



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E ARCHITETTURA (DICEA)

# **VALUTAZIONE DELL'IMPATTO DEL PROLUNGAMENTO DELL'ARGINE DESTRO DEL FIUME MISA**

Committente: Gestiport S.P.A.

DATA: Marzo 2022

## Sommario

1. Oggetto dello studio .....	5
2. Inquadramento del sito e descrizione della modellazione numerica .....	6
2.1 Descrizione dell'area oggetto di studio .....	6
2.2 Monitoraggio e dati disponibili .....	8
2.3 Modellazione numerica .....	9
3. Sulla riduzione della barra di foce .....	13
4. L'impatto del prolungamento dell'argine sul paraggio .....	16
4.1 Simulazioni con onde stazionarie, in assenza di portata fluviale .....	16
4.2 Simulazioni con onde stazionarie e portata fluviale.....	21
4.3 Simulazioni di eventi reali.....	23
4.4 Effetti in caso di rotazione del campo ondoso .....	26
5. Conclusioni .....	29
Bibliografia.....	30

## Indice delle figure

Figura 1 – Vista panoramica della città di Senigallia in cui si può distinguere il fiume Misa, la sua foce delimitata dagli argini rigidi, il porto e la differenza tra la spiaggia a nord e quella a sud del porto. ....	6
Figura 2 – a) Rosa della distribuzione direzionale dell’altezza d’onda significativa. b) Rosa della distribuzione direzionale dei periodi di picco.....	7
Figura 3 – a) Distribuzione spaziale degli strumenti che monitorano la foce del fiume Misa. b) Esempio delle serie temporali dei dati acquisiti dagli strumenti. c) Fase di installazione della sonda ADCP offshore. d) Sonda di marea. e) Sonda fluviale. f) Stazione SGS. g) Radar a banda X.....	8
Figura 4 – Griglie utilizzate per la modellazione numerica con Delft3D. In verde la “Griglia esterna wave”, in blu la “Griglia esterna flow”, in ciano la “Griglia interna” usata sia nel modulo FLOW che nel modulo WAVE. ....	10
Figura 5 – a) Configurazione attuale. b) Configurazione di progetto con argine allungato. In rosso sono riportate le sezioni longitudinali del fiume. ....	10
Figura 6 – Mappa della distribuzione spaziale della frazione fangosa per la configurazione attuale (a) e per quella di progetto (b). ....	11
Figura 7 – Esempi osservati e rilevati dalle telecamere di migrazione della barra verso valle (a,b,c) a causa della portata fluviale e verso monte (d,e,f) a causa dell’azione delle onde. Il pin blu indica la posizione iniziale della barra, mentre quello rosso la sua posizione finale.....	13
Figura 8 – Posizione della barra a settembre 2021 (pin blu), a seguito delle piene di novembre-dicembre 2021 (pin rosso) e a febbraio 2022 (pin verde). ....	14
Figura 9 – Variazione verticale del fondo lungo la sezione longitudinale del fiume (Figura 5). In nero è riportata l’elevazione iniziale, in rosso le elevazioni finali. La linea rossa continua mostra i risultati ottenuti con portate di $150 \text{ m}^3/\text{s}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , mentre la linea rossa tratteggiata quelli ottenuti con portate di $300 \text{ m}^3/\text{s}$ e $H_s=4 \text{ m}$ . La linea tratto-punto verticale indica la posizione della foce. La prima riga mostra i risultati ottenuti con onde da $45^\circ\text{N}$ , per la configurazione attuale (a), di progetto (b) e di progetto con barra traslata (c). La seconda riga mostra i risultati ottenuti con onde da $90^\circ\text{N}$ , per la configurazione attuale (d), di progetto (e) e di progetto con barra traslata (f). ....	15
Figura 10 – Mappe dell’altezza d’onda significativa in prossimità della foce e dell’imboccatura del porto, nel caso di sola forzante ondosa. La prima riga mostra i risultati ottenuti con onde da $45^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , per la configurazione attuale (a) e di progetto (b). La seconda riga mostra i risultati ottenuti con onde da $90^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , per la configurazione attuale (c) e di progetto (d). Le frecce bianche indicano la direzione dei fronti d’onda.....	16
Figura 11 – Mappe della circolazione residua intorno nell’area estuarina, nel caso di sola forzante ondosa. La prima riga mostra i risultati ottenuti con onde da $45^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , per la configurazione attuale (a) e di progetto (b). La seconda riga mostra i risultati ottenuti con onde da $90^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , per la configurazione attuale (c) e di progetto (d). ....	17
Figura 12 – Dettaglio dell’andamento delle correnti alla foce del fiume Misa per le due direzioni d’onda e le due configurazioni dell’argine considerate. ....	18
Figura 13 – Mappa del trasporto medio di sedimenti per le due direzioni d’onda e le due configurazioni dell’argine considerate. ....	19
Figura 14 – Da sinistra verso destra, mappe di accumulo/erosione dopo 16, 32 e 48 ore dall’inizio delle simulazioni con sola forzante ondosa. La prima e la seconda riga mostrano i risultati ottenuti con onde da $45^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto. La terza e la quarta riga mostrano i risultati ottenuti con onde da $90^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto. ....	20

Figura 15 – Da sinistra a destra, mappe di accumulo/erosione dopo 16, 32 e 48 ore dall’inizio delle simulazioni con forzante ondosa e fluviale ( $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La prima e la seconda riga mostrano i risultati ottenuti con onde da $45^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto. La terza e la quarta riga mostrano i risultati ottenuti con onde da $90^\circ\text{N}$ e $H_s=2 \text{ m}$ , rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto.....	22
Figura 16 – Mappa della concentrazione di sedimento in sospensione trasportato dal fiume in un istante successivo alla massima portata ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La prima riga mostra i risultati per le onde da Bora, mentre la seconda riga mostra i risultati per le onde da Scirocco, per la configurazione attuale e di progetto. ....	23
Figura 17 – Immagini relative alla situazione all’interno del porto dopo la piena del 11/12/2021, dove è possibile osservare la cospicua quantità di materiale proveniente dal fiume.....	23
Figura 18 – Serie temporali per le simulazioni degli eventi reali. ....	24
Figura 19 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo uno, due e tre giorni dall’inizio della simulazione dell’evento reale del 24-26 Febbraio 2017. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto.....	25
Figura 20 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo uno, due e tre giorni dall’inizio della simulazione dell’evento reale del 2-4 Febbraio 2018. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto. ....	26
Figura 21 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo 40, 80 e 120 ore dall’inizio della simulazione con rotazione del campo ondoso. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto.....	27
Figura 22 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo 40, 80 e 120 ore dall’inizio della simulazione con rotazione del campo ondoso associato a portata fluviale. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto. ....	28

## Indice delle tabelle

Tabella 1 – Caratterizzazione degli scenari analizzati.....	12
Tabella 2 – Percentuale di area erosa nei diversi scenari. ....	15

## 1. Oggetto dello studio

La città di Senigallia (AN) nel corso degli anni è stata soggetta ad importanti eventi alluvionali che ne testimoniano l'elevato rischio idrogeologico. Il suo territorio comunale è infatti percorso dal fiume Misa che, nel suo tratto finale, attraversa l'area densamente popolata del centro storico. Questo tratto è delimitato da muri arginali che ne vincolano la geometria e la massima portata scaricabile.

Inoltre, a causa del continuo apporto sedimentario proveniente dalla regione di monte del fiume e la scarsità di piogge verificatasi negli ultimi anni, una notevole quantità di sedimenti si è accumulata in prossimità della foce provocando un generale interrimento del tratto terminale del fiume e l'emersione per lunghi periodi di un'ampia barra fluviale. Il fenomeno dell'interrimento della zona di foce è storico e, quando il fiume rappresentava l'ingresso del porto, era necessario ricorrere a periodiche operazioni di dragaggio.

Al fine di ridurre l'insabbiamento causato dalle onde all'interno della foce del fiume Misa, è stata recentemente avanzata l'idea progettuale di prolungare l'argine di destra di circa 90 m con una lieve curvatura che coincide con quella dell'argine di sinistra. Essendo l'area estuarina e portuale contraddistinta da una dinamica complessa, dovuta alla presenza di molteplici forzanti, quali le onde, la portata fluviale, il vento e la marea, risulta di fondamentale importanza approfondire lo studio del trasporto dei sedimenti presente nella zona in esame e l'eventuale influenza della nuova opera.

Il presente studio è stato redatto per valutare il possibile impatto che l'allungamento dell'argine può avere sulla formazione ed evoluzione della barra fluviale e sulla morfodinamica del paraggio circostante, con particolare attenzione all'area estuarina e quella portuale. Sono state, pertanto, eseguite diverse analisi basate sull'utilizzo di informazioni provenienti da misure di campo e da simulazioni numeriche, realizzate utilizzando il software Delft3D (Deltares). Tutte le simulazioni sono state eseguite sia per la configurazione attuale che per la configurazione di progetto, al fine di analizzare il possibile impatto dell'allungamento dell'argine sull'idro-morfodinamica dell'area di interesse.

## 2. Inquadramento del sito e descrizione della modellazione numerica

### 2.1 Descrizione dell'area oggetto di studio

La città di Senigallia è bagnata dal Mare Adriatico Centrale e le sue coste sono caratterizzate da pendenze molto basse e prevalenza di sabbia fine. La linea di costa è ruotata di circa 40° rispetto al nord, in direzione NO-SE. Intorno alla foce del fiume Misa si è sviluppato fin dal 1400 d.C. il porto-canale di Senigallia. Il complesso portuale si è poi sviluppato nel corso degli anni sulla sponda sinistra del fiume fino a raggiungere la configurazione attuale con l'ingresso orientato verso nord (Figura 1).

La costa a nord del porto presenta una serie di barriere frangiflutto per proteggere la spiaggia dall'azione delle onde, mentre la parte a sud del porto è caratterizzata da un lungo tratto di spiaggia naturale interrotta solo dalla presenza della Rotonda. La costa di Senigallia è situata in un ambiente micromareale con prevalenza di marea semidiurna. L'escursione di marea raramente supera 0.6 m e le correnti da essa generate sono trascurabili.



Figura 1 – Vista panoramica della città di Senigallia in cui si può distinguere il fiume Misa, la sua foce delimitata dagli argini rigidi, il porto e la differenza tra la spiaggia a nord e quella a sud del porto.

La spiaggia sommersa a sud del porto è caratterizzata da sabbia da medio a fine ( $D_{50} = 0.125-0.25$  mm) (Postacchini et al., 2017) e normalmente presenta un sistema di tre barre sommerse, tipico delle spiagge sabbiose naturali, situato nei primi 400 m di spiaggia ad una profondità dell'acqua compresa tra 0-3 m. Queste barre sommerse, allineate con la linea di costa, sono in grado di proteggere in maniera naturale la spiaggia e mitigare l'azione erosiva del mare (Melito et al., 2020). Il trasporto dei sedimenti al fondo è principalmente diretto da sud verso nord, mentre i sedimenti in sospensione provenienti dal fiume sono principalmente trasportati verso sud in accordo con il vento e con la corrente ondosa prevalente. All'interno del canale fluviale prevale invece la presenza di argille e limi.

Il clima ondoso è caratterizzato da due settori dominanti, generati dai venti che prevalentemente soffiano nell'adriatico centrale: Bora e Scirocco (Figura 2). La Bora è un vento freddo molto intenso proveniente da NE che, per la geometria del Mare Adriatico, ha un fetch molto corto. Le onde generate dal vento di Bora sono generalmente onde da vento con altezza significativa che può superare i 4 m e periodo piuttosto breve.



Lo Scirocco è invece un vento caldo che spira da SE. Le tempeste da Scirocco sono caratterizzate da onde più lunghe ed energetiche. Sia le onde da Bora che quelle da Scirocco sono in grado di risalire il fiume, ma le onde da Bora riescono a entrare più facilmente all'interno del canale, essendo il tratto terminale del fiume orientato di circa 30°N. Inoltre, la presenza di dissipatori ondosi in prossimità della foce provoca un abbattimento delle onde da est.

