		Ca	Mg	K	Na	Cl	S	HCO ₃
Portopalo	A0	571	1134	351	9535	21985	876	154
	P	842	1585	512	11702	21293	894	122
	E	650	1549	448	12743	27273	910	198
	A	587	1487	452	12052	24159	872	146
Simeto	A0	632	1145	351	8963	21493	876	157
	P	760	1438	467	10944	19631	691	183
	E	606	1453	417	12096	25313	884	226
	A	832	1407	414	11558	23082	816	174
Falconara	A0	619	1119	337	9047	21767	869	152
	P	521	1506	491	11721	21712	823	159
	E	586	1505	442	12419	26158	926	183
	A	647	1471	479	11762	21630	886	159

Tab. 19 – Concentrazioni in ppm degli elementi maggiori presenti nelle acque di mare campionate nei tre siti in: autunno 2020 (A0), primavera 2021 (P), estate 2021 (E), autunno 2021 (A).

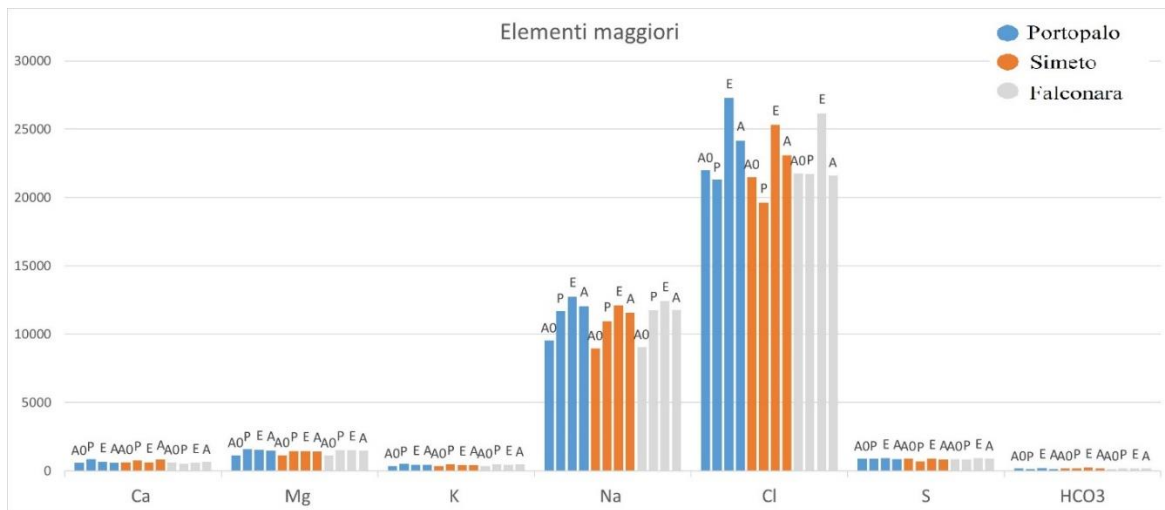


Fig. 100 – Istogramma delle concentrazioni in ppm degli elementi maggiori presenti nelle acque campionate nei tre siti in: autunno 2020 (A0), primavera 2021 (P), estate 2021 (E), autunno 2021 (A).

Si evidenzia una tendenza ad avere valori medi più alti in estate. Questo si nota soprattutto per elementi come Na e Cl, che mostrano i più bassi valori in autunno e in primavera, rispettivamente. Questo trend riflette la condizione di maggiore evaporazione caratterizzante il periodo estivo con concentrazioni medie di Na superiori a 12000 ppm in tutti i siti campionati e concentrazioni di Cl comprese tra i 25000 e i 27000 ppm. I valori dell'autunno 2021 sono più elevati rispetto a quelli dell'autunno 2020 per Na, Cl, Ca, Mg e K.

Mg e K evidenziano concentrazioni lievemente più basse in autunno. Relativamente al Ca, sono stati registrati aumenti per i siti di Portopalo e Simeto principalmente nel periodo primaverile contrariamente a quanto registrato a Falconara dove sono stati riscontrati i valori più bassi. Per ciò che riguarda lo ione SO_4 non è evidente alcuna tendenza tranne che una riduzione in primavera nel Simeto. In quest'ultimo caso, probabilmente, i processi secondari, come la riduzione batterica del solfato (Vespasiano *et al.*, 2021 e riferimenti interni), mascherano qualsiasi possibile tendenza legata a processi di diluizione.

Normalizzando i valori medi di pH e dei costituenti maggiori con quelli dell'acqua di mare media (Nordstrom *et al.*, 1979 – Tab. 20) si nota che questi sono confrontabili tra di loro (valori normalizzati prossimi a 1) (Fig. 101) fatta eccezione per il calcio e il bicarbonato e in parte per il Cl e il SO_4 . La concentrazione di Ca e HCO_3 è controllata dai processi di dissoluzione/precipitazione di calcite mentre, Cl e SO_4 , probabilmente, risentono di fenomeni di diluizione/evaporazione e processi di riduzione batterica, rispettivamente.

pH	HCO₃	Ca	Cl	Mg	K	Na	SO₄	NH₄	Fe	Mn	NO₃
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
8.22	142	412	19353	1292	399	10768	2712	0.03	0.002	0.002	0.29
Al	As	Ba	B	Cd	Cr	F	Hg	Ni	Pb	Cu	Zn
ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb	ppb
2.0	4.0	20	4610	0.10	0.30	1390	0.03	1.70	0.05	0.70	4.90

Tab. 20 – Composizione dell’acqua di mare media in termini di costituenti maggiori e minori riportata da Nordstrom *et al.*, 1979.

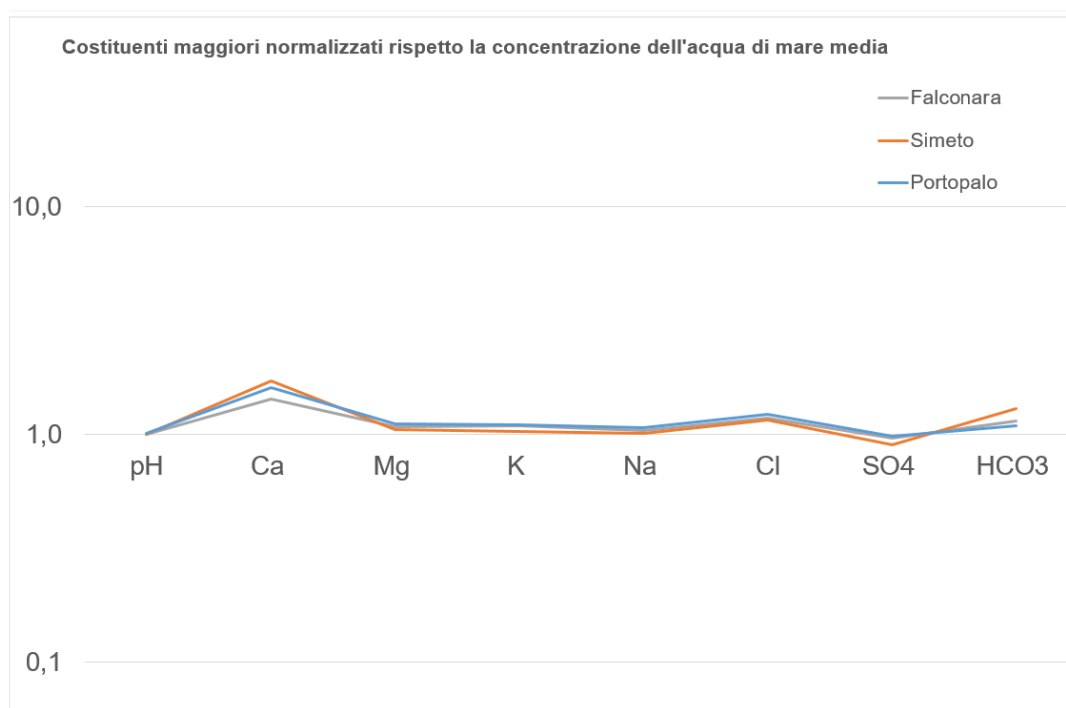


Fig. 101 – Grafico riportante i valori normalizzati di pH ed elementi maggiori rispetto alle medie dell’acqua di mare.

Dal rapporto $\text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Mg})$ calcolato sui valori medi delle acque di mare dei tre siti (Tab. 15; Fig. 99), si nota che: le acque di mare con maggiore concentrazione di Ca sono quelle del Simeto (0.30), seguite da Portopalo (0,32) e Falconara (0,30).

Viceversa, le acque di mare con maggiore concentrazione di Mg sono quelle di Falconara, seguite da Portopalo e Simeto.

I Costituenti in traccia presenti nelle acque analizzate sono: Li, B, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Se, Rb, Sr, U e Ti.

Di seguito sono riportati i valori medi in ppb determinati sui campioni prelevati dall'autunno 2020 all'autunno 2021 (Tab. 21; Fig. 102).

		Li	B	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Se	Rb	Sr	U	Ti
Portopalo	A0	222	6066	106	31,9	50,8	385	97,9	719	141	9393	6,6	700
	P	218	6049	97,6	24,9	56,8	421	91,3	719	133	9568	7,2	686
	E	223	6328	87,2	31,2	63,0	326	81,9	792	138	9636	7,6	672
	A	201	8038	65,1	137	269	8091	54,2	362	121	8701	3,1	688
Simeto	A0	228	5980	110	24,2	51,3	346	117	701	132	9153	8,3	673
	P	210	5989	75,5	27,1	55,0	333	69,1	735	137	9195	6,0	653
	E	210	6064	101	35,0	64,1	270	75,0	776	129	9466	6,6	636
	A	191	6020	25,8	90,3	217	624	48,5	346	133	9144	3,1	675
Falconara	A0	216	6181	94,4	23,3	55,9	272	86,2	722	135	9322	6,2	676
	P	193	5381	78,7	23,8	48,7	289	76,8	694	118	8420	7,1	603
	E	224	6525	108	29,5	59,0	292	70,9	682	131	9261	7,8	616
	A	188	6955	23,8	74,9	270	7509	50,7	307	113	8236	3,2	600

Tab. 21 – Concentrazioni in ppb degli elementi in traccia presenti nelle acque di mare campionate nei tre siti in: autunno 2020 (A0), primavera 2021 (P), estate 2021 (E), autunno 2021 (A).

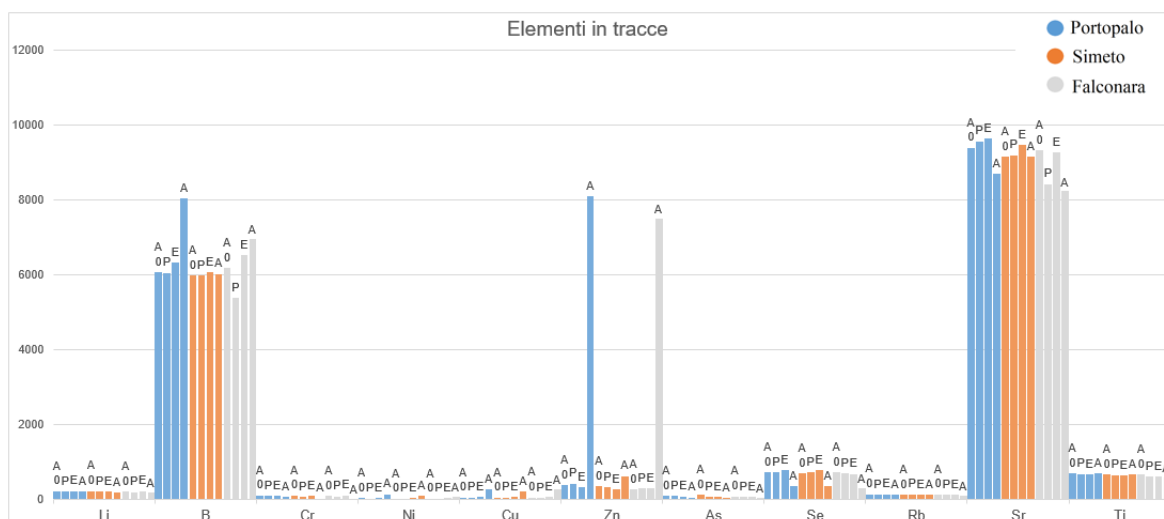


Fig. 102 – Istogramma delle concentrazioni in ppb degli elementi in traccia presenti nelle acque campionate nei tre siti in: autunno 2020 (A0), primavera 2021 (P), estate 2021 (E), autunno 2021 (A).

Si evidenzia che Sr e B hanno valori decisamente maggiori rispetto agli altri elementi superando rispettivamente i 9000 e i 6000 ppb. Solo Sr e Se seguono il trend degli elementi maggiori, come Na e K, con valori medi massimi in estate in tutti e tre i siti. Il B mostra per Portopalo e Simeto valori decisamente più alti nell'autunno 2021.

Come il B anche lo Zn ha dei valori medi anomali nel secondo periodo autunnale con picchi estremamente alti. Questo stesso trend con valori più alti nell'autunno 2021 si ha per

Ni e Cu in tutti e tre i siti. Le concentrazioni anomale riscontrate per i tre metalli di transizione (Ni, Cu e Zn) sono probabilmente riconducibili a processi di contaminazione antropica locale data la prossimità ad aree industriali dismesse o ancora in attività. Per gli altri elementi in tracce non è evidente alcun trend.

Questi costituenti, sono stati normalizzati rispetto all'acqua di mare media (Fig. 103):

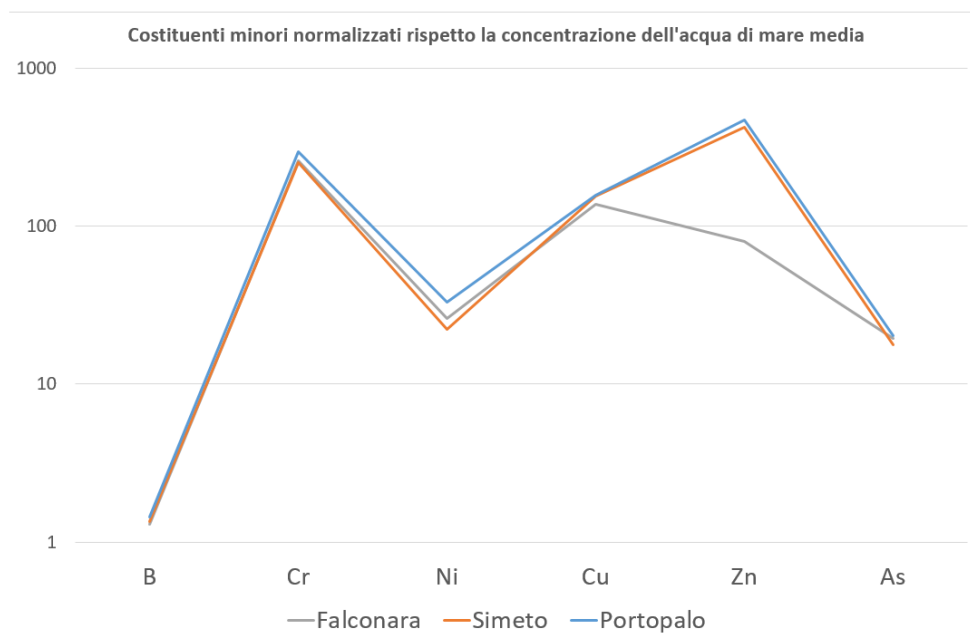


Fig. 103 – Grafico riportante i valori normalizzati delle concentrazioni di B, Cr, Ni, Cu, Zn e As presenti nelle acque di mare circostanti le biocostruzioni, campionate nei tre siti.

B, Cr, Ni, Cu, Zn e As hanno evidenziato concentrazioni molto superiori rispetto all'acqua di mare media fino a 3 ordini di grandezza. Tali anomalie sono state riscontrate in tutti i periodi di campionamento con valori variabili ma sempre estremamente superiori rispetto alle medie attese.

Tali elementi sono stati rilevati anche all'interno del biocemento, nei campioni raccolti nell'estate 2021 (Tab. 16).

4.10. I taxa associati alla biocostruzione

Le biocostruzioni rappresentano un substrato duro e articolato, con numerosi microhabitat, che si prestano alla colonizzazione di numerosi taxa sia bentonici sessili e vagili che nectonici.

I risultati mostrano una maggiore ricchezza di specie (sia floristica che faunistica) per il sito di Portopalo, rispetto a quanto rilevato per il sito di Falconara e per il sito del Simeto. Quest'ultimo presenta valori notevolmente più bassi.

Inoltre, sono state distinti i seguenti aspetti ecologici:

- **Portopalo:** la biocostruzione è scarsamente colonizzata da fauna sessile vivente. Nella porzione superiore, vi sono spugne che creano un sottile strato incrostante sulla superficie dei tubi ancora abitati da *S. alveolata* (Fig. 104 b), numerosi molluschi (*Chiton* sp., *Mytilaster minimus*, *Columbella rustica*) si trovano sulla biocostruzione, all'interno di cavità, o nel substrato roccioso limitrofo dove si possono trovare alcune attinie (*Anemonia viridis*) (Fig. 104). Le porzioni sciafile rivolte verso il substrato delle *croste*, dove *Sabellaria* è ormai assente, sono in parte incrostate da serpulidi (Tab. 22; Fig. 105), briozoi e idrozoi. Altri organismi come crostacei (anfipodi, isopodi, paguri e granchi) (Fig. 106), policheti erranti (Tab. 23), platelminti (*Polycladida* n.i.) e nemertini sono presenti sulla superficie o all'interno di tubi vuoti mentre numerosi pesci sono stati osservati tra le fronde algali e in prossimità della biocostruzione (Tab. 24; Fig. 107).

