



Nature-based reef solution for coastal protection and marine biodiversity enhancement



Progetto cofinanziato dalla Commissione Europea nell'ambito del Programma LIFE 2021-2027 – Natura & Biodiversità



COMUNE DI RAVENNA



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



PARCO DELTA DEL PO  
EMILIA-ROMAGNA



PROAMBIENTE  
Innovation & environment



FONDAZIONE FLAMINIA  
PER L'UNIVERSITÀ  
IN ROMAGNA

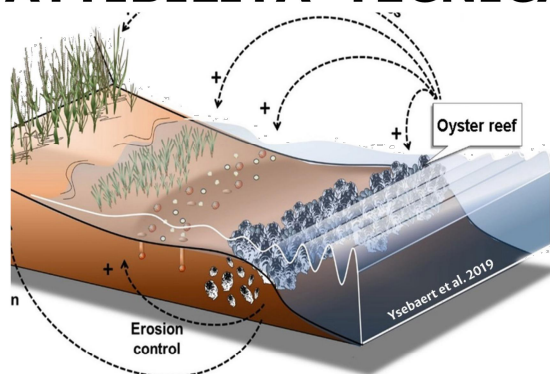


AREA INFRASTRUTTURE CIVILI SERVIZIO TUTELA AMBIENTE E TERRITORIO  
UFF. GEOLOGICO E PROT. CIVILE

INTERVENTO: Lavori finalizzati al ripristino e conservazione degli habitat marini e costieri attraverso la creazione di una scogliera di ostriche e sabellarie alla foce del Torrente Bevano (**LIFE NatuReef**) - CUP-C68H24000140001.

## FASE PROGETTUALE

# STUDIO DI FATTIBILITA' TECNICA ECONOMICA



Segretario Generale Dott. Paolo Neri		Assessore ai LL.PP.: Federica del Conte		Sindaco f.f. Fabio Sbaraglia			
Capo Servizio: Dott. Stefano Ravaoli			Capo Area: Ing. MASSIMO CAMPRINI				
<b>RESPONSABILE UNICO DI PROGETTO:</b>		Dott. Stefano Ravaoli		.....			
<b>PROGETTISTA:</b>		Acqua Ingegneria S.r.l. Ing. Riccardo Arvedi		.....  Acqua Ingegneria srl			
<b>COLLABORATORE ALLA PROGETTAZIONE:</b>		Geom. Barbara Prati		.....			
<b>COORD. SICREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:</b>		Dott. Alessandro Criscenti		.....			
<b>ELABORAZIONE GRAFICA:</b>		Geom. Barbara Prati		.....			
<b>COORD. PROGETTO LIFE:</b>		Dott. Massimo Ponti		ALMA MATER STUDIORUM UNIBO			
<b>CO-COORDINATRICE PROGETTO LIFE:</b>		Ing. Renata Archetti		ALMA MATER STUDIORUM UNIBO			
0	EMISSIONE	<b>COPIA MASTER</b>		MP	RA	AM	Febbraio 2025
Rev.	Descrizione			Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data:
ELABORATO:							
<b>PIANO PRELIMINARE DI MONITORAGGIO AMBIENTALE</b>							
Fascicolo: <b>2023/06.05/182</b>		Data: Febbraio 2025		Codice Elaborato:		<b>PMA</b>	
Scala:		File: 07_PMA_PFTE_R0.pdf		Revisione:		<b>R0</b>	

## PIANO DI MONITORAGGIO

### Sommario

1	Premesse .....	2
2	Geomorfologia marina e costiera .....	5
2.1	Rilievi batimetrici e geofisici marini .....	5
2.1.1	Ecoscandaglio .....	6
2.1.2	Ricevitore GNSS .....	7
2.1.3	Elaborazione dei dati .....	8
2.1.4	Pianificazione delle rotte .....	8
2.2	Rilievo topografico .....	9
2.2.1	Ricevitore GNSS .....	9
2.2.2	Sistema UAV .....	9
3	Condizioni meteomarine e idrodinamiche .....	13
3.1	Misure correntometriche .....	13
3.2	Misure ondametriches.....	14
4	Evoluzione della linea di costa, morfologia del sistema spiaggia-dune e copertura vegetale .....	16
4.1	Sistema digitale di analisi della linea di costa DSAS .....	16
4.1.1	<i>Net Shore Movement</i> NSM .....	16
4.1.2	<i>End Point Rate</i> EPR .....	16
4.1.3	Linear Regression Rate LRR .....	17
4.2	Valutazione e identificazione della vegetazione .....	19
4.2.1	Indice di area fogliare (LAI) .....	20
5	Habitat, comunità e biodiversità dei fondali marini .....	21
5.1	Caratteristiche dei sedimenti e comunità macrobentoniche .....	21
5.1.1	Campionamento e trattamento dei campioni .....	21
5.1.2	Analisi dei sedimenti .....	21
5.1.3	Macrobenthos .....	23
5.2	Comunità e processi ecologici sulla scogliera .....	24
5.2.1	Integrità delle reti metalliche .....	24
5.2.2	Stato di salute delle ostriche .....	24
5.2.3	Comunità macro-epibentonica .....	26
5.2.4	Fauna ittica .....	27
5.2.5	Processi di reclutamento e di biocostruzione/bioerosione .....	27
5.3	Qualità delle acque, fitoplancton ed eDNA .....	28
5.3.1	Campionamento e trattamento dei campioni .....	29
5.3.2	Estrazione del DNA ambientale .....	29
5.3.3	Analisi del contenuto di clorofilla-a .....	30
5.3.4	Analisi della concentrazione dei nutrienti .....	30
6	Ornitofauna .....	30
	Bibliografia .....	32

# 1 Premesse

L'opera in progetto rientra nel più ampio progetto co-finanziato dalla Commissione Europea **LIFE NatuReef** (*Nature-based reef solution for coastal protection and marine biodiversity enhancement*; LIFE22-NAT-IT-LIFE-NatuReef/101113742; periodo 01/07/2023 - 30/06/2027) che ha per scopo l'applicazione, a livello dimostrativo, delle migliori pratiche disponibili per il ripristino delle antiche scogliere di ostriche e sabellarie, reintroducendo le specie autoctone in un raro tratto costiero non urbanizzato della costa dell'Alto Adriatico all'intero del sito protetto di interesse comunitario della Foce del Torrente Bevano, parte del Parco del Delta del Po (sito Rete Natura 2000 - IT4070009). Il progetto LIFE NatuReef ha una sezione (*Work Package* WP2) appositamente finanziata e interamente dedicata alla valutazione dello stato ambientale ante-operam (*baseline*) e dei cambiamenti post-operam, attraverso un **piano di monitoraggio annuale** che si estende per l'intero periodo di progetto (giugno 2027) e che prevede una successiva verifica nei 5 anni successivi. La maggior parte dei rilievi e campionamenti è previsto nel periodo primaverile (marzo-maggio), alcuni rilievi sulla qualità delle acque e componenti biologiche ed ecologiche sono previsti anche in altri momenti dell'anno.

L'obiettivo primario di questo WP è quindi quello di fornire la baseline necessaria per gli habitat presenti e la biodiversità che ospitano nell'intera area di riferimento (Fig. 1). Questa baseline fornisce le condizioni di riferimento per la progettazione dell'opera, realizzata in elementi modulari di materassi di rete metallica, riempiti con spaccato calcareo, di dimensioni unitarie 5,00 x 2,00 x 0,30 m composti per formare dei macro-blocchi di dimensioni 15 x 4 x 0,30/0,60 m su un'area lorda di 100 x 48 m (Fig. 2), e il successivo monitoraggio ambientale, necessario per valutare il raggiungimento degli obiettivi del progetto in termini di conservazione di habitat e specie e ripristino della biodiversità della scogliera.

Gli obiettivi del WP sono:

- fornire la conoscenza di base su habitat e biodiversità per la progettazione e monitoraggio della scogliera,
- monitorare indicatori quantificabili che descrivono il successo e il progresso dell'azione di ripristino dei popolamenti naturali,
- valutare lo stato di salute della scogliera biogenica e la composizione della comunità associate,
- monitorare i parametri ambientali nel sito di intervento.

Le attività di monitoraggio, nell'ambito del progetto LIFE NatuReef vengono svolte in stretta collaborazione con i ricercatori e tecnici dei dipartimenti di Scienze Biologiche, Geologiche ed Ambientali (BiGeA) e di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'**Alma Mater Studiorum Università di Bologna**, del **Ente di Gestione per i Parchi e la Biodiversità - Delta del Po Emilia-Romagna** e del consorzio misto pubblico-privato **PROAMBIENTE S.C.r.l.**, che comprende il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), l'Università di Ferrara (UNIFE) e 9 piccole/medie imprese con sede nella Regione Emilia-Romagna.