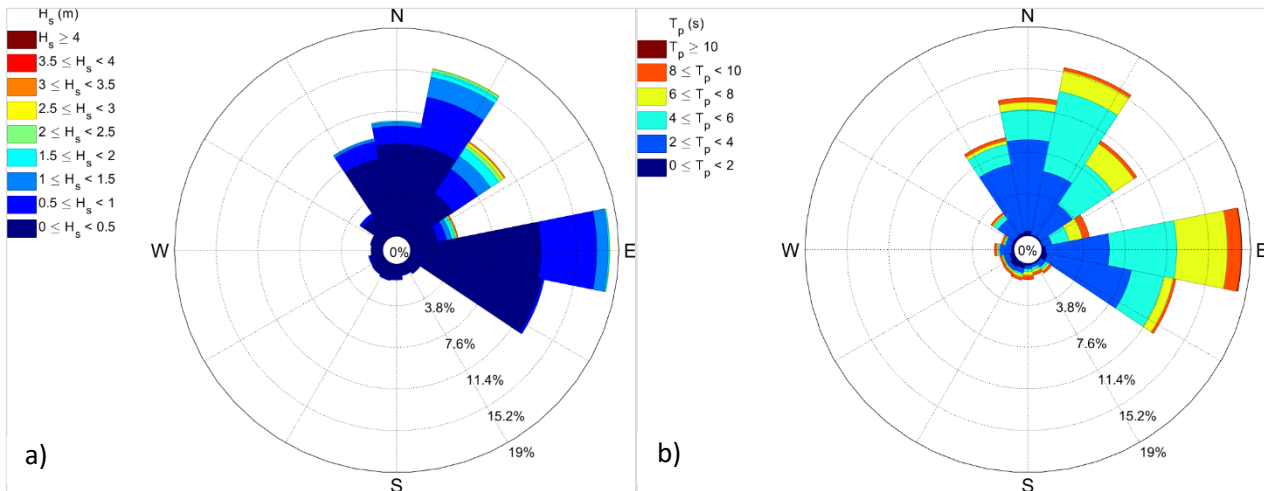


Figura 2 – a) Rosa della distribuzione direzionale dell'altezza d'onda significativa. b) Rosa della distribuzione direzionale dei periodi di picco.

Il fiume Misa ha un bacino stretto e allungato, ampio 383 km<sup>2</sup>, nasce nel territorio del comune di Arcevia e ha un importante affluente di sinistra, il fiume Nevola. Quest'ultimo si forma tra Castelleone di Suasa e Barbara e si immette nel Misa nel territorio comunale di Trecastelli al confine con Senigallia ([Piano di Emergenza di Protezione Civile - Parte Generale](#)). Il regime idrico del fiume Misa è caratterizzato da eventi di carattere torrentizio, con portate di circa 400, 500, 600 m<sup>3</sup>/s per tempi di ritorno di 100, 200, 500 anni, intervallati da significativi periodi di magra. Negli ultimi anni è stata inoltre osservata una riduzione degli eventi di portata dovuta ad una diminuzione delle piogge. Un ulteriore decremento delle portate è atteso nei prossimi anni ([Darvini & Memmola, 2020](#)). L'estuario del fiume Misa è classificata come "salt-wedge estuary", ed è quindi caratterizzato da un'intrusione salina a forma di cuneo e la presenza di un flusso di acqua dolce in superficie diretto verso il largo.

Il fiume Misa è in grado di trasportare verso mare una consistente quantità di sedimento, gran parte del quale costituito da materiale fino in sospensione. La portata solida in sospensione è stimata essere tra 4.7·10<sup>8</sup> kg yr<sup>-1</sup> e 8.4·10<sup>8</sup> kg yr<sup>-1</sup> ([Milliman & Syvitski, 1992](#); [Frignani et al., 2005](#)). La disponibilità di una grande quantità di sedimenti favorisce la possibile formazione di depositi in prossimità della foce e apporta sedimento fino alle spiagge del paraggio circostante.

In prossimità della foce si ha un apporto di sedimenti all'interno della bocca del fiume che in larga parte è dovuto al trasporto verso valle di limi e ghiaie (trasporto fluviale) e solo in maniera marginale verso monte di sabbie (trasporto dovuto al moto ondoso). Generalmente si osserva un deposito dei sedimenti durante la stagione estiva, causato dalle basse portate fluviali, e una erosione durante il periodo invernale caratterizzato da una maggiore piovosità e più intense correnti fluviali ([Brocchini et al., 2017](#)). Questo ciclo naturale di accumulo ed erosione viene talvolta interrotto da periodi di siccità, come avvenuto negli ultimi anni per il bacino del fiume Misa. La presenza di lunghi periodi di magra ha impedito che l'accumulo di sedimenti in prossimità della foce fosse trasportato in mare dalla corrente fluviale, fino a far emergere la barra di foce osservata negli ultimi anni.

## 2.2 Monitoraggio e dati disponibili

Il complesso ambiente estuarino è monitorato dal 2015 dalla stazione di video monitoraggio SGS (Sena Gallica Speculator), installata grazie al Progetto EsCoSed (Estuarine Cohesive Sediments). Nel 2018, nell'ambito del Progetto MORSE (Modeling and Observation of River-Sea Exchanges) sono state aggiunte una sonda fluviale tipo USGS per il rilevamento delle portate, una sonda ADCP al largo per la misura del clima ondoso e una sonda di marea per determinare il livello del mare. Recentemente, nell'ambito dello stesso progetto, è operativo anche un radar in banda X per il monitoraggio delle onde vicino alla costa ([www.morse.univpm.it](http://www.morse.univpm.it)). La Figura 3 mostra una panoramica di tutti gli strumenti installati nell'ambito dei progetti EsCoSed e MORSE.

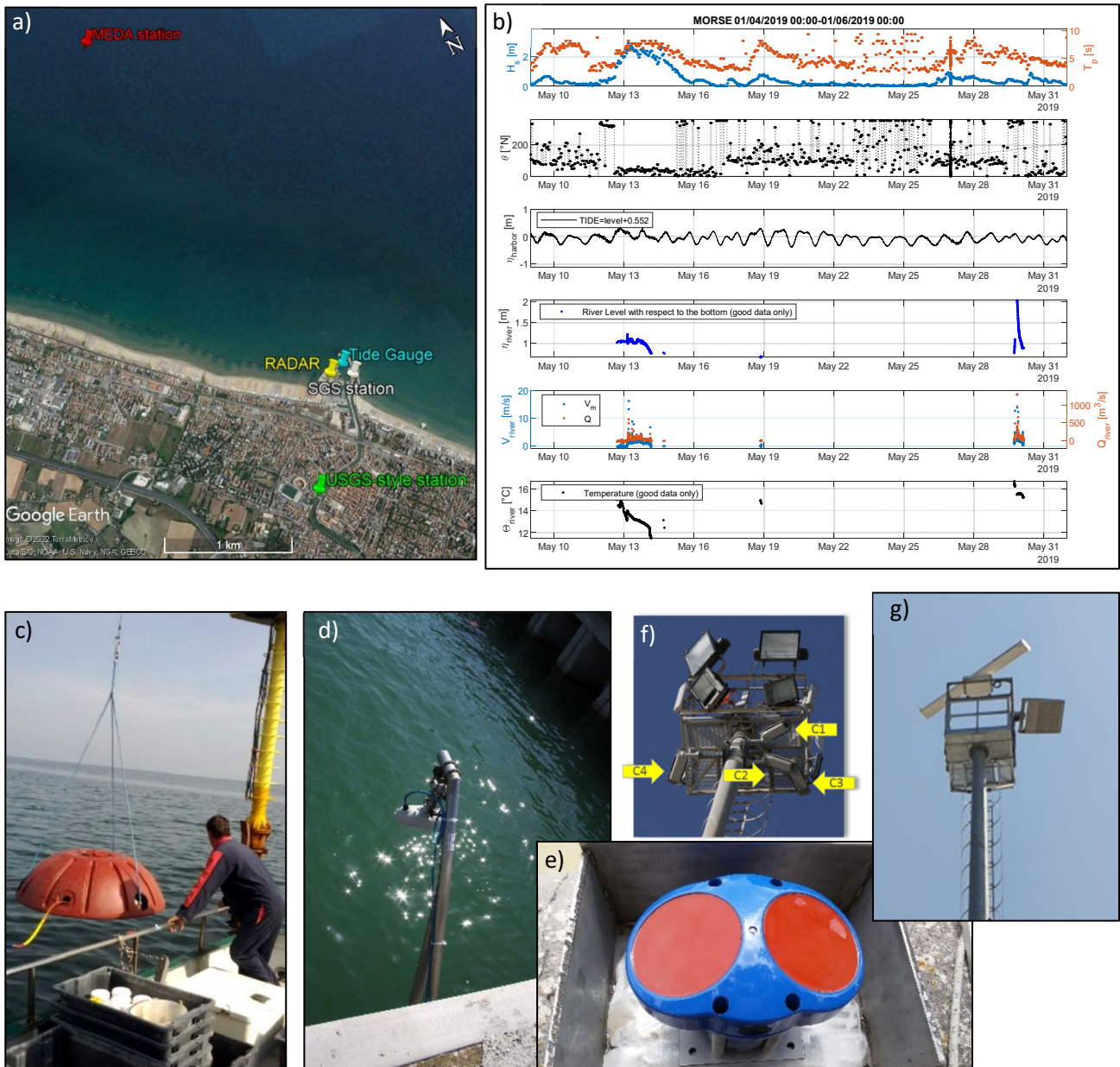


Figura 3 – a) Distribuzione spaziale degli strumenti che monitorano la foce del fiume Misa. b) Esempio delle serie temporali dei dati acquisiti dagli strumenti. c) Fase di installazione della sonda ADCP offshore. d) Sonda di marea. e) Sonda fluviale. f) Stazione SGS. g) Radar a banda X.

La stazione SGS (Figura 3f) si trova nel molo Nord del porto di Senigallia ed è composta da quattro telecamere posizionate sulla sommità di un palo adibito alla pubblica illuminazione (25 m slmm). Tre telecamere sono rivolte a sud, verso i 500 m di spiaggia non protetta compresa tra il porto e la Rotonda. La quarta telecamera



è rivolta a nord, verso l'estuario del fiume Misa. Per ogni ora di registrazione, ogni telecamera produce un video di dieci minuti (registrato con 2 Hz di frequenza) e un'immagine istantanea. L'acquisizione dei dati avviene dalle 5:00 alle 17:00 UTC, per un totale di tredici video e tredici istantanee al giorno, per ogni telecamera. I video e le istantanee registrati ogni ora dalla stazione SGS sono successivamente elaborati utilizzando una serie di toolbox tradizionali e alcuni codici Matlab personalizzati. I video sono processati per ottenere immagini piane georeferenziate. Le immagini elaborate, in particolare le immagini mediate (timex), sono state ampiamente utilizzate negli studi riguardanti la zona estuarina di Senigallia. Tra i vari fenomeni osservabili dalle immagini, le immagini hanno permesso il monitoraggio della barra di foce, l'osservazione del comportamento delle barre sommerse e del pennacchio di sedimenti uscente dal fiume.

La sonda ADCP per l'acquisizione dei dati ondosi (Figura 3c) è posizionata alla base del palo dove è collocata anche la stazione MEDA (CNR-IRBIM), a circa 1.5 miglia nautiche a nord di Senigallia, 1.5 miglia nautiche al largo e a una profondità d'acqua di circa 10.5 m. La sonda ADCP fornisce informazioni sull'altezza d'onda significativa, il periodo di picco e la direzione di picco. Oltre ai dati ondosi, la stazione MEDA acquisisce anche i dati del vento e delle correnti. Altre informazioni sul clima ondoso e sulle correnti possono essere ottenute dai modelli numerici del programma Copernicus (CMEMS).

La sonda di marea (Figura 3d) è posizionata in una area protetta dal moto ondoso all'interno del porto e consente l'acquisizione del livello del mare. Ulteriori dati del livello del mare sono acquisiti dal mareografo della rete nazionale ISPRA situato all'interno del porto di Ancona, a circa 25 km da Senigallia ([www.mareografico.it](http://www.mareografico.it)). I dati delle due stazioni differiscono di poco data la ridotta distanza tra i siti di misurazione, il carattere micromareale dell'area e la presenza di un nodo anfidromico al largo di Ancona. Per estrapolare, dal segnale misurato, la sola marea astronomica è stato utilizzato il Delft3D TIDE, che permette di separare il contributo astronomico da quello meteorologico.

La sonda fluviale (Figura 3e) è stata invece installata a circa 1.2 km dalla foce del fiume in località "Ponte Garibaldi" e in prossimità di un idrometro della Protezione Civile Nazionale. La sonda tipo USGS permette di misurare sia il livello che, indirettamente, la portata ogni volta che lo strumento risulta sommerso. I dati non sono invece attendibili quando il livello dell'acqua non raggiunge lo strumento. Le informazioni sul livello del fiume possono però essere integrate con i dati degli idrometri della Protezione Civile disposti lungo il corso sia del fiume Misa che del Nevola. Inoltre, la Protezione Civile mette a disposizione, per la stazione di Bettolle, la scala delle portate.

