



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



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA



PARCO DELTA DEL PO  
EMILIA-ROMAGNA



PROAMBIENTE  
Innovation & environment



FONDAZIONE FLAMINIA  
PER L'UNIVERSITÀ  
IN ROMAGNA

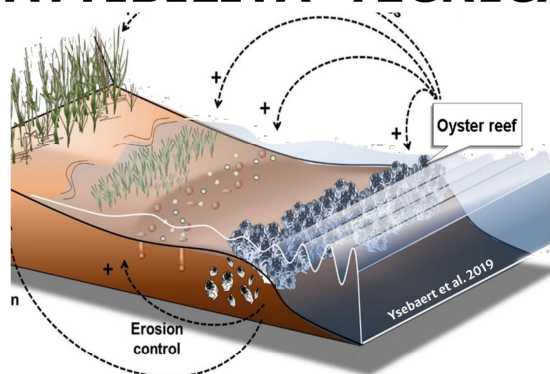


AREA INFRASTRUTTURE CIVILI SERVIZIO TUTELA AMBIENTE E TERRITORIO  
UFF. GEOLOGICO E PROT. CIVILE

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		.....			
<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	COPIA MASTER		BP	RA	AM	Febbraio 2025
Rev.	Descrizione	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Data:		
ELABORATO:							
RELAZIONE TECNICA							
Fascicolo: 2023/06.05/182		Data: Febbraio 2025		Codice Elaborato:		RT	
Scala: -		File: 03_RT_PFTE_R0.pdf		Revisione:		R0	

## INDICE

<b>1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>2</b>
<b>2 ESIGENZE, REQUISITI E LIVELLI PRESTAZIONALI.....</b>	<b>3</b>
<b>3 ALTERNATIVE PROGETTUALI E POSSIBILI SCENARI .....</b>	<b>4</b>
3.1 Soluzione strutture rigida .....	4
3.2 Soluzione flessibile in materassi .....	6
3.2.1 Soluzione a scacchiera non omogenea .....	6
<b>4 STUDI E INDAGINI.....</b>	<b>7</b>
4.1 Morfologia del fondale marino.....	7
4.2 Scelte tecniche e elementi di dimensionamento preliminare .....	8
<b>5 CARATTERISTICHE DELL'OPERA .....</b>	<b>10</b>
5.1 Durabilità del filo metallico .....	10
5.2 Spostamento dell'opera .....	12
<b>6 ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E IDRAULICI.....</b>	<b>13</b>
6.1 Geologia .....	13
6.2 Suddivisione della zona di sedimentazione .....	14
6.3 Subsidenza .....	16
6.4 Geomorfologia .....	17
6.5 Idraulica .....	18
<b>7 VINCOLI E ASPETTI PAESAGGISTICI .....</b>	<b>20</b>
<b>8 PIANO DI GESTIONE DEL MATERIALE.....</b>	<b>24</b>
<b>9 ESPROPRI .....</b>	<b>25</b>
<b>ALLEGATO A: Relazione modellazione idraulica .....</b>	<b>25</b>

## 1 INTRODUZIONE

L'intervento sperimentale in oggetto è finalizzato alla protezione di un tratto dell'arenile posto a sud dell'abitato di Lido di Dante che confina con la foce del torrente Bevano, in modo tale da valutare l'efficacia della proposta progettuale mediante un successivo monitoraggio. L'ipotesi progettuale è quella di realizzare una difesa sperimentale soffolta, costituita da materassini sovrapposti in rete metallica (dimensione prevista 5,00x2,00 h 0,30 ml), riempiti in scapolame calcareo e successiva semina di specie di ostriche adatte alla colonizzazione dell'imbasamento. Lo strato di base sarà inoltre dotato di apposito strato di materiale geotessile al fine di minimizzare la possibilità di interrimento a seguito delle correnti litoranee e di frangenza. In questo modo si tende ad ottenere un Reef rinaturalizzato con funzioni multiple e più precisamente:

- Creare una scogliera artificiale rinaturalizzata con ostriche, in quanto sul basamento calcareo, della superficie alla base di circa 3.000 mq, si provvederà alla sua rinaturalizzazione mediante l'insediamento di ostriche native e sabellarie, (piccoli policheti che aggregano la sabbia, formano "biocostruzioni" naturali, molto diffuse in passato) Queste due specie, ostriche e sabellarie, sono in grado di creare strutture tridimensionali ricche di nicchie ecologiche che consentono un'elevata biodiversità e un habitat adatto per la riproduzione di molte altre specie;
- Realizzare un'opera di difesa della costa, in quanto la struttura in massi, la cui geometria non uniforme ha una sommergezza pari a circa -1,50 m. Tale profondità e collocamento planimetrico sono state individuate a seguito di apposita modellazione numerica bi/tridimensionale preventiva (MIKE 21) in modo tale da avere un cospicuo coefficiente di riduzione sulla trasmissione dell'onda frangente. Il software MIKE 21 è un modello numerico per la simulazione di correnti, onde, trasporto solido che in ambito marittimo consente anche la determinazione della valutazione del mutamento della linea di costa al variare del tempo, oltre che a consentire il trasferire le onde da largo a riva considerando gli effetti di frangenza, rifrazione e diffrazione.

## **2 ESIGENZE, REQUISITI E LIVELLI PRESTAZIONALI**

La località di Lido di Dante, come ampiamente illustrato nella relazione generale, è ancor oggi soggetta ad un importante tasso di subsidenza, (oggi circa 7,5 mm/anno) e pertanto è anche un paraggio costiero soggetto a notevoli fenomeni di erosione e ingressione marina.

Questa situazione ha fatto sì che nel corso degli anni, a partire da metà degli anni '80, si siano realizzate diverse opere di difesa, e oggi buona parte della costa risulta protetta, alcune di queste risultano essere di tipo rigido, l'ultima in ordine temporale realizzata è posta a nord del sito oggetto di intervento nella quale è stata estesa la barriera soffolta per un tratto di circa 500 m, oltre alla realizzazione di un pennello posto a parziale chiusura della zona di interesse.

Il presente intervento, pertanto, tende a proseguire nella sua funzione di difesa, soprattutto di un tratto di arenile oggi risultato particolarmente esposto a fenomeni erosivi sia emersi che sommersi.

Difatti sia il tratto di costa prospiciente al posizionamento dell'opera che la spiaggia sommersa risultano in un precario stato di equilibrio, per il quale periodicamente è oggetto di ripascimento da parte della Regione Emilia-Romagna.

L'opera, come sopra accennato, verrà realizzata mediante la posa di due strati di materasso di dimensioni 5,00 x 2,00 x 0,30 m posti accostati e su più livelli al fine di poter formare attraverso una disposizione non casuale una superficie complessiva pari a circa 100 x 48 m per un'altezza massima di 0,60 m, con una sommergenza massima pari a 1,20/1,50 sul medio mare.



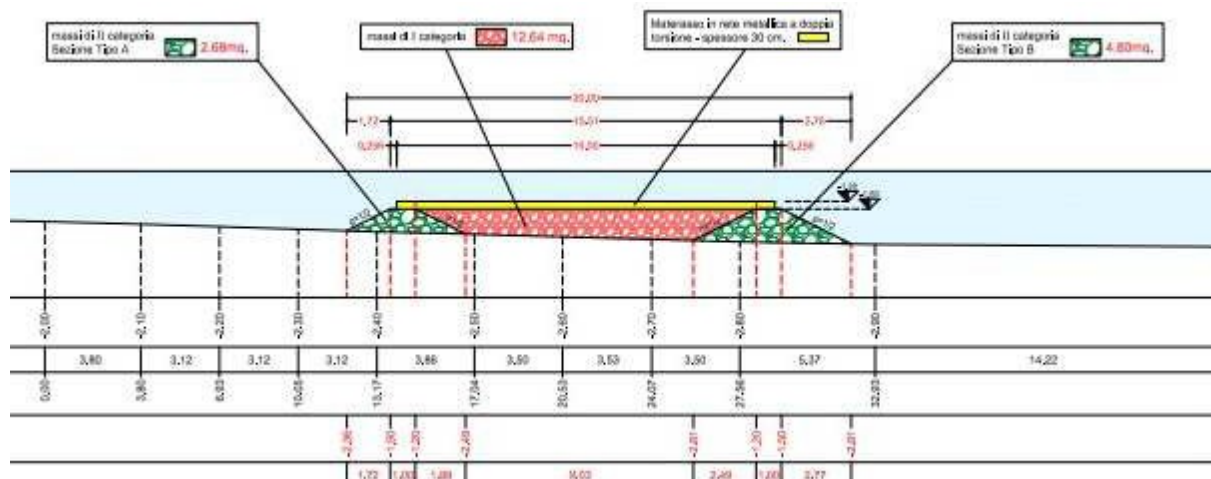
### 3 ALTERNATIVE PROGETTUALI E POSSIBILI SCENARI

Nel corso della progettazione sono state effettuate verifiche su altre scelte progettuali possibile che hanno fatto per la scelta di progetto.

#### 3.1 Soluzione strutture rigida

La soluzione rigida presentata in sede di prima Conferenza dei Servizi, realizzata mediante la realizzazione di una massicciata di base 200,00 x 20,00 m, con forma tronco piramidale, altezza media 1,50 m e base superiore, sempre a forma rettangolare, con dimensioni 15,50 x 195,20 m, con la base maggiore posta parallelamente alla linea di riva, ad una distanza di circa 160 m dalla stessa e a una batimetria di partenza di circa -2,40, con sviluppo dell'opera lato mare sino alla batimetria di circa -2,90.

Seppur presentava la possibilità di alloggiare materassi per si provvederà alla sua rinaturalizzazione mediante l'insediamento di ostriche native e sabellarie, tale soluzione presentava la notevole complessità di essere una struttura molto impattante a livello idraulico, sulla stabilità della costa.



PLANIMETRIA STATO DI FATTO E DI PROGETTO  
Scala 1:1000

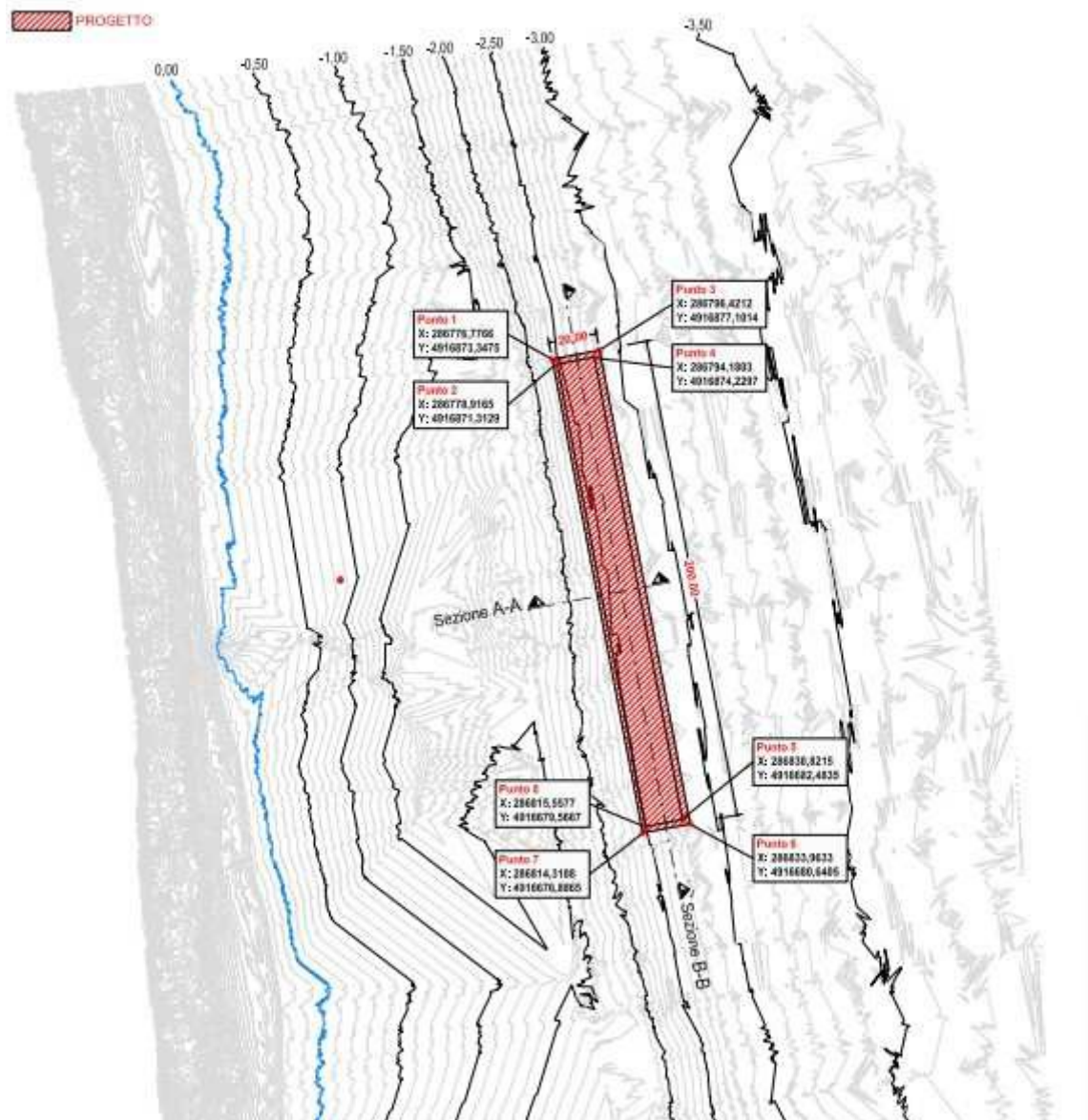


Figura 2 - Planimetria di possibile collocamento della struttura Rigida;

## 3.2 Soluzione flessibile in materassi

La soluzione con una struttura in materassi di dimensioni modulari 5,00 x 2,00 x 0,30 m posti in più livelli è stata valutata al fine di definire quella che era la conformazione migliore per tutte le implicazioni di tipo sedimentologico, idraulico e idrodinamico che avrebbero potuto generare.

### 3.2.1 Soluzione a scacchiera non omogenea

Tale soluzione è stata valutata ottimale sia da un punto di vista idrodinamico che dimensionale, vista la sua estensione, non omogeneità planare che limita quindi la possibilità di formazioni di correnti tra i vari elementi modulari, inoltre la presenza di gradualità alle estremità si limita l'effetto di bordo della soluzione proposta.

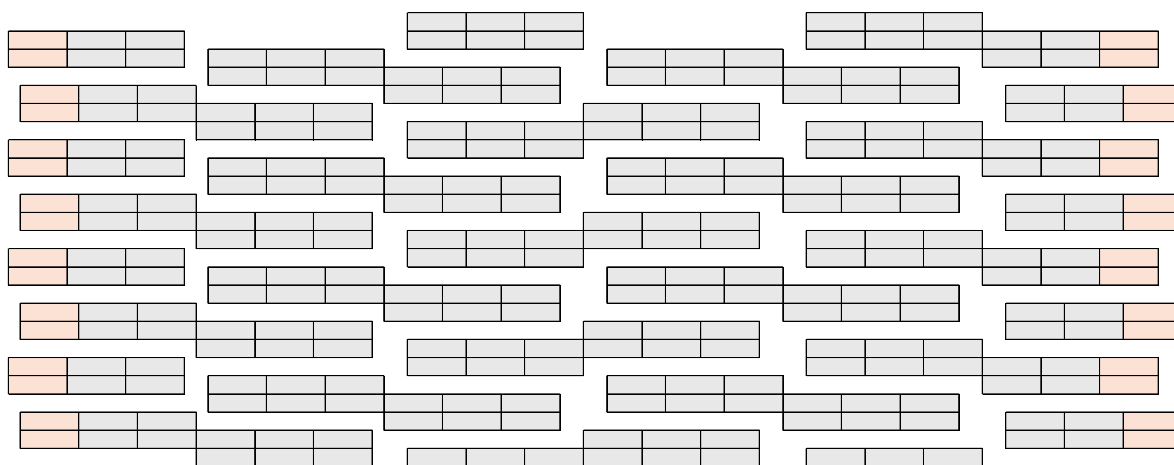


Figura 3 - Soluzione con moduli a Scacchiera non Omogenea;

## 4 STUDI E INDAGINI

### 4.1 Morfologia del fondale marino

Dal rilievo batimetrico aggiornato dell'area oggetto del presente progetto si è provveduto ad elaborare la seguente planimetria ad isolinee ed isobate con l'equidistanza di 10 cm.

Si evidenzia come la struttura sia stata posizionata in prossimità della isobata -2,00 m a sud del pennello realizzata dopo gli anni 2020, in tale zona è presente una zona di deposito che a seguito della realizzazione della nuova struttura avrà una evoluzione, tale aspetto sull'evoluzione del fondale e degli effetti di trasmissione dell'onda e del suo smorzamento, oltre che alla variazione della linea di costa a seguito della nuova struttura, si rimanda all'elaborato specialistico di modellazione idraulica.

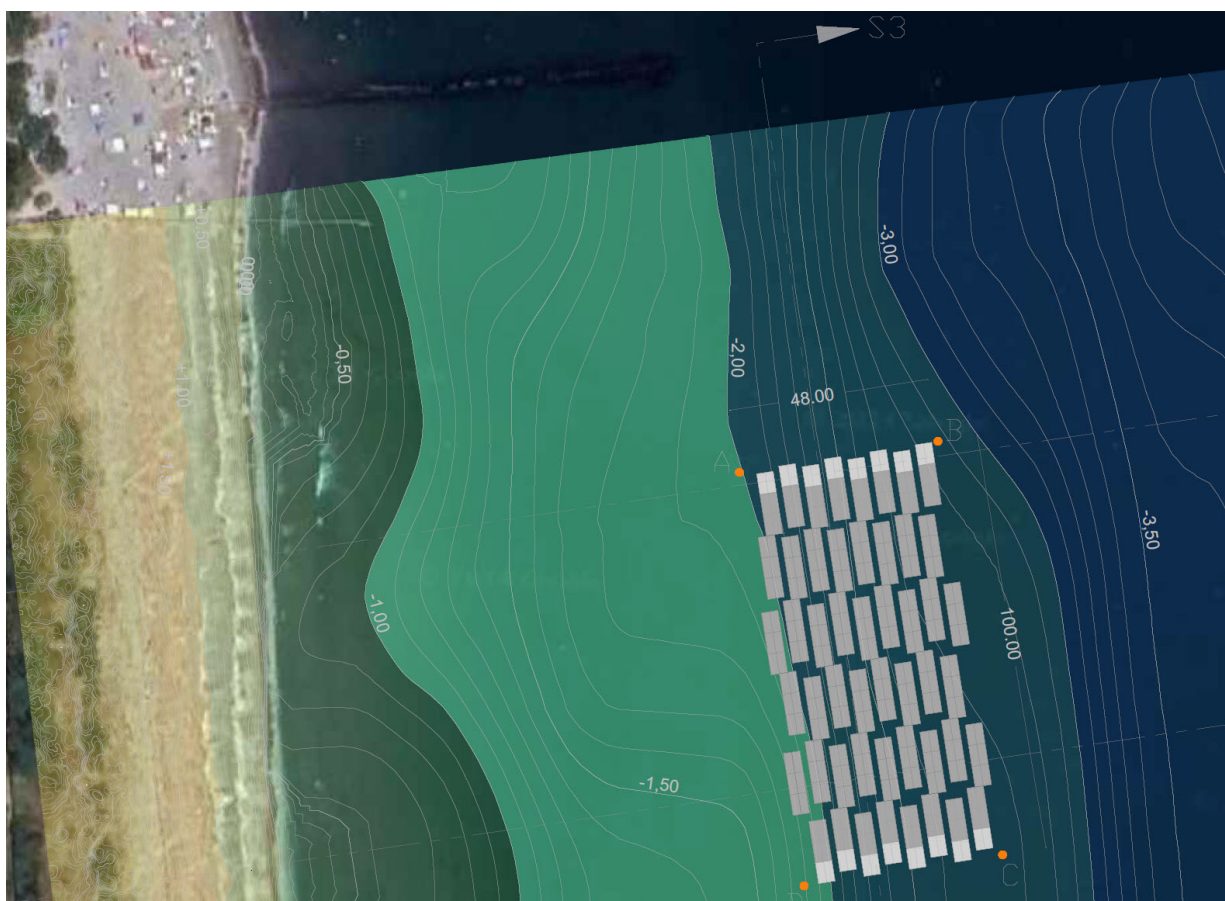


Figura 4 - Planimetria di progetto;

## 4.2 Scelte tecniche e elementi di dimensionamento preliminare

La struttura in progetto, come già indicato è realizzata in elementi modulari di dimensioni unitarie 5,00 x 2,00 x 0,30 m composti per formare dei macro blocchi di dimensioni 15,00 x 4,00 x 0,30/0,60 m la differenza di altezza dipende dal numero di elementi che possono essere sovrapposti.

La dimensione complessiva della struttura non essendo disposti in modo omogeneo sulla superficie marina coprirà un'area lorda pari a 100,00 x 48,00 m. La disposizione non omogenea ma non casuale, come già indicato consentirà di coprire la massima superficie, ma allo stesso tempo di evitare la formazione di effetti interni e di bordo indesiderati per una struttura diffusa di questo tipo.

La quota di imbasamento come indicato parità da quota -2,00 m fino a quota circa -2,60/2,80 m in base alla posizione dell'attuale fondale. Il posizionamento e la legatura delle strutture così diffuse sarà garantire attraverso la presenza di personale OTS che supervisionerà l'attività di sgancio e di posizionamento da parte degli operatori posti sul pontone.

Le motivazioni che hanno definito il posizionamento dell'opera possono essere riassunte:

- L'esigenza del successivo insediamento di ostriche native a colonizzazione della struttura è stata fondamentale per la scelta della sommergenza, in quanto le ostriche, per la loro sopravvivenza, non possono mai risultare emerse, quindi considerato una bassa marea anche superiore a - 50 cm e uno sviluppo coloniale delle ostriche di 20/30 cm in altezza si è ritenuto opportuno mantenere comunque un ulteriore franco di acqua di 40/50 cm (quindi in totale 1,40 ml.) in modo tale da garantire un minimo di ricoprimento idrico anche durante le mareggiate;
- Il posizionamento alla -2,00 m, con sviluppo lato mare è dovuto alla tipologia di mezzi marittimo impiegabili in cantiere, che comunque difficilmente hanno una immersione

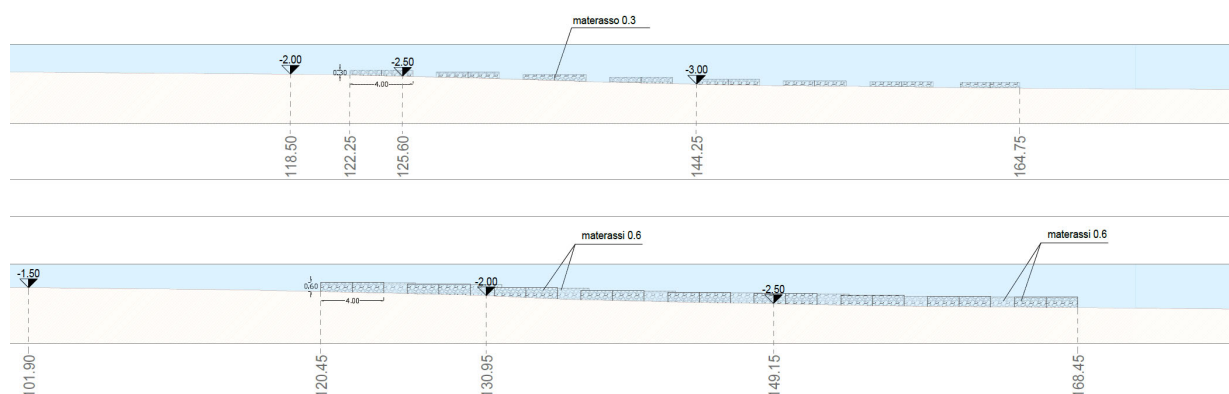


Figura 5 - Sezioni di progetto;



inferiore a circa 2,00/2,20 m, quindi a pieno carico, per poter operare in sicurezza e con una finestra lavorativa, devono comunque adattare la loro operatività alle fasi di marea, iniziando con la fase di risalita, potendo così sfruttare la concomitanza anche dello scarico del mezzo e quindi una minor immersione dello stesso;

- La struttura verrà realizzata mediante la posa dei materassini, dimensioni 5,00 x 2,00 x 0,30 m cadauno in rete metallica zincata posti affiancati l'uno all'altro. I materassini verranno riempiti e confezionati prima della posa, con materiale calcareo a spigolo vivo (spaccato) dimensione 100/200 mm in modo da creare mediante un opportuno indice dei vuoti, un ambiente idoneo sia ad accogliere che alla crescita delle ostriche.



*Figura 6 - Spaccato di cava calcareo;*

## 5 CARATTERISTICHE DELL'OPERA

L'opera, come già indicato nei paragrafi precedenti, sarà costituita da moduli affiancati di dimensioni pari a 5,00 x 2,00 x 0,30 m realizzati mediante rete tessuta con trafilato di acciaio di diametro pari a 3,70 mm galvanizzato con lega eutettica di zinco (95%) e alluminio (5%) conforme alle EN 10244 - classe A. Il materiale interno sarà costituito da spaccato di cava di origine calcareaa con un fuso granulometrico compreso tra i 100 e i 200 mm.

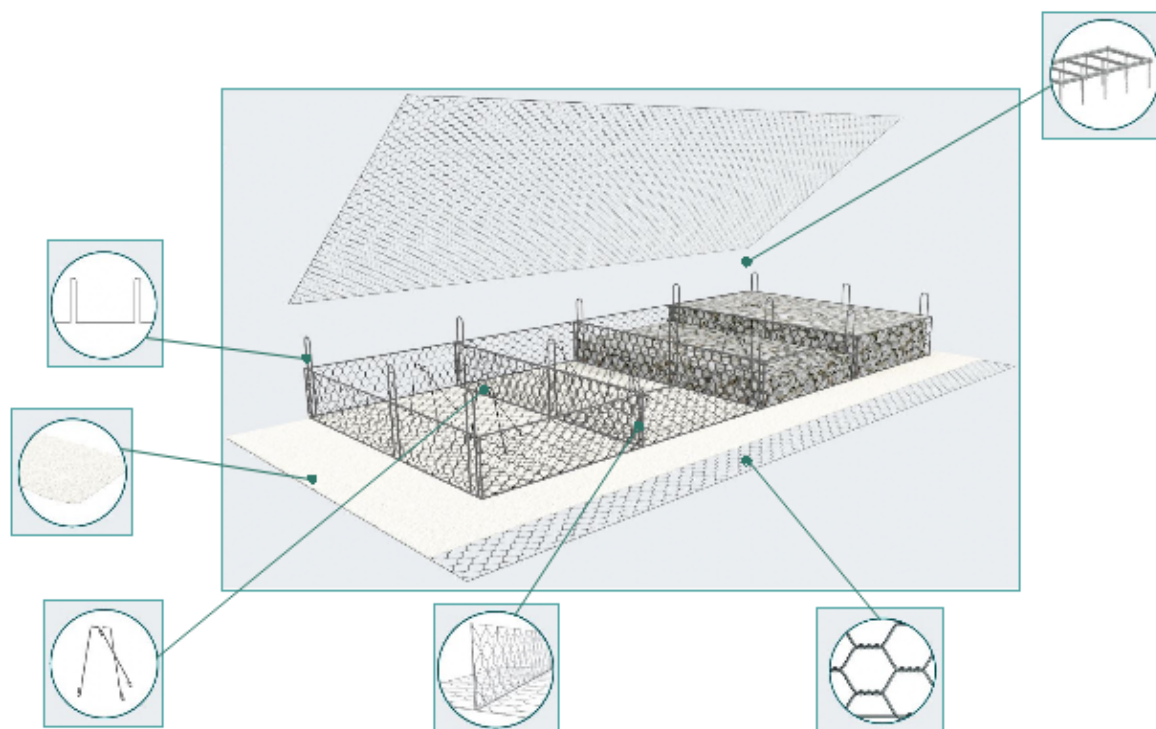


Figura 7 - Materasso di dimensioni 5,00 x 2,00 x 0,30 m;

### 5.1 Durabilità del filo metallico

Al fine di verificare la durata del filo metallico di spessore pari a 3,70 mm, si ipotizza che la colonia di ostriche native e sabellarie riescano a rendere stabile la struttura di massi in circa 10 anni. In questo arco di tempo minimo, dovrà essere la rete metallica che garantirà la stabilità complessiva dell'opera.

A tal fine si prendere a riferimento al EN 1993-5:2007: Eurocodice 3: Progettazione dell'acciaio strutture - Parte 5: Palificazioni, nel quale sono trattate per similitudine la durabilità delle opere in ambiente marino §4.4 *Tassi di corrosione per la progettazione*.

Tale calcolo è funzione di:

- il tipo di terreno;
- la variazione del livello della falda freatica;
- la presenza di ossigeno;
- la presenza di contaminanti.

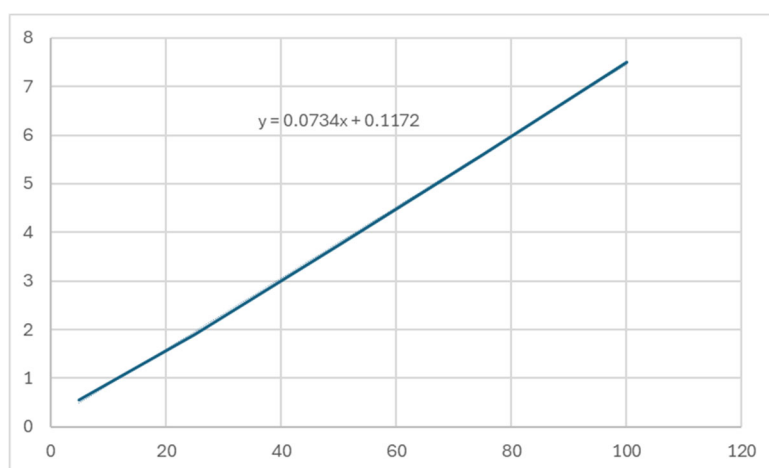
**Table 4-2: Recommended value for the loss of thickness [mm] due to corrosion for piles and sheet piles in fresh water or in sea water**

Required design working life	5 years	25 years	50 years	75 years	100 years
Common fresh water (river, ship canal, ....) in the zone of high attack (water line)	0,15	0,55	0,90	1,15	1,40
Very polluted fresh water (sewage, industrial effluent, ....) in the zone of high attack (water line)	0,30	1,30	2,30	3,30	4,30
Sea water in temperate climate in the zone of high attack (low water and splash zones)	0,55	1,90	3,75	5,60	7,50
Sea water in temperate climate in the zone of permanent immersion or in the intertidal zone	0,25	0,90	1,75	2,60	3,50

**Notes:**

- 1) The highest corrosion rate is usually found in the splash zone or at the low water level in tidal waters. However, in most cases, the highest bending stresses occur in the permanent immersion zone, see Figure 4-1.
- 2) The values given for 5 and 25 years are based on measurements, whereas the other values are extrapolated.

*Figura 8 - Valori raccomandati di corrosione in mm;*





Per una durata stimata di 10 anni, la perdita di spessore è pari a 0,8512 mm per lato, essendo una sezione circolare dopo tale periodo di tempo la sezione complessiva sarà residua sarà pari a 53% della sezione iniziale, mentre l'area residua sarà pari a circa il 30% della sezione iniziale.

Tale condizione è la condizione estrema a 10 anni quando la struttura sarà completamente stabilizzata dalle concrezioni; quindi, la struttura metallica non avrà più funzioni portanti.

Inoltre, il calcolo è stato considerato tenendo conto della condizione di massimo consumo per corrosione, vista la posizione dei materassi dovrà risultare sempre sommersa al fine di consentire alla colonia di poter proliferare e accrescere.

## 5.2 Spostamento dell'opera

Al fine di verificare lo spostamento a causa delle correnti prodotte dalla nuova struttura, ci si affida alla sola capacità di resistere per il solo peso dell'opera, tale verifica sarà condotta sia per i materassi di spessore 0,30 m che per i materassi di spessore pari a 0,60 m con un coefficiente di attrito pari a 0,3. L'indice dei vuoi considerato a seguito del riempimento è pari allo 50%.

Peso dell'opera immersa:

$$P_{0,30} = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot (\gamma_m - \gamma_a) \cdot (1 - e) = 5 \cdot 2 \cdot 0,3 \cdot (2,4 - 1,03) \cdot (1 - 0,50) = 2,055 \text{ t}$$

$$P_{0,60} = L_1 \cdot L_2 \cdot L_3 \cdot (\gamma_m - \gamma_a) \cdot (1 - e) = 5 \cdot 2 \cdot 0,6 \cdot (2,4 - 1,03) \cdot (1 - 0,50) = 4,11 \text{ t}$$

Forza Stabilizzante:

$$F_{0,30} = P_{0,30} \cdot \mu = 2,055 \cdot 0,30 = 0,62 \text{ t} = 6.200 \text{ N}$$

$$F_{0,60} = P_{0,60} \cdot \mu = 4,11 \cdot 0,60 = 1,23 \text{ t} = 12.300 \text{ N}$$

Azione unitaria sollecitante, considerando una velocità di 0,40 m/s

$$p = 0,50 \cdot \gamma \cdot v^2 = 0,50 \cdot 1030 \cdot 0,40^2 = 82,4 \text{ N/m}^2$$

Azione sollecitante in funzione del tipo di materasso

$$S_{0,3} = p \cdot A = 82,4 \cdot 5 \cdot 0,3 = 123,6 \text{ N}$$

$$S_{0,6} = p \cdot A = 82,4 \cdot 5 \cdot 0,6 = 247,2 \text{ N}$$

Le azioni sollecitanti risultano sempre inferiori alle azioni resistenti offerte dal manufatto.

## **6 ASPETTI GEOLOGICI, GEOMORFOLOGICI E IDRAULICI**

### **6.1 Geologia**

L'ultima glaciazione (denominata Wurm) iniziò nel nostro globo 60.000-70.000 anni fa e durò, sia pure intervallata da periodi interglaciali, fino a 17.000-20.000 anni fa, col risultato di fare abbassare il livello marino ad un centinaio di metri al di sotto di quello attuale.

Nel sottosuolo ravennate, ad una profondità di 80 metri circa, è stato possibile osservare che le faune marine fossili del Pleistocene superiore (tirreniano) tendono a scomparire, passando attraverso forme di ambiente lagunare a sedimenti di ambiente continentale, sia terrestre che di acqua dolce.

Lo spessore dei sedimenti continentali depositatesi in questa zona durante la regressione wurminiana si aggira sui 50 metri e si tratta, in prevalenza, di limi argillosi con intercalazioni di argille e sabbie.

In definitiva, durante la regressione wurmiana, a seguito dell'abbassamento marino, l'alto Adriatico si era trasformato in una vasta piana alluvionale, mentre la zona compresa tra le attuali isobate di metri 60 e metri 100 da Ancona e Pescara era caratterizzata da ambienti lagunari e marino-costieri. Secondo studi eseguiti, sembra ormai accertato che ad iniziare da 17.000 anni fa la temperatura media terrestre cominciò ad aumentare.

Prese così avvio un miglioramento climatico, che portò come conseguenza ad un generale ritiro dei ghiacciai e ad un aumento del livello marino, che, durante questa generale trasgressione, si arrestò contro le prime colline a sud di Rimini, e contemporaneamente si inoltrò notevolmente nelle aree più depresse dell'attuale pianura ravennate e del delta padano.

I primi sedimenti che documentano l'avvicinarsi dell'ambiente marino nel ravennate si trovano alla profondità di circa 25 metri e ricoprono i depositi di ambiente continentale formati durante la regressione wurmiana.