La comunità algale associata alle *croste* è molto ricca: sulla stessa biocostruzione prevalgono *Caulerpa cylindracea* e *C. taxifolia* v. *distichophylla* due specie aliene fortemente invasive, che crescono sulla superficie delle croste e colonizzano i tubi vuoti (Fig. 108); *Ericaria giacconei* è tra le specie più abbondanti riscontrate nel fondale interessato (Fig. 109; Tab. 25).



Fig. 104 – Esempi di fauna presente sulla porzione superiore delle *croste*: a) *Anemonia viridis* (Forsskål, 1775). b) Porifero incrostante. c) Poliplacofori del genere *Chiton* sp. d) *Mytilaster minimus* (Poli, 1795).

Serpulidi
<i>Serpula concharum</i> Langerhans, 1880
<i>Spirobranchus lamarckii</i> (Quatrefages, 1866)
<i>Vermiliopsis striaticeps</i> (Grube, 1862)
<i>Hydroides stoichadon</i> Zibrowius, 1971
<i>Filograna</i> sp.

Tab. 22 – Elenco dei serpulidi incrostanti la porzione inferiore della biocostruzione.



Fig. 105 – Fauna sciafila nella superficie inferiore della crosta: a) *Serpula concharum* Langerhans, 1880. b) *Spirobranchus lamarckii* (Quatrefages, 1866). c) *Vermiliopsis striaticeps* (Grube, 1862).

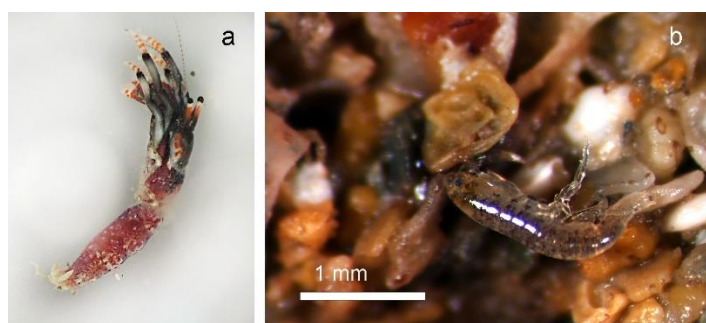


Fig. 106 – a) Paguro tubicolo *Calcinus tubularis* (Linnaeus, 1767) estratto all'interno di un tubo dove conduce una vita sedentaria utilizzando i lunghi peli presenti sugli arti per catturare le particelle in sospensione. b) Anfipode vivo sui granuli dei tubi.

Policheti erranti
<i>Marphysa sanguinea</i> (Montagu, 1813)
<i>Neanthes nubila</i> (Savigny, 1822)
<i>Halosydna</i> sp.
Nereididae
<i>Syllis</i> sp.1
<i>Syllis</i> sp.2

Tab. 23 – Elenco dei policheti erranti trovati all'interno dei tubi vuoti o sulla superficie superiore della biocostruzione.

Specie ittiche
<i>Mullus surmuletus</i> Linnaeus, 1758
<i>Symphodus tinca</i> Linnaeus, 1758
<i>Diplodus annularis</i> Linnaeus, 1758
<i>Diplodus vulgaris</i> (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817)
<i>Diplodus sargus</i> (Linnaeus, 1758)
<i>Thalassoma pavo</i> Linnaeus, 1758
<i>Coris julis</i> (Linnaeus, 1758)

Tab. 24 – Elenco delle specie ittiche presenti in prossimità della biocostruzione.



Fig. 107 – Fauna ittica tipica mediterranea di ambiente prevalentemente roccioso, tra le fronde algali e la biocostruzione: a) *Thalassoma pavo* Linnaeus, 1758 e *Diplodus sargus* (Linnaeus, 1758). b) *Symphodus tinca* Linnaeus, 1758. c) *Mullus surmuletus* Linnaeus, 1758; *Diplodus vulgaris* (Geoffroy Saint-Hilaire, 1817) e *Diplodus sargus* (Linnaeus, 1758).



Fig. 108 – *Caulerpa* sp. all'interno di un tubo vuoto di *S. alveolata*.

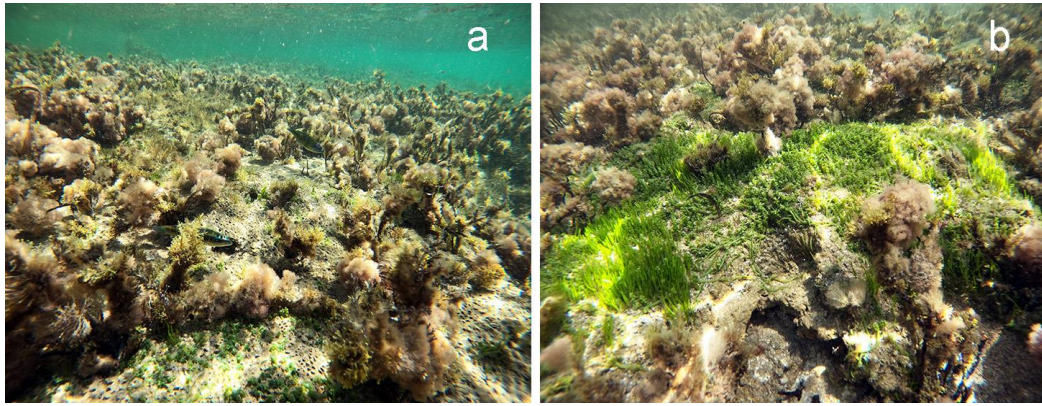


Fig. 109 – a) Habitat ad *Ericaria giacconei*. b) Croste ricoperte dalle specie aliene invasive *Caulerpa cylindracea* e *C. taxifolia* v. *distichophylla*.

		Portopalo	Simeto	Falconara
Rhodophyta	<i>Acrothamnion preissii</i> (Sonder) E.M.Wollaston	+		
	<i>Crouania francescoi</i> Cormaci et al.			+
	<i>Gelidium crinale</i> (Hare ex Turner) Gaillon			+
	<i>Gelidium spinosum</i> var. <i>hystrix</i> (J.Agardh) G.Furnari	+		
	<i>Gracilaria</i> sp.			+
	<i>Gymnogongrus griffithsiae</i> (Turner) C.Martius			+
	<i>Halophytis incurva</i> (Hudson) Batters			+
	<i>Hypnea musciformis</i> (Wulfen) J.V. Lamouroux			+
	<i>Jania virgata</i> (Zanardini) Montagne	+		
	<i>Laurencia caduciramulosa</i> Masuda et Kawaguchi	+		
	<i>Laurencia</i> cfr <i>obtusata</i> (Hudson) J.V.Lamouroux	+		
	<i>Laurencia intricata</i> J.V.Lamouroux	+		
	<i>Laurencia microcladia</i> Kützinger	+		
	<i>Laurencia marilzae</i> (Gil-Rodríguez et al.) Gil-Rodríguez et al.	+		
	<i>Rytiphlaea tinctoria</i> (Clemente) C.Agardh	+		
	<i>Vertebrata tripinnata</i> (Harvey) Kuntze			+
<i>Womersleyella setacea</i> (Hollenberg) R.E.Norris	+			
Ochrophyta	<i>Cystoseira compressa</i> (Esper) Gerloff et Nizamuddin	+		
	<i>Dictyopteris polypodioides</i> (De Candolle) J.V.Lamouroux		+	
	<i>Dictyota dichotoma</i> (Hudson) J.V.Lamouroux	+		
	<i>Dictyota fasciola</i> (Roth) J.V.Lamouroux	+		
	<i>Dictyota mediterranea</i> (Schiffner) G.Furnari	+		
	<i>Ericaria giacconei</i> Serio & G. Furnari	+		
	<i>Padina distromatica</i> Hauck	+		
	<i>Padina pavonica</i> (Linnaeus) J.V. Lamouroux	+		+
Chlorophyta	<i>Caulerpa cylindracea</i> Sonder	+		
	<i>Caulerpa taxifolia</i> (Vahl) C. Agardh v. <i>distichophylla</i> (Sonder) Verlaque et al.	+		+
	<i>Chaetomorpha linum</i> (O.F.Müller) Kützinger			+
	<i>Cladophora hutchinsiae</i> (Dillwyn) Kützinger			+
	<i>Cladophora laetevirens</i> (Dillwyn) Kützinger	+		+
	<i>Ulva lactuca</i> Linnaeus		+	+
	<i>Ulva pseudolinza</i> (Koeman & Hoek) H.S.Hayden, Blomster, Maggs, P.C.Silva, Stanhope & Waaland			+
	<i>Valonia utricularis</i> (Roth) C.Agardh	+		

Tab. 25 – Elenco floristico delle macroalghe prelevate su *S. alveolata* nei tre siti.

- **Foce del Simeto:** la superficie delle biocostruzioni degradata, ormai priva di individui di *S. alveolata*, è colonizzata da una abbondante fauna epibionte con diversi individui vivi come briozoi (*Copidozoum* sp., *Cryptosula pallasiana*), serpulidi (*Spirobranchus lamarckii*), ostreidi (*Ostreola stentina*) e balani (Fig. 110). Popolazioni di numerosi individui del bivalve *Mytilus galloprovincialis* sono associate alle biocostruzioni in crescita sia su quelle del fondo mobile che sugli scogli intorno all'isolotto colonizzando spesso la loro porzione basale (Fig. 111). Piccoli mitilidi sono fissati col bisso sui tubi della biocostruzione mentre numerosi crostacei (anfipodi, isopodi e granchi) vivono all'interno dei tubi vuoti o sulla loro superficie esterna.

Le alghe sono assenti nei fondali limitrofi alla biocostruzione mentre su *Sabellaria*, sono presente popolamenti a *Ulva lactuca* e *Dictyopteris polypodioides* che colonizzano abbondantemente le parti morte e degradate dei cuscini (Figg. 111; Tab. 25).

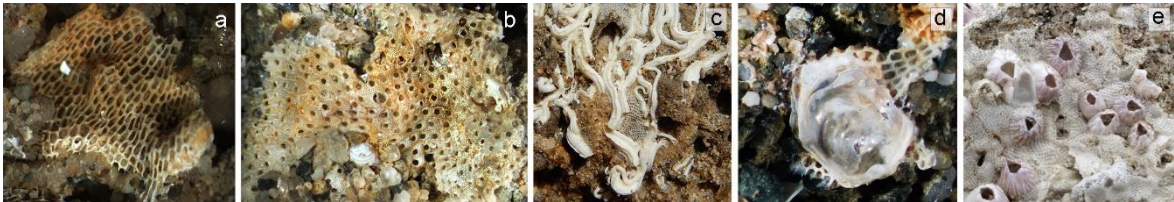


Fig. 110 – Fauna incrostante la superficie della biocostruzione: a) *Copidozoum* sp. b) *Cryptosula pallasiana* (Moll, 1803). c) *Spirobranchus lamarckii* (Quatrefages, 1866). d) *Ostreola stentina* (Payraudeau, 1826). e) *Balanus* sp.

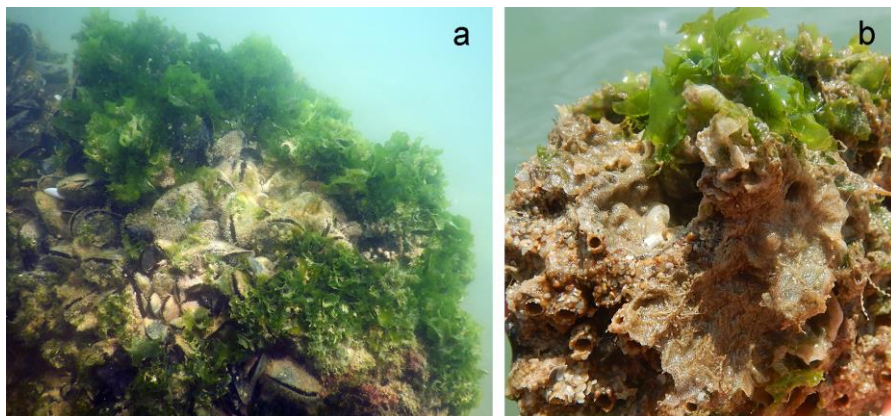


Fig. 111 – a) Popolazioni numerose di *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 e *Ulva lactuca* associate alle biocostruzioni. b) Porzione di biocostruzione morta superiormente popolata da *Ulva lactuca* e inferiormente incrostata da briozoi e serpulidi.

- **Falconara:** la superficie delle biocostruzioni, in crescita, è colonizzata da poca fauna epibionte, come alcune attinie, qualche serpulide (*Hydroides* sp.), pochi briozoi (*Amathia delicatula*) e piccoli bivalvi (*Striarca lactea*, *Mytilaster minimus*) (Fig. 112). Tuttavia, la biocostruzione ospita diversi organismi come, granchi (*Eriphia verrucosa*) e pesci (*Lipophrys trigloides*) che trovano riparo dentro alcune cavità da essi stessi prodotte nella biocostruzione (Fig. 113). Altri organismi, come gasteropodi (*Columbella rustica*), pascolano sulla loro superficie.

Le alghe formano localmente sulle biocostruzioni degradate una esigua comunità algale (Fig. 114; Tab. 25).

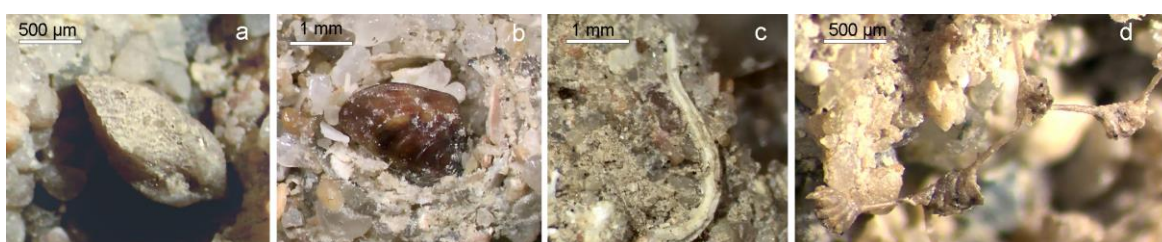


Fig. 112 – Fauna incrostante o attaccata alla biocostruzione: a) *Striarca lactea* (Linnaeus, 1758) all'interno di un'apertura del tubo. b) *Mytilaster minimus* (Poli, 1795) fissato tramite bisso ai tubi della biocostruzione. c) *Hydroides* sp. d) *Amathia delicatula* Souto, Fernández-Pulpeiro e Reverter-Gil, 2010.

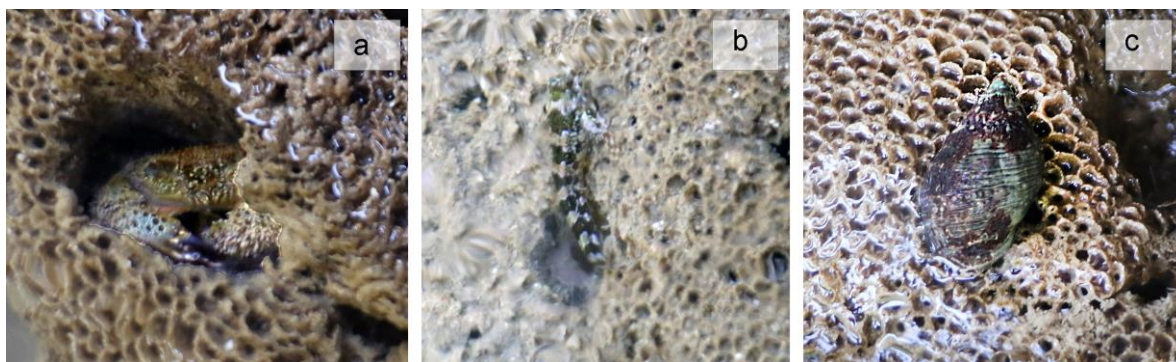


Fig. 113 – Fauna all'interno di tane scavate sulla superficie della biocostruzione: a) *Eriphia verrucosa* (Forskål, 1775). b) *Lipophrys trigloides* (Valenciennes, 1836). c) *Columbella rustica* (Linnaeus, 1758).



Fig. 114 – a-b) Alghe sulla superficie della biocostruzione. c) *Caulerpa cylindracea*.

5. DISCUSSIONE

5.1. Distribuzione geografica

L'intensa fase di ricerca bibliografica e lettura critica ha rivelato che, ad esclusione di quelli della costa ionica siciliana, tutti i record mediterranei di *S. alveolata* sono ubicati nel bacino occidentale del Mediterraneo. Si tratta di una specie che predilige condizioni di acque temperato-fredde come quelle delle coste atlantiche europee e si è diffusa nel Mediterraneo occidentale attraverso lo stretto di Gibilterra. *S. alveolata* condivide una distribuzione geografica simile alla co-generica *S. spinulosa* ma, quest'ultima mostra una più spiccata affinità per il freddo distribuendosi maggiormente nell'Atlantico settentrionale (costa orientale britannica) (Jenkins *et al.*, 2018). Nel Mediterraneo sono entrambe presenti nel bacino occidentale e nel Mar Ionio ma *S. spinulosa* presenta aggregati più modesti, invece, in Adriatico, dove *S. alveolata* ad oggi non è segnalata, forma biocostruzioni ben sviluppate e abbondanti (Gadaleta *et al.*, 2015; Lisco *et al.*, 2017).