## 2.3 Modellazione numerica

Per la modellazione numerica è stato usato il software Delft3D e in generale sono stati accoppiati i moduli FLOW (idro-morfodinamica) e WAVE (propagazione moto ondoso).

Per la modellazione idro-morfodinamica dell'area in esame sono state costruite in totale 3 griglie (Figura 4):

- Griglia esterna wave
- Griglia esterna flow
- Griglia interna

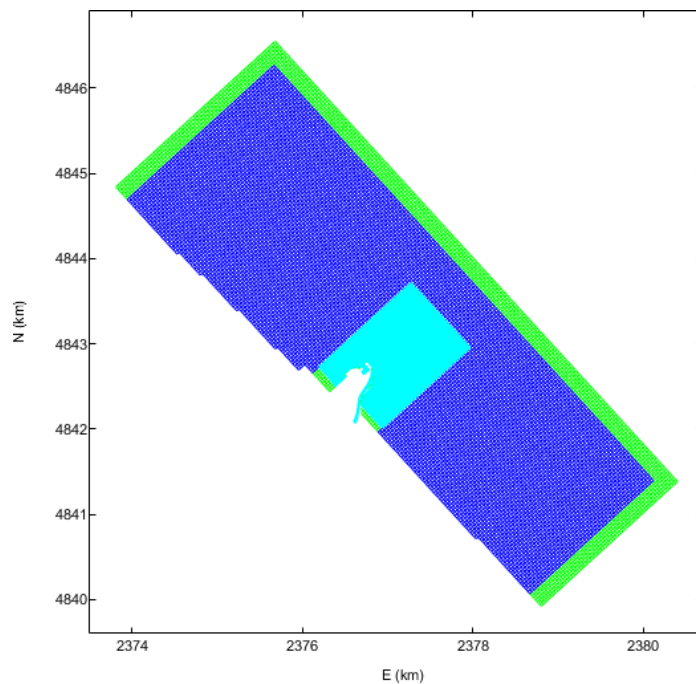


Figura 4 – Griglie utilizzate per la modellazione numerica con Delft3D. In verde la “Griglia esterna wave”, in blu la “Griglia esterna flow”, in ciano la “Griglia interna” usata sia nel modulo FLOW che nel modulo WAVE.

Nel modulo WAVE, la “Griglia esterna wave” è stata unita alla “Griglia interna” tramite nesting, mentre nel FLOW la “Griglia esterna flow” è stata unita alla “Griglia interna” tramite il domain decomposition. Le griglie esterne hanno risoluzione di circa 33 m mentre per la griglia interna la risoluzione varia da circa 8 m a circa 2.5 m all’interno del fiume.

Al fine di valutare gli effetti del prolungamento dell’argine di destra sono state analizzate e confrontate due diverse configurazioni (Figura 5):

- configurazione attuale;
- configurazione di progetto che prevede il prolungamento dell’argine di destra.

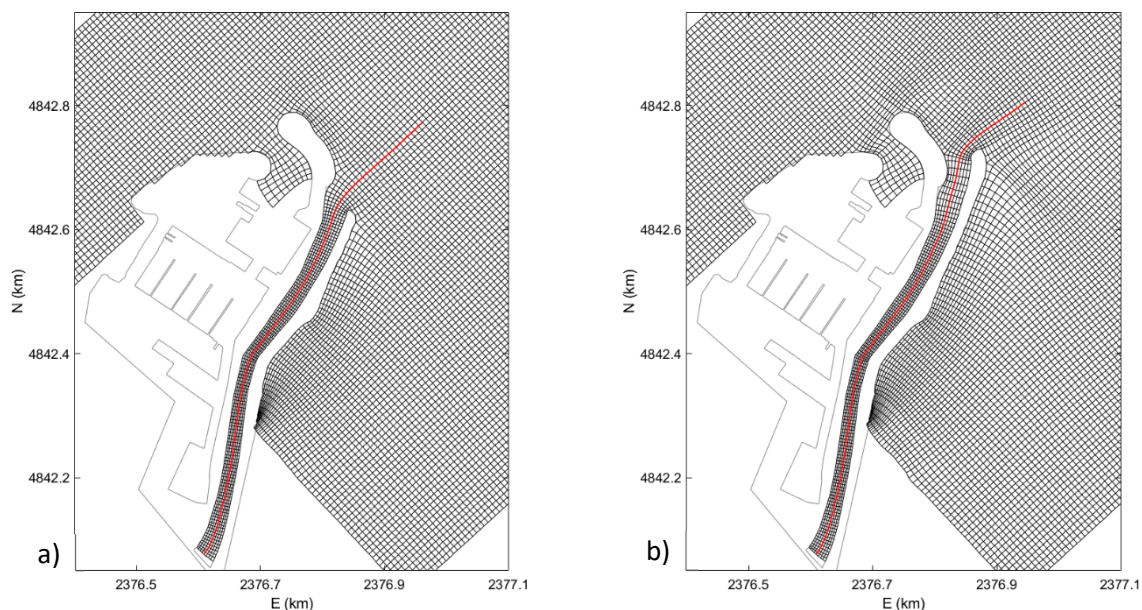


Figura 5 – a) Configurazione attuale. b) Configurazione di progetto con argine allungato. In rosso sono riportate le sezioni longitudinali del fiume.

Per la ricostruzione del fondo sono state usate le batimetrie dell’EmodNET e il rilievo del porto di Senigallia del 2018. Per la configurazione di progetto, la batimetria della zona in prossimità della foce è stata ricostruita manualmente mantenendo la stessa pendenza della configurazione attuale. In prima analisi, non è stato modificato l’accumulo di sedimenti collocato pochi metri a monte della foce attuale. In una analisi successiva, è stata valutata, per completezza, una diversa posizione dell’accumulo di sedimenti dovuta ad una possibile redistribuzione del materiale in risposta alla nuova configurazione del tratto finale dell’argine di destra. Si è quindi ipotizzata e analizzata la possibilità che la barra fluviale sia collocata più a valle, cioè a pochi metri dalla nuova foce. Il fondo è stato caratterizzato con due sedimenti, uno non coesivo (sabbia,  $D_{50}=0.18$  mm) e uno fangoso. La distribuzione di questi due sedimenti è coerente con i campionamenti eseguiti dal Consorzio di Bonifica per conto della Regione Marche nel 2019 ([Consorzio di Bonifica, 2019](#); [Report – Regione Marche, 2020](#)). Maggiori dettagli sulla distribuzione spaziale delle due tipologie di sedimento sono riportati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

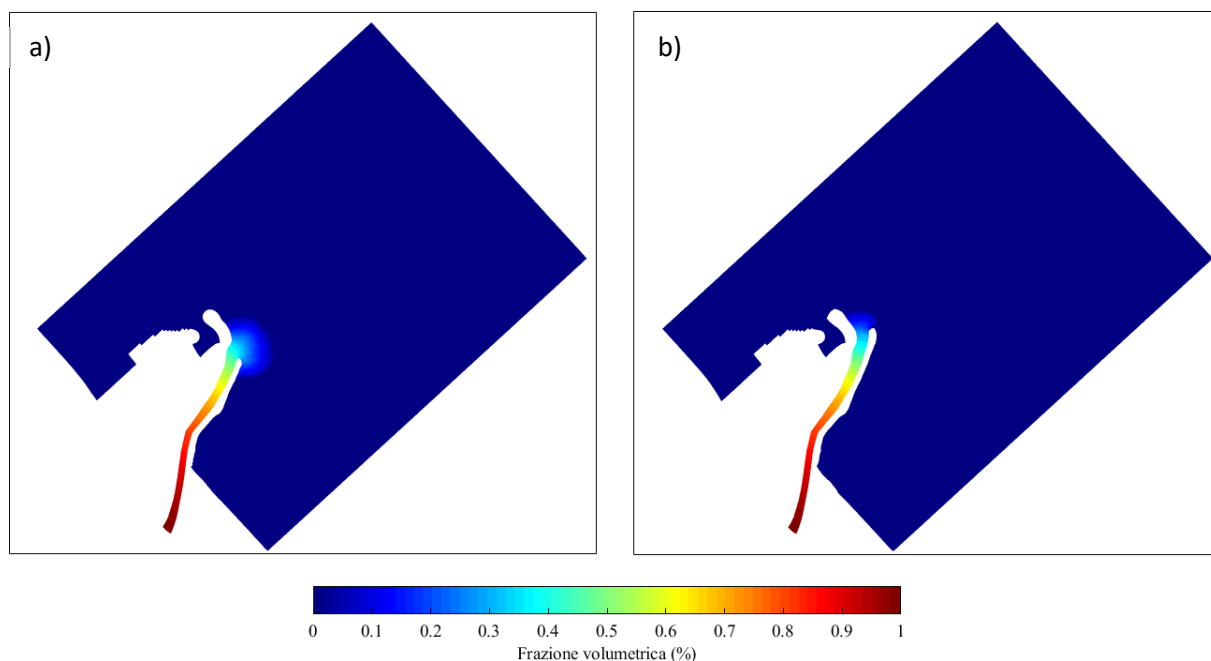


Figura 6 – Mappa della distribuzione spaziale della frazione fangosa per la configurazione attuale (a) e per quella di progetto (b).

Il modulo WAVE è stato forzato con uno spettro ondoso applicato al bordo offshore della “Griglia esterna wave”. Nel modulo FLOW è stata utilizzata la condizione di Neumann, con serie temporale nulla, nei due bordi cross-shore della “Griglia esterna flow”, e la condizione di Water Level, con costante  $a_0=0.5$  m, nel bordo offshore. Quest’ultima condizione serve a rappresentare il sovrizzo di tempesta dovuto alle mareggiate. Nella “Griglia interna” è stato inoltre definito un bordo all’inizio del fiume per simulare la portata fluviale.

I parametri utilizzati per i sedimenti sono stati calibrati all’interno degli studi della barra di foce ([Baldoni et al., 2021](#)) e del pennacchio ([Baldoni et al., 2022](#)), sulla base delle simulazioni e dei dati osservati.

Per quanto riguarda la forzante ondosa, la scelta degli scenari simulati è stata fatta sulla base della caratterizzazione del clima ondoso che interessa la costa di Senigallia, riportata nelle rose in Figura 2. Sono state considerate tempeste da Bora ( $45^\circ\text{N}$ ), il settore che presenta le onde più importanti, e da Scirocco ( $90^\circ\text{N}$ ), il settore che presenta le onde più frequenti. Inoltre, sulla base di osservazioni di eventi naturali, è stato modellato anche uno scenario con rotazione del campo d’onda da  $90^\circ\text{N}$  fino a  $30^\circ\text{N}$ , includendo così un altro settore importante, quello dei  $30^\circ\text{N}$ . Le tempeste sono caratterizzate da altezza significativa d’onda di 2 m e 4 m, relative ad una profondità di circa 12 m. Tali altezze d’onda sono tipiche delle mareggiate, con periodo di ritorno dell’anno e dei 5 anni, che interessano il paraggio considerato. Il periodo ondoso è stato adattato in base alle direzioni, considerando un periodo maggiore per le onde di Scirocco, caratterizzate da

un fetch più ampio rispetto a quelle da Bora. A tutti gli scenari è stato inoltre associato un sovrizzo di tempesta di 50 cm.

Gli scenari ondosi da Bora e Scirocco con valori di  $H_s = 2$  m sono stati combinati con valori di portata fluviale di  $0 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  per simulare, rispettivamente, condizioni di assenza di corrente fluviale e condizioni di corrente con tempo di ritorno pari ad un anno. Per considerare uno scenario ipotetico di periodo di ritorno di 5 anni sono state, invece, accoppiate le onde di altezza significativa uguale a 4 m con una portata fluviale di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lo scenario con la rotazione del campo d'onda è stato associato a portata fluviale nulla o pari a  $150 \text{ m}^3/\text{s}$ , contemporanea alle onde da  $45^\circ\text{N}$ , questo per rappresentare in maniera schematica eventi naturali per i quali ad una prima fase di mareggiate da Scirocco seguono piogge consistenti, che inducono portate fluviali di media intensità, e, quindi, una fase conclusiva di mare da Bora.

Le simulazioni degli scenari di Bora e Scirocco hanno una durata di due giorni, quelle con onde variabili durando invece cinque giorni, con rotazione della direzione ondosa ogni 36 ore circa.

Tutti gli scenari sono stati eseguiti con la configurazione attuale dell'argine e con la configurazione di progetto e sono riassunti in Tabella 1.