Nel corso della massima espansione della trasgressione olocenica (5.000-6.000 anni fa), la linea di costa raggiunse posizioni nell'entroterra ravennate distanti una ventina di chilometri da quella attuale. Pertanto, tutta una vasta area attorno a Ravenna fu occupata dal mare fino a circa 2.000 anni fa, quando ebbe inizio una grande regressione che portò, sia pure con alterne vicende, la linea di costa all'attuale posizione.

Nel territorio ravennate, la trasgressione è contrassegnata dalla presenza di limo, dello spessore di poco più di un metro, di ambiente lagunare, cui segue sabbia di ambiente di spiaggia.

Questa sabbia segue il passaggio della linea di costa che, dopo aver raggiunto rapidamente le posizioni più occidentali, durante la fase della massima espansione della trasgressione, si ritirò dopo su una posizione di qualche chilometro più arretrata.

Su questa nuova posizione, la spiaggia si stabilizzò per qualche migliaia di anni, dando vita ad un corpo sabbioso spesso circa 25 metri.

In questo corpo sabbioso si inseriscono anche strati ghiaiosi, a causa di particolari condizioni di trasporto delle correnti di riva.

A Ovest di tale corpo sabbioso, si ebbe invece una sedimentazione di limo sabbioso, limo, argilla e torba per l'instaurarsi di un ambiente, prima lagunare, poi vallivo.

Ad Est dello stesso corpo sabbioso, dove la sedimentazione avveniva via via in mare aperto sempre più lontano dalla costa, si aveva deposito di limo sabbioso, limo, o argilla.

## **6.2 Suddivisione della zona di sedimentazione**

Da quanto è stato fin qui illustrato, si possono individuare e delineare nel sottosuolo ravennate quattro zone di sedimentazione aventi proprie caratteristiche sedimentologiche e litologiche.

### **ZONA A**

E' la zona che non è stata raggiunta dal mare nel corso della trasgressione olocenica, pertanto i sedimenti del tardo Pleistocene e dell'Olocene sono quindi di ambiente continentale. Tale zona si trova nella parte più occidentale del territorio ravennate: verso sud, però, tende ad avvicinarsi alla costa attuale.

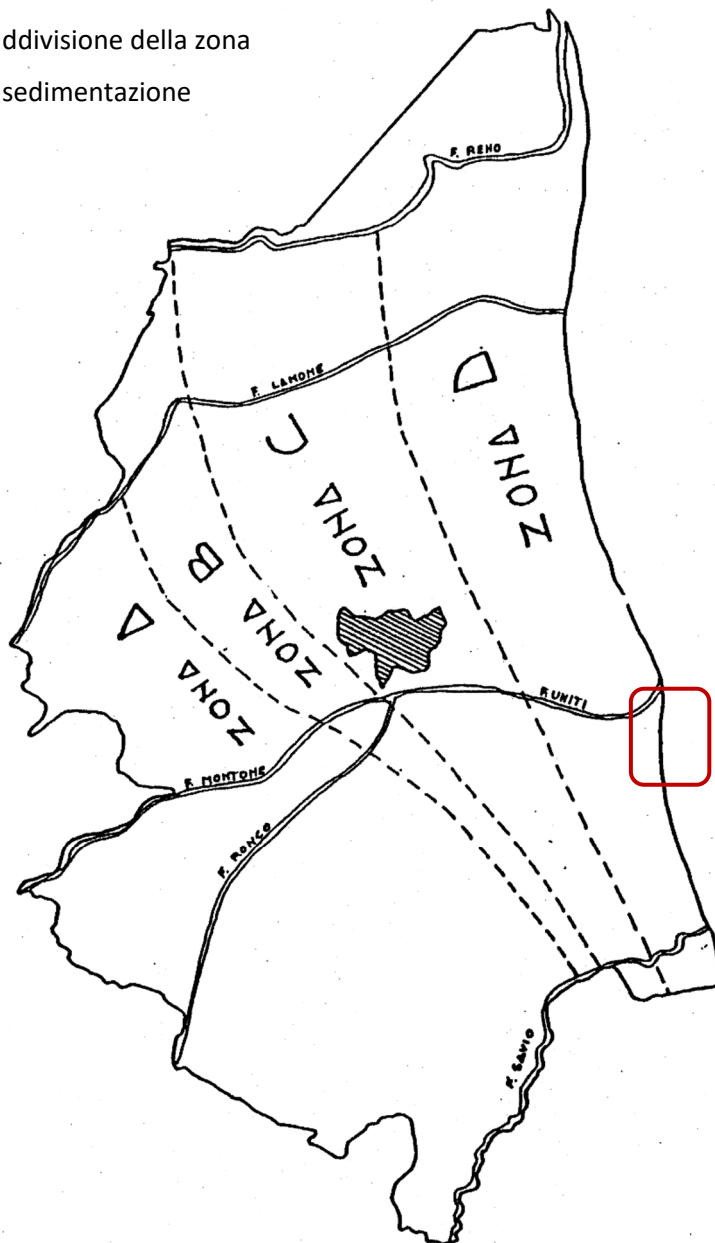
La parte più alta del complesso litologico, i primi 15 metri, è costituita da argilla limosa con intercalazioni di torba, seguono poi verso il basso argilla, limo e sabbia in successione alternata.

### **ZONA B**

E' stata raggiunta dalla trasgressione olocenica durante la massima espansione, i terreni del tardo Pleistocene e dell'Olocene più antico, di ambiente continentale, sono formati da alternanza di argilla, limo e sabbia. La trasgressione olocenica è caratterizzata, da limo sabbioso di ambiente lagunare e sabbia di spiaggia dello spessore complessivo di 3-4 metri, seguono poi verso l'alto, limo sabbioso, limo di ambiente lagunare e infine argilla con torba sedimentatasi in ambiente vallino ad acqua dolce. La serie è ricoperta superficialmente da argilla giallastra, di

apporto fluviale e della bonifica recente. Lo spessore dei sedimenti soprastanti alla trasgressione diminuisce gradatamente da nord verso sud.

Suddivisione della zona  
di sedimentazione



## **ZONA C**

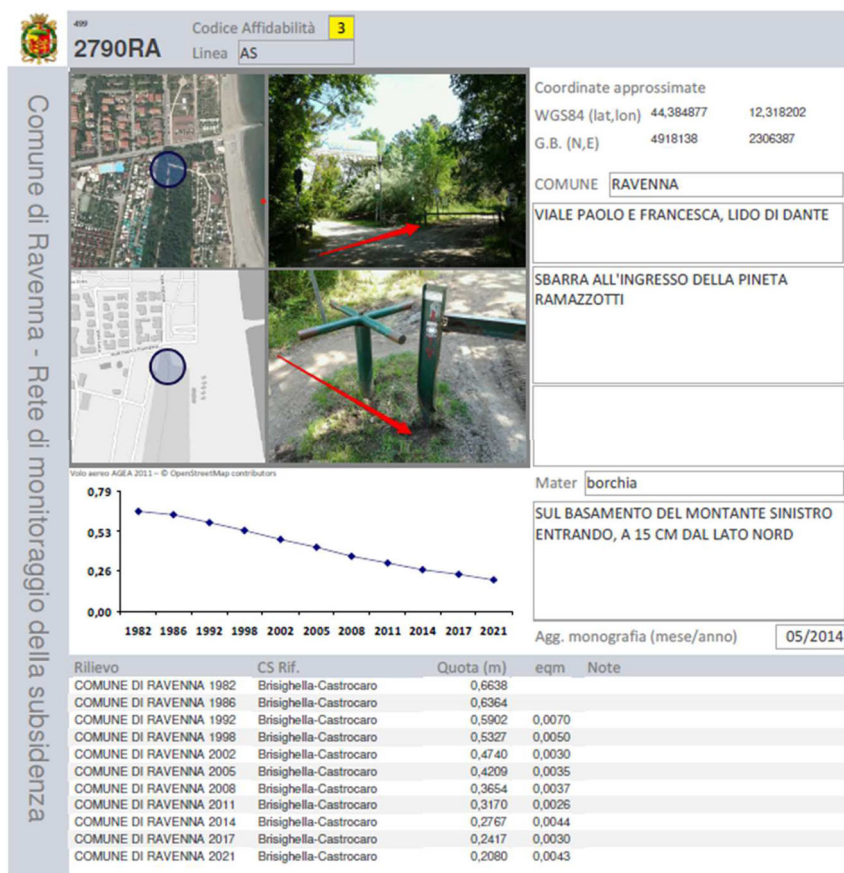
I terreni soprastanti alla trasgressione olocenica, sono in questa zona prevalentemente sabbiosi, mentre quelli sottostanti, sono della stessa natura delle zone già descritte. Durante le ultime fasi dell'Olocene, a causa dell'equilibrio verificatosi tra variazioni del livello marino e subsidenza e della preesistenza quindi di un ambiente di spiaggia, si è sviluppato in tutta questa zona un copro sabbioso dello spessore di circa 20 metri. Anche questo complesso diminuisce gradatamente di spessore, da nord verso sud, a causa del variare in tal senso della subsidenza.

## **ZONA D**

I sedimenti olocenici marini sono caratterizzati da un corpo sabbioso inferiore ed uno superiore, intervallati da limo sabbioso. La sabbia inferiore (sino a 25-30 metri) appartiene alla fase trasgressiva, mentre quella superiore appartiene alla fase regressiva. Il limo intercalato si è sedimentato quando la linea di costa si era stabilizzata ad occidente, entro la zona C. I terreni continentali sottostanti alla trasgressione (argilla, limo e sabbia) sono in genere più fini della zona precedente, data la sezione operata dai fiumi che erano i principali agenti del trasporto.

### **6.3 Subsidenza**

La subsidenza è un fenomeno che interessa soprattutto i terreni di tipologia alluvionale recenti e, relativamente alla zona oggetto di studio, la stessa si trova nella zona di sedimentazione D" cioè la più recente. Il comune di Ravenna, già dalla fine degli anni '70 ha intrapreso un'attenta e puntuale analisi di tale fenomeno relativamente al proprio territorio, istituendo una rete di livellazione specifica, che periodicamente (ogni 3/4 anni) viene sottoposta a verifiche di alta precisione mediante livellazioni. L'ultima è stata eseguita nel 2021. Analizzando la serie storica di un caposaldo posto nella località di Lido di Dante, 2790 RA sotto riportato, si evince che nel periodo 1982 (data di istituzione del caposaldo) ad oggi, l'abbassamento medio complessivo nel periodo di 39 anni è stato di 46 cm. (media di 11,8 mm/anno) con picchi di circa 20 mm/anno (2005/2008), attestandosi ad oggi con un abbassamento di poco maggiore agli 8 mm/anno (periodo 2017/2021).



## 6.4 Geomorfologia

La pianura emiliano romagnola si estende dal margine appenninico in direzione nord fino al Fiume Po, limitata ad est dalla fascia litoranea e a nord-est dalla piana deltizia.

La sua attuale configurazione è dovuta a processi ed ambienti sedimentari di origine diversa che hanno portato alla differenziazione della pianura in tre sistemi deposizionali distinti dal punto di vista genetico:

- *Sistema alluvionale* dominato dai processi fluviali di origine appenninica ed alpina (fiume Po);
- *Sistema deltizio* dominato dal paleodelta del Fiume Po in cui si hanno complesse interazioni fra dinamica fluviale, dinamica marina e tidale (ambiente di transizione);
- *Sistema litoraneo*, che comprende gli ambienti deposizionali costieri interdeltizi, costituiti da corpi sabbiosi longitudinali formati per giustapposizione di cordoni litoranei.

Il territorio del Comune di Ravenna risulta suddiviso in due grandi domini: il primo, nella parte più occidentale del territorio, è caratterizzato da forme morfogenetiche dovute alla dinamica fluviale (Sistema alluvionale); il secondo, nella parte orientale del territorio, è costituito da un insieme morfogenetico litorale marino (Sistema litoraneo).

L'area in esame ricade nella fascia caratterizzata dal Sistema Litoraneo e la geomorfologia attuale è pertanto il risultato di alterne vicende prevalentemente legate ad avanzamenti ed arretramenti della linea di costa e alla dinamica dei corsi fluviali.

L'area in esame rientra all'interno della 3° sotto unità litoranea, caratterizzata dal più recente sistema di cordoni dunosi litoranei, indicanti l'ultima progradazione della linea di riva verso est, con tessitura in superficie prevalentemente del tipo sabbioso, localmente intercalata da piccole aree limose o argillose.

## 6.5 Idraulica

Per quanto attiene allo studio idraulico si rimanda all'apposita relazione relativa alla dinamica litoranea e le modificazioni dell'assetto morfologico delle spiagge che caratterizzano il paraggio studiato dove sono state definite le condizioni del moto ondoso incidente, relative sia al regime medio annuo sia agli eventi estremi che possono colpire la costa.

Il clima del moto ondoso al largo è la base per definire il regime idraulico sottocosta e conseguentemente il trasporto litoraneo: le condizioni medie sono responsabili dell'evoluzione dei litorali a lungo termine, attraverso il regime delle correnti lungo riva e il conseguente trasporto dei sedimenti, mentre la conoscenza delle condizioni estreme sono necessarie per il corretto dimensionamento degli interventi lungo costa, per verificare i fenomeni erosivi e le variazioni lungo il profilo della spiaggia.

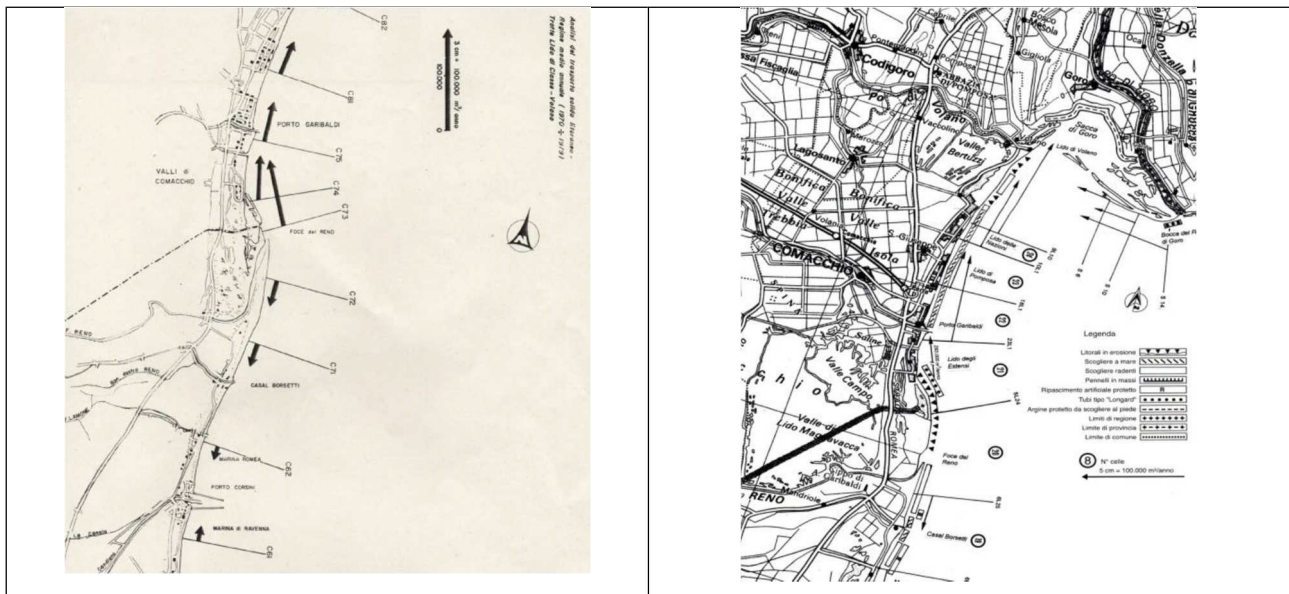
Inoltre nel periodo 16 dicembre 2020-16 marzo 2021, nell'ambito dell'accordo quadro Eni-Alma Mater Studiorum Università di Bologna, è stata eseguita una campagna di misura ondometrica e correntometrica con lo scopo di acquisire dati di dettaglio di onde e correnti presso il litorale della provincia di Ravenna per caratterizzare il regime idrodinamico e calibrare i modelli. In particolare si è provveduto ad installare una boa ondamentrica al largo di Marina di Ravenna su un fondale di -10 m come la Nausicaa. Dal confronto tra le serie temporali dei parametri ondosi con le misure della boa operativa Nausicaa si vede un'ottima corrispondenza delle altezze d'onda e dei periodi di picco, ma una differenza nelle direzioni di provenienza di 10°.

Relativamente alle correnti, in letteratura sono presenti studi teorici e numerici sul trasporto solido litoraneo, misurazioni con strumentazione sono sporadiche. Tra la documentazione



disponibile ai fini dello studio bibliografico dell'area, vi sono anche le seguenti mappe del trasporto. Nella prima mappa di sinistra, pubblicata da Idroser (1981), è riportata l'analisi del trasporto solido litoraneo tra il 1970 e il 1979. Lo studio condotto si riferiva ad un tratto di costa compreso tra Lido di Classe e Volano ma nella presente relazione si riporta un estratto dell'originale compreso tra Marina Romea e Porto Garibaldi, mentre la seconda mappa di destra riguarda il tratto di costiero tra foce Reno e foce Po di Goro (Progetto di Piano Costa del 1996) in cui è rappresentata la direzione e l'intensità del trasporto solido litoraneo.

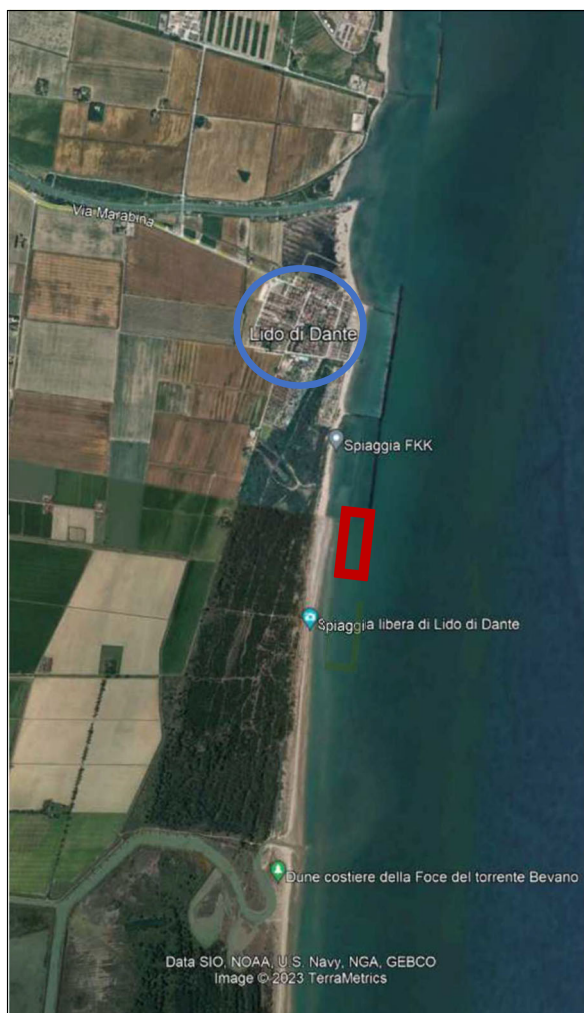
Relativamente allo studio idraulico specifico del paraggio di interesse, si rimanda alla modellazione numerica allegata alla Valutazione di Impatto Ambientale.





## 7 VINCOLI E ASPETTI PAESAGGISTICI

Dalla analisi dei vincoli svolta sul sito di intervento, tratto di mare antistante il litorale sud dell'abitato di Lido di Dante (vedi figura), emerge quanto segue:

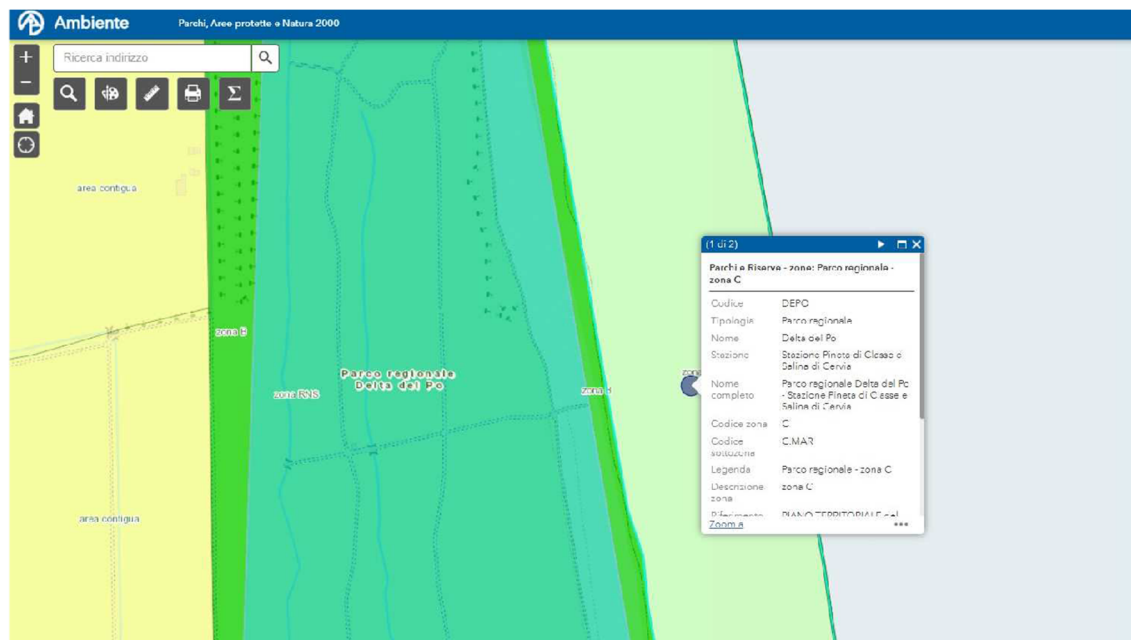


Il sito di intervento, specchio acqueo antistante la costa tra l'abitato di Lido di Dante e la foce del Torrente Bevano, ricade all'interno della Stazione di Parco Regionale del Delta del Po "Pineta di Classe e Saline di Cervia", *Atto di istituzione: L.R. 27-02/07/1988 - Approvata con DGR 489 del 23/04/2012.*

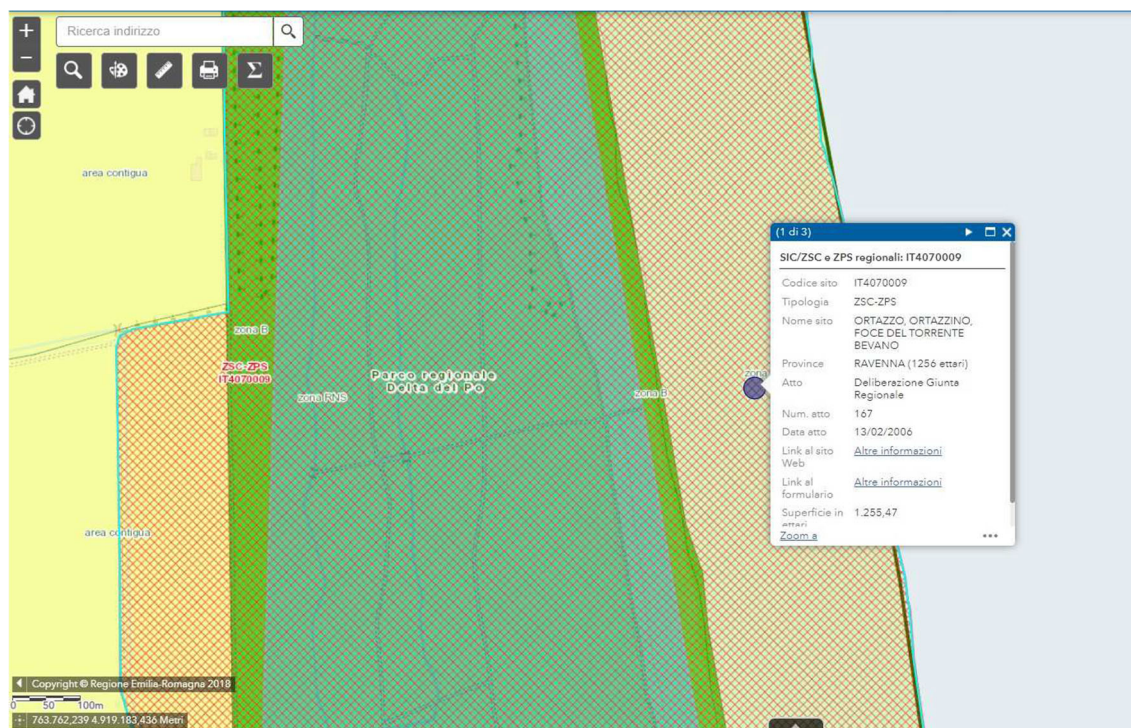
Dalla consultazione della Cartografia digitale della Regione Emilia-Romagna "AMBIENTE, Servizi Moka - Parchi, Aree protette e Natura 2000", l'intervento in progetto interessa la seguente Zona e Sottozona del Piano di Stazione del Parco:

- Codice ZONA: C

- Codice SOTTOZONA: C.MAR

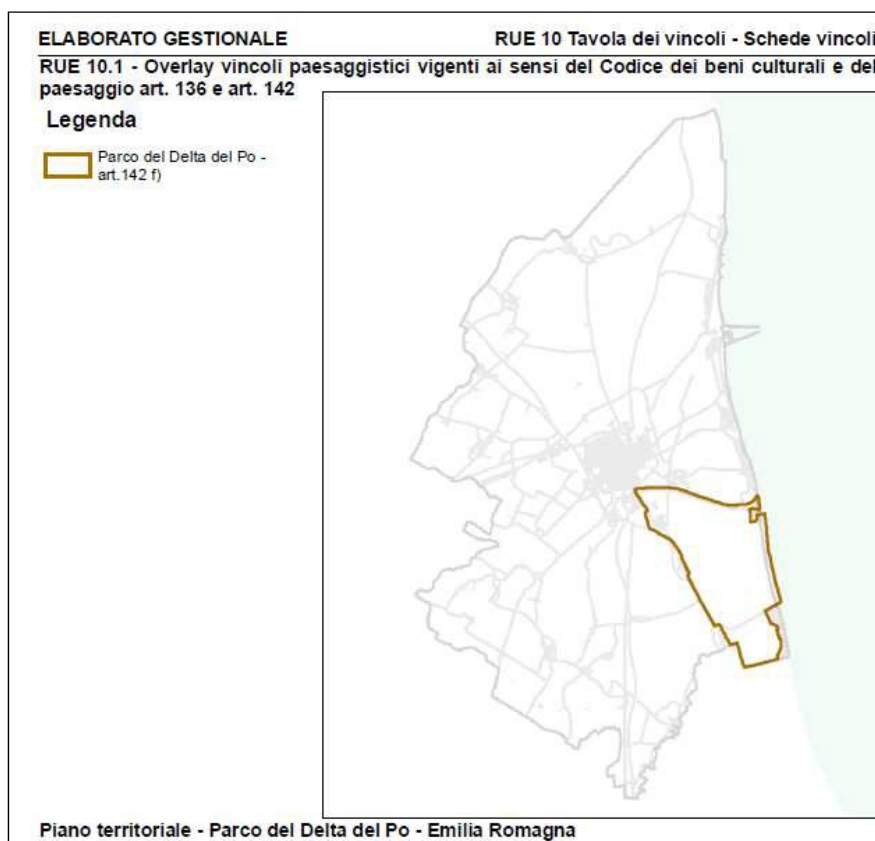


Lo specchio acqueo è inoltre è ricompreso all'interno del Sito Natura 2000 regionale, ZONA ZSC (Zone speciali di conservazione) e ZPS (Sito di Importanza Speciale) - IT4070009 \_ ORTAZZO, ORTAZZINO, FOCE DEL TORRENTE BEVANO;



L'area oggetto dei lavori ricade in Ambiti di tutela ambientale, come individuati dal Codice dei Beni culturali e del paesaggio D.Lgs. 42/2004:

- Art. 142: Lettera f) "I parchi e le riserve nazionali o regionali, nonché i territori di protezione esterna dei parchi". Denominazione: Stazione Pineta di Classe e Salina di Cervia, *Atto di istituzione: L.R. 27-02/07/1988 - Approvata con DGR 489 del 23/04/2012*



In merito, comunque, si attesta che l'esecuzione degli interventi lascia inalterate le componenti paesaggistiche naturali dei siti, trattandosi di opere di difesa e quindi di salvaguardia dei caratteri naturali propri dei luoghi. Infatti, l'intervento produrrà molteplici effetti positivi, riducendo il deficit cronico dei sedimenti in circolazione lungo la costa con ricadute positive sulle spiagge limitrofe e sui fondali antistanti e si concilia con le strategie di lungo termine che prevedono il riequilibrio del litorale per via naturale.

Verificato che:

l'intervento NECESSITA DI NULLA OSTA E VALUTAZIONE DI INCIDENZA AMBIENTALE DA PARTE DELL'ENTE GESTIONE DEI PARCHI E LA BIODIVERSITÀ DELTA DEL PO;

NON RICADE tra quelli soggetti ad AUTORIZZAZIONE PAESAGGISTICA ai sensi dell'art.146 del D.Lgs n. 42/2004 e s.m.i. , in quanto assimilabile alla fattispecie di cui al *Punto 15 dell'Allegato A del DPR. 31/2017 "Regolamento recante individuazione degli interventi esclusi dall'autorizzazione paesaggistica o sottoposti a procedura autorizzatoria semplificata."*

## **8 PIANO DI GESTIONE DEL MATERIALE**

Come accennato nei capitoli precedenti, per la realizzazione del presente intervento si utilizzeranno esclusivamente scapolame di dimensione 100/200 mm: dovrà essere di natura calcarea e essere costituiti da pietre dure e compatte, prive di cappellaccio, di non presentare piani di sfaldamento o incrinature, di non alterarsi a contatto con l'acqua di mare o per effetto del gelo e di avere un peso specifico non inferiore a 2500 kg/m<sup>3</sup>.

La realizzazione dei materassi avverrà in sito messo a disposizione dalla Stazione Appaltante in accordo con l'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centro Settentrionale, ove sarà possibile realizzare i vari materassi e poterli trasportare sino al sito di deposito, mediante mezzi marittimi adeguati, tale mezzo dovrà avere le caratteristiche idonee per navigare ed effettuare le lavorazioni in dette acque basse.

Non sono previsti sfridi o rifiuti da conferire in apposite discariche.

---

## 9 ESPROPRI

Siccome i lavori vengono svolti in mare, area demaniale marittima, prima della consegna dei lavori all'impresa esecutrice, determinata tramite appalto pubblico, dovrà essere richiesta, provvisoriamente, in consegna provvisoria lo specchio acqueo oggetto dell'intervento, compresa un'area perimetrale necessaria per la movimentazione dei mezzi marittimi impiegati nei lavori.

## ALLEGATO A: RELAZIONE MODELLAZIONE IDRAULICA

### INDICE

<b>1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>28</b>
<b>2 CONDIZIONI METEOMARINE PRESSO IL SITO OGGETTO DI STUDIO .....</b>	<b>29</b>
2.1 Livello medio mare e andamento delle maree .....	29
2.2 Venti .....	33
2.3 Onde .....	35
2.3.1 <i>Analisi degli eventi estremi dalla Boa Nausicaa</i> .....	40
2.4 Correnti e trasporto solido costiero .....	44
2.4.1 <i>Trasporto solido fluviale</i> .....	46
2.5 Innalzamento del livello marino (sea level rise) .....	47
<b>3 ALTERNATIVE PROGETTUALI E POSSIBILI SCENARI.....</b>	<b>50</b>
3.1 Alternativa 0 Nessun intervento .....	50
3.2 Alternativa strutture rigida coperta da materassi S1 .....	50
3.3 Alternativa flessibile in materassi S2 .....	52
<b>4 MODELLI NUMERICI .....</b>	<b>54</b>
<b>5 SETTAGGIO DEL MODELLO.....</b>	<b>56</b>
5.1 Topografia della spiaggia.....	56
5.2 Batimetria del fondale marino .....	56
5.3 Batimetria e mesh per Alternativa 1 .....	59
5.4 Batimetria e mesh per la Alternativa S2.....	61
5.5 Condizioni al contorno .....	63
<b>6 RISULTATI DEL MODELLO .....</b>	<b>65</b>
6.1 Alternativa S0-Stato di fatto .....	65
6.2 Alternativa S1 .....	69
6.2.1 <i>Modellazione dei campi d'onda</i> .....	69
6.3 Alternativa S2 .....	72

---

6.4	Evoluzione della linea di riva.....	75
6.4.1	<i>Alternativa S1</i> .....	76
6.4.2	<i>Alternativa S2</i> .....	77
<b>7</b>	<b>RISULTATI XBEACH</b> .....	<b>80</b>
7.1	Trasmissione ondosa con e senza reef .....	80
7.1.1	<i>Propagazione onda sul reef</i> .....	81
7.2	Campi di corrente .....	83
7.3	Risultati relativi al trasporto sedimentario .....	84
<b>8</b>	<b>CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE</b> .....	<b>87</b>
<b>9</b>	<b>RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b> .....	<b>90</b>



## 1 INTRODUZIONE

Le opere di difesa delle coste devono avere la capacità di ridurre l'energia del moto ondoso per mitigare gli effetti di erosione, di allagamento e di ingressione marina.

Le opere rigide parallele ai litorali per la protezione costiera hanno mostrato di avere una buona capacità nel ridurre l'altezza dell'onda e l'energia del moto ondoso, e nel proteggere una parte limitata dell'arenile, ma hanno parecchi effetti collaterali, che vanno dal deterioramento della qualità dell'acqua sottoflutto, ad una erosione localizzata in prossimità delle testate, ed a effetti di erosione localizzata nei tratti di coste adiacenti.

Al fine di determinare quale sia l'impatto fisico dell'opera NatuReef da realizzare, già descritta nella Relazione tecnica del PFTE (sezione 09\_2023\_6.5\_059\_PFTE\_RT\_R0), sono presentati i risultati di una serie di modellazioni idromorfodinamiche per la stima delle forzanti e carichi di progetto, utili alla progettazione, e la simulazione di correnti, onde, trasporto solido che in ambito marittimo consente anche la determinazione della valutazione del mutamento della linea di costa al variare del tempo, oltre che a consentire il trasferimento delle onde da largo a riva considerando gli effetti di frangenza, rifrazione e diffrazione.

Oltre a fornire indicazioni sulla capacità dell'opera nel limitare l'ingressione marina e l'erosione costiera nell'area, le simulazioni proposte sono state elaborate per vedere come l'opera modificherà il campo idrodinamico e la propagazione dell'onda e quali potrebbero essere gli effetti sul litorale.

Viene presentata la schematizzazione dell'opera NatuReef nel modello, la stima del trasporto longitudinale, con particolare focus sulla direzione e la variabilità annuale, per stabilire una possibile variabilità climatica, la selezione delle condizioni simulate, i risultati dei modelli e le conclusioni.

Per questo studio si è utilizzata la suite di modellazione MIKE21 ed il codice Open Sorce XBeach.

## 2 CONDIZIONI METEOMARINE PRESSO IL SITO OGGETTO DI STUDIO

Il monitoraggio sistematico delle forzanti idrodinamiche in ambito marino (venti, onde, maree e correnti) è funzionale non solo alla difesa costiera, ma anche ad altri settori quali navigazione, pesca, sicurezza ambientale, turismo, energia rinnovabile, solo per fare alcuni esempi. I fattori meteo marini (o idrodinamici) sono:

**Venti**, che oltre a generare le onde trasferendo alla superficie del mare parte della propria energia, sono artefici della movimentazione di ingenti volumi di sedimento sulla spiaggia emersa e sulla duna.