Nella maggior parte dei ritrovamenti le biocostruzioni a *S. alveolata* sono di estensione discontinua e non uniforme.

I tre siti, oggetto della presente tesi, contribuiscono a conoscere e ad integrare la distribuzione delle specie lungo le coste siciliane e in particolare in quelle del Canale di Sicilia (Portopalo e Falconara) e del Mar Ionio (foce del Simeto) dove, la presenza delle biocostruzioni a *S. alveolata*, è una prima segnalazione in assoluto andando a costituire l'avamposto più orientale della specie nel bacino del Mediterraneo.

I risultati di questo studio biogeografico evidenziano che le biocostruzioni a *S. alveolata*, nelle aree costiere mediterranee, sono abbastanza diffuse. Inoltre, la maggior parte delle segnalazioni riguarda biocostruzioni di grandi dimensioni come quelle delle coste tirreniche italiane. In Sicilia, i ritrovamenti comprendono non solo biocostruzioni piuttosto grandi, come quelle di Eraclea Minoa e Donnalucata (Iacofano *et al.*, 2015; Schimmenti *et al.*, 2016; Bertocci *et al.*, 2017) ma anche recentissimi ritrovamenti pubblicati dalla sottoscritta nel corso della presente tesi (Sanfilippo *et al.*, 2019). Queste sono di piccole dimensioni e distribuite in modo discontinuo, sfuggendo per questo al loro ritrovamento, che è stato possibile solo grazie ad un attento rilevamento a piccola scala. La loro crescita e sviluppo è infatti spesso ostacolata dalle condizioni ambientali in quanto strettamente dipendenti dall'idrodinamismo (Gruet, 1971; Wilson, 1971; Jackson-Bué *et al.*, 2021) e dall'apporto sedimentario (Gruet, 1971; Wilson, 1971; Desroy *et al.*, 2011), oltre che molto

sensibili all'impatto antropico dato, per esempio, dal calpestio e la pesca (Vorberg, 2000; Dubois *et al.*, 2002; Plicanti *et al.*, 2016; Bonifazi *et al.*, 2019). Si tratta quindi di strutture effimere, soggette ad una forte riduzione o scomparsa in brevissimo tempo, anche nel corso di una stagione. Dare un quadro della distribuzione di questa specie stabile negli anni, è quindi difficile se non per le biocostruzioni più grandi.

Tra le tre morfologie di crescita riscontrate prevale quella a *banco* che riesce meglio a perdurare nel tempo perché di maggiori dimensioni. Al contrario le biocostruzioni a *crosta* o a *fungo*, di limitato areale, possono disgregarsi a causa dell'erosione fino a scomparire del tutto (Wilson, 1971).

5.2. Distribuzione stratigrafica

Le mie ricerche hanno portato ad escludere che esistano a tutt'oggi affioramenti di *reef* fossili a *Sabellaria*. L'assenza di ritrovamenti fossili sarebbe dovuta alla scarsa potenzialità di fossilizzazione di questa tipologia di *reef*. Infatti, l'adesivo proteico, nonostante sia particolarmente efficace nell'incollare saldamente gli elementi della struttura, è costituito da sostanza organica soggetta a decomposizione nel corso dei processi tafonomici più precoci (biostratinomia). Conseguentemente, gli elementi della biocostruzione tenderanno a disgregarsi (processo biostratinomico: disarticolazione) diffondendosi disordinatamente nel sedimento marino di ambiente poco profondo o in sospensione nelle masse d'acqua (Stewart *et al.*, 2004).

5.3. Struttura e composizione dei tubi

I risultati della tesi hanno integrato la descrizione della struttura del tubo ai precedenti studi essendo questi stati fatti per la prima volta solo con una raffigurazione della parete del tubo per il genere *Phragmatopoma* del Pacifico (Scholl, 1958) (Fig. 115) e successivamente con la descrizione della struttura interna della parete in *S. alveolata* (Bodeur *et al.*, 1987) dove viene riconosciuta una certa disposizione del sedimento agglutinato a formare due strati concentrici con granuli di differente morfologia (uno strato interno, con elementi appiattiti disposti a formare un pavimento, e uno strato esterno con grandi bioclasti disposti obliquamente).

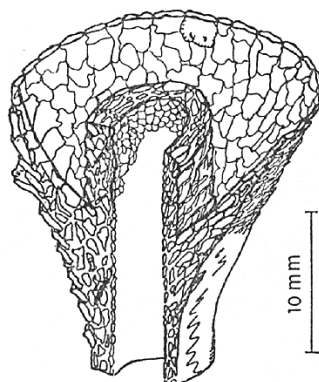


Fig. 115 – Porzione anteriore del tubo in sezione longitudinale di *Phragmatopoma californica* (da Scholl, 1958).

Tuttavia, in questa descrizione Bodeur non riporta alcuna immagine che raffiguri tale struttura. Più recentemente Naylor e Viles (2000) su *S. alveolata* del nord Atlantico figurano il tubo in sezione, solo accennando alla struttura stratificata senza aggiungere dettagli.

Lo studio sui campioni della tesi, unitamente al lavoro preliminare di Sanfilippo *et al.* (2019) su *S. alveolata* di Sampieri, nella costa ragusana del Canale di Sicilia, hanno permesso di integrare la descrizione dell'architettura del tubo e, per la prima volta, raffigurare il modello corretto della sua struttura interna, che riconosce la presenza di un ulteriore strato (Fig. 51). Questa struttura a strati concentrici conferma la capacità di *S. alveolata* di selezionare i granuli di sedimento per dimensione e forma e disporli all'interno di differenti strati.

L'analisi dei campioni dei tre siti ha portato le seguenti considerazioni: quando l'animale non ha a disposizione elementi organogeni sottili e laminari (frammenti di conchiglie), per costruire lo strato interno, sceglie di utilizzare anche elementi tozzi, purché presentino un lato della superficie appiattita. Ciò è stato osservato nelle biocostruzioni del Simeto in cui il sedimento a disposizione nell'ambiente è dato prevalentemente da granuli litici isodiametrici. Elementi sabbiosi tozzi isodiametrici di varie dimensioni sempre vanno a costituire lo strato intermedio che è quello più spesso. Lo strato esterno, invece, è formato da una sola fila di elementi e può essere discontinuo o mancare del tutto come nel caso del Simeto, dove scarseggiano nell'ambiente circostante bioclasti grossi e appiattiti come frammenti di conchiglie o piccole valve intere.

Riguardo la dimensione del sedimento agglutinato, nella biocostruzione di Falconara son stati riconosciuti elementi di granulometria maggiore in tubi di individui adulti di grandi dimensioni. Ciò è coerente con i dati di Vovelle (1965) e Gruet (1984) che correlano le

dimensioni dei granuli alla grandezza dell'organo costruttore. La granulometria del sedimento agglutinato sarebbe, quindi, proporzionale all'età dell'animale, aumentando soprattutto dal primo al terzo anno di vita per poi stabilizzarsi quando il diametro del tubo ha raggiunto 400-600 μm .

Sia le dimensioni del sedimento costituente la parete dei tubi (vedi paragrafo 4.4. Risultati) che quelle delle porzioni di biocostruzioni campionate (vedi paragrafo 4.7. Risultati), sono costanti e corrispondono a delle sabbie medio-grosse. Questi valori si scostano dai dati di letteratura (Vovelle, 1965; Gruet, 1984; Bodeur *et al.*, 1987; Dubois *et al.*, 2006) che riportano sempre una granulometria corrispondente alla sabbia media (200-500 μm) per i tubi degli individui adulti. Ciò potrebbe essere dovuto ad una maggiore disponibilità di sedimento sabbioso grossolano, in ambienti ad idrodinamismo molto elevato dovuto a moto ondoso come quello dei siti di studio. Nelle località delle coste atlantiche francesi le granulometrie riportate in letteratura invece, dipendono da un idrodinamismo relativamente minore essendo principalmente dovuto a correnti di marea.

La frazione fine, che comunque è subordinata aggirandosi intorno al 12%, si ritrova nei tubi di individui di piccola taglia essendo la granulometria degli elementi selezionati e agglutinati dal verme proporzionale alle dimensioni del suo organo costruttore. In parte, tuttavia, la presenza sia pur minima della frazione di sabbia molto fine e di sabbia molto grossa potrebbe attribuirsi al sedimento di dimensioni variabili depositato per gravità negli spazi di intertubo che riempie i vuoti e non viene selezionato né cementato dall'animale.

I valori granulometrici dei tubi della biocostruzione di Falconara e Simeto, con un contenuto medio di sabbie medie e grosse confrontati con quelli del fondale, evidenziano chiaramente che c'è una selezione da parte di *Sabellaria* nel costruire i tubi.

Riguardo la composizione, i sedimenti differiscono a seconda delle località studiate: la biocostruzione del Simeto è quasi esclusivamente composto da elementi di natura litica, quella di Falconara presenta sia elementi litici che organogeni, a Portopalo nei tubi prevalgono gli elementi organogeni. Le frazioni granulometriche del sedimento alla base delle biocostruzioni corrispondono a delle sabbie medie.

La differenza è data dalla componente organogena che risulta essere più elevata nel sedimento dei tubi. Risulta, pertanto, che il polichete, per la costruzione del tubo, seleziona, mediante l'organo costruttore, i granuli solo in base alle dimensioni e alla forma, preferendo la componente organogena che viene messa più facilmente in sospensione dal moto ondoso e che a parità di dimensioni, presenta un peso specifico minore, con dispendi energetici più ridotti per gli animali; tutto ciò è in accordo con quanto riportato da altri Autori (Giordani

Soika, 1956; Taramelli Rivosecchi, 1961; Volvelle, 1971; Gruet e Boudier, 1994; Delbono *et al.*, 2003).

5.4. Modello di crescita e morfologie delle biocostruzioni

Le osservazioni condotte sulle biocostruzioni presenti nei tre siti campionati hanno permesso di ricostruirne il modello di crescita e distinguere le tre differenti morfologie a *crosta*, a *cuscinio/fungo* e a *banco*. Queste terminologie non sempre espressamente richiamate nei lavori riguardanti *Sabellaria alveolata*, pur essendo già state introdotte da Gruet (1982) che riporta e descrive “croste” o “*veneer*”, “cuscini”/“funghi” (Lucas e Lefèvre, 1956) altrimenti definiti “bouquets” (Hommeril, 1962) e “banchi” (Fig. 116). Il modello di crescita che prevede il passaggio da una morfologia a *crosta* a quella a *banco* è descritto e figurato molto esaurientemente sempre da Gruet (1972, 1982) e successivamente viene ripreso da Fournier (2013) che, applica questo modello su biocostruzioni delle coste atlantiche francesi, documentando fotograficamente i vari passaggi da una morfologia all'altra (Fig. 118). Le tipologie morfologiche sono sinteticamente raffigurate in Delbono *et al.* (2003) basandosi su osservazioni svolte su biocostruzioni delle coste liguri (Fig. 117).

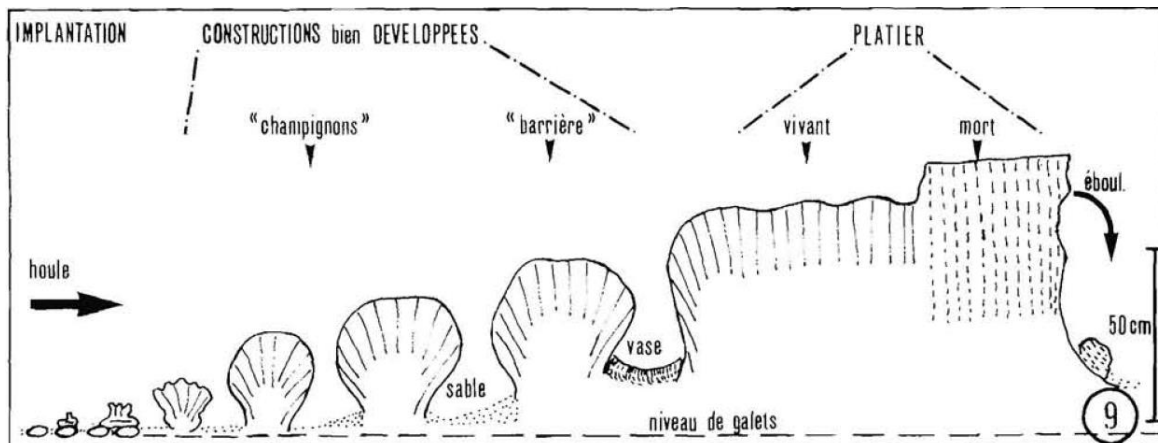


Fig. 116 – Morfologie di biocostruzione a *S. alveolata* (da Gruet, 1972).

Nella biocostruzione di Falconara, è stata riconosciuta, inoltre, la fase ultima dell'evoluzione del banco, con aggregati di individui morti, non più in crescita in cui le superfici dei tubi mostrano chiari segni di erosione e smantellamento, come ben evidenziato nel modello di Gruet, 1972 (Fig. 116).

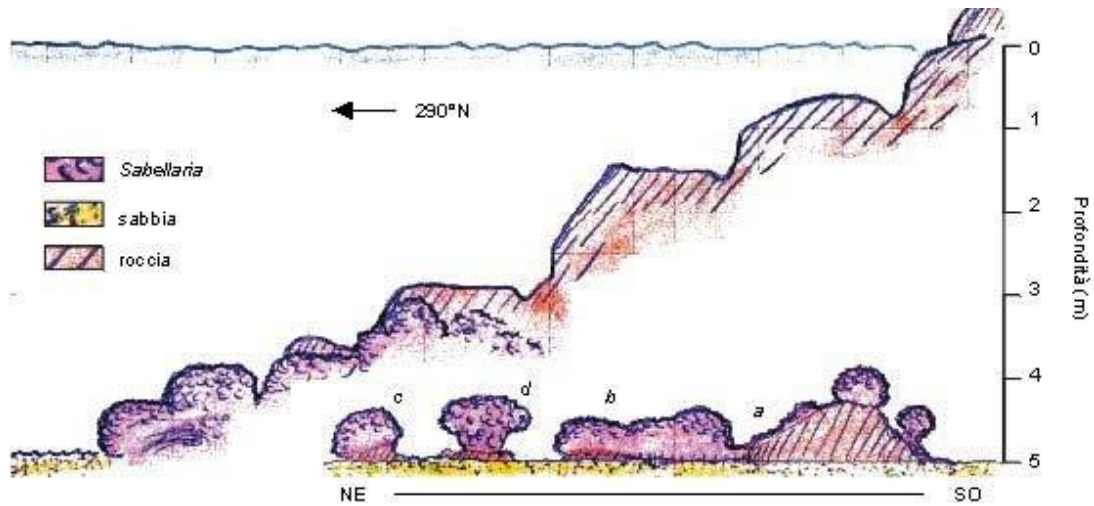


Fig. 117 – Profilo schematico dei reef di *Sabellaria alveolata* Morfologia delle biocostruzioni: a = strato; b = banco (derivato da coalescenza e fusione di strati limitrofi ed accrezione verticale); c = cuscino; d = fungo (derivato da erosione differenziale alla base di un cuscino) (da Delbono *et al.*, 2003).



Fig. 118 – Documentazione fotografica della dinamica dei reef delle coste atlantiche francesi che evidenziano i passaggi dalla morfologia 1) a *crosta* su substrati duri; 2) a *cuscino* tondeggianti e 3) a *banco* (fusione dei cuscini in crescita) (da Fournier, 2013).

Nella presente tesi la morfologia a *crosta* (o *vener*) descritta a Portopalo rappresenta una prima segnalazione per la Sicilia dove le biocostruzioni, fino a prima conosciute, sono *cuscini* o *banchi* (Iaciofano *et al.*, 2015; Schimmenti *et al.*, 2016; Bertocci *et al.*, 2017). Gruet e Bodeur (1995) descrivono i *vener* come biocostruzioni crostose, formate da tubi prostrati nella loro estremità distale subparallela al substrato e con aperture dirette verso la costa. In questo lavoro, sulla base di quanto detto da questi Autori, la morfologia a *crosta*, viene descritta, in maniera più approfondita e per la prima volta raffigurata. Questo tipo di biocostruzione potrebbe rappresentare uno stadio iniziale di sviluppo che precede la formazione di altre di maggiori dimensioni, secondo il modello descritto da Gruet (1982). Tuttavia, è anche possibile ipotizzare che le *croste* a *Sabellaria* di Portopalo, siano con

maggior probabilità formate in seguito alle particolari condizioni ambientali del sito, caratterizzate da estremo idrodinamismo, che inibisce la crescita verso l'alto dei tubi, come ipotizzato da Gruet e Bodeur (1995) e come osservato dalle condizioni meteo-marine nei tre anni di monitoraggio (vedi paragrafo 3.1.1. Materiali e metodi). In questo caso, quindi, le *croste* rappresenterebbero una morfologia dello stadio maturo che non si sviluppa in altezza. La formazione delle tre morfologie individuate nei siti presi in esame, dipende da variazioni locali di parametri ambientali come idrodinamismo e apporto sedimentario così come descritto per le coste atlantiche francesi (Gruet, 1982; Fournier, 2013).