*Tabella 1 – Caratterizzazione degli scenari analizzati.*

ID	Scirocco			Bora			Scirocco + Bora	
	S0	S150	S300	B0	B150	B300	V0	V150
$H_s$ (m)	2	2	4	2	2	4	2	2
$T_p$ (s)	8	8	9	7	7	8	variabile	variabile
Dir ( $^\circ\text{N}$ )	90	90	90	45	45	45	variabile	variabile
Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0	150	300	0	150	300	0	150

Inoltre, sono stati riprodotti due casi reali con rotazione del campo d'onda (si veda Sezione 4.3).

### 3. Sulla riduzione della barra di foce

Il ridotto quantitativo di piogge degli ultimi anni, e la conseguente scarsità di eventi di piena capaci di erodere il sedimento e trasportarlo verso mare, hanno generato un deposito persistente alla foce del fiume Misa, noto come barra di foce. È qui necessario ricordare che la generazione della barra di foce, fenomeno del tutto naturale, è essenzialmente indotto dal trasporto verso valle dei sedimenti fluviali. La semplice osservazione visiva illustra il processo di formazione delle barre fluviali in prossimità della sponda interna delle anse del fiume (zone di deposito).

La zona dove è posta la barra di foce del fiume Misa è monitorata in continuo dal sistema di telecamere della stazione SGS da luglio 2015. Lo studio dell'evoluzione della barra emersa dal 2016 al 2019 ha mostrato un comportamento ciclico (Baldoni et al., 2021). In presenza di una portata fluviale, anche non particolarmente significativa, è stata sempre osservata una netta migrazione della barra verso valle (Figura 7 a, b, c). Al verificarsi di consistenti precipitazioni e portate fluviali elevate la barra viene quindi erosa ed espulsa in mare naturalmente (si veda anche Figura 8). Le onde, viceversa, possono indurre una migrazione della barra verso monte. In assenza di portate fluviali e in presenza di un clima ondosito la barra migra lentamente verso monte, accrescendosi a causa dell'accumulo di sedimenti sul suo versante lato mare (Figura 7 d, e, f). Sotto l'azione di forti tempeste di Bora e alti livelli di marea, il trasporto di sedimenti verso monte si intensifica causando una migrazione più rapida della barra.

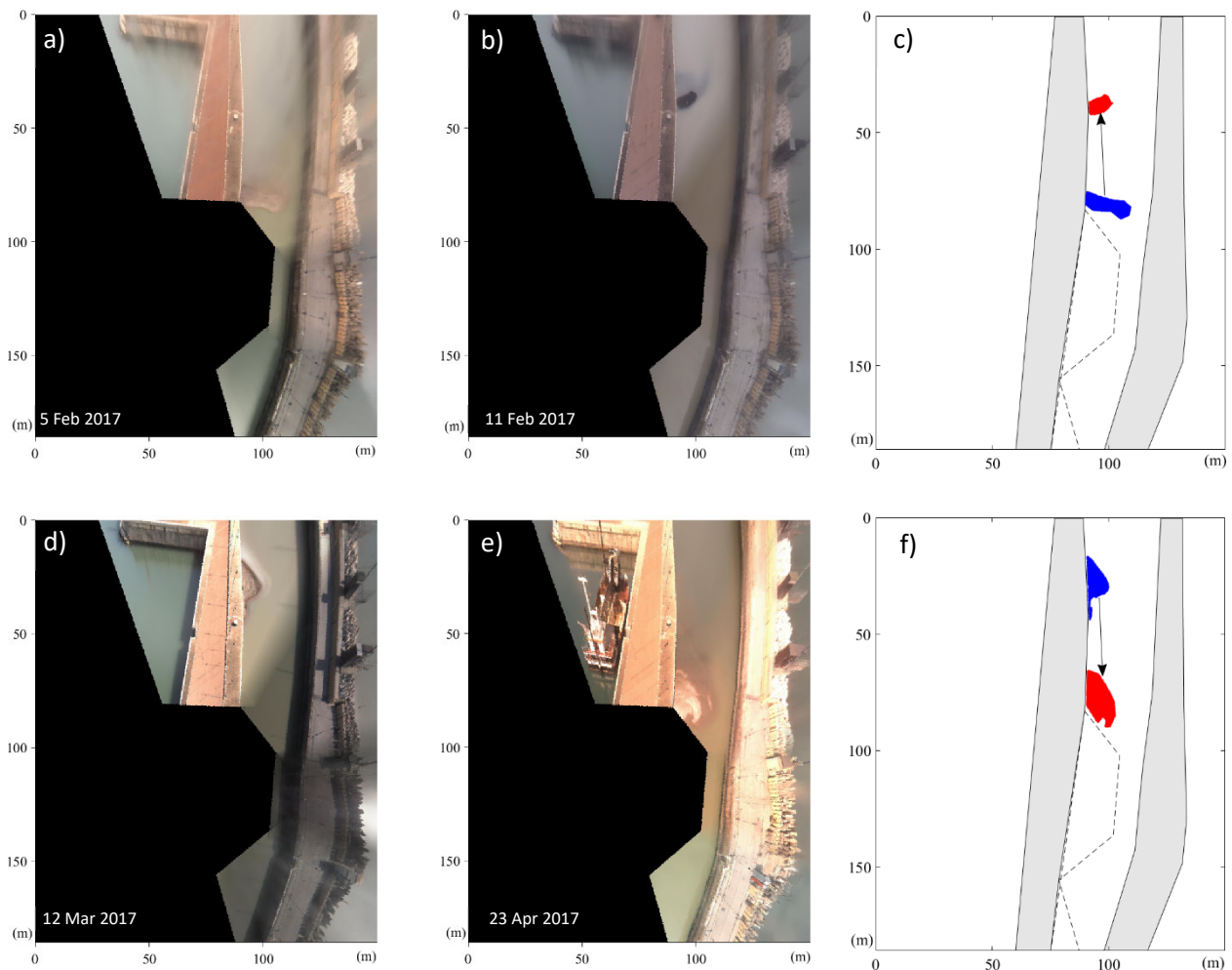


Figura 7 – Esempi osservati e rilevati dalle telecamere di migrazione della barra verso valle (a,b,c) a causa della portata fluviale e verso monte (d,e,f) a causa dell'azione delle onde. Il pin blu indica la posizione iniziale della barra, mentre quello rosso la sua posizione finale.



Lo studio del comportamento della barra emersa alla foce del fiume Misa ([Baldoni et al., 2021](#)), eseguito sulla base di dati osservati e numerici, ha mostrato come portate fluviali moderate, associate a tempi di ritorno di circa 1 anno, comportano un tasso di migrazione verso valle maggiore del tasso di migrazione verso monte indotto dall'azione di onde importanti, associate a tempi di ritorno maggiori o uguali ai 5 anni ( $H_s$  circa 4 m). Questo è stato evidenziato anche a seguito degli eventi di piena avvenuti a novembre e dicembre 2021 (Figura 8). Tali piene, pur non avendo avuto carattere di eccezionalità, hanno indotto una importante migrazione verso mare della barra che, attualmente, è al limite dell'espulsione dalla zona di foce (si veda il pin verde di Figura 8).

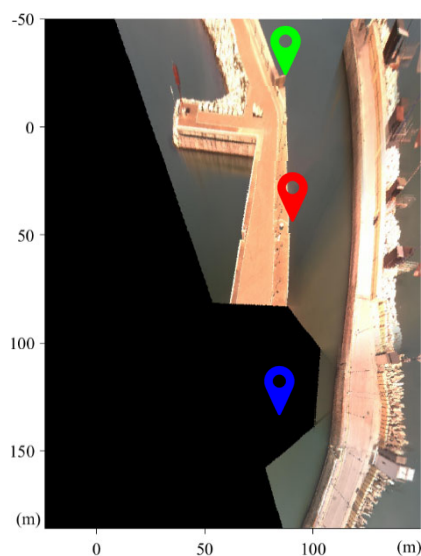


Figura 8 – Posizione della barra a settembre 2021 (pin blu), a seguito delle piene di novembre-dicembre 2021 (pin rosso) e a febbraio 2022 (pin verde).

Lo studio di Baldoni et al. ([2021](#)) evidenzia come, attualmente, le portate fluviali caratteristiche del fiume Misa siano in grado di erodere la barra fluviale disperdendo il sedimento verso mare. Solo in periodi di eccezionale siccità la barra diventa così rilevante da risultare emersa anche nelle fasi di alta marea ed estesa da interessare buona parte della sezione del fiume.

Il prolungamento dell'argine di destra del fiume Misa comporterebbe un allungamento del tratto finale dell'argine del fiume e la conseguente traslazione della foce a circa 90 m più a valle. Al fine di valutare gli effetti di questa modifica geometrica sul comportamento della barra, è stato eseguito un confronto tra i risultati numerici ottenuti per le due configurazioni in esame soggette alle stesse forzanti. Inoltre, per tenere in considerazione la redistribuzione di sedimento che avverrebbe a seguito del prolungamento dell'argine, si è anche analizzata una configurazione con la barra di foce traslata verso valle. In questo modo l'accumulo di sedimenti si trova posizionato all'incirca alla stessa distanza dalla foce per entrambe le configurazioni.

La Figura 9 mostra le variazioni del fondale lungo la sezione longitudinale del fiume (Figura 5) a causa di eventi di piena e contemporanea presenza di mareggiate non trascurabili. I pannelli di sinistra (Figura 9 a, d) mostrano i risultati per la configurazione attuale, i pannelli al centro (Figura 9 b, e) quelli ottenuti per la configurazione di progetto, i pannelli a destra (Figura 9 c, f) quelli ottenuti per la configurazione di progetto con barra traslata. Inoltre, nella prima riga (Figura 9 a, b, c) ci sono i risultati relativi alle simulazioni con onde provenienti da 45°N (Bora), mentre nella seconda riga (Figura 9 d, e, f) ci sono quelli relativi alle simulazioni con onde provenienti da 90°N (Scirocco). L'elevazione iniziale del fondo è riportata in nero mentre l'elevazione del fondo ottenuta al termine delle simulazioni è riportata in rosso. I risultati ottenuti con portate di 150 m<sup>3</sup>/s e  $H_s=2$  m sono indicati con una linea rossa continua, quelli ottenuti con portate di 300 m<sup>3</sup>/s e

$H_s=4$  m sono indicati con una linea rossa tratteggiata. La linea tratto-punto verticale mostra la posizione della foce nella rispettiva configurazione.

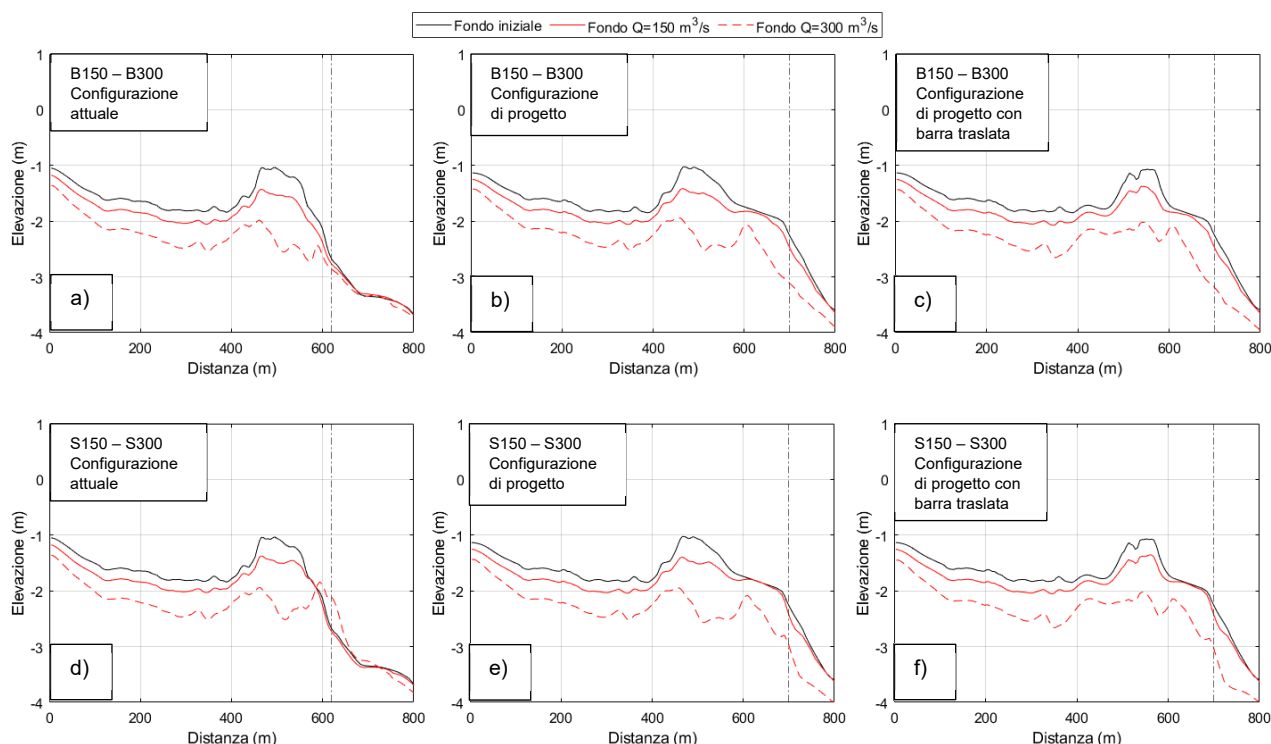


Figura 9 – Variazione verticale del fondo lungo la sezione longitudinale del fiume (Figura 5). In nero è riportata l’elevazione iniziale, in rosso le elevazioni finali. La linea rossa continua mostra i risultati ottenuti con portate di  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $H_s=2$  m, mentre la linea rossa tratteggiata quelli ottenuti con portate di  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $H_s=4$  m. La linea tratto-punto verticale indica la posizione della foce. La prima riga mostra i risultati ottenuti con onde da  $45^\circ\text{N}$ , per la configurazione attuale (a), di progetto (b) e di progetto con barra traslata (c). La seconda riga mostra i risultati ottenuti con onde da  $90^\circ\text{N}$ , per la configurazione attuale (d), di progetto (e) e di progetto con barra traslata (f).