**Onde**, che rappresentano le forzanti più significative per il fattore erosione costiera. Esse determinano infatti un grande trasferimento di energia sotto costa che si traduce in movimentazione di sedimento.

**Livello del mare**, che determina un innalzamento del livello di frangimento delle onde e fenomeni di allagamento costiero.

**Correnti costiere**, litoranee (*long-shore*) e trasversali (*cross-shore*), che contribuiscono trasporto solido costiero, inteso come trasporto longitudinale, i cui effetti sono valutabili sulla lunga durata, e trasporto trasversale, legato agli eventi di mareggiate e i cui effetti sono sul breve termine.

### 2.1 Livello medio mare e andamento delle maree

Le variazioni del livello del mare sono dovute a diversi fattori. Principalmente si hanno variazioni dovute all'attrazione gravitazionale degli astri, detta anche marea astronomica, e variazioni dovute ad effetti complessi, detta marea meteorologica. Le variazioni del livello del mare sono quindi la somma di questi due principali fattori. Mentre la componente astronomica è costante e ampiamente prevedibile perché legata al movimento periodico degli astri, la marea meteorologica è una componente aleatoria: si conosce l'effetto delle perturbazioni meteorologiche sul livello dell'acqua, ma non è possibile prevedere la forzante che causa tale perturbazione.

Per l'analisi delle variazioni del livello di marea nel paraggio esaminato si è fatto riferimento alla stazione mareografica più vicina che risulta essere quella di Ravenna, Porto Corsini-Marina di Ravenna (Fig. 1), facente parte della Rete Mareografica Nazionale (RMN), da cui è possibile accedere ai dati (<https://www.mareografico.it/>; Fig. 2).

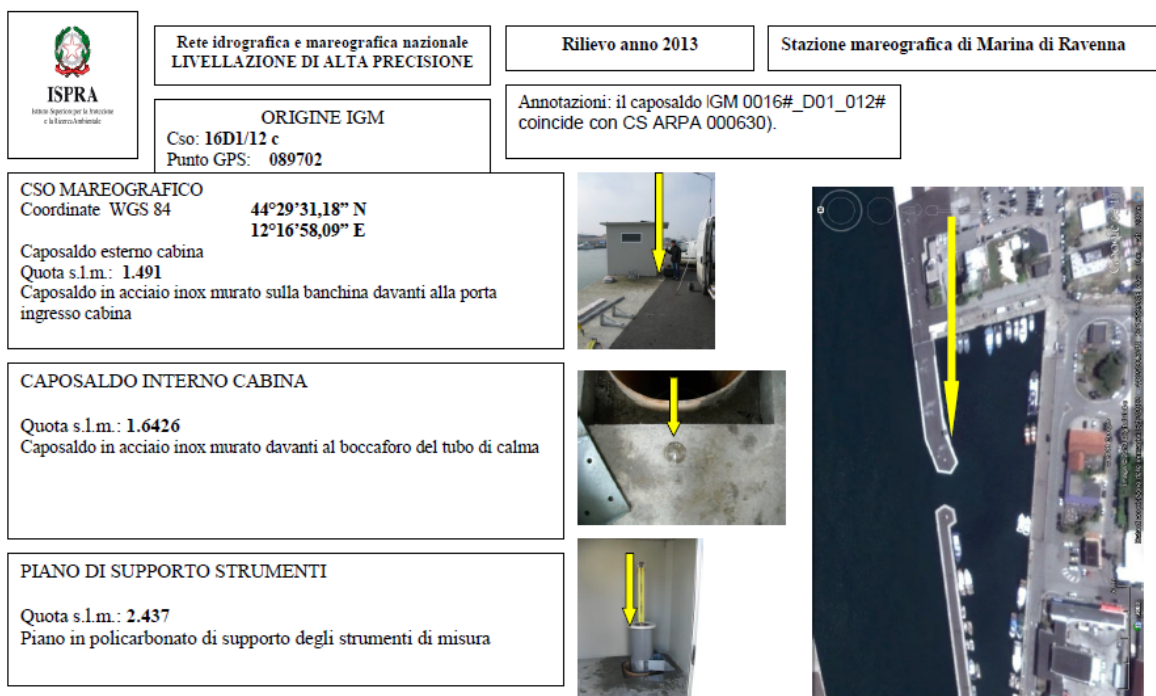


Fig. 1 Monografia del mareografo di Ravenna.

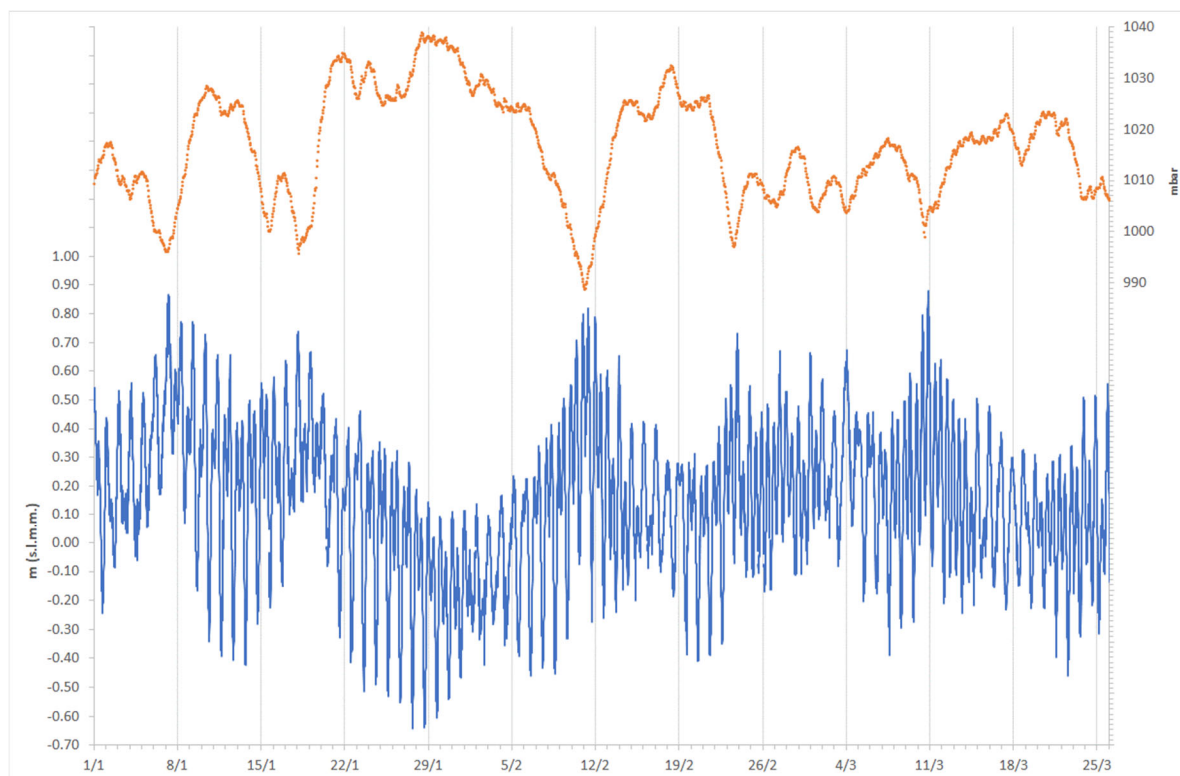


Fig. 2 Esempio di serie temporale di dati misurati dal mareografo di Ravenna dal 01/01/2024 al 26/03/2024 (in blu il livello dell'acqua,

in arancione la pressione atmosferica).

Oltre al mareografo di Ravenna, ARPAE mette a disposizione tre stazioni mareografiche posizionate a Porto Garibaldi, Cervia e Cattolica, che rilevano il livello del mare (Fig. 3).

A partire dal 1° gennaio 2016 il mareografo di Porto Garibaldi è stato allineato ai caposaldi della rete IGM2005 ed è stato applicato un offset di +12,31 cm. A partire dal 1° gennaio 2024, i tre mareografi di Arpae sono allineati alle misure RGC2023 (rete geodetica costiera aggiornata al 2023). A partire da questa data, ai dati rilevati dal mareografo di Porto Garibaldi è stato applicato un offset di – 8,1 cm. Dalla serie storica registrata dalla stazione mareografica di Ravenna sono stati estrapolati i massimi annuali, sia per la bassa che per la alta marea (Tab. 1).

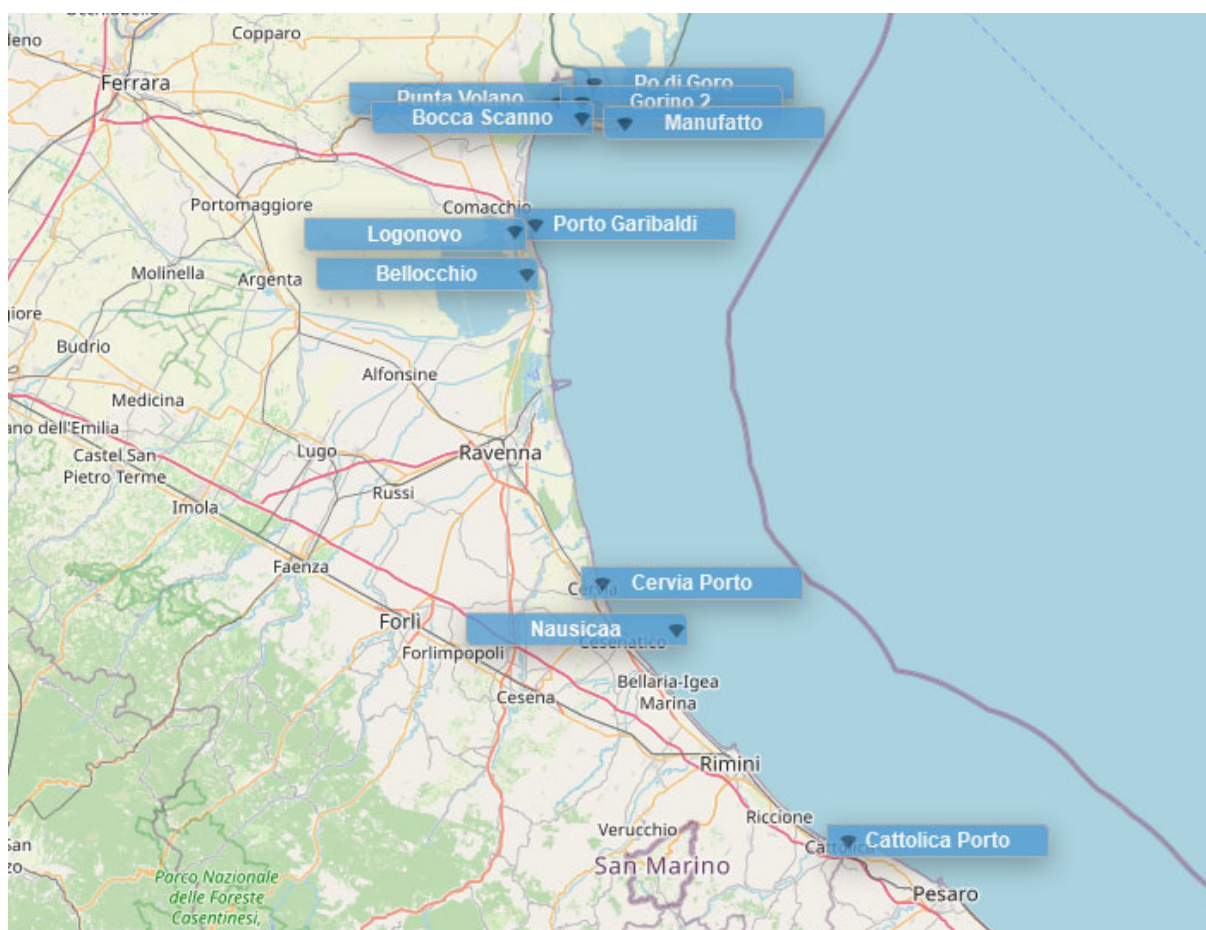


Fig. 3 Rete di monitoraggio meteo-marina di ARPAE.

A tali serie di dati sono state associate le leggi di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) di Gumbel al fine di determinare i livelli di marea da associare ad assegnati tempi di ritorno  $T_R$ . Sono stati quindi individuati, per i diversi periodi di ritorno  $T_R$ , i livelli di marea (Tab. 2).

Tab. 1 Massimi annuali di alta e bassa marea registrati dalla stazione mareografica di Ravenna.

Anni	Alta Marea (m)	Bassa Marea (m)
1987	0.87	0.73
1988	0.61	0.79
1989	0.65	0.71
1993	0.87	0.68
1997	0.73	0.85
1998	0.76	0.63
1999	0.99	0.68
2000	0.83	0.75
2001	0.88	0.65
2002	0.95	0.79
2003	0.85	0.69
2004	0.91	0.74
2005	0.80	0.85
2006	0.70	0.69
2007	0.71	0.78

Tab. 2 Valori di alta e bassa marea per diversi periodi di ritorno  $T_R$  calcolati con la distribuzione di Gumbel.

$T_R$ (anni)	Alta Marea (m)	Bassa Marea (m)
1	0.68	-0.66
2	0.79	-0.72
5	0.89	-0.78
10	0.95	-0.82
15	0.99	-0.84
20	1.02	-0.86
25	1.03	-0.87
30	1.05	-0.88
50	1.10	-0.91
100	1.16	-0.95
150	1.19	-0.97
200	1.22	-0.98

La stima dei valori estremi di livello legati agli eventi di *surge* (marea meteorologica) è stata effettuata considerando la probabilità limite congiunta degli  $r$  eventi annuali più elevati sia della serie temporale dei livelli osservati che di quella dei residui, ottenuta rimuovendo la marea astronomica tramite analisi armonica effettuata. La selezione è stata realizzata considerando indipendenti valori estremi separati da almeno 78 ore, in modo da includere in un unico evento le oscillazioni di livello dovute alle sesse che possono accompagnare tali fenomeni di *surge*. La distribuzione statistica considerata è stata la Generalized Extreme Value, GEV (Jenkinson 1955):

$$F(x; \mu, \sigma, k) = \exp \left\{ - \left[ 1 - k \left( \frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{1/k} \right\}$$

con  $\sigma > 0$  e valori di  $x$  tali per cui  $1 - k(x - \mu)/\sigma > 0$ .

I risultati sono mostrati nella *Tab. 3*, dove sono riportati i valori di livello di surge per assegnato tempo di ritorno  $T_R$ . Tali valori sono stati calcolati prendendo in considerazione un numero di eventi estremi  $r$  variabile da 3 a 7 per ognuno dei 20 anni di dati campionati ad alta frequenza.

*Tab. 3 Stima dei livelli marini di surge per assegnato tempo di ritorno  $T_R$  in prossimità di Porto Corsini considerando un numero di eventi estremi  $r$  variabile da 3 a 7.*

	$r = 3$	$r = 4$	$r = 5$	$r = 6$	$r = 7$
$T_R$ (anni)	Livello di surge (m)				
<b>2</b>	0.84	0.84	0.85	0.85	0.86
<b>5</b>	0.93	0.95	0.96	0.97	0.99
<b>10</b>	0.99	1.01	1.03	1.05	1.07
<b>20</b>	1.05	1.08	1.10	1.12	1.15
<b>50</b>	1.13	1.16	1.19	1.21	1.25
<b>100</b>	1.19	1.23	1.26	1.28	1.32

## 2.2 Venti

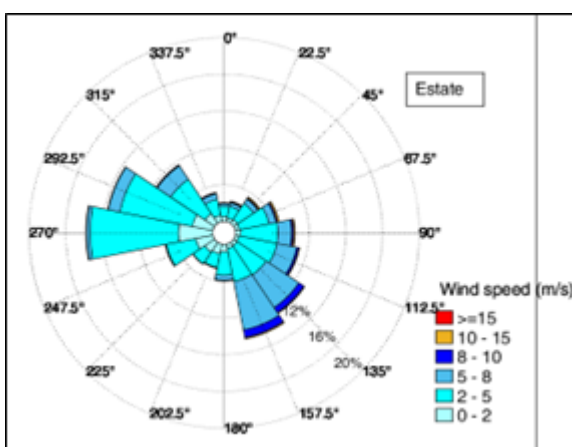
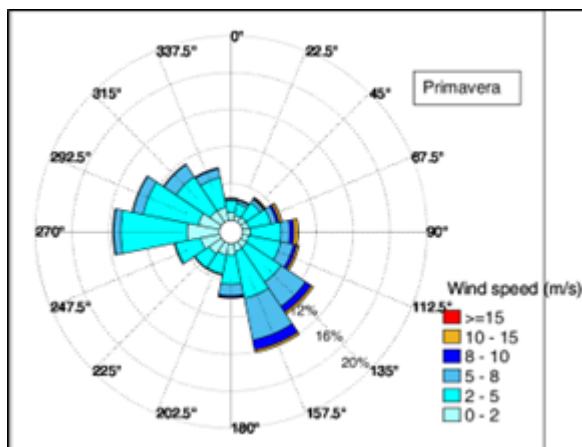
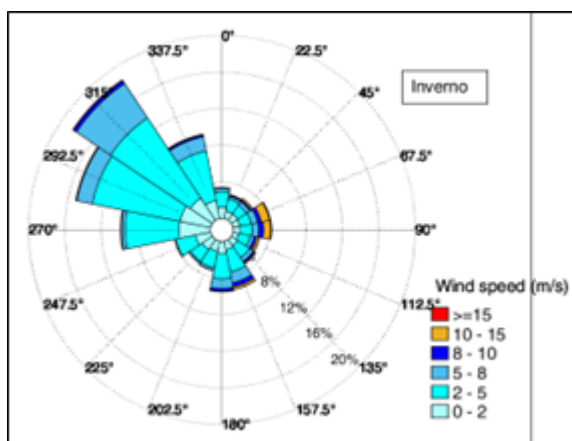
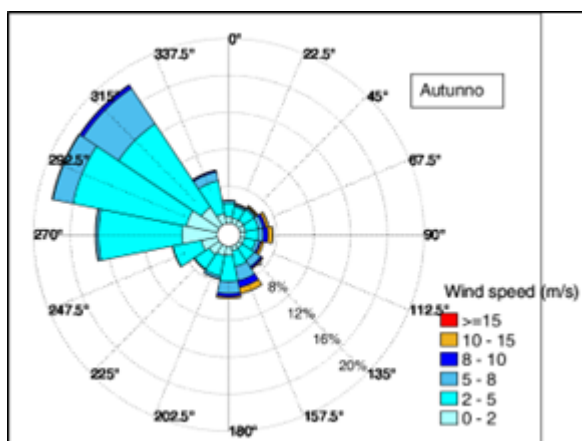
I dati anemometrici della stazione meteo nel Porto di Cesenatico alle coordinate 44.206451° lat 12.401319° lon sono stati utilizzati per l'analisi del regime dei venti. La stazione ha un'altissima percentuale di dati disponibili, con soltanto lo 0.748% di dati mancanti su 12 anni di misurazioni, periodo 2009-2020 (*Fig. 4 e Tab. 4*).

I dati sono stati scaricati sul sito <https://simc.arpae.it/dext3r/> e hanno frequenza di campionamento di 30'. I parametri scaricati ed analizzati sono stati la velocità media e la direzione media del vento su 1 ora a 10 m di altezza (quota di riferimento).



Tab. 4 Frequenze di accadimento del vento (intensità e direzione) a Cesenatico nel periodo 2000-2020.

D (°N)	Vento (m/s)						Totale
	<2	2-5	5-8	8-10	10-15	>15	
0	1,14	1,96	0,43	0,08	0,05	0,01	3,68
30	0,84	1,88	0,46	0,11	0,11	0,03	3,43
60	0,90	2,68	0,77	0,29	0,45	0,06	5,16
90	0,88	3,34	1,21	0,54	0,62	0,07	6,67
120	0,75	3,58	1,85	0,37	0,25	0,02	6,82
150	0,95	4,38	4,21	1,00	0,40	0,01	10,95
180	1,43	3,71	1,58	0,32	0,15	0,01	7,20
210	1,67	2,53	0,20	0,02	0,00	0,00	4,43
240	2,23	2,94	0,13	0,01	0,00	0,00	5,31
270	4,64	10,20	0,58	0,09	0,01	0,00	15,51
300	3,48	12,72	3,55	0,19	0,03	0,00	19,97
330	2,14	6,30	2,10	0,24	0,08	0,00	10,87
<b>Totale</b>	<b>21,04</b>	<b>56,22</b>	<b>17,09</b>	<b>3,26</b>	<b>2,18</b>	<b>0,21</b>	<b>100</b>



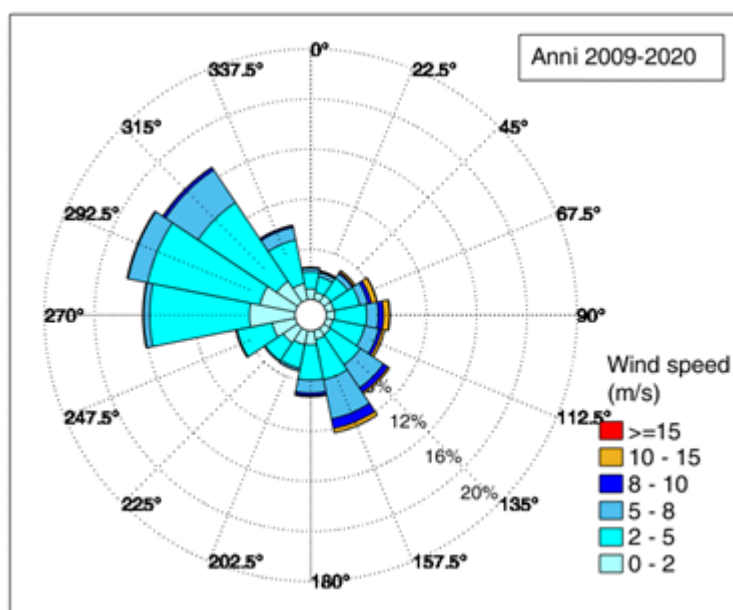


Fig. 4 Rosa dei venti presso Cesenatico

## 2.3 Onde

Il clima del moto ondoso al largo è la base per definire il regime idraulico sottocosta e conseguentemente il trasporto litoraneo: le condizioni medie sono responsabili dell'evoluzione dei litorali a lungo termine, attraverso il regime delle correnti lungo riva e il conseguente trasporto dei sedimenti, mentre la conoscenza delle condizioni estreme sono necessarie per il corretto dimensionamento degli interventi lungo costa, per verificare i fenomeni erosivi e le variazioni lungo il profilo della spiaggia.

Inoltre, nel periodo 16 dicembre 2020-16 marzo 2021, nell'ambito dell'accordo quadro Eni-Alma Mater Studiorum Università di Bologna, è stata eseguita una campagna di misura ondometrica e correntometrica con lo scopo di acquisire dati di dettaglio di onde e correnti presso il litorale della provincia di Ravenna per caratterizzare il regime idrodinamico e calibrare i modelli. In particolare, si è provveduto ad installare una boa ondamentrica al largo di Marina di Ravenna su un fondale di -10 m, la boa Nausicaa. Dal confronto tra le serie temporali dei parametri ondosi con le misure della boa operativa Nausicaa si vede un'ottima corrispondenza delle altezze d'onda e dei periodi di picco, ma una differenza nelle direzioni di provenienza di 10°.

Lo studio delle condizioni ondose riguarda sia le condizioni relative al regime medio annuo sia quelle relative agli eventi estremi che possono colpire la costa.



Il clima del moto ondoso al largo costituisce la base per definire il regime idraulico sotto costa ed il trasporto litoraneo: le condizioni medie sono responsabili dell'evoluzione dei litorali a lungo termine, attraverso il regime delle correnti lungo riva e il conseguente trasporto dei sedimenti, mentre la conoscenza delle condizioni estreme sono necessarie per il corretto dimensionamento degli interventi lungo costa, per verificare la stabilità delle opere marittime di protezione della costa.

In ragione alla disposizione geografica della costa, gli stati di mare che influenzano la dinamica del litorale emiliano-romagnolo sono quelli che provengono dal I e dal II quadrante (rispettivamente provenienti da  $0^\circ - 90^\circ\text{N}$  e  $90^\circ - 180^\circ\text{N}$ ) mentre sono trascurabili quelli provenienti dal III e IV.

Tra le varie fonti informative di dati disponibili per conoscere il clima che interessa la zona oggetto di studio si è deciso di utilizzare i dati registrati dalla Boa Ondametrica Nausicaa che si trova al largo della costa di Cesenatico.

La disponibilità di dati ondametrici in corrispondenza delle coste della Regione Emilia-Romagna è risultata, in passato, piuttosto varia, sia come tipologia delle stazioni di misura, sia come estensione temporale delle serie storiche. Infatti, il bacino centro-settentrionale del mare Adriatico è stato oggetto di studi e campagne di misura oceanografiche da parte di un gran numero di istituti, enti, società sia per finalità scientifiche e di ricerca, sia per l'organizzazione di attività produttive in campo marittimo. Questa condizione ha portato all'installazione di molti strumenti e, conseguentemente, alla produzione di un gran numero di dati di varia natura: meteorologici, ondametrici, correntometrici, mareografici, chimico-fisici, ecc. Di contro, davanti alle coste della Regione Emilia-Romagna, per molti anni non è stata presente nessuna stazione di misura del moto ondoso.

La stazione di rilevamento Nausicaa<sup>1</sup> è stata installata dall'Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente "ARPA" dell'Emilia - Romagna il 23 maggio 2007. È collocata al largo della costa di Cesenatico a circa 8 km dalla banchina della darsena su un fondale di circa 10 m di profondità in una zona interdetta alla navigazione, all'attracco e alla pesca. Le coordinate di posa (dal 7 maggio 2009) sono:  $44.2155^\circ\text{N}$   $12.4766^\circ\text{E}$  – WGS84.

La stazione ondametrica Nausicaa è equipaggiata con un sistema direzionale Datawell Directional WaveRider MkIII 70 in grado di rilevare oscillazioni paria a  $\pm 20$  m con periodo da 1,60 a 30 secondi e con una risoluzione di  $1.50^\circ$  nell'angolo di provenienza dell'onda.

I dati sono acquisiti dal centro ricevente, situato presso la struttura oceanografica Daphne, ogni 30 minuti il quale li archivia su un computer locale collegato alla banca dati centrale della rete di monitoraggio meteo – idrografico (RIRER) gestita dal Servizio IdroMeteorologico (ARPA - SIMC). In questa sede i dati sono controllati, archiviati e distribuiti in tempo reale attraverso la homepage di ARPA – SIMC (Servizio IdroMeteoClima) e al sistema *Dexter*.

In alcuni periodi la misura dei dati non è avvenuta a causa di malfunzionamenti e operazioni di manutenzione delle strumentazioni, ma la disponibilità dei dati è risultata infatti piuttosto buona, tenendo conto dei periodi di inattività della boa. Infatti, i periodi non coperti da misure risultano concentrati in alcuni e ben distinti momenti.

Nella *Fig. 5* viene fornita la percentuale dei dati disponibili nei singoli anni di misura e sul totale del periodo. Complessivamente i dati rilevati hanno raggiunto l'86.1% dei dati teoricamente attesi, mentre analizzando i singoli anni, o porzioni di essi, si nota che tutti gli anni a disposizione mostrano una percentuale di disponibilità piuttosto alta con, l'eccezione del 2014 e il 2017 durante i quali i dati mancanti hanno raggiunto rispettivamente la soglia del 42,5% e del 30,4% dei valori attesi.

### **Clima ondoso annuale dalla Boa Nausicaa**

La analisi dei dati è stata effettuata per il periodo 2007 – 2020, negli anni 2021-2022 la continuità e la qualità dei dati è stata molto scarsa. Il 13 ottobre 2022 la boa è stata sostituita con una nuova boa chiamata Nausicaa 2. La nuova boa è il modello DWR-4 ACM della ditta olandese Datawell e misura in tempo reale le caratteristiche del moto ondoso, della corrente superficiale e della temperatura dell'acqua e dell'aria. Ha un diametro di 0,7 m con scafo in Cunifer10 (che riduce la formazione di incrostazioni grazie alla sua lega di rame e nichel), è equipaggiata con doppia alimentazione (batterie e pannelli solari), doppio sistema di trasmissione dati (radio e GPRS) e antenna CAT4 per la misura della temperatura dell'aria a 2 metri, oltre ad avere i sensori integrati nello scafo che permettono il rilevamento delle caratteristiche dell'onda, delle correnti superficiali e della temperatura del mare.

<sup>1</sup> Il sistema è stato acquisito nel 2007 dalla Regione Emilia – Romagna nell'ambito del progetto Beachmed – E, sottoprogetto Nausicaa, e mantenuto anche grazie al finanziamento del progetto europeo MICORE Morphological Impacts and Coastal Risk Introduced by Extrem Storm Events. (FP7 – ENV – 2007 – 1 cooperation, Grant agreement no.:202798).

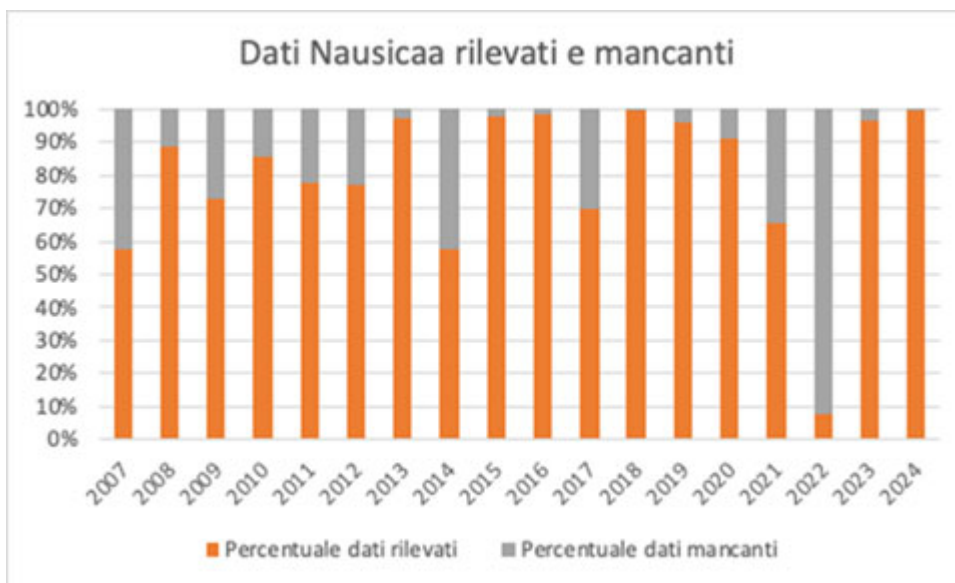


Fig. 5 Disponibilità dei dati misurati da Boa Nausicaa nel periodo 2007-2022

La nuova stazione di rilevamento è stata finanziata grazie ai fondi del progetto europeo strategico AdriaClim del Programma di cooperazione transfrontaliera Italia-Croazia che ha come obiettivo l'aggiornamento e lo sviluppo dei piani di adattamento regionali agli eventi estremi e ai futuri scenari climatici nell'area adriatica. Oltre al monitoraggio operativo in tempo reale delle condizioni del mare, utile alla prevenzione del rischio marino-costiero, Nausicaa 2 dovrebbe essere in continuità alla boa precedente per il popolamento di un data base regionale finalizzato all'analisi climatica dei parametri rilevati. In realtà in questo studio ci siamo limitati ai dati di Nausicaa.

Dopo un controllo preliminare di qualità dei dati, è stato possibile elaborare la rosa del clima ondoso (Fig. 6), cioè la rosa di frequenza degli eventi distribuiti per classi di intensità e di direzione.

Il criterio di elaborazione adottato è stato quello di considerare "calma" le onde con altezza inferiore a 0.10 m e suddividere le altre all'interno di 10 classi, da 0.10 m a 4.00 m. I settori angolari considerati per la direzione sono 36 rispettivamente ampi 10°. Nelle tabelle seguenti, sono riportate le analisi sui dati registrati dalla boa e suddivisi per frequenze di accadimento in classi prestabilite.

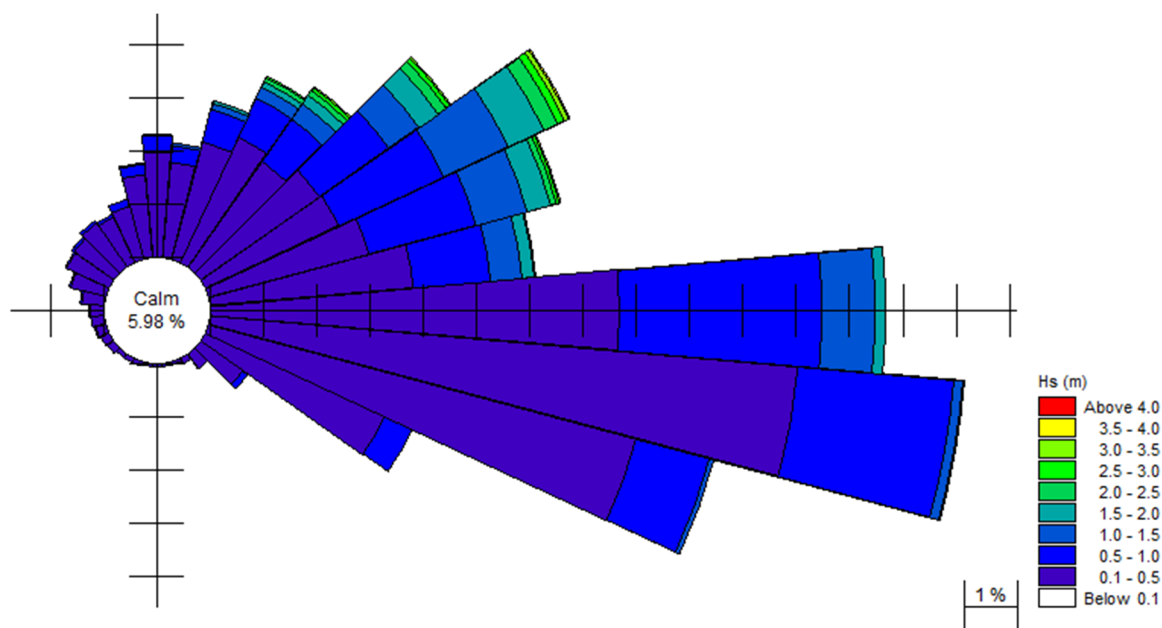


Fig. 6 Diagramma di rosa delle onde dei dati Nausicaa 2007-2020.

Più in dettaglio si è osservato che:

- il settore caratterizzato da condizioni di moto ondoso dominante, ossia il settore caratterizzato dalla presenza di altezze d'onda massime superiori a 3 m, è quello definito nella seguente Tab. 5;
- la frequenza di eventi con altezza significativa maggiore di 3.0 m è pari a 0.21%;
- gli stati di mare regnanti, ossia gli stati di mare caratterizzati da frequenze di apparizione massime, si presentano nei settori di direzioni comprese tra 90 - 110°N. Le condizioni ondose che provengono da questo settore hanno una frequenza media pari al 29.84%;
- il settore prevalente, ossia quello caratterizzato da altezze e frequenze di accadimento massime, è quello di 60 - 70°N con frequenza media pari a 8.18%;
- la condizione di calma, definita dalla classificazione adottata in fase di elaborazione della rosa delle onde, si ha per eventi ondosi caratterizzati da altezze d'onda inferiori a 0.10 m. La frequenza di apparizione del fenomeno è pari a 5.98%.

Tab. 5 Eventi ondosi dominanti: confronto delle statistiche per il periodo 2007-2017.

	Periodo 2007-2017
30-40°N	0.02%
40- 50 °N	0.03%
50 - 60°N	0.06%
60 - 70°N	0.09%
70 - 80°N	0.00%
110 - 120°N	0.00%
<b>Totale</b>	<b>0.21%</b>

### 2.3.1 Analisi degli eventi estremi dalla Boa Nausicaa

La mareggiata può essere definita come “una successione di stati di mare durante i quali  $H_s(t)$  supera una soglia critica  $h_{crit}$  e non scende al di sotto di tale soglia per durate di tempo superiori a un valore  $\Delta t_{crit}$  prefissato” (Boccotti 1997). I valori dei parametri che concorrono nella definizione del parametro non possono essere prefissati in modo assoluto, ma devono riflettere il preciso contesto climatico ed ambientale di applicazione.

Secondo Boccotti (1997) il valore  $\Delta t_{crit}$  può essere fissato pari a 6 ore e la soglia critica  $h_{crit}$ , nel Mediterraneo, è pari a 2 volte l'altezza media dell'onda. Nell'Atlante delle onde nei mari italiani (Corsini et al. 2004) si considera come mareggiata la successione temporale degli stati di mare caratterizzati da: persistenza dell'altezza d'onda sopra la soglia di 1 m maggiore di 12 ore consecutive, attenuazione dell'agitazione ondosa sotto la soglia di 1 m per meno di 6 ore consecutive, appartenenza della direzione di provenienza ad un determinato settore angolare ( $\pm 30^\circ$  rispetto alla direzione iniziale ovvero rotazione della direzione media della mareggiata inferiore a  $60^\circ$ ), intervallo temporale tra due picchi indipendenti superiore a 48 ore (tale scelta è derivata sia dall'analisi della funzione di autocorrelazione dei dati di altezza d'onda sia dalle indicazioni sulla durata media delle tempeste nei mari italiani).

Nell'ambito del Catalogo delle mareggiate e degli impatti associati sulla costa prodotto all'interno del progetto MICORE (Perini et al. 2011) vengono identificate come mareggiate gli eventi in cui l'altezza d'onda significativa supera per almeno 6 ore il valore minimo di 1.5 m. Due eventi sono considerati separati se  $H_s$  rimane al di sotto del valore soglia di 1.5 m per non meno di 3 ore consecutive.

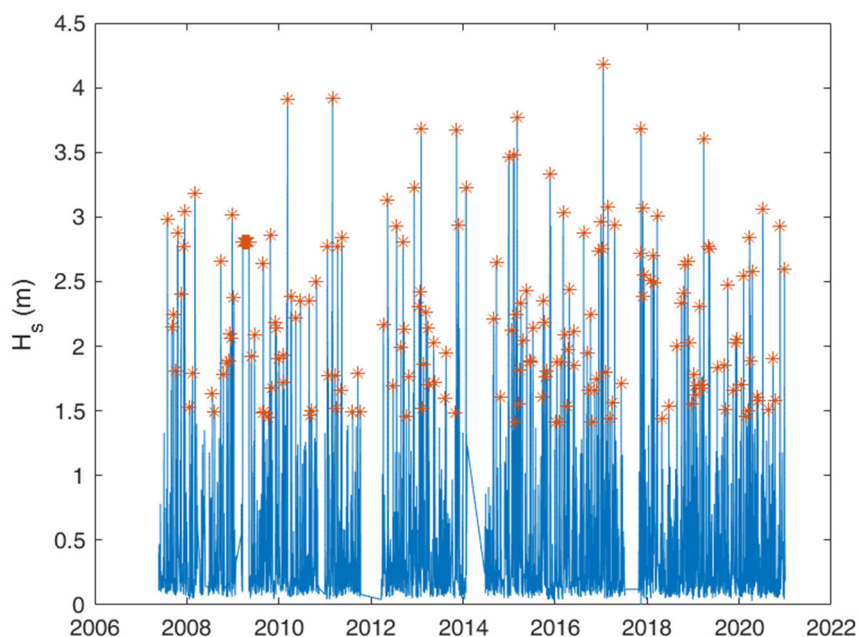
Per eseguire l'analisi statistica delle altezze d'onda risulta necessario selezionare preliminarmente dei campioni di dati che rispondano al doppio requisito di risultare tra loro indipendenti ed omogenei. Per quanto riguarda l'indipendenza statistica si utilizza il metodo POT (*Peaks Over Threshold*), comunemente anche chiamato “della serie di durata parziale sopra soglia”, che consiste nel prendere in esame il solo valore massimo di altezza d'onda (valore di picco) che si verifica nell'ambito di una singola mareggiata. L'individuazione di ciascuna mareggiata nell'ambito della serie storica viene effettuata introducendo una soglia di altezza d'onda e considerando che il singolo evento (mareggiata) abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa supera per la prima volta il valore della soglia prestabilito. Conseguentemente si ipotizza che l'evento termini quando l'altezza d'onda significativa assume per la prima volta un valore inferiore a quello di soglia oppure quando si verifica un forte scarto della direzione del moto ondoso.

In questo studio, per l'individuazione degli eventi ondosi, è stata definita una soglia critica di 2 volte l'onda media, cioè circa 1 m. Per poter essere considerato “mareggiata”, l'evento ondos

deve presentare una persistenza minima, sopra la soglia indicata, pari ad almeno 6 ore consecutive. Due eventi sono considerati separati se  $H_s$  si mantiene al di sotto del valore soglia per più di 3 ore successive. Si considera che l'evento abbia inizio quando l'altezza d'onda significativa supera la soglia per almeno 6 ore. L'evento termina quando l'altezza d'onda scende sotto la soglia prefissata per almeno 3 ore consecutive. In Fig. 7, l'individuazione dei picchi delle mareggiate individuate, come dal metodo descritto.

I picchi di mareggiate selezionati dal clima registrato alla boa Nausicaa nel periodo 2007-2020 sono stati soggetti ad un'elaborazione statistica al fine di ricavare, mediante una regolarizzazione degli eventi estremi secondo note funzioni probabilistiche, le caratteristiche del moto ondoso da associare ad assegnati tempi di ritorno  $T_R$  (o probabilità di occorrenza).

Fig. 7 Identificazione delle mareggiate.



Per valutare la migliore distribuzione di probabilità, abbiamo confrontato le 3 distribuzioni più comunemente usate (lognormali, Gumbel e Weibull) e scelto la distribuzione di Gumbel come quella con maggiore coefficiente di correlazione. La Fig. 8 rappresenta sull'asse delle ascisse la altezza dell'onda  $H$  e sull'asse delle ordinate il parametro di Gumbel ridotto  $Z = -\ln(-\ln(F))$ , dove  $F$  è la probabilità di non superamento. Le leggi adottate di distribuzione di probabilità cumulata di non superamento (funzione di ripartizione) sono quelle di Gumbel:

$$P_{x_{max}}(x) = 1 - \exp \left[ -e^{\frac{x-b}{a}} \right]$$



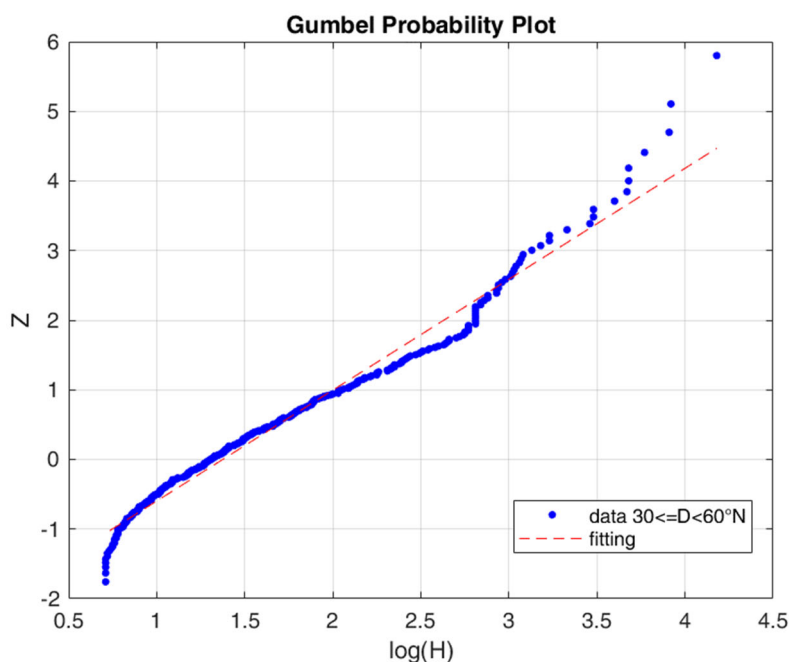


Fig. 8 Distribuzione statistica dei valori estremi di  $H_s$  per il settore direzionale 30°-60°N.

Tenendo conto che la probabilità cumulata di non superamento è legata al tempo di ritorno dell'evento dalla relazione:

$$T_R(X \leq x) = \frac{1}{1 - P(X \leq x)}$$

si sono stimate le altezze d'onda relative ai diversi tempi di ritorno, per gli eventi di Scirocco e di Bora. In seguito a test statistici si è visto che la distribuzione che meglio si adatta ai dati è la distribuzione di Gumbel e da tali valori sono state estratte le condizioni ordinarie ed estreme.

Per identificare il periodo di picco delle altezze d'onda estreme identificate, viene interpolato dai dati disponibili il rapporto tra periodo di picco e l'altezza d'onda significativa utilizzando le relazioni empiriche per tutte le direzioni (0°-360°) e per le direzioni più significative del clima ondoso (0°-30°, 30°-60°, 60°-90°, 90°-120° e 120°-150°) come la seguente:

$$T_p = a + b \cdot H_s^c$$

Le caratteristiche dei valori attesi delle onde per i tempi di ritorno  $T_R$  uguali a 1, 2, 5, 10, 25, 50, 70, 100, 150, 200, 500 e 1000 anni sono riportati nella *Tab. 6* (omnidirezione) e in *Tab. 7* (per i diversi settori direzionali).

Tab. 6 Caratteristiche delle onde associate a periodi di ritorno: mutlidirezionale (0-360°N).

$T_R$ (anni)	$0^\circ \leq D < 360^\circ$	
	$H_s$	$T_p$
	m	s
1	3.37	8.21
2	3.76	8.39
5	4.28	8.61
10	4.66	8.76
25	5.18	8.95
50	5.56	9.08
70	5.75	9.14
100	5.95	9.21
150	6.18	9.28
200	6.34	9.33
500	6.85	9.47
1000	7.24	9.58
Coeff corr	0.9779	

Tab. 7 Caratteristiche delle onde associate a periodi di ritorno per settori direzionali di ampiezza 30°.

$T_R$ (anni)	$0^\circ \leq D < 30^\circ$		$30^\circ \leq D < 60^\circ$		$60^\circ \leq D < 90^\circ$		$90^\circ \leq D < 120^\circ$		$120^\circ \leq D < 150^\circ$	
	$H_s$	$T_p$	$H_s$	$T_p$	$H_s$	$T_p$	$H_s$	$T_p$	$H_s$	$T_p$
	m	s	m	s	m	s	m	s	m	s
1	2.40	6.37	3.00	8.37	0.95	3.73	1.76	7.72	3.30	8.54
2	2.75	6.63	3.32	8.57	1.06	3.81	1.96	8.01	3.67	8.89
5	3.19	6.92	3.74	8.81	1.20	3.89	2.23	8.35	4.14	9.31
10	3.53	7.13	4.05	8.98	1.31	3.95	2.43	8.60	4.50	9.61
25	3.97	7.37	4.46	9.18	1.45	4.02	2.69	8.90	4.98	9.98
50	4.31	7.55	4.77	9.33	1.56	4.07	2.89	9.12	5.34	10.25
70	4.47	7.63	4.92	9.40	1.61	4.09	2.99	9.22	5.51	10.37
100	4.64	7.72	5.08	9.47	1.67	4.11	3.09	9.33	5.69	10.50
150	4.84	7.81	5.27	9.55	1.73	4.14	3.21	9.44	5.90	10.65
200	4.98	7.87	5.40	9.60	1.69	4.12	3.29	9.53	6.05	10.75
500	5.42	8.07	5.81	9.77	1.82	4.18	3.55	9.78	6.52	11.06
1000	5.76	8.21	6.12	9.89	1.92	4.22	3.75	9.96	6.88	11.29
Coeff corr	0.9613		0.9712		0.9895		0.9910		0.9608	

## 2.4 Correnti e trasporto solido costiero

La circolazione litoranea in direzione ortogonale e parallela alla costa riveste, come già accennato, un ruolo di fondamentale importanza nei fenomeni di trasporto solido costiero, che può essere scomposto in due componenti:

- trasporto solido trasversale, in direzione perpendicolare alla linea di battigia (*cross-shore*), dovuto principalmente alle correnti di ritorno e alle asimmetrie del campo di moto ondoso;
- trasporto solido longitudinale, in direzione parallela alla linea di battigia (*long-shore*), prodotto dalla corrente litoranea.

Il trasporto solido long-shore influisce sull'evoluzione a lungo termine della morfologia costiera, mentre quello cross-shore è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine dovuti a condizioni di mareggiata.

Il trasporto solido trasversale è dunque promotore del rimodellamento del profilo della sezione garantendo tuttavia la conservazione della massa e la continuità; il trasporto solido longitudinale invece determina la sottrazione o addizione di sabbia allontanandola o accumulandola dalla sezione secondo la direzione definita dalle onde frangenti (*radiation stress*).

Nell'area compresa tra la linea di frangimento dell'onda più alta e la linea del litorale avviene la maggior parte del trasporto solido (Fig. 9): la parte più fine del materiale posto in movimento viene trasportata per sospensione, la frazione più grossa viene spostata per rotolamento sul fondo secondo la direzione dell'onda verso riva; esistono quindi due gruppi di particelle in movimento: il carico sospeso e il carico di fondo.

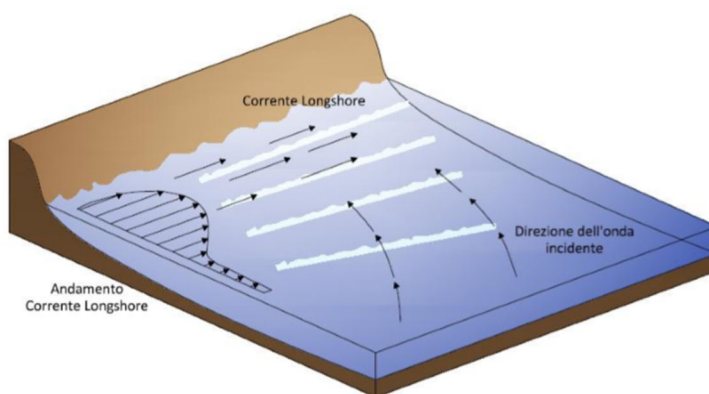


Fig. 9 Schema della generazione della corrente long-shore

Se il profilo di una spiaggia non è in equilibrio per una data onda incidente, la sabbia verrà ridistribuita per permettere al profilo di raggiungere una condizione equilibrata (Fig. 10); in funzione delle onde incidenti, della forma del profilo e delle proprietà dei sedimenti il trasporto sarà prevalentemente diretto verso la costa o verso il largo. Qualora il profilo tenda ad una condizione di erosione, esso sarà caratterizzato da una sottrazione di sedimenti nella parte alta e un deposito nella zona dei frangenti con la conseguente formazione di una barra; qualora invece tendesse a una condizione di accrescimento si osserverà un deposito di sabbia nei pressi della battigia e la conseguente formazione di una berma.

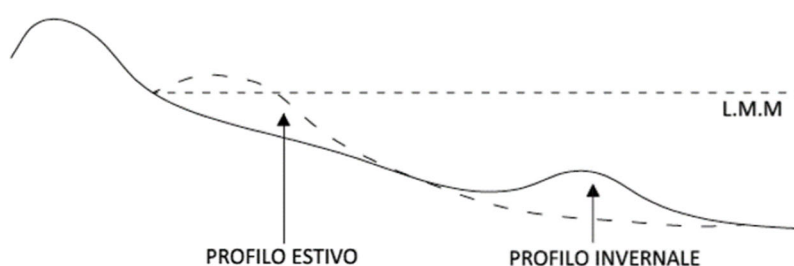


Fig. 10 Profilo cross-shore invernale ed estivo.

Relativamente alle correnti, in letteratura sono presenti studi teorici e numerici sul trasporto solido litoraneo, misurazioni con strumentazione sono sporadiche. Tra la documentazione disponibile ai fini dello studio bibliografico dell'area, vi sono anche le seguenti mappe del trasporto (Fig. 11). Nella prima mappa di sinistra, pubblicata da Idroser (1981), è riportata l'analisi del trasporto solido litoraneo tra il 1970 e il 1979. Lo studio condotto si riferiva ad un tratto di costa compreso tra Lido di Classe e Volano ma nella presente relazione si riporta un estratto dell'originale compreso tra Marina Romea e Porto Garibaldi, mentre la seconda mappa di destra riguarda il tratto costiero tra foce Reno e foce Po di Goro (Progetto di Piano Costa del 1996) in cui è rappresentata la direzione e l'intensità del trasporto solido litoraneo.

Relativamente allo studio idraulico specifico del paraggio di interesse, si rimanda alla modellazione numerica allegata alla Valutazione di Impatto Ambientale.

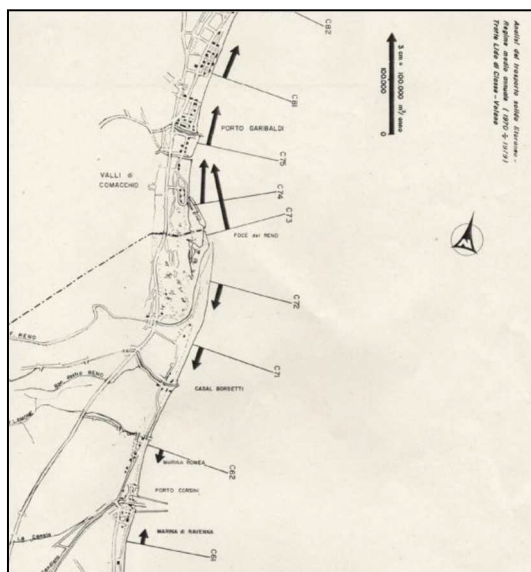


Fig. 11 Mappe del trasporto: (sinistra) tratto Lido di Classe - Volano tra il 1970 e il 1979; (destra) il tratto foce Reno - foce Po di Goro (Progetto di Piano Costa del 1996).

## 2.4.1 Trasporto solido fluviale

Le foci sono soggette all'insabbiamento nei periodi di magra, quando cioè la dinamica litoranea prevale su quella fluviale. Durante le piene, infatti, una forte corrente fluviale rimuoverebbe con facilità la sabbia che si è depositata nella foce e la porta in mare dove, in ragione delle diverse energie, si sedimenta poco distante dalla battigia formando accumuli sommersi. Questi accumuli vengono in seguito rimodellati dal mare e, nei casi di fiumi con bassa portata estiva, assumono la forma di barre sommerse parallele alla costa, poste alcune centinaia di metri al largo.

Negli ultimi 15-20 anni il materiale dragato alla foce di canali e fiumi lungo la costa emiliano-romagnola è stato quasi sempre utilizzato per scopi di ripascimento.

L'influenza di una corrente che si sovrappone ad un moto ondoso è un fenomeno fisico molto frequente le cui caratteristiche sono sostanzialmente quelle di apportare delle trasformazioni, più o meno intense al campo di moto oscillatorio, e delle modifiche alla morfologia del fondo.

Le correnti presenti in prossimità della fascia costiera, oltre per cause quali maree, gradienti di densità e/o di temperatura, azione del vento sulla superficie libera, sono da imputare alla presenza del moto ondoso che, come è noto, in condizioni di shallow water e nella "surf zone" è caratterizzato, oltre che dalle componenti oscillatorie, anche dalla presenza di correnti di massa, di intensità molto spesso non trascurabili.

In prossimità di una foce fluviale, la corrente si sviluppa in opposizione alla direzione di propagazione del moto ondoso e la zona interessata dal fenomeno di interazione si estende a tutto l'apparato di foce producendo modifiche che interessano non solo lo specchio d'acqua di mare prospiciente la foce stessa, ma anche un tratto più o meno esteso dell'asta terminale del corso d'acqua naturale.

L'interazione idrodinamica onde-correnti determina inoltre modificazioni morfologiche (erosioni o accrescimenti dei fondali) che possono estendersi fino a profondità elevate.

Lo studio di tale fenomeno presenta notevoli difficoltà trattandosi di un processo di interazione fortemente non lineare tra le sollecitazioni dovute alla corrente e al moto ondoso e le modificazioni morfologiche indotte dall'azione combinata delle due forzanti.

## **2.5 Innalzamento del livello marino (*sea level rise*)**

La costa adriatica dell'Emilia-Romagna è particolarmente vulnerabile all'innalzamento del livello del mare. Le proiezioni del livello del mare sono altamente incerte a seconda di una serie di ipotesi e processi, compresi quelli su scala globale.

Perini et al. (2017) considerano per la costa emiliano-romagnola un aumento del livello del mare entro il 2100 di 0.34 m nello scenario di emissione RCP4.5 e di 0.45 m nell'RCP 8.5 con una stima di perdita di terreno (*land loss*) pari a 350 km<sup>2</sup>. Questi valori, calcolati estraendo dalle mappe globali dell'IPCC AR5 le proiezioni del livello del mare per le celle della griglia più vicine alla costa emiliano-romagnola, sono leggermente inferiori a quelle ipotizzate per il bacino del Mediterraneo e la scala globale. Tali stime non includono la subsidenza, che può essere localmente significativa. Questa si osserva principalmente lungo la costa centrale della regione a causa dell'estrazione di gas e dello sfruttamento delle acque sotterranee (Sytnik et al. 2018). I valori lungo la costa per il periodo 2011-2016 sono stati di circa 5 mm/a con punte di 15-17 mm/a lungo la costa ravennate (Arpae).

In tal senso, Antonioli et al. 2017 propongono stime dell'innalzamento relativo del livello del mare che combinano i movimenti verticali locali (tassi tettonici e glacio-isostatici) e proiezioni eustatiche globali (IPCC AR5 e Rahmstorf 2007): per il Nord Adriatico, l'innalzamento relativo del livello del mare previsto entro il 2100 varia da 58 a 101 cm (secondo lo scenario più severo IPCC RCP AR5 8.5, livello minimo e massimo) e fino a oltre 1 metro secondo lo scenario più severo IPCC RCP AR5 8.5, livello minimo e massimo scenario peggiore (Rahmstorf 2007).



Nel 2018 la Giunta regionale ha approvato la Strategia di mitigazione e adattamento per l'Emilia-Romagna (Delibera n.187/2018<sup>2</sup>), che costituisce un quadro comune di mitigazione e adattamento per i settori economici regionali e le amministrazioni locali. La Strategia individua misure e azioni per far fronte all'attuale variabilità climatica e ai futuri cambiamenti climatici in tutti i settori importanti della regione, tra cui: acque interne e risorse idriche, qualità dell'aria, aree urbane, uso del suolo, zone costiere, trasporti, foreste, biodiversità ed ecosistemi, agricoltura, industria produttiva, sistema energetico, turismo, salute, pesca e acquacoltura, beni culturali.

Le inondazioni e l'erosione delle coste rappresentano alcuni dei maggiori rischi per l'Emilia-Romagna. La Strategia propone l'attuazione di un Piano di Gestione Integrata delle Aree Costiere, da disegnare sulla base dell'ampia esperienza pregressa, comprendente le linee guida per la Gestione Integrata delle Zone Costiere approvate nel 2005 (D.R. n.645 del 20.01.2005), i piani della Direttiva Alluvioni e i risultati di numerosi progetti e misure già attuati lungo il litorale della regione. Azioni specifiche a medio termine volte ad aumentare la resilienza costiera comprendono: la regolamentazione e la limitazione dello sviluppo urbano lungo la costa, il miglioramento del sistema di allerta precoce per le tempeste costiere e i relativi impatti e la stabilizzazione del litorale attraverso il ripascimento e la ricostruzione delle dune, integrato con misure grigie (dighe, pennelli e frangiflutti) ove necessario.

Per il settore produttivo, le azioni a medio termine previste dalla Strategia regionale mirano a rendere il territorio e le imprese al sicuro dai rischi climatici che si manifestano. Le azioni suggerite comprendono la pianificazione di nuovi siti di produzione in aree non vulnerabili agli impatti climatici (come le inondazioni fluviali e costiere), la promozione del consumo di energia da fonti rinnovabili, la riduzione del consumo di acqua e la produzione di rifiuti, ecc. Per la maggior parte dei settori, la mitigazione è affrontata principalmente da promuovere l'efficienza energetica e incoraggiare il cambiamento comportamentale (es. mobilità verde, aree verdi urbane).

All'interno dell'ARPAE, è stato istituito l'Osservatorio Regionale degli Scenari sui Cambiamenti Climatici (Osservatorio Regionale degli scenari di cambiamento climatico).

La Regione Emilia-Romagna ha inoltre istituito il Presidio Organizzativo Cambiamento Climatico gestito dal Servizio Valutazione Impatto e Promozione Sviluppo Sostenibile (Servizio Valutazione Impatto e Promozione Sviluppo Sostenibile). Questo organismo monitora e valuta l'efficacia delle politiche e delle linee guida regionali di adattamento e mitigazione, nonché

---

<sup>2</sup>[https://www.gse.it/normativa\\_site/GSE%20Documenti%20normativa/EMILIA\\_ROMAGNA\\_DCR\\_n187\\_20\\_12\\_2018.pdf](https://www.gse.it/normativa_site/GSE%20Documenti%20normativa/EMILIA_ROMAGNA_DCR_n187_20_12_2018.pdf)

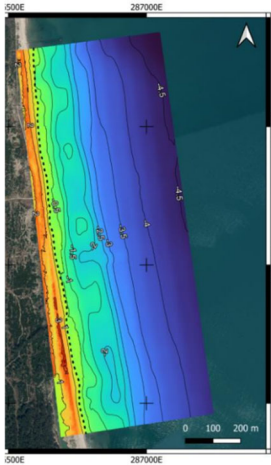
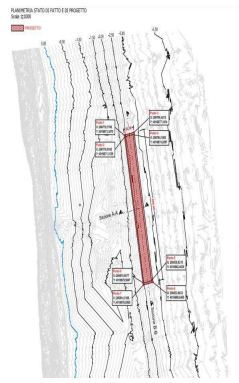
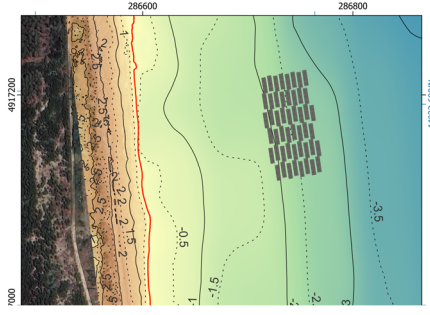
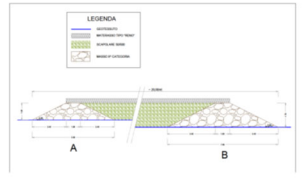
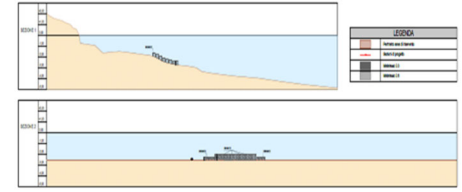
aggiorna la strategia in base alle nuove evidenze sui cambiamenti climatici nell'area della regione.

### 3 ALTERNATIVE PROGETTUALI E POSSIBILI SCENARI

Nello studio in oggetto vengono presentate verifiche su due scelte progettuali oltre alla situazione attuale senza interventi.

Le soluzioni, la loro numerazione e gli schemi sono sintetizzate nella seguente Tab. 8

Tab. 8 Soluzioni considerate nello studio.

Alternativa 0	Alternativa 1	Alternativa 2
		
		

#### 3.1 Alternativa 0 Nessun intervento

Questa Alternativa consiste nel lasciare inalterata la situazione senza interventi.

#### 3.2 Alternativa strutture rigida coperta da materassi S1

La soluzione rigida presentata in sede di prima Conferenza dei Servizi, realizzata mediante una massicciata di base 200,00 x 20,00 m, con forma tronco piramidale, altezza media 1,50 m e base superiore, sempre a forma rettangolare, con dimensioni 15,50 x 195,20 m, con la base maggiore posta parallelamente alla linea di riva, ad una distanza di circa 160 m dalla stessa e a una batimetria di partenza di circa -2,40 m, con sviluppo dell'opera lato mare sino alla batimetria di circa -2,90 m. La sezione è mostrata in Fig. 12, mentre dall'alto in Fig. 13.



### 3.3 Alternativa flessibile in materassi S2

La Alternativa S2 è realizzata con materassi di dimensioni modulari 5,00 x 2,00 x 0,30 m posti in più livelli e disposti in modo un po' irregolare, come mostrato in Fig. 14.

I materassi saranno disposti in blocchi da 6 per una estensione totale di 4 m x 15 m, posti in doppio strato con una altezza di 0.60 m. Il numero dei blocchi sarà pari a 50, i materassi presso i lati esterni settentrionali e meridionali saranno lasciati ad un solo strato, portando ad una gradualità che dovrebbe ridurre i fenomeni di riflessione e di diffrazione delle onde e di conseguenza gli effetti localizzati sia nella zona limitrofa che sulla battigia.

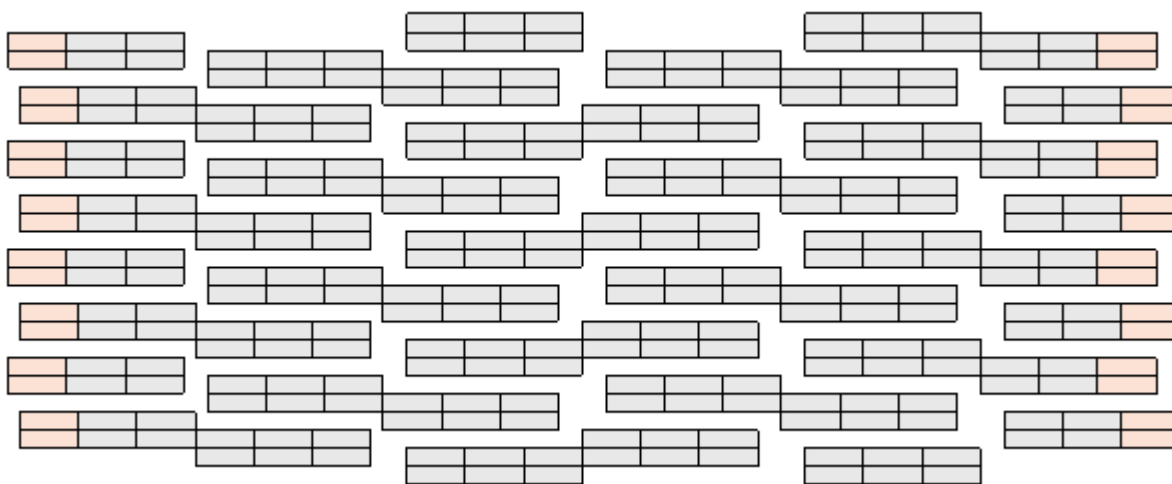


Fig. 14 Soluzione con moduli a Scacchiera realizzati con materassi. Alternativa soluzione S2.

Le tendenze evolutive dell'area sono stimate mediante dettagliata analisi delle fonti storiche disponibili. Si invita a riferirsi al capitolo dedicato alla **evoluzione costiera ed effetti delle opere di difesa** all'interno dello **Studio di Incidenza Ambientale (SIA)**. La conclusione è che l'erosione è più marcata nella regione centrale, con una progressiva diminuzione verso sud. Il tasso medio di erosione nell'area centrale è di  $-2.3 \pm 1.0$  m/anno, riducendosi fino a valori trascurabili nei segmenti più meridionali. Nella zona di posizionamento della scogliera di progetto (Alternativa S2), il tasso medio di erosione è stato di  $-1.5 \pm 1.1$  m/anno dal 1998 al 2019 (Fig. 15).

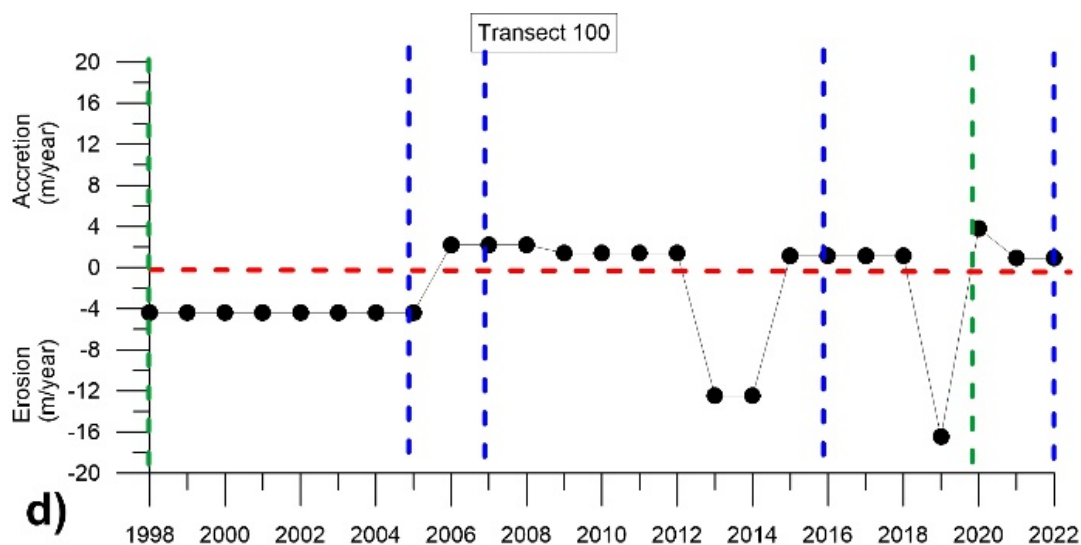


Fig. 15. Tasso di accrescimento ed erosione EPR [m/anno] nella zona di posizionamento della scogliera di progetto (**Alternativa S2**) nei vari intervalli di tempo (1998-2005; 2005-2008; 2008-2012; 2012-2014; 2014-2018; 2018-2019; 2019-2020; 2020-2022 pre-ripascimento Progettone 4) per un insieme selezionato di transetti nell'intorno dell'area di posizionamento della scogliera (riferirsi a Figura 4 per la posizione). Le linee tratteggiate blu indicano i periodi dei principali ripascimenti nell'area di studio, incluso Progettone 2 (2007), Progettone 3 (2016) e Progettone 4 (2022); la linea tratteggiate rossa indica il valore 0 m/anno = stabilità; le linee tratteggiate verdi indicano i principali interventi di difesa costiera (1998 costruzione della scogliera frangiflutto; 2020 costruzione della barriera soffolta a continuazione della scogliera frangiflutto in prossimità degli stabilimenti balneari di Lido di Dante).



## 4 MODELLI NUMERICI

In questo studio sono stati utilizzati per la modellazione la Suite di software proprietario <https://www.dhigroup.com/technologies/mikepoweredbydhi>, con i moduli SW, HD, ST e SM, e per la sola alternativa S2 anche il codice open source Xbeach (<https://oss.deltares.nl/web/xbeach/>) sviluppato da Deltares.

Lo studio del campo ondoso, idrodinamico e morfodinamico è stato affrontato con l'applicazione della modellistica numerica bidimensionale del codice di calcolo **MIKE21** sviluppato dal DHI MARINE (Danish Hydraulic Institute). Il programma è modulare e contenente diversi codici di calcolo per la simulazione di corpi idrici e l'approssimazione idrodinamica. Esso è bidimensionale nel piano ("2") e monodimensionale lungo la verticale ("1"). Lo schema utilizzato nelle applicazioni marittime e costiere è il Flexible Mesh cioè un metodo di calcolo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio di calcolo è discretizzato nelle dimensioni orizzontali attraverso una maglia non strutturata di elementi triangolari o quadrangolari che garantisce il massimo della flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse e in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile.