Dalle osservazioni condotte negli ultimi venti anni (Menna *et al.*, 2019; Soukissian e Sotiriou, 2022) sui venti che influenzano i tre siti si è potuto evidenziare come i valori medi annuali della loro velocità siano sempre più bassi in estate rispetto all'inverno; i valori maggiori, inoltre, si riscontrano sempre nel sito di Portopalo, mentre a Falconara si hanno valori minori e ancor più bassi alla foce del Simeto (Fig. 20 a). Anche riguardo le correnti costiere dominanti, le velocità medie annue maggiori si riscontrano al sito di Portopalo e le minori alla foce del Simeto (Fig. 20 b). La presenza di questi venti dominanti e delle correnti marine costiere, unitamente alla fisiografia dei fondali ospitanti le biocostruzioni, hanno determinato delle locali condizioni idrodinamiche tipiche di ciascun sito. Anche il periodo corrispondente ai tre anni di monitoraggio effettuato durante la tesi ha evidenziato condizioni meteo-marine e idrodinamiche più estreme a Portopalo, dove venti moderati (Fig. 21) e, di conseguenza, mare mosso diretto prevalentemente verso la linea di costa sono stati osservati durante tutte le stagioni per circa il 30-80% dei giorni mensili (sito web Windy.app). Queste condizioni hanno avuto un ruolo principale sui processi di erosione/sedimentazione costiera e di conseguenza hanno influito sull'evoluzione delle biocostruzioni a *S. alveolata* presenti.

I dati ottenuti sulle condizioni meteo-marine hanno permesso di confermare l'ipotesi che la morfologia a *crosta* con i suoi piccoli spessori e tubi sempre prostrati, presente nel sito di Portopalo, è correlata al maggiore grado idrodinamismo (vedi paragrafo 3.1.1. Materiali e metodi). Nelle altre due morfologie, invece, l'elevato apporto sedimentario per la vicinanza alle foci fluviali e la turbolenza multidirezionale da moto ondoso, data dalla presenza degli scogli che ne smorzano l'azione diretta sulle biocostruzioni, garantiscono la presenza costante di sabbia in sospensione che si mantiene in prossimità delle biocostruzioni senza essere trasportata altrove da correnti eccessivamente forti (come a Portolalo). Correnti non eccessivamente forti durante tutto l'anno, quindi, potrebbero essere le condizioni ideali per lo

sviluppo delle biocostruzioni e per la loro crescita in altezza così come avviene a Falconara e alla foce del Simeto (Fig. 119).

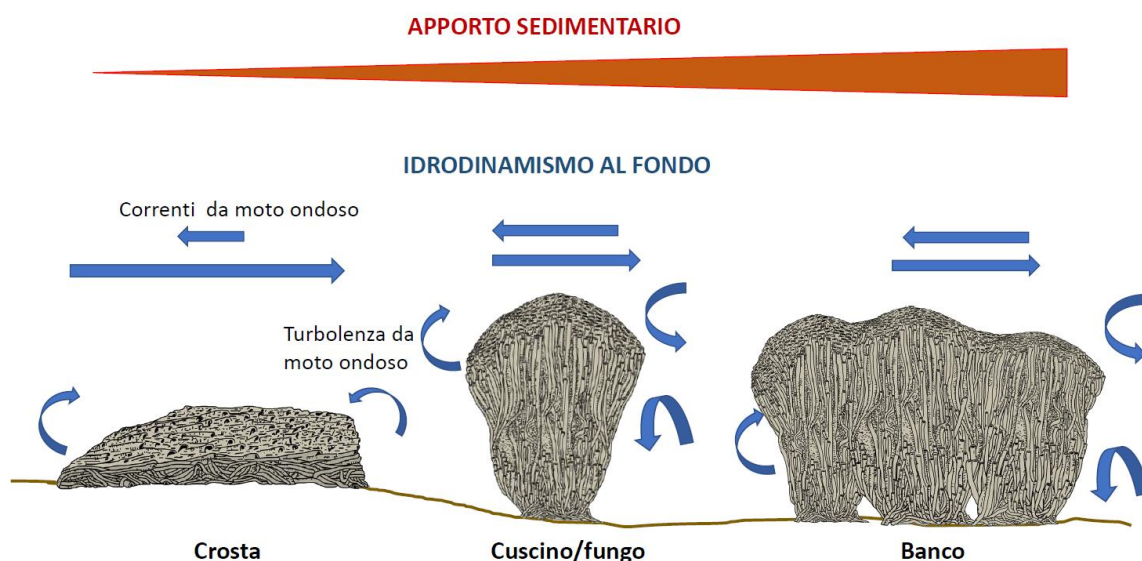


Fig. 119 – Modello di correlazione tra le tipologie morfologiche delle biocostruzioni a *S. alveolata* e fattori edafici quali idrodinamismo al fondo e apporto di sedimento.

È stato osservato inoltre che, in ambienti o in settori delle biocostruzioni di *S. alveolata* in cui vi è una maggiore corrente o un elevato idrodinamismo, come a Portopalo o in alcuni *cuscini* più esposti al Simeto e a Falconara, il collareto aperturale è molto allungato asimmetricamente e forma una sorta di tettuccio a protezione dell'apertura del tubo che verrà così rivolta verso il lato più riparato permettendo una migliore cattura del sedimento e del nutrimento sospeso e nello stesso tempo evitando la morte dell'animale.

La crescita dei tubi di *S. alveolata* varia in relazione ai parametri descritti di apporto sedimentario e di idrodinamismo. Gli studi di Gruet del 1972 hanno mostrato che la lunghezza dei tubi è variabile da un mese all'altro così come da un anno all'altro. Non si registra un trend di crescita uniforme come per le conchiglie dei bivalvi o i tubi dei serpulidi. Piuttosto, la crescita della *Sabellaria* è variabile e discontinua in accordo con il tasso di sedimentazione.

5.5. Evoluzione spazio-temporale delle biocostruzioni

Un modello che descrive l'evoluzione spazio-temporale di queste biocostruzioni, si conosce solo per l'Atlantico, sempre con gli studi di Gruet (1982), il quale evidenzia l'estrema dinamicità dei *reef*, con estensione e morfologia variabili negli anni in rapporto a regime idrodinamico e sedimentario (Fig. 120). Per il Mediterraneo non esiste ancora un modello di riferimento ma solo recenti studi sulla evoluzione di queste strutture che utilizzano nuove tecnologie di acquisizione 3D (Ventura *et al.*, 2020) (Fig. 121).

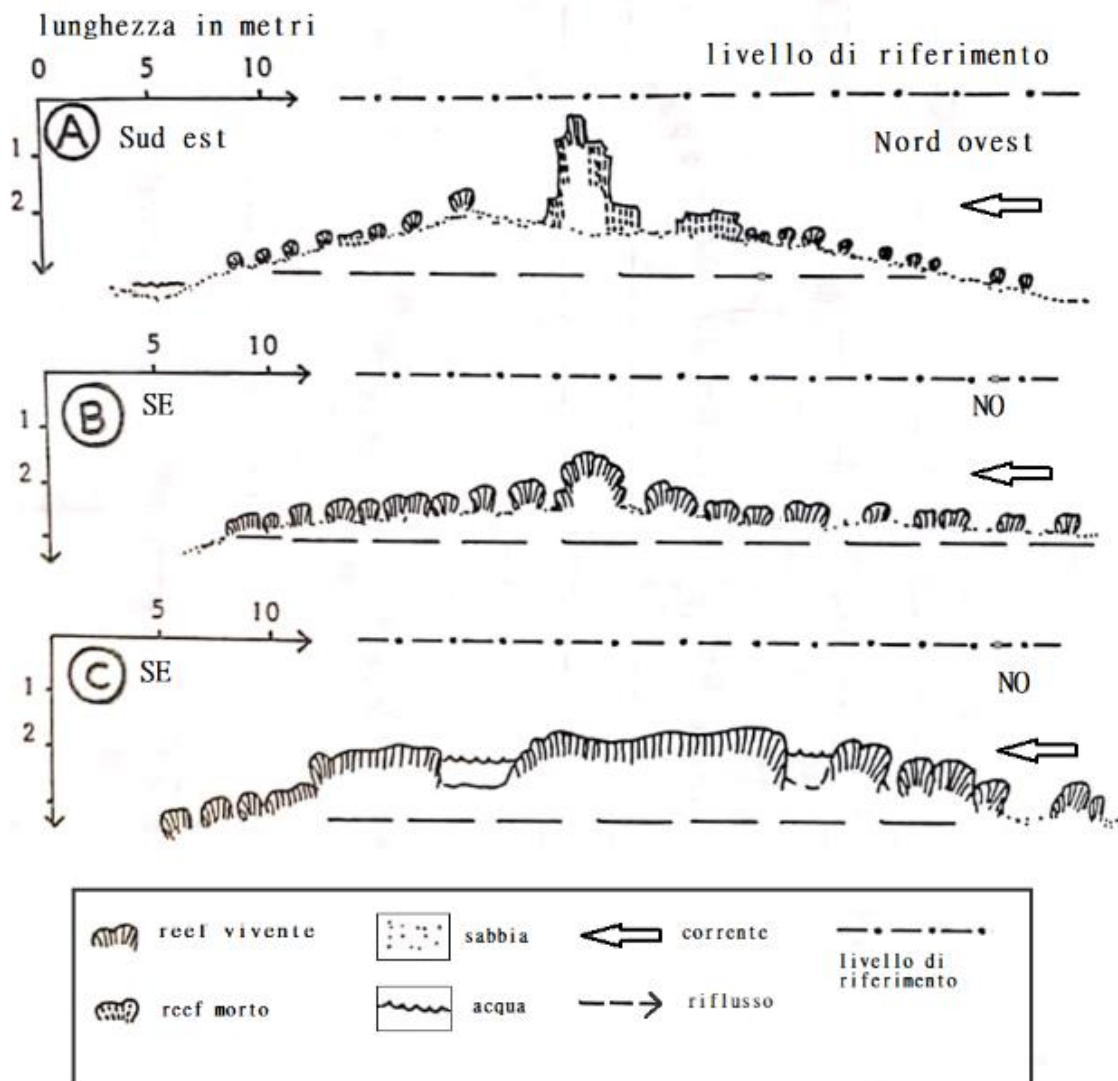


Fig. 120 – Modello che schematizza l'evoluzione spazio-temporale dei *reef* a *Sabellaria* in cui si succedono all'interno della stessa area, fasi di distruzione e crescita. A) Crescita di piccoli cuscini lateralmente ad un nucleo centrale di biocostruzione morta. B) Crescita e coalescenza dei cuscini. C) Ulteriore coalescenza e formazione di un banco rilevato (da Gruet, 1982).

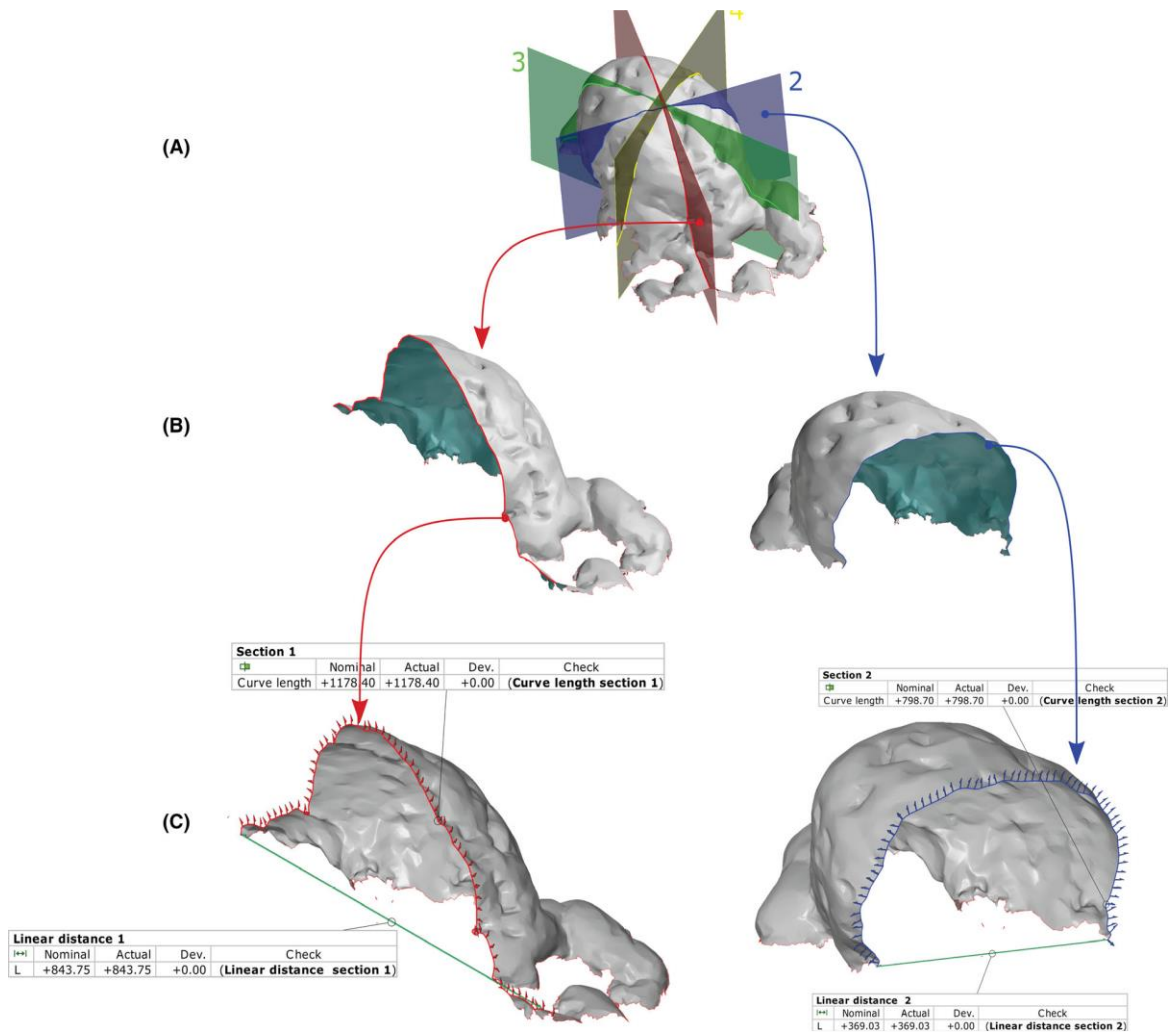


Fig. 121 – Fotogrammetria subacquea ravvicinata per raffigurare la crescita e le modifiche strutturali di ogni parte della biocostruzione (da Ventura *et al.*, 2020).

Il principale agente inibitorio della crescita delle biocostruzioni a *Sabellaria* è il cambiamento del regime idrodinamico che, se troppo debole, causa la mancanza del sedimento in sospensione necessario per la costruzione dei tubi e del particolato alimentare (Gruet, 1972; Bodeur *et al.*, 1987; Fournier, 2013). L'assenza del ricambio delle acque circostanti la biocostruzione fa sì che i prodotti di scarto del metabolismo non vengano rimossi causando un accumulo di scorie metaboliche e l'intasamento degli interstizi che porteranno alla morte dell'animale. Al contrario, se l'idrodinamismo è troppo elevato, in base alle condizioni locali, la biocostruzione può essere distrutta meccanicamente dal moto ondoso o può essere parzialmente o totalmente insabbiata come verificatosi al Simeto e a Portopalo. Quando l'idrodinamismo è eccessivamente forte, inoltre, il sedimento sospeso nell'acqua circostante la biocostruzione ha un movimento troppo rapido e il verme non può catturarlo per la costruzione dei tubi. La crescita può arrestarsi anche a causa della scarsa

disponibilità del sedimento o della scomparsa, per diverse cause, naturali o antropiche, della sorgente sabbiosa. Con il susseguirsi delle stagioni, i parametri geochimici delle acque circostanti le biocostruzioni cambiano. Un abbassamento della temperatura gioca un ruolo importante per la sopravvivenza dei vermi. Un arresto della crescita della biocostruzione può associarsi anche ad un'elevata abbondanza di epiflora o epifauna (Wilson, 1971), come ipotizzabile per le croste di Portopalo.

In linea generale le biocostruzioni osservate nei tre siti mostrano delle oscillazioni stagionali, con picchi di individui giovani di nuova formazione nel periodo autunnale. Ciò è in buon accordo con i dati di Lisco *et al.* del 2020 i quali hanno osservato per *S. alveolata* il massimo numero di individui in autunno (7200 individui su m²) mentre, questo valore, diminuisce durante tutte le altre stagioni. La frammentazione della biocostruzione, invece, diminuisce durante la primavera ed aumenta nella stagione invernale a causa dell'erosione da parte del moto ondoso e in estate per il calpestio dei bagnanti.