L’erosione del fondo dovuta all’azione della portata fluviale è ben evidente per tutti gli scenari analizzati. Questo chiarisce come l’azione del fiume sia in grado di erodere naturalmente, anche in concomitanza con un forzante ondoso non trascurabile, la barra che periodicamente si forma in prossimità della foce. Per valutare la differenza tra le due configurazioni, è stata calcolata la percentuale di area erosa nella sezione verticale nei diversi scenari. I risultati sono riportati in Tabella 2 e confermano che la barra di foce viene erosa dalla portata fluviale in tutti i casi analizzati. La configurazione attuale permette una maggiore o uguale erosione della barra rispetto alla configurazione di progetto.

Tabella 2 – Percentuale di area erosa nei diversi scenari.

	Area erosa (%)		
	Configurazione attuale	Configurazione di progetto	Configurazione di progetto con barra traslata
<b>B150</b>	8.3	7	5.8
<b>B300</b>	24.1	22.9	19
<b>S150</b>	5.7	6.2	4.6
<b>S300</b>	18.6	23.8	19.4

Tutto quanto sopra dimostra che un eventuale allungamento dell’argine di destra (o molo di levante) non comporterebbe alcun beneficio in relazione alla riduzione della barra di foce, la cui erosione è strettamente correlata all’azione delle portate fluviali.

## 4. L'impatto del prolungamento dell'argine sul paraggio

Il prolungamento dell'argine di destra del fiume Misa comporta necessariamente un impatto sull'idrodinamica e sul trasporto di sedimenti nel paraggio circostante, in particolare sulla adiacente area portuale. Di seguito si analizzano tali impatti causati dalla configurazione attuale e quella di progetto, confrontando le mappe di altezza d'onda, delle correnti, del trasporto dei sedimenti e delle variazioni del fondale.

### 4.1 Simulazioni con onde stazionarie, in assenza di portata fluviale

Le figure mostrano nella colonna di destra i risultati per la configurazione attuale e nella colonna di sinistra quelli della configurazione di progetto. Sono state analizzate due diverse direzioni d'onda prevalenti, da Bora ( $45^\circ\text{N}$ ) e da Scirocco ( $90^\circ\text{N}$ ), entrambe con  $H_s=2$  m, caratteristiche del tratto di costa in esame.

La Figura 10 mostra i campi di altezza d'onda significativa. Le onde da Bora, caratterizzate da una direzione di propagazione quasi parallela all'asse fluviale, riescono a risalire il fiume con altezze d'onda significative fino a 0.5 m per oltre 100 m a monte della foce (Figura 10 a). L'argine destro del fiume riesce, invece, a schermare le onde da Scirocco abbattendo così l'altezza d'onda all'interno del tratto terminale del fiume (Figura 10 c). Allo stesso modo l'imboccatura del porto è maggiormente protetta dall'azione delle onde da Scirocco (Figura 10 c) rispetto all'azione delle onde da Bora (Figura 10 a).

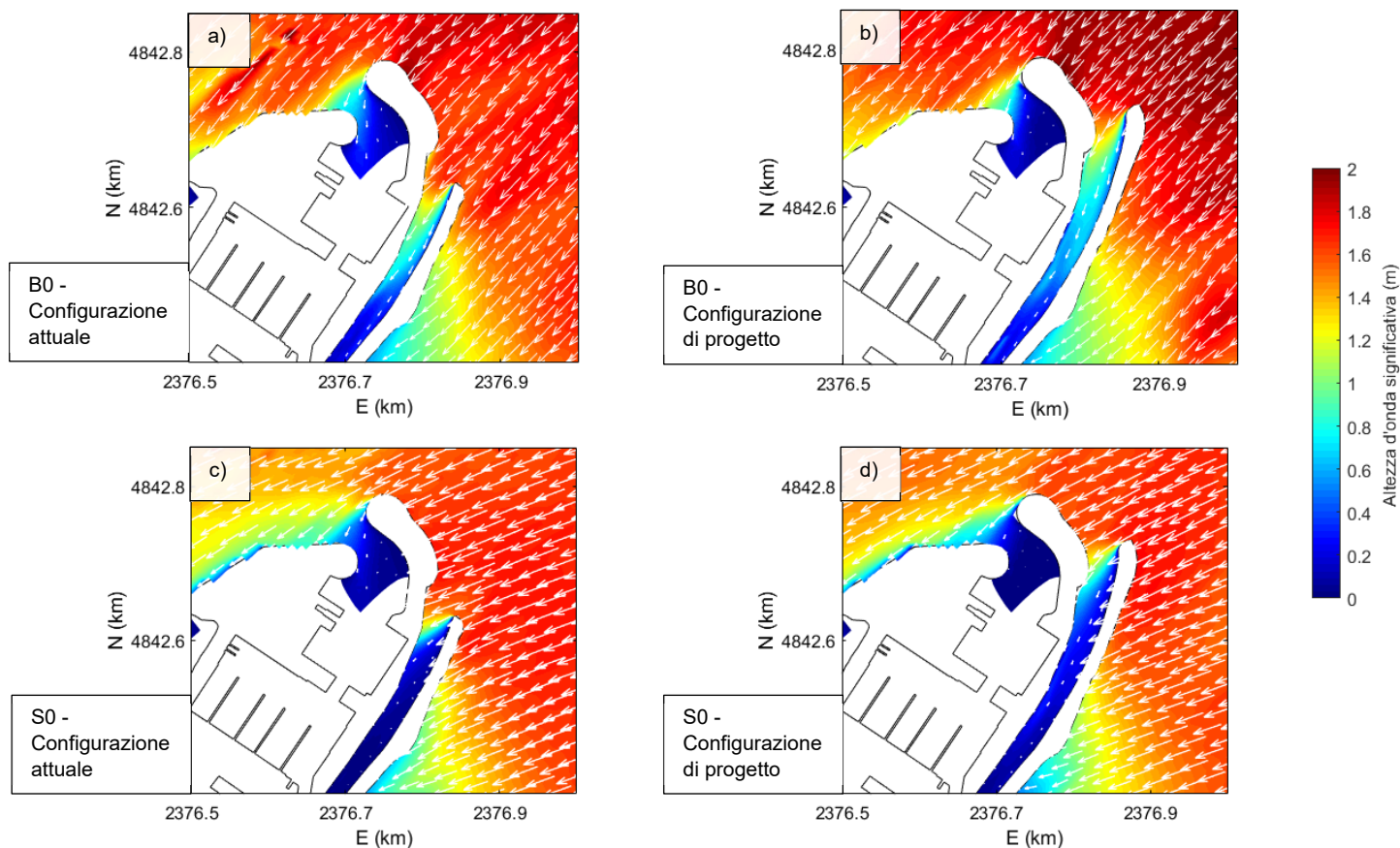


Figura 10 – Mappe dell'altezza d'onda significativa in prossimità della foce e dell'imboccatura del porto, nel caso di sola forzante ondata. La prima riga mostra i risultati ottenuti con onde da  $45^\circ\text{N}$  e  $H_s=2$  m, per la configurazione attuale (a) e di progetto (b). La seconda riga mostra i risultati ottenuti con onde da  $90^\circ\text{N}$  e  $H_s=2$  m, per la configurazione attuale (c) e di progetto (d). Le frecce bianche indicano la direzione dei fronti d'onda.

Il prolungamento dell'argine di destra favorisce questa azione di protezione nei confronti delle onde da Scirocco riducendo l'altezza delle onde che entrano nell'avamposto (Figura 10 b, d). Al contrario, però, non modifica in maniera significativa il campo d'onda all'interno del canale fluviale (Figura 10 b, d).

Le onde da Bora, raggiungendo la costa quasi perpendicolarmente, non sono in grado di generare una netta corrente longitudinale ma i campi di velocità sono caratterizzati da numerosi vortici antiorari nella zona dei frangenti (Figura 11 a, b). Lungo l'argine di destra le velocità, di circa 0.3 m/s, sono dirette in direzione onshore. Le onde da Scirocco sono invece molto più inclinate rispetto alla riva e generano una netta corrente longitudinale diretta da SE verso NO, con intensità che raggiungono anche 0.8 m/s in prossimità della costa (Figura 11 c, d). La corrente longshore principale è deviata dalla presenza del porto. Lungo l'argine di destra le velocità sono dirette in direzione offshore con valori fino a circa 0.5 m/s, per poi affiancare l'argine di sinistra e ricollegarsi alla corrente longitudinale principale a nord del porto. Il prolungamento dell'argine di destra allontana maggiormente la corrente dalla riva, distaccandola anche dall'argine di sinistra lungo il quale, nella configurazione di progetto, le correnti sono inferiori (Figura 11 d).

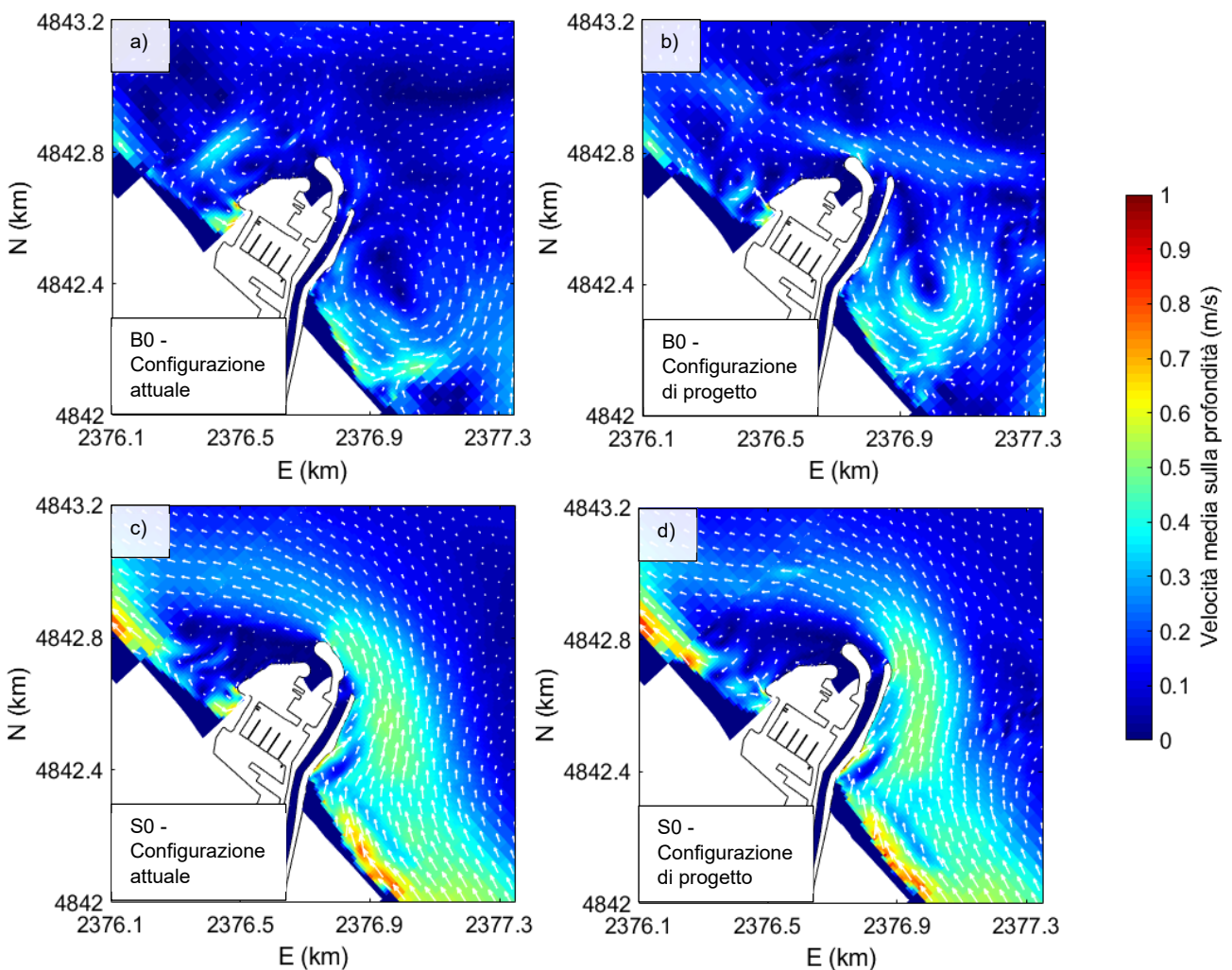


Figura 11 – Mappe della circolazione residua intorno nell'area estuarina, nel caso di sola forzante ondosa. La prima riga mostra i risultati ottenuti con onde da 45°N e  $H_s=2$  m, per la configurazione attuale (a) e di progetto (b). La seconda riga mostra i risultati ottenuti con onde da 90°N e  $H_s=2$  m, per la configurazione attuale (c) e di progetto (d).