**Xbeach** è un modello numerico opensource utilizzato per simulare vari processi costieri, come l'erosione, l'accumulo di sedimenti e le dinamiche idrodinamiche in condizioni di onde e correnti. La modalità surfbeat permette al modello una risoluzione delle variazioni delle onde corte sulla scala del gruppo di onde (involuppo delle onde corte) e delle onde lunghe ad esse associate. Questa è la principale caratteristica che lo distingue dal Mike21.

Il moto delle onde corte viene risolto utilizzando l'equazione dell'azione ondosa, che è una forzante dipendente dal tempo delle equazioni HISWA [Holthuijsen et al., 1989]. Questa equazione risolve la variazione dell'involuppo delle onde corte (altezza d'onda) sulla scala dei gruppi d'onda. Impiega un modello di dissipazione da utilizzare con i gruppi d'onda [Daly et al., 2012, Roelvink, 1993] e un roller model [Nairn et al., 1990, Stive e De Vriend, 1994, Svendsen, 1984] per rappresentare la quantità di moto immagazzinata in superficie dopo il frangimento.

Queste variazioni, attraverso gradienti di *radiation stress* [Longuet-Higgins e Stewart, 1962, Longuet-Higgins e Stewart, 1964] esercitano una forza sulla colonna d'acqua e determinano onde di periodo più lungo (onde infragravitazionali) e correnti non stazionarie, che vengono risolte dalle equazioni non lineari delle acque basse [Phillips, 1977].

Pertanto, sono incluse nel modello surfbeat le correnti generate dalle onde (longshore current, rip currents and undertow) e le correnti generate dal vento (stazionarie e uniformi) per

l'assetto del vento locale, onde lunghe (infragravitazionali) e runup e rundown per onde lunghe (swash).

Il modello surfbeat è perfettamente valido sulle spiagge di natura dissipativa, dove le onde corte sono per lo più dissipate quando si avvicinano alla linea di riva.

È risolto su una griglia curvilinea dove l'energia delle onde corte in arrivo varia lungo il boundary lato mare e nel tempo, a seconda delle condizioni al contorno per le onde. Questa variazione viene propagata nel dominio del modello risolvendo la direzione delle onde a intervalli regolari utilizzando il risolutore stazionario, e quindi propagando l'energia delle onde lungo la direzione dell'onda media. Questo preserva il raggruppamento delle onde perché significa mantenere l'energia delle onde in modo più coerente all'interno del gruppo quindi questo porta ad un maggior forcing delle onde infragravitazionali poiché l'energia viene trasferita in modo più efficiente a queste onde a bassa frequenza. Si rimanda la descrizione approfondita dei software ai relativi siti web.

## 5 MODELLI NUMERICI

### 5.1 Topografia della spiaggia

Il rilievo della parte emersa dell'area di studio è effettuato tramite un'integrazione di tecniche, in particolare sistema UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) e ricevitori GNSS (*Global Navigation Satellite System*).

Il rilievo è composto da 3 momenti: programmazione del rilievo, acquisizione dei dati in una singola giornata con favorevole bassa marea, elaborazione e validazione dei dati.

Secondo progetto, è previsto che questi rilievi vengano effettuati una volta l'anno, con aggiunta di rilievi in successione ad eventi metereologici estremi, i quali più di tutti possono impattare sulla morfologia del luogo. I dati topografici sono stati 'uniti' ai dati batimetrici di cui in seguito vengono dettagliate le fonti.

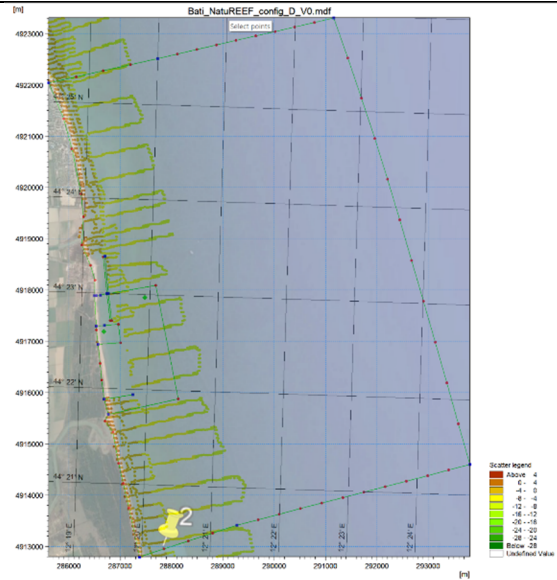
### 5.2 Batimetria del fondale marino

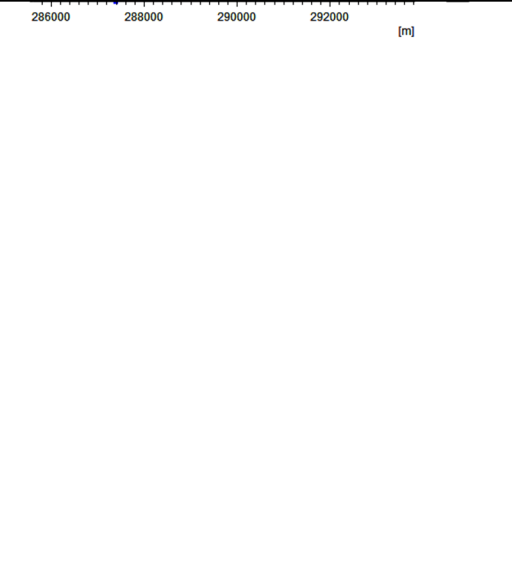
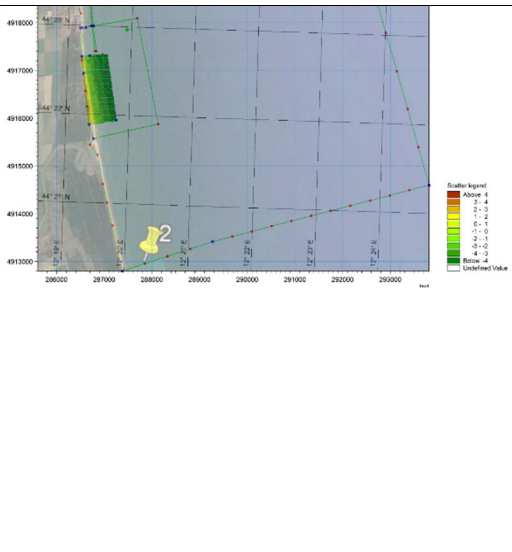

Dal rilievo batimetrico aggiornato dell'area oggetto del presente progetto si è provveduto ad elaborare le seguenti planimetrie ad isolinee ed isobate.

Le fonti di dati batimetrici non sono le medesime per le differenti soluzioni. In seguito vengono presentati i set up del modello e la generazione della griglia per le differenti soluzioni.

Per realizzare la *mesh* di calcolo del modello sono state utilizzate differenti fonti di dati batimetrici, come mostrato in *Tab. 10*.

Tab. 10 Fonti di dati utilizzate per la interpolazione sulle mesh di calcolo

A	Rilievo batimetrico ARPA2018	 <p>Bati_NatuREEF_config_D_V0.mdf</p> <p>Scatter legend</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Above 4</li> <li>4</li> <li>-4</li> <li>0</li> <li>8</li> <li>-8</li> <li>12</li> <li>-12</li> <li>16</li> <li>-16</li> <li>20</li> <li>-20</li> <li>24</li> <li>-24</li> <li>28</li> <li>-28</li> <li>32</li> <li>-32</li> <li>36</li> <li>-36</li> <li>40</li> <li>-40</li> <li>44</li> <li>-44</li> <li>48</li> <li>-48</li> <li>52</li> <li>-52</li> <li>56</li> <li>-56</li> <li>60</li> <li>-60</li> <li>64</li> <li>-64</li> <li>68</li> <li>-68</li> <li>72</li> <li>-72</li> <li>76</li> <li>-76</li> <li>80</li> <li>-80</li> <li>84</li> <li>-84</li> <li>88</li> <li>-88</li> <li>92</li> <li>-92</li> <li>96</li> <li>-96</li> <li>100</li> <li>-100</li> <li>104</li> <li>-104</li> <li>108</li> <li>-108</li> <li>112</li> <li>-112</li> <li>116</li> <li>-116</li> <li>120</li> <li>-120</li> <li>124</li> <li>-124</li> <li>128</li> <li>-128</li> <li>132</li> <li>-132</li> <li>136</li> <li>-136</li> <li>140</li> <li>-140</li> <li>144</li> <li>-144</li> <li>148</li> <li>-148</li> <li>152</li> <li>-152</li> <li>156</li> <li>-156</li> <li>160</li> <li>-160</li> <li>164</li> <li>-164</li> <li>168</li> <li>-168</li> <li>172</li> <li>-172</li> <li>176</li> <li>-176</li> <li>180</li> <li>-180</li> <li>184</li> <li>-184</li> <li>188</li> <li>-188</li> <li>192</li> <li>-192</li> <li>196</li> <li>-196</li> <li>200</li> <li>-200</li> <li>204</li> <li>-204</li> <li>208</li> <li>-208</li> <li>212</li> <li>-212</li> <li>216</li> <li>-216</li> <li>220</li> <li>-220</li> <li>224</li> <li>-224</li> <li>228</li> <li>-228</li> <li>232</li> <li>-232</li> <li>236</li> <li>-236</li> <li>240</li> <li>-240</li> <li>244</li> <li>-244</li> <li>248</li> <li>-248</li> <li>252</li> <li>-252</li> <li>256</li> <li>-256</li> <li>260</li> <li>-260</li> <li>264</li> <li>-264</li> <li>268</li> <li>-268</li> <li>272</li> <li>-272</li> <li>276</li> <li>-276</li> <li>280</li> <li>-280</li> <li>284</li> <li>-284</li> <li>288</li> <li>-288</li> <li>292</li> <li>-292</li> <li>296</li> <li>-296</li> <li>300</li> <li>-300</li> <li>304</li> <li>-304</li> <li>308</li> <li>-308</li> <li>312</li> <li>-312</li> <li>316</li> <li>-316</li> <li>320</li> <li>-320</li> <li>324</li> <li>-324</li> <li>328</li> <li>-328</li> <li>332</li> <li>-332</li> <li>336</li> <li>-336</li> <li>340</li> <li>-340</li> <li>344</li> <li>-344</li> <li>348</li> <li>-348</li> <li>352</li> <li>-352</li> <li>356</li> <li>-356</li> <li>360</li> <li>-360</li> <li>364</li> <li>-364</li> <li>368</li> <li>-368</li> <li>372</li> <li>-372</li> <li>376</li> <li>-376</li> <li>380</li> <li>-380</li> <li>384</li> <li>-384</li> <li>388</li> <li>-388</li> <li>392</li> <li>-392</li> <li>396</li> <li>-396</li> <li>400</li> <li>-400</li> <li>404</li> <li>-404</li> <li>408</li> <li>-408</li> <li>412</li> <li>-412</li> <li>416</li> <li>-416</li> <li>420</li> <li>-420</li> <li>424</li> <li>-424</li> <li>428</li> <li>-428</li> <li>432</li> <li>-432</li> <li>436</li> <li>-436</li> <li>440</li> <li>-440</li> <li>444</li> <li>-444</li> <li>448</li> <li>-448</li> <li>452</li> <li>-452</li> <li>456</li> <li>-456</li> <li>460</li> <li>-460</li> <li>464</li> <li>-464</li> <li>468</li> <li>-468</li> <li>472</li> <li>-472</li> <li>476</li> <li>-476</li> <li>480</li> <li>-480</li> <li>484</li> <li>-484</li> <li>488</li> <li>-488</li> <li>492</li> <li>-492</li> <li>496</li> <li>-496</li> <li>500</li> <li>-500</li> <li>504</li> <li>-504</li> <li>508</li> <li>-508</li> <li>512</li> <li>-512</li> <li>516</li> <li>-516</li> <li>520</li> <li>-520</li> <li>524</li> <li>-524</li> <li>528</li> <li>-528</li> <li>532</li> <li>-532</li> <li>536</li> <li>-536</li> <li>540</li> <li>-540</li> <li>544</li> <li>-544</li> <li>548</li> <li>-548</li> <li>552</li> <li>-552</li> <li>556</li> <li>-556</li> <li>560</li> <li>-560</li> <li>564</li> <li>-564</li> <li>568</li> <li>-568</li> <li>572</li> <li>-572</li> <li>576</li> <li>-576</li> <li>580</li> <li>-580</li> <li>584</li> <li>-584</li> <li>588</li> <li>-588</li> <li>592</li> <li>-592</li> <li>596</li> <li>-596</li> <li>600</li> <li>-600</li> <li>604</li> <li>-604</li> <li>608</li> <li>-608</li> <li>612</li> <li>-612</li> <li>616</li> <li>-616</li> <li>620</li> <li>-620</li> <li>624</li> <li>-624</li> <li>628</li> <li>-628</li> <li>632</li> <li>-632</li> <li>636</li> <li>-636</li> <li>640</li> <li>-640</li> <li>644</li> <li>-644</li> <li>648</li> <li>-648</li> <li>652</li> <li>-652</li> <li>656</li> <li>-656</li> <li>660</li> <li>-660</li> <li>664</li> <li>-664</li> <li>668</li> <li>-668</li> <li>672</li> <li>-672</li> <li>676</li> <li>-676</li> <li>680</li> <li>-680</li> <li>684</li> <li>-684</li> <li>688</li> <li>-688</li> <li>692</li> <li>-692</li> <li>696</li> <li>-696</li> <li>700</li> <li>-700</li> <li>704</li> <li>-704</li> <li>708</li> <li>-708</li> <li>712</li> <li>-712</li> <li>716</li> <li>-716</li> <li>720</li> <li>-720</li> <li>724</li> <li>-724</li> <li>728</li> <li>-728</li> <li>732</li> <li>-732</li> <li>736</li> <li>-736</li> <li>740</li> <li>-740</li> <li>744</li> <li>-744</li> <li>748</li> <li>-748</li> <li>752</li> <li>-752</li> <li>756</li> <li>-756</li> <li>760</li> <li>-760</li> <li>764</li> <li>-764</li> <li>768</li> <li>-768</li> <li>772</li> <li>-772</li> <li>776</li> <li>-776</li> <li>780</li> <li>-780</li> <li>784</li> <li>-784</li> <li>788</li> <li>-788</li> <li>792</li> <li>-792</li> <li>796</li> <li>-796</li> <li>800</li> <li>-800</li> <li>804</li> <li>-804</li> <li>808</li> <li>-808</li> <li>812</li> <li>-812</li> <li>816</li> <li>-816</li> <li>820</li> <li>-820</li> <li>824</li> <li>-824</li> <li>828</li> <li>-828</li> <li>832</li> <li>-832</li> <li>836</li> <li>-836</li> <li>840</li> <li>-840</li> <li>844</li> <li>-844</li> <li>848</li> <li>-848</li> <li>852</li> <li>-852</li> <li>856</li> <li>-856</li> <li>860</li> <li>-860</li> <li>864</li> <li>-864</li> <li>868</li> <li>-868</li> <li>872</li> <li>-872</li> <li>876</li> <li>-876</li> <li>880</li> <li>-880</li> <li>884</li> <li>-884</li> <li>888</li> <li>-888</li> <li>892</li> <li>-892</li> <li>896</li> <li>-896</li> <li>900</li> <li>-900</li> <li>904</li> <li>-904</li> <li>908</li> <li>-908</li> <li>912</li> <li>-912</li> <li>916</li> <li>-916</li> <li>920</li> <li>-920</li> <li>924</li> <li>-924</li> <li>928</li> <li>-928</li> <li>932</li> <li>-932</li> <li>936</li> <li>-936</li> <li>940</li> <li>-940</li> <li>944</li> <li>-944</li> <li>948</li> <li>-948</li> <li>952</li> <li>-952</li> <li>956</li> <li>-956</li> <li>960</li> <li>-960</li> <li>964</li> <li>-964</li> <li>968</li> <li>-968</li> <li>972</li> <li>-972</li> <li>976</li> <li>-976</li> <li>980</li> <li>-980</li> <li>984</li> <li>-984</li> <li>988</li> <li>-988</li> <li>992</li> <li>-992</li> <li>996</li> <li>-996</li> <li>1000</li> <li>-1000</li> <li>1004</li> <li>-1004</li> <li>1008</li> <li>-1008</li> <li>1012</li> <li>-1012</li> <li>1016</li> <li>-1016</li> <li>1020</li> <li>-1020</li> <li>1024</li> <li>-1024</li> <li>1028</li> <li>-1028</li> <li>1032</li> <li>-1032</li> <li>1036</li> <li>-1036</li> <li>1040</li> <li>-1040</li> <li>1044</li> <li>-1044</li> <li>1048</li> <li>-1048</li> <li>1052</li> <li>-1052</li> <li>1056</li> <li>-1056</li> <li>1060</li> <li>-1060</li> <li>1064</li> <li>-1064</li> <li>1068</li> <li>-1068</li> <li>1072</li> <li>-1072</li> <li>1076</li> <li>-1076</li> <li>1080</li> <li>-1080</li> <li>1084</li> <li>-1084</li> <li>1088</li> <li>-1088</li> <li>1092</li> <li>-1092</li> <li>1096</li> <li>-1096</li> <li>1100</li> <li>-1100</li> <li>1104</li> <li>-1104</li> <li>1108</li> <li>-1108</li> <li>1112</li> <li>-1112</li> <li>1116</li> <li>-1116</li> <li>1120</li> <li>-1120</li> <li>1124</li> <li>-1124</li> <li>1128</li> <li>-1128</li> <li>1132</li> <li>-1132</li> <li>1136</li> <li>-1136</li> <li>1140</li> <li>-1140</li> <li>1144</li> <li>-1144</li> <li>1148</li> <li>-1148</li> <li>1152</li> <li>-1152</li> <li>1156</li> <li>-1156</li> <li>1160</li> <li>-1160</li> <li>1164</li> <li>-1164</li> <li>1168</li> <li>-1168</li> <li>1172</li> <li>-1172</li> <li>1176</li> <li>-1176</li> <li>1180</li> <li>-1180</li> <li>1184</li> <li>-1184</li> <li>1188</li> <li>-1188</li> <li>1192</li> <li>-1192</li> <li>1196</li> <li>-1196</li> <li>1200</li> <li>-1200</li> <li>1204</li> <li>-1204</li> <li>1208</li> <li>-1208</li> <li>1212</li> <li>-1212</li> <li>1216</li> <li>-1216</li> <li>1220</li> <li>-1220</li> <li>1224</li> <li>-1224</li> <li>1228</li> <li>-1228</li> <li>1232</li> <li>-1232</li> <li>1236</li> <li>-1236</li> <li>1240</li> <li>-1240</li> <li>1244</li> <li>-1244</li> <li>1248</li> <li>-1248</li> <li>1252</li> <li>-1252</li> <li>1256</li> <li>-1256</li> <li>1260</li> <li>-1260</li> <li>1264</li> <li>-1264</li> <li>1268</li> <li>-1268</li> <li>1272</li> <li>-1272</li> <li>1276</li> <li>-1276</li> <li>1280</li> <li>-1280</li> <li>1284</li> <li>-1284</li> <li>1288</li> <li>-1288</li> <li>1292</li> <li>-1292</li> <li>1296</li> <li>-1296</li> <li>1300</li> <li>-1300</li> <li>1304</li> <li>-1304</li> <li>1308</li> <li>-1308</li> <li>1312</li> <li>-1312</li> <li>1316</li> <li>-1316</li> <li>1320</li> <li>-1320</li> <li>1324</li> <li>-1324</li> <li>1328</li> <li>-1328</li> <li>1332</li> <li>-1332</li> <li>1336</li> <li>-1336</li> <li>1340</li> <li>-1340</li> <li>1344</li> <li>-1344</li> <li>1348</li> <li>-1348</li> <li>1352</li> <li>-1352</li> <li>1356</li> <li>-1356</li> <li>1360</li> <li>-1360</li> <li>1364</li> <li>-1364</li> <li>1368</li> <li>-1368</li> <li>1372</li> <li>-1372</li> <li>1376</li> <li>-1376</li> <li>1380</li> <li>-1380</li> <li>1384</li> <li>-1384</li> <li>1388</li> <li>-1388</li> <li>1392</li> <li>-1392</li> <li>1396</li> <li>-1396</li> <li>1400</li> <li>-1400</li> <li>1404</li> <li>-1404</li> <li>1408</li> <li>-1408</li> <li>1412</li> <li>-1412</li> <li>1416</li> <li>-1416</li> <li>1420</li> <li>-1420</li> <li>1424</li> <li>-1424</li> <li>1428</li> <li>-1428</li> <li>1432</li> <li>-1432</li> <li>1436</li> <li>-1436</li> <li>1440</li> <li>-1440</li> <li>1444</li> <li>-1444</li> <li>1448</li> <li>-1448</li> <li>1452</li> <li>-1452</li> <li>1456</li> <li>-1456</li> <li>1460</li> <li>-1460</li> <li>1464</li> <li>-1464</li> <li>1468</li> <li>-1468</li> <li>1472</li> <li>-1472</li> <li>1476</li> <li>-1476</li> <li>1480</li> <li>-1480</li> <li>1484</li> <li>-1484</li> <li>1488</li> <li>-1488</li> <li>1492</li> <li>-1492</li> <li>1496</li> <li>-1496</li> <li>1500</li> <li>-1500</li> <li>1504</li> <li>-1504</li> <li>1508</li> <li>-1508</li> <li>1512</li> <li>-1512</li> <li>1516</li> <li>-1516</li> <li>1520</li> <li>-1520</li> <li>1524</li> <li>-1524</li> <li>1528</li> <li>-1528</li> <li>1532</li> <li>-1532</li> <li>1536</li> <li>-1536</li> <li>1540</li> <li>-1540</li> <li>1544</li> <li>-1544</li> <li>1548</li> <li>-1548</li> <li>1552</li> <li>-1552</li> <li>1556</li> <li>-1556</li> <li>1560</li> <li>-1560</li> <li>1564</li> <li>-1564</li> <li>1568</li> <li>-1568</li> <li>1572</li> <li>-1572</li> <li>1576</li> <li>-1576</li> <li>1580</li> <li>-1580</li> <li>1584</li> <li>-1584</li> <li>1588</li> <li>-1588</li> <li>1592</li> <li>-1592</li> <li>1596</li> <li>-1596</li> <li>1600</li> <li>-1600</li> <li>1604</li> <li>-1604</li> <li>1608</li> <li>-1608</li> <li>1612</li> <li>-1612</li> <li>1616</li> <li>-1616</li> <li>1620</li> <li>-1620</li> <li>1624</li> <li>-1624</li> <li>1628</li> <li>-1628</li> <li>1632</li> <li>-1632</li> <li>1636</li> <li>-1636</li> <li>1640</li> <li>-1640</li> <li>1644</li> <li>-1644</li> <li>1648</li> <li>-1648</li> <li>1652</li> <li>-1652</li> <li>1656</li> <li>-1656</li> <li>1660</li> <li>-1660</li> <li>1664</li> <li>-1664</li> <li>1668</li> <li>-1668</li> <li>1672</li> <li>-1672</li> <li>1676</li> <li>-1676</li> <li>1680</li> <li>-1680</li> <li>1684</li> <li>-1684</li> <li>1688</li> <li>-1688</li> <li>1692</li> <li>-1692</li> <li>1696</li> <li>-1696</li> <li>1700</li> <li>-1700</li> <li>1704</li> <li>-1704</li> <li>1708</li> <li>-1708</li> <li>1712</li> <li>-1712</li> <li>1716</li> <li>-1716</li> <li>1720</li> <li>-1720</li> <li>1724</li> <li>-1724</li> <li>1728</li> <li>-1728</li> <li>1732</li> <li>-1732</li> <li>1736</li> <li>-1736</li> <li>1740</li> <li>-1740</li> <li>1744</li> <li>-1744</li> <li>1748</li> <li>-1748</li> <li>1752</li> <li>-1752</li> <li>1756</li> <li>-1756</li> <li>1760</li> <li>-1760</li> <li>1764</li> <li>-1764</li> <li>1768</li> <li>-1768</li> <li>1772</li> <li>-1772</li> <li>1776</li> <li>-1776</li> <li>1780</li> <li>-1780</li> <li>1784</li> <li>-1784</li> <li>1788</li> <li>-1788</li> <li>1792</li> <li>-1792</li> <li>1796</li> <li>-1796</li> <li>1800</li> <li>-1800</li> <li>1804</li> <li>-1804</li> <li>1808</li> <li>-1808</li> <li>1812</li> <li>-1812</li> <li>1816</li> <li>-1816</li> <li>1820</li> <li>-1820</li> <li>1824</li> <li>-1824</li> <li>1828</li> <li>-1828</li> <li>1832</li> <li>-1832</li> <li>1836</li> <li>-1836</li> <li>1840</li> <li>-1840</li> <li>1844</li> <li>-1844</li> <li>1848</li> <li>-1848</li> <li>1852</li> <li>-1852</li> <li>1856</li> <li>-1856</li> <li>1860</li> <li>-1860</li> <li>1864</li> <li>-1864</li> <li>1868</li> <li>-1868</li> <li>1872</li> <li>-1872</li> <li>1876</li> <li>-1876</li> <li>1880</li> <li>-1880</li> <li>1884</li> <li>-1884</li> <li>1888</li> <li>-1888</li> <li>1892</li> <li>-1892</li> <li>1896</li> <li>-1896</li> <li>1900</li> <li>-1900</li> <li>1904</li> <li>-1904</li> <li>1908</li> <li>-1908</li> <li>1912</li> <li>-1912</li> <li>1916</li> <li>-1916</li> <li>1920</li> <li>-1920</li> <li>1924</li> <li>-1924</li> <li>1928</li> <li>-1928</li> <li>1932</li> <li>-1932</li> <li>1936</li> <li>-1936</li> <li>1940</li> <li>-1940</li> <li>1944</li> <li>-1944</li> <li>1948</li> <li>-1948</li> <li>1952</li> <li>-1952</li> <li>1956</li> <li>-1956</li> <li>1960</li> <li>-1960</li> <li>1964</li> <li>-1964</li> <li>1968</li> <li>-1968</li> <li>1972</li> <li>-1972</li> <li>1976</li> <li>-1976</li> <li>1980</li> <li>-1980</li> <li>1984</li> <li>-1984</li> <li>1988</li> <li>-1988</li> <li>1992</li> <li>-1992</li> <li>1996</li> <li>-1996</li> <li>2000</li> <li>-2000</li> <li>2004</li> <li>-2004</li> <li>2008</li> <li>-2008</li> <li>2012</li> <li>-2012</li> <li>2016</li> <li>-2016</li> <li>2020</li> <li>-2020</li> <li>2024</li> <li>-2024</li> <li>2028</li> <li>-2028</li> <li>2032</li> <li>-2032</li> <li>2036</li> <li>-2036</li> <li>2040</li> <li>-2040</li> <li>2044</li> <li>-2044</li> <li>2048</li> <li>-2048</li> <li>2052</li> <li>-2052</li> <li>2056</li> <li>-2056</li> <li>2060</li> <li>-2060</li> <li>2064</li> <li>-2064</li> <li>2068</li> <li>-2068</li> <li>2072</li> <li>-2072</li> <li>2076</li> <li>-2076</li> <li>2080</li> <li>-2080</li> <li>2084</li> <li>-2084</li> <li>2088</li> <li>-2088</li> <li>2092</li> <li>-2092</li> <li>2096</li> <li>-2096</li> <li>2100</li> <li>-2100</li> <li>2104</li> <li>-2104</li> <li>2108</li> <li>-2108</li> <li>2112</li> <li>-2112</li> <li>2116</li> <li>-2116</li> <li>2120</li> <li>-2120</li> <li>2124</li> <li>-2124</li> <li>2128</li> <li>-2128</li> <li>2132</li> <li>-2132</li> <li>2136</li> <li>-2136</li> <li>2140</li> <li>-2140</li> <li>2144</li> <li>-2144</li> <li>2148</li> <li>-2148</li> <li>2152</li> <li>-2152</li> <li>2156</li> <li>-2156</li> <li>2160</li> <li>-2160</li> <li>2164</li> <li>-2164</li> <li>2168</li> <li>-2168</li> <li>2172</li> <li>-2172</li> <li>2176</li> <li>-2176</li> <li>2180</li> <li>-2180</li> <li>2184</li> <li>-2184</li> <li>2188</li> <li>-2188</li> <li>2192</li> <li>-2192</li> <li>2196</li> <li>-2196</li> <li>2200</li> <li>-2200</li> <li>2204</li> <li>-2204</li> <li>2208</li> <li>-2208</li> <li>2212</li> <li>-2212</li> <li>2216</li> <li>-2216</li> <li>2220</li> <li>-2220</li> <li>2224</li> <li>-2224</li> <li>2228</li> <li>-2228</li> <li>2232</li> <li>-2232</li> <li>2236</li> <li>-2236</li> <li>2240</li> <li>-2240</li> <li>2244</li> <li>-2244</li> <li>2248</li> <li>-2248</li> <li>2252</li> <li>-2252</li> <li>2256</li> <li>-2256</li> <li>2260</li> <li>-2260</li> <li>2264</li> <li>-2264</li> <li>2268</li> <li>-2268</li> <li>2272</li> <li>-2272</li> <li>2276</li> <li>-2276</li> <li>2280</li> <li>-2280</li> <li>2284</li> <li>-2284</li> <li>2288</li> <li>-2288</li> <li>2292</li> <li>-2292</li> <li>2296</li> <li>-2296</li> <li>2300</li> <li>-2300</li> <li>2304</li> <li>-2304</li> <li>2308</li> <li>-2308</li> <li>2312</li> <li>-2312</li> <li>2316</li> <li>-2316</li> <li>2320</li> <li>-2320</li> <li>2324</li> <li>-2324</li> <li>2328</li> <li>-2328</li> <li>2332</li> <li>-2332</li> <li>2336</li> <li>-2336</li> <li>2340</li> <li>-2340</li> <li>2344</li> <li>-2344</li> <li>2348</li> <li>-2348</li> <li>2352</li> <li>-2352</li> <li>2356</li> <li>-2356</li> <li>2360</li> <li>-2360</li> <li>2364</li> <li>-2364</li> <li>2368</li> <li>-2368</li> <li>2372</li> <li>-2372</li> <li>2376</li> <li>-2376</li> <li>2380</li> <li>-2380</li> <li>2384</li> <li>-2384</li> <li>2388</li> <li>-2388</li> <li>2392</li> <li>-2392</li> <li>2396</li> <li>-2396</li> <li>2400</li> <li>-2400</li> <li>2404</li> <li>-2404</li> <li>2408</li> <li>-2408</li> <li>2412</li> <li>-2412</li> <li>2416</li> <li>-2416</li> <li>2420</li> <li>-2420</li> <li>2424</li> <li>-2424</li> <li>2428</li> <li>-2428</li> <li>2432</li> <li>-2432</li> <li>2436</li> <li>-2436</li> <li>2440</li> <li>-2440</li> <li>2444</li> <li>-2444</li> <li>2448</li> <li>-2448</li> <li>2452</li> <li>-2452</li> <li>2456</li> <li>-2456</li> <li>2460</li> <li>-2460</li> <li>2464</li> <li>-2464</li> <li>2468</li> <li>-2468</li> <li>2472</li> <li>-2472</li> <li>2476</li> <li>-2476</li> <li>2480</li> <li>-2480</li> <li>2484</li> <li>-2484</li> <li>2488</li> <li>-2488</li> <li>2492</li> <li>-2492</li> <li>2496</li> <li>-2496</li> <li>2500</li> <li>-2500</li> <li>2504</li> <li>-2504</li> <li>250</li></ul>
---	------------------------------	--

C	<p>Rilievi appositamente realizzati nel novembre 2023 nell'ambito del progetto LIFE NatuReef;</p>	
D	<p>Rilievi appositamente realizzati nel marzo 2024 nell'ambito del progetto LIFE NatuReef.</p>	
E	<p>Rilievo della zona in prossimità della barriera realizzata nella primavera 2020, eseguito nell'ottobre 2020</p>	

I codici di calcolo utilizzati per questo studio sono la Suite DHI Mike21 (Alternative S1 ed S2) ed il codice OpenSource Xbeach (Alternativa S2). In sintesi, il rilievo di dettaglio topografico-batimetrico eseguito nel novembre 2023 ha riguardato la zona prevista per la soluzione S1, e quello realizzato nel marzo del 2024 ha coperto l'area prevista per l'alternativa S2. Per la modellazione sono necessari dati per creare la *mesh* sia lateralmente che più al largo, e per queste zone sono stati utilizzati i dati dalle altre fonti.

### 5.3 Batimetria e mesh per Alternativa 1

Per eseguire il settaggio della soluzione S1 sono state utilizzati i rilievi A, B, C ed E. In Fig. 16 è mostrata la batimetria in assenza di interventi ottenuta per interpolazione dei rilievi A, B, C ed E.

Per la Alternativa 1 si è implementata nella *mesh* la posizione dell'opera. (Fig. 17), in cui si nota l'aumento di risoluzione in prossimità dell'opera con la cresta alla quota -1.20 m.

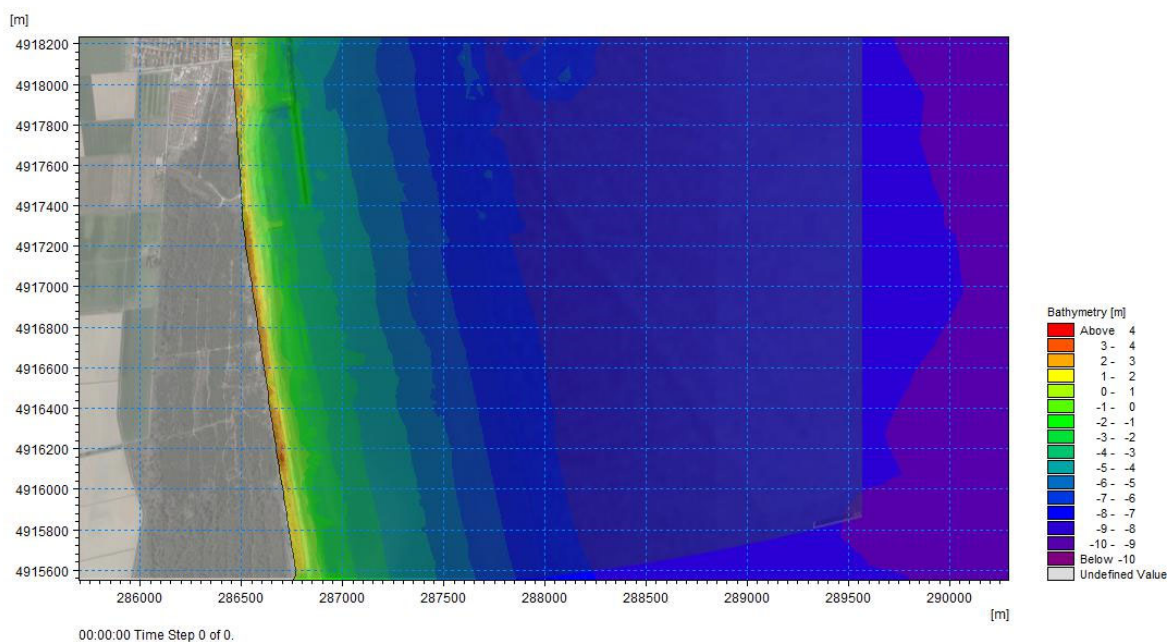


Fig. 16 Batimetria della zona di studio per interpolazione dei rilievi A, B, C ed E per la Soluzione 0



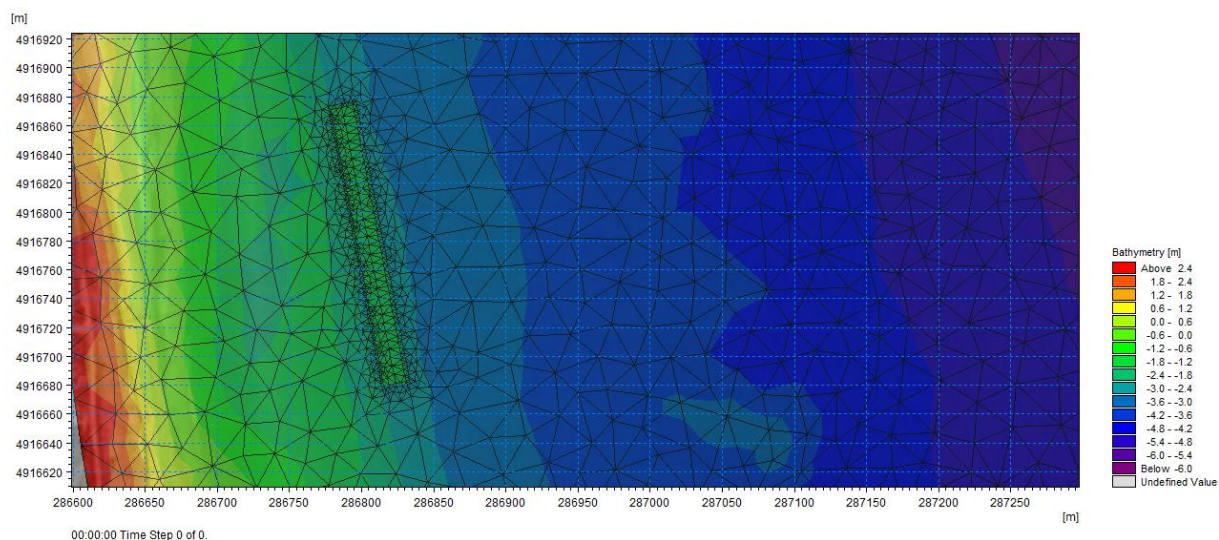


Fig. 17 Dettaglio della realizzazione dell'opera con alternativa S1 nella batimetria del modello

Si evidenzia come la struttura sia stata posizionata in prossimità della isobata -2,00 m a sud del pennello realizzata dopo gli anni 2020, in tale zona è presente una zona di deposito che a seguito della realizzazione della nuova struttura avrà una evoluzione (Fig. 18).

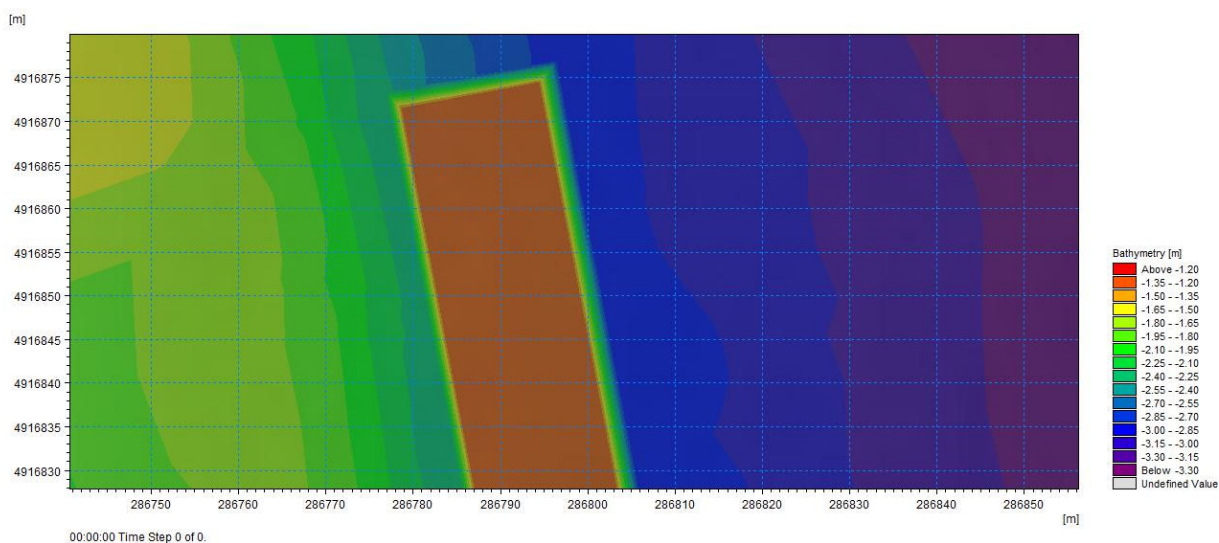


Fig. 18 Ingrandimento di dettaglio della soluzione 1.

## 5.4 Batimetria e mesh per la Alternativa S2

Per eseguire il settaggio della griglia di calcolo per la alternativa S2 sono state utilizzate i rilievi A, B, D ed E. Chiaramente essendo stati acquisiti in tempi differenti può esserci una discontinuità tra le aree coperte dalle differenti fonti di dati. Per riempire le zone al largo sono stati utilizzati i dati delle carte nautiche Cmap (Fonte B), che hanno una risoluzione bassa così come la griglia per fondali profondi ha dimensioni di maglie larghe. Per quanto riguarda le zone adiacenti purtroppo ci sono delle discontinuità o delle carenze di rilievi batimetrici in acque basse. Questo succede per esempio in prossimità della testata della barriera sommersa realizzata nel 2020 fino al pennellino di pali (Vedi Fig. 19). La fonte dei dati E copre i fondali del mare protetto dalla barriera sommersa, e la fonte D copre i fondali dal pennellino verso sud. Per il 'corridoio' tra l'opera per l'alternativa S2 e la testata della barriera sommersa sono stati utilizzati i dati batimetrici della fonte A, molto meno risolti dei precedenti.

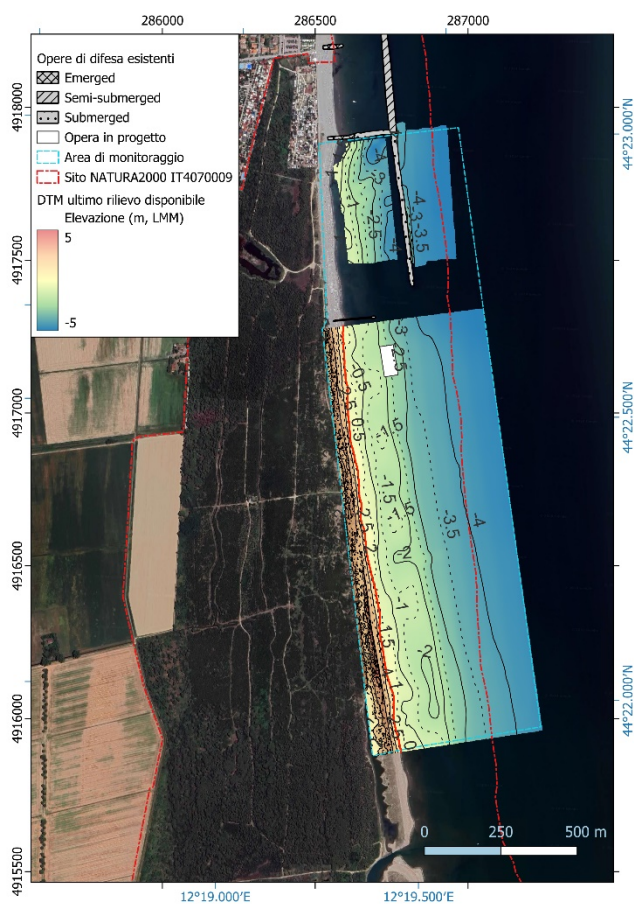


Fig. 19 DTM su GIS ricavato mediante interpolazione delle fonti di dati D ed E

Il dettaglio della mesh in prossimità della soluzione alternativa S2 è mostrato in Fig. 21, mentre nella successiva Fig. 20 la realizzazione di dettaglio sul DTM dei blocchi del reef come da Alternativa S2.

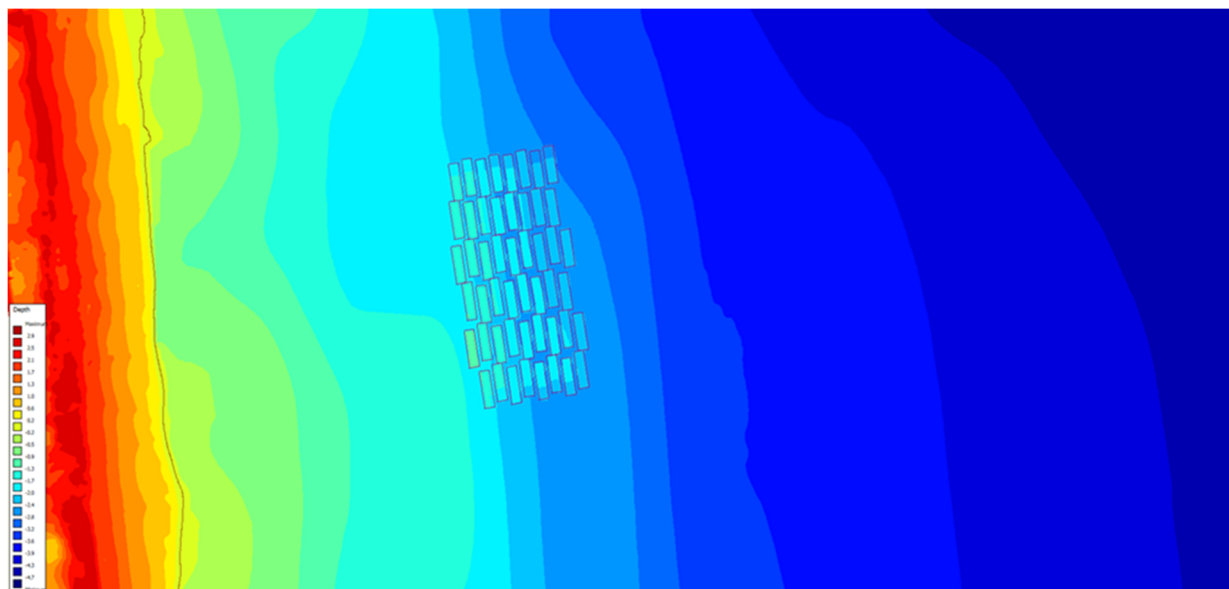


Fig. 20 Batimetria dell'opera per la alternativa S2, con la riproduzione delle quote di 60 cm nella parte centrale e 30 cm nei blocchi periferici

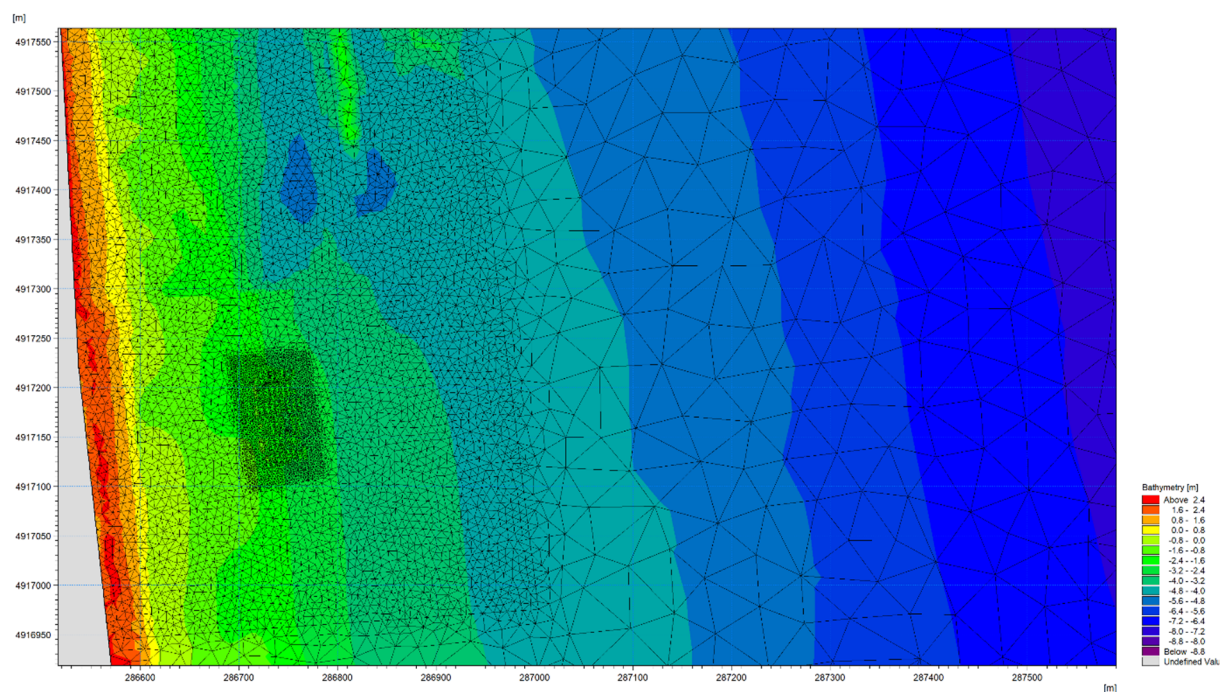


Fig. 21 Dettaglio della realizzazione dell'opera con alternativa S2 nella batimetria del modello

## 5.5 Condizioni al contorno

Il codice di calcolo permette di imporre condizioni al contorno relativamente alle onde, a livelli e correnti ed a sorgenti di sedimenti. In questo studio sono stati utilizzati due codici di calcolo state imposte condizioni presso il contorno.

Le condizioni ondose propagate sono state:

- mareggiate di Bora (3 febbraio 2015, 16-17 maggio 2023, Fig. 23);
- mareggiate di scirocco di Sirocco. (15-18 gennaio 2015, (Fig. 22);
- scenari di condizioni estreme: due onde con tempo di ritorno di 25 anni e direzione tipica di Bora e di Scirocco. Ciascuna mareggiata simulata con una durata di 3 ore  
Evento estremo da Scirocco  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$  s. Evento estremo da Bora  $H_s=5.18$  m;  $Dir=70^\circ N$ ;  $T_p=8.95$  s.

L'attrito al fondo imposto è stato pari a valori di Manning pari a 0.03 per il reef di ostriche e 0.02 per la sabbia (E.W.J. BERGSMA, 2012).

Le strutture rigide sono state rappresentate come fondale non erodibile. Altri parametri del modello sono stati impostati in base alla letteratura.

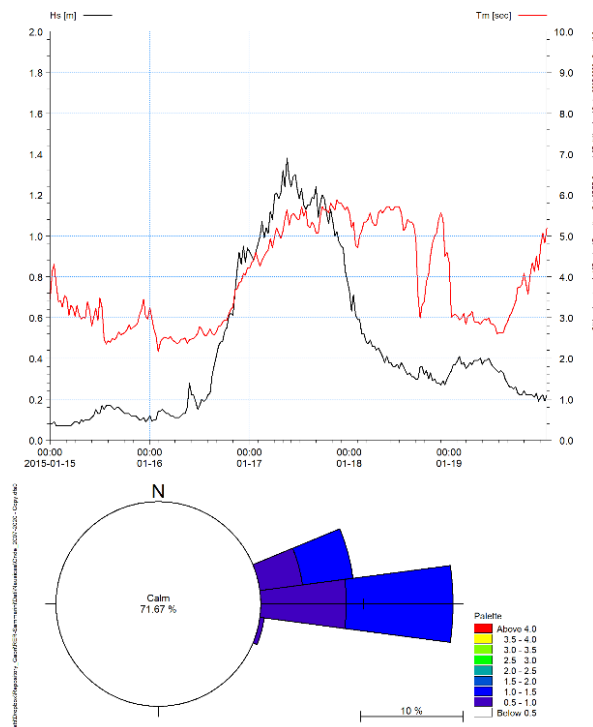


Fig. 22 Mareggiata del 15-17 gennaio 2015 Prevalenza della direzione E SE Scirocco. Altezza massima registrata 1,4 m.



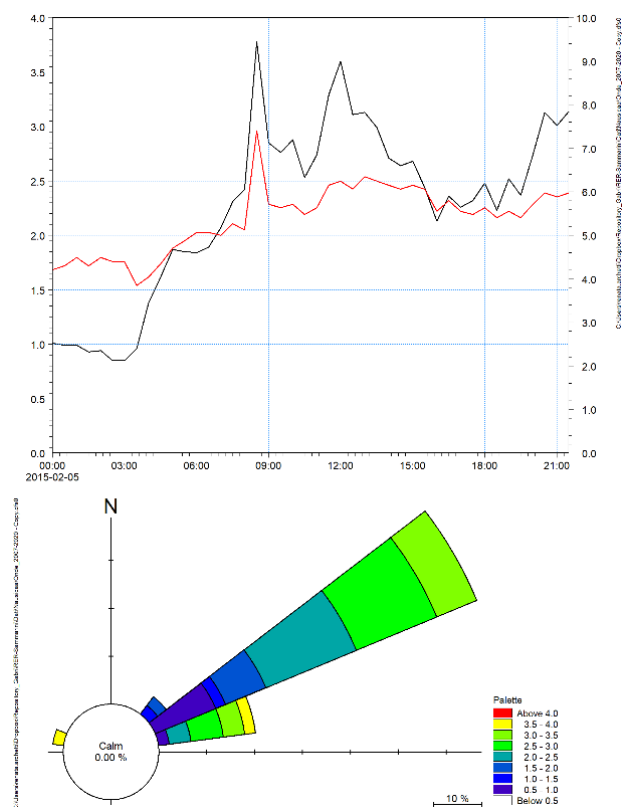


Fig. 23 Mareggiata 5-6 febbraio 2015 Prevalenza NE (Bora). Altezza massima registrata 3,7 m.

## 6 RISULTATI DEL MODELLO

I risultati delle simulazioni di scenari d'onde sia da Scirocco che da Bora vengono mostrati per le 2 soluzioni già discusse S1 o S2 e confrontate con la l'assenza delle opere (Alternativa S0). Si vedano le figure da a Fig. 28.

### 6.1 Alternativa S0-Stato di fatto

Le posizioni degli interventi ipotetici sono sovrapposte alle mappe. S1 mediante un rettangolo rosso ed S2 mediante un rettangolo nero

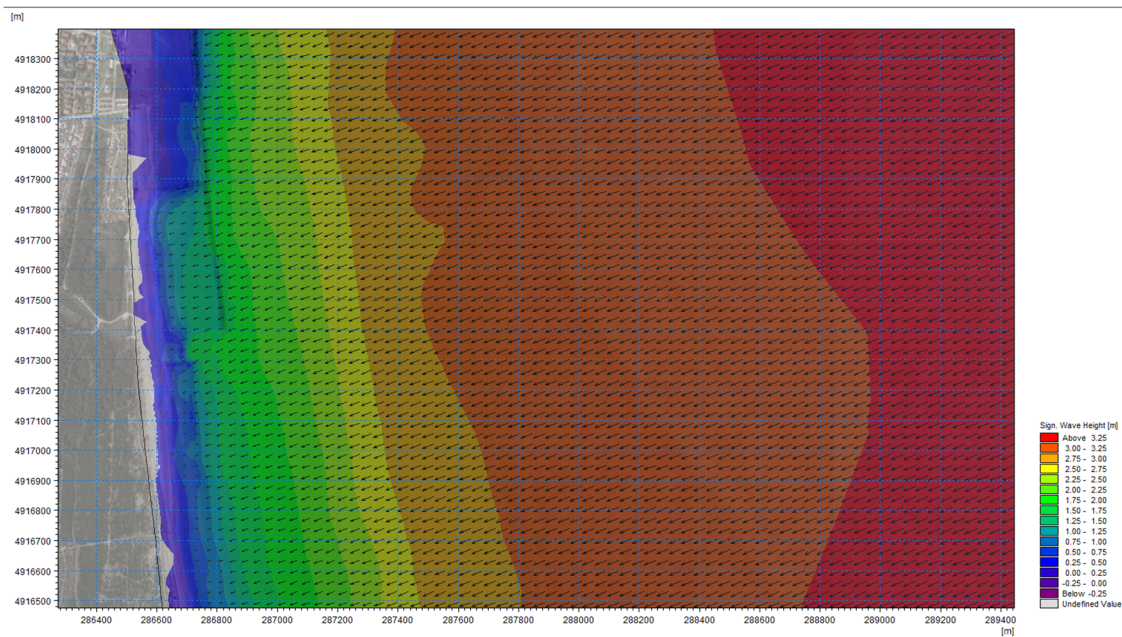


Fig. 24 Dettaglio dell'andamento del moto ondoso. Stato Attuale dell'area. Evento estremo da Bora  $H_s = 5.18$  m;  $Dir = 70^\circ N$ ;  $T_p = 8.95$

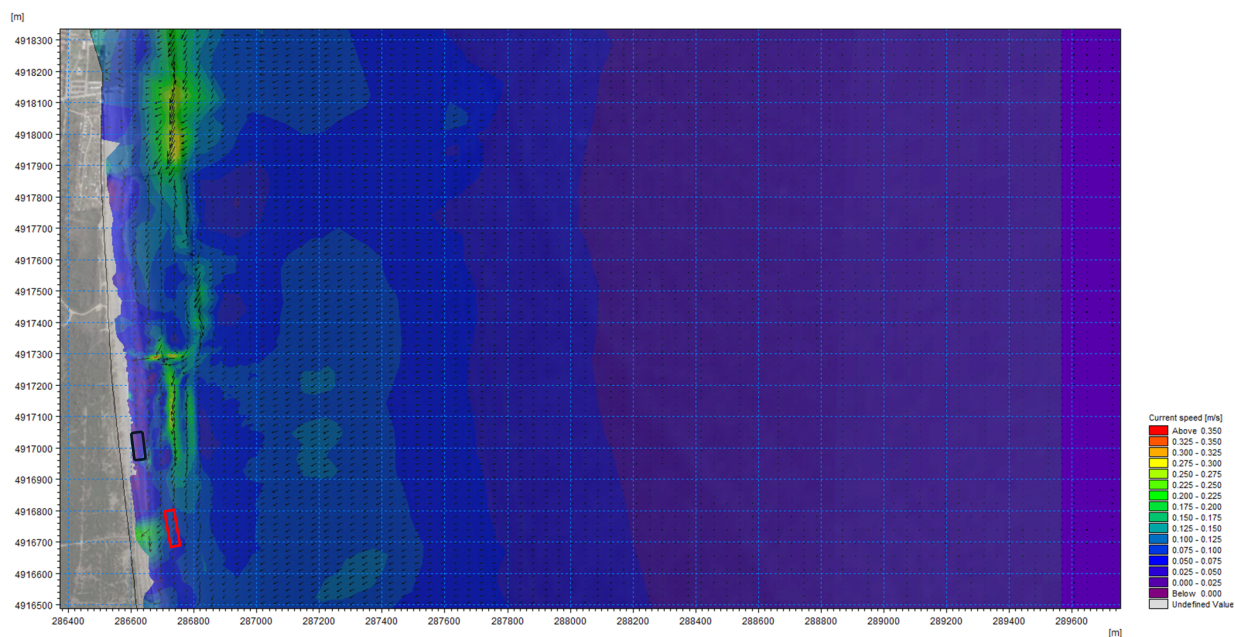


Fig. 25 Dettaglio dell'andamento del campo di corrente. Stato Attuale dell'area. Evento estremo da Bora Hs= 5.18 m; Dir=70°N; Tp=8.95

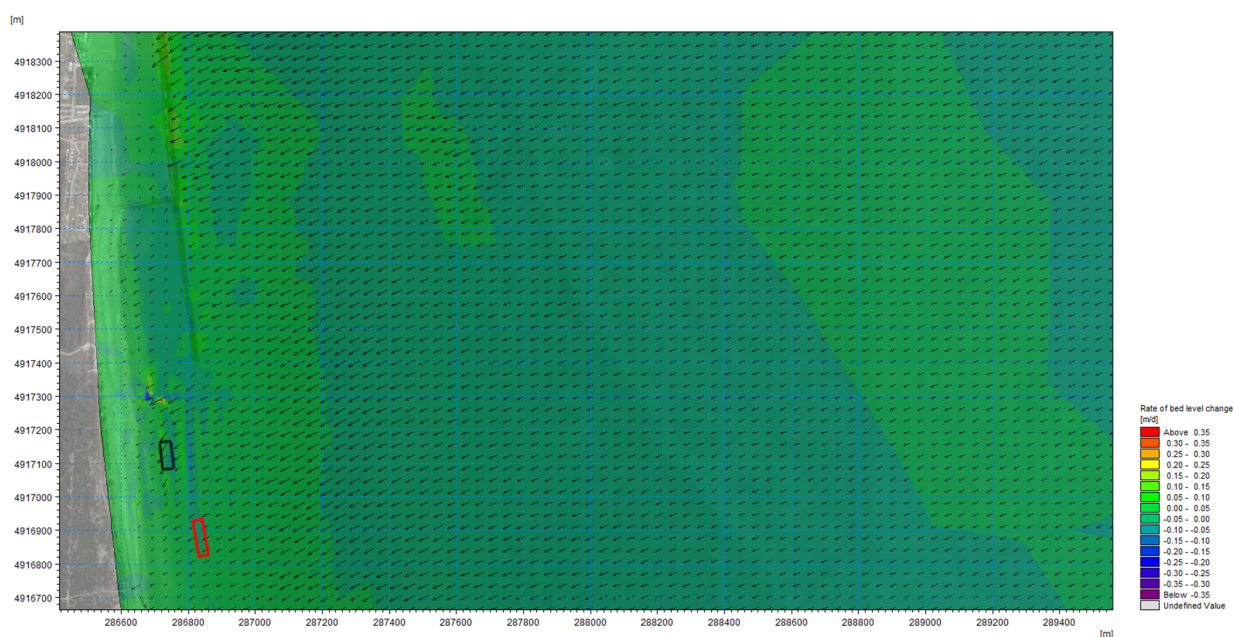


Fig. 26 Mappe di sediment transport. Evento estremo da Bora Hs= 5.18 m; Dir=70°N; Tp=8.95 s.



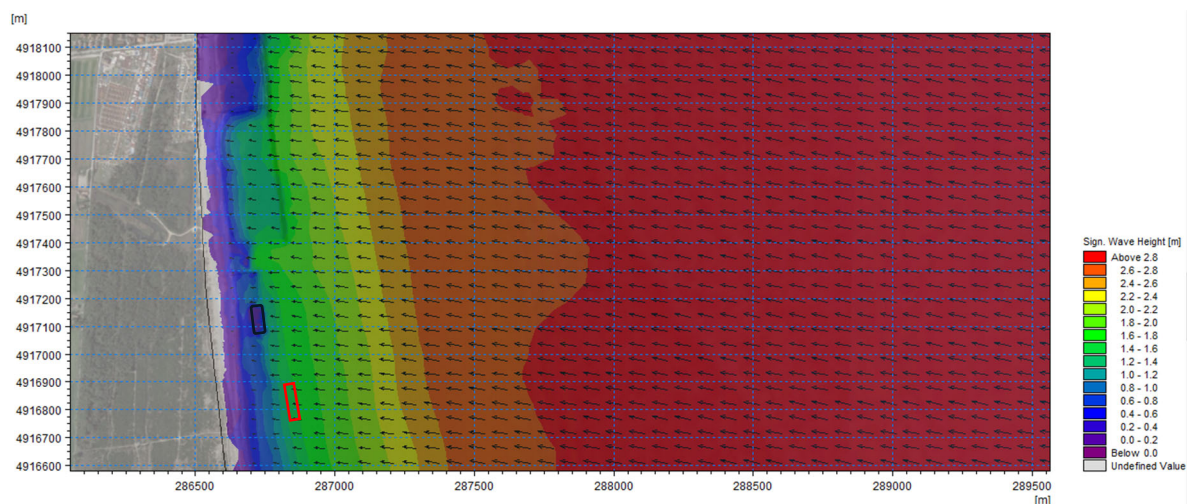


Fig. 27 Dettaglio dell'andamento del moto ondoso. Stato Attuale dell'area. Evento estremo da Scirocco  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$

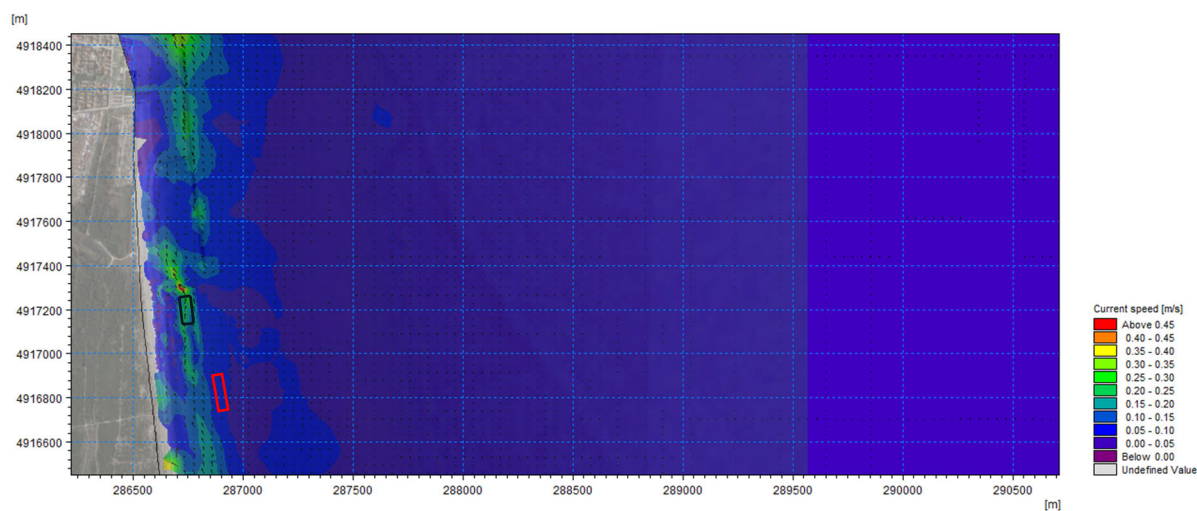


Fig. 28 Dettaglio dell'andamento del campo di corrente. Stato Attuale dell'area. Evento estremo da Scirocco  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$  s.

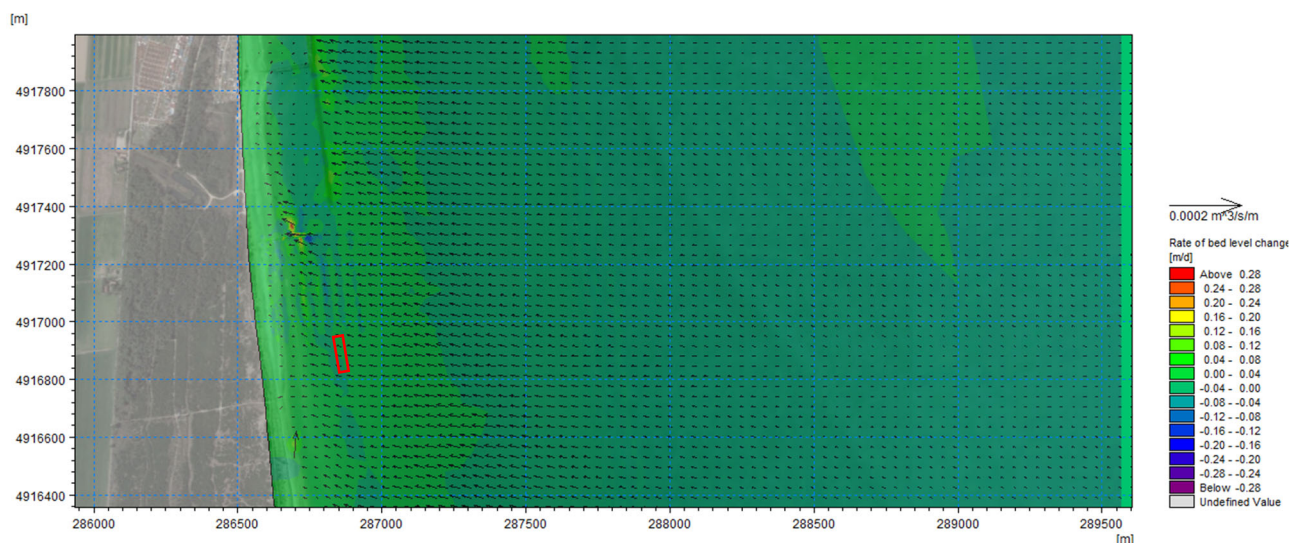


Fig. 29 - Mappe di sediment transport dell'intero tratto di costa per l'evento estremo da Scirocco  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$ .

Nello stato di fatto è evidente la capacità della barriera sommersa realizzata dal comune di Ravenna nella primavera del 2020 a ridurre l'attacco ondoso. Questo intervento non può essere paragonato a quanto qui proposto perchè ha una estensione pari a 800 m, rispetto all'intervento Natureef che interessa un tratto di costa pari a 100 m.

Nella zona protetta si osserva una riduzione dell'onda ( $K_t$  coefficiente di trasmissione) che varia tra 0.54 e 0.64 ( e Fig. 27), e di conseguenza le correnti ed il trasporto di sedimenti.

Dalle simulazioni dell'evento estremo con tempo di ritorno pari a 25 anni, mostrato nelle figure con i risultati mostrati nelle figure da a Fig. 26, sono stati estratti i parametri utilizzati per progettare la stabilità dell'opera come da Relazione tecnica del PFTE (sezione 09\_2023\_6.5\_059\_PFTE\_RT\_R0).

La alternativa S1 è posizionata in un tratto lontano dagli altri interventi, mentre la Alternativa S2 molto vicina al pennello realizzato nel 2020. Questo pennello è stato costruito con pali che lo rendono quasi permeabile all'attacco delle onde ed alla corrente.

## 6.2 Alternativa S1

Le condizioni precedenti sono state simulate con la presenza dell'opera come da soluzione S1. Vengono riprodotte in seguito le mappe con i risultati delle modellazioni (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** - Fig. 35).

### 6.2.1 Modellazione dei campi d'onda

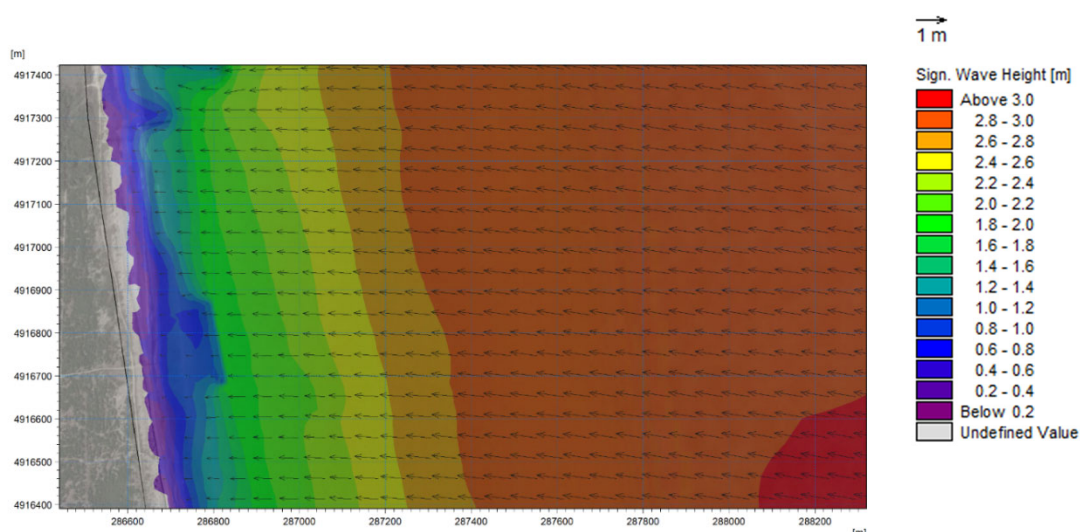


Fig. 30 Alternativa S1. Dettaglio dell'andamento del moto ondoso. Alternativa S1. Evento estremo da Bora  $H_s = 5.18$  m;  $Dir = 70^\circ N$ ;

$T_p = 8.95$

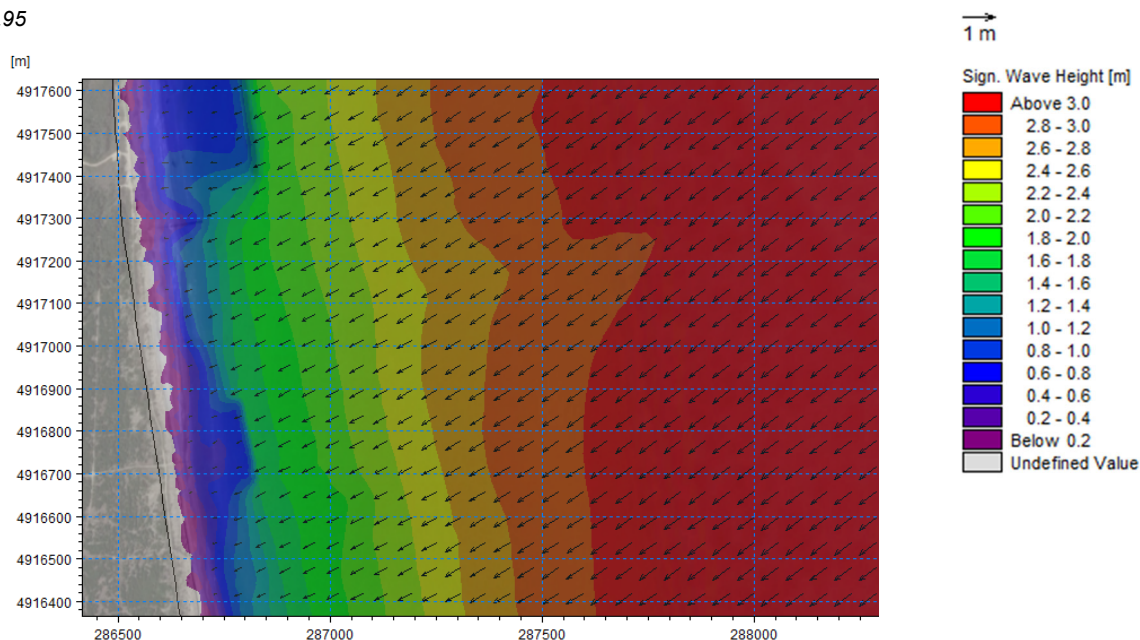




Fig. 31 Dettaglio dell'andamento del moto ondoso. Soluzione S1. Evento estremo da Scirocco  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$  s

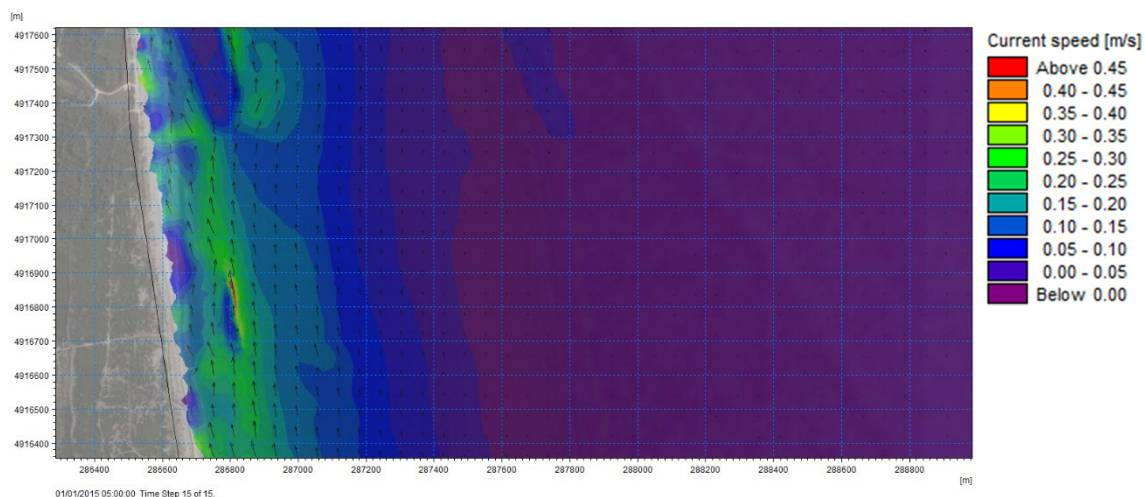


Fig. 32 Mappe di corrente del mare dell'intero tratto di costa per l'evento estremo da Scirocco.  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$

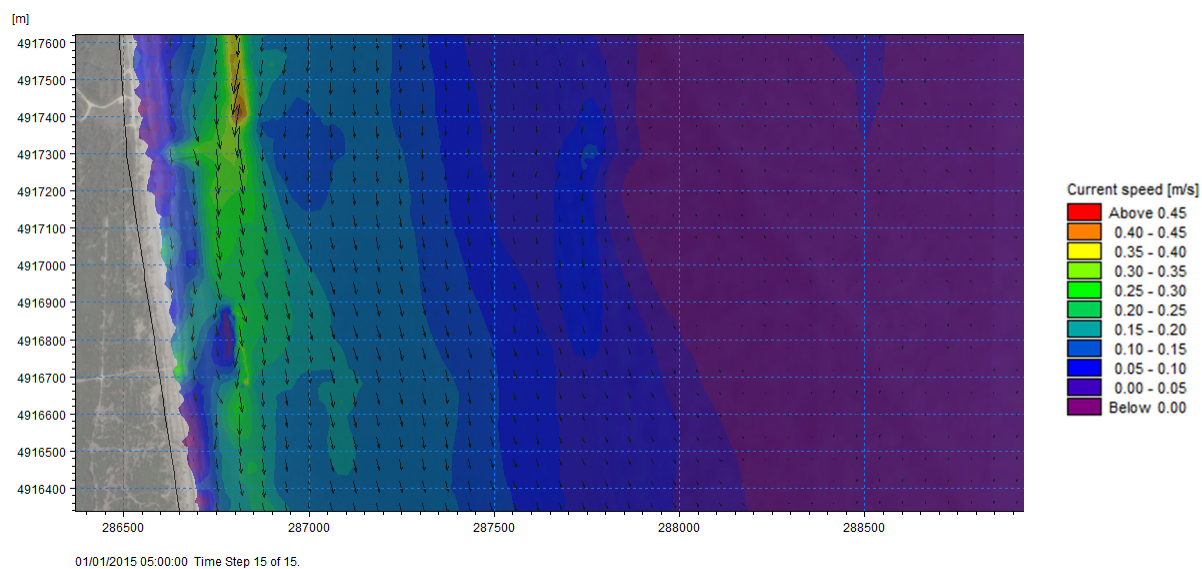


Fig. 33 Mappe di corrente del mare dell'intero tratto di costa. Soluzione S1. Evento estremo da Bora  $H_s= 5.18$  m;  $Dir=70^\circ N$ ;  $T_p=8.95$

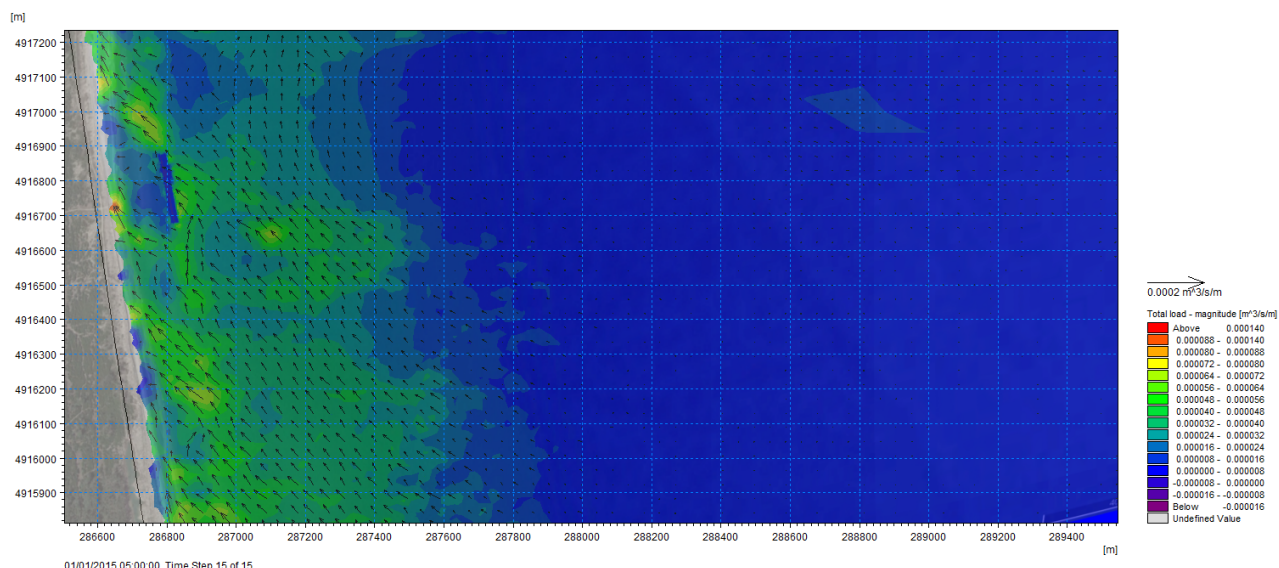


Fig. 34 Mappe di sediment transport del mare dell'intero tratto di costa per l'evento estremo da Bora.  $H_s = 5.18$  m;  $Dir = 70^\circ N$ ;  $T_p = 8.95$ .

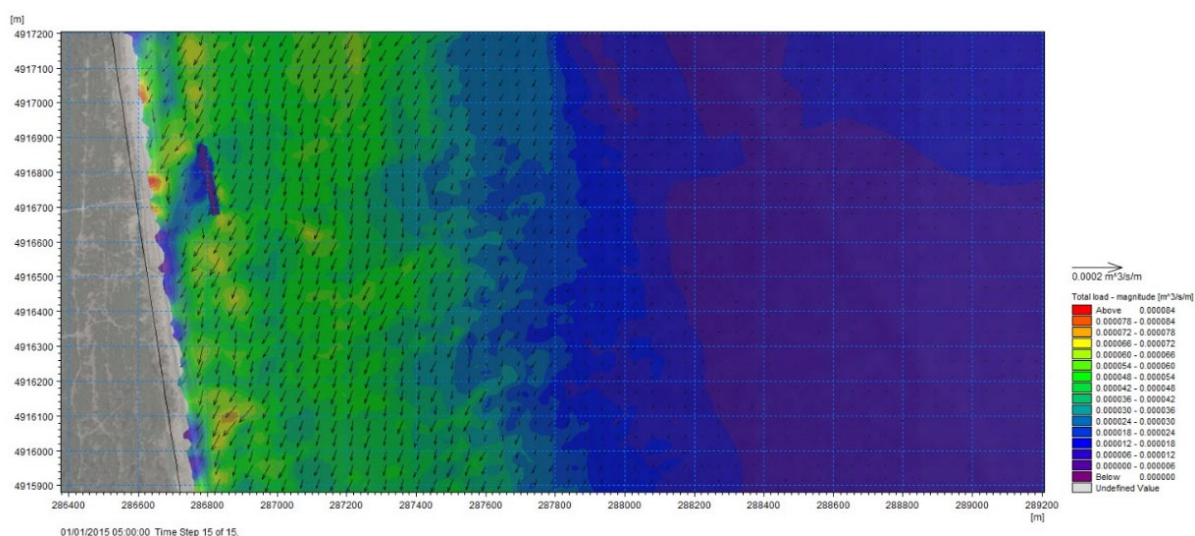


Fig. 35 Mappe di sediment transport dell'intero tratto di costa per l'evento estremo da Scirocco.  $H_s = 3.11$  m;  $Dir = 100^\circ N$ ;  $T_p = 7.82$

- L'onda sente poco l'effetto dell'opera per condizioni basse, mentre durante eventi intensi l'onda frange sull'opera e riduce notevolmente la sua energia. Da queste simulazioni risulta un coefficiente di trasmissione  $k_t$  (Altezza d'onda al trasmessa/ altezza d'onda al largo dell'opera) che raggiunge il 40%.

- Il tratto di costa protetto è maggiore dell'estensione dell'opera 'proiettato' nella direzione dell'attacco ondoso, che per rifrazione giunge all'opera quasi perpendicolare per entrambe le direzioni.
- La riduzione dell'attacco ondoso in presenza di della nuova opera si traduce in una evidente riduzione della corrente a tergo dell'opera e di conseguenza in una riduzione del trasporto (Fig. 32 e per le correnti e Fig. 34 e Fig. 35 per il trasporto).

## 6.3 Alternativa S2

I risultati della modellazione con MIKE21 per la Alternativa S2 vengono mostrati nelle figure successive. (Fig. 36 - Fig. 41).

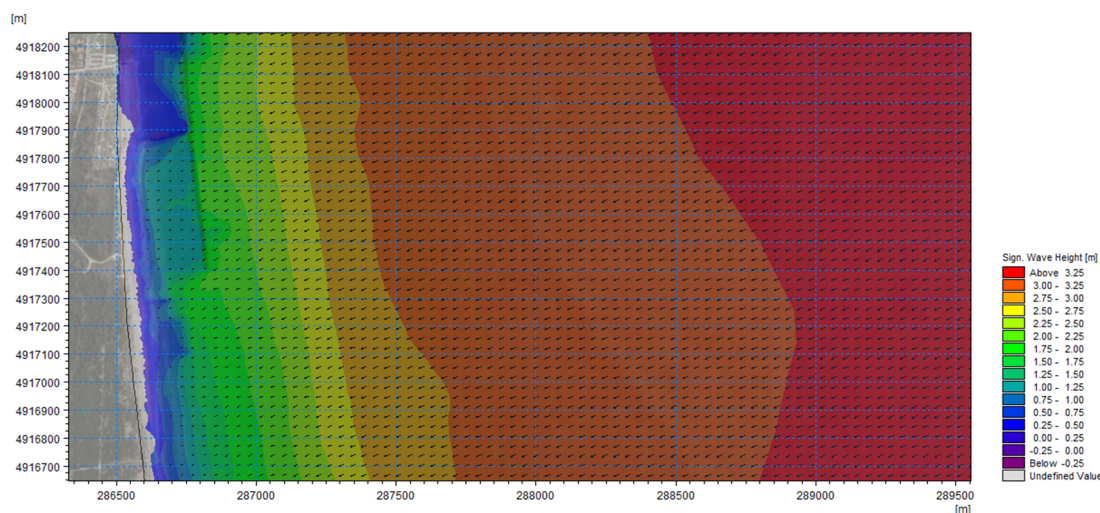


Fig. 36 Dettaglio dell'andamento del moto ondoso. S2. Evento estremo da Bora  $H_s=5.18$  m;  $Dir=70^\circ N$ ;  $T_p=8.95$

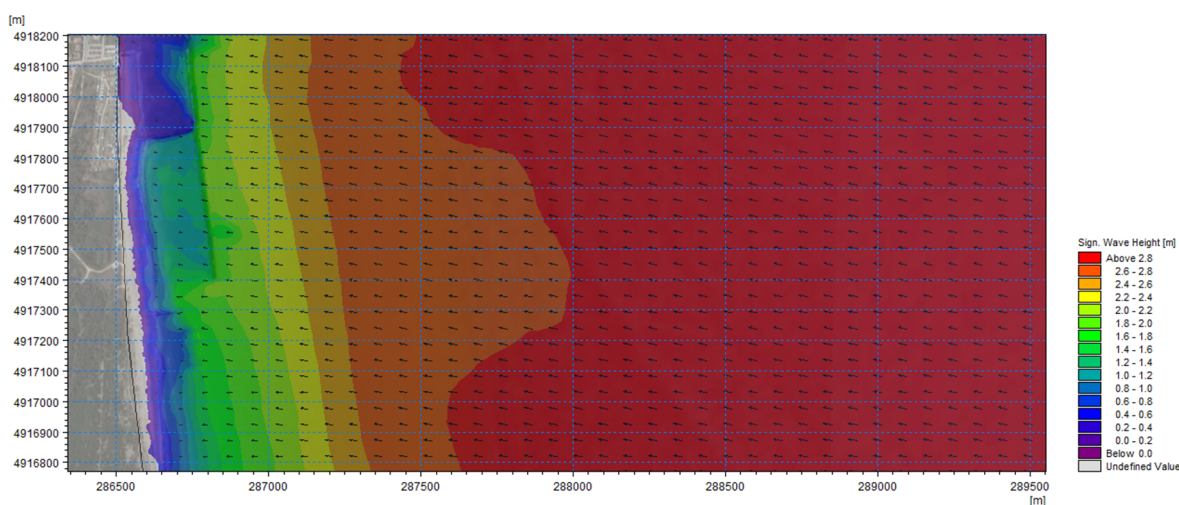


Fig. 37 Dettaglio dell'andamento del moto ondoso. Evento estremo da Scirocco  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$  s. Soluzione S2.



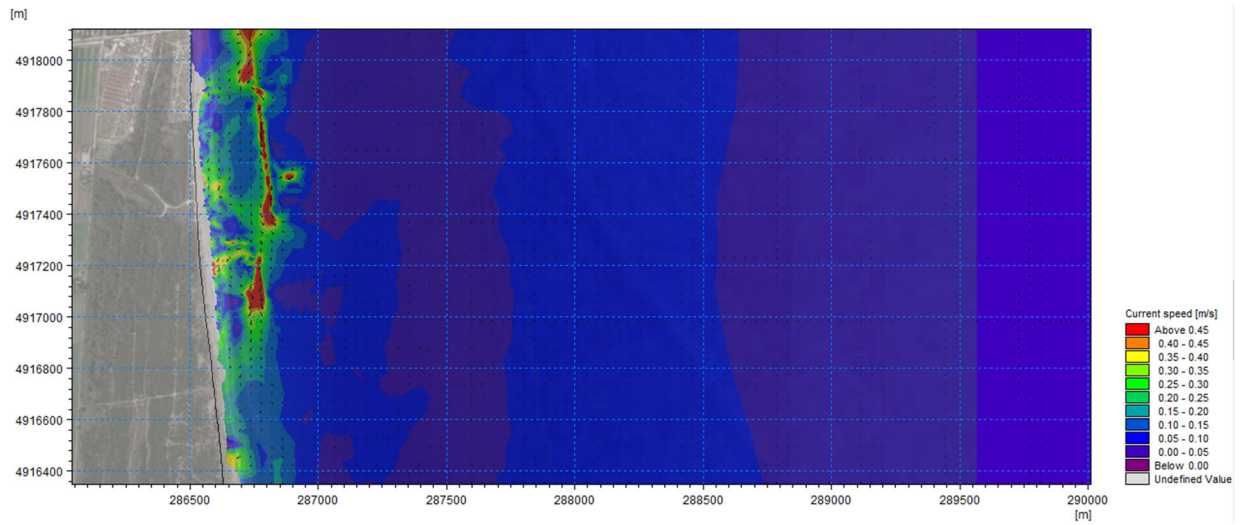


Fig. 38 Mappe di corrente. Evento estremo da Bora  $H_s = 5.18$  m;  $Dir = 70^\circ N$ ;  $T_p = 8.95$ . Soluzione S2.

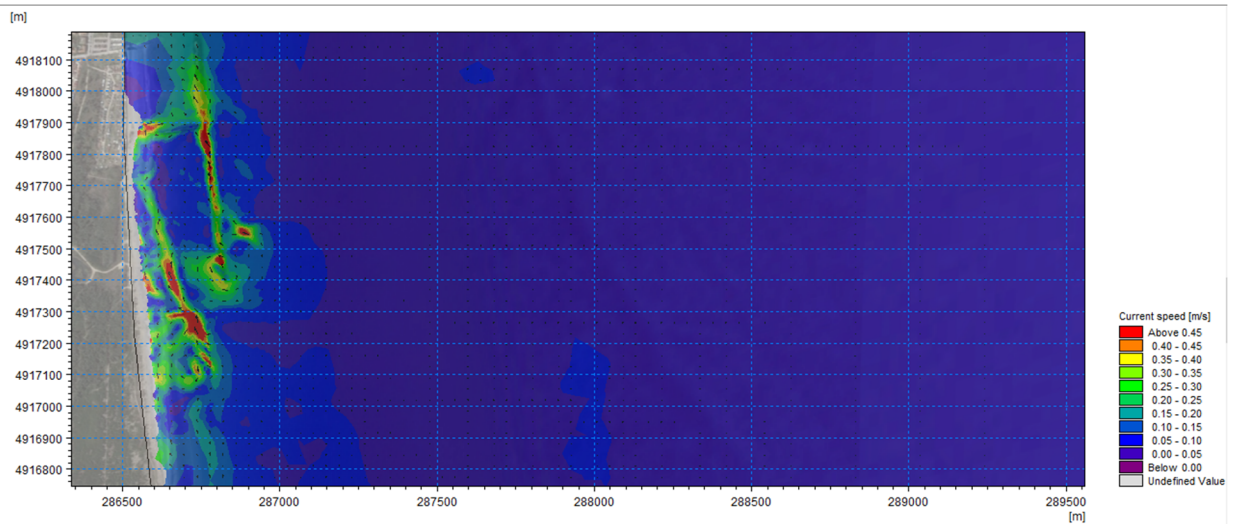


Fig. 39 Mappe di corrente per l'evento estremo da Scirocco.  $H_s = 3.11$  m;  $Dir = 100^\circ N$ ;  $T_p = 7.82$  Soluzione S2.



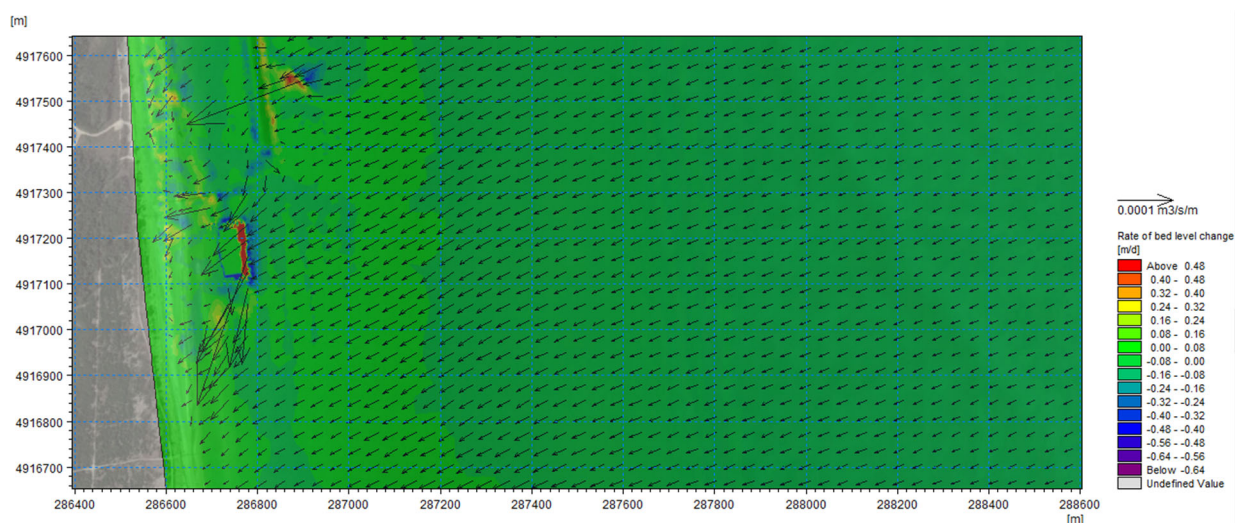


Fig. 40 Mappe di sediment transport per l'evento estremo da Bora.  $H_s=5.18$  m;  $Dir=70^\circ N$ ;  $T_p=8.95$ . Soluzione S2.

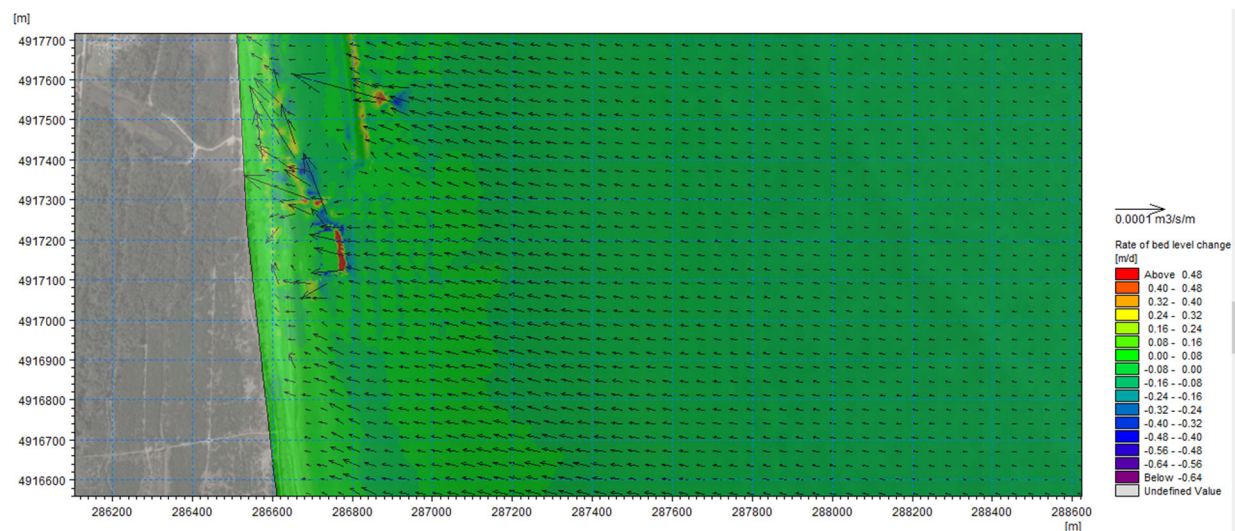


Fig. 41 Mappe di sediment transport per l'evento estremo da Scirocco.  $H_s=3.11$  m;  $Dir=100^\circ N$ ;  $T_p=7.82$ . Soluzione S2.

La soluzione S2 è molto differente rispetto alla S1 ed alla barriera presente a sud di Lido di Dante realizzata nel 2020. Le differenze possono essere così riassunte:

- L'intervento è realizzato dalla profondità di 1.80 m circa, mentre l'altra dai 2.50 m, e di conseguenza molto più prossima alla battigia.
- La sommergenza varia tra 1.20 m (come le altre soluzioni) a 2.40 m nella zona più al largo. Il coefficiente di trasmissione è definito come il rapporto dell'altezza d'onda a tergo ed al largo dell'opera, indipendentemente dalla profondità alla quale è stato estratto.

I valori di  $K_t$  ricavati sono dell'ordine di 0.38 e 0.41 per le condizioni esaminate. I coefficienti di trasmissione sono paragonabili a quelli stimati per la alternativa S1.

Sull'opera si osserva una intensa corrente dovuta al frangimento, ed una riduzione a tergo, per la quale ci si aspetta una riduzione del trasporto. L'estensione di questa opera è molto ridotta (100 m) e di conseguenza il tratto di litorale interessato.

Per quanto riguarda gli effetti presso i piccoli varchi tra i diversi moduli con cui è realizzata l'opera, abbiamo preferito riferirci ad i risultati del codice Xbeach, e sono commentati nella prossima sezione di questo documento.

## 6.4 Evoluzione della linea di riva

L'ultima analisi svolta riguarda la stima dell'evoluzione della linea di riva in corrispondenza dell'opera. Questa analisi ha uno scopo comparativo, nello specifico il confronto tra la posizione della linea di riva in presenza ed in assenza di una o più varianti di opere. È stata quindi scelta una condizione iniziale di batimetria, estratta l'isobata a livello 0, e simulata la evoluzione in seguito all'attacco ondoso di un anno rappresentativo. Per questa analisi si è proceduto considerando la *mesh* e la batimetria più recente (9 novembre 2023), e come anno rappresentativo si è scelto il 2015, sia perché mostra una continuità di dati sia perché è stato interessato da una sequenza di mareggiate significative. È chiaro che in questa analisi si vuole approfondire il fenomeno partendo dallo stato della costa recente, con forzanti tipiche del sito.

Per l'analisi è stato utilizzato il tool Shoreline Modelling del software Mike21. Il modulo di simulazione dell'evoluzione simula la variazione della linea di riva nel tempo. La linea di riva è stata descritta inizialmente con una linea formata da N punti equidistanti, in questo caso di 94 punti alla distanza reciproca di 25 m, per coprire una estensione di circa 2.3 km. Una mappa della posizione dei punti è mostrata nella Fig. 42. Il primo punto è posizionato a NW e la linea di riva continua verso SE. L'opera è collocata in corrispondenza dei punti 45-55.

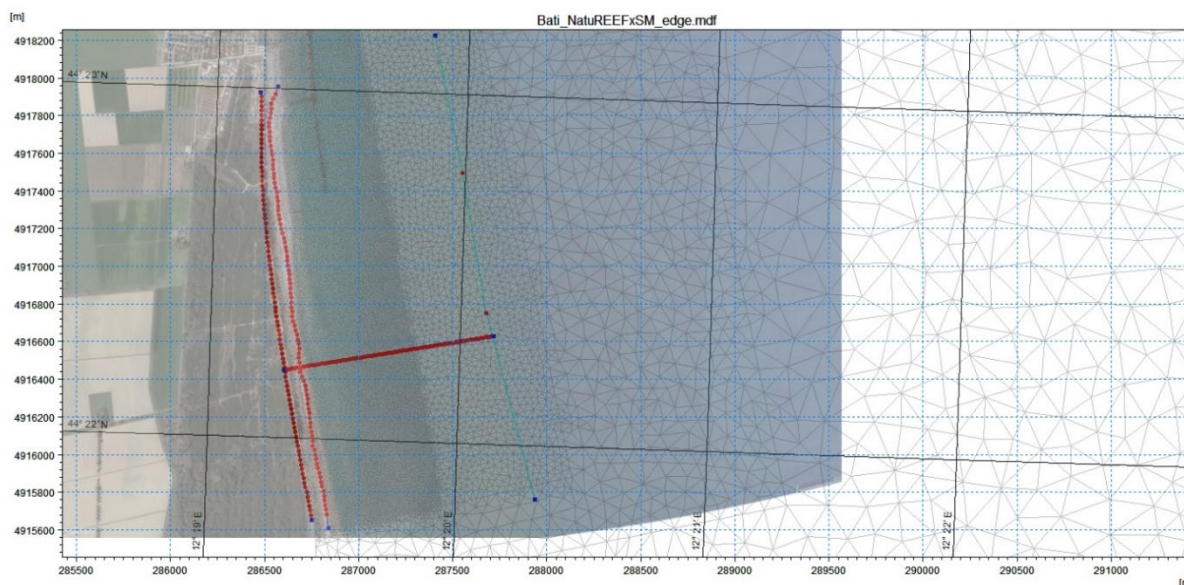


Fig. 42 Posizione della baseline e della linea di riva per le simulazioni di evoluzione con modulo Shoreline Modelling (proiezione UTM33/WGS84).

La modellazione della evoluzione della linea di riva è molto più rapida della modellazione idrodinamica, e fornisce un'indicazione dell'efficacia e dell'impatto delle soluzioni proposte in termini di impatto sulla battigia. In questo approccio si considera un anno o più anni rappresentativi del clima, e si ipotizza che questo possa essere ripetibile. In questo studio ci siamo riferiti agli anni 2015 e 2016 come rappresentativi, questo perché completi di dati (Si veda la Fig. 5). Nelle figure successive viene mostrata l'evoluzione per un intero anno. Nella prima con la situazione attuale e nella seconda con l'opera. Si ricorda come le simulazioni della linea di riva vanno prese a scopo comparativo. È evidente in Fig. 43 la grande capacità dell'opera di proteggere il tratto di costa dietro l'opera stessa, e le nicchie di erosione in corrispondenza delle testate.

#### 6.4.1 Alternativa S1

Il modello è stato utilizzato per simulare l'evoluzione della linea di riva in corrispondenza del tratto centrale tra Lido di Dante e la foce del Bevano, dove è stata ipotizzata la alternativa S1.

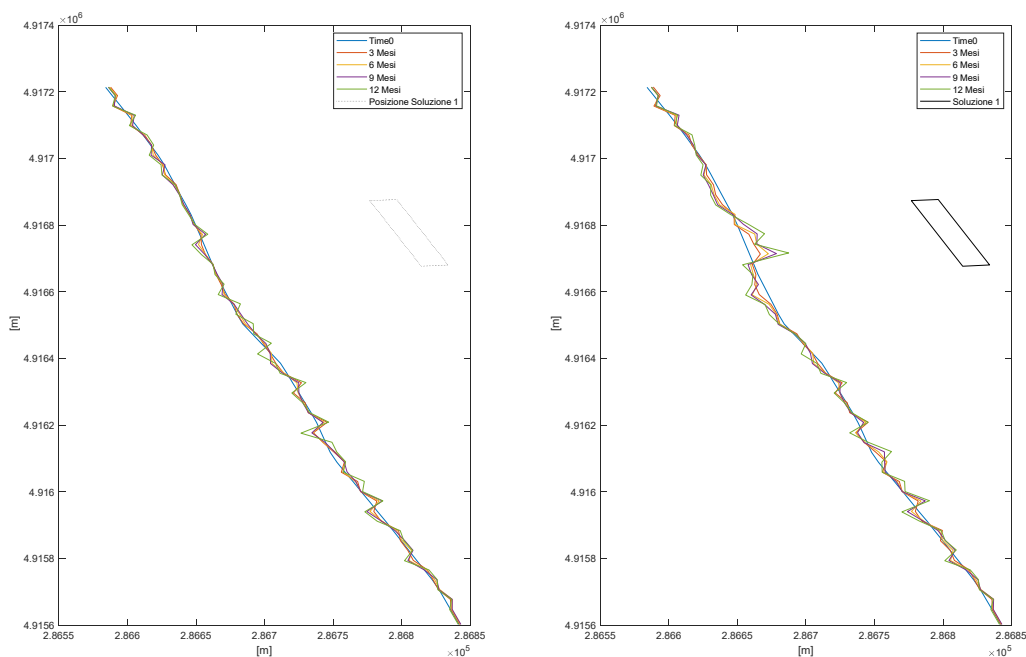


Fig. 43 Simulazione dell'evoluzione della linea di riva per un anno di attacco ondoso (coordinate UTM33/WGS84) per la Alternativa S1.

Nell'immagine (Fig. 44) georeferenziata sono riportati per confronto le posizioni della linea di riva simulate dopo un anno tipico, rispetto alla posizione iniziale in presenza dell'opera alternativa S1.

Questo risultato presentato nella prima proposta progettuale, e presenta una delle maggiori criticità della soluzione S1. È evidente la capacità dell'opera di proteggere la linea di riva, che in prossimità presenta un avanzamento significativo della battigia di circa 5 m, ma molto marcate sono le 'nicchie di erosione' provocate dalla diffrazione delle onde in prossimità delle testate dell'opera.

## 6.4.2 Alternativa S2

Lo stesso modello è stato applicato alla Alternativa S2. In figura si osserva sempre in blu la posizione al tempo 0.