Nel sito di Portopalo, in questi tre anni di rilievi, si è assistito ad una progressiva riduzione della biocostruzione fino alla sua scomparsa nell'area investigata (Fig. 72). La biocostruzione presentava la sua massima estensione nell'estate 2020, periodo successivo al lock-down in cui, a causa dell'emergenza Covid-19, il turismo balneare era inesistente, le condizioni meteomarine erano ottimali (Fig. 21) per la presenza di sedimento sospeso necessario alla crescita dei tubi e la copertura algale ha svolto la funzione di protezione e mantenimento delle croste. Con la riapertura degli stabilimenti balneari e la ripresa delle attività turistiche, nell'autunno dello stesso anno, la biocostruzione ha subito una locale riduzione a causa del *trampling* dei bagnanti. Questa riduzione ha proseguito nei successivi anni a causa di eventi naturali quali l'elevato idrodinamismo che ha smantellato quasi completamente alcune croste e fortemente abraso altre (Fig. 21). L'idrodinamismo eccessivo circostante la biocostruzione non ha permesso al sedimento di essere catturato dai vermi per la costruzione dei tubi. Lo smantellamento delle prime biocostruzioni mappate e la formazione di nuove croste più ad est, lascia pensare che *S. alveolata* sia in grado di resistere a condizioni avverse spostando il suo areale per colonizzare ambienti limitrofi in cui determinati parametri, come l'apporto sedimentario, rispondono alle esigenze necessarie per la crescita e sopravvivenza della biocostruzione.

Nel sito della foce del Simeto, durante questi tre anni di rilievi, le biocostruzioni hanno evidenziato una riduzione dei cuscini più distanti dall'isolotto e una leggera crescita di quelli limitrofi. Le biocostruzioni nel complesso presentavano la loro massima estensione nell'estate 2020 (Fig. 78). La loro presenza e la loro crescita è strettamente legata alle

variazioni locali dei parametri ambientali come l'idrodinamismo e l'apporto fluviale. Forti mareggiate a seguito di venti tesi e forti nei mesi autunnali (Fig. 21), hanno causato la distruzione dei cuscini più a nord dell'area: a testimonianza di ciò, i numerosi frammenti trovati nel fondale limitrofo nel rilievo del 2020. I cuscini vicino agli scogli frangiflutti, essendo protetti dalla forza del moto ondoso diretta, invece, sono cresciuti in estensione e in altezza diventando coalescenti. L'apporto di sedimento fluviale (Chiocci e Casalbore, 2011; Di Stefano *et al.*, 2013), inoltre ha prodotto un'elevata torbidità e ha mantenuto più o meno infangate le biocostruzioni per tutto il periodo. I dati relativi alle analisi chimiche effettuate in queste acque mostrano, già dagli anni Novanta (Ciravolo *et al.*, 1997; Madonia e Palmeri, 1999) concentrazioni di nitrati e fosfati superiori alle soglie consentite dal D.P.R. 236/88. La presenza di queste sostanze, dovuta alla contaminazione a seguito dell'erosione di suoli contenenti fertilizzanti organici o chimici, è registrata anche successivamente (Muzirafuti *et al.*, 2019). La massiccia colonizzazione del popolamento algale di *Ulva lactuca* sulle biocostruzioni è probabilmente dovuto all'apporto di questi nutrienti dal fiume e, insieme alla presenza di mitili, ha favorito la degradazione delle biocostruzioni di *S. alveolata* in accordo con quanto detto in Dubois *et al.* (2006).

Anche nel sito di Falconara si è evidenziata una riduzione dell'estensione delle biocostruzioni nel corso dei tre anni di monitoraggio. Così come per le biocostruzioni degli altri due siti, la massima estensione si è osservata nel rilievo del 2020 (Fig. 86). In quest'area l'elevato idrodinamismo ha giocato un ruolo fondamentale sull'erosione della costa e sulla distruzione di grossi blocchi di biocostruzioni. Eventi di elevato rilascio di sedimento invece hanno causato l'insabbiamento locale delle biocostruzioni più piccole. In quest'area ha giocato un ruolo importante anche l'impatto antropico: la presenza di cantieri limitrofi all'area studiata (Fig. 122), nel 2022, ha causato il rilascio di materiale detritico di natura diversa, lungo la costa modificando la composizione granulometrica del sedimento in prossimità del substrato sabbioso delle biocostruzioni.



Fig. 122 – Cantiere edilizio antistante lo scoglio in cui affiorano le biocostruzioni.

5.6. Il biocemento dei tubi

Le analisi micromorfologiche e degli elementi hanno consentito la caratterizzazione del biocemento secreto da *S. alveolata*. Questo, in tutti i campioni analizzati, presenta una microstruttura tipo *solid foam* analoga a quella descritta per *Phragmatopoma californica* (Volvell, 1965; Stewart *et al.*, 2004; Stevens *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2010; Wang e Stewart 2012). La microstruttura vacuolare del biocemento ricorda la struttura adesiva schiumosa proteica del bisso dei mitili (Waite e Tanzer, 1981). Secondo Stewart *et al.* (2004), la struttura simile alla schiuma aumenterebbe l'elasticità e la capacità di adesione del cemento, facendo risparmiare materiale ed energia metabolica all'animale e minimizzando la differenza data dalla consistenza rigida delle particelle e la fluidità del biocemento.

Il biocemento di *Sabellaria alveolata* mostra un'elevata quantità di calcio e magnesio simile a quello rilevato nel cemento di *P. californica* (Gruet *et al.*, 1987; Stewart *et al.*, 2004). Tra i vacuoli della microstruttura del cemento sono stati trovati localmente cristalli di NaCl chiaramente depositati dall'evaporazione dell'acqua di mare.

Secondo il modello proposto da Stewart *et al.* (2004), i cationi bivalenti (Ca^{2+} e Mg^{2+}) sono coinvolti nella condensazione, reidratazione e solidificazione del biocemento. Sun *et al.* (2007) suggeriscono che, questi ioni bivalenti svolgono un ruolo complesso e multifunzionale mantenendo la forza adesiva del cemento. Le analisi degli aminoacidi di *P. californica* hanno rivelato che il fosforo è sotto forma di fosfoserina e che più del 90% di serina nel cemento è fosforilata (Stewart *et al.*, 2004). Come in *P. californica*, l'elevata

quantità di fosforo rilevato nel cemento di *S. alveolata* sembra essere correlato a gruppo fosfato (PO_4^{3-}) aggiunto alle proteine.

5.6.1. Modalità di distribuzione dei punti colla

La modalità di distribuzione dei punti colla è stata descritta in dettaglio per la prima volta nella presente tesi e pubblicata in Sanfilippo *et al.* 2019: gli elementi tozzi o isodiametrici sono agglutinati da *spot* di colla; gli elementi appiattiti sono agglutinati da *strip* di colla.

Dalle osservazioni al microscopio ottico, ma anche al SEM, è emerso che la quantità di punti colla sui granuli è variabile tra i siti di campionamento. Nei campioni del Simeto e di Portopalo, il numero medio dei punti colla sul singolo grano è maggiore. Inoltre, nei campioni di Portopalo i punti colla su un singolo granulo sono tanti ma piccoli. La differente quantità di biocemento nei tubi dei diversi siti può essere legata all'esigenza che ha l'animale di rendere più resistente la struttura, laddove il moto ondoso e l'idrodinamismo sia eccessivo, come a Portopalo.

Una ulteriore motivazione, di cui non è mai stata fornita alcuna evidenza (Stewart *et al.*, 2004), può essere dovuta al maggiore potere legante della colla, che salderebbe più efficacemente gli elementi carbonatici rispetto a quelli litici. Probabilmente l'elevato numero di punti colla nei grani agglutinati delle biocostruzioni del Simeto, compensa la presenza di questi legami più deboli.

Nei campioni analizzati il biocemento è di colorazione giallognolo-bruno ad eccezione di quello di Falconara dove è presente una patina scura sulla superficie esposta che negli altri siti non si osserva. Dalle analisi EDS, si è visto che nella parte centrale del punto colla, dove la colorazione è simile in tutti e tre i campioni, la composizione è anch'essa simile, sul bordo scuro del biocemento di Falconara sono invece presenti ossidi di ferro. Tali ossidi rappresentano un deposito successivo alla formazione del biocemento e potrebbero testimoniare un maggior contenuto in ferro nell'ambiente deposizionale (Falconara) rispetto agli altri due siti.

5.7. Caratteristiche chimico- fisiche delle acque circostanti le biocostruzioni

I parametri chimico-fisici delle acque circostanti le biocostruzioni dei tre siti hanno evidenziato valori medi di temperatura e di salinità confrontabili rispetto a quelli medi noti in Mediterraneo (Nordstrom *et al.*, 1979).

Le analisi geochimiche dei costituenti maggiori hanno evidenziato concentrazioni in gran parte confrontabili con le medie oceaniche registrando però effetti stagionali particolarmente marcati. Quest'ultimo fattore potrebbe essere attribuibile ai maggiori effetti evaporativi caratterizzanti il bacino del Mediterraneo.

Per quanto riguarda le analisi geochimiche degli elementi in tracce, i tre siti hanno evidenziato concentrazioni nettamente superiori alle medie oceaniche nonostante Falconara presenti le medie normalizzate più basse.

Le variazioni chimiche riscontrate nei diversi periodi di campionamento sono state confrontate con le caratteristiche chimico-composizionali dei biocementi per investigare il ruolo svolto dalla chimica dell'ambiente di formazione sulla crescita finale delle biocostruzioni.

Il confronto del rapporto $Ca/(Ca+Mg)$ calcolato sia sui valori medi delle acque che del biocemento dei tre siti (Tab. 15, Fig. 99) ha evidenziato una tendenza opposta tra i rapporti delle concentrazioni di Ca e Mg del biocemento e quelli dell'acqua di mare provenienti dallo stesso sito. Il dato dimostra come Ca e Mg siano frazionati dal biocemento a prescindere dalle concentrazioni presenti nell'ambiente di formazione, a differenza degli elementi in tracce (Cr, Ni, Cu, Zn e As) per i quali è stata osservata una buona correlazione.

Tra i tre siti, Falconara è quello con le medie normalizzate più basse anche in termini di elementi in traccia mentre i due siti che hanno riscontrato acque con medie superiori di zinco sono Simeto e Portopalo. Questa tendenza si è riscontrata anche nei biocementi: in quello del Simeto e di Portopalo si ha la più alta percentuale di Zn mentre, nel biocemento di Falconara, la più bassa. Questi dati permettono di ipotizzare una correlazione tra chimismo degli elementi in traccia del biocemento e quello delle acque.

Valori così elevati di Zn in tutti e tre i siti, lasciano ipotizzare un elevato inquinamento ambientale causato da incenerimento dei rifiuti e acque di scarico industriali e di altra provenienza. Il particolare tipo di inquinamento delle acque dovuto ai metalli pesanti è stato notato principalmente nelle acque marine costiere come risultato degli scarichi di fiumi, degli scoli domestici e industriali, delle immissioni di scorie, oltre che all'inquinamento prodotto dalle acque di prima pioggia provenienti da discariche o da impianti industriali.

Studi futuri saranno incentrati sugli elementi in traccia per verificare se il frazionamento di tali elementi (Cu, Zn, Cr e Ni) nel biocemento è in equilibrio con la concentrazione nelle acque. Un tale frazionamento permetterebbe di considerare il biocemento dei Sabellaridi come nuovo *proxy* per studi ambientali.

5.8. I taxa associati alla biocostruzione

I taxa animali e vegetali associati alle biocostruzioni dei siti investigati hanno mostrato tre differenti situazioni:

Il sito di Portopalo è il più ricco come numero di taxa vegetali (21 specie) osservati sulla biocostruzione. Durante il primo rilievo (2020) questa ricca comunità algale sembrerebbe abbia favorito la crescita delle biocostruzioni. Testimonianza di ciò si ha dalle osservazioni fatte a distanza di un anno in cui, laddove le fronde di *Ericaria* sono presenti, i tubi hanno collaretti aperturali intatti, mentre le biocostruzioni distanti da essa mostrano tubi rotti e abrasati. Ciò probabilmente perché non protette dalle fronde algali che in parte mitigano l'azione idrodinamica erosiva sulle biocostruzioni e favoriscono la cattura del sedimento.

Questo particolarissimo habitat in cui la biocostruzione a *S. alveolata* è in associazione con la popolazione di *Ericaria giacconei* è stato osservato per la prima volta in assoluto ed è diventato frutto di una pubblicazione (Sanfilippo *et al.*, 2022) che comprende una prima checklist di specie algali associate alle biocostruzioni a *S. alveolata*.

In Serio e Furnari (2021), a seguito di ulteriori osservazioni periodiche condotte in questi ultimi anni sulla comunità algale di Portopalo, inoltre, la relazione tra *S. alveolata* ed *E. giacconei* viene considerata non casuale ma sinergica in quanto la struttura agglutinata di *S. alveolata* protegge la porzione dei talli perenni di *E. giacconei* circondandoli.

Sia la presenza di alghe che la morfologia articolata delle biocostruzioni, con microcavità e rilievi, ha permesso a molte specie animali di trovare microhabitat adatti alle loro esigenze e così favorire la biodiversità. Le alghe, come per esempio *Caulerpa* sp. pl., si sono sviluppate al di sopra della biocostruzione a *Sabellaria* sia tra i tubi con animali vivi che su quelli vuoti mentre gli organismi animali si sono distribuiti diversamente nella porzione inferiore (sciafila) o superiore (fotofila) della biocostruzione. Anch'essi hanno presentato un alto numero di taxa bentonici. La presenza però di questi animali sembra essere aumentata maggiormente nelle parti di biocostruzione più degradate, dove all'interno dei tubi vuoti, *S. alveolata* è stata sostituita da piccoli crostacei, molluschi ma soprattutto da altri anellidi. Questa eterogeneità faunistica probabilmente è stato un campanello d'allarme che ha permesso di individuare una fase di regressione della biocostruzione in accordo con quanto detto in Bonifazi *et al.* (2019) a proposito delle faune associate alle biocostruzioni delle coste laziali.

Il sito del Simeto è il più povero per quanto riguarda i taxa vegetali osservati sulla biocostruzione (2 specie). Gli animali presenti (serpulidi, briozoi e balani) sono presenti

principalmente sopra le porzioni di biocostruzione degradate e ne incrostano quasi completamente tutta la superficie mentre sulle biocostruzioni in crescita vi sono pochi crostacei e mitilidi.

Il sito di Falconara presenta una piccola comunità algale composta da 15 specie. Queste sono principalmente presenti sulle superfici abrase delle biocostruzioni più esposte alla luce. Le comunità animali (molluschi e crostacei) prediligono le microcavità tra i singoli tubi o le grandi tane scavate da granchi e da pesci.

6. CONCLUSIONI

Gli obiettivi prefissati della presente tesi sono stati tutti raggiunti:

- Sono stati realizzati un elenco dei record presenti in letteratura di *S. alveolata* e una mappa con la loro collocazione nei diversi settori biogeografici del Mediterraneo. Ciò ha permesso di avere un quadro complessivo della distribuzione ed estensione dei reef a *Sabellaria alveolata* che ha evidenziato un range biogeografico limitato al settore occidentale del Mediterraneo. Inoltre, sono stati aggiunti per le coste siciliane i nuovi ritrovamenti, oggetto della presente tesi.
- Sono state create mappe riportanti la distribuzione delle tre diverse morfologie di biocostruzione riportate in letteratura e una tabella con i riferimenti bibliografici, da cui deriva che le descrizioni di tali morfologie ed estensioni sono carenti.
- Sono state descritte la struttura e la composizione della parete dei singoli tubi agglutinati all'interno della quale sono stati riconosciuti tre strati concentrici ben distinti: strato interno, strato intermedio e strato esterno confermando la capacità di *S. alveolata* di selezionare i granuli di sedimento per dimensione e forma.
- È stato ricostruito e descritto il modello di crescita delle biocostruzioni a *Sabellaria* distinguendo quattro fasi successive di sviluppo nel tempo: fase iniziale, intermedia, matura e senescente.
- Sono state per la prima volta descritte in dettaglio e raffigurate le tre differenti morfologie di biocostruzione riportate in letteratura, e riscontrate nei siti campionati: morfologia a *crosta* o *veneer*, morfologia a *cuscinio/fungo* e morfologia a *banco*, e la loro formazione è stata messa in relazione con i parametri ambientali: idrodinamismo e apporto sedimentario.
- È stata descritta e documentata su mappa digitale l'estensione e la variazione temporale delle tre biocostruzioni presenti nei rispettivi siti di studio, confermando che si tratta di strutture effimere altamente dinamiche.
- I sedimenti alla base delle biocostruzioni delle diverse aree campionate hanno mostrato distribuzioni granulometriche piuttosto simili trattandosi di sabbie medio-grosse e sabbie medio-fini.
- Sono stati documentati e misurati nell'arco dei tre anni i parametri chimico-fisici delle acque circostanti le biocostruzioni nei tre siti, ampliando così le conoscenze sulle caratteristiche ambientali in cui *S. alveolata* vive. I risultati delle analisi hanno permesso di evidenziare valori confrontabili dei parametri come temperatura, salinità, conducibilità,

pH e concentrazioni dei costituenti maggiori (Ca, Mg, K, Na, Cl, SO₄ e HCO₃) con quelli dell'acqua di mare media (Nordstrom *et al.*, 1979) mentre sono state riscontrate delle anomalie nelle concentrazioni dei costituenti minori (B, Cr, Ni, Cu, Zn e As).

- È stata descritta, per la prima volta, la modalità di distribuzione dei punti colla distinguendo due morfologie: *spot* e *strip* utilizzate in maniera differente in relazione alla forma dell'elemento sabbioso agglutinato. Inoltre, è stata studiata l'abbondanza del biocemento tra i grani mostrando numeri più alti di punti colla sui grani delle biocostruzioni del Simeto e di Portopalo.
- È stata investigata e descritta la microstruttura vacuolare del biocemento, analoga a quella descritta per la specie pacifica *Phragmatopoma californica*, di tipo *solid foam* ed è stata investigata la sua composizione chimica che ha mostrato otto principali elementi costantemente osservati nel biocemento dei tre siti: C, N, Na, Mg, P, Cl, K e Ca.
- È stato confrontato il chimismo del biocemento con quello delle acque circostanti le biocostruzioni dei tre siti ed è emerso come Ca e Mg siano frazionati dal biocemento a prescindere dalle concentrazioni presenti nell'ambiente di formazione, mentre gli elementi in tracce (B, Cr, Ni, Cu, Zn e As) presentano una buona correlazione tra concentrazioni nelle acque circostanti e biocemento.
- È stato discusso il significato ecologico delle biocostruzioni a *S. alveolata* nei tre siti e sono stati determinati i taxa animali associati, approfondendo la conoscenza della biodiversità associata ai reef a *S. alveolata*.
- È stata creata una lista delle specie algali individuate sulle biocostruzioni. Nel sito di Portopalo sono stati osservati una particolare abbondanza e un elevato numero di specie per la prima volta documentate.
- Sono state condotte indagini in Sicilia su presunti reef fossili a *Sabellaria* che hanno permesso di affermare che, ad oggi, queste testimonianze non esistono.

Prospettive di ricerche future

Gli interessanti studi condotti riguardanti i parametri chimico-fisici delle acque circostanti le biocostruzioni e i rapporti che essi hanno con la composizione del biocemento sono ancora da approfondire e offrono ulteriori spunti per possibili studi futuri. La presenza di metalli pesanti ritrovati nelle acque di mare dei tre siti lascia intendere che *Sabellaria* abbia elevati range di tollerabilità per questi elementi. Essendo i tre siti investigati, inquinati, sarebbe interessante studiare biocostruzioni di aree protette come quella dell'area marina di Torre del Cerrano (Abruzzo), dove non dovrebbero trovarsi inquinanti o fonti di inquinamento e vedere se anche queste biocostruzioni presentano, nel loro biocemento, elementi pesanti e in che concentrazione. Inoltre, si potrebbe svolgere lo stesso tipo di analisi chimico-fisiche nelle acque dove la probabilità che ci sia un elevato inquinamento è alta, come le biocostruzioni di Ostia, nel Lazio. Infatti, per la vicinanza alla foce del Tevere ci si aspetterebbe una situazione ambientale confrontabile a quella riscontrata per la foce del Simeto ed anche agli altri due siti.

Un altro studio che intendo sviluppare potrebbe essere legato alla capacità di *Sabellaria* di smorzare il moto ondoso proteggendo le aree costiere dall'erosione. Recenti studi condotti da Franzitta *et al.* (2022) su *S. spinulosa*, hanno dimostrato che è possibile trapiantare, con un metodo controllato dall'uomo, aggregati di *Sabellaria* per effettuare il ripristino di un'area costiera, come quella di Falconara Marittima, nell'alto Adriatico, dove le scogliere a Sabellaridi hanno subito un forte impatto antropico. Questo metodo di ripristino dell'habitat a Sabellaridi potrebbe essere applicato anche al fine di evitare un'ulteriore erosione costiera in zone fortemente soggette all'azione demolitrice del mare, come nel caso del Simeto, salvaguardando così importanti habitat come quelli dunali.

Prossimi studi riguarderanno gli esemplari predisposti per le indagini genetiche di *Sabellaria* e della sua fauna associata che sono stati spediti al Dipartimento di Zoologia e Idrobiologia degli Invertebrati della Facoltà di Biologia e Protezione Ambientale, Università di Łódź (Polonia) per eseguire un'ulteriore identificazione tramite estrazione del DNA, amplificazione e sequenziamento.

Infine, potrei svolgere una ricerca mirata di affioramenti dei *reef* fossili nei depositi del Mediterraneo.

7. BIBLIOGRAFIA

- Achary G.P.K. (1969). Sabellariids as associates of other invertebrates and their role in the formation of benthic animal communities. *Journal of the Marine Biological Association of India*, 11(1-2), 198-202.
- Achary G.P.K. (1974). Polychaetes of the family Sabellariidae with special reference to their intertidal habitat. *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 38, 442-455.
- Ataide M.B., Venekey V., Rosa Filho J.S. e Dos Santos P.J.P. (2014). Sandy reefs of *Sabellaria wilsoni* (Polychaeta: Sabellariidae) as ecosystem engineers for meiofauna in the Amazon coastal region, Brazil. *Marine Biodiversity*, 44(3), 403-413.
- Ayata S.D., Ellien C., Dumas F., Dubois S. e Thiébaud É. (2009). Modelling larval dispersal and settlement of the reef-building polychaete *Sabellaria alveolata*: role of hydroclimatic processes on the sustainability of biogenic reefs. *Continental Shelf Research*, 29(13), 1605-1623.
- Baccetti B., Baldaccini N.E., Bedini C., Brandmayr P., Capanna E., Chieffi G., Cobolli M., Ferraguti M., Ghirardelli E., Ghiretti F., Giusti F., Grigolo A., Mainardi D., Minelli A., Papi F., Parrinello N., Ricci N., Ruffo S., Sarà M., Scali V. e Zullini A. (1991). In: *Trattato italiano di Zoologia* (Grasso Ed), 2.
- Badalamenti F., D'Anna G., Riggio S. (2000). Artificial Reefs in the Gulf of Castellammare (North-West Sicily): a case study. In: *Artificial reefs in European seas* (Jensen A.C., Collins K.J., Lockwood A.P.M. eds.). Springer Netherlands, 2, 75-96.
- Bajjouk T., Jauzein C., Drumetz L., Dalla M., Duval A. e Dubois S. (2020). Hyperspectral and lidar: complementary tools to identify benthic features and assess the ecological status of *Sabellaria alveolata* reefs. *Frontiers in Marine Science*, 7, 575218.
- Bamber R.N. e Irving P.W. (1997). The differential growth of *Sabellaria alveolata* (L.) reefs at a power station outfall. *Polychaete research*, 17(3), 1-12.
- Barrier P., Di Geronimo I. e Grasso M. (1989). 3° *Simposio di Ecologia e Paleoecologia delle Comunità Bentoniche 12 10 1985- Guida alle escursioni*.
- Becker P.T., Lambert A., Lejeune A., Lanterbecq D. e Flammang P. (2012). Identification, characterization, and expression levels of putative adhesive proteins from the tube-dwelling polychaete *Sabellaria alveolata*. *The Biological Bulletin*, 223, 217-225.
- Bellan B.G. (1964). Contribution à l'étude systématique, bionomique et écologique des Annélides Polychètes de la Méditerranée. *Recueil des Travaux de la Station Marine d'Endoume*, 49 (33), 1-371.
- Bell J.J., Davy S.K., Jones T., Taylor M.W. e Webster N.S. (2013). Could some coral reefs become sponge reefs as our climate changes? *Global Change Biology* 19, 2613-2624.
- Benson A., Foster-Smith B., Gubbay S. e Hendrick V. (2013). Background Document for *Sabellaria spinulosa* reefs. OSPAR's vision of a clean, healthy and biological diverse North-east Atlantic used sustainably. *OSPAR Commission Report. Publication*, 614, 1-24.
- Bertocci I., Badalamenti F., Lo Brutto S., Mikac B., Pipitone C., Schimmenti E., Vega Fernández T. e Musco L. (2017). Reducing the data-deficiency of threatened European habitats: Spatial variation of Sabellariid worm reefs and associated fauna in the Sicily Channel, Mediterranean Sea. *Marine Environmental Research*, 130, 325-337.
- Blott S.J. e Pye K. (2012). Particle size scales and classification of sediment types based on particle size distributions: review and recommended procedures. *Sedimentology*, 59, 2071-2096.
- Bodeur Y., Garcin M., Gruet Y. e Vachard D. (1987). Biosédimentologie des constructions à Hermelles de l'île de Noirmoutier (France); relations avec des équivalents fossiles découverts dans le Messinien des Cordillères Bétiques (Espagne). *8th IAS Regional Meeting of Sedimentology*, 106-107.
- Bonifazi A., Lezzi M., Ventura D., Lisco S., Cardone F. e Gravina M.F. (2019). Macrofaunal biodiversity associated with different developmental phases of a threatened Mediterranean *Sabellaria alveolata* (Linnaeus, 1767) reef. *Marine Environmental Research*, 145, 97-111.

- Bonifazi A., Ventura D. e Mancini E. (2018). *Sabellaria* reefs as reservoirs of preferential species: The case of *Eulalia ornata* Saint-Joseph, 1888 (Annelida: Phyllodoceidae). *Marine and Freshwater Research*, 69(10), 1635-1640.
- Bremec C. e Lana P.C. (1994). New records of Sabellariidae (Annelida, Polychaeta) from Argentina. *Neritica*, 8(1-2), 47-53.
- Brunier G., Oiry S., Gruet Y., Dubois S.F. e Barillé L. (2022). Topographic Analysis of Intertidal Polychaete Reefs (*Sabellaria alveolata*) at a Very High Spatial Resolution. *Remote Sensing*, 14, 307.
- Capa M., Faroni-Perez L. e Hutchings P. (2015). Sabellariidae from Lizard Island, Great Barrier Reef, including a new species of *Lygdamis* and notes on external morphology of the median organ. *Zootaxa*, 4019(1), 184-206.
- Capa M., Hutchings P. e Peart R. (2012). Systematic revision of Sabellariidae (Polychaeta) and their relationships with other polychaetes using morphological and DNA sequence data. *Zoological journal of the Linnean Society*, 164, 245-284.
- Casoli E., Bonifazi A., Ardizzone G., Gravina M.F., Russo G., Sandulli R. e Donnarumma L. (2019). Comparative analysis of mollusc assemblages from different hard bottom habitats in the Central Tyrrhenian Sea. *Diversity*, 11(5), 74.
- Castelli A., Bianchi C.N., Cantone G., Çinar M.E., Gambi M.C., Giangrande A., Iraci Sareri D., Lanera P., Licciano M., Musco L., Sanfilippo R. e Simonini R. (2008). Annelida Polychaeta. In: *Checklist of the flora and fauna in Italian Seas* (Relini G. ed.). *Biologia Marina Mediterranea*, 15(1), 323-373.
- Cerrano C., Bavestrello G., Benatti U., Calcinai B., Cattaneo-Vietti R., Cortesogno L., Gaggero L., Giovine M., Puce S. e Sarà M. (1999). Organism-quartz interaction in structuring benthic communities; towards a marine bio-mineralogy. *Ecology Letters*, 2, 1-3.
- Chiocci F.L. e Casalbore (2011). Submarine gullies on Italian upper slopes and their relationship with volcanic activity revisited 20 years after Bill Normark's pioneering work. *Geosphere*, 7(6), 1284-1293.
- Çinar M.E., Katağan T., Koçak F., Öztürk B., Ergen Z., Kocatas A., Önen M., Kirkim F., Bakır K., Kurt G., Daglı E., Açık S., Doğan A. e Özcan T. (2008). Faunal assemblages of the mussel *Mytilus galloprovincialis* in and around Alsancak Harbour (Izmir Bay, eastern Mediterranean) with special emphasis on alien species. *Journal of Marine Systems*, 71, 1-17.
- Çinar M.E., Katagan T., Öztürk B., Egemen O., Ergen Z., Kocatas A., Önen M., Kirkim F., Bakır K., Kurt G., Daglı E., Kaymakçı A., Açık S., Doğan A. e Özcan T. (2006). Temporal changes of soft-bottom zoobenthic communities in and around Alsancak Harbor (Izmir Bay, Aegean Sea), with special attention to the autecology of exotic species. *Marine Ecology*, 27(3), 229-246.
- Ciravolo L., Indelicato S. e Viviani G. (1997). Stream water quality models: an application to the Simeto river basin. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 13.
- Cocito S. (2004). Bioconstruction and biodiversity: their mutual influence. *Scientia Marina*, 68, 137-144.
- Cole V.J. e Chapman M.G. (2007). Patterns of distribution of annelids: taxonomic and spatial inconsistencies between two biogeographic provinces and across multiple spatial scales. *Marine Ecology Progress Series*, 346, 235-241.
- Coll M., Piroddi C., Steenbeek J., Kaschner K., Ben Rais Lasram F., Aguzzi J., Ballesteros E., Bianchi C.N., Corbera J., Dailianis T., Danovaro R., Estrada M., Frogliani C., Galil B. S., Gasol J. M., Gertwagen R., Gil J., Guilhaumon F., Kesner-Reyes K., Kitsos M.S., Koukouras A., Lampadariou N., Laxamana E., López-Fé de la Cuadra C.M., Lotze H.K., Martin D., Mouillot D., Oro D., Raicevich S., Rius-Barile J., Saiz-Salinas J.I., San Vicente C., Somot S., Templado J., Turon X., Vafidis D., Villanueva R. e Voultziadou E. (2010). The biodiversity of the Mediterranean Sea: estimates, patterns, and threats. *Plos one*, 5(8), 11842.
- Collins K. (2003). Dorset marine habitat surveys: maerl, worms reefs, seagrass and brittlestars. 2002 survey results. *Report to Dorset Wildlife Trust, English Nature and PADI AWARE from the School of Ocean and Earth Science*. University of Southampton, Southampton, 18 pp.

- Cormaci M., Furnari G. e Giaccone G. (2003). Macrofitobenthos. In: *Manuale di metodologie di campionamento e studio del benthos marino mediterraneo* (Gambi M.C., Dappiano M. eds.). *Biologia Marina Mediterranea*, 10, 233-262.
- Cunningham P.N., Hawkins S.J., Jones H.D. e Burrows M.T. (1984). The geographical distribution of *Sabellaria alveolata* (L.) in England, Wales and Scotland, with investigations into the community structure of, and the effects of trampling on *Sabellaria alveolata* colonies. *Report to the Nature Conservancy Council from the Department of Zoology, Manchester University, Manchester*, 1-38.
- Dean M., Welch J., Brandt C. e Tauer T. (2009). Surface analyses of biocements from *Pectinaria gouldii* (Polychaeta: Pectinariidae) and *Phragmatopoma lapidosa* (Polychaeta: Sabellariidae). In: *Proceedings of the 9th International Polychaete Conference, Portland, Maine, USA 2007* (Maciolek N.J., Blake J.A. eds.). *Zoosymposia*, 2, 329-337.
- Delbono I., Bianchi C.N., e Morri C. (2003). Le biocostruzioni di *Sabellaria alveolata* come indicatori ambientali: area costiera fra Chiavari e Sestri Levante. In: *Studi per la Creazione di Strumenti di Gestione costiera: Golfo del Tigullio. ENEA, Centro Ricerche Ambiente Marino, La Spezia* (Ferretti O. ed.), 130-140.
- Desroy N., Dubois S.F., Fournier J., Ricquiers I., Le Mao P., Guerine L., Gerla D., Rougerie M. e Legendre A. (2011). The conservation status of *Sabellaria alveolata* (L.) (Polychaeta: Sabellariidae) reefs in the Bay of Mont Saint Michel. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 21, 462-471.
- Dias A.S. e Paula J. (2001). Associated fauna of *Sabellaria alveolata* colonies on the central coast of Portugal. *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom*, 80, 169-170.
- Di Stefano A., De Pietro R., Monaco C. e Zanini A. (2013). Anthropogenic influence on coastal evolution: A case history from the Catania Gulf shoreline (eastern Sicily, Italy). *Ocean & Coastal Management*, 80, 133-148.
- Dos Santos A.S., Brasil A.C. e Christoffersen M.L. (2014). *Sabellaria* and *Lygdamis* (Polychaeta: Sabellariidae) from reefs off northeastern Brazil including a new species of *Sabellaria*. *Zootaxa*, 3881(2), 125-144.
- Dubois S., Barillé L. e Cognie B. (2009). Feeding response of the polychaete *Sabellaria alveolata* (Sabellariidae) to changes in seston concentration. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 376, 94-101.
- Dubois S., Barille L. e Retiere C. (2003). Efficiency of particle retention and clearance rate in the polychaete *Sabellaria alveolata* L., *Comptes Rendus Biologies*, 326, 413-421.
- Dubois S., Barillé L., Cognie B. e Beninger P.G. (2005). Particle capture and processing mechanisms in *Sabellaria alveolata* (Polychaeta: Sabellariidae). *Marine Ecology Progress Series*, 301, 159-171.
- Dubois S., Commito J.A., Olivier F. e Retière C. (2006). Effects of epibionts on *Sabellaria alveolata* (L.) biogenic reefs and their associated fauna in the Bay of Mont Saint-Michel. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68, 635-646.
- Dubois S., Comtet T., Retière C. e Thiébaud E. (2007). Distribution and retention of *Sabellaria alveolata* larvae (Polychaeta: Sabellariidae) in the Bay of Mont-Saint-Michel, France. *Marine Ecology Progress Series*, 346, 243-254.
- Dubois S., Retière C. e Olivier F. (2002). Biodiversity associated with *Sabellaria alveolata* (Polychaeta: Sabellariidae) reefs: effects of human disturbances. *Journal of the Marine Biological Association of United Kingdom*, 82, 817-826.
- Ebling F.J. (1945). Formation and Nature of the opercular chaetae of *Sabellaria alveolata*. *Quarterly Journal of Microscopical Scienze*, 153-176.
- Eckelbarger K.J. (1976). Larval development and population aspects of the reef-building polychaete *Phragmatopoma lapidosa* from the east coast of Florida. *Bulletin of Marine Science*, 26, 117-132.
- Faroni-Perez L., Helm C., Burghardt I., Hutchings P. e Capa M. (2016). Anterior sensory organs in Sabellariidae (Annelida). *Invertebrate Biology*, 135(4), 423-447.
- Fauchald K. e Rouse G.W. (1997). Polychaete systematics: past and present. *Zoologica Scripta*, 26(2), 71-138.

- Fauchald, K. (1977). The Polychaete worms. Definitions and keys to the Orders, Families and Genera. *Natural History Museum of Los Angeles Country, Science Series*, 28, 1-190.
- Fausto-Filho J. e Furtado E. (1970). Nota preliminar sôbre a fauna das colônias de Sabellariidae do litoral do estado do Ceará (Annelida, Sedentaria). *Revista Brasileira de Biologia*, 30(2), 285-289.
- Fauvel P. (1927). Polychètes sédentaires. Addenda aux errantes, Arachiannélides, Myzostomaires. *Faune de France. Paul Lechevalier, Paris*, 16, 1-494.
- Firth L.B., Mieszkowska N., Grant L.M., Bush L.E., Davies A.J., Frost M.T. e Hawkins S.J. (2015). Historical comparisons reveal multiple drivers of decadal change of an ecosystem engineer at the range edge. *Ecology and evolution*, 5(15), 3210-3222.
- Fournier J. (2013). Bioconstructions d'annélides polychètes. Complexité des niveaux d'organisation, de l'organisme à l'écosystème. *Synthese scientifique Institut France: Universitaire Européen de la Mer. CNRS*, 171 pp.
- Franzitta G., Colletti A., Savinelli B., Lo Martire M., Corinaldesi C. e Musco L. (2022). Feasibility of the Sabellarid Reef Habitat Restoration. *Frontiers in Marine Science*, 9, 854986.
- Gadaleta F., Mercurio M., Cardone F. e Corriero G., (2015). Indagini biocenotiche sui popolamenti bentonici di substrato duro dei fondali marini dell'Area Marina Protetta Torre del Cerrano. Relazione Conclusiva. Università degli Studi di Bari.
- Gambi M.C. (1987). Osservazioni su morfologia funzionale e comportamento trofico di *Owenia fusiformis* Delle Chiaje (Polychaeta, Oweniidae) in rapporto ai fattori ambientali. *Oebalia, Atti del XIX Congresso della Società italiana di Biologia Marina, Napoli 24-28 settembre 1989*, 15, 145-155.
- Garcin M. e Vachard D. (1987). Découverte d'Hermelles fossiles dans le Messinien de San Miguel de Salinas (Annelides du Miocène supérieur du Sud-Est de l'Espagne). *Géobios*, 20, 407-414.
- Garcin M. e Vachard D. (1994). Récifs, trottoirs et autres biolithosores du bassin de San Miguel de Salinas. *Regional Committee on Mediterranean Neogene Stratigraphy (RCMNS), Marseille: France*, 1-14.
- George C.L. e Warwick R.M. (1985). Annual macrofauna production in a hard-bottom reef community. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 65, 713-735.
- Gibb N., Tillin H.M., Pearce B. e Tyler-Walters H. (2014). Assessing the sensitivity of *Sabellaria spinulosa* to pressures associated with marine activities. *JNCC report*, 504, 67 pp.
- Giordani-Soika S. (1956) Scogliera pseudocorallina intercotidale di *Sabellaria alveolata* (L.) nelle coste del Lazio (Ann. Polych.). *Bollettino del Museo Civico di Storia Naturale di Venezia*, 9, 11-14.
- Glaessner M.F. (2018). Early Phanerozoic annelid worms and their geological and biological significance. *Journal of the Geological Society of London*, 132, 259-275.
- Gravina M.F., Bonifazi A., Del Pasqua M., Giampaolletti J., Lezzi M., Ventura D. e Giangrande A. (2020). Perception of changes in marine benthic habitats: the relevance of taxonomic and ecological memory. *Diversity*, 12, 480.
- Gruet Y. e Bodeur Y. (1994). Selection des grains de sable selon leur nature et leur forme par *Sabellaria alveolata* Linné (Polychaete Sabellariidae) lors de la reconstruction expérimentale de son tube. In: *Actes de la 4eme Conference Internationale des Polychaetes; Memoirs de Musee Nationale Histoire Naturelle* (Dauvin J.C., Laubier L., Reish D.J. eds.). Paris, 425-432.
- Gruet Y. e Bodeur Y. (1995). Ecological conditions of modern sabellarian reefs development: geological implications. *Publication du Service Geologique du Luxembourg*, 29, 73-80.
- Gruet Y. e Bodeur Y. (1997). Les récifs d'Hermelles. In: *Les biocenoses marines et littorales françaises des côtes Atlantique, Manche et Mer du Nord, synthèse, menaces et perspectives* (Dauvin J.C. ed.). *Collection Patrimoines naturels: Série Patrimoine écologique*, 28, Muséum National d'Histoire naturelle: Paris, 168-176.
- Gruet Y. (1970). Faune associée des récifs édifiés par l'annélide *Sabellaria alveolata* (Linné) en baie du Mont Saint-Michel: banc des Hermelles. *Memoires de la Société des Sciences de Cherbourg*, 54, 21 pp.
- Gruet Y. (1971). Morphologie, croissance et faune associée des récifs de *Sabellaria alveolata* (Linné) de la Bernerieen-Retz (Loire Atlantique). *Tethys*, 3, 321-380.

- Gruet Y. (1972). Aspects morphologiques et dynamiques de constructions de l'Annelide polychete *Sabellaria alveolata* (Linnaeus). *Revue des Travaux de l'Institut des Peches Maritimes*, 36(2), 131-161.
- Gruet Y. (1977). Peuplements de la côte rocheuse de Sion-sur-l'Océan (Vendée) et faune associée aux «récifs» d'hermelles [*Sabellaria alveolata* (Linné), Annélide Polychète]. *Bulletin d'Ecologie*, 8, 37-55.
- Gruet Y. (1982). Recherches sur l'écologie des " récifs " d'hermelles édifiés par l'Annélide Polychète *Sabellaria alveolata* (Linnaeus). *PhD thesis, Université de Nantes*, 1-234.
- Gruet Y. (1992). Biology and Ecology of the Polychaete annelid *Sabellaria alveolata* (Linnaeus). In: *The Sabellariid reefs in the Bay of Mont Saint-Michel, France. Ecology, Geomorphology, Sedimentology, and Geologic Implications*. (Kirtley D.W. ed.). Florida Oceanographic Institute.
- Gruet Y., Vovelle J. e Grasset M. (1987). Composante biominérale du ciment du tube ches *Sabellaria alveolata* (L.) Annelide Polychete. *Canadian Journal of Zoology*, 65, 837-842.
- Gruet Y. (1984). Granulometric evolution of the sand tube in relation to growth of the Polychaete Annelid *Sabellaria alveolata* (Linnaeus) (Sabellariidae). *Ophelia*, 23, 181-193.
- Gruet Y. (1986). Spatio-temporal Changes of Sabellarian reefs Built by the Sedentary Polychaete *Sabellaria alveolata* (Linné). *Marine Ecology*, 7, 303-319.
- Gubbay S. (2007). Defining and managing *Sabellaria spinulosa* reefs: Report of an inter-agency workshop 1–2 May, 2007. *Report Joint Nature Conservation Committee*, Peterborough, UK, 405.
- Gubbay S., Sanders N., Haynes T., Janssen J.R., Rodwell J.A.M., Nieto M., García Criado M., Beal S., Borg J., Kennedy M., Micu D., Otero M., Saunders G. e Calix M. (2016). European Red List of Habitats. *Marine Habitats. European Union Publication Offices*, 1, 48 pp.
- Gutiérrez J.L., Jones C.G., Strayer D.L. e Iribarne O.O. (2003). Mollusks as ecosystem engineers: the role of shell production in aquatic habitats. *Oikos*, 101, 79-90.
- Hendrick V. J. (2007). An appraisal of *Sabellaria spinulosa* reefs in relation to their management and conservation. *PhD Thesis, University of Newcastle, Newcastle upon Tyne*, 178 pp.
- Hendrick V. J., Foster-Smith R. L. e Davies A. J. (2011). Biogenic reefs and the marine aggregate industry. In: *Marine Aggregate Levy Sustainability Fund* (Newell R., Measures J. eds.) (MALSF Science Co-ordinators). *Science Monograph Series*, 3, 60 pp.
- Hendrick V.J. e Foster-Smith R.L. (2006). *Sabellaria spinulosa* reef: a scoring system for evaluating 'reefiness' in the context of the Habitats Directive. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 86(04), 665-677.
- Hiscock K. (1984). *Sublittoral survey of Bardsey and the Llyn peninsula*. August 13th to 27th, 1983. (Contractor: Field Studies Council, Oil Pollution Research Unit, Pembroke.) *Nature Conservancy Council*.
- Holt T.J., Rees E.I., Hawkins S.J. e Seed R. (1998). Biogenic Reefs. An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine sacs. *Scottish Association for Marine Science (UK MARine SACs Project)*, 170 pp.
- Hommeril P. (1962). Etude locale (Gouville-sur-Mer, Manche) de la reeue des sédiments par deux polychètes sédentaires: *Sabellaria alveolata* (Hermelle) et *Lanice conchilega*. *Cahiers Océanographiques*, 14, 245-257.
- Hutchings P., Capa M. e Peart R. (2012). Revision of the Australian Sabellariidae (Polychaeta) and description of eight new species. *Zootaxa*, 3306, 1-6.
- Hutchings P.A. (2000). Family Sabellariidae. Polychaetes and allies: the southern synthesis. *Fauna of Australia*, 4, 215-218.
- Jackson-Bué T., Williams G.J., Walker-Springett G., Rowlands S.J. e Davies A.J. (2021). Three-dimensional mapping reveals scale-dependent dynamics in biogenic reef habitat structure. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 7(4), 621-637.
- Jones C.G., Lawton J.H. e Shachak M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69, 373-386.

- Jones D. J. (1972). Changes in the ecological balance of invertebrate communities in kelp holdfast habitats of some polluted North Sea waters. *Helgolander wissenschaftliche Meeresuntersuchungen*, 23, 248-260.
- Killeen I.J. e Light J.M. (2000). *Sabellaria*, a polychaete host for the gastropods *Noemiamea dolioliformis* and *Graphis albida*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 80(3), 571-573.
- Kirtley D.W. e Tanner W.F. (1968). Sabellariid worms: builders of a major reef type. *Journal of Sedimentary Research*, 38(1), 73-78.
- Kirtley D.W. (1994). A review and taxonomic revision of the family Sabellariidae Johnston, 1865 (Annelida; Polychaeta). *Sabecon Press, Science Series number*, 1, 1-223.
- La Greca M. (1990). *Zoologia degli Invertebrati* (U.T.E.T ed.), 521 figg.
- La Porta B. e Nicoletti L. (2009). *Sabellaria alveolata* (Linnaeus) reefs in the central Tyrrhenian Sea (Italy) and associated polychaete fauna. *Zoosymposia*, 2, 527-536.
- La Porta B., La Valle P. e Chimenz Gusso C. (2006). *Sabellaria alveolata* (L.) (Polychaeta Sabellariidae): la selezione dei granuli di sedimento per la costruzione dei tubi. *Biologia Marina Mediterranea*, 13, 593-596.
- La Porta B., Targusi M., Lattanzi L., La Valle P. e Nicoletti L. (2009). Analisi della fauna associata alle biocostruzioni a *Sabellaria alveolata* (L.) in relazione al loro stato di conservazione. In *40 Congresso SIBM Livorno. Biologia Marina Mediterranea*, 16(1), 36-38.
- Lana P.C. e Gruet Y. (1989). *Sabellaria wilsoni* sp. n. (Polychaeta, Sabellariidae) from the southeast coast of Brazil. *Zoologica Scripta*, 18(2), 239-244.
- Le Cam J.B., Fournier J., Etienne S. e Couden J. (2011). The strength of biogenic sand reefs: Viscoelastic behaviour of cement secreted by the tube building polychaete *Sabellaria alveolata*, (Linnaeus, 1767). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 91, 333-339.
- Lechapt J.P. e Kirtley D.W. (1996). *Bathysabellaria spinifera* (Polychaeta: Sabellariidae), a new species from deep water off New Caledonia, southwest Pacific Ocean. *Proceedings of the Biological Society of Washington*, 109(3), 560-574.
- Lezzi M., Cardone F., Mikac B. e Giangrande A. (2015). Variation and ontogenetic changes of opercular paleae in a population of *Sabellaria spinulosa* (Polychaeta: Sabellariidae) from the South Adriatic Sea, with remarks on larval development. *Scientia Marina*, 79, 137-150.
- Lisco S., Acquafredda P., Gallicchio S., Sabato L., Bonifazi A., Cardone F., Corriero G., Gravina M.F., Pierri C. e Moretti M. (2020). The sedimentary dynamics of *Sabellaria alveolata* bioconstructions (Ostia, Tyrrhenian Sea, central Italy). *Journal of Palaeogeography*, 9, 2.
- Lisco S., Moretti M., Moretti V., Cardone F., Corriero G. e Longo C. (2017). Sedimentological features of *Sabellaria spinulosa* bioconstructions. *Marine and Petroleum Geology*, 87, 203-212.
- Lisco S., Pierri C., Lazic T., Bonifazi A., Gravina M.F., Giangrande A., Acquafredda P. e Moretti M. (2021). *Sabellaria alveolata* versus *Sabellaria spinulosa* reefs along the Italian coasts: a new methodological proposal to compare different growth models. *Geosciences*, 11, 426.
- Lo Bianco S. (1888) Notizie biologiche riguardanti specialmente il periodo di maturità sessuale degli animali del Golfo di Napoli. *Mittheilungen aus der Zoologischen Station zu Neapel*, 8, 385-440.
- Lo Bianco S. (1893) Gli anellidi tubicoli trovati nel Golfo di Napoli. *Atti della Real Accademia delle scienze fisiche e matematiche*, Ser. 2, 5(11), 1-97.
- Londoño-Mesa M.H. e Carrera-Parra L.F. (2005). Terebellidae (Polychaeta) from the Mexican Caribbean with description of four new species. *Zootaxa*, 1057, 1-44.
- Lucas G. e LeFevre P. (1956). Contribution a l'étude de quelques sédiments marins et de récifs d'hermes du mont Saint-Michel. *Revue des Travaux de l'Institut des Pêches Maritimes*, 20(1), 85-112.
- Madonia P. e Palmeri A. (1999). The basaltic canyons of Mount Etna. *IXth International Symposium On Vulcanospeleology, 11-19 September 1999, Catania*, 55-61.
- Martino C., Di Stefano A., Monaco C., Zanini A. e Curcuruto E.P. (2011). Fenomeni erosivi lungo il litorale di Marina di Butera (CL), Sicilia centro-meridionale. *Geologi di Sicilia*, 4-14.
- McIntosh W. (1922). A monograph of the British Marine Annelids, London, UK. *Ray Society*, 4, 1.