Osservando più nel dettaglio la foce del fiume Misa (Figura 12) si può notare come le onde generino, in tutte le configurazioni, un vortice antiorario in prossimità dell'imboccatura del canale. Le correnti sono dirette verso monte lungo l'argine di sinistra mentre sono dirette verso mare lungo l'argine di destra. Nella configurazione attuale il vortice è posizionato leggermente più all'interno del fiume.

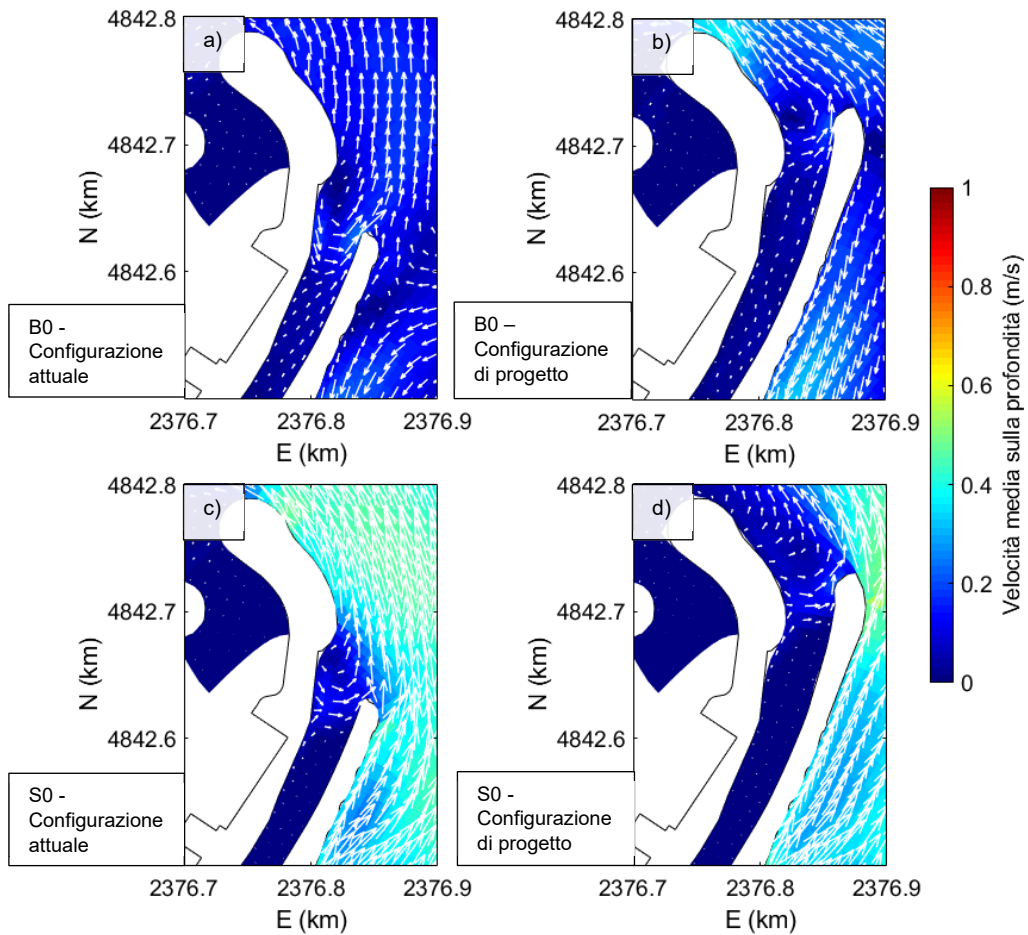


Figura 12 – Dettaglio dell'andamento delle correnti alla foce del fiume Misa per le due direzioni d'onda e le due configurazioni dell'argine considerate.

Per quanto concerne il trasporto dei sedimenti, Figura 13 mostra le mappe di trasporto medio in prossimità della foce del fiume Misa, mentre Figura 14 riporta le mappe di accumulo/erosione per tre istanti successivi delle simulazioni (dopo 16, 32 e 48 ore dall'inizio della simulazione).



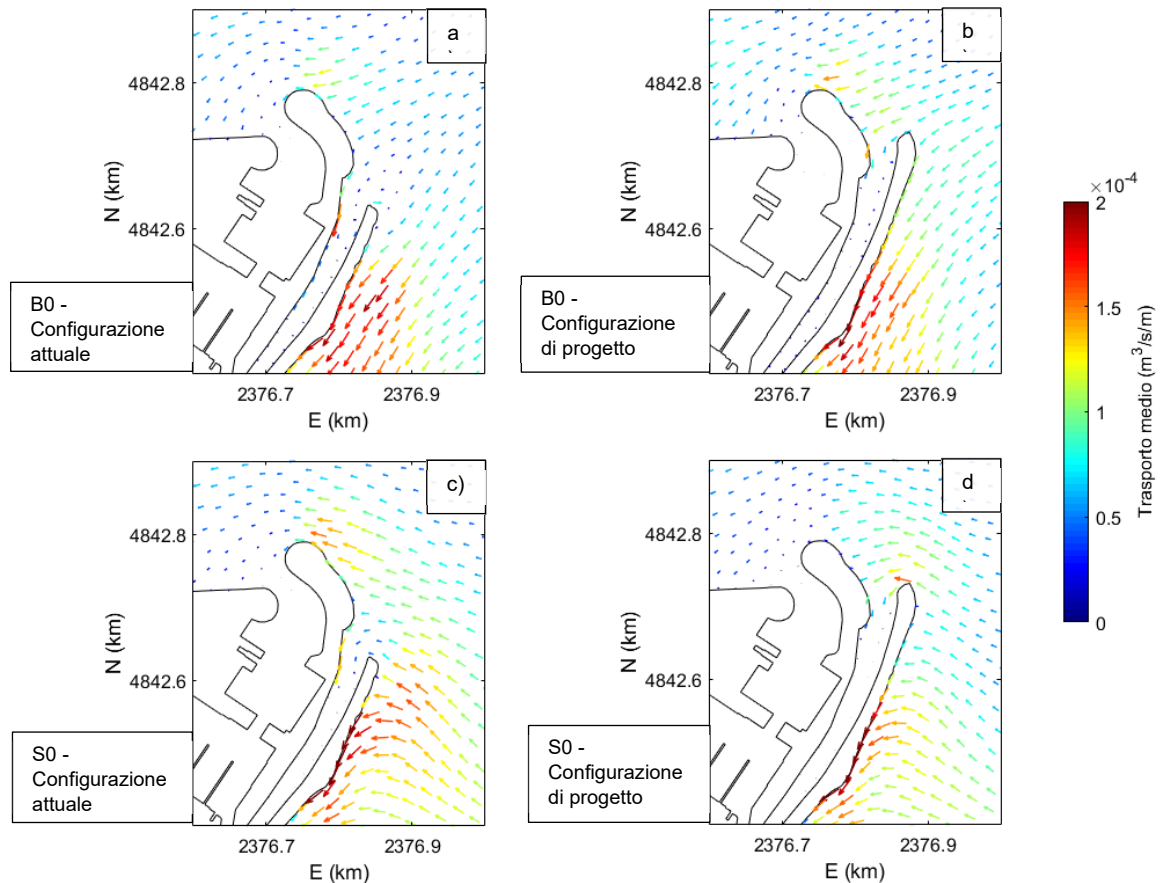


Figura 13 – Mappa del trasporto medio di sedimenti per le due direzioni d’onda e le due configurazioni dell’argine considerate.

In entrambe le configurazioni, le onde provenienti da Bora tendono ad ostruire maggiormente l’imboccatura del porto rispetto alle onde da Scirocco, mentre quest’ultime favoriscono maggiormente l’interrimento del canale fluviale (Figura 14). Lungo tutto il perimetro degli argini che delimitano il porto e il canale fluviale si osserva sempre una tendenza all’accumulo di sedimento. Le onde da Scirocco sono però responsabili di un maggiore tasso di accumulo lungo il lato sud dell’argine di sinistra a causa del trasporto di sedimenti verso NO che si genera durante le mareggiate da est (Figura 13 c, d). Un altro importante accumulo di materiale si verifica in adiacenza dell’argine di sinistra e si estende verso l’ingresso del porto alternando aree di accumulo ed erosione. Nella configurazione attuale si osserva un ulteriore accumulo di sedimenti all’estremità dell’argine di levante dove, però, il fondale è caratterizzato da un affossamento. Nella configurazione di progetto, l’accumulo di sedimento dovuto alle mareggiate da Bora è intensificato soprattutto all’interno del canale fluviale, mentre resta all’incirca uguale all’imboccatura del porto. Sotto l’azione delle onde da Scirocco, invece, la sedimentazione lungo l’argine di sinistra risulta leggermente ridotta per la configurazione di progetto rispetto a quella attuale.