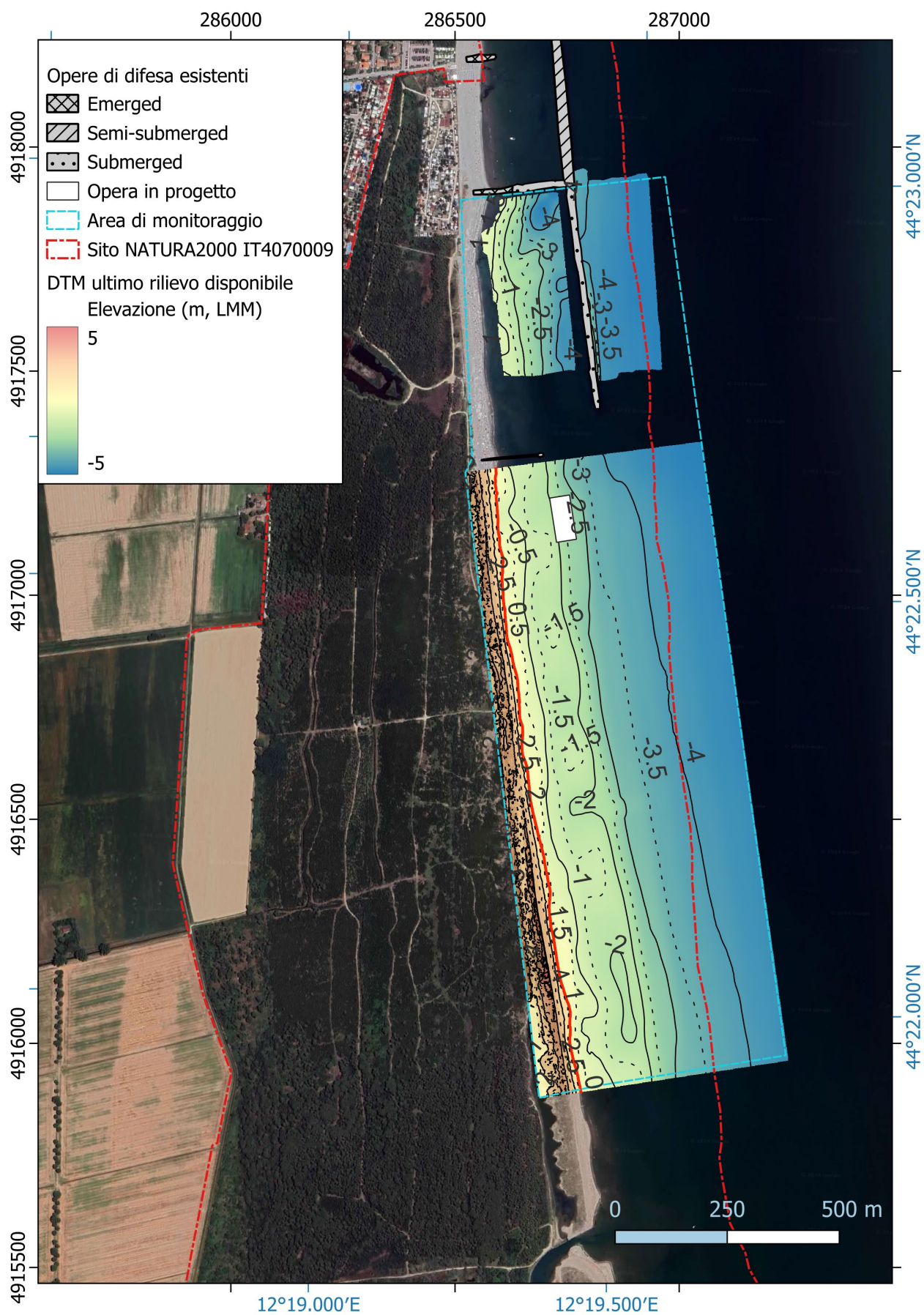


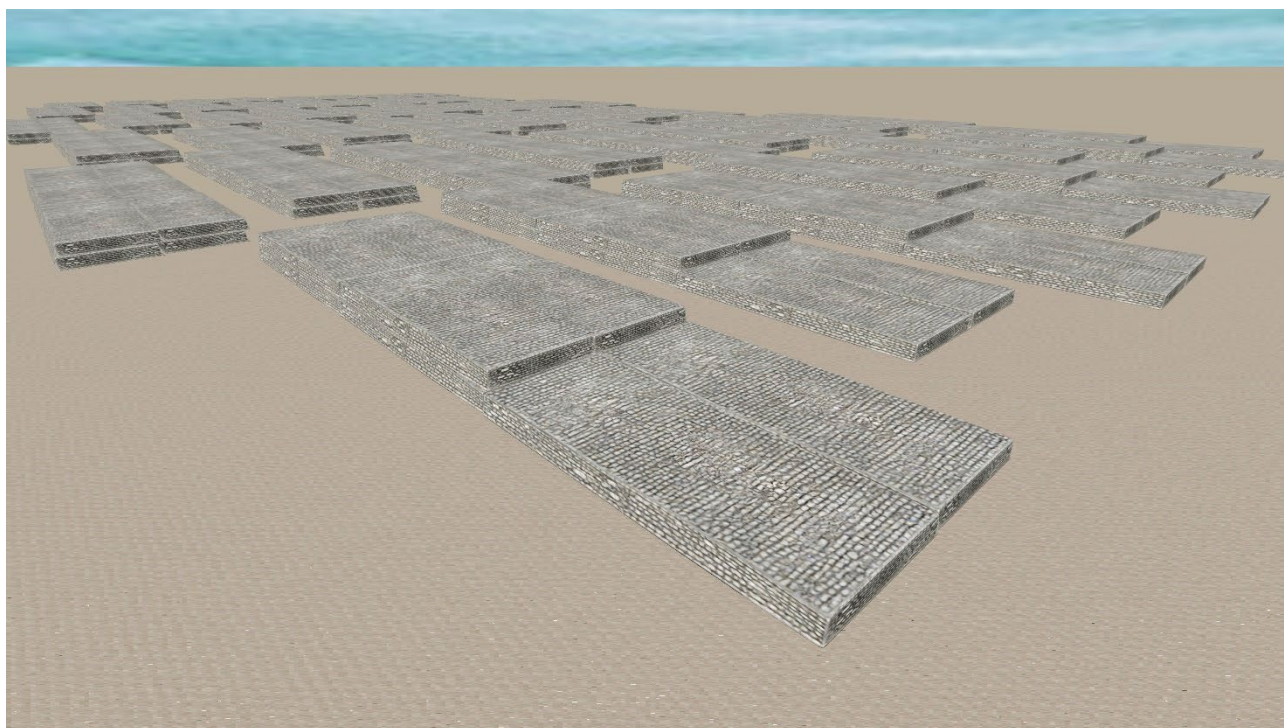
Fig. 1. Area di monitoraggio con le opere esistenti, in progetto e i rilievi già topografici disponibili.



Tutte le attività di monitoraggio, studio e ricerca in campo sono concordate e autorizzate dalle autorità competenti a terra e in mare, in particolare il Reparto Biodiversità di Punta Marina, Raggruppamento Carabinieri Biodiversità, l'Ente di Gestione per i Parchi e la Biodiversità - Delta del Po Emilia-Romagna e la Guardia Costiera di Ravenna (Nobili et al. 2024).

Tutte le attività di **volo con drone** saranno condotte da operatori con adeguata formazione e registrati UAS in Italia.

Tutte le attività di studio e ricerca in **immersione subacquea** vengono svolte da operatori scientifici subacquei certificati dall'Associazione Italiana Operatori Scientifici Subacquei ([www.aioss.eu](http://www.aioss.eu)) ai sensi delle norma tecnica UNI 11948-2 "Sicurezza e tutela della salute nelle attività lavorative scientifiche subacquee - Parte 2: Requisiti di conoscenza, abilità, autonomia e responsabilità delle figure professionali", equipollenti agli standard dell'European Scientific Diving Panel e come previsto dal DM 5 marzo 2024 "Linee guida operative cui si conformano le attività tecnico-scientifiche funzionali alla protezione dell'ambiente marino che comportano l'immersione subacquea in mare al di fuori degli ambiti portuali" del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, nonché dal manuale per le attività in esterno dell'Università di Bologna. Nelle attività possono essere coinvolti anche studenti e altro personale in formazione sotto la supervisione e responsabilità degli istruttori subacquei e docenti dell'insegnamento 37670 - Ricerca Scientifica Subacquea dell'Università di Bologna, Prof. Massimo Ponti e Dott.ssa Eva Turicchia.



*Fig. 2. Rendering dell'opera.*

## 2 Geomorfologia marina e costiera

### 2.1 Rilievi batimetrici e geofisici marini

L'ispezione geofisica di ambienti ultra-bassi come quello in studio nell'area di Bevano era fino ad oggi quasi impraticabile a causa della bassissima profondità dell'acqua, onde caotiche, maree e correnti. Tuttavia, negli ultimi anni sono state sviluppate e rese disponibili sul mercato nuove tecnologie che hanno cambiato molto la situazione. Oggi la disponibilità di elettronica piccola ma potente, alcune delle quali rilasciate con licenze OpenHardware/OpenSoftware, ha consentito lo sviluppo di piccoli veicoli di superficie in grado di navigare autonomamente dato un percorso pianificato. La capacità di seguire i percorsi pianificati con altissima precisione, impensabile per un'imbarcazione con equipaggio umano, offre la capacità di eseguire vere e proprie indagini geofisiche 4D anche nell'area bassa e ultra-bassa prospiciente la linea di costa. Gli ASV (*Autonomous Surface Vehicle*) come OpenSWAP sono una classe di veicoli autonomi, di diverse dimensioni e pesi (Fig. 3.3) sviluppati con l'obiettivo di navigare autonomamente seguendo una rotta pianificata con una precisione superiore a ~30 cm (Stanghellini et al. 2020).



*Fig. 3. Veicolo autonomo OpenSWAP.*

In particolare, gli OpenSWAP sono stati sviluppati attraverso una collaborazione Proambiente/CNR-Ismar e resi disponibili al mercato nel 2020. Sono stati ampiamente utilizzati durante il progetto di ricerca TAO, finanziato dalla Regione Emilia-Romagna con lo scopo di sviluppare un sistema in grado di monitorare e indagare l'erosione costiera e la

mitigazione. Oltre a ciò, essendo sviluppati internamente, è possibile eventualmente ottimizzare il sistema per adattarlo all'ambiente indagato (in questo caso, l'area di Bevano).

Durante tutto il progetto sono previste indagini annuali, in primavera, impiegando veicoli OpenSWAP per effettuare rilievi geofisici nell'area di monitoraggio della foce del fiume Bevano. Gli obiettivi di queste indagini ripetute saranno di ottenere le mappe morfo-batimetriche dell'area per studiare lo stato iniziale (la baseline) e l'evoluzione nei successivi anni, attraverso il confronto e l'analisi comparativa dei dati raccolti. Le immagini di backscatter del fondale marino hanno anche un contributo significativo alla produzione di mappe tematiche sullo stato del fondale marino (ad esempio, mappatura dell'habitat) e dal punto di vista morfologico: mappa dello spessore del sedimento - mappe di distribuzione del sedimento - analisi dell'erosione vs. deposizione (Del Bianco et al. 2014).

A seconda dei casi i veicoli saranno equipaggiati con:

- *single beam echosounder* (200 KHz) ad alta precisione sviluppato internamente per eseguire batimetrie ad alta precisione sulle linee di navigazione;
- *multibeam* (Klein Hydrochart 3500 multibeam interferometrico per ambienti ultra-bassi);
- *sub-bottom profiler* (chirped sub-bottom profiler (1-20 KHz) sviluppato internamente);
- *side scan sonar* (Tritech Starfish 990F a frequenza singola oppure Imagenex Yellowfish a frequenza tripla).

### 2.1.1 Ecoscandaglio

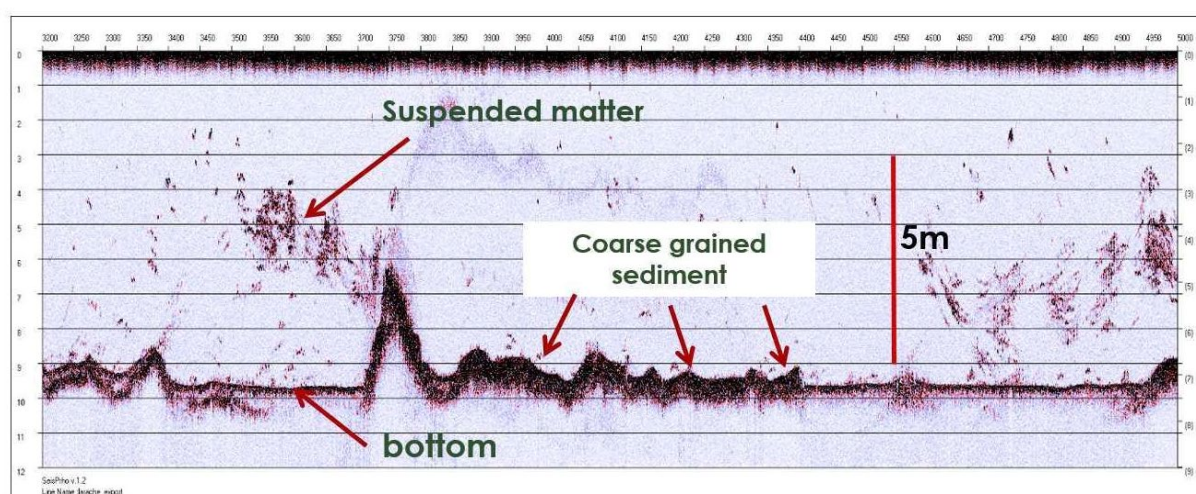
In particolare, l'ecoscandaglio (*single beam echosounder*) impiegato è stato sviluppato in collaborazione tra ISMAR-CNR e Proambiente Scrl di Bologna. Questo è caratterizzato da un'elevata frequenza operativa (50-200 kHz), larghezza del fascio stretta (8° conica), breve lunghezza dell'impulso (350  $\mu$ s) e un intervallo di profondità minima di ~0,3 m (Tab. 1). Il segnale dell'ecoscandaglio a 200 kHz viene campionato digitalmente lungo una finestra temporale costante (15 ms) che comprende colonna d'acqua, fondale e sottosuolo marino e gli ecogrammi sono archiviati in file in formato SEG Y (Fig. 4).

Questo strumento è in grado di registrare l'intero ecogramma della colonna d'acqua, consentendo l'acquisizione di vari livelli di informazioni. Il primo livello di informazioni riguarda la profondità specifica del punto, ovvero il posizionamento dell'interfaccia acqua/sedimento, che fornisce la profondità del fondale marino con una precisione verticale su scala centimetrica. Il secondo livello di informazioni riguarda la risposta acustica in tutta la colonna d'acqua e negli strati di sedimento più superficiali, a condizione che siano fini e non consolidati. Sfruttando questo "indice di riflettività", è possibile stimare la granulometria del sedimento e ricostruire i primissimi strati di qualsiasi stratificazione presente vicino al fondale marino.



Tab. 1. Parametri del Single Beam Echosounder.

Single Beam Echosounder	
Transducer brand	Airmar - 8° beam angle
Emitted frequency	50 - 200 KHz (selectable)
Depth Accuracy	1 cm/0.1% of depth (0.5 to 40m)
Pulse length	350 µsec - (variable)
N. of samples	10000 for each pulse
Data Format Acquisition	SEG-Y and NMEA \$DPT + water temperature



### High frequency profiles information is

**200 kHz**

- High precision depth (bathymetric maps)
- Water column information
- Bottom information (reflectivity >> grain size)
- Fine sediment depocenters

Fig. 4. Esempio di profilo ecografico acquisito tramite ecoscandaglio a fascio singolo operante a una frequenza di 200 kHz. Sono chiaramente visibili i tipi di informazioni che possono essere estratte dall'analisi della riflettività della colonna d'acqua.

## 2.1.2 Ricevitore GNSS

Il ricevitore GNSS U-blox RTK ZED-F9P è utilizzato in una configurazione doppia per determinare la vera direzione del veicolo in movimento. Questa configurazione prevede una base mobile e un rover mobile, entrambi dotati di antenne L1/L2. La correzione della posizione si basa su un servizio Network Real-Time Kinematic (NRTK), che utilizza Virtual Reference Stations (VRS). I dati di correzione RTCM vengono trasmessi tramite Internet a un collegamento 4G, che è collegato a un Raspberry Pi. Il Raspberry Pi riceve i dati RTCM in tempo reale tramite il collegamento 4G e li elabora tramite una connessione USB ai ricevitori GNSS, consentendo una correzione della posizione e una determinazione della direzione accurate (Fig. 5).



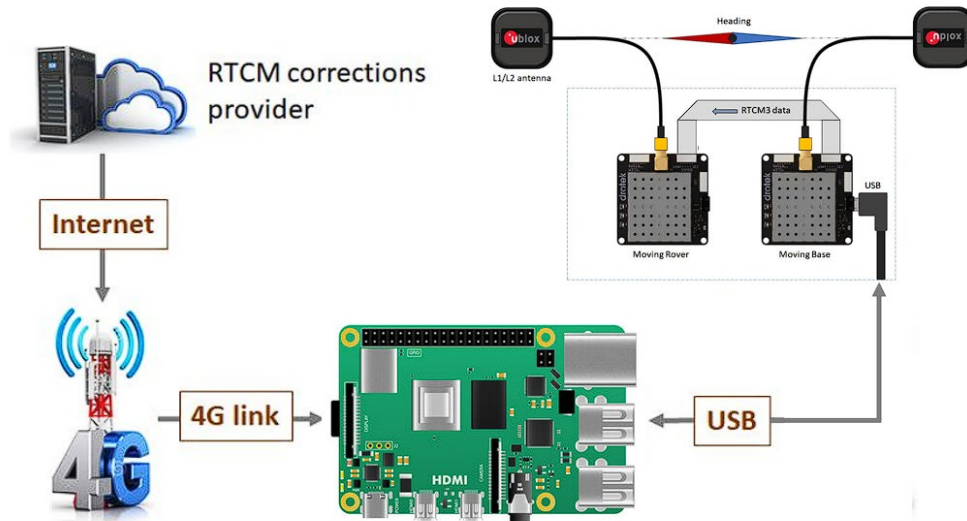


Fig. 5. Schema della configurazione del ricevitore GNSS RTK ZED-F9P a doppio U-blox per la determinazione della direzione del veicolo mediante correzioni RTCM.