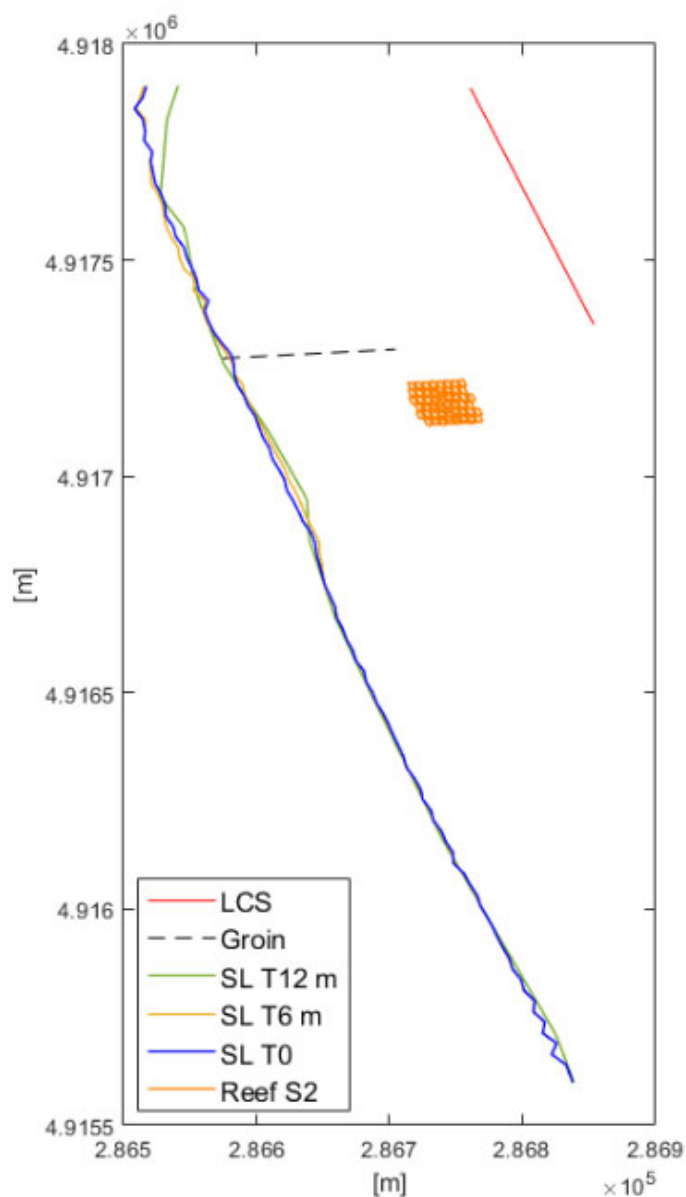


Fig. 44 Simulazione dell'evoluzione della linea di riva considerando l'attacco del moto ondoso di un anno significativo per la alternativa S2 (proiezione UTM33/WGS84).

Si osserva un lieve arretramento della linea di riva in corrispondenza del pennellino, ciò è dovuto al fatto che il pennellino è stato modellato come opera permeabile alle correnti ed alle onde. In corrispondenza del reef (S2) si osserva un avanzamento non uniforme che varia dai 3 ai 5 m. Tra il lato settentrionale del reef S2 ed il pennellino sostanzialmente una condizione di stabilità. Contrariamente alla soluzione S1 non si evidenzia un effetto erosivo concentrato in

prossimità delle due estremità (non si può ora parlare di testate in quanto la forma dell'opera è rettangolare).

In seguito alle analisi mostrate si può concludere:

Gli impatti sembrano essere lievi, si nota la formazione dei vortici in corrispondenza delle testate, con una locale effetto di erosione localizzata. Per quanto riguarda gli effetti sulla battigia, la parte protetta è ovviamente legata all'estensione dell'opera, non si nota una erosione localizzata nelle sezioni adiacenti, come avviene per i pennelli o per le opere parallele più alte di quella in progetto.

Ci si può aspettare per gli anni successivi un andamento analogo, con un avanzamento della battigia di circa 3 m/anno in prossimità dell'opera.



## 7 RISULTATI XBEACH

Le performance del reef sono state stimate tramite modellazione idrodinamica e morfodinamica con il modello numerico XBeach, implementato in modalità surfbeat, bidimensionale mediato sulla profondità (2DH).

### 7.1 Trasmissione ondosa con e senza reef

Per uno studio più dettagliato della trasmissione dell'onda per la alternativa S2 e dell'idro morfodinamica si è proceduto anche con i risultati del modello implementato con Xbeach. Rispetto al precedente modello è stato possibile definire con precisione la posizione dei singoli blocchi, e simulare le correnti ed il trasporto tra i blocchi.

Sono stati selezionati differenti istanti e due transetti che attraversano la zona del reef (Fig. 45) per verificare l'efficacia del reef nella riduzione dell'altezza d'onda. Il confronto per l'altezza d'onda è stato fatto tra le simulazioni con e senza il reef in corrispondenza dello stesso transetto.

Il coefficiente di trasmissione  $K_t$  è stato calcolato dal rapporto tra l'altezza d'onda in due punti, davanti e dietro al reef, che si possono osservare nella Fig. 46.

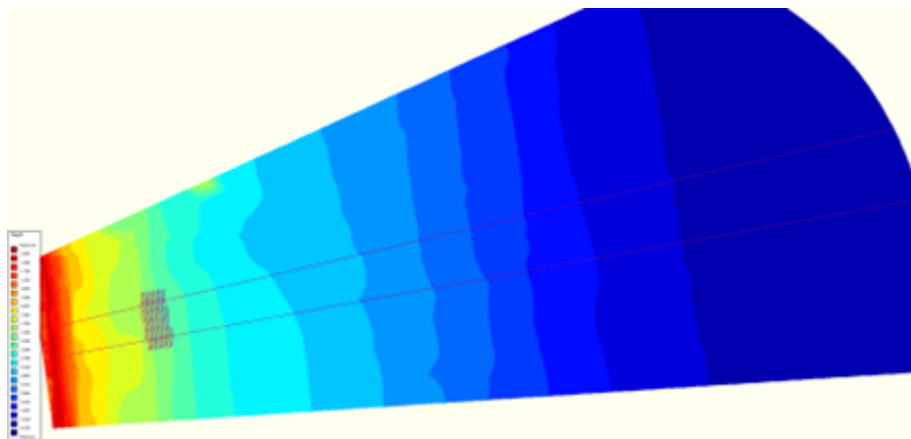


Fig. 45 Due transetti selezionati. EPSG 3263 – WGS84/UTM zona 33N



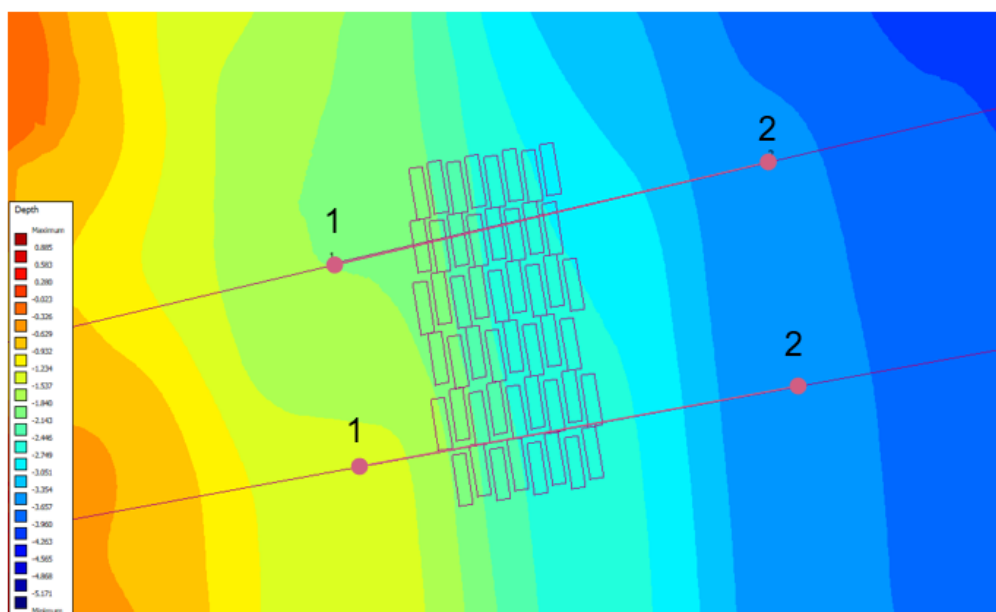


Fig. 46 Punti di estrazione delle condizioni ondose lungo 2 transetti.

### 7.1.1 Propagazione onda sul reef

Questo confronto è stato svolto per 7 istanti delle mareggiate descritte nella sezione **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** La Tab. 11 mostra, per entrambi i transetti, il coefficiente di trasmissione per entrambe le situazioni in presenza (alternativa S2) ed in assenza del reef (Alternativa S0). L'altezza d'onda è stata estratta sui fondali di 1.5 m ed 4 m. Il coefficiente di trasmissione è pari al rapporto  $H_{in}/H_{out}$  ed è espresso in percentuale.

Tab. 11 Coefficiente di trasmissione e attenuazione ondosa in quattro timestep e in due transetti per la mareggiata di Bora.

Hoff	T	dir	Transect 1						Transect 2					
			Hout	Ht S0	Ht S2	KtS0	Kt S2	% Kt red.	Hout2	Ht S0	Ht S2	Kt S0	Kt S2	% Kt red.
m	s	°N	m	m	m	%	%	%	m	m	m	%	%	%
1.38	7.69	85.8	0.56	0.56	0.53	100.0	97.9	6.8	0.55	0.49	0.47	89.7	84.6	5.7
3.23	7.4	61	0.86	0.82	0.36	95.5	42.2	55.8	0.99	0.81	0.33	81.9	33.2	59.4
2.81	7.7	51	0.84	0.62	0.58	73.5	68.5	6.8	0.93	0.59	0.56	63.6	60.5	4.9
3.1	8	60	1.04	0.67	0.61	64.5	58.7	8.9	0.83	0.61	0.55	73.0	66.6	8.8
2.84	7.1	32	1.02	0.64	0.57	63.0	56.4	10.6	1.01	0.63	0.56	62.1	55.3	10.9

Si può notare dalla tabella che il coefficiente di trasmissione in presenza del reef S2 mostra valori compresi tra il 42% ed il 68% per le condizioni d'onda maggiori di  $H_s = 2.0$  m al largo, cioè

circa 1 m sul fondale di 4 m. Quando le onde sono basse non subiscono significative modifiche dovute alla presenza del reef. Si osserva una attenuazione ondosa maggiore presso il transetto meridionale, questo perché davanti era presente durante il rilievo batimetrico di dettaglio una barra, che funge in continuità con l'opera a dissipare l'energia ondosa.

L'ordine di grandezza del coefficiente di trasmissione è simile a quanto stimato mediante il Mike21. Di seguito vengono presentati alcuni profili trasversali lungo i due transetti dove la linea rossa rappresenta l'altezza d'onda nella simulazione senza reef e la linea blu l'altezza d'onda in presenza del reef (Fig. 47).

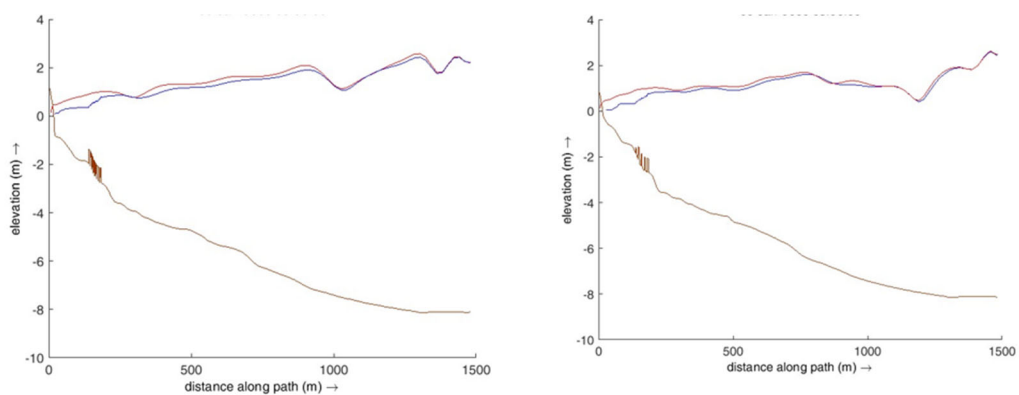


Fig. 47 Propagazione dell'onda dal largo a riva

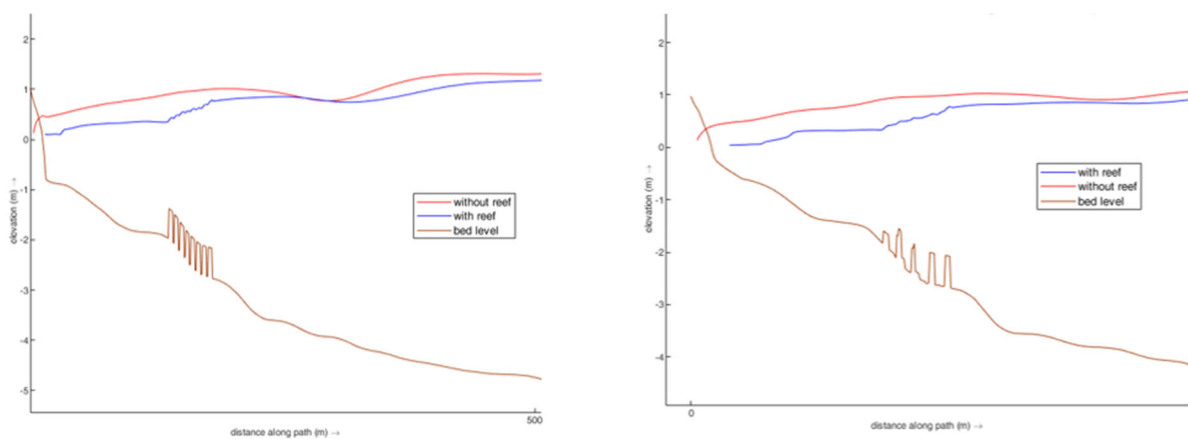


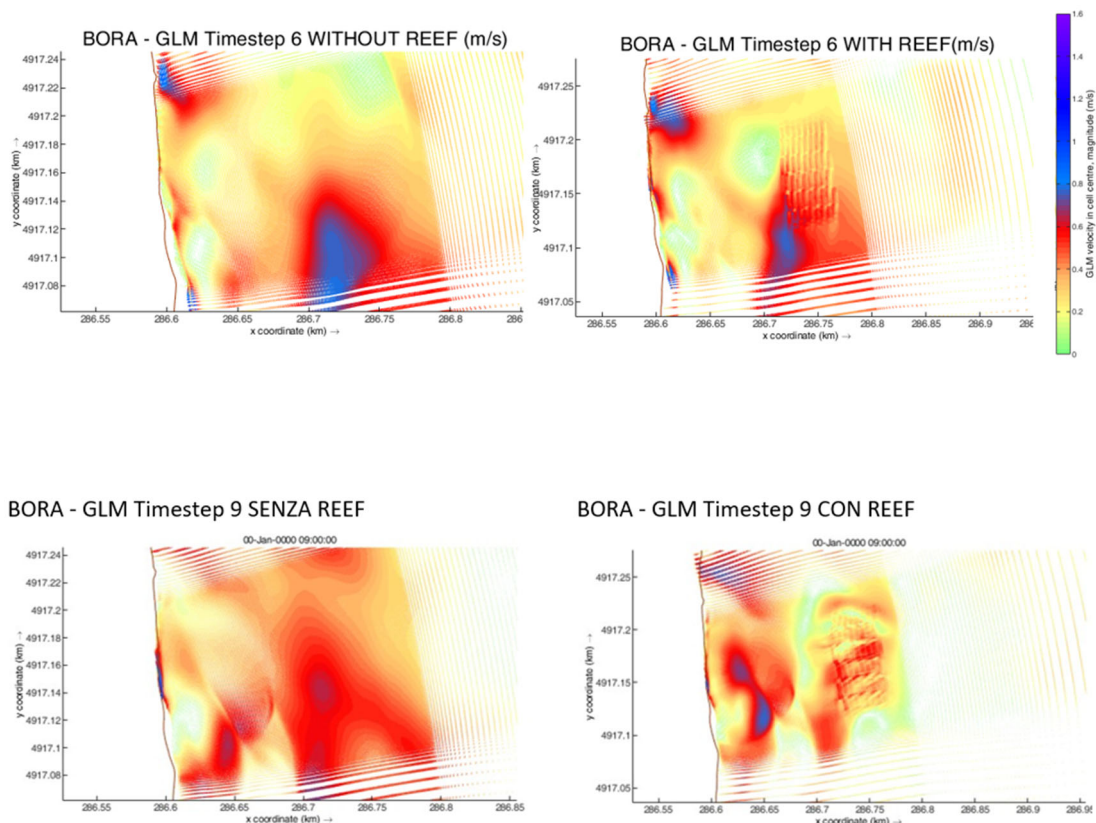
Fig. 48 Propagazione dell'onda dal largo a riva

Qui di seguito vengono mostrati gli ingrandimenti delle precedenti immagini per mostrare come l'altezza d'onda si riduca proprio in corrispondenza della zona del reef.

## 7.2 Campi di corrente

Questa sezione mostra le mappe di corrente prodotte mediante il codice Xbeach. Per tutte le simulazioni è proposta la mappa in assenza di reef (S0).

Per la particolare configurazione batimetrica in cui a sud ovest del reef si ha una riduzione del fondale, si osserva una forte corrente (blu in figura), che è presente anche in presenza del reef. Nelle immagini successive vengono mostrate le mappe per diversi istanti della modellazione delle mareggiate, sia da Bora che da Scirocco. È evidente la forte riduzione delle intensità delle velocità (Fig. 49).



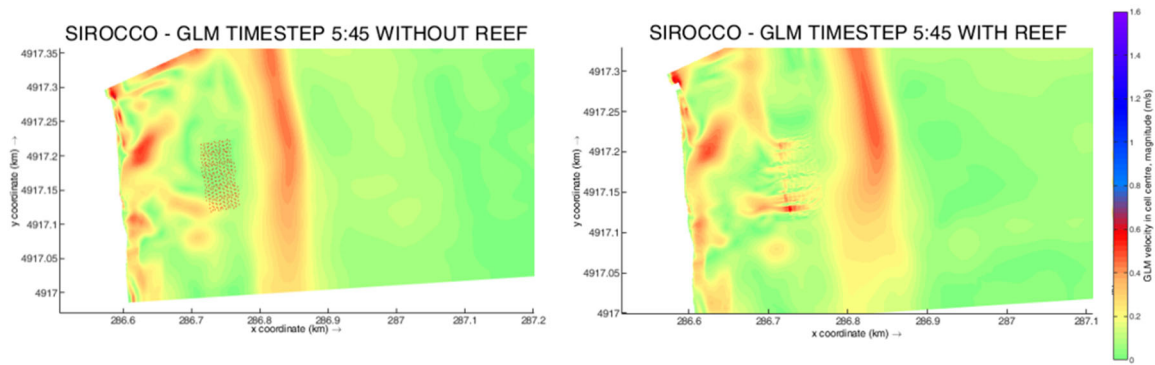


Fig. 49 Campi di velocità in assenza (sinistra) (S0) ed in presenza (destra) del reef (S2).

### 7.3 Risultati relativi al trasporto sedimentario

La Fig. 50 mostrano la morfodinamica in assenza e presenza di reef (S2) in seguito alla mareggiata di Bora.

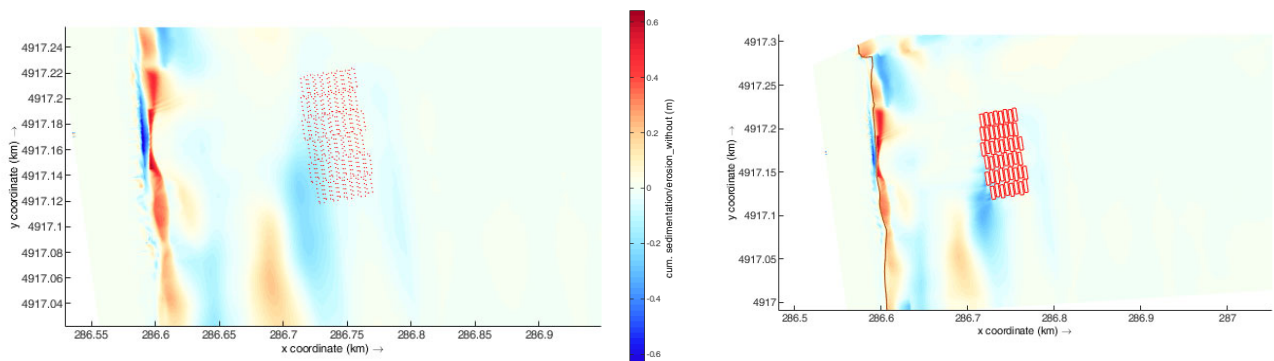


Fig. 50 Sedimentazione ed erosione durante la mareggiata di Bora

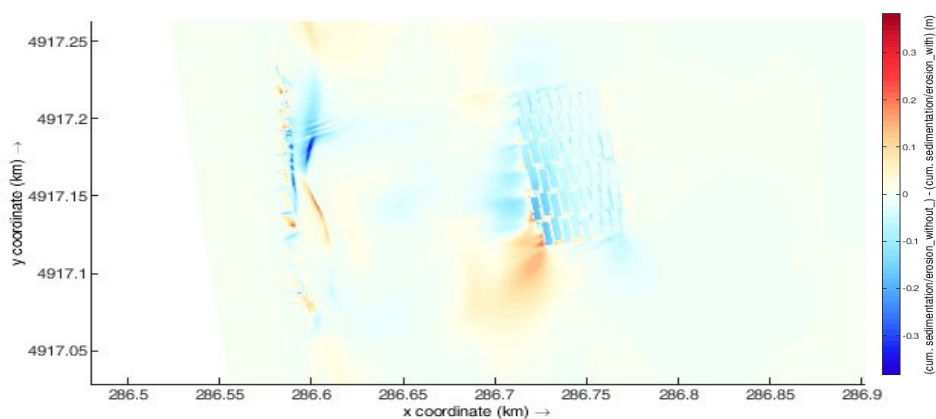


Fig. 51 Differenza tra sedimentazione ed erosione (senza – con il reef), mareggiata di Bora.

La differenza tra le due situazioni è riprodotta nella figura seguente (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) che ne mostra la differenza: i valori negativi, di colore blu, indicano minore erosione con l'opera S2, mentre i positivi (colori caldi) maggiore erosione. In sintesi, il colore blu indica un effetto positivo che il reef esercita sulla morfologia.

La zona più esposta è l'angolo SW del reef sempre in corrispondenza del gradino formato dal fondale. Ci si aspetta quindi una regolarizzazione della morfologia. Nella zona interna al reef è evidente una leggera sedimentazione ed un accumulo sulla battigia oltre ad una leggera erosione.

Nelle simulazioni di Scirocco (Fig. 52) la differenza non è così pronunciata, il che potrebbe suggerire che il reef non causa effetti così significativi alla morfologia con una mareggiata di questo tipo. La differenza che si vede in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** rimarca le lievissime differenze.

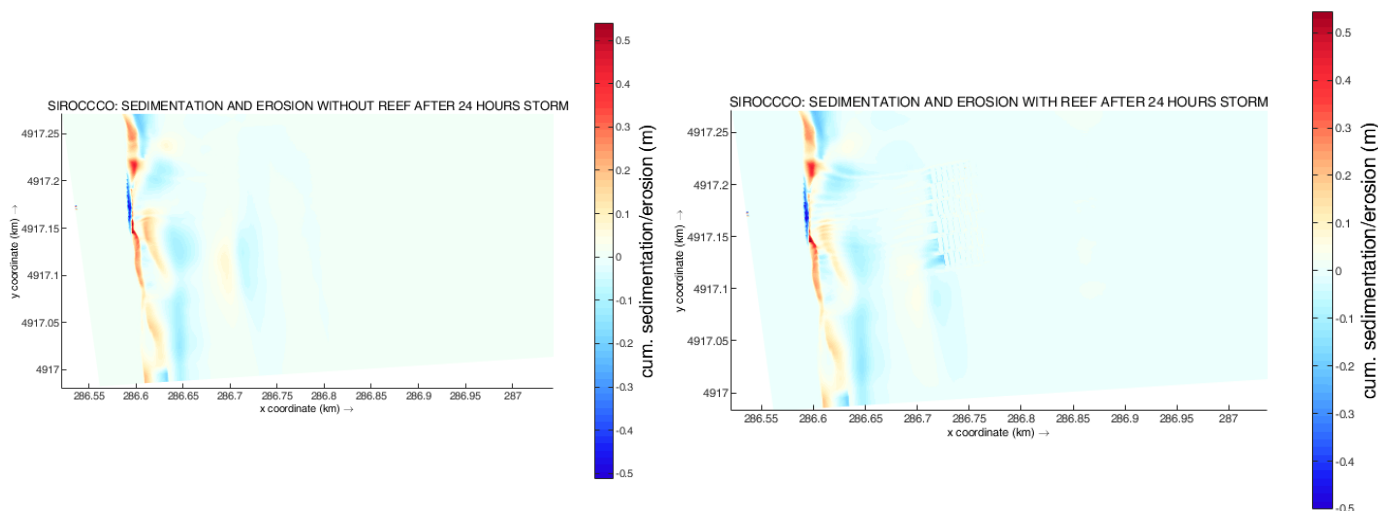
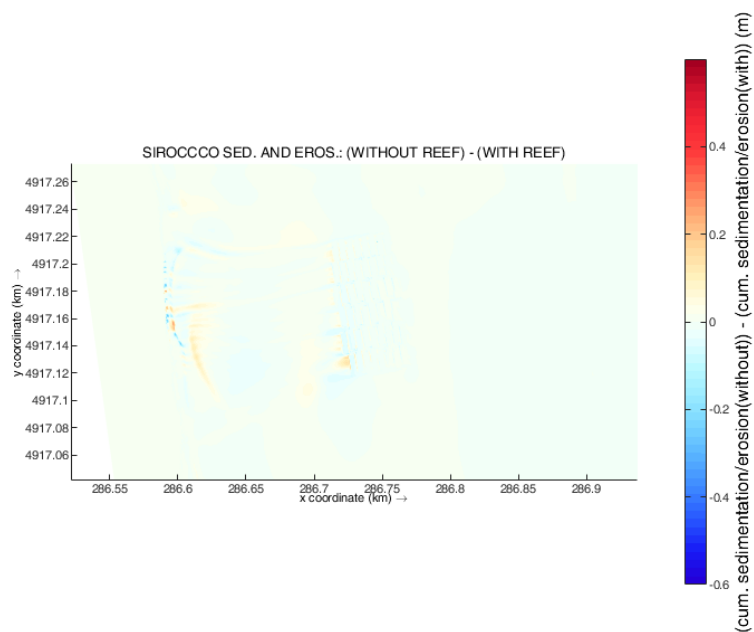


Fig. 52 Sedimentazione ed erosione durante la mareggiata di Scirocco. Sx) senza reef (alternativa S0) dx) con reef (Alternativa S2)



*Fig. 53 Differenza tra sedimentazione ed erosione (senza – con il reef), mareggiata di Scirocco.*

## 8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente studio dopo aver sintetizzato le caratteristiche meteorologiche del sito, vengono presentate le 3 alternative, e come queste sono state schematizzate per la modellazione ed implementate nei codici utilizzati, che sono la suite Mike21 comprensiva del modulo SM (Shoreline Modelling) ed il codice Opensource XBeach. Si è scelto di completare lo studio anche con Xbeach principalmente per i seguenti motivi: offre la possibilità di meglio rappresentare i singoli moduli nella mesh ed ha implementata la modalità surf beat.

Nello stato di fatto è evidente la capacità della barriera sommersa realizzata dal comune di Ravenna nella primavera del 2020 a ridurre l'attacco ondoso. Questo intervento non può essere paragonato a quanto qui proposto perché ha una estensione pari a 800 m, rispetto all'intervento di LIFE NatuReef che interessa un tratto di costa pari a 100 m.

Nella zona protetta si osserva una riduzione dell'onda ( $K_t$  coefficiente di trasmissione: Altezza d'onda al trasmessa/ altezza d'onda al largo dell'opera) che varia tra 0.54 e 0.64 ( e Fig. 27), e di conseguenza le correnti ed il trasporto di sedimenti.

Dalle simulazioni dell'evento estremo con tempo di ritorno pari a 25 anni, mostrato nelle figure con i risultati mostrati nelle figure da a Fig. 26, sono stati estratti i parametri utilizzati per progettare la stabilità dell'opera come da Relazione tecnica del PFTE (sezione 09\_2023\_6.5\_059\_PFTE\_RT\_R0).

Per le alternative successive S1 ed S2 sono state considerate le caratteristiche dell'opera in seguito alla posa, non è stata simulata la crescita delle ostriche e sabellaria sia sulla superficie superiore che nei varchi (per la soluzione S2). I risultati sono a favore di sicurezza perché la crescita porterà ad un aumento della scabrezza, ad una riduzione della profondità quindi a dei risultati in termini di agitazione ondosa, idrodinamismo e trasporto minore rispetto a quanto osservato per le nostre condizioni.

La Alternativa S1, già presentata alla conferenza dei servizi, assomiglia ad una larga barriera sommersa (sommersione di circa 1.20 m) coperta da uno strato di ostriche su un materasso. Il comportamento idrodinamico è molto simile a quello di una tradizionale opera sommersa. Per le condizioni simulate si osserva un coefficiente di trasmissione  $k_t$  che raggiunge il 40%.

La riduzione dell'attacco ondoso in presenza della scogliera di LIFE NatuReef si traduce in una evidente riduzione della corrente a tergo dell'opera e di conseguenza in una riduzione del trasporto (Fig. 32 e per le correnti e Fig. 34 e Fig. 35 per il trasporto).



Il tratto di costa protetto è maggiore dell'estensione dell'opera 'proiettato' nella direzione dell'attacco ondoso, che per rifrazione giunge all'opera quasi perpendicolare per entrambe le direzioni.

La Alternativa S2 è molto differente rispetto alla S1 ed alla barriera presente a sud di Lido di Dante realizzata nel 2020. Le differenze possono essere così riassunte:

L'intervento è realizzato dalla profondità di 1.80 m circa, mentre l'altra dai 2.50 m, e di conseguenza molto più prossima alla battigia.

La sommergezza varia tra 1.20 m (come la precedente soluzione) a 2.40 m nella zona più al largo. In questi risultati definiamo sempre coefficiente di trasmissione come il rapporto dell'altezza d'onda a tergo ed in fronte all'opera, ma va considerato che la distanza è molto maggiore e quindi su questa distanza le onde si modificano anche per *shoaling*.

I valori di  $K_t$  ricavati sono dell'ordine di 0.38 e 0.41 per le condizioni esaminate. I coefficienti di trasmissione sono paragonabili a quelli stimati per la alternativa S1, ma va tenuto presente che i meccanismi di dissipazione dell'energia sono differenti.

Sull'opera si osserva una intensa corrente dovuta al frangimento, ed una riduzione di fronte, per la quale ci si aspetta una riduzione del trasporto. La dimensione di questa opera è comunque ridotta (100 m) e di conseguenza il tratto di litorale interessato.

Per quanto riguarda gli effetti presso i piccoli varchi tra i diversi moduli con cui è realizzata l'opera, abbiamo preferito riferirci ad i risultati del codice Xbeach. Si nota ovviamente la formazione di correnti concentrate nei varchi, e questo potrà essere uno di quegli aspetti che dovrà essere attenzionato durante il monitoraggio.

Si può notare dalla tabella che il coefficiente di trasmissione in presenza del reef mostra valori compresi tra il 42% ed il 68% per le condizioni analizzate sopra i 2.0 m al largo, cioè circa 1 m sul fondale di 4 m. Dove le onde sono basse (In tabella 1.38 m al largo) l'onda non subisce riduzioni dovute alla presenza del reef.

La linea di riva in seguito alla realizzazione dell'opera S1 mostra un evidente erosione concentrata in prossimità delle due estremità, tipica delle barriere sommerse. Per quanto riguarda la soluzione S2 si osserva un lieve arretramento della linea di riva in corrispondenza del pennellino, ciò è dovuto al fatto che il pennellino è stato modellato come opera permeabile alle correnti ed alle onde, in corrispondenza del reef (S2) un avanzamento non uniforme che varia dai 3 ai 5 m/anno (Fig. 43). Tra il lato settentrionale del reef S2 ed il pennellino sostanzialmente una condizione di stabilità. Contrariamente alla Alternativa S1 non si evidenzia

un effetto erosivo concentrato in prossimità delle due estremità (non si può ora parlare di testate in quanto la forma dell'opera è rettangolare).

In seguito alle analisi mostrate si può concludere:

La soluzione S1, già commentata durante la prima conferenza di Servizio, ha portato a delle perplessità per le quali si è sviluppata la proposta alternativa S2, per superare le criticità.

Con S2 gli impatti sembrano essere lievi, si nota la formazione dei vortici in corrispondenza delle estremità, con una locale effetto di erosione localizzata. Per quanto riguarda gli effetti sulla battigia, la parte protetta è ovviamente legata all'estensione dell'opera, non si nota una erosione localizzata nelle sezioni adiacenti, come avviene per i pennelli o per le opere parallele sommerse più tradizionali.

Ci si può aspettare per gli anni successivi un andamento analogo, con un avanzamento della battigia di circa 3 m/anno in prossimità dell'opera.

## 9 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Archetti R. 2009. Quantifying the evolution of a beach protected by low crested structures using video monitoring. JOURNAL OF COASTAL RESEARCH, vol. 25 (4), p. 884-899, ISSN: 0749-0208.

Archetti R. Modellazione del paraggio costiero Lido di Dante – Bevano finalizzata alla individuazione di proposte di interventi integrati di difesa costiera su tutta l'area. Report Fondazione Flaminia. Giugno 2014.

Archetti R., C. Romagnoli. 2011. Analysis of the effects of different storm events on shoreline dynamics of an artificially embayed beach. EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS, vol. 36, p. 1449-1463, ISSN: 0197-9337, doi: 10.1002/esp.2162.

Daly Christopher, J. A. Roelvink, A. R. van Dongeren, J. S. M. van Thiel de Vries, and R. T. McCall. Validation of an advective-deterministic approach to short wave breaking in a surf-beat model. Coastal Engineering, 60:69–83, February 2012. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378383911001517>, doi:10.1016/j.coastaleng.2011.08.001.

Deserti M., 2008, *“Sottoprogetto Nausicaa: Caratterizzazione delle condizioni idro – meteorologiche e analisi dei rischi dei litorali”*, Servizio IdroMeteoriologico, ARPA, Emilia - Romagna

DHI ITALIA, *“MIKE21, “Modello bidimensionale per fiumi, laghi, aree costiere e offshore”*, Manuale Tecnico

Holthuijsen L.H., N. Booij, and T.H.C. Herbers. A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents. Coastal Engineering, 13(1):23–54, May 1989. URL: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0378383989900318>, doi:10.1016/0378-3839(89)90031-8.

Longuet-Higgins M. S. and R. W. Stewart. Radiation stress and mass transport in gravity waves, with application to 'surf beats'. Journal of Fluid Mechanics, 13:481–504, 1962.

Longuet-Higgins M. S. and R. W. Stewart. Radiation stress in water waves: a physical discussion with applications. Deep-Sea Research, pages 529–562, 1964.

Masina M., Ciavola P. 2011. Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate. Studi Costieri. 18. 87-101.

Nairn R.B., J. A. Roelvink, and H.N. Southgate. Transition zone width and implications for modeling surfzone hydrodynamics. Proceedings 22th International Conference on Coastal Engineering, pages 68–81, 1990. doi:10.9753/icce.v22.

Phillips O.M.. The dynamics of the upper ocean. Cambridge University Press, pages 366, 1977.

Roelvink J. A.. Dissipation in random wave group incident on a beach. Coastal Engineering, 19:127–150, 1993.

Stive M. J. F. and H. J. De Vriend. Shear stresses and mean flow in shoaling and breaking waves. Proceedings 24th International Conference on Coastal Engineering, pages 594–608, 1994. doi:10.9753/icce.v24.

Svendsen I. A.. Wave heights and set-up in a surf zone. Coastal Engineering, 8:303–329, 1984. doi:10.1016/0378-3839(84)90028-0.