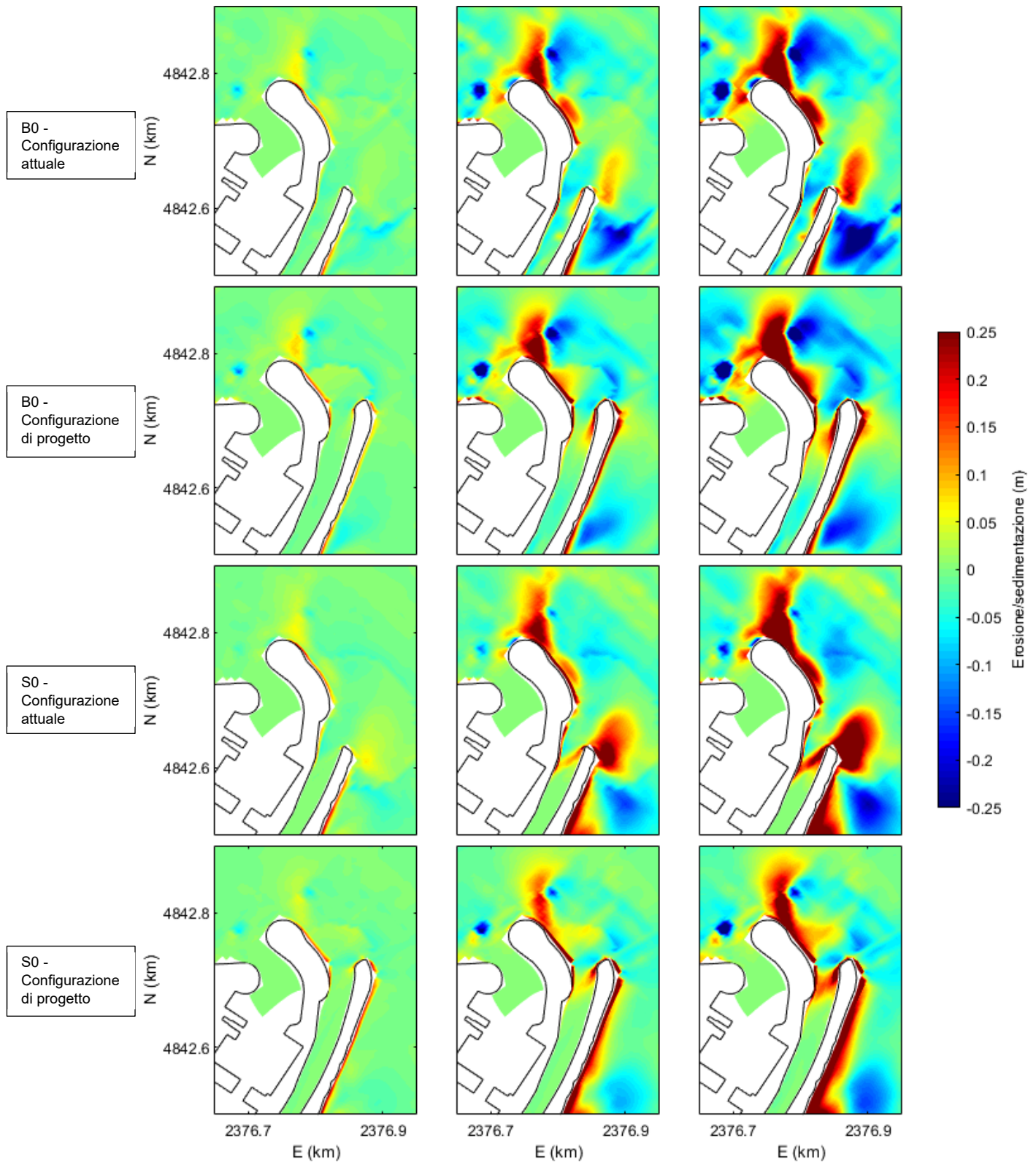


Figura 14 – Da sinistra verso destra, mappe di accumulo/erosione dopo 16, 32 e 48 ore dall'inizio delle simulazioni con sola forzante ondosca. La prima e la seconda riga mostrano i risultati ottenuti con onde da  $45^\circ\text{N}$  e  $H_s=2$  m, rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto. La terza e la quarta riga mostrano i risultati ottenuti con onde da  $90^\circ\text{N}$  e  $H_s=2$  m, rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto.

## 4.2 Simulazioni con onde stazionarie e portata fluviale

Per tenere in considerazione anche l'azione del fiume sono state eseguite delle simulazioni numeriche forzate sia da onde che da una portata fluviale rappresentativa di un tempo di ritorno dell'anno ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Il fiume, oltre all'azione di erosione provocata dalla corrente, apporta nella zona estuarina il materiale trasportato da monte. Nelle simulazioni tale materiale è stato simulato imponendo una concentrazione in ingresso nel bordo esterno del fiume proporzionale alla portata liquida, come desunto da un'analisi della letteratura sulle "sediment rating curves" ([De Girolamo et al., 2015](#)) e confermato dai dati forniti da Aquater ([1982](#)) per i fiumi della Regione Marche.

Confrontando i risultati così ottenuti (Figura 15) con quelli relativi alla sola azione delle onde (Figura 14) si può osservare come l'azione erosiva del fiume previene l'accumulo di materiale all'interno del canale, trasportando il sedimento verso il mare. L'espulsione del materiale da parte del fiume genera un incremento dell'accumulo lungo l'argine di sinistra, in particolare nel caso della configurazione di progetto (Figura 15). Inoltre, il materiale in sospensione proveniente da monte e generato dall'azione dalle onde viene trasportato dalle correnti e sedimenta nelle zone in cui le velocità diminuiscono ([Baldoni et al., 2022](#)). Pertanto, nella zona dell'avamposto, in presenza di un evento di piena, si riscontra un incremento dell'accumulo di sedimento dell'ordine di decine di cm. Tale meccanismo è accentuato in presenza dell'argine allungato in quanto la foce del fiume è più prossima all'ingresso del porto, facilitando l'entrata nel porto del sedimento trasportato dal fiume (Figura 16). Nella realtà si è di fatto osservato l'ingresso di materiale galleggiante all'interno del porto dopo un evento di piena (Figura 17).

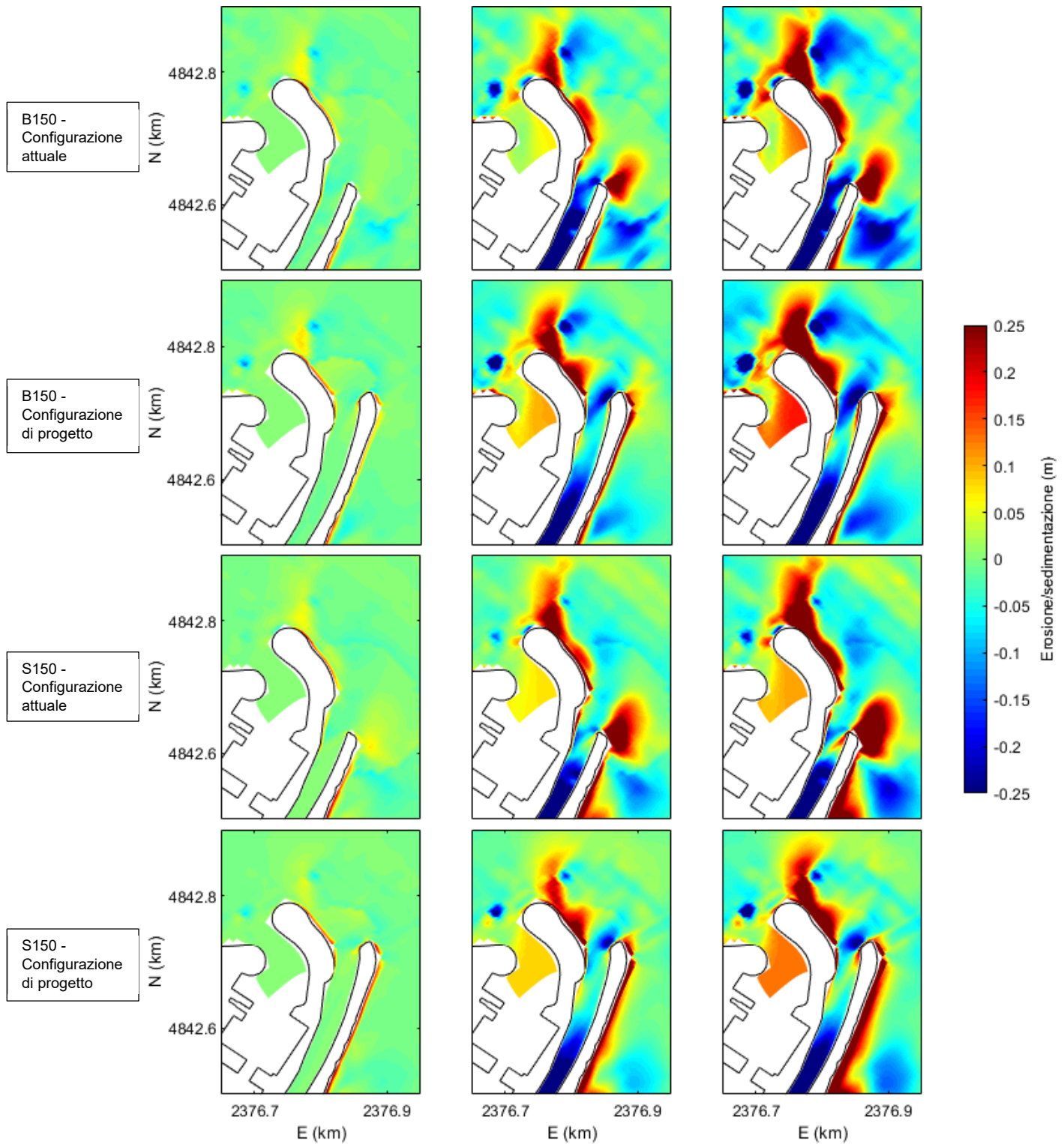


Figura 15 – Da sinistra a destra, mappe di accumulo/erosione dopo 16, 32 e 48 ore dall’inizio delle simulazioni con forzante ondosa e fluviale ( $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La prima e la seconda riga mostrano i risultati ottenuti con onde da  $45^\circ\text{N}$  e  $H_s=2 \text{ m}$ , rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto. La terza e la quarta riga mostrano i risultati ottenuti con onde da  $90^\circ\text{N}$  e  $H_s=2 \text{ m}$ , rispettivamente per la configurazione attuale e di progetto.



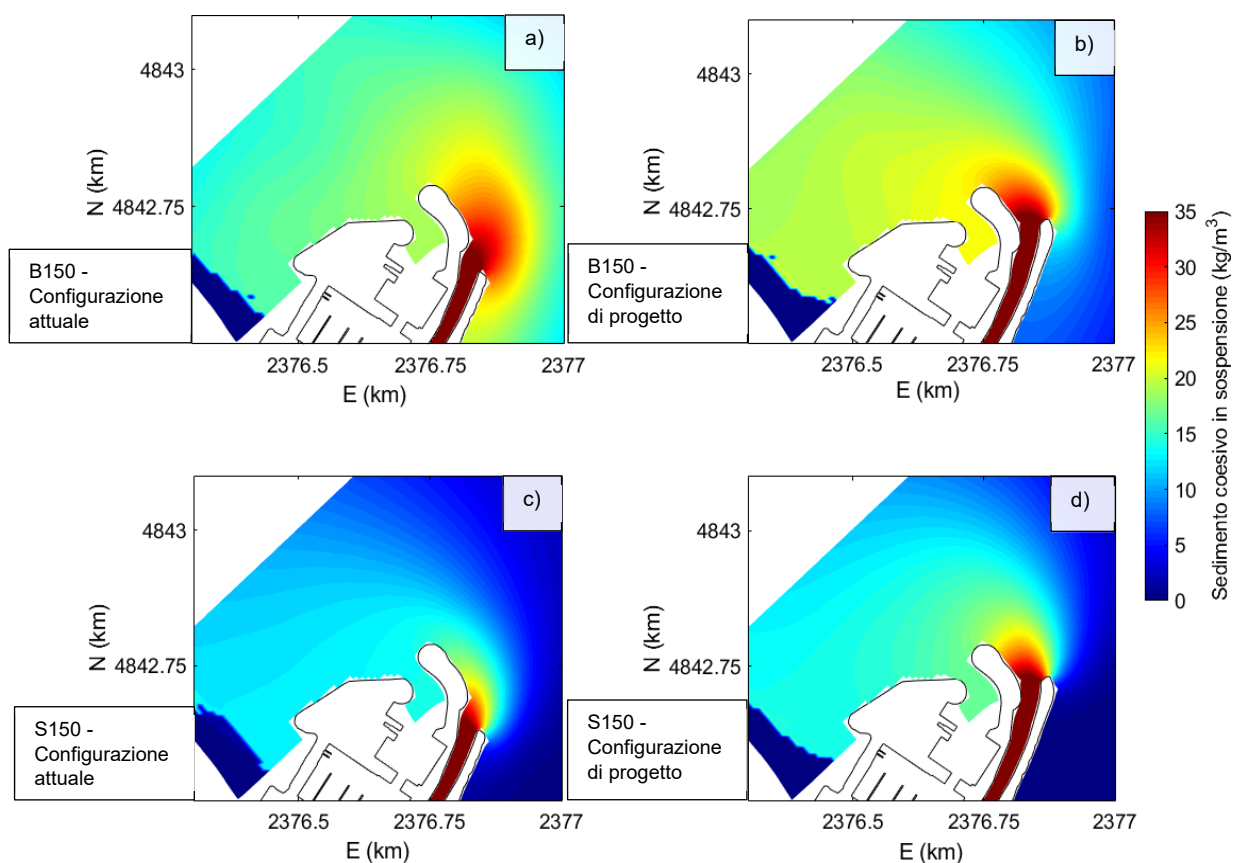


Figura 16 – Mappa della concentrazione di sedimento in sospensione trasportato dal fiume in un istante successivo alla massima portata ( $150 \text{ m}^3/\text{s}$ ). La prima riga mostra i risultati per le onde da Bora, mentre la seconda riga mostra i risultati per le onde da Scirocco, per la configurazione attuale e di progetto.



Figura 17 – Immagini relative alla situazione all'interno del porto dopo la piena del 11/12/2021, dove è possibile osservare la cospicua quantità di materiale proveniente dal fiume.