### 2.1.3 Elaborazione dei dati

Dopo il filtraggio della frequenza e le correzioni di offset tra i trasduttori e l'antenna GNSS, viene impiegato un algoritmo di rilevamento del fondale per identificare automaticamente la profondità del fondale marino (*bottom tracking*). Quel tempo di transito, il cosiddetto TWT (*two-way travel*), viene convertito in profondità (m) utilizzando la velocità media del suono nell'acqua di mare (1505 m/s, in media) misurata all'inizio e alla fine di ogni rilevamento. Questi dati vengono infine elaborati con GMT (Wessel et al. 2013). Un sistema GNSS con doppio ricevitore GPS che utilizza la correzione RTK fornisce il posizionamento durante il rilevamento. Il set di dati viene fornito in quattro formati:

- GRID NetCFD – Coordinate geografiche DD.XXXXXX - WGS84 (EPSG:4326)
- File AsciiText XYZ contenente (Lat, Lon, Profondità) - Coordinate geografiche DD.XXXXXX - WGS84 (EPSG:4326)
- File AsciiText XYZ contenente (Y, X, Profondità) – Metri proiettati UTM33 – WGS84 (EPSG: 32633)
- Formato immagine GEOTiff

### 2.1.4 Pianificazione delle rotte

Il percorso pianificato è progettato per coprire l'area di studio con spaziatura delle linee regolata per tenere conto della variazione batimetrica stimata, in conformità con i dati precedentemente acquisiti da precedenti campagne di misurazione (Stanghellini et al. 2022). È stata presa in considerazione la presenza di una diga frangiflutti trasversale situata immediatamente a nord dell'area indagata.

Le rotte vengono generalmente eseguite utilizzando una navigazione completamente automatizzata. In prossimità della riva, le rotte vengono eseguite in una modalità mista

manuale/semi-automatica, consentendo l'indagine delle aree più vicine alle profondità minime rilevabili dallo strumento (circa 20-30 cm). La stazione di terra viene posizionata strategicamente sulla spiaggia in un punto centrale lungo la rotta di navigazione per mantenere il contatto visivo con il veicolo. Questo posizionamento consente alla stazione di terra di gestire efficacemente l'acquisizione dei dati dall'ecoscandaglio e garantire una navigazione accurata dell'ASV OpenSWAP lungo la rotta specificata.

## 2.2 Rilievo topografico

Il rilievo di base della porzione emersa dell'area della foce del fiume Bevano viene effettuato in primavera (generalmente marzo), sfruttando un'integrazione di tecniche: un sistema UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) incorporato con una telecamera ottica e un sensore LiDAR utilizzati per raccogliere una descrizione sia visiva che metrica della morfologia dell'area; i ricevitori GNSS (*Global Navigation Satellite System*) incorporati nel sistema UAV o su un palo sono utilizzati per motivi di georeferenziazione al fine di avere i prodotti finali riferiti al corretto sistema di coordinate: RDN2008/UTM33.

### 2.2.1 Ricevitore GNSS

Il ricevitore GNSS TopCon Hiper V è utilizzato per acquisire la posizione di una rete di punti a terra. La modalità di correzione della posizione è basata su un servizio *Network Real Time Kinematic* (NRTK), che sfrutta *Virtual Reference Stations* (VRS).

I dati GNSS di questi punti a terra, raccolti nel sistema geografico ETRS89-RDN2008 con altezza ellissoidale, vengono convertiti dal software convER nel sistema cartografico proiettato RDN2008/UTM33 con altezza ortometrica, utilizzando i dati grigliati IGM (Istituto Geografico Militare) gk-2, basati sul modello geoide ITALGEO2005. Questa elaborazione dei dati mostra un'altezza media del geoide di 39,039 m, valore utilizzato per lo spostamento globale del DTMM (*Digital Terrain and Marine Model*). La rete di punti a terra è composta da tre diverse tipologie di punti: punti permanenti, basati su perni in elementi di legno; punti non permanenti, basati su bersagli circolari in compensato, diametro 50 cm, con un motivo bianco e nero; punti non permanenti, basati su bersagli quadrati in plastica, 10×10 cm, con un motivo bianco e nero. La posizione di questi punti a terra viene utilizzata per l'elaborazione fotogrammetrica e LiDAR: alcuni punti vengono sfruttati come *Ground Control Point* e la loro posizione viene integrata nelle elaborazioni; i punti rimanenti vengono utilizzati come *Check point*; quindi, la loro posizione viene utilizzata per la valutazione dell'accuratezza della ricostruzione.

### 2.2.2 Sistema UAV

I voli UAV vengono effettuati nell'area, sfruttando la bassa marea del giorno, dal DJI Matrice 300 RTK, 810×670×430 mm (senza rotori), peso massimo al decollo 9 kg, con un carico utile massimo di 2,7 kg, equipaggiato sia con il carico utile P1 (camera ottica) che con il L1 (sensore LiDAR). La presenza di un gimbal a bordo del sistema UAV consente di compensare il

movimento della montatura, consentendo un'acquisizione stabile durante il volo. La modalità di correzione della posizione dell'UAV si basa su un servizio *Network Real Time Kinematic* (NRTK), sfruttando una *Virtual Reference Station* (VRS) posizionata in prossimità del punto di decollo.

#### 2.2.2.1 Camera ottica

Il rilievo fotogrammetrico UAV (Tab. 2) viene effettuato tramite due voli pianificati con il software DJI Pilot 2. I due voli hanno una durata complessiva di circa 36 minuti, durante i quali vengono catturate 1025 immagini ad altezza fissa dal punto di decollo di circa 45 m, con una sovrapposizione frontale e laterale rispettivamente dell'80% e del 60%.

Tab. 2. Parametri del volo fotogrammetrico UAV.

Flight Parameters	
payload name/camera model	DJI Zenmuse P1
payload type	optical camera
sensor dimension	36×24 mm
picture resolution	8192×5460 pixel
focal length	24.00 mm
forward overlap	80%
side overlap	60%
flight height (from take-off point)	45 m
Ground Sampling Distance (GSD)	~ 0.82 cm
flight speed	5.0 m/s
number of flights	2
surveyed area	~ 0.34 km <sup>2</sup>
number of images	1025 (477 in the north flight; 548 in the south flight)
flight time	~36 min (18 min for the north flight; 17 min for the south flight)

Le immagini vengono elaborate dal software fotogrammetrico Metashape, basato su un approccio *Structure-from-Motion*. In particolare, il flusso di lavoro fotogrammetrico è composto come segue:

- La posizione di ripresa, raccolta nel sistema geografico ETRS89-RDN2008 con altezza ellissoidale, viene convertita dal software convER nel sistema cartografico proiettato RDN2008/UTM33 mantenendo l'altezza ellissoidale. Le immagini e le loro nuove coordinate di ripresa vengono importate in Metashape come metadati corretti da elaborare.
- Rilevamento dei punti di legame alla risoluzione originale delle immagini con una riduzione del tempo di calcolo grazie all'uso di una strategia *coarse-to-fine*

(preselezione generica) e alla conoscenza della posizione di ripresa (preselezione di riferimento).

- Calcolo dei parametri di orientamento esterno e interno grazie alla conoscenza della posizione dei punti di legame e delle posizioni di ripresa. - Affinamento del *bundle-adjustment* grazie alla conoscenza delle coordinate dei GCP e ottimizzazione della calibrazione della telecamera ( $f$ ,  $c_x$ ,  $c_y$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ).
- Rimozione dei punti di collegamento errati (procedura di selezione graduale) e ottimizzazione dell'allineamento.
- Valutazione degli errori dei Ground Control Point (d003, d014, cs08, cs04, d004, cs07, q007, d007, cs03, d006) e dei Checkpoint (q002, d011, d010, q001, d012, d013). I GCP hanno un RMSE di circa 4,6 cm e un errore massimo di circa 8,0 cm (d006); i Checkpoint hanno un RMSE di circa 6,1 cm e un errore massimo di 8,4 cm (q002).
- Correlazione densa ad alta risoluzione (1/4 della risoluzione delle immagini originali) con un filtraggio leggero.
- Filtraggio della nuvola densa con rimozione dei punti di scarsa qualità (sono mantenuti punti con una confidenza  $\geq 3$ ).
- Generazione del modello di superficie digitale grazie all'interpolazione della nuvola di punti densa filtrata (GSD=1,66 cm)
- Generazione dell'ortomosaico con una modalità di fusione a mosaico, sfruttando il DSM come superficie di riferimento. (GSD=0,83 cm)

#### 2.2.2.2 LiDAR

Il rilievo UAV LiDAR (Tab. 3) viene effettuato tramite due voli pianificati con il software DJI Pilot 2. I due voli hanno una durata complessiva di circa 41 minuti, catturando il sito tramite una modalità di scansione non ripetitiva ad un'altezza fissa dal punto di decollo di circa 45 m, impostando una sovrapposizione della striscia laterale del 20%.

I dati LiDAR acquisiti vengono elaborati tramite il software DJI Terra Pro, impostando il sistema di coordinate di input (RDN2008) e il sistema di coordinate di output (RDN2008/UTM33 con altezza ellissoidale; Tabella 4). Non viene effettuato alcun processo di *smoothing* della rugosità, per preservare la discontinuità della scena, e l'ottimizzazione dei dati viene effettuata grazie all'integrazione delle osservazioni di una nuova stazione di riferimento virtuale situata sull'area (44° 22'2.093"N, 12°19'23.211"E, 50.0 m di altezza ellissoidale) e del valore di altitudine di alcuni punti a terra. I *Ground Control Point* (d010, d013, d007, d014, d003, d012, d011) hanno un RMSE medio della differenza di altitudine di circa 3.4 cm e i *Checkpoint* (d004, d006) hanno un RMSE medio della differenza di altitudine di circa 4.4 cm. La generazione del Modello Digitale del Terreno (DTM) viene effettuata alla risoluzione di 0,2 m, sfruttando la classificazione puntuale del terreno con i parametri del "debole pendio" (angolo di iterazione di 6°, distanza di iterazione di 0,5 m).



Tab. 3. Parametri del volo UAV LiDAR.

Flight Parameters	
payload name	DJI Zenmuse L1
payload type	LiDAR sensor with an integrated optical camera
camera model	EP800
sensor dimension (optical camera)	1 inch
focal length (optical camera)	8.8 mm
picture resolution (optical camera)	5472×3648 pixel
side overlap (LiDAR)	20%
forward overlap (optical camera)	70%
side overlap (optical camera)	37%
flight height (from take-off point)	45 m
cloud density	~381 point/m <sup>2</sup>
Ground Sampling Distance (optical camera)	~1.23 cm
flight speed	4.7 m/s
return mode	triple
scanning mode	non-repetitive
number of flights	2
surveyed area	~ 0.38 km <sup>2</sup>
number of images	746 (375 in the north flight; 371 in the south flight)
estimated time	~41 min (20 min for the north flight; 21 min for the south flight)

### 3 Condizioni meteomarine e idrodinamiche

Il monitoraggio e l'analisi delle condizioni meteomarine sono volti alla verifica delle simulazioni numeriche progettuali in merito agli effetti e all'efficacia dell'opera nei confronti del moto ondoso e delle correnti marine nell'introno dell'opera stessa, ed in particolare tra l'opera e la riva.

#### 3.1 Misure correntometriche

Vengono eseguite campagne specifiche di misura correntometriche sopra e nell'introno dell'opera. Allo scopo vengono utilizzati due tipologie di strumenti.

##### 3.1.1.1 *Acoustic Doppler current profiler ADCP*

L' ADCP è un misuratore di corrente idroacustico simile a un sonar, utilizzato per misurare le velocità delle correnti d'acqua su un intervallo di profondità utilizzando l'effetto Doppler delle onde sonore diffuse dalle particelle all'interno della colonna d'acqua. L'intervallo di frequenze di lavoro degli ADCP varia da 38 kHz a diversi megahertz. Sarà installato in configurazione “upward-looking” (rivolto dal fondale verso l'alto), consentendo di misurare la velocità e la direzione delle correnti a intervalli uguali fino alla superficie. Lo strumento consente anche di misurare il moto ondoso sovrastante.

##### 3.1.1.2 *TCM-4 Tilt Current Meter*

Per misure correntometriche puntuali replicate all'interno ed esterno dell'area protetta dall'opera saranno eseguite in simultanea per lunghi periodi di acquisizione con tre o più correntometri TCM-4 (Fig. 6).

Il misuratore di corrente a inclinazione TCM-4 della Lowell Instrument LLC è progettato per l'uso in acque poco profonde come lagune costiere, fiumi e corsi d'acqua. Il TCM-4 necessita di soli 28 cm di profondità d'acqua per funzionare ed è facile da installare a mano o da una piccola imbarcazione. I misuratori di corrente a inclinazione misurano la corrente utilizzando il principio di trascinamento-inclinazione. Il design fisico è semplice; il misuratore è galleggiante ed è fissato tramite un cavo flessibile ancorato. L'acqua in movimento inclina il logger nella direzione del flusso. Un accelerometro a 3 assi e un magnetometro a 3 assi determinano l'inclinazione e la direzione. Il misuratore contiene anche un termistore per la registrazione della temperatura. L'elettronica del misuratore è alloggiata in una custodia in fibra di carbonio senza sensori esterni. La custodia stessa galleggia e il data logger integrato include un'interfaccia di comunicazione USB, una scheda di memoria flash microSD e una batteria al litio a lunga durata.

	<b>Range</b>	<b>Accuracy</b>	<b>Resolution</b>
<i>Speed (Recommended Range)</i>	0-50 cm/s	3 cm/s + 3% of reading	0.1 cm/s
<i>Speed (Maximum Range)</i>	0-75 cm/s	Not Specified	0.1 cm/s
<i>Direction</i>	0-360°	5° (for speed >5 cm/s)	0.1°
<i>Temperature</i>	-5 to 30 °C	0.1 °C	<0.005 °C
	-20 to -5, 30 to 50°C	0.2 °C	<0.01 °C

#### Electronics

<i>Memory</i>	8 GB microSDHC flash card (standard)
<i>Communications</i>	Full speed USB micro-B port
<i>Battery Type</i>	3.6 V, size "A", user replaceable lithium (from Lowell Instruments)
<i>Battery Life</i>	Months to years depending on recording rates
<i>Internal Clock</i>	< 1 minute of error per month

#### Operating Modes

<i>Start and Stop</i>	Start and Stop at user defined times
<i>Burst Mode</i>	Variable rate logging at user defined interval
<i>Recording Rate</i>	Current: 64 Hz to 1 sample per hour with typical settings of one 20 second burst @ 8 Hz per minute (12-month battery life) Temperature: 1 Hz to 1 sample per hour

#### Mechanical

<i>Depth Rating</i>	30 m (100 ft)
<i>Dimensions</i>	Diameter: 2.54 cm (1.00") Length: 25.4 cm (10.0")
<i>Weight</i>	98 g (3.5 oz)
<i>Construction</i>	Housing: Carbon Fiber and Epoxy Laminate with PVC & PETG fittings, 316 Stainless Steel Screw and Buna and EPDM O-rings.

#### Software

<i>User Interface</i>	Windows® Compatible Software Download
<i>USB</i>	USB 2.0 compliant MSC and CDC Classes
<i>Firmware</i>	Field upgradable via USB cable

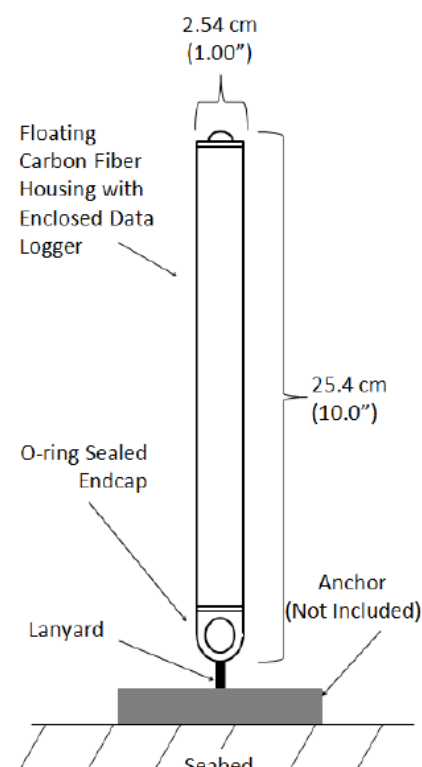
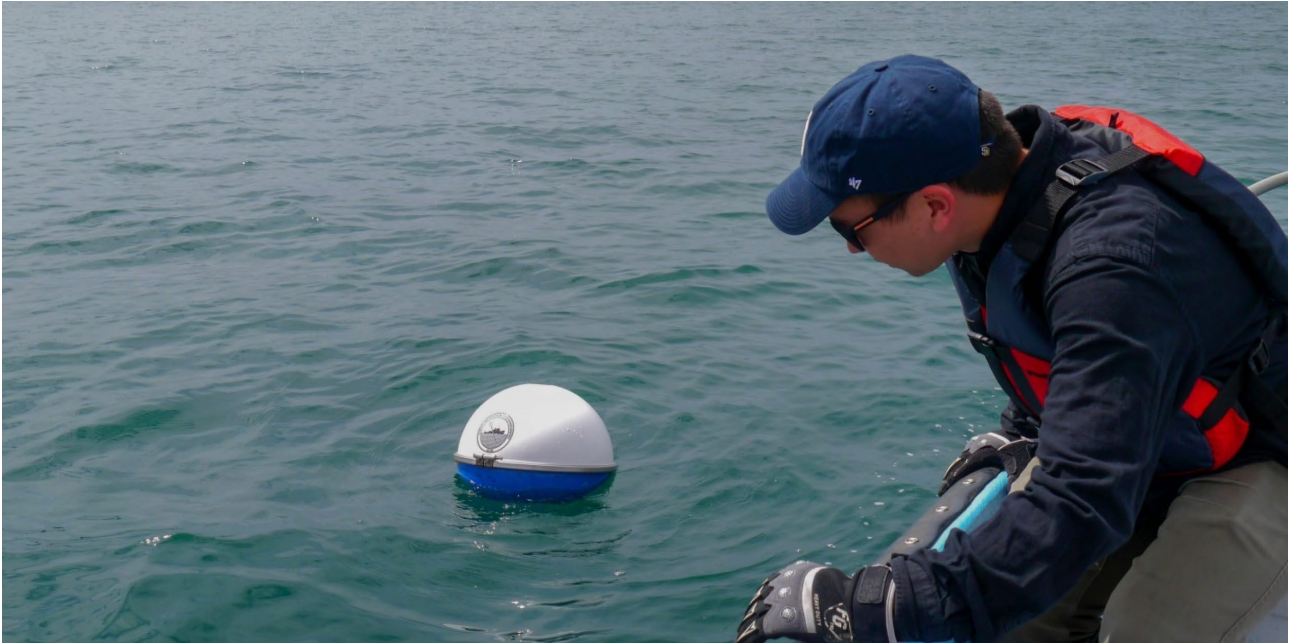


Fig. 6. Specifiche e schema del correntometro TCM-4 della Lowell Instrument, LLC.

## 3.2 Misure ondametriches

Oltre ad utilizzare, come condizioni al contorno, le misure in continuo della boa oceanografica NAUSICAA2 (modello DWR-4 ACM della ditta olandese Datawell)<sup>1</sup>, vengono eseguite campagne specifiche di misura ondametrica al largo e nell'introno dell'opera. Allo scopo saranno utilizzate boe equipaggiate con *GPS Directional Wave Sensor* sviluppato dal *Scripps Institution of Oceanography* (Fig. 7). Le boe con i sensori vengono posizionate nei punti fissi prescelti per le analisi e mantenute per i cicli di misura previsti.

<sup>1</sup> <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/mare/dati-e-indicatori/dati-boas-ondametrica>



*Fig. 7. Boa ondametrica GPS Directional Wave Sensor, Scripps Institution of Oceanography.*

Specifiche della boa:

- Scafo in ABS da 44 cm di diametro
- Pacco batteria sostituibile
- Sensori diagnostici di bordo
- Vernice antivegetativa
- Attacco a bullone ad occhiello per l'uso come sistema di ormeggio

Specifiche del sensore ondametrico:

- Coefficienti di Fourier  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$ ,  $b_2$  da 0,03 Hz a 0,50 Hz
- Larghezza di banda 1/256 Hz
- Calcolo a bordo dei parametri delle onde  $H_{mo}$ ,  $T_{peak}$ ,  $T_{mean}$ ,  $D_d$
- Regime di campionamento programmabile dall'utente
- Tracciamento satellitare a 56 canali
- Precisione della posizione di 2,0 m
- Precisione della velocità di 0,1 m/s
- Precisione della direzione di 0,5 gradi

Per le misure ondametriches sarà utilizzato anche uno strumento Acoustic Doppler current profiler ADCP, precedentemente descritto.



## 4 Evoluzione della linea di costa, morfologia del sistema spiaggia-dune e copertura vegetale

### 4.1 Sistema digitale di analisi della linea di costa DSAS

DSAS, inizialmente sviluppato dall'United States Geological Survey (USGS) come componente aggiuntivo per ArcGIS dell'Environmental Systems Research Institute (ESRI), è uno strumento statistico fondamentale per analizzare i cambiamenti geomorfologici costieri sia a breve che a lungo termine. Calcola i tassi di cambiamento della linea di costa utilizzando dati storici della linea di costa, fornendo una base statistica per analizzare i cambiamenti nella posizione della linea di costa. DSAS calcola varie metriche come il *Net Shore Movement* (NSM), l'*End Point Rate* (EPR) e il *Linear Regression Rate* (LRR) per quantificare il movimento della linea di costa (Himmelstoss et al. 2021). Il software richiede all'utente di specificare le linee di base per le quali devono essere calcolate le statistiche. L'utente deve anche immettere le impostazioni per il casting dei transetti (ad esempio la distanza tra i transetti) che intercettano le linee di costa disponibili e lungo le quali vengono calcolati questi valori.

#### 4.1.1 *Net Shore Movement* NSM

Il *Net Shoreline Movement* (NSM) è una misura utilizzata nell'analisi costiera per determinare la distanza totale percorsa da una linea di costa tra due date specifiche. È definito come la distanza (m) tra la linea di costa più vecchia e quella più giovane lungo ogni transetto su cui viene eseguita l'analisi DSAS. A differenza dell'*End Point Rate* (EPR), che normalizza questo movimento nel tempo per fornire una velocità (m/anno), l'NSM indica semplicemente il cambiamento assoluto nella posizione senza considerare l'intervallo di tempo.

Quando la linea di base è al largo, un valore positivo di NSM indica che la linea di costa si è spostata verso il mare nel periodo esaminato e rappresenta un accrescimento o un guadagno di superficie terrestre lungo la costa. Un valore negativo indica che la linea di costa si è spostata verso terra nel periodo esaminato e rappresenta un'erosione o una perdita di superficie terrestre lungo la costa.

Nel monitoraggio costiero, l'NSM fornisce una misura semplice del cambiamento della linea di costa, aiutando i gestori costieri e i ricercatori a comprendere l'entità dei processi costieri in un periodo specificato. Può essere particolarmente utile nell'identificazione di aree di significativa erosione o accrescimento, aiutando nella gestione della zona costiera, nella valutazione dei pericoli e negli sforzi di pianificazione.

#### 4.1.2 *End Point Rate* EPR

L'*End Point Rate* (EPR) è una misura del tasso di variazione (m/anno) di una linea di costa tra due date specifiche. Viene calcolato come la distanza tra la posizione della linea di costa in due diversi punti nel tempo, divisa per l'intervallo di tempo tra queste date (Fig. 8).

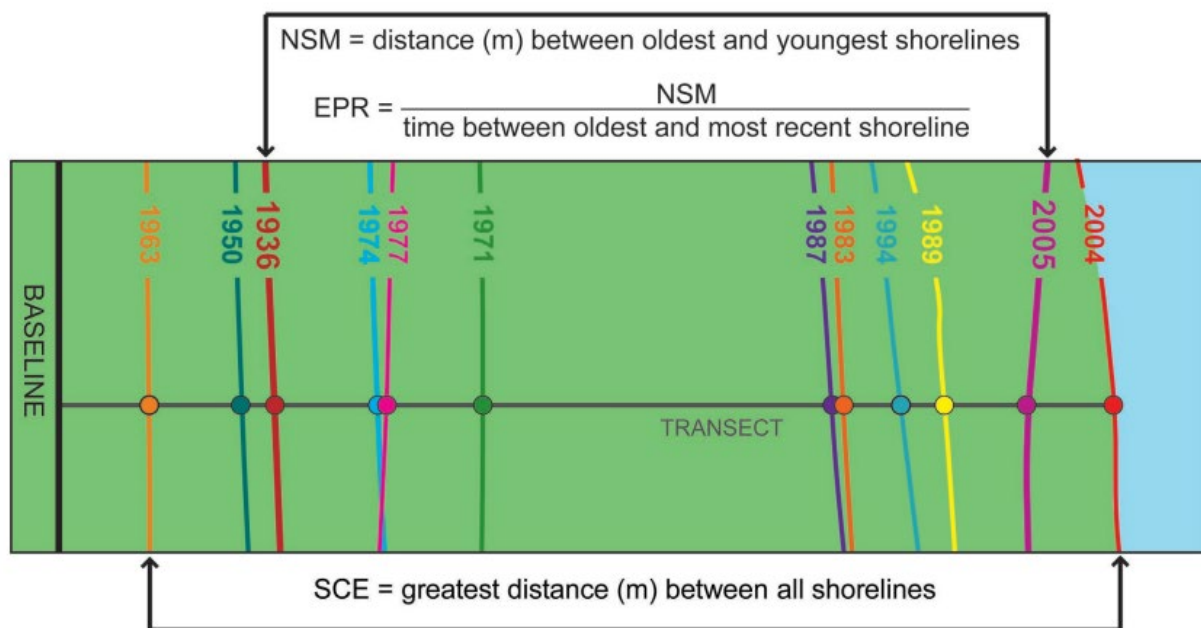


Fig. 8. Un set di dati sulla linea di costa che include dati di base (nero), transetto (grigio) e dati sulla linea di costa e intersezione (multicolore) per illustrare la relazione tra le statistiche sui cambiamenti della linea di costa: net shoreline movement (NSM), end point rate (EPR) e shoreline change envelope (SCE). NSM è la distanza lungo il transetto in metri (m) tra la linea di costa più vecchia (1936, rosso) e quella più recente (2005, magenta). L'EPR è la distanza NSM divisa per l'intervallo di tempo tra la linea di costa più vecchia (1936, rosso) e quella più recente (2005, magenta) (69 anni in questo esempio). L'SCE (generalmente non utilizzato) è la distanza maggiore tra tutte le linee di costa indipendentemente dalla data (Himmelstoss et al. 2021).

Con una linea di base offshore, un valore positivo indica un avanzamento della linea di costa verso il mare, ovvero accrescimento o deposito. Ciò significa che la linea di costa si è spostata verso il mare, in genere a causa della sedimentazione, mentre un valore negativo indica un arretramento della linea di costa verso la terra, ovvero erosione. Ciò significa che la linea di costa si è spostata verso terra a causa dell'erosione o della perdita di sedimenti.

Nel monitoraggio costiero, l'EPR è un indicatore chiave utilizzato per monitorare i cambiamenti costieri e può essere integrato con altri parametri e analisi per fornire una visione completa dei processi costieri e delle dinamiche del sistema di spiaggia.

#### 4.1.3 Linear Regression Rate LRR

Il Linear Regression Rate (LRR, m/anno) è un'altra metrica utilizzata nell'analisi della linea di costa, in particolare all'interno del Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Comporta l'adattamento di una linea di regressione lineare alle posizioni della linea di costa su una serie di punti temporali. La pendenza di questa linea fornisce il tasso di cambiamento della linea di costa nel periodo analizzato. Calcolo di LRR (Fig. 9)

##### 1. Raccolta dati:

- Raccogliere le posizioni della linea di costa in più punti temporali.

## 2. Analisi di regressione:

- Eseguire un'analisi di regressione lineare in cui l'asse x rappresenta il tempo (anni) e l'asse y rappresenta la posizione della linea di costa (distanza da una linea di base). Si noti che, in caso di una linea di base offshore, l'asse y deve contenere valori negativi per mostrare una pendenza positiva corrispondente a un accrescimento della spiaggia nel tempo.

## 3. Pendenza della retta di regressione:

- La pendenza della retta di regressione lineare adattata è il tasso di regressione lineare (LRR).
- LRR è solitamente espresso in metri all'anno (m/anno).

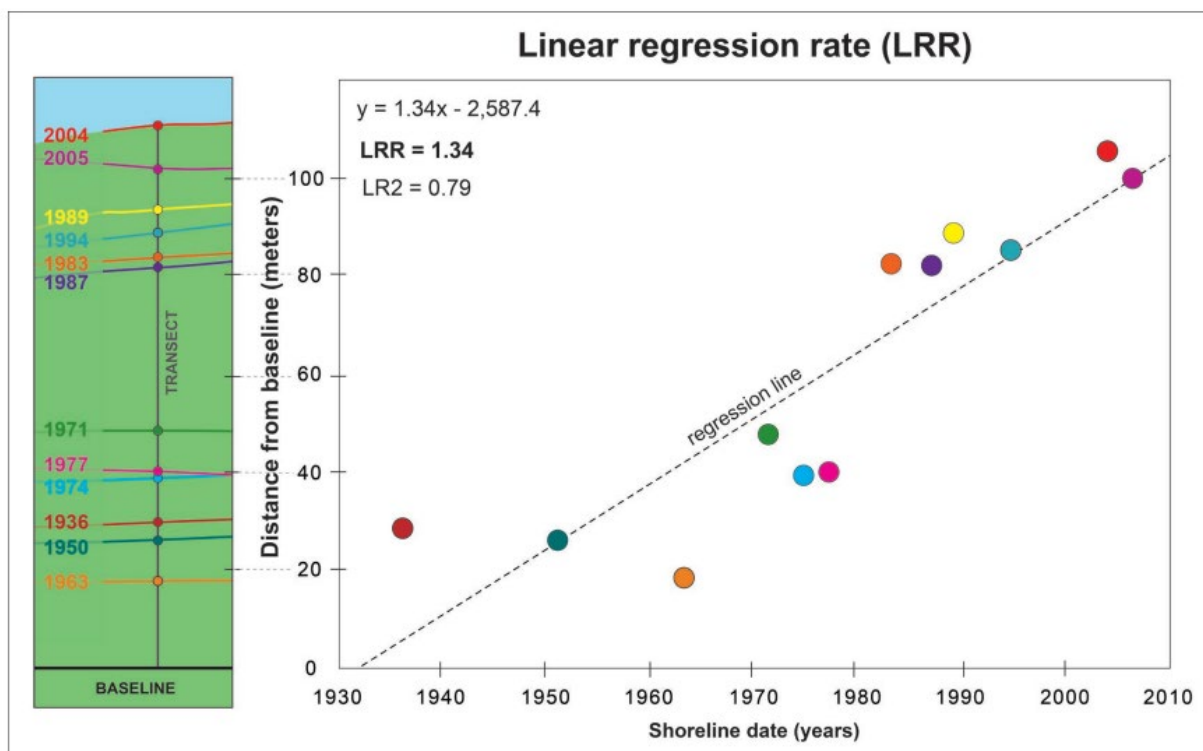


Fig. 9. Un set di dati sulla linea di costa (linea di base [nero], transetto [grigio] e linee di costa e intersezioni [multicolore]) presentato su una mappa e come grafico della distanza dalla linea di base rispetto alla data della linea di costa in relazione alla linea di regressione del tasso di regressione lineare (LRR). L'LRR è stato determinato tracciando le posizioni di intersezione della linea di costa (distanza dalla linea di base) rispetto al tempo (anni) e calcolando l'equazione di regressione lineare di  $y = 1,34x - 2587,4$ . La pendenza dell'equazione che descrive la linea è il tasso (1,34 metri all'anno). LR2, R-quadrato della regressione lineare (Himmelstoss et al., 2021).

Un LRR positivo indica che la linea di costa si sta, in media, muovendo verso il mare nel tempo. Ciò suggerisce che i processi di accrescimento o deposizione sono dominanti. Un LRR negativo indica che la linea di costa si sta, in media, muovendo verso terra nel tempo. Ciò suggerisce che i processi di erosione sono dominanti (ad esempio, un LRR di -0,5 m/anno significa che la linea di costa si sta ritirando verso terra di 0,5 m/anno in media).

Vantaggi dell'utilizzo di LRR:

- Analisi delle tendenze:
  - A differenza di NSM o EPR, che considerano solo due punti nel tempo, LRR utilizza più posizioni della linea di costa per fornire un'analisi più solida delle tendenze nel tempo.
- Fiducia statistica:
  - Il metodo di regressione lineare fornisce misure statistiche (ad esempio, valori R-quadrato, intervalli di confidenza) che indicano l'affidabilità del tasso stimato.
- Modelli temporali:
  - LRR può catturare tendenze a lungo termine ed è meno influenzato dalla variabilità a breve termine nelle posizioni della linea di costa, rendendolo utile per comprendere i processi costieri a lungo termine.

Nel monitoraggio costiero, LRR è ampiamente utilizzato dai gestori costieri per:

- Identificare le tendenze della linea di costa a lungo termine.
- Pianificare e implementare misure di protezione costiera.
- Valutare gli impatti dei processi naturali e delle attività umane su movimento della costa.

## **4.2 Valutazione e identificazione della vegetazione**

La vegetazione svolge un ruolo cruciale nella formazione e stabilizzazione delle dune costiere. Inizialmente, contribuisce alla formazione delle dune intrappolando la sabbia trasportata dal vento. Le piante, in particolare le erbe e gli arbusti bassi, catturano le particelle di sabbia con i loro steli, foglie e radici, portando alla graduale formazione della struttura della duna. Le specie pioniere, come le erbe da spiaggia, sono spesso le prime a colonizzare le aree sabbiose nude. I loro adattamenti alle dure condizioni costiere consentono loro di stabilizzare la sabbia sciolta e creare un ambiente più ospitale per l'insediamento di altre specie vegetali. Una volta stabilita, la vegetazione aiuta a stabilizzare le dune costiere attraverso i suoi estesi apparati radicali. Queste radici, che sono spesso profonde e fibrose, ancorano la sabbia in posizione, formando una rete che lega la sabbia e riduce l'erosione causata dal vento e dall'acqua. Questa stabilizzazione è essenziale per mantenere la struttura della duna nel tempo. Inoltre, la vegetazione riduce la velocità del vento vicino alla superficie, il che diminuisce la possibilità che la sabbia venga sollevata e trasportata, prevenendo così un'ulteriore erosione. Man mano che la vegetazione cresce apporta anche materia organica alla sabbia, aiutando nella formazione del suolo. Nel tempo, l'accumulo di materiale vegetale e materia organica decomposta aumenta la fertilità del suolo e sostiene una comunità vegetale diversificata, stabilizzando ulteriormente le dune. Oltre a queste funzioni, una vegetazione dunale sana fornisce protezione contro le mareggiate e le onde alte. La presenza fisica di copertura vegetale aiuta a dissipare l'energia delle onde e riduce l'impatto degli eventi di tempesta sulle aree costiere (Merloni et al. 2015).



#### 4.2.1 Indice di area fogliare (LAI)

L'indice di area fogliare (LAI) è una quantità adimensionale che caratterizza la quantità di area fogliare in una determinata area. È un parametro fondamentale per comprendere le chiome delle piante ed è ampiamente utilizzato in campi come ecologia, agricoltura, silvicoltura e telerilevamento. L'LAI è definito come l'area fogliare verde unilaterale per unità di superficie del terreno. Per le piante a foglia larga, include entrambi i lati delle foglie, mentre per le piante a foglia aghiforme, include solo un lato degli aghi. Matematicamente, può essere espresso come:

$$LAI [-] = \frac{Total\ leaf\ area\ [m^2]}{Ground\ area\ [m^2]}$$

dove l'area fogliare è la superficie totale delle foglie e l'area del terreno è l'area di terreno su cui sono distribuite le foglie.

LAI svolge un ruolo cruciale in diversi processi ecologici e agricoli. È direttamente correlato alla capacità fotosintetica delle chiome delle piante, che a sua volta influenza il ciclo del carbonio e la crescita delle piante. LAI influenza lo scambio di vapore acqueo e l'equilibrio energetico tra la chioma e l'atmosfera, rendendolo significativo nel ciclo dell'acqua e nella regolazione del clima. Serve anche come indicatore della qualità dell'habitat per la fauna selvatica, influenzando fattori come la disponibilità di cibo e il riparo. In agricoltura, LAI viene utilizzato per valutare la salute delle colture e prevedere le rese. Inoltre, LAI è una variabile chiave nel telerilevamento satellitare, consentendo il monitoraggio delle dinamiche della vegetazione su scala globale. LAI può essere misurato tramite metodi sia diretti che indiretti. I metodi diretti comportano la rimozione fisica e la misurazione delle foglie da un'area campione. I metodi indiretti includono strumenti ottici, relazioni allometriche e telerilevamento: satelliti e sensori aerei catturano immagini della vegetazione e LAI viene stimato utilizzando indici spettrali come il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) o altri modelli di trasferimento radiativo. Quando si utilizzano misurazioni ottiche, il LAI può essere stimato dalla relazione tra l'intensità della luce sopra la chioma ( $I_0$ ) e sotto la chioma ( $I_1$ ), in genere utilizzando la legge di Beer-Lambert:

$$LAI = \frac{\ln \frac{I_0}{I_1}}{k}$$

dove  $k$  è un coefficiente di estinzione della luce, che varia a seconda del tipo di vegetazione.

Nel telerilevamento, il LAI è spesso derivato da dati satellitari tramite modelli empirici o modelli di trasferimento radiativo che collegano la riflettanza o la radianza osservata al LAI.

La comprensione del LAI è fondamentale per gli studi relativi alla fisiologia vegetale, all'ecologia e alla produttività agricola, in quanto fornisce informazioni sulla struttura della chioma e sulle sue interazioni con l'ambiente. Il LAI ha varie applicazioni importanti in diversi campi. Nella gestione forestale, il monitoraggio del LAI è essenziale per valutare la salute della

foresta, pianificare i raccolti e comprendere le dinamiche forestali. Per gli studi sul clima, i dati del LAI sono fondamentali in quanto aiutano a modellare le interazioni tra clima e vegetazione, comprendere i meccanismi di feedback e prevedere scenari climatici futuri. Nelle pratiche agricole, gli agricoltori utilizzano il LAI per ottimizzare i programmi di irrigazione, la fertilizzazione e il controllo dei parassiti, con l'obiettivo finale di massimizzare le rese delle colture.

## **5 Habitat, comunità e biodiversità dei fondali marini**

### **5.1 Caratteristiche dei sedimenti e comunità macrobentoniche**

#### **5.1.1 Campionamento e trattamento dei campioni**

Per analizzare le associazioni macrobentoniche nell'area di studio, definita considerando l'ubicazione della scogliera progettata, vengono predefiniti 40 punti di campionamento, distribuiti in modo semi-casuale. I campioni vengono eseguiti in maggio e i punti di campionamento effettivi vengono localizzati con un DGPS (precisione 1 m, accuratezza 2-3 m).

I campioni vengono raccolti tramite immersioni subacquee a profondità comprese tra 0,5 e 5 m, durante giornate con buone condizioni meteorologiche e mare da calmo a poco mosso. L'area di campionamento viene delimitata con un cilindro di plastica, con un diametro di 24 cm e un'area di 452 cm<sup>2</sup>. Il campione di substrato viene raccolto con l'ausilio di una paletta, quindi inserito in un sacchetto e portato in superficie. Una volta a bordo del gommone, dal campione così raccolto viene prelevata un'aliquota di circa 50 ml, riservata all'analisi del sedimento. La parte rimanente viene setacciata mediante risciacquo in acqua di mare utilizzando una retina con fori calibrati da 500 µm. La frazione trattenuta dalla setacciatura viene conservata in alcol etilico denaturato al 95% e destinato all'analisi della componente macrobentonica. I campioni per l'analisi del sedimento sono stati conservati a -18 °C mentre quelli in alcol vengono lasciati a temperatura ambiente.

#### **5.1.2 Analisi dei sedimenti**

Prima di procedere con le analisi della sostanza organica, i campioni di sedimento vengono scongelati a temperatura ambiente.

##### **5.1.2.1 Granulometria**

Una volta scongelati, da ogni campione viene prelevata una quota di sedimento e analizzata a umido con lo strumento Malvern Mastersizer 3000 (Fig. 10). Questo è uno strumento avanzato, versatile e di facile utilizzo per l'analisi delle dimensioni delle particelle. Utilizza la tecnologia della diffrazione laser per misurare la granulometria delle particelle sospese in un mezzo liquido con dimensioni delle particelle nel range 0,01 – 2100 µm ad umido e 0,1 – 3500 µm a secco, suddividendole fino in 100 classi granulometriche decise dall'operatore. Le principali caratteristiche sono:

- Alta velocità: misurazione rapida, circa 30 s cadauna, con la possibilità di fare diverse prove ripetute dello stesso campione in poco tempo.
- Ampio intervallo di dimensioni: comprese tra 10 nm e 3.5 mm, coprendo un'ampia gamma di applicazioni.
- Precisione e accuratezza: con ottiche e sistemi di rilevamento avanzati, fornisce risultati precisi e riproducibili, fondamentali per il controllo di qualità e la ricerca.
- Funzionamento automatizzato: il sistema è di facile utilizzo e con procedure di misurazione automatizzate, riducendo gli errori dell'operatore e garantendo la coerenza nei risultati.



*Fig. 10. Malvern Mastersizer 3000.*

#### **5.1.2.2 Sostanza organica**

Una volta scongelati, da ogni campione viene prelevata una quota di sedimento e posta in un crogiolo, precedentemente pesato utilizzando una bilancia analitica elettronica con una precisione di 0,00001 g (Fig. 11). I crogioli, con il sedimento al loro interno, vengono nuovamente pesati e posti in un forno per 24 h a 80 °C. I campioni, così essiccati, vengono prima lasciati raffreddare in una campana di deumidificazione e poi pesati per determinare la perdita di contenuto d'acqua. Infine, vengono inceneriti in muffola per 8 h di attività a 450 °C e poi pesati per ottenere il valore della perdita di sostanza organica per differenza di peso con le ceneri rimanenti (*Loss on Ignition*, LOI; Ponti et al. 2009).



Fig. 11. A sinistra: campioni di sedimento durante l'analisi del contenuto di sostanza organica.

### 5.1.3 Macrobenthos

#### 5.1.3.1 Identificazione tassonomica

I campioni di macrobenthos vengono analizzati singolarmente sotto stereomicroscopi e ogni singolo esemplare viene identificato al livello tassonomico più basso possibile in base alle caratteristiche morfologiche, idealmente a livello di specie, e contato. I microscopi utilizzati vanno da stereomicroscopi per smistamento e dissezione, a foto-stereomicroscopi e foto-microscopi a forte ingrandimento ottico-digitale per l'identificazione tassonomica (Fig. 12).

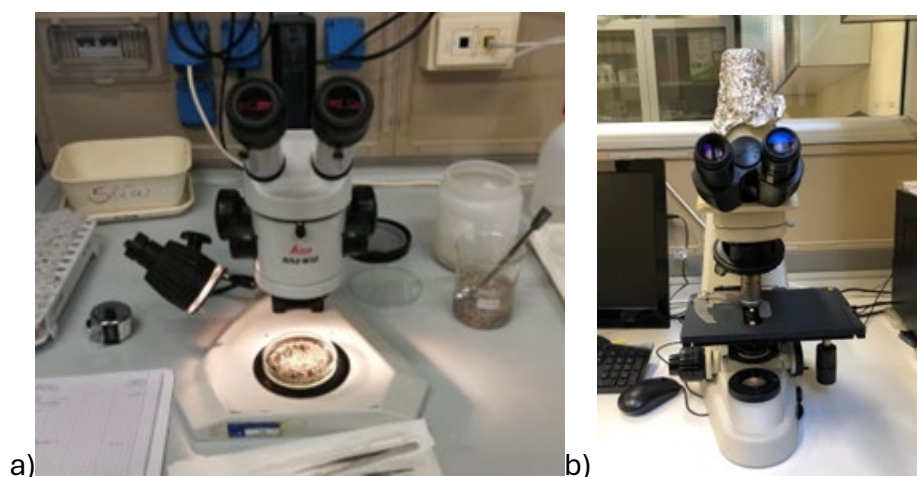


Fig. 12. a) stereomicroscopio a luce riflessa e b) microscopio a luce trasmessa ad alto ingrandimento.

#### 5.1.3.2 Indici di diversità delle specie

La diversità delle specie in ogni punto di campionamento viene calcolata utilizzando 3 degli indici di diversità più comuni (Magurran 2004):

- Ricchezza delle specie (S);
- Diversità delle specie (Hill's N1), espressa in termini di numero di specie equivalenti in una comunità con individui perfettamente equidistribuiti tra le specie;
- Equidistribuzione degli individui tra le specie (Hill's N10), espressa in termini percentuali rispetto a individui perfettamente equidistribuiti tra le specie.



#### 5.1.3.3 *Analisi della distribuzione spaziale*

L'abbondanza delle specie viene espressa come densità (ind. m<sup>-2</sup>), quindi le abbondanze (e gli indici di diversità) sono stati interpolati nell'area di studio. Le interpolazioni sono state eseguite utilizzando l'algoritmo di interpolazione *Ordinary Kriging* (OK) perché può garantire una buona accuratezza del risultato quando si lavora con dati distribuiti casualmente e con modelli naturali moderatamente complessi (MacCormack et al. 2013). Inoltre, se confrontato con altri algoritmi comunemente utilizzati nelle interpolazioni (ad esempio *Inverse Distance Weighted* e *Regular Spline*), OK può fornire una buona previsione di valori intermedi e con un errore minimo (Zhang et al. 2015). I dati sono stati interpolati utilizzando il software Surfer 11 (Golden Software 2012) utilizzando la tipologia di Kriging predefinita "*Point Kriging*" impostando il valore *Grid Spacing* a 1 m e utilizzando il modello lineare o un migliore modello di fitting, sulla base del variogramma. Infine, la rappresentazione della variabilità spaziale dei diversi parametri è stata eseguita utilizzando il software QGIS ver. 3.34 (QGIS Development Team 2024).

Distribuzioni spaziali di variabili diverse (abbondanza, indici, profondità, granulometria, sostanza organica) e le stesse variabili in tempi diversi (ante-, post- operam) vengono confrontate con analisi di correlazione spaziale. Questo consente di evidenziare eventuali anomalie locali, riconducibili o meno all'opera in progetto.

## 5.2 Comunità e processi ecologici sulla scogliera

### 5.2.1 Integrità delle reti metalliche

Annualmente, indicativamente tra aprile e giugno, sarà eseguito una ispezione visiva lungo il perimetro dell'opera e, a campione, nelle zone interne, per verificare il ricoprimento o l'eventuale esposizione e l'integrità delle reti metalliche.

### 5.2.2 Stato di salute delle ostriche

#### 5.2.2.1 *Densità di popolazione*

La densità di ostriche vive sarà valutata annualmente con campioni visivi su quadrati di 0,5 × 0,5 m.

#### 5.2.2.2 *Stato e capacità riproduttiva*

La maturità delle ostriche e la presenza di gameti saranno verificati a campione durante la stagione riproduttiva. La capacità di reclutamento di nuove ostriche a partire dalla popolazione locale sarà valutata tramite collettori di giovanili posizionati sulla struttura e a distanze crescenti a nord e a sud.

#### 5.2.2.3 *Stato di salute e misure di sicurezza per il rischio biologico*

Piano di sicurezza per il rischio biologico, predisposto per il progetto LIFE NatuReef (Franchini et al. 2024), si basa sulle linee guida europee per il ripristino di popolazioni di ostriche native (zu Ermgassen et al. 2020).

Per ridurre la probabilità di introduzione di patogeni e le loro potenziali conseguenze, verranno prese in considerazione diverse pratiche, procedure e politiche. I principali passaggi nello sviluppo di strategie di biosicurezza sono l'identificazione del pericolo, seguita da un processo di valutazione del rischio. Sulla base di questa conoscenza, possono essere sviluppati piani di mitigazione del rischio (prevenzione dell'introduzione), rilevamento e controllo delle malattie (se l'introduzione avviene) ed eradicazione. Le malattie causate da alcuni patogeni rappresentano una minaccia importante per le ostriche autoctone sia in acquacoltura che in natura. In particolare, la specie di aplosporidi *Bonamia ostreae*, che causa la malattia bonamiosi, sta ancora espandendo il suo areale in Europa e può causare fino al 90% di mortalità quando arriva in una popolazione. Allo stesso modo, le specie non autoctone invasive (NIS) sono considerate una minaccia chiave per la biodiversità in tutte le acque europee. Anche le fioriture algali dannose di specie in grado di produrre biotossine potrebbero influire sulla biodiversità e sulla biosicurezza. I vettori includono la navigazione e la nautica da diporto, ma una causa importante è stata lo spostamento dei molluschi. La presenza o l'introduzione di una malattia o di una specie NIS può avere un impatto negativo sugli obiettivi di conservazione per le specie e gli habitat protetti. Rappresentano inoltre una minaccia per il successo del ripristino delle ostriche autoctone attraverso la competizione per il cibo e lo spazio, la predazione, le epidemie di malattie, l'impatto negativo sulla biodiversità associata a un habitat biogenico sano e il danno alla reputazione. Un altro aspetto rilevante della biosicurezza è mantenere e verificare un'elevata diversità genetica nelle popolazioni seminate, che dovrebbe essere ottenuta utilizzando esemplari selvatici locali nelle pratiche di semina e tramite una buona connettività con altre popolazioni naturali. Le ostriche autoctone sono suscettibili o possono essere un vettore per una serie di altri parassiti e patogeni. Qui c'è un elenco non esaustivo di patogeni e parassiti noti che colpiscono le ostriche autoctone e che saranno ricercati annualmente attraverso analisi a campione:

- *Boccardia* (genere),
- *Cliona celata*,
- *Cliona viridis*,
- *Gyrodinium aureolum*,
- *Haplosporidium armoricum*,
- *Herrmannella duggani*,
- *Hexamita inflata*,
- *Mytilicola intestinalis*,
- *Nocardia crassostreae*,
- *Ostracoblabe implexa*,
- Papovaviridae (famiglia),
- *Perkinsus mediterraneus*,
- *Polydora* (genere),
- *Pseudoklossia* (genere),
- *Vibrio* spp. (e.g. *V. alginolyticus*, *V. anguillarum*, *V. coralliilyticus*, *V. neptunius*, *V. ostreicida*, *V. tubiashi*)

Per prevenire l'introduzione accidentale di specie invasive e patogeni durante le attività sul campo, vengono osservati i seguenti quattro punti:

4. Tutte le attrezzature, gli indumenti e le barche dopo aver svolto le attività di lavoro sul campo verranno CONTROLLATI per verificare la presenza di materiale incrostante.

Prima di lasciare il sito, tutti gli oggetti visibili, i sedimenti e i detriti devono essere rimossi. Se ciò avviene lontano dal sito, assicurarsi che tutto il materiale venga almeno smaltito in modo sicuro e in nessun caso vicino a un corso d'acqua.

5. Tutti gli oggetti del lavoro sul campo verranno PULITI accuratamente con acqua dolce il prima possibile (ad esempio, indumenti da lavoro sul campo, attrezzature di restauro, ruote del rimorchio e aree umide o difficili da raggiungere).
6. Durante le procedure di pulizia, se necessario, verrà inclusa una parte di DISINFEZIONE.
7. Tutti gli oggetti del lavoro sul campo e le attrezzature come un rimorchio e una barca devono essere ASCIUGATI alla luce del sole per drenare l'acqua rimanente prima del successivo utilizzo.

### 5.2.3 Comunità macro-epibentonica

#### 5.2.3.1 Flora e fauna sessile

I popolamenti sessili di fondo duro, sia sulla nuova opera sia su quelle preesistente, vengono analizzati annualmente, in primavera-estate, con un campionamento fotografico replicato su area standard di  $21 \times 28$  cm (Fig. 13a). Allo scopo vengono impiegate fotocamere digitali appositamente scafandrate e dotate di sistema di illuminazione e riquadratore. La percentuale di copertura degli organismi sessili viene stata quantificata sovrapponendo una griglia di 400 quadrati di uguali dimensioni utilizzando PhotoQuad (Trygonis & Sini 2012). La percentuale di ricoprimento di ciascuna specie viene riferita all'area leggibile totale di ciascuna immagine, ottenuta sottraendo zone o porzioni scure e sfocate o coperte da oggetti estranei (Ponti et al. 2011, Ponti et al. 2015, Gianni et al. 2023). In condizione di buona visibilità possono essere acquisite immagini per ricostruzioni 3D fotogrammetriche.

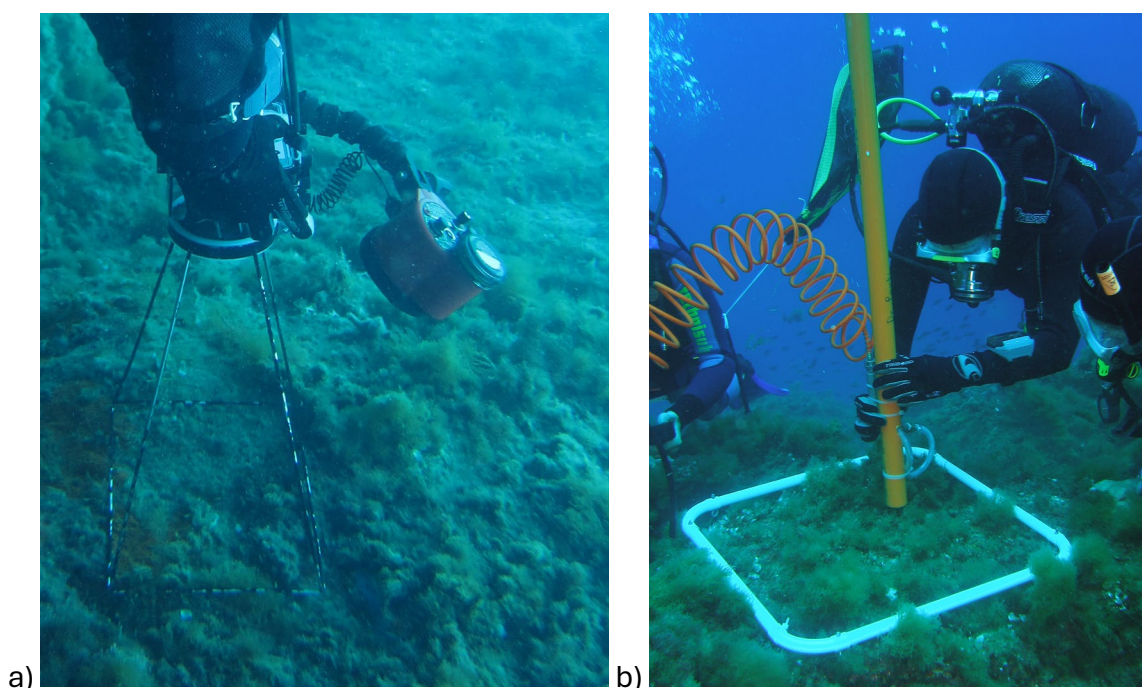


Fig. 13. Campionamento delle comunità macro-epibentoniche: a) fotocampione; b) prelievo con sorbona).

#### 5.2.3.2 Fauna vagile

La fauna vagile di fondo duro viene analizzata annualmente con campionamento a mezzo di sorbona ad aria replicato su are standard (Fig. 13b). I campioni, fissati in alcool, vengono analizzati come indicato per la fauna vagile macrobentonica dei fondi mobili circostanti (vedi 5.1.3). Inoltre, vengono realizzati videotransetti di 15 m di lunghezza (pari a quella dei macro-blocchi), alla ricerca di specie cospicue e di interesse, come ad esempio i granchi blu alieni, *Callinectes sapidus*. I videotransetti vengono eseguiti con videocamere GoPro Hero5 o superiore, in modalità full HD (1080×1920 pixel) e 25 frame/secondo.

#### 5.2.4 Fauna ittica

La fauna ittica viene campionata almeno annualmente, in primavera-estate, con due modalità:

- postazioni fisse, sia sull'opera sia in zone di confronto con altre tipologie di strutture o prive di strutture,
- transetti visivi e videotransetti di 15 m di lunghezza (pari a quella dei macro-blocchi), sia sull'opera sia in zone di confronto con altre tipologie di strutture

In considerazione della ridotta visibilità e del traffico di imbarcazioni nell'area, si opera con videocamere ad alta definizione e sensibilità GoPro Hero5 o superiore, che grazie all'elevata sensibilità e all'ampio grandangolare e profondità di campo consentono riprese anche con scarsa visibilità.

Per le postazioni fisse, le videocamere, montate su apposite basi zavorrate, vengono calate sul fondale dalla superficie o posizionate dai subacquei e lasciate registrare per non meno di 30 minuti in ogni postazione. I transetti vengono realizzati da coppie di operatori subacquei, uno addetto alle riprese e l'altro alle annotazioni manuali, su una larghezza di 2 metri, focalizzandosi all'andata sulle specie pelagiche e al ritorno su quelle bento-nectoniche e criptiche. Le riprese vengono eseguite in modalità full HD (1080×1920 pixel) e 25 frame/secondo. Le postazioni fisse e i transetti vengono scelti in maniera casuale all'interno delle aree da monitorare. I filmati vengono interamente analizzati e gli individui ripresi classificati e contati, esprimendo il dato in avvistamenti/ora, per le postazioni fisse, e individui m<sup>-2</sup> per i transetti.

#### 5.2.5 Processi di reclutamento e di biocostruzione/bioerosione

I processi di reclutamento e di biocostruzione/bioerosione vengono valutati mediante mattonelle calcaree (15,0 × 11,5 × 1,0 cm = 172,5 cm<sup>3</sup>) posizionate in modo casuale sulla struttura a partire da subito dopo la messa in opera. Le mattonelle vengono etichettate, pesate e sottoposte a Tomografia Assiale Computerizzata (TAC) prima del loro posizionamento. Nel tempo le mattonelle vengono fotografate e alcune progressivamente rimosse annualmente per essere analizzate in laboratorio, e nuovamente pesate e sottoposte a TAC. L'analisi delle incrostazioni, delle variazioni di massa e dei volumi di accrescimento ed erosi, misurati con la TAC, consentono di valutare i tassi di colonizzazione, biocostruzione e bioerosione delle diverse specie presenti (Fig. 14; Turicchia et al. 2022). In particolare, prima di ogni TAC le

mattonelle vengono essiccate (80 °C per 24 ore). Per le scansioni viene utilizzando un sistema CT sperimentale, messo a punto dall'Università di Bologna per l'analisi di beni culturali e ambientali, composto da una sorgente di raggi X microfocus (tubo a raggi X Kevex PXS10-65W), un rilevatore digitale a pannello piatto (VARIAN PS2520D, schermo di conversione Csl, 1.536 × 1.920 pixel) con una dimensione dei pixel di 127 µm e un palco di rotazione di precisione (Physik Instrument M-038). Vengono utilizzati un voltaggio della sorgente di raggi X di 130 kV e una corrente compresa tra 50 e 180 µA e il fascio è filtrato con un foglio di alluminio spesso 1,5-3 mm. Le proiezioni radiografiche vengono acquisite su 360° con incrementi angolari di 0,4°. La dimensione isotropica del voxel risultante nella configurazione adottata era di 0,1 mm. Le immagini tomografiche vengono ricostruite utilizzando il pacchetto open source SlicerMorph, che consente l'importazione, la visualizzazione, la misurazione, l'annotazione e l'analisi morfometrica su dati 3D, tra cui scansioni volumetriche (CT e MR) e scansioni di superfici 3D, il tutto all'interno dell'applicazione 3D Slicer (Rolfe et al. 2021).

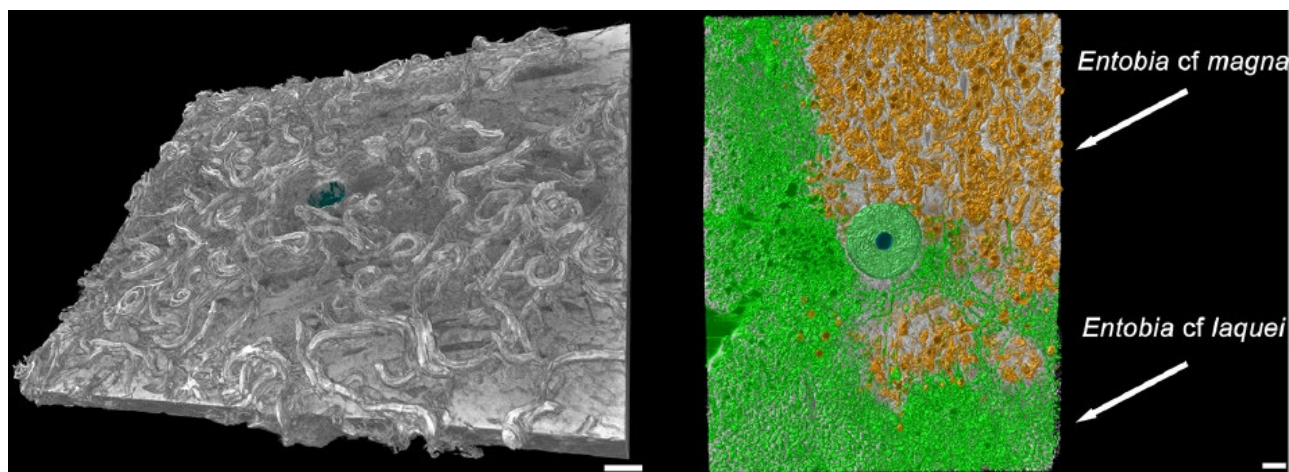


Fig. 14. Esempi di ricostruzioni 3D di mattonella calcarea da TAC: a sinistra biocostruzione esterna, a destra bioerosione interna.

### 5.3 Qualità delle acque, fitoplancton ed eDNA

Per indagare la qualità delle acque, il fitoplancton e il DNA ambientale (eDNA), sia nei sedimenti che nelle acque prossime al fondale, vengono scelti un sottoinsieme dei siti di campionamento utilizzati per l'analisi della comunità macrobentonica. I campionamenti vengono replicati almeno 2 volte all'anno, idealmente 3: in primavera, estate e autunno.

Durante il campionamento vengono stati misurati i parametri ambientali (temperatura, concentrazione di O<sub>2</sub>, conducibilità/salinità, pH, ORP, torbidità, clorofilla, ammonio) con una sonda multiparametrica (e.g., HACH, Aquared AP-2000-D).

Misure ripetute di temperatura, salinità, luce e ossigeno disciolto saranno eseguite in prossimità della scogliera utilizzando data logger (e.g., HOBO, Star Oddi) e sonde specifiche subacquee (e.g., PME).



### 5.3.1 Campionamento e trattamento dei campioni

In ogni sito di campionamento, due tipi di matrici, acqua e sedimento, vengono prelevate manualmente, da subacquei o con appositi campionatori dalla superficie. L'acqua superficiale viene raccolta in 2 bottiglie Nalgene da 1 L. I campioni di acqua di fondo vengono raccolti utilizzando bottiglie Nalgene da 1 L all'interfaccia sedimento-acqua tramite immersioni subacquee. I campioni di sedimento vengono raccolti immediatamente dopo i campioni di acqua dal primo centimetro del fondale marino utilizzando provette Falcon da 10 mL. Per evitare contaminazioni, bottiglie e provette vengono precedentemente sterilizzate con alcol etilico al 70% (EtOH) e riempite con acqua deionizzata. Entrambi i tipi di campioni vengono conservati per non più di 6 ore in un minifrigo da campo pieno di ghiaccio (condizioni di buio e bassa temperatura) per evitare la denaturazione dell'eDNA e la crescita di alghe (Laramie et al. 2015). Sia i campioni di acqua di fondo che quelli superficiali vengono successivamente conservati in una stanza buia a 4 °C immediatamente dopo ogni giorno di campionamento, mentre i campioni di sedimento vengono conservati a -20 °C. In meno di 12 ore, due aliquote da 500 mL di campioni di acqua di fondo e di superficie vengono pre-filtrati separatamente utilizzando filtri sterili in cellulosa da 3 µm (un filtro per ogni aliquota da 500 mL), seguita da una nuova filtrazione attraverso filtri sterili in cellulosa da 0,22 µm (un filtro per ogni aliquota da 500 mL). I campioni filtrati vengono quindi raccolti in provette sterili e congelati a -20 °C fino all'estrazione dell'eDNA (Hinlo et al. 2017).

Inoltre, due aliquote da 400 mL di acqua superficiale vengono filtrate su filtri non sterili GF/C (un filtro per ogni aliquota da 400 mL) per l'analisi del contenuto di clorofilla. I filtri sono conservati in provette Falcon da 15 mL a -20 °C prima dell'analisi. Due aliquote da 250 mL dal flusso di filtrazione GF/C vengono conservate per l'analisi del contenuto di nutrienti e conservate a -20 °C fino all'elaborazione. Aliquote di 200 mL di acqua superficiale vengono miscelate con soluzione di LUGOL e conservate a temperatura ambiente in bottiglie di vetro ombreggiate fino all'analisi microscopica qualitativa-quantitativa della comunità fitoplanctonica.

### 5.3.2 Estrazione del DNA ambientale

L'intero flusso di lavoro di laboratorio viene eseguito in condizioni sterili: utilizzo di strumenti autoprotettivi (camice da laboratorio, maschera e guanti) e un'area di lavoro sterilizzata (70% EtOH e 10% candeggina). L'estrazione del DNA dall'acqua di fondo e di superficie è stata eseguita utilizzando il DNeasy® Power Water Kit (Qiagen, Hilden, Germania) seguendo il protocollo del produttore. L'estrazione del sedimento viene eseguita su 500 mg di ciascun campione di sedimento utilizzando il NucleoSpin® Soil Kit (Macherey-Nagel, Germania) secondo il protocollo del produttore. La concentrazione del DNA viene quantificata utilizzando il dsDNA BR Assay Kit (ThermoFisher Scientific, Massachusetts, USA) e un Qubit 2.0 Fluorometer (Invitrogen, ThermoFisher Scientific Inc, USA). I campioni con bassa resa di DNA vengono concentrati utilizzando il kit NucleoSpin® Gel and PCR Clean-up (Macherey-Nagel, Germania) secondo il protocollo del produttore in un volume di eluizione finale di 30 µL. Per lo

screening della comunità biologica eucariotica vengono impiegati i seguenti marcatori molecolari: COI per la maggior parte dei metazoi e 18S rDNA per i non metazoi.

### 5.3.3 Analisi del contenuto di clorofilla-a

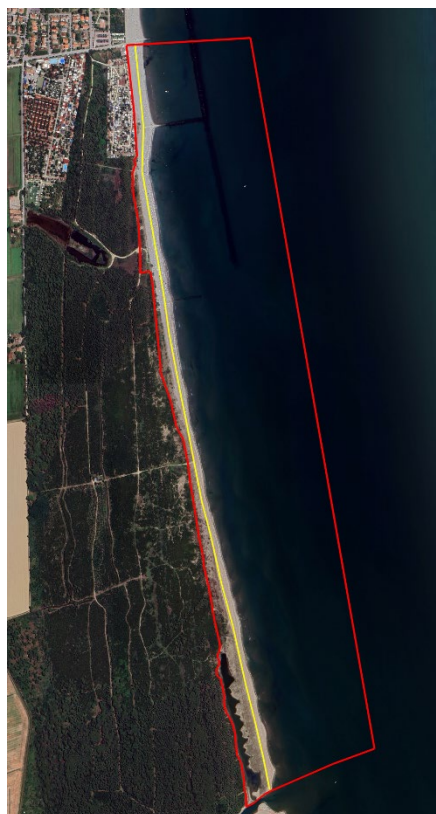
La clorofilla-a (Chl-a) viene determinata con spettrofotometro (UV/VIS, JASCO V-650, Tokyo, Giappone), utilizzando acetone al 90% come solvente per l'estrazione. Un volume (10 mL) di acetone (90% v/v) viene aggiunto a ciascuna provetta contenente il filtro. I campioni vengono agitati fino alla completa dissoluzione del filtro, quindi incubati al buio a 4 °C per 20-24 ore. Dopo l'incubazione, vengono aggiunti 5 mL di solvente al campione, quindi il campione viene agitato e centrifugato a  $2550 \times g$  per 10 min. L'assorbanza dell'estratto viene misurata a 750 e 665 nm e la concentrazione di Chl-a viene calcolata secondo le equazioni proposte da Ritchie (2006).

### 5.3.4 Analisi della concentrazione dei nutrienti

Le analisi di nitrati e fosfati sono state eseguite su acqua filtrata (filtri Whatman GF/C, dimensione dei pori 1,2  $\mu m$ ) e analizzate con spettrofotometro (UV/VIS/NIR, JASCO V-650, Tokyo, Giappone) secondo Strickland and Parsons (1972).

## 6 Ornitofauna

Il censimento dell'ornitofauna costiera e marina comprenderà sia specie protette che non protette, e i loro comportamenti svernanti e riproduttivi. Particolare attenzione viene rivolta al fratino, *Charadrius alexandrinus*\*, e al fraticello, *Sternula albifrons*\* [\* Specie prioritaria]. I rilievi vengono effettuati da ornitologi esperti con rilievi ripetuti in diverse stagioni. L'attività professionale viene integrata dalla collaborazione con associazioni ornitologiche, come parte del coinvolgimento pubblico e del monitoraggio basato sulla comunità previsti dal progetto LIFE NatuReef. È prevista un'ispezione mensile durante i periodi di migrazione degli uccelli, in linea con i metodi di censimento implementati dal parco, in collaborazione con ISPRA e AsOER, nelle principali zone umide del Delta del Po. L'ispezione viene effettuata lungo un transetto selezionato all'interno dell'area di studio, che va da Lido di Dante (in corrispondenza del Viale Paolo e Francesca) alla foce del torrente Bevano (Fig. 15).



*Fig. 15. Area di studio (linea rossa) e transetto (linea gialla).*

Nei periodi più rilevanti per lo svernamento e la nidificazione, l'intensità di rilevazione sarà incrementata come segue:

- **Svernamento:** due visite di censimento, nella parte centrale della prima e seconda metà del mese (gennaio); a questi dati si aggiungeranno quelli raccolti da Parco, ISPRA e AsOER il giorno del Censimento Internazionale degli Uccelli Acquatici.
- **Nidificazione:** due visite di ricognizione mensili, nella parte centrale della prima e seconda metà di ogni mese, da aprile a luglio.

La determinazione e il conteggio degli uccelli svernanti e migratori vengono effettuati tramite conteggio diretto, con l'uso di binocoli 10×42 e telescopi 25-60×85. La determinazione e il conteggio degli uccelli nidificanti vengono effettuati tramite rilevamento del canto dei maschi per i Passeriformi; conteggio diretto, con l'uso di binocoli 10×42, e analisi dei comportamenti comprovanti la nidificazione; conteggi dei nidi per le specie coloniali. Viene sempre posta la massima attenzione a non disturbare gli uccelli nidificanti.

## Bibliografia

- Del Bianco F, Gasperini L, Giglio F, Bortoluzzi G, Kljajic Z, Ravaioli M (2014) Seafloor morphology of the Montenegro/N. Albania Continental Margin (Adriatic Sea—Central Mediterranean). *Geomorphology* 226:202-216  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.006>
- Franchini M, Costantini F, Pezzolesi L, Cavalieri E, Vezzulli L, Ponti M (2024) Biosecurity Measures Plan. Deliverable 4.1 of the LIFE NatuReef project: Nature-based reef solution for coastal protection and marine biodiversity enhancement. LIFE22-NAT-IT-LIFE-NatuReef/101113742 <https://doi.org/10.5281/zenodo.14208880>
- Gianni F, Turicchia E, Abbiati M, Calcinai B, Caragnano A, Ciriaco S, Costantini F, Kaleb S, Piazzì L, Puce S, Querin S, Rindi F, Solidoro C, Bandelj V, Ponti M, Falace A (2023) Spatial patterns and drivers of benthic community structure on the northern Adriatic biogenic reefs. *Biodivers Conserv* 32:3283-3306 <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02654-3>
- Golden Software I (2012) Surfer Version 11.0
- Himmelstoss EA, Henderson RE, Kratzmann MG, Farris AS (2021) Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide. Open-File Report (2021-1091) US Geological Survey <https://doi.org/10.3133/ofr20211091>
- Hinlo R, Gleeson D, Lintermans M, Furlan E (2017) Methods to maximise recovery of environmental DNA from water samples. *PLoS ONE* 12:e0179251  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179251>
- Laramie MB, Pilliod DS, Goldberg CS, Strickler KM (2015) Environmental DNA sampling protocol - filtering water to capture DNA from aquatic organisms. Report No. 2-A13, Reston, VA <https://doi.org/10.3133/tm2A13>
- MacCormack KE, Brodeur JJ, Eyles CH (2013) Evaluating the impact of data quantity, distribution and algorithm selection on the accuracy of 3D subsurface models using synthetic grid models of varying complexity. *Journal of Geographical Systems* 15:71-88  
<https://doi.org/10.1007/s10109-011-0160-x>
- Magurran AE (2004) Measuring biological diversity. Blackwell Science Ltd
- Merloni N, Rigoni P, Zanni F (2015) La vegetazione delle dune litoranee nella Riserva Naturale di Foce Bevano. In: Nobili G (ed) Spiagge e dune dell'Alto Adriatico
- Nobili G, Rizzo M, Ravaioli S, Costa M, Ponti M (2024) La cooperazione delle autorità nella sorveglianza dell'area di ripopolamento (Memorandum of understanding for cooperation in the surveillance of the oyster reef). Deliverable 5.8 of the LIFE NatuReef project: Nature-based reef solution for coastal protection and marine biodiversity enhancement. LIFE22-NAT-IT-LIFE-NatuReef/101113742  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.14210162>
- Ponti M, Fava F, Abbiati M (2011) Spatial-temporal variability of epibenthic assemblages on subtidal biogenic reefs in the northern Adriatic Sea. *Mar Biol* 158:1447-1459  
<https://doi.org/10.1007/s00227-011-1661-3>
- Ponti M, Fava F, Perlini RA, Giovanardi O, Abbiati M (2015) Benthic assemblages on artificial reefs in the northwestern Adriatic Sea: Does structure type and age matter? *Mar Environ Res* 104:10-19 <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.12.004>
- Ponti M, Pasteris A, Guerra R, Abbiati M (2009) Impacts of maintenance channel dredging in a northern Adriatic coastal lagoon. II: Effects on macrobenthic assemblages in channels and ponds. *Estuar Coast Shelf Sci* 85:143-150  
<https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.06.027>

- QGIS Development Team (2024) QGIS Geographic Information System Version 3.34.12 LTR  
Open Source Geospatial Foundation Project
- Ritchie KB (2006) Regulation of microbial populations by coral surface mucus and mucus-associated bacteria. *Mar Ecol Prog Ser* 322:1-14 <https://doi.org/10.3354/meps322001>
- Rolfe S, Pieper S, Porto A, Diamond K, Winchester J, Shan S, Kirveslahti H, Boyer D, Summers A, Maga AM (2021) SlicerMorph: An open and extensible platform to retrieve, visualize and analyse 3D morphology. *Methods Ecol Evol* 12:1816-1825  
<https://doi.org/10.1111/2041-210x.13669>
- Stanghellini G, Bidini C, Romagnoli C, Archetti R, Ponti M, Turicchia E, Del Bianco F, Mercorella A, Polonia A, Giorgetti G, Gallerani A, Gasperini L (2022) Repeated (4D) marine geophysical surveys as a tool for studying the coastal environment and ground-truthing remote-sensing observations and modeling. *Remote Sensing* 14:5901  
<https://doi.org/10.3390/rs14225901>
- Stanghellini G, Del Bianco F, Gasperini L (2020) OpenSWAP, an open architecture, low cost class of autonomous surface vehicles for geophysical surveys in the shallow water environment. *12:2575* <https://doi.org/10.3390/rs12162575>
- Strickland JDH, Parsons TR (1972) A practical hand book of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada Bulletin 157, 2nd Edition
- Trygonis V, Sini M (2012) photoQuad: A dedicated seabed image processing software, and a comparative error analysis of four photoquadrat methods. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 424-425:99-108  
<https://doi.org/10.1016/j.jembe.2012.04.018>
- Turicchia E, Abbiati M, Bettuzzi M, Calcinai B, Morigi MP, Summers AP, Ponti M (2022) Bioconstruction and bioerosion in the northern Adriatic coralligenous reefs quantified by X-ray computed tomography. *Front Mar Sci* 8:790869  
<https://doi.org/10.3389/fmars.2021.790869>
- Wessel P, Smith WHF, Scharroo R, Luis J, Wobbe F (2013) Generic Mapping Tools: Improved Version Released. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 94:409-410  
<https://doi.org/10.1002/2013EO450001>
- Zhang H, Lu L, Liu Y, Liu W (2015) Spatial sampling strategies for the effect of interpolation accuracy. *International Journal of Geo-Information* 4:2742-2768  
<https://doi.org/10.3390/ijgi4042742>
- zu Ermgassen PSE, Gamble C, Debney A, Colsohl B, Fabra M, Sanderson WG, Strand Å, Preston J (eds) (2020) European guidelines on biosecurity in native oyster restoration. The Zoological Society of London, UK, London, UK ISBN 978-0-900881-82-4