- Menna M., Poulain P.M., Ciani D., Doglioli A., Notarstefano G., Gerin R., Rio M.H., Santoleri R., Gauci A. e Drago A. (2019). New Insights of the Sicily Channel and Southern Tyrrhenian Sea Variability. *Water*, 11(7), 1355.
- Mettam C. (1992). The influence of *Sabellaria* reefs on sublittoral community structure. *Polychaete research newsletter*, 14(3).
- Meyer C., Laroni-Perez L. e Purschke G. (2019). Anterior sense organs in *Sabellaria alveolata* with special reference to ultrastructure of photoreceptor elements presumably involved in shadow reflex. *Zoomorphology*, 138, 39-54.
- Molinier R. e Picard J. (1953). Notes biologiques à propos d'un voyage d'étude sur les côtes de Sicile. Masson. *Annales de l'Institut Oceanographique*, 28(4), 163-188.
- Muller R.A. e Stone G.W. (2001). A climatology of tropical storm and hurricane strikes to enhance vulnerability prediction for the southeast U.S. coast. *Journal of Coastal Research*, 17(4), 949-956.
- Muzirafuti A., Randazzo G., Lanza S., Crupi A., Cascio M., Barreca G. e Gregorio F. (2019). Sentinel-2 images for the monitoring of dissolved contaminants on Sicily's south-east coast. *European Geosciences Union- General Assembly, 7-12 April 2019, Vienna*, 21.
- Nahuelhua, E., Carcedo C. e Fiori S. (2012). Fauna asociada a los arrecifes de *Sabellaria nanella* (Sabellariidae) en el intermareal de Monte Hermoso, Argentina. *BioScriba*, 5, 43-48.
- Naylor L.A. e Viles H.A. (2000). A temperate reef builder: an evaluation of the growth, morphology and composition of *Sabellaria alveolata* (L.) colonies on carbonate platforms in South Wales. *Geological Society, London, Special Publications*, 178(1), 9-19.
- Nicoletti L., Lattanzi L., La Porta B., La Valle P., Gambi M.C., Tomassetti P. e Chimenz Gusso C. (2001). Biocostruzioni a *Sabellaria* delle coste del Lazio (Tirreno centrale). *Biologia Marina Mediterranea*, 8(1), 252-258.
- Nishi E., Bailey-Brock J.H., Dos Santos A.S., Tachikawa H. e Kupriyanova E.K. (2010). *Sabellaria isumiensis* n. sp. (Annelida: Polychaeta: Sabellariidae) from shallow waters off Onjuku, Boso Peninsula, Japan, and re-descriptions of three Indo-West Pacific sabellariid species. *Zootaxa*, 2680, 1-25.
- Nishi E., Kato T. e Hayashi I. (2004). *Sabellaria tottoriensis* n. sp. (Annelida: Polychaeta: Sabellariidae) from shallow water off Tottori, the Sea of Japan. *Zoological Science*, 21, 211-217.
- Nishi E., Matsuo K., Capa M., Tomioka S., Kajihara H., Kupriyanova E.K. e Polgar G. (2015). *Sabellaria jeramae*, a new species (Annelida: Polychaeta: Sabellariidae) from the shallow waters of Malaysia, with a note on the ecological traits of reefs. *Zootaxa*, 4052(5), 555-568.
- Noernberg M.A., Fournier J., Dubois S. e Populus J. (2010). Using airborne laser altimetry to estimate *Sabellaria alveolata* (Polychaeta: Sabellariidae) reefs volume in tidal flat environments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 90 (2), 93-102.
- Nollet L.M.L. e De Gelder L.S.P. (2007). Handbook of Water Analysis. *CRC Press*, 944 pp.
- Nordstrom D.K., Plummer L.N., Wigley T.M.L., Wolery T.J., Ball J.W., Jenne E.A., Bassett R.L., Crerar D.A., Florence T.M., Fritz B., Hofman M., Holdren G.R., Lafon G.M., Mattigod S.V., McDuff R.E., Morel F., Reddy M.M., Sposito G. e Thraillkill J. (1979). A comparison of computerized chemical models for equilibrium calculations in aqueous systems. In: *Chemical modeling in aqueous systems* (Jenne EA ed.). *ACS symposium series*, 93, 857-892.
- PAI (2004). Piano stralcio di bacino per l'assetto idrogeologico della regione siciliana. *Assessorato Territorio e Ambiente, Regione Sicilia*, 176 pp.
- Parapar J. e Moreira J. (2015). The Oweniidae (Annelida; Polychaeta) from Lizard Island (Great Barrier Reef, Australia) with the description of two new species of *Owenia* Delle Chiaje, 1844. *Zootaxa*, 4019, 604-620.
- Parapar J., Besteiro C. e Urgorri V. (1992). Nuevas aportaciones al conocimiento de los anélidos poliquetos en el litoral gallego (N.O. Península Ibérica). *NACC Biología*, 3, 109-123.
- Pawlik J. R. (1988). Larval settlement and metamorphosis of two gregarious sabellariid polychaetes: *Sabellaria alveolata* compared with *Phragmatopoma californica*. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 68(1), 101-124.

- Plicanti A., Iacofano D., Bertocci I. e Lo Brutto S. (2016). The amphipod assemblages of *Sabellaria alveolata* reefs from the NW coast of Portugal: An account of the present knowledge, new records, and some biogeographic considerations. *Marine Biodiversity*, 47(2), 521-534.
- Porrás R., Bataller J.V., Murgui E. e Torregrosa M.T. (1996). Trophic structure and community composition of polychaetes inhabiting some *Sabellaria alveolata* (L.) reefs along the Valencia Gulf Coast, western Mediterranean. *Marine Ecology*, 17, 583-602.
- Posey M.H., Pregnal A.M. e Graham R.A. (1984). A brief description of a subtidal sabellariid (Polychaeta) reef on the southern Oregon coast. *Pacific Science*, 38(1), 28-33.
- Read G. e Fauchald K. (2015). World Polychaeta database. *World Register of Marine Species*, www.marinespecies.org.
- Rouhi A., Sif J., Ferssiwi A. e Chema A. (2007). Bioaccumulation de quelques éléments métalliques par deux espèces d'Annélides Polychètes du littoral de Jorf Lasfar (région d'El Jadida, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Vie*, 29, 81-87.
- Rouse G.W. e Pleijel F. (2001). Polychaetes. *Oxford University Press*, Oxford, 347 pp.
- Sanfilippo R., Guido A., Insacco G., Deias C., Catania G., Reitano A., Leonardi R. e Rosso A. (2020). Distribution of *Sabellaria alveolata* (Polychaeta Sabellariidae) in the Mediterranean Sea: update and new findings. *Zoosymposia*, 19, 198-208.
- Sanfilippo R., Rosso A., Guido A., Mastandrea A., Russo A., Viola A. e Deias C. (2019). Tube architecture of the sandcastle worm *Sabellaria alveolata* from the Mediterranean Sea, Sicily Channel. *Journal of Morphology*, 21069, 1839-1849.
- Sanfilippo R., Serio D., Deias C. e Rosso A. (2022). *Sabellaria alveolata* (Annelida, Polychaeta) bioconstructions and associated macroalgal community from Portopalo di Capo Passero (SE Sicily). *Mediterranean Marine Science*, 23(1), 150-156.
- Schimmenti E. (2017). Approccio multidisciplinare allo studio delle biocostruzioni di *Sabellaria* sp. (Annelida: Polychaeta) nel Mediterraneo e alla fauna ad esse associata. *PhD Thesis, Università degli Studi di Palermo*, 1-177.
- Schimmenti E., Lo Brutto S., Badalamenti F., Giangrande A., Mikac B. e Musco L. (2015). DNA-Barcoding to solve the tricky case of co-occurring *Sabellaria* (Annelida) species in the Mediterranean Sea. *Biologia Marina Mediterranea*, 22(1), 109-110.
- Schimmenti E., Musco L., Lo Brutto S., Mikac B., Nygren A. e Badalamenti F. (2016). Mediterranean record of *Eulalia ornata* (Annelida: Phyllococida) corroborating its fidelity link with the *Sabellaria alveolata* reef habitat. *Mediterranean Marine Science*, 17, 359-370.
- Schlund E., Basuyaux O., Lecornu B., Pezy J.P., Baffreau A. e Dauvin J.C. (2016). Macrofauna associated with temporary *Sabellaria alveolata* reefs on the west coast of Cotentin (France). *SpringerPlus*, 5, 1260.
- Scholl D. W. (1958). Effects of an arenaceous tube-building polychaete upon the sorting of a beach sand at Abalone Cove, California. *Compass Magazine*, 35, 276-283.
- Serio e Furnari (2021). *Ericaria giacconei* sp. nov. (Sargassaceae, Fucophyceae), the species to which the invalidly published *Cystoseira hyblaea* Giaccone should be referred. *Cryptogamie Algologie*, 42(10), 141-151.
- Shao H., Bachus K. N. e Stewart R. J. (2009). A water-borne adhesive modeled after the sandcastle glue of *P. californica*. *Macromolecular Bioscience*, 9, 464-471.
- Shcherbakova T.D. e Tzetlin A.B. (2016). Fine structure of agglutinated tubes of polychaetes of the family Terebellidae (Annelida). *Doklady Biological Sciences*, 466, 16-20.
- Shcherbakova T.D., Tzetlin A.B., Mardashova M.V. e Sokolova O.S. (2017). Fine structure of the tubes of Maldanidae (Annelida). *Vol. Abstracts 12th International Polychaete Conference, 1-5 august 2016, Cardiff*, 41.
- Sheppard C.R.C., Davy S.K. e Pilling G.M. (2009). The biology of coral reefs. *Oxford University Press*, Oxford, UK.
- Soukissian T. e Sotiriou M.A. (2022). Long-Term Variability of Wind Speed and Direction in the Mediterranean Basin. *Wind*, 2, 513-534.

- Sparla M.P., D'Anna G. e Riggio S. (1992). Notes on the development and invertebrate colonization of *Sabellaria alveolata* reefs in N/W Sicily. *Rapports de la Commission internationale pour l'exploration de la Mer Méditerranée*, 33, 53.
- Stevens M. J., Steren R. E., Hlady V. e Stewart R. J. (2007). Multiscale structure of the underwater adhesive of *Phragmatopoma californica*: a nanostructured latex with a steep microporosity gradient. *Langmuir* 23, 5045-5049.
- Stewart R.J., Weaver J.C., Morse D.E. e Waite, J.H. (2004). The tube cement of *Phragmatopoma californica*: a solid foam. *Journal of Experimental Biology*, 207, 4727-4734.
- Sun C.J., Fantner G.E., Adams J., Hansma P.K. e Waite J.H. (2007). The role of calcium and magnesium in the concrete tubes of the sandcastle worm. *Journal of Experimental Biology*, 210, 1481-1488.
- Taramelli-Rivosecchi E. (1961). Osservazioni sulle biocenosi del banco a *Sabellaria* di Lavinio. *Rendiconti Accademia Nazionale delle scienze detta dei XL. Memorie di Matematica*, 4, 147-154.
- Ten Hove H.A. e Van Den Hurk P. (1993). A review of recent and fossil serpulid 'reefs'; actuopalaontology and the 'Upper malm' serpulid limestones in NW Germany. *Geologie en Mijnbouw*, 72, 23-67.
- Ventura D., Dubois S.F., Bonifazi A., Lasinio G.J., Seminara M., Gravina M.F. e Ardizzone G. (2020). Integration of close-range underwater photogrammetry with inspection and mesh processing software: a novel approach for quantifying ecological dynamics of temperate biogenic reefs. *Remote Sensing in Ecology Conservation*, 7, 169-186.
- Vespasiano G., Marini L., Muto F., Auqué L.F., Cipriani M., De Rosa R., Critelli S., Gimeno M.J., Blasco M., Dotsika E. e Apollaro C. (2021). Chemical, isotopic and geotectonic relations of the warm and cold waters of the Cotronei (Ponte Coniglio), Bruciarello and Repole thermal areas, (Calabria - Southern Italy). *Geothermics*, 96, 102228.
- Vorberg R. (2000). Effects of shrimp fisheries on reefs of *Sabellaria spinulosa* (Polychaeta). *ICES Journal of Marine Science*, 57, 1416-1420.
- Vovelle J (1965). Le tube de *Sabellaria alveolata* (L.) Annelide Polychete Hermellidae et son ciment. Etude écologique, expérimentale, histologique et histochimique. *Archives de Zoologie Experimentale & Generale*, 106, 1-187.
- Vovelle J. (1971). Sélection des grains du tube chez les Amphictenidae (Polychètes sédentaires). *Cahiers de Biologie Marine*, 12, 365-380.
- Waite J. H., Jensen R. A. e Morse D. E. (1992). Cement precursor proteins of the reef-building polychaete *Phragmatopoma californica* (Fewkes). *Biochemistry*, 31, 5733-5738.
- Waite J.H. e Tanzer M.L. (1981). Polyphenolic substance of *Mytilus edulis*: novel adhesive containing L-Dopa and Hydroxyproline. *Science*, 212(4498), 1038-1040.
- Walker A. J. M. e Rees E. I. S. (1980). Benthic ecology of Dublin Bay in relation to sludge dumping: fauna. *Irish Fisheries Investigations Series B*, 22, 59 pp.
- Wang C.S. e Stewart R.J (2012). Localization of the bioadhesive precursors of the sandcastle worm, *Phragmatopoma californica* (Fewkes). *The Journal of experimental biology*, 215, 351- 361.
- Wang C.S., Svendsen K.K. e Stewart R.J. (2010). Morphology of the adhesive system in the sandcastle worm, *Phragmatopoma californica*. In: *Biological Adhesive Systems: From Nature to Technical and Medical Applications* (von Byern J., Grunwald I. eds.). New York: Springer.
- Webby B.D. (1968). Devonian trace fossils from the Beacon Group of Antarctica. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 11, 1001-1008.
- Wells R.M.G. (1970). The feeding biology of *Sabellaria*. *Tane*, 16, 131-134.
- Wilson D. (1971). *Sabellaria* colonies at Duckpool, North Cornwall, 1961-1970. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 51, 509-580.
- Wolff N.H., Wong A., Vitolo R., Stolberg K., Anthony K.R.N. e Mumby P.J. (2016). Temporal clustering of tropical cyclones on the Great Barrier Reef and its ecological importance. *Coral Reefs*, 35 (2), 613-623.

- Wood A.C.L., Probert P.K., Rowden A.A. e Smith A.M. (2012). Complex habitat generated by marine bryozoans: a review of its distribution, structure, diversity, threats and conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 22, 547-563.
- Zhang J., Zhang Y. e Qiu J.W. (2015). A new species of *Amphictene* (Annelida, Pectinariidae) from the northern South China Sea. *ZooKeys*, 545, 27-36.
- Zhao H., Sun C., Stewart J. e Waite J. (2005). Cement proteins of the tube-building polychaete *Phragmatopoma californica*. *Journal of Biological Chemistry*, 280(52), 42938-42944.

RINGRAZIAMENTI

Questi tre anni di dottorato, sono stati molto diversi rispetto a quello che ci si aspettava: nessuno poteva immaginarsi che, a pochi mesi dall'inizio, sarebbe scoppiata una pandemia che avrebbe cambiato il “normale” percorso che ogni nuovo dottorando pensava di intraprendere.

Sono state molte le difficoltà operative legate al sopraggiunto lockdown dovuto all'emergenza COVID-19 e per poter svolgere la ricerca si son dovute trovare diverse soluzioni che prevedevano incontri online o limitati accessi ai laboratori. Nonostante, non sia stato possibile lavorare a stretto contatto con diversi ricercatori esperti sull'argomento del mio progetto, ho avuto la fortuna di poter conoscere alcuni di loro “virtualmente” e, grazie a incontri online o corrispondenze via e-mail, ho ricevuto i giusti consigli e le indicazioni per poter procedere con la mia ricerca.

Tra queste conoscenze virtuali vorrei in particolar modo ringraziare:

- Il Prof. Yves Gruet (Univ. Nantes), che ha seguito, verificato e validato i miei avanzamenti rendendosi disponibile ad aiutarmi nell'interpretazione dei dati acquisiti *in situ* e a darmi informazioni sulle testimonianze fossili a “*Hermelles*”.
- Il Dott. Daniele Ventura (UniRoma Sapienza) e la Prof.ssa Maria Flavia Gravina (UniRoma Tor Vergata) per avermi consigliato sulla metodologia da utilizzare per i rilievi e le mappature delle biocostruzioni.
- I Proff. Katrine Kongshavn (UiB), Anna Zhadan (MSU), Alexander Semenov (MSU) del Workshop: “Creating illustrations for publications using Adobe Photoshop” organizzato dalla Prof.ssa Nataliya Budaeva (UiB), che in maniera molto chiara e semplice mi hanno insegnato l'utilizzo a scopo scientifico di Adobe Photoshop fondamentale per la creazione dei modelli schematici di *S. alveolata* e per la composizione di tutte le figure della tesi.

I miei ringraziamenti vanno a chi mi è stato vicino, rendendo tutto il lavoro di tesi possibile, stimolante ed effettivo. Ringrazio:

- Il gruppo di ricerca dell'UniCal: il Dott. Giovanni Vespasiano, il Prof. Carmine Apollaro, la Dott.ssa Mara Cipriani e il tecnico Mariano Davoli per avermi insegnato aspetti nuovi della ricerca, aiutato praticamente nello svolgimento delle analisi sulle acque e sul biocemento e per avermi supportato tecnicamente e moralmente anche a distanza.

- Il Prof. Eugenio Fazio (UniCT) per aver svolto le riprese con il drone per il rilievo del reef a *Sabellaria* di Portopalo.
- I tecnici dell'UniCT: Alfio Viola per avermi aiutato con le fotografie al SEM e le analisi sedimentologiche; Riccardo Leonardi per aver svolto i campionamenti subacquei alla foce del Simeto nei periodi freddi.
- I Dott. dell'UniCT: Gemma Donato e Francesco D'Alpa per essermi stati vicini in quest'ultimo anno, dandomi piccoli consigli e informazioni utili durante la stesura della tesi.
- Il Dott. Salvatore Riccobene e Agatino Reitano per avermi informato sulla presenza delle biocostruzioni a *Sabellaria* nei luoghi siciliani diventati le aree investigate della presente tesi.
- Rosario Cacciola per avermi aiutato nella creazione degli istogrammi, nella ricostruzione del modello 3D digitale dell'area di Portopalo e per essere stato un supporto pratico durante le missioni.
- La Coordinatrice Prof.ssa Agata Di Stefano per aver trovato le soluzioni a tutte le problematiche burocratiche e organizzative, dovute al particolare periodo, e per aver incoraggiato noi dottorandi nei momenti difficili.
- I miei cotutori la Prof.ssa. Donatella Serio (UniCT) e il Prof. Adriano Guido (UniCal) per esserci stati sempre aiutandomi praticamente, insegnandomi ad osservare e ad analizzare la natura con occhio critico e rendendosi disponibili in qualunque momento.
- I miei revisori la Prof.ssa Daniela Basso (UniMib) e il Prof. Alessandro Vescogni (UniMore) per le loro utili e costruttive osservazioni.

Infine i miei più sinceri e sentiti ringraziamenti vanno alla mia tutor: la Prof.ssa Rossana Sanfilippo che mi è stata vicino in ogni momento, mi ha trasmesso le sue passioni e le sue conoscenze, ha vissuto fianco a fianco tutti i momenti di questi tre anni, non solo come ricercatrice ma anche come compagna di esperienza e mi ha spinto a mettermi in gioco insegnandomi a “vivere” nel mondo della ricerca.