### 4.3 Simulazioni di eventi reali

Lo stesso comportamento riscontrato nei casi parametrici è stato ottenuto simulando alcuni eventi reali le cui caratteristiche principali sono descritte in Figura 18. Si riportano di seguito, a titolo di esempio, i risultati ottenuti per gli eventi del 24-26 Febbraio 2017 (Figura 19) e del 2-4 Febbraio 2018 (Figura 20), forzati con



serie temporali reali (Figura 18). Entrambi gli eventi sono stati valutati utilizzando la configurazione attuale e di progetto dell'argine di destra e, per entrambi, si può osservare il maggiore accumulo di sedimenti che si genera nel tratto terminale del canale e all'interno del porto nell'ipotesi di allungamento dell'argine di destra. L'entità dell'accumulo/erosione simulato negli eventi reali risulta inferiore a quello dei casi parametrici in quanto le forzanti, oltre ad essere meno intense, agiscono per periodi minori. Inoltre, a differenza degli scenari finora analizzati, le onde variano la loro direzione nel corso della durata dell'evento.

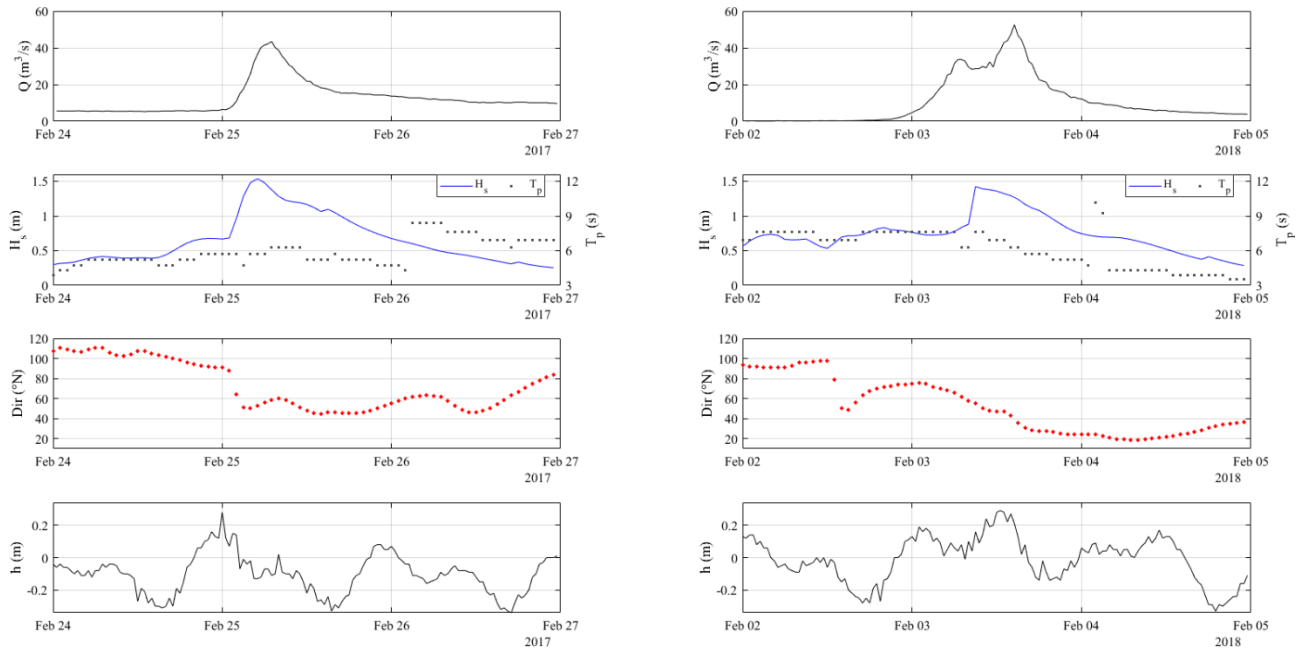


Figura 18 – Serie temporali per le simulazioni degli eventi reali.

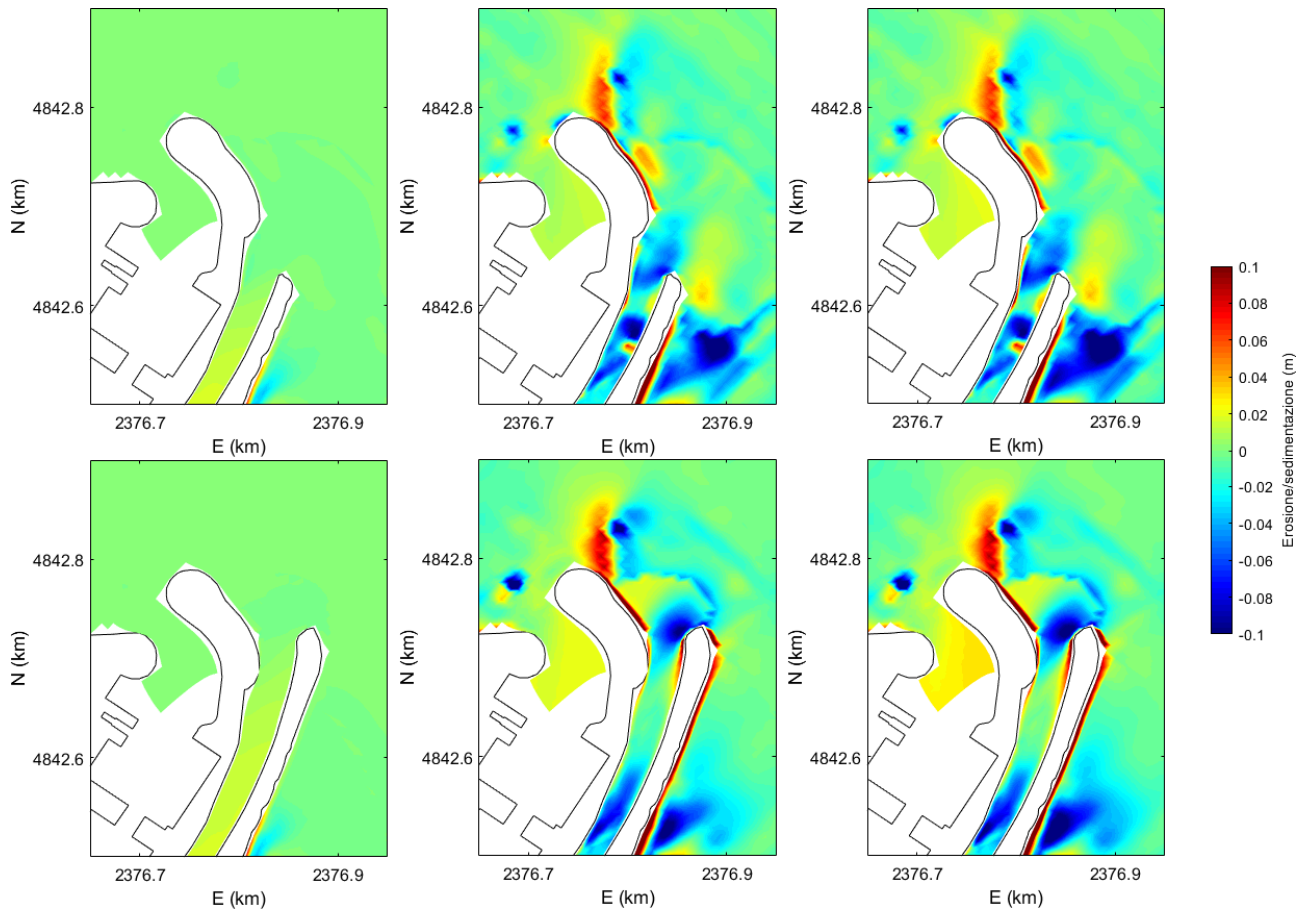


Figura 19 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo uno, due e tre giorni dall’inizio della simulazione dell’evento reale del 24-26 Febbraio 2017. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto.

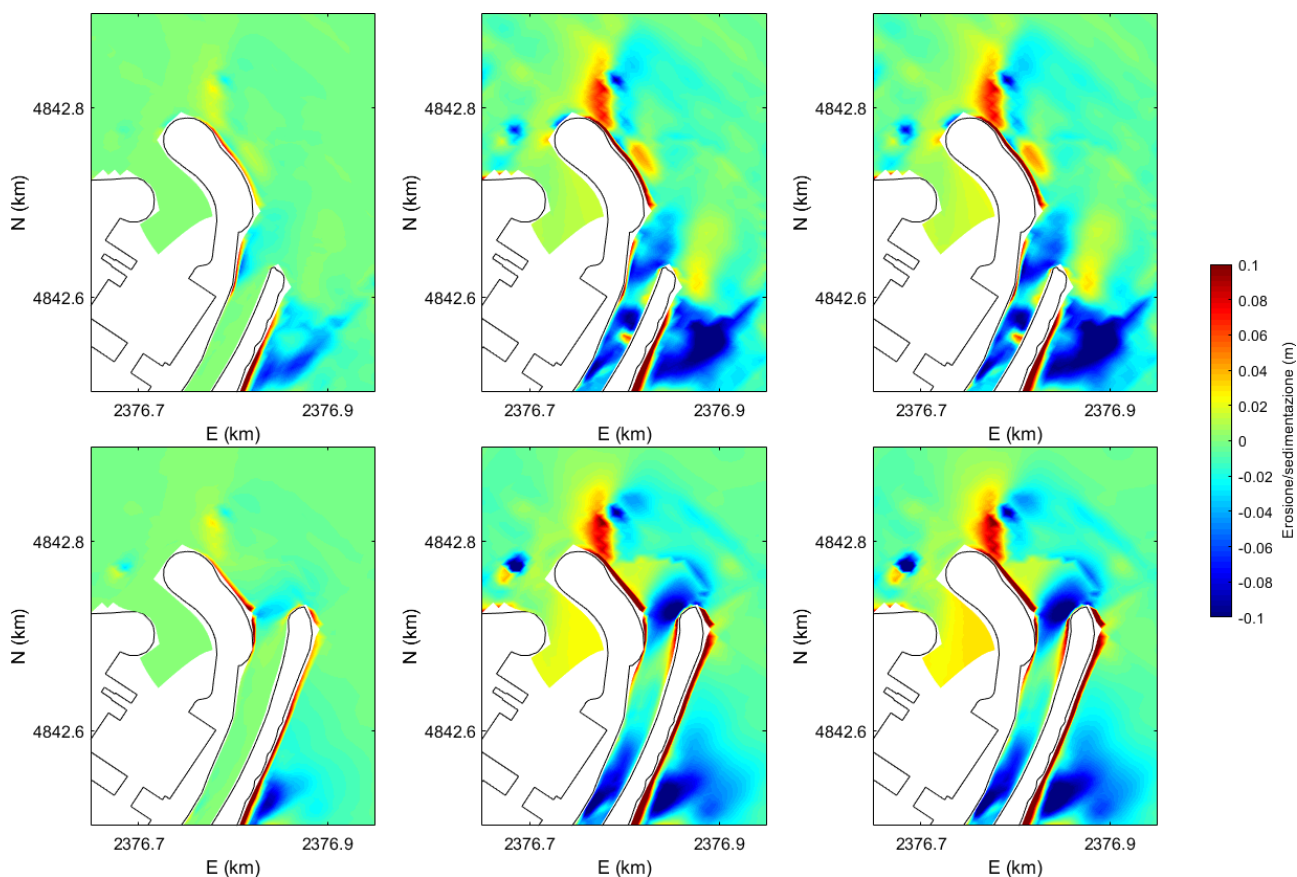


Figura 20 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo uno, due e tre giorni dall’inizio della simulazione dell’evento reale del 2-4 Febbraio 2018. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto.

#### 4.4 Effetti in caso di rotazione del campo ondoso

Per accelerare i processi che si verificano quando avvengono fenomeni di rotazione del campo d’onda indotti dall’evoluzione dei fronti meteorologici e relative piogge come descritto nella sezione precedente, è stato rappresentato uno scenario parametrico in cui le onde ruotano da 90°N fino a 30°N mantenendo un’altezza d’onda di 2 m.

La Figura 21 mostra la variazione del fondale dovuta solo all’azione delle onde, mentre per la Figura 22 è presente anche una portata fluviale di 150 m<sup>3</sup>/s in concomitanza delle onde provenienti da 45°N. Grazie alla maggior durata della simulazione e all’intensità delle forzanti, i pattern di accumulo/erosione, simili a quelli descritti nella sezione precedente, risultano enfatizzati in intensità.

Questa enfattizzazione rende evidenti gli effetti negativi dell’eventuale allungamento dell’argine di destra.

In particolare, la simulazione relativa al caso di pura forzante ondosa evidenzia chiaramente l’importante interrimento della foce del fiