



Laboratorio Geofisico, Sede di Bologna

Progetto TAO Tecnologie per il monitoraggio costiero

**Interpretazione dei dati morfo-batimetrici e
dell'evoluzione di morfologie di fondale in
ambienti costieri caratterizzati da acque basse**

**Giuseppe Stanghellini, Camilla Bidini, Alessandra Mercorella,
Luca Gasperini, Alina Polonia, Fabrizio Del Bianco***

Resp. Alina Polonia

Relazione Tecnica, Gennaio 2022

*afferenza esterna Proambiente S.c.r.l. Via P.Gobetti, 101 – 40129 BO

Istituto di Scienze Marine, ISMAR-CNR, Gennaio 2022

Indice

1. Introduzione

2. Aree di Studio

2.1 Foce del Fiume Bevano

2.2 Lido Di Dante

2.3 Riccione

3. Strumenti

3.1 Side-scan sonar

3.2 Ecoscandaglio a fascio singolo

3.3 Sub-bottom profiler con tecnologia chirp

4. Organizzazione ed elaborazione dei dati raccolti

4.1 Profili Stratigrafici

4.2 Operazioni di filtraggio dei dati

4.3 Realizzazione delle mappe batimetriche

4.4 Realizzazione delle carte degli accumuli e dei residui

4.5 Dati Side-Scan Sonar

5. Interpretazione dei dati elaborati: le morfologie del fondale

5.1 Foce del Fiume Bevano

5.2 Riccione

5.3 Lido Di Dante

6. Risultati e Conclusioni

7. Bibliografia e Sitografia

1. Introduzione

La fascia costiera e le spiagge che la caratterizzano sono ecosistemi estremamente dinamici in cui si verificano continui scambi di sedimenti, guidati da molteplici fattori di controllo. Inoltre, la presenza di spiagge riflette l'esistenza di un equilibrio dinamico dato dall'alternanza di trasporto di sedimenti lungo costa e verso mare comportando la formazione di depositi di differente entità tra cui barre di sabbia e avvallamenti che costituiscono morfologie fondamentali per la caratterizzazione del fondale e delle dinamiche che lo dominano. Il numero di barre, la loro morfologia e la loro eventuale migrazione sono controllati da diversi fattori tra cui il regime del moto ondoso, la pendenza della scarpata, sia nella parte emersa che sommersa della spiaggia, e la granulometria dei sedimenti. I processi geologici e le variazioni morfologiche dei sistemi costieri sono molto complessi da osservare, poiché si verificano a diverse scale temporali ed in un ambiente estremamente dinamico quale l'acqua bassa in prossimità della costa.

Le aree di studio del Progetto TAO (Lido Di Dante, Riccione e Foce del Fiume Bevano) sono state selezionate per analizzare in dettaglio la variabilità della dinamica costiera e i fattori che ne influenzano i processi geologici attraverso l'esecuzione di rilievi ripetuti. Le campagne di raccolta dati sono state condotte nell'arco di un periodo di poco più di un anno, da Ottobre 2020 a Dicembre 2021, mediante l'utilizzo del veicolo autonomo di superficie OpenSWAP, equipaggiato di strumentazione geofisica sviluppata ad hoc nell'ambito del Progetto stesso.

L'introduzione di un sistema autonomo per l'esecuzione di indagini geofisiche in combinazione con le tecniche di telerilevamento ha permesso di raccogliere dati ad alta risoluzione tramite indagini ripetute nel tempo. L'approccio metodologico utilizzato costituisce una svolta nell'acquisizione di dati batimetrici e di sismica a riflessione in acque poco profonde poiché permette di eseguire indagini difficilmente realizzabili con altri sistemi di acquisizione, visto che la profondità dell'acqua media è spesso al di sotto del limite degli ecoscandagli convenzionali e dell'accessibilità dei natanti. A questo si aggiunge il limite legato al rumore dovuto alle onde e alla turbolenza nella colonna d'acqua che influisce fortemente sulla qualità delle misure. Grazie alla metodologia utilizzata nell'ambito del Progetto TAO, è stato possibile investigare in dettaglio la zona più vicina a costa, nei primi metri di profondità d'acqua, che ospita i processi più dinamici sia in termini di erosione che di deposizione di sedimenti. Considerando che questa zona è quella solitamente meno investigata, i dati acquisiti nell'ambito del progetto TAO costituiscono un set di dati importante che potrà costituire un riferimento per altre aree di studio.

Queste caratteristiche non solo hanno permesso di osservare la morfologia dei fondali indagati, ma hanno anche evidenziato quanto la profondità nella zona prossima a riva possa fluttuare e quali siano le principali variazioni nelle morfologie e nei corpi sedimentari presenti nei tre siti di studio, la cui caratteristica principale è data dalla presenza di barre ed avvallamenti che variano in numero e forma in prossimità della costa, sia in presenza di opere di difesa rigide (come nei siti di Lido Di Dante e Riccione), che in contesti costieri quanto più possibile preservati nel loro stato naturale (Bevano).

In questa relazione tecnica vengono illustrate le interpretazioni ricavate sulla base delle elaborazioni innovative sviluppate e dei risultati da esse ottenuti, con il fine di ricavare informazioni riguardo la composizione del fondale, le sue caratteristiche morfologiche e sedimentarie e le dinamiche costiere che lo controllano.

2. Aree di Studio

I dati acquisiti durante le campagne di rilievo provengono da tre siti di studio, scelti tra alcune delle località più importanti del litorale della costiera adriatica: Foce del Fiume Bevano (RA), Lido di Dante (RA), e Riccione (RN). Le località indagate sono parte integrante del litorale Emiliano-romagnolo, inquadrato in Fig. 1, e caratterizzate da fondali poco profondi e generalmente poco acclivi nei primi metri di spiaggia emersa e sommersa. Nonostante ciò, come illustrato in questo report, presentano caratteristiche ambientali e morfologiche piuttosto differenti che sono emerse in seguito alle indagini effettuate.

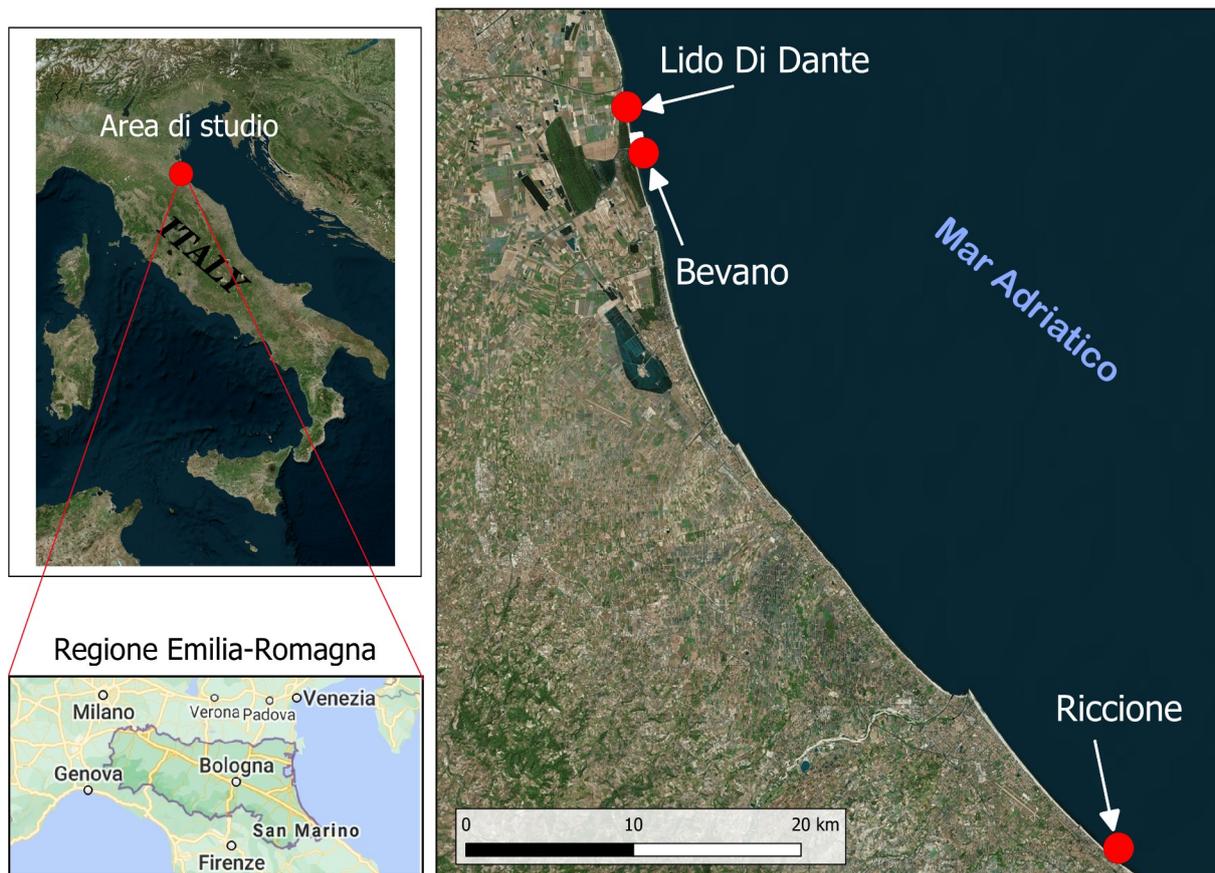


Figura 1 – Collocazione dei siti di studio individuati nell'ambito del Progetto TAO: Lido Di Dante, Bevano e Riccione.

I rilievi si sono svolti mediante l'utilizzo del veicolo autonomo di superficie OpenSWAP realizzato nell'ambito del progetto TAO, che ha eseguito la raccolta dati percorrendo rotte di navigazione preimpostate ed equipaggiato dalla specifica strumentazione geofisica, realizzata nell'ambito del Progetto stesso, costituita da Side-Scan Sonar, Ecografo a fascio singolo e Sub-bottom profiler a tecnologia CHIRP (chirp-sonar), in grado quest'ultimo di penetrare le prime decine di metri all'interno della successione sedimentaria. I dati di Side-scan, di Single-beam e di Sub-bottom così ottenuti sono stati organizzati in un database, elaborati secondo una procedura ad hoc (Capitolo 4) e hanno permesso l'interpretazione delle mappe batimetriche e dei profili stratigrafici ottenuti in seguito all'elaborazione (Capitolo 5), relativi ai tre siti di studio.

2.1 Foce del fiume Bevano



Figura 2 – Linee di navigazione eseguite a Foce del Fiume Bevano

Situata nella fascia litoranea di dune costiere naturali comprese tra Lido di Dante e Lido di Classe (Figura 1), in provincia di Ravenna, e si colloca in una riserva naturale a pochi km da località molto importanti per il turismo balneare della riviera, per questo fortemente antropizzate. Questa zona del litorale è caratterizzata dalla prevalenza di un fondale sabbioso, con una profondità massime di - 5 m.

2.2 Lido Di Dante



Figura 3 – Linee di navigazione eseguite a Lido Di Dante

La fascia costiera antistante il Lido di Dante, a sud del Camping Ramazzotti, si estende per un'area complessiva di circa 1,6 km² (Figura 2); in questo sito sono presenti barriere semi-sommerse a protezione della costa, in un battente di acqua della profondità massima di 5 m.

2.3 Riccione

La fascia costiera di Riccione costituisce una località molto importante per il turismo balneare della riviera e per questo fortemente impattata; lungo il litorale vengono periodicamente effettuati interventi di ripascimento con sedimenti sabbiosi al fine di preservare la zona costiera dalla forte erosione; l'area di indagine relativa al sito di studio è visibile in Figura 3.

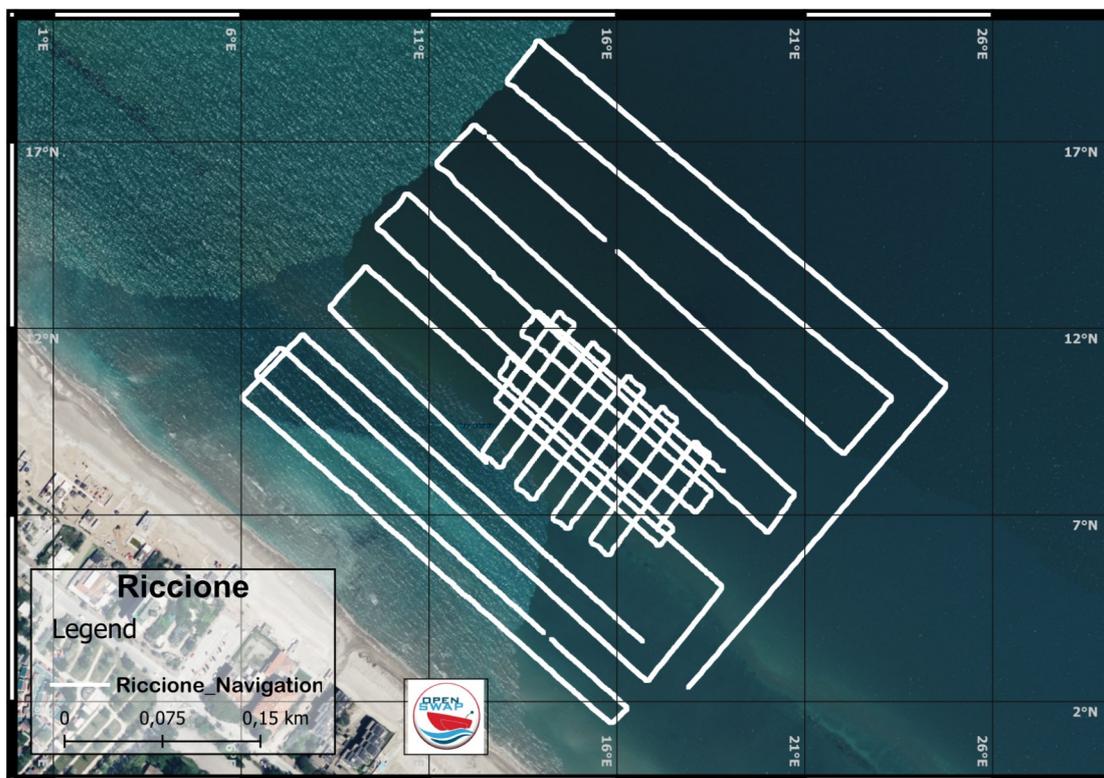


Figura 4 – Linee di navigazione eseguite a Riccione

3. Strumentazione geofisica

3.1 Side Scan Sonar



Figura 5 - Side-scan Sonar Starfish, Tritech

In un primo momento sul veicolo autonomo è stato installato il Side-Scan Sonar commerciale Starfish 990F (Figura 5), prodotto dalla Tritech. Si tratta di uno strumento relativamente economico, portatile e leggero, ma con caratteristiche utili al raggiungimento degli obiettivi previsti dal progetto TAO, e cioè l'acquisizione di immagini acustiche del fondale marino ad una risoluzione simile a quella di un rilievo fotogrammetrico. Il flusso di lavoro per l'elaborazione dei dati acquisiti da questo strumento è stato formulato tenendo in considerazione le specificità dello strumento, come la frequenza di emissione del segnale (900 kHz), che controlla la risoluzione dei dati, e la larghezza dello "swath", il cono di insonificazione che controlla la copertura laterale dello strumento. Questi parametri sono stati decisi sulla base delle esigenze specifiche di ogni sito in esame, e sulla ipotizzata utilità delle immagini side-scan a fare luce sui processi geologici in atto.

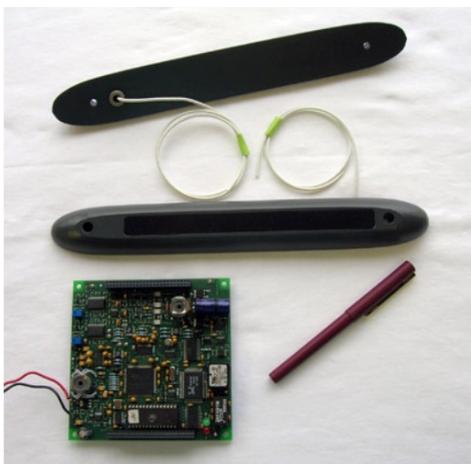


Figura 6 - Side-scan Sonar Imagenex



Figura 7 - case sviluppato per contenere side-scan Imagenex

Successivamente, col procedere delle campagne di rilievo, si è constatato la necessità di lavorare sul campo con uno strumento che restituisse in output dei dati in un formato maggiormente utilizzabile in elaborazioni di campagne idrografiche e che permettesse di correggere il rapporto segnale/rumore, in modo da ricavarne mappe di riflettività più rappresentative rispetto a quelle precedentemente ottenute.

Procedendo in quest'ottica è stato utilizzato il Side Scan Sonar della ditta Imagenex, anch'esso portatile e leggero, in quanto le componenti elettroniche che lo compongono sono state collocate all'interno di un case sviluppato ad hoc a bordo del veicolo (Fig. 7). A questo punto i dati sono stati acquisiti con una frequenza di emissione del segnale di 260 e 330 kHz, ciò ha permesso di

ottenere dati con un miglior rapporto segnale/rumore rispetto all'emissione a 900 kHz come spiegato nel seguente Capitolo 4.

3.2 Ecoscandaglio a fascio singolo

I dati ecografici sono stati acquisiti utilizzando un ecoscandaglio a fascio singolo e incidenza normale accoppiato ad un sistema di campionamento del segnale basato su tecnologie "open" sviluppate in ISMAR-CNR (Stanghellini et al., 2020). Anche i dati ecografici sono stati acquisiti secondo parametri definiti sulla base delle caratteristiche delle aree di indagine, in modo da ottenere una buona copertura del fondale relativamente agli obiettivi geologici. I dati acquisiti da un sistema ecografico a fascio singolo sono generalmente costituiti dalle misure dei tempi di percorrenza dell'impulso ultrasonico (200 kHz nel nostro caso) che l'impulso acustico impiega dalla sua emissione alla successiva riflessione dal fondale e quindi al suo ritorno al punto di emissione, cioè a quello che tecnicamente viene chiamato "tempo di volo". Nel caso della strumentazione installata sul natante autonomo OpenSWAP (Stanghellini et al., 2020) la tipologia di dato registrato contiene in aggiunta a ciò anche tutto l'ecogramma temporale dalla emissione dell'impulso acustico alla sua ricezione, questo permette tramite opportuna elaborazione acustica di ottenere informazioni aggiuntive molto utili per la classificazione del fondale come la riflettività e di conseguenza, tramite opportuna fase di calibrazione, anche di granulometria. I dati di acquisizione utilizzati dal "single-beam-echosounder" per le campagne di rilevamento oggetto di questa relazione sono riportati in Tabella 1.

frequenza emessa	200 kHz
lunghezza impulso	200 μ sec
n. di campioni	5000

3.3 Sub-bottom profiler con tecnologia chirp



Figura 8 - Sub-bottom profiler a tecnologia chirp

I dati di sub-bottom sono stati acquisiti utilizzando un sub-bottom con tecnologia CHIRP, completamente programmabile, sviluppato nell'ambito del progetto TAO (Figura 8) ed integrato al veicolo autonomo di superficie.

La caratteristica peculiare del "sub-bottom" installato sul natante autonomo OpenSWAP è la completa programmabilità dell'ecogramma di emissione (impulso CHIRP) questo consente da un lato di avere il controllo sulla tipologia del segnale acustico emesso e quindi sulla sua potenziale energia di impatto sul fondale e dall'altro la possibilità di applicare metodiche di riduzione del dato acquisito che prendono in considerazione l'esatta forma d'onda dell'impulso emesso. Con una oculata scelta del procedimento matematico di estrazione dell'impulso dalle forme

d'onda si ottiene come vedremo un notevole miglioramento della risoluzione e della ampiezza del segnale ricevuto. I dati di acquisizione utilizzati dal "subbottom-profiler" per le campagne di rilevamento oggetto di questa relazione sono di seguito riportati (Tabella 2).

frequenza emessa	2-7 kHz
lunghezza impulso	1-5 msec
n. di campioni	10000

4. Organizzazione ed elaborazione dei dati raccolti

I dati ottenuti dalle campagne di rilievo previste per il Progetto TAO sono stati raccolti e strutturati in un database organizzato in base alla suddivisione dei tre siti studio di Progetto:

- Riccione
- Foce del fiume Bevano
- Lido Di Dante

I dati pervenuti per l'elaborazione e raccolti nel suddetto database sono relativi ai seguenti rilievi:

- Foce del fiume Bevano
SURVEY 1: BEVANO-2020-07
SURVEY 2: BEVANO-2021-04
SURVEY 3: BEVANO-2021-09
SURVEY 4: BEVANO-2021-12
- Lido Di Dante
SURVEY 1: LIDODIDANTE-2020-10
SURVEY 2: LIDODIDANTE-2021-04
SURVEY 3: LIDODIDANTE-2021-09
SURVEY 4: LIDODIDANTE-2021-12
- Riccione
SURVEY 1: RICCIONE-2020-12
SURVEY 2: RICCIONE-2021-06
SURVEY 3: RICCIONE-2021-11

Durante ogni campagna di rilievo i dati sono stati raccolti dal veicolo autonomo di superficie, equipaggiato con la strumentazione geofisica citata nel precedente Capitolo, che ha permesso di ottenere dati di tipo chirp, echo e side-scan, inseriti nel database con una struttura "ad albero".

Una volta ordinati i dati raw, si è proceduto all'elaborazione di questi secondo le procedure ampiamente spiegate nel Capitolo 3. Infine, i prodotti delle elaborazioni sono stati organizzati con la medesima struttura dei dati raw, andando a costituire i dati processati a partire dai quali si sono ottenuti i profili stratigrafici, le mappe batimetriche, rappresentative della morfologia del fondale, e le carte degli accumuli e delle erosioni.

4.1 Profili Stratigrafici

I profili sono stati ottenuti mediante i dati di sub-bottom, acquisiti utilizzando il sub-bottom con tecnologia CHIRP, integrato e programmabile, sviluppato nell'ambito del progetto TAO. Considerando le profondità di indagine e la tipologia di sedimento del substrato, sono stati scelti i parametri di acquisizione riportati in Tabella 3:

Pulse length	5 ms
Frequency	2-7 kHz
Ping Rate	6 Hz

Queste acquisizioni costituiscono uno dei primi esempi di dati provenienti da tale sensore, sviluppato ad-hoc per il progetto TAO, e devono essere validati anche dal punto di vista della qualità. Si tratta di dati di tipo RAW e scritti nel formato SEG Y, non ancora sottoposti fase di "dechirp" (vedi Figura 10), mancanti cioè dello step iniziale del processo di elaborazione che "deconvolve" il segnale emesso dal segnale ricevuto, rendendo visibili il fondale e gli strati sedimentari a maggiori profondità. L'operazione di "dechirp" è stata effettuata applicando un algoritmo messo a punto sulle caratteristiche di ampiezza, frequenza e rumore dei dati in oggetto ed ha permesso di "comprimere" gli impulsi acustici riflessi alle varie discontinuità stratigrafiche (contrast di impedenza acustica) e consentito l'interpretazione dei profili stratigrafici.

In Figura 9 è visibile una sezione elaborata del profilo sismico a riflessione relativo al sito di Lido Di Dante in cui è possibile distinguere la superficie del fondale che presenta alcune irregolarità, come picchi e flessi. Come si vede, le procedure di elaborazione dei dati descritte nei paragrafi successivi hanno permesso di ottenere immagini acustiche della sotto-superficie marina, con penetrazione di qualche metro e risoluzione verticale centimetrica. Queste immagini rappresentano vere e proprie sezioni geologiche, che possono essere interpretate sulla base di analogie con gli affioramenti rocciosi, e forniscono informazioni preziose circa i processi sedimentari alla base della deposizione/erosione dei sedimenti.

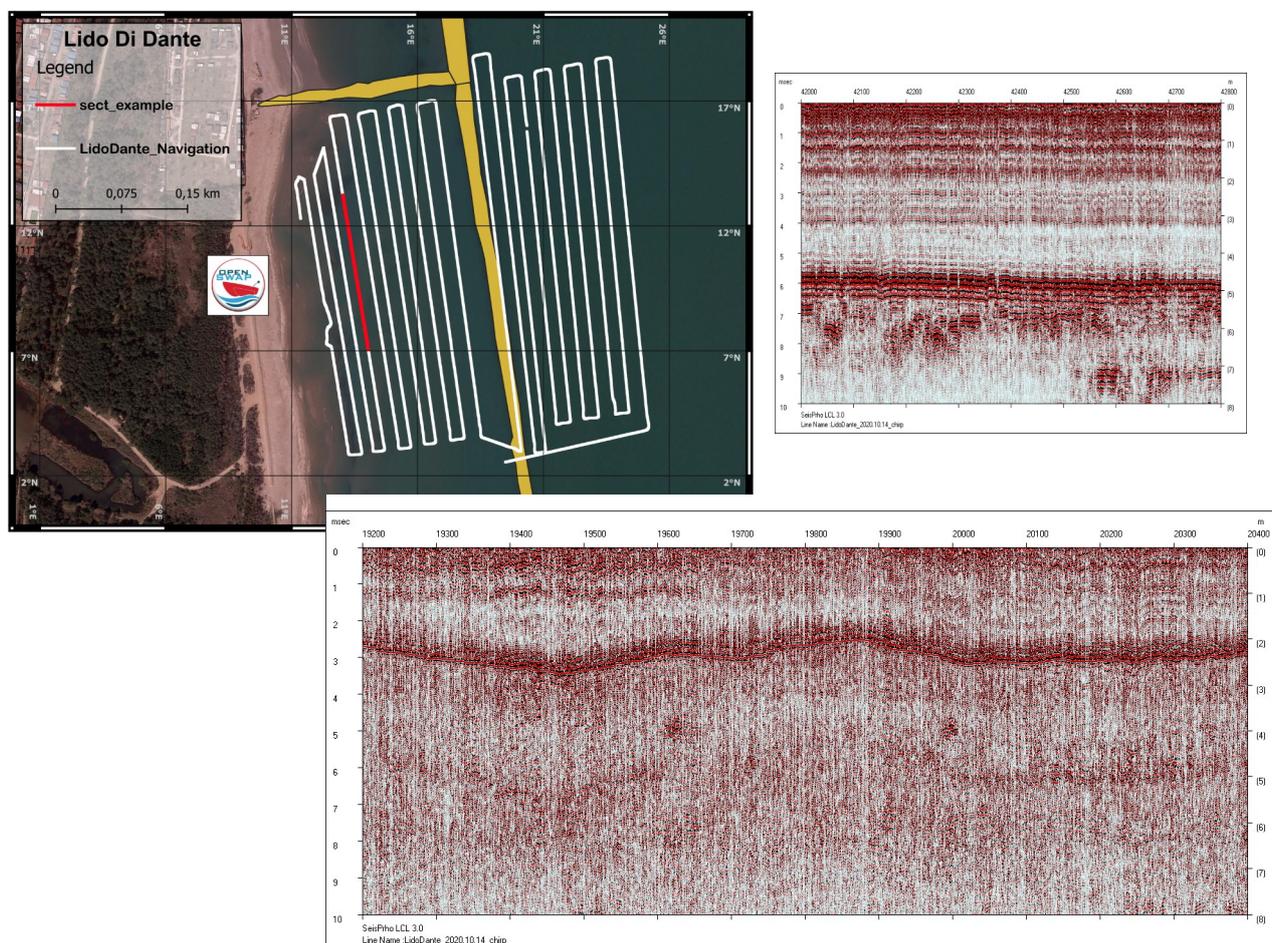


Figura 9 - Profilo sismico ottenuto in seguito alla procedura di dechirp

4.2 Operazioni di filtraggio dei dati

La messa a punto del flusso di elaborazione è stata suddivisa in due fasi: la prima di riduzione dell'impulso "chirp" e la seconda di elaborazione vera e propria.

4.2.1 Ottimizzazione e Riduzione della lunghezza dell'impulso (dechirp)

Al fine di una corretta interpretazione dei dati di sismica e' necessario deconvolvere l'impulso generato dal segnale ricevuto, a tal fine è stata sviluppata una opportuna procedura utilizzando l'ambiente OpenSource Octave, compatibile ad alto livello con il pacchetto commerciale Matlab1 e di seguito descritta. Di seguito è riassunto il flusso di elaborazione per la fase di dechirp, utilizzata da tali procedure:

1) Debias del segnale (il segnale acquisito presenta uno spostamento verso l'alto delle ampiezze ricevute pari ad un valore digitale di 2048)

- II) Filtraggio con filtro passa banda (il segnale acquisito presenta rumore incoerente a varie frequenze lontane da quelle emesse, probabilmente rientrante dal sistema natante)
- III) Generazione della rappresentazione digitale della forma d'onda rappresentante l'impulso modulato in frequenza (CHIRP) emesso dal sistema, per fare questo sono stati utilizzati i parametri presenti nel file SEGY di acquisizione che descrivono le caratteristiche dell'impulso emesso.
- IV) Cross-correlazione della rappresentazione digitale della forma d'onda dell'impulso con la forma d'onda risultante dai precedenti passi
- V) Generazione della minimum-phase wavelet e cross-correlazione di essa con la forma d'onda risultante dai precedenti passi.

4.2.2 Elaborazione finale delle immagini stratigrafiche

La procedura di “dechirp” permette, una volta portata a termine, di agire sull'ecogramma consentendo la successiva elaborazione e interpretazione, di seguito vengono descritti gli ulteriori passi compiuti per arrivare ad avere un dataset pulito da rumori e pronto per la fase di interpretazione:

- I) Operazione di “swell correction” integrata in SeisPrho: rimozione dell'effetto dell'onda di movimento verticale (heave);
- II) Applicazione della funzione di TVG (time-variant gain) per migliorare la resa grafica dei profili (Figura 7);
- III) Operazione di “flattening”, che ha permesso di riportare tutto alla profondità del bottom-detection, escludendo la colonna d'acqua;
- IV) Rendering grafico: per cui a partire dal profilo sismico vengono generate delle bitmap.

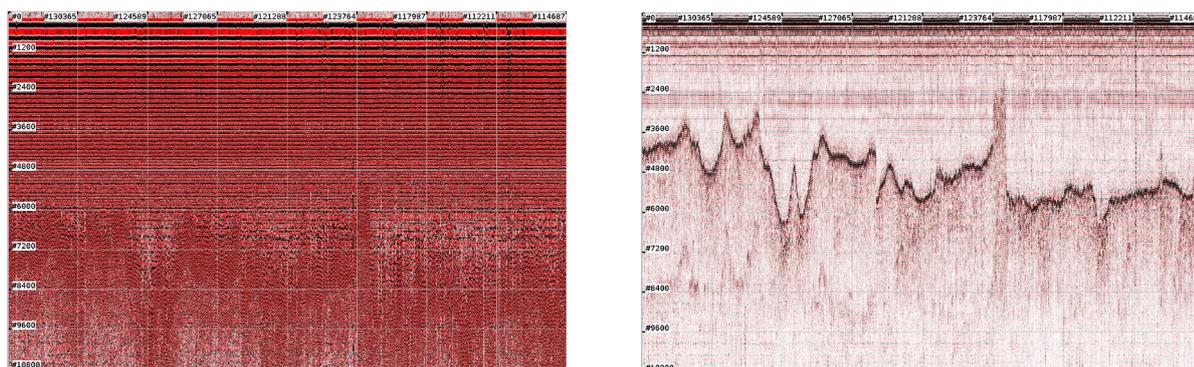


Figura 10 – Navigazione di Lido Di Dante prima (a sinistra) e dopo (a destra) la fase di “dechirp”

I profili sismici riprodotti in Figura 9 e 10, comprovano la validità degli algoritmi di elaborazione sviluppate nell'ambito del Progetto, e permettono di verificare come esse permettano di ottenere profili stratigrafici in cui appare chiara la successione degli strati più profondi rispetto all'interfaccia acqua-sedimento. La penetrazione del segnale all'interno del sedimento è molto variabile in funzione delle litologie e della presenza di fluidi o superfici di diagenesi precoce all'interno del substrato. In condizioni “normali”, e con le granulometrie osservate nella fascia batimetrica in esame, possiamo aspettarci delle penetrazioni fino a una decina di metri al di sotto del fondale.

4.3 Realizzazione delle mappe batimetriche e di riflettività

Al fine di ottenere mappe batimetriche rappresentative della morfologia del fondale è stato necessario elaborare gli ecogrammi relativi alle riflessioni acustiche da cui sono stati estratti e georeferenziati dei punti profondità. Per prima cosa si è controllato manualmente ogni profilo sismico dopo dechirping, individuando la profondità del fondale (operazione di bottom-tracking); per farlo,

si è selezionato il punto sulla verticale corrispondente alla durata del segnale acustico sorgente, e misurando il tempo impiegato a raggiungere il fondale e a tornare in superficie al ricevitore. Tale tempo di transito, detto TWT (two-way travelttime) è stato convertito in profondità, considerando un valore per la velocità del suono in acqua pari a 1495 m/s, che rappresenta un valore medio nelle aree in esame nelle condizioni di rilievo.

Il profilo ecografico visibile in Figura X è relativo alla zona di Foce del Bevano, e mostra una qualità dei dati sufficientemente buona da permettere l'individuazione del fondale con grande precisione, nonostante, ad esempio nella parte iniziale del profilo, l'eco del fondale si confonda con l'ondina di emissione e i rimbalzi sulla chiglia del veicolo e sulla interfaccia acqua-aria.

Si sono ottenute mappe batimetriche (Capitolo 5) dai dati puntuali elaborati secondo la seguente procedura:

- 1) controllo qualità dei dati acquisiti in formato SEG-Y;
- 2) digitalizzazione del fondo automatica seguita da controllo manuale, al fine di ottenere la corretta individuazione del fondo ed estrarre i punti profondità;
- 3) georeferenziazione dei punti estratti allo step 2;
- 4) conversione dei TWT in profondità (m);
- 5) applicazione delle correzioni di marea con dati ottenuti dal portale di ISPRA;

I dati puntuali di profondità, in forma di file ASCII lat,lon,depth, separati da spazio, sono stati filtrati e "grigliati" utilizzando l'algoritmo "nearneighbor" implementato nel pacchetto di GMT 6.0 (Wessel et al. 2019), si sono ottenuti così dei file GRID in formato NetCDF rappresentativi delle morfologie di fondale per ogni rilievo.

I dati estratti presentavano coordinate doppie e triple per punti successivi, dovute tasso di aggiornamento GPS inferiore rispetto a quello di emissione degli impulsi ecografici. Si è quindi provveduto a compilare una routine in python per l'interpolazione delle coordinate doppie assumendo una velocità costante tra i punti vicini con coordinate diverse.

Inoltre, con l'intento di attribuire una caratterizzazione riguardo la tipologia di sedimento costituente le principali morfologie individuate nel sito di Lido Di Dante, sono state generate delle mappe di riflettività per poter verificare che le aree interessate dalla presenza di barre sul fondale fossero caratterizzate o meno dalla presenza di sedimento sabbioso, che abbiamo visto costituire una preziosa risorsa per il litorale in erosione.

4.4 Realizzazione delle carte degli accumuli e dei residui/erosioni

Al fine di validare quanto osservato, inizialmente dai profili sismici e successivamente dalle mappe batimetriche, sono state effettuate delle operazioni sui files di tipo GRID: questi costituiscono un set di interfacce/formati di dati "a griglia" georeferenziati, che quindi includono informazioni preziose tra cui quota, coordinate e sistema di riferimento.

Su tali files si è operato seguendo i seguenti passaggi:

- I) i files grid in formato NetCDF sono stati convertiti in formato CD, che risulta essere maggiormente compatibile con i differenti software GIS utilizzati;
- II) per ogni sito di studio sono stati disegnati dei poligoni disegnati ad hoc e che circoscrivessero aree in cui fossero presenti dati per ogni rilievo effettuato; i poligoni serviranno come maschere di ritaglio per i files grid in modo da renderli tutti della medesima estensione e permettere così le operazioni;
- III) I file grid sono stati ritagliati mediante la funzione "estrazione tramite maschera" disponibile dal software Qgis;
- IV) sono state effettuate operazioni di sottrazione per ogni sito di studio, operando tra i grid relativi ai primi rilievi (minuendo) e quelli successivi al primo (sottraendo), in modo da ottenere come risultato una differenza e/o resto rappresentativa delle variazioni di quota e quindi di fluttuazione del fondale, indicative di possibili accumuli e/o erosioni.

4.5 Dati Side-Scan Sonar

I dati di side scan sonar sono stati acquisiti sia con il sistema Starfish che con il sistema Imagenex. Il software utilizzato per le elaborazioni è SEAVIEW della Mogassoftware.

Questo software ha numerosi vantaggi quali il costo contenuto, la possibilità di comunicare con gli sviluppatori in maniera diretta e le sue numerose e versatili funzioni che ben si prestano a elaborare e migliorare il dato acquisito.

Grazie alla comunicazione con gli sviluppatori, si è riuscito ad implementare nel software funzioni specifiche per i nostri dati, come, ad esempio, il taglio preciso, con conseguente eliminazione del rumore laterale.

I vari filtri applicabili al dato hanno consentito un importante miglioramento del rapporto segnale/rumore ed una soddisfacente correzione delle geometrie.

Di seguito, una descrizione dei filtri utilizzati sui dati di side scan sonar:

- Filtro Automatic Gain Correction, consente di applicare un guadagno variato lungo la linea, con diverse intensità e passo di campionamento, così da ottenere un segnale chiaro ed omogeneo lungo tutto il fascio e correggere così le difformità dovuta all'angolo di incidenza.
- Filtro Destriping: consente di eliminare strisce laterali tipiche del rollio (Fig. 11).
- Correzione dello "Slant Range": consiste nella trasformazione dei tempi di ricezione del segnale in distanze e direzioni di provenienza. È una delle parti più delicate del processo di elaborazione e dipende da quanto accuratamente è stata calcolata la linea del fondale. Il software Seaview mette a disposizione diversi strumenti per calcolare il fondo, ma è stato possibile, negli ultimi survey, inserire la stringa col valore di profondità derivante dall'ecoscandaglio, direttamente nel software di acquisizione del side scan, migliorando notevolmente il successivo lavoro di processing (Fig. 12)



Fig. 11: Esempio della stessa linea prima (sinistra) e dopo (destra) l'applicazione del filtro di destriping



Fig. 12: Esempio della stessa linea prima (sinistra) e dopo (destra) l'applicazione del filtro di slant range

Dopo vari test effettuati, si è appurato che le frequenze che consentono un miglior rapporto segnale/rumore e chiarezza del dato nelle nostre aree di lavoro sono quelle a 260 e a 330 kHz. A queste frequenze si è notata anche una buona definizione del dato nella parte centrale e laterale del fascio. Lavorando a 800 kHz, invece, si riscontra una minore definizione sia nella parte laterale che in quella centrale, dovuta ad un peggiore rapporto segnale/rumore, questo comporta una maggiore difficoltà, nell'applicare un corretto filtro di slant range (Fig. 13) e porta ad una degradazione rapida del segnale.

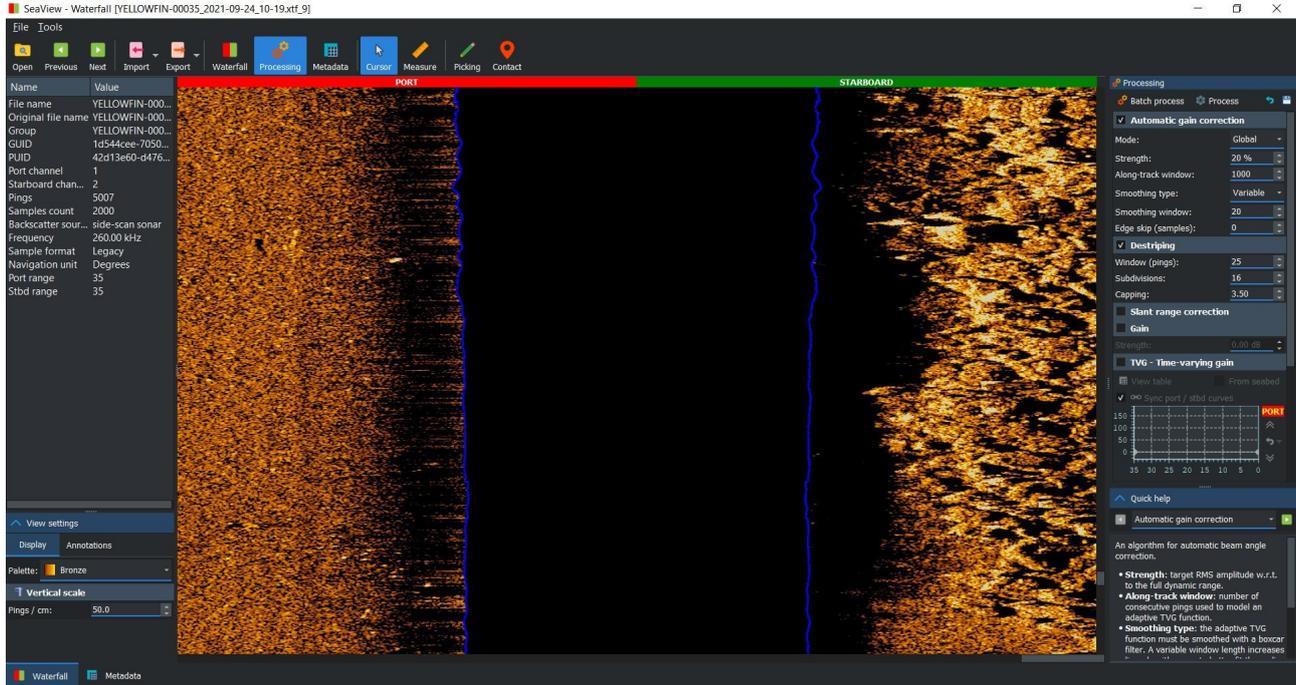


Fig. 13: Esempio di elaborazione di una linea acquisita a 800 kHz. La linea blu indica la posizione reale del fondo mare (come registrata ed inviata dall'ecoscandaglio al side scan sonar). In questa immagine si vede chiaramente come l'impulso a 800 kHz intercetta molto male il fondale.

Dopo il lavoro di elaborazione del dato, sono state prodotte mappe di riflettività che descrivono sufficientemente bene le caratteristiche del fondale e nelle quali è possibile distinguere diverse "facies" acustiche. Le mappe, solitamente esportate come immagini georeferenziate (geotiff), sono basate su valori in decibel. Minore è l'assorbimento della superficie impattata, maggiore è la sua riflettività e quindi il valore in decibel restituito.

Le seguenti tre immagini mostrano le mappe di riflettività del sito Lido Di Dante.

Nelle seguenti tre figure è possibile vedere la stessa area acquisita in tre modalità differenti e in due giorni differenti.

In Figura 14, il dato è stato acquisito con il side scan sonar Starfish (990 kHz), il 24 settembre 2021.



Fig. 14: Dato acquisito con Starfish, 990 kHz, il 24/09/2021

In Figura 15, il dato è stato acquisito con il side scan sonar Imagenex a 260 kHz, il 24 settembre 2021.

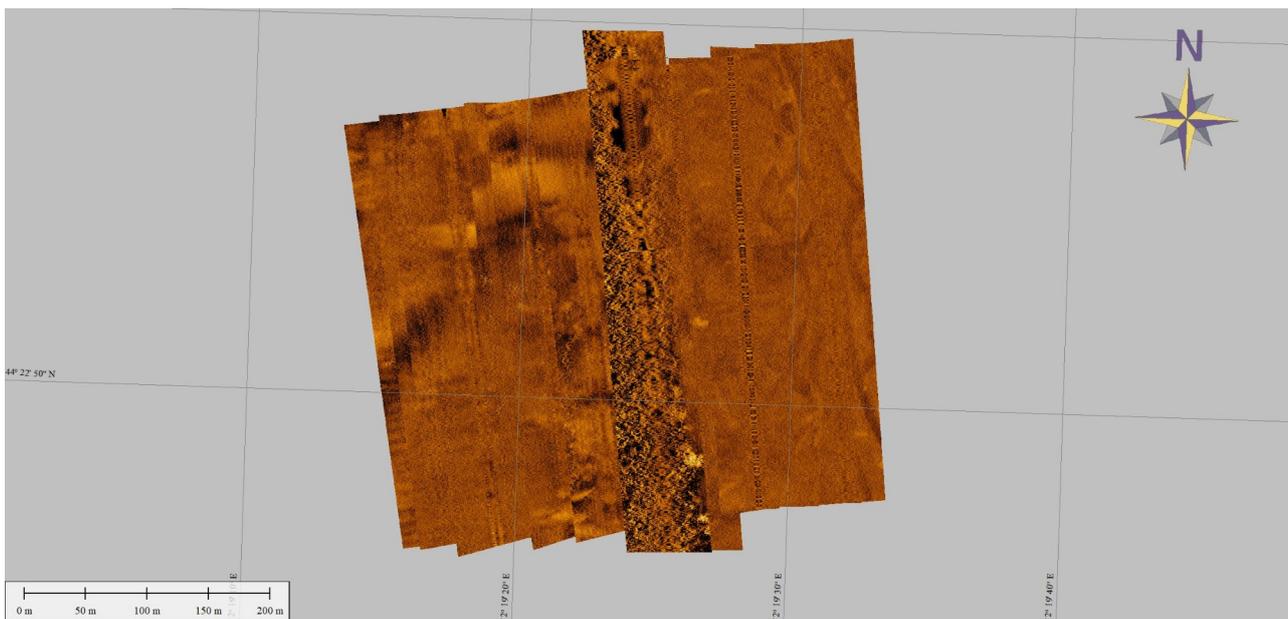


Fig. 15: Dato acquisito con Imagenex, 260 kHz, il 24/09/2021

In Figura 16, il dato è stato acquisito con il side scan sonar Imagenex a 330 kHz, il 30 aprile 2021

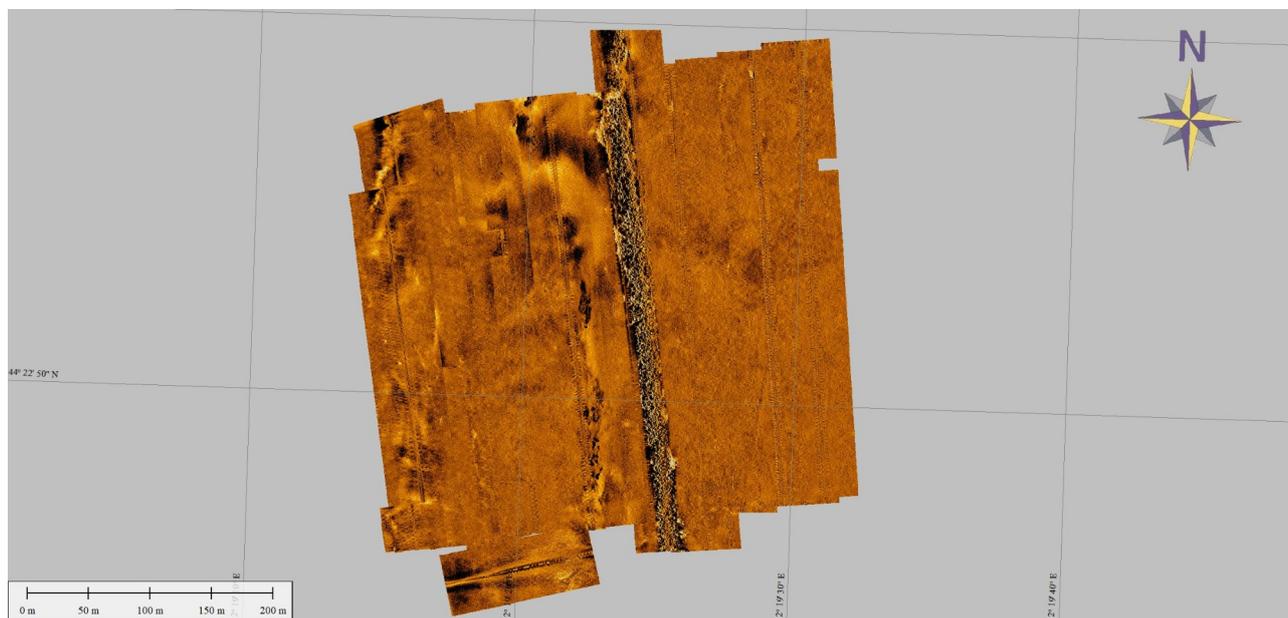


Fig. 16: Dato acquisito con Imagenex, 330 kHz, il 30/04/2021

5. Interpretazione dei dati elaborati: le morfologie del fondale

Dalle mappe batimetriche realizzate è stato possibile osservare l'evoluzione delle morfologie di fondale. Per ogni area di studio sono emerse caratteristiche peculiari rappresentate dalle differenti forme di fondo che sono state individuate, monitorate ed interpretate grazie alle campagne di rilievo ripetute nel tempo, realizzando così un database di forme di fondo a differenti scale temporali. Queste risultano indicative dei fattori di controllo regolati dalle condizioni meteo-marine e quindi dei processi di deposito e/o erosione di sedimento, dinamiche fondamentali e di centrale interesse per la realizzazione del Progetto TAO.

5.1 Foce del Fiume Bevano

La Foce del Torrente Bevano costituisce l'ultimo estuario meandriforme dell'Alto Adriatico, libero di evolvere naturalmente grazie alla posizione riparata determinata da lunghi tratti di pineta retrodunale. Il sito rientra nel Parco Regionale del Delta del Po e si trova nei pressi dell'Oasi di Protezione "Ortazzo e Ortazzino" (800 ettari).

L'Ortazzo è un'ampia palude costantemente sommersa dalle acque dei fiumi Bevano e Fosso Ghiaia, originariamente costituiva una valle d'acqua dolce, arginata ed ottenuta dalla riconversione di precedenti risaie, mentre ad oggi è soggetta agli influssi salmastri della falda. L'Ortazzino si trova a sud del torrente Bevano e costituisce un'area salmastra contigua alla spiaggia in cui si alternano stagni retrodunali, canneti, dune e una vegetazione mediterranea con pinete costiere; inoltre comprende i meandri fossili del Bevano e parte delle dune.

Il sito di Foce Bevano è uno dei pochi nel litorale del tutto privo di stabilimenti balneari e ad accesso regolamentato, comprende anche la fascia marina costiera per circa 300 metri di larghezza, mentre la foce del Bevano vera e propria occupa un'area di circa 40 ettari e testimonia, con i suoi equilibri (tra acque, sabbie e fanghi), mutevoli in base agli andamenti stagionali di maree e portate fluviali, come doveva essere l'intera fascia costiera regionale prima dei massicci interventi antropici.

Inoltre, una recente opera di ingegneria naturalistica, nel 2006, ne ha in parte indirizzato lo sbocco diretto in mare, al fine di proteggere le dune a Nord della foce: sei chilometri di dune costiere attive con alle spalle la pineta litoranea, i lembi delle praterie aride e gli arbusteti sub-mediterranei, che caratterizzavano il litorale ravennate prima dell'imposizione delle pinete artificiali. Proprio alle spalle delle dune si trovano le pinete demaniali (sezioni Ramazzotti e Savio) create fin dal primo novecento con lo scopo di proteggere le colture retrostanti dai venti marini e che si sono sovrapposte all'originaria vegetazione arbustiva tipica delle dune consolidate che, in parte, rimane nelle fasce marginali e nel sottobosco.

In sintesi, il sito impreziosisce la costa di Ravenna nel tratto compreso tra Lido di Dante e Lido di Classe, con una natura ricca e incontaminata caratterizzata da boschi, dune sabbiose, anse abbandonate del torrente, stagni salmastri e zone umide.

In questo particolare contesto sono state eseguite 4 campagne di rilievo che hanno permesso di raccogliere i dati elaborati ed analizzati secondo gli step illustrati nel Cap. 4, da cui si sono generate le mappe batimetriche visibili in Fig. 17(a, b, c, d).

Durante ogni campagna di acquisizione il veicolo autonomo OpenSWAP (nelle mappe rappresentato con il logo, indicativo della posizione della stazione fissa di controllo) ha percorso le linee di navigazione programmate in precedenza sulla base dei campionamenti di benthos effettuati dal partner nel Progetto TAO CIRI_FRAME. Tuttavia, queste rotte di navigazione preimpostate si sono rivelate essere poco efficaci ai fini della rappresentazione batimetrica: infatti i punti di campionamento sono collocati a circa 140-150 m tra loro, una distanza eccessiva per un'attendibile interpretazione del dato puntuale, una volta interpolato e impostato il raggio di ricerca nell'intorno del punto rilevato. Quest'ultima considerazione si esplica nella resa grafica delle batimetrie, in cui il filtraggio del dato non ha permesso di eliminare gli artefatti che rendono difficoltosa l'interpretazione del fondale nell'area di indagine.

In ogni caso si è ricercato un compromesso tra il raggio di ricerca e lo spessore del filtro applicato in fase di elaborazione del dato, per cui è stato possibile effettuare alcune considerazioni di carattere morfologico:

Nel rilievo del Luglio 2020 in prossimità della foce si osservano minori profondità di fondale e morfologie irregolari proprio a ridosso del cordone di sabbia che protegge l'ultimo meandro del Bevano; man mano che si procede in direzione offshore le profondità aumentano gradualmente.

A 9 mesi dal primo rilievo, ad Aprile 2021, il fondale risulta complessivamente innalzato, la zona di transizione di spiaggia sommersa risulta maggiormente estesa, tuttavia le morfologie irregolari osservate in precedenza si osservano esclusivamente nell'area a ridosso del cordone ed in corrispondenza della foce, inoltre hanno dimensioni ridotte e sono orientate in direzione parallela alla costa.

Nel Settembre 2021, a 14 mesi dal primo rilievo, non sono identificabili altrettanto chiaramente le morfologie di barre e questo è dovuto ad alcuni problemi tecnici verificatisi a bordo del veicolo autonomo in sede di rilievo a causa dei quali non è stato possibile eseguire per intero le linee di navigazione preimpostate. Tenendo in considerazione questo, l'area con profondità maggiori che si osserva al centro della mappa costituisce probabilmente un artefatto.

L'ultimo rilievo presso la Foce del Bevano è stato effettuato nel Dicembre 2021: in corrispondenza della foce e per tutta l'estensione del cordone litoraneo sono presenti morfologie irregolari di dimensioni considerevoli ed assimilabili a quelle osservate nel Luglio 2020; la zona di transizione nearshore-offshore risulta omogenea.

Una volta osservate le principali morfologie di fondale dalle mappe batimetriche ottenute dall'elaborazione dei dati raccolti per ciascun rilievo, si è potuto procedere con l'interpretazione della distribuzione del sedimento, regolata dalla dinamica costiera. In quest'ottica si fa riferimento alle operazioni effettuate tra i files GRID che, come illustrato nel Paragrafo 4.4 - Cap.4, che sono state effettuate esclusivamente in seguito all'operazione di "estrazione" tramite poligono che circoscrive un'area di indagine in cui fossero presenti dati raccolti ad ogni campagna.

Una volta ricavati file grid di uguali dimensioni, si è proceduto con con l'operazione di sottrazione tra grid, così da ottenere le differenze tra i rilievi. Questo dato ci permette di individuare le aree di preferenziale localizzazione di accumuli e/o erosioni di sedimento: si parte dal presupposto che a maggiore quota corrisponda minore profondità di fondale e di conseguenza maggiore volume di sedimento sabbioso in quel punto; viceversa dove la quota risulta minore si sarebbe verificato un approfondimento del fondale: ciò implica erosione.

Mappe Batimetriche

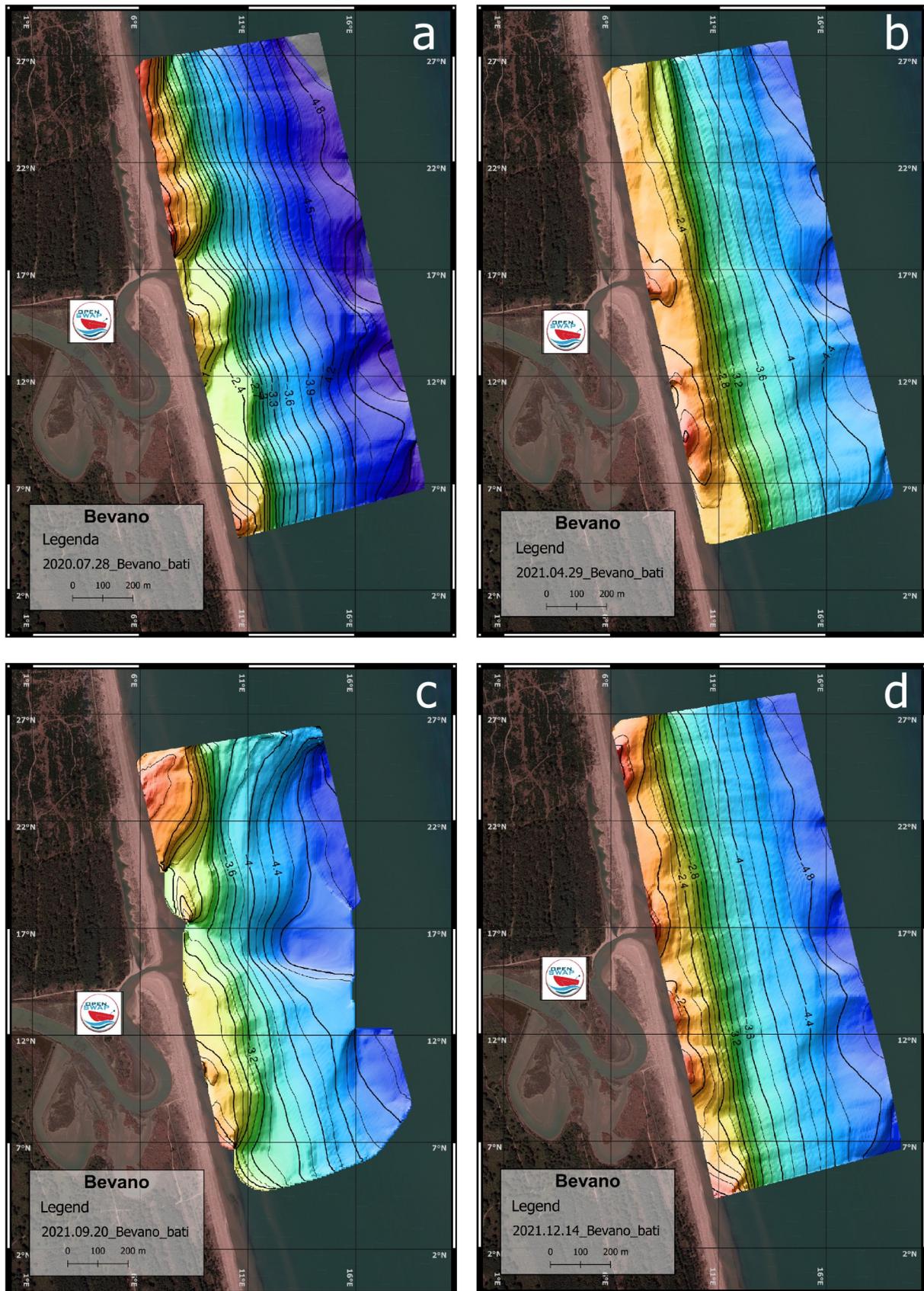


Figura 17(a, b, c, d) - Batimetrie relative ai rilievi svolti sul sito di Foce del Fiume Bevano

In Fig. 18 (a, b) sono rappresentate le carte degli accumuli e dei residui relative al sito di Foce del Fiume Bevano, che mostrano rispettivamente le differenze che caratterizzano il fondale a 9 mesi di distanza, e cioè tra i rilievi di Luglio 2020 – Aprile 2021, ed a 16 mesi di distanza, quindi Luglio 2020 – Dicembre 2021. In Fig. 18a la maggior parte dell'area è di colore grigio, indicativo di accumulo con valori più alti in corrispondenza della foce e nella sottile zona che si estende parallela alla costa. Invece le zone in rosso sono indicative di erosione e si concentrano soprattutto a Nord della foce, ma anche nell'area a sud, a ridosso del cordone litoraneo. Quindi a 9 mesi di distanza tra un rilievo e l'altro, il trend generale dell'area indagata sembra essere condizionato da fenomeni di accumulo.

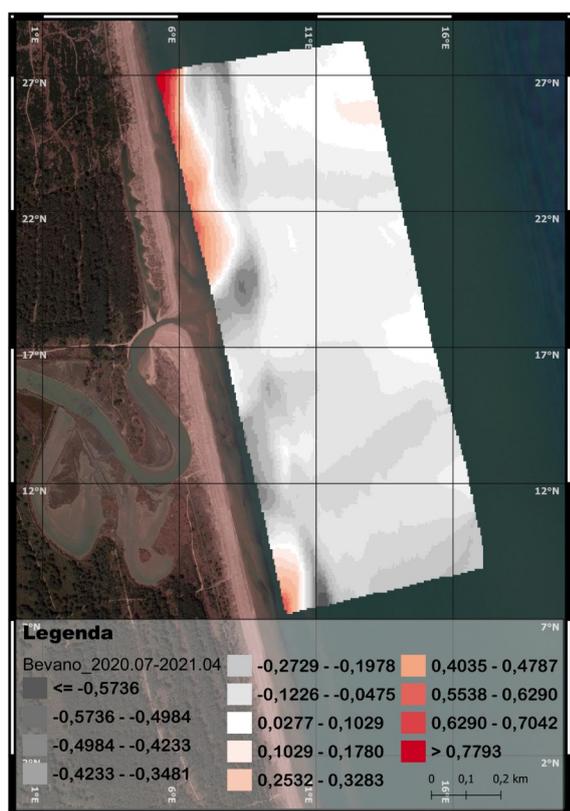


Figura 18a - Mappa degli accumuli e delle erosioni a 9 mesi di distanza

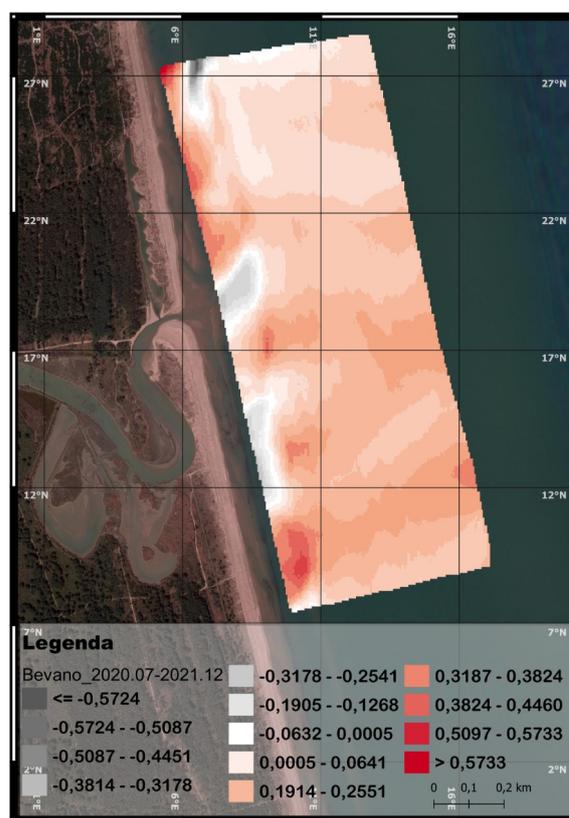


Figura 18b - Mappa degli accumuli e delle erosioni a 14 mesi di distanza

In Fig.18b le aree indicative di erosione, in rosso, sono significativamente aumentate e si estendono per quasi la totalità dell'area rilevata, mentre le zone in grigio, indicative di accumulo, si localizzano principalmente a Nord della foce ed a Sud di quest'ultima; sono distribuite in modo eterogeneo lungo la linea di costa e sono collocate in corrispondenza delle aree che, guardando alla batimetria di Dicembre 2021, sono caratterizzate da porzioni di fondale molto basso a bordare il cordone litoraneo, naturale riparo dell'ultimo meandro del Bevano prima che questo sfoci in mare.

In questo caso la carta degli accumuli/erosioni è rappresentativa delle dinamiche verificatesi a 14 mesi di distanza dal primo rilievo e l'andamento generale risulta essere opposto a quanto osservato in precedenza: si assiste ad un trend indicativo di erosione, per cui il sedimento trasportato lontano dall'area di indagine potrebbe essere andato a costituire input sabbiosi consistenti seguendo la corrente lungocosta.

La Foce del Fiume Bevano costituisce un'area di riserva naturale che è stata preservata nelle sue componenti fondamentali quali dune, vegetazione mediterranea, paludi/specchi d'acqua salmastri

e cordoni litoranei e risulta libera da opere di difesa rigide sul fronte mare che, al contrario, sono largamente utilizzate nelle aree circostanti, come avremo modo di esaminare in questo report.

Le spiagge (sempre costituite da una parte emersa ed una sommersa) e le dune sono parte integrante ed indissolubile di un unico sistema ambientale e territoriale quale una “zona di transizione” come quella del Bevano. Un sistema molto dinamico, nello spazio e nel tempo, in cui la sabbia viene costantemente scambiata e ridistribuita dalle onde e dal vento.

In continuità con la spiaggia emersa, nella spiaggia sommersa si osserva un terrazzo di bassa marea sottile e discontinuo, spesso interrotto da canali ed escavazioni (rip-channels e scours) probabilmente generati dalle mareggiate. Tali condizioni si registrano in quest’area grazie al persistere delle dune, che tendono ad essere fragili, mobili, e facilmente esposte al deterioramento e all’erosione, soprattutto a causa delle pressioni esercitate dall’uomo.

Potrebbe verificarsi un consistente trasporto di sabbie verso le opere di protezione di Lido di Dante (a nord). Tuttavia, come avremo modo di vedere nella sezione dedicata a Lido Di Dante, non si hanno riscontri di depositi sabbiosi considerevoli in corrispondenza delle opere di difesa, per cui è probabile che esista un punto localizzato tra la foce e le strutture di protezione costiera, dove i sedimenti si perdono verso il largo, probabilmente in seguito alla formazione di correnti dirette verso il mare aperto in condizioni di mareggiata.

5.2 Riccione

Il fronte mare di Riccione si estende per 6,2 km ed è privo di opere di difesa rigide, anche se in seguito alla realizzazione di opere di difesa nei litorali adiacenti, il tratto più a sud della spiaggia è entrato in erosione verso la fine degli anni '70. Conseguentemente, per garantirne l’equilibrio, dal 1983 sono stati effettuati interventi di ripascimento periodici, accompagnati dalla costruzione di una barriera longitudinale sommersa di 3 km costituita da sacchi pieni di sabbia e posta a 150-180 m dalla battigia (Preti et al. 2011) allo scopo di trattenere la sabbia portata a ripascimento. Nonostante ciò l’erosione costiera ha continuato ad interessare il litorale e proprio per questo negli ultimi anni sono state valutate dal Comune e messe in posto da una ditta privata locale (Edilimpianti) le cosiddette “Wmesh”: si tratta di barriere permeabili soffolte, collocate sul fondale marino in prossimità delle barriere in sacchi, studiate per la difesa della costa e dell’habitat marino, che avrebbero la funzione di ridurre l’onda in arrivo e limitare il deflusso dei sedimenti verso il largo, garantendo così il mantenimento degli interventi di ripascimento della spiaggia che si effettuano ogni anno.

Nel 2017 furono posizionati inizialmente tre moduli a circa 300/400 metri dalla costa, tuttavia nel 2019 questa prima struttura è stata rimossa (<https://www.edilimpianti.it/approfondimenti/barriere-antierosione-wmesh-a-riccione-la-barriera-si-allunga>) per modificarne il posizionamento con una nuova struttura dell’estensione di circa 100 metri. Infine, nella primavera 2020, sono stati posizionati ulteriori 16 moduli, distanti circa 50 metri dalla barriera in sacchi sommersa e sempre nella zona sud del litorale, collocati più verso riva.

I rilievi effettuati nell’ambito del Progetto Tao sul sito di Riccione riguardano proprio l’area caratterizzata dalla presenza delle Wmesh e delle barriere soffolte, più a largo.

Il primo rilievo si è svolto nel **Dicembre 2020**, quindi durante la stagione invernale caratterizzata da condizioni meteo-marine a maggior numero di mareggiate, rispetto al resto dell’anno.

La mappa batimetrica in Fig. 19a permette di osservare le morfologie del fondale al momento del rilievo e anche di distinguere e suddividere l’areale in cinque zone principali, sulla base di caratteristiche distintive per ciascuna zona:

Zona 1: l’area di spiaggia sommersa in prossimità della battigia risulta essere piuttosto omogenea, in direzione della barriera in sacchi;

Zona 2: procedendo verso la barriera in sacchi si osserva un aumento graduale di profondità, fino a valori di circa -3 / -3.7 m, che caratterizzano tutta l’area fino alla barriera stessa in modo omogeneo;

Zona 3: in corrispondenza delle barriere sommerse, ubicate a circa 150-180 m dalla battigia, si osserva una morfologia assimilabile a quella di un cordone di sabbia orientato parallelo costa;

Zona 4: oltre la barriera sommersa ed in prossimità della Wmesh messa in posto nel 2020 si riconosce una morfologia da accumulo, circoscritta esclusivamente alla porzione centrale dell'area occupata dalla Wmesh del 2020, dove il fondale ha profondità di circa -1.5 m e quindi inferiori rispetto a quelle circostanti.

Zona 5: procedendo in direzione offshore le profondità aumentano progressivamente ed in modo graduale ad esclusione di un'area in cui si osserva la massima profondità rilevata, circa - 5.4 m, situata in corrispondenza delle Wmesh messe in posto nel 2017 (successivamente riposizionate).

La suddivisione in zone è stata adottata per poter descrivere e confrontare rapidamente le batimetrie ricavate dai differenti rilievi, così da poter individuare rapidamente le differenze tra le morfologie principali.

In quest'ottica, dalla mappa batimetrica relativa al rilievo di **Giugno 2021** (Fig. 19b) si osservano alcune importanti variazioni in ogni zona precedentemente descritta:

Zona 1: l'area di spiaggia sommersa in prossimità della battigia presenta le profondità minori rilevate, come risultava a Dicembre 2020;

Zona 2: la zona antistante è caratterizzata da un aumento di profondità che circoscrivono due aree depresse, dalla morfologia circolare, come due "conche", di cui una in posizione centrale (se si guarda all'area indagata internamente alla barriera in sacchi) e l'altra in direzione sud; le due risultano separate da un'area a minore profondità (-2.3 m) orientata perpendicolarmente alla linea di riva.

Zona 3: i bordi degli avvallamenti precedentemente descritti coincidono con la barriera sommersa e, procedendo verso largo, si hanno minori profondità distribuite su morfologie assimilabili a cordoni di sabbia, paralleli costa e localizzati tra le barriere in sacchi e le Wmesh del 2020;

Zona 4: in corrispondenza della Wmesh del 2020 riconosciamo solo una traccia di quella che era stata identificata con una morfologia da accumulo, nella mappa batimetrica di Dicembre 2020, oltre la quale le profondità aumentano gradualmente in direzione offshore con valori superiori rispetto al precedente rilievo, si è quindi verificato un innalzamento del fondale;

Zona 5: in corrispondenza delle Wmesh del 2017 si ha un'area caratterizzata dalla maggiore profondità rilevata in questa compagna, che è di circa - 4.95 m.

L'ultimo rilievo è stato effettuato a **Novembre 2021**, Fig. 19c, e le zone discusse in precedenza sono nuovamente mutate:

Zona 1: le profondità minime dell'area di indagine si riscontrano in prossimità della spiaggia sommersa, che risulta essere più estesa verso largo rispetto a Giugno '21 e presenta il valore minimo di - 0.63 m;

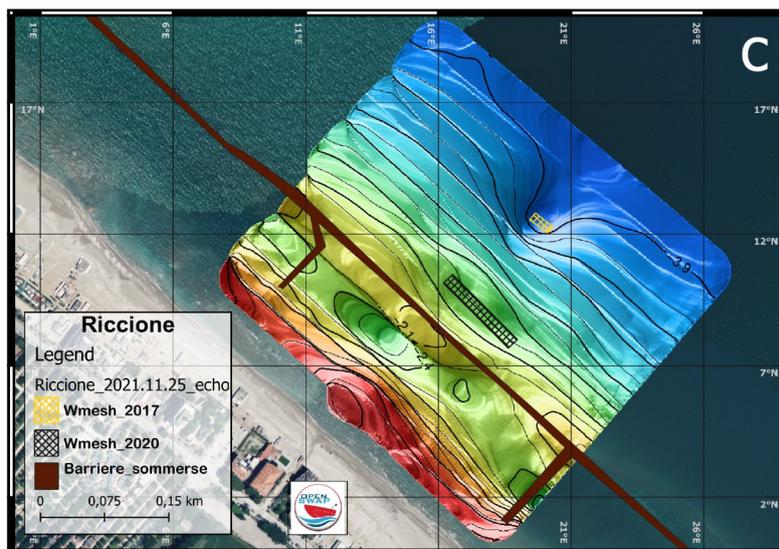
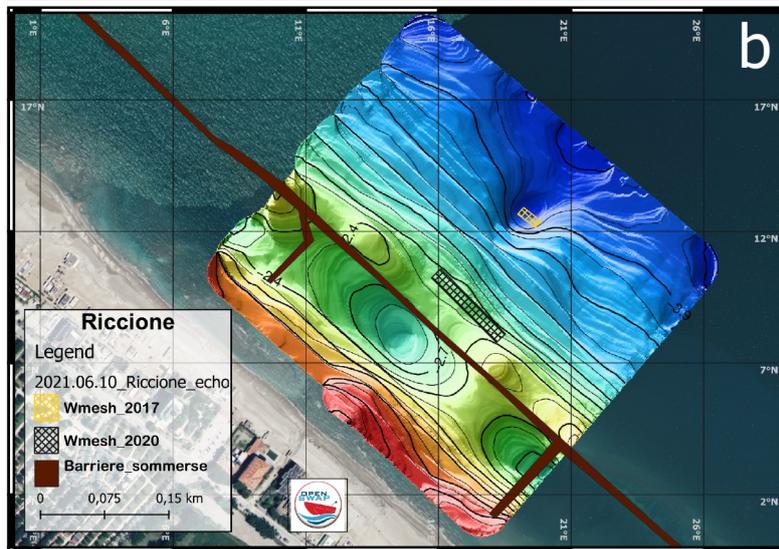
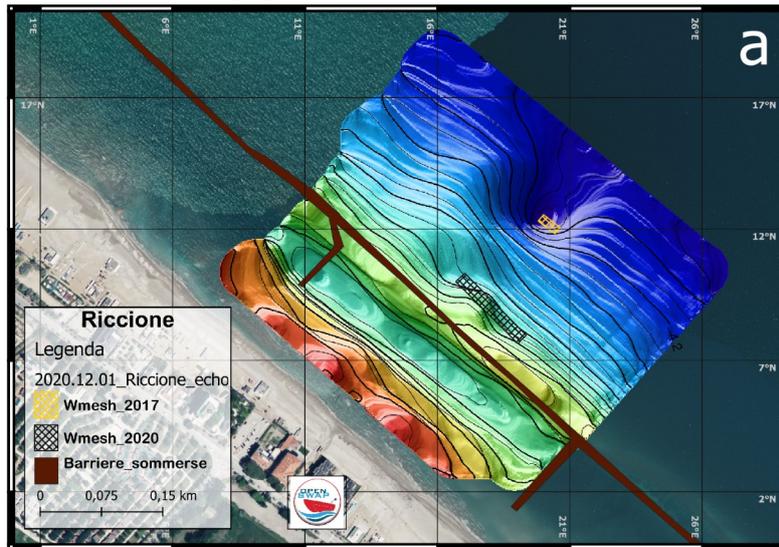
Zona 2: procedendo verso la barriera le profondità aumentano ed in corrispondenza della zona caratterizzata dai due avvallamenti nel Giugno '21 si riscontrano profondità inferiori circoscritte ad un'area ellittica sicuramente di dimensioni inferiori rispetto a quelle degli avvallamenti preesistenti;

Zona 3: in prossimità della barriera in sacchi è presente un cordone orientato parallelo costa, caratterizzato da minori profondità rispetto al fondale circostante e che termina in corrispondenza della barriera stessa, oltre la quale le profondità aumentano gradualmente;

Zona 4: in corrispondenza delle Wmesh 2020 si riscontra un leggero aumento di profondità, ma il fondale risulta per lo più omogeneo con la tendenza ad approfondirsi;

Zona 5: verso largo le quote massime sono circoscritte all'area della Wmesh del 2017 con un valore di circa - 4.60 m, coincidente con l'area di massima profondità di indagine nel rilievo in questione; si assiste ad una complessiva tendenza di innalzamento del fondale.

Mappe Batimetriche



Al fine di verificare quanto osservato dalle mappe batimetriche, si è proceduto con l'estrazione dei files grid tramite poligono di ritaglio (disegnato ad hoc, tracciando un'area che contenesse dati rilevati ad ogni campagna) e successivamente alle operazioni di sottrazione tra i grid.

Ne è risultata la mappa degli accumuli e delle erosioni in Fig. 20, rappresentativa di un periodo di quasi un anno: si osservano diffusamente valori indicativi di erosione, rappresentati dalle aree di colore rosso, sia all'interno che all'esterno delle barriere sommerse in sacchi, con aree indicative di massimi erosivi soprattutto in corrispondenza delle Wmesh del 2017 ed in prossimità della barriera in sacchi, nella porzione interna (lato spiaggia) sia verso nord che verso sud.

Si hanno valori indicativi di accumulo, nei toni del grigio, esclusivamente in corrispondenza della barriera in sacchi distribuiti parallelamente alla costa e con massimi valori localizzati al centro della barriera stessa; è individuabile una ulteriore zona di accumulo in corrispondenza della zona centrale delle Wmesh del 2020, anche se di piccole dimensioni.

Sono trascorsi 11 mesi tra un rilievo e l'altro e si è passati dalla stagione invernale, caratterizzata da un maggior numero di eventi di mareggiata, a quella estiva durante la quale sono più duraturi i periodi di mare calmo. Il trend generale è caratterizzato da fenomeni di erosione.

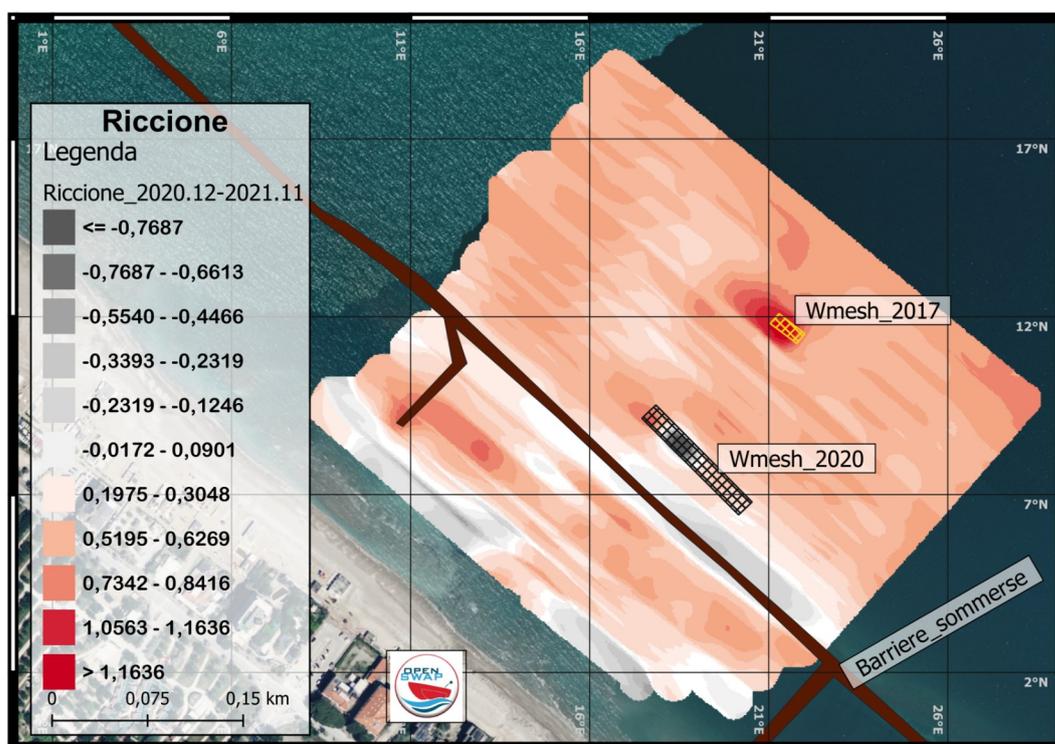


Figura 20 - Mappa degli accumuli e delle erosioni relativa al sito di Riccione; in grigio le zone di accumulo, in rosso le zone di erosione.



Figura 21 - Ubicazione dell'area di indagine a Riccione, rispetto alle opere di difesa del litorale nel comune di Misano

L'area del litorale di Riccione indagata nell'ambito del Progetto si trova al confine con il Comune di Misano (vedi Fig. 21) le cui spiagge sono caratterizzate dalla presenza di pennelli.

Il fronte a mare del comune di Misano infatti è interamente protetto da opere rigide realizzate a partire dagli anni '70, per cui i fattori che contribuiscono alla perdita di materiale della spiaggia sono da ricercare nell'insufficiente alimentazione naturale e nell'azione riflettente dei pennelli, poco distanziati tra loro. Inoltre la spiaggia, attualmente costituita da sabbia, in origine era formata da sabbia e ghiaie che venivano trasportati a mare dal fiume Conca: questo sfocia in corrispondenza del confine meridionale del Comune di Misano e, a partire da metà degli anni '70, è stato sbarrato a 3 km dalla foce con una diga, a causa della quale il trasporto di sedimenti grossolani al mare è stato bloccato.

Tenendo conto di quanto sopra e guardando ai risultati ottenuti relativamente all'area di indagine del Progetto, che ricordiamo essere collocata nella porzione più a sud di Riccione, si osserva come nella zona del fondale esterno alla barriera in sacchi sia stata riscontrata una prevalenza di zone di erosione rispetto a quelle di accumulo, queste ultime localizzate principalmente in corrispondenza delle Wmesh e delle barriere in sacchi.

Al contrario, nella porzione nord del medesimo litorale si riscontra una situazione di equilibrio dal punto di vista degli accumuli/erosioni (Preti et al., 2011) e questo potrebbe essere dato dalla forte deriva da sud verso nord dei sedimenti lungo costa: questa fa sì che la porzione meridionale della costa di Riccione risulti la più sollecitata dall'erosione e quella settentrionale la più stabile. Oltre a ciò, anche la condizione delle spiagge di Misano potrebbe contribuire al verificarsi di tale dinamica proprio perché protetta da opere di difesa costituite da scogliere parallele emerse che appaiono trattenere di più la sabbia, nonostante non abbiano un forte set-up nella zona protetta, ma in presenza di mareggiate molto intense perdono comunque materiale attraverso i varchi (Preti et al., 2011).

Per cui il sedimento che stazionava nelle aree andate in erosione (vedi carte degli accumuli e residui ottenute), potrebbe essersi accumulato in parte all'esterno della barriera in sacchi,

contribuendo ad un innalzamento del fondale (particolarmente evidente nella mappa batimetrica di Novembre 2021), ed in parte potrebbe essere stato trasportato verso nord dalla corrente litoranea andando ad alimentare le spiagge settentrionali.

La causa principale delle perdite di sedimento quindi sarebbe da ricercare nella variabilità delle condizioni meteo-marine, ma la forte deriva da sud verso nord dei sedimenti lungo costa fa sì che la porzione meridionale della costa di Riccione risulti la più sollecitata dall'erosione e quella settentrionale la più stabile.

In conclusione, le spiagge di Riccione risultano in equilibrio precario nonostante i periodici interventi di ripascimento e le opere di difesa di differente entità adottate (barriere sommerse e Wmesh), poiché i volumi di sabbia apportati potrebbero essere fuoriusciti e trasportati in gran parte verso nord.

Quindi quest'area del settore costiero di Riccione può essere considerata come una zona di ricarica artificiale del "nastro trasportatore litoraneo" che, spostando la sabbia fino al molo di Rimini (Preti et al., 2011), garantisce l'equilibrio dei km di spiagge che si trovano a nord rispetto a questa.

5.3 Lido Di Dante

L'area relativa al sito di Lido Di Dante è caratterizzata dalla presenza di opere di difesa costruite a partire dagli anni '80 con lo scopo di proteggere la costa dall'erosione in atto e composte da un sistema di barriere prossime alla riva (Fig. 22). Inizialmente furono costruiti tre pennelli ed una barriera semi-sommersa e parallela alla linea di riva, estesa per 770 m ed interrotta da un varco largo 30 m; quest'ultima è posta a 180 m dalla costa ad una profondità di 3,5 m, per questo risulta emergente durante la bassa marea e sommerso durante l'alta marea.

La parte più a Sud del litorale era relativamente non protetta e gli effetti generati dal sistema di barriere sulla propagazione delle onde si sono manifestati subito dopo la loro costruzione, infatti si è verificata erosione sia lungo-costa che vicino riva, localizzata soprattutto nei primi 500 m ed espandendosi gradualmente verso sud. Per questo è stata recentemente realizzata un'ulteriore barriera sommersa, lunga circa 500 m, che prolunga il sistema di barriere verso sud (Fig. 23) nella spiaggia precedentemente non protetta.

Inoltre, nonostante la sua collocazione in prossimità delle foci fluviali, l'area costiera di Lido Di Dante è interessata da problemi di erosione anche a causa del limitato apporto di sedimenti fluviali sulla costa e valorizzata dagli effetti del cedimento locale dovuto all'estrazione di acqua e gas (il campo di estrazione del gas Angela-Angelina si trova vicino al sito; Teatini et al., 1997).

In quest'area così complessa e antropizzata, sono state condotte 4 campagne di rilievo (vedi Cap.4 – Organizzazione dei dati) durante le quali è stato possibile monitorare l'evoluzione delle morfologie qui presenti quali le barre di sabbia e gli avvallamenti relativi ad esse.

Figura 22 - Prime opere di difesa presso Lido Di Dante, messe in posto negli anni '80

Figura 23 - Prolungamento della barriera semi-sommersa messa in posto recentemente a Lido Di Dante

Figura 24 (a, b, c, d) - Mappe batimetriche relative al sito di Lido Di Dante

Rilievo del 10 Ottobre 2020

Guardando alla mappa batimetrica in Fig. 24a si osservano nella porzione interna alla barriera, lato costa, dei corpi sedimentari identificabili con delle barre sabbiose morfologicamente crescenti verso Sud, orientate in direzione normale alla linea di riva, ed ognuna bordata da un canale.

All'angolo tra la barriera ed il pennello, è presente una depressione piuttosto marcata che raggiunge profondità massime dell'area, con un valore di -4.70 m circa.

Oltre la barriera si osserva un aumento di pendenza graduale del fondale, che arriva ad un massimo di -5 m di profondità (al limite dell'area indagata).

Rilievo del 20 Aprile 2021

Nella mappa batimetrica realizzata dai dati dei rilievi di Aprile 2021, Fig. 21b, a 6 mesi di distanza dal precedente, si osserva come la morfologia di fondale sia notevolmente variata nella stessa area:

è presente un'unica barra collegata alla spiaggia sommersa, nella zona di nearshore, mediante un cordone di sedimento piuttosto ridotto in larghezza e affiancato da un avvallamento con profondità maggiori rispetto all'area circostante. Inoltre la barra risulta orientata N-S, quindi maggiormente inclinata rispetto alla direzione normale alla linea di riva, ed estesa verso barriera soffolta. All'angolo barriera-pennello si riconosce l'avvallamento con profondità inferiori rispetto a quanto già rilevato, con valori di 4.6 – 4.7 m circa.

Nella porzione esterna alla barriera il fondale raggiunge profondità massime di 4.8 m con andamento graduale, mentre le profondità in corrispondenza della barriera è presente la morfologia da accumulo. Più in generale, il fondale in questa zona si è innalzato, infatti le profondità risultano inferiori.

Rilievo del 24 Settembre 2021

Trascorsi 11 mesi dal primo rilievo, il fondale risulta ulteriormente modificato nelle sue caratteristiche (Fig. 24c):

Internamente alla barriera, lato costa, la singola barra risulta completamente "saldata" alla scarpata di spiaggia sommersa e si estende in direzione della barriera soffolta con maggiore inclinazione verso N-S; l'avvallamento presente all'angolo barriera-pennello risulta di dimensioni ridotte e con profondità massime nell'ordine dei -4.5 m.

Nella porzione esterna alla barriera il fondale risulta innalzato rispetto a quanto visto in precedenza e si registrano profondità massime nell'ordine dei -4.2 m.

Rilievo del 13 Dicembre 2021

L'ultima campagna si è svolta a 14 mesi dal primo rilievo e si osservano numerose morfologie: internamente alla barriera si distinguono almeno due barre di simili dimensioni ed in posizione centrale, orientate perpendicolari alla linea di costa. L'area di avvallamento visibile in angolo, tra pennello e barriera, è di maggiori dimensioni e con profondità di - 4.8 m circa.

Oltre la barriera il fondale risulta nuovamente approfondito, con valori massimi di - 5 m circa.

Tenendo conto di questo particolare assetto dell'area di Lido Di Dante, si potrebbe ipotizzare che le barre presenti inizialmente nel periodo invernale risultano crescenti e di differenti dimensioni, mentre con la bella stagione queste morfologie tendono ad accorparsi in un'unica barra, di dimensioni maggiori. Al fine di rendere completa l'analisi riguardo i sedimenti movimentati nell'arco dei 14 mesi di monitoraggio, sono state realizzate delle mappe di riflettività (Fig. 25 a,b,c,d) e le carte degli accumuli e delle erosioni (Fig.26 a,b,c,d).

Le mappe di riflettività esprimono un indice legato alla diversa riflettività del sedimento di fondo e ciò può essere, in prima approssimazione, direttamente legato alla diversa granulometria prevalente. Per cui, considerando che ad alta riflettività corrisponde generalmente sedimento sabbioso ed effettuando un confronto differenziale tra le mappe, ottenute in differenti periodi e per questo rappresentative di diverso clima meteo-marino, è stato possibile validare quanto osservato dalle batimetrie: in prossimità della spiaggia sommersa e delle barre soggette a migrazione risultano valori maggiori del coefficiente di riflettività e quindi si potrebbero essere movimentati

volumi di sedimento sabbioso; al contrario man mano che si procede in direzione offshore i valori di riflettività diminuiscono, poiché ci troviamo in presenza di maggiori volumi di sedimenti fini.

In Figura 26 (a, b, c, d) sono visibili le Mappe degli accumuli e delle erosioni: nell'arco del periodo in cui si sono svolti i rilievi i valori indicativi di accumulo (colori nel tono del grigio) sono concentrati soprattutto nella porzione di spiaggia interna alla barriera semi-sommersa. Questi residui "positivi" sono particolarmente ben visibili in corrispondenza delle barre crescenti e successivamente singola barra, che osserviamo a partire dal rilievo di Aprile 2021.

In quest'area interna alla barriera si osservano residui "negativi", in rosso e quindi indicativi di erosione, circoscritti a ridotte porzioni in prossimità della costa, mai troppo significative se non nella Mappa rappresentativa della differenza tra il rilievo di Dicembre 2021 ed Aprile 2021.

Esternamente alla barriera si hanno valori che potrebbe essere indicativi di equilibrio nelle dinamiche di erosione/accumulo sedimentario, infatti quasi tutta l'area è nella tonalità del grigio-chiaro/bianco, fatta ad esclusione di una piccola zona in rosso collocata a ridosso dell'estremità più a sud della barriera, indicativa di forte erosione proprio in quel punto.

In **Figura 26b**, trascorso quasi un anno dal primo rilievo, buona parte dell'area di fondale esterna alla barriera risulta caratterizzata da residui leggermente negativi, indicativi di erosione.

Figura 25 (a, b, c, d) - Mappe rappresentative della riflettività del fondale, relative al sito di Lido Di Dante

Figura 26 (a, b, c, d) - Mappe degli accumuli e delle erosioni, relative al sito di Lido Di Dante

Da queste evidenze si potrebbe confermare quanto osservato dalle mappe batimetriche e cioè che, nell'arco di tempo intercorso tra Ottobre 2020 e Dicembre 2021, i sedimenti costituenti aree di fondale soggetto ad erosione sono stati trasportati e ridistribuiti lungo costa dal regime del moto ondoso, regolato dall'alternarsi di condizioni meteo-marine a maggiore incidenza di mareggiate (stagione invernale) e mare calmo (stagione estiva).

In particolare è opportuno notare che per il sito di Lido Di Dante le barre sono presenti in maniera rilevante per la maggior parte dell'anno: ciò offre l'opportunità di esaminare le relazioni tra le proprietà delle barre ed i fattori di controllo che le influenzano e questo perché la loro genesi costituisce espressione di condizioni meteo-marine caratterizzate da fenomeni frequenti di mareggiate e quindi soggette a forte moto ondoso, entrambi fattori di controllo responsabili di movimentare ingenti quantità di sedimento sabbioso.

In sintesi si osserva che:

- durante i mesi invernali, soggetti a mareggiate, sono presenti barre multiple che tendono ad assumere forme crescenti o ritmiche, in direzione normale rispetto alla linea di costa: probabilmente queste sono state generate da eventi di mareggiata;

- in condizioni di mare calmo, le barre sono soggette ad onde miti e vanno così a fondersi in un'unica barra per poi "saldarsi" alla spiaggia sommersa: ciò significa che si è verificata una migrazione verso terra delle barre, che col passare del tempo potrebbe portare alla fusione della singola barra che si è generata con la spiaggia, di cui andrà a costituire la porzione sommersa.

Infatti col passare dei mesi e soprattutto con l'arrivo della bella stagione, le onde si fanno più miti e diventano il principale fattore di controllo che, insieme ai venti di Bora e Scirocco (Archetti e Lamberti, 2009), contribuiscono a regolare le condizioni meteo-marine: sono così in grado di ridistribuire il sedimento seguendo la direzione di trasporto lungo costa che in questa porzione di litorale è diretto verso Sud (Archetti and Romagnoli, 2011).

A conferma di questa dinamica, osserviamo come nell'ultimo rilievo di Dicembre 2021, in piena stagione invernale, il fondale lato mare risulti approfondito rispetto al rilievo precedente, mentre l'area protetta dalla barriera semi-sommersa è caratterizzata da barre di recente formazione.

6. Risultati e Conclusioni

Il lavoro sviluppato nell'ambito del progetto TAO ha permesso di proporre interpretazioni di natura morfodinamica, partendo dall'analisi di dati raccolti nell'ambito di alcuni rilievi ripetuti in aree chiave. L'insieme delle elaborazioni dei dati e la loro interpretazione costituisce un elemento fondamentale alla realizzazione degli obiettivi del Progetto, incluso quello di comprendere le dinamiche costiere agenti sul litorale Emiliano-Romagnolo da anni soggetto a forte erosione. I risultati ottenuti forniscono elementi utili valutare l'efficacia delle opere di difesa progettate e messe in posto al fine di preservare il sistema costiero.

Le difficoltà nell'acquisizione di dati multi-parametrici in ambiente sommerso *super-shallow* è in genere affrontata utilizzando sistemi di misura di grande precisione ma di costo troppo elevato. In alternativa, esistono sistemi più economici che non raggiungono però le performances di accuratezza e ripetibilità indispensabili per il monitoraggio costiero.

L'utilizzo di veicoli autonomi di superficie effettuato nell'ambito del progetto TAO ha dato la possibilità di ripetere rotte programmate con precisione molto elevata, una caratteristica alla quale si è lavorato con successo, consentendo l'esecuzione di rilievi ripetuti (rilievi 4D) che permettono di pianificare operazioni di monitoraggio della fascia costiera. Inoltre, l'utilizzo della strumentazione geofisica includendo simultaneamente ecografo, Chirp-sonar e side-scan sonar a bordo del veicolo autonomo di superficie, ha ridotto significativamente il tempo di acquisizione e, grazie all'accuratezza del DGPS, ha garantito un buon controllo del dato di posizionamento. Questo è risultato fondamentale ai fini della rapidità e del basso costo da mantenere, fattori importanti per lo svolgimento di questo tipo di indagini che hanno importanti implicazioni ambientali e sociali.

L'approccio utilizzato ha permesso di svolgere i rilievi periodicamente ed in modo efficace consentendo di ricostruire l'evoluzione dell'interfaccia acqua-sedimento nel tempo. Le mappe batimetriche e le mappe che illustrano l'accumulo e l'erosione di sedimento, prodotti finali di questo lavoro, permettono di caratterizzare le dinamiche generate dai fattori di controllo che agiscono sui depositi sabbiosi presenti, osservando lo stato morfologico del fondale e la sua evoluzione.

Proprio per questi fattori, l'approccio utilizzato nell'ambito del Progetto TAO semplifica notevolmente l'operazione di raccolta dati e l'interpretazione dei risultati: potrebbe quindi costituire uno studio di riferimento che propone una metodologia efficace per descrivere la distribuzione degli accumuli sabbiosi e la loro dinamica costiera in vari contesti anche in altre aree di studio. I cambiamenti morfologici descritti ed i trend evolutivi sono il risultato dell'azione congiunta di fattori naturali e antropici, i quali hanno fortemente influenzato la situazione già critica di questi settori di spiaggia.

I dati acquisiti ed i primi risultati ottenuti, suggeriscono l'importanza di integrare il set di dati multi-parametrici con i campionamenti diretti di benthos e sedimento, che aggiungerebbero informazioni stratigrafiche fondamentali ai fini dell'interpretazione geologica e ambientale del fondale. Dal momento che i dati ottenuti costituiscono un elemento importante per lo studio dei processi di dinamica costiera, tutti i dati elaborati e le procedure di elaborazione sono disponibili in forma digitale per gli scopi del Progetto TAO. L'attività effettuata ha permesso di ricostruire gli effetti principali dei processi sedimentari nelle tre aree di studio, e consente di individuare, monitorare e quindi preservare al meglio i depositi sabbiosi, risorse preziose soprattutto per le porzioni di litorale indagato in quanto soggetto ad erosione.

Bologna 01/02/2021

Firma della responsabile
Dott.sa Alina Polonia



7. Bibliografia e Sitografia

Gasperini, L., Alfredo Marzocchi, Stefano Mazza, Roberto Miele, Matteo Meli, Hassan Najjar, Alessandro Michetti, Alina Polonia (2020a). Morphotectonics and late Quaternary seismic stratigraphy of Lake Garda (Northern Italy). *Geomorphology*, 371, 107427.

Gasperini, L., Extremely shallow-water morphobathymetric surveys: the Valle Fattibello (Comacchio, Italy) test case. *Marine Geophysical Researches* (2005) 26:97–107 DOI 10.1007/s11001-005-3710-0.

Gasperini, L. & Stanghellini G., (2009). SEISPRHO: An interactive computer program for processing and interpretation of high-resolution seismic reflection profiles, *COMPUTERS & GEOSCIENCES*, 35, 1497-1507.

Gasperini, L., Ligi, M., Stanghellini, G. (2021). Pseudo-3D techniques for analysis and interpretation of high-resolution marine seismic reflection data *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, in press.

Gaviletea, M.D. (2017). Environmental Impacts of Sand Exploitation. *Analysis of Sand Market. Sustainability, Sustainability*, 9 (2017), p. 1118

Preti, M., Aguzzi, M., Costantino, R., De Nigris, N., & Morelli, M. (2011). Monitoraggio delle spiagge nel periodo 2002-2005, *Studi costieri*, no.19, 35-87.

Preti, M., Aguzzi, M., Costantino, R., De Nigris, N., & Morelli, M. (2011). Monitoraggio delle spiagge nel periodo 2007-2009, *Studi costieri*, no. 19, 137-198.

Padmal, D., Maya, K. (2014). *Sand Mining, Environmental Impacts and Selected Case Studies*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London.

Stanghellini, G., Del Bianco, F., Gasperini, L. (2020a). OpenSWAP, an Open Architecture, Low Cost Class of Autonomous Surface Vehicles for Geophysical Surveys in the Shallow Water Environment. *Remote Sensing*, 12(16), 2575.

van Rijn L.C., 2011. Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54, Issue 12,867-887

Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. (2019). The Generic Mapping Tools version 6. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20, 5556–5564. <https://doi.org/10.1029/2019GC008515>.

Siti WEB:

Caris Hips&Sips: <http://www.teledyne-caris.com/en/products/hips-and-sips/>

GMT: <https://www.generic-mapping-tools.org/download/>

Matlab: <https://it.mathworks.com/downloads/>

OpenStreetMap (www.openstreetmap.org)

Seaview: <https://www.mogasw.com/seaview/mosaic/>

SeisPrho: <http://software.bo.ismar.cnr.it/seisprho>

Starfish: <https://www.tritech.co.uk/product/starfish-990f-high-resolution-side-scan-sonar-shallow-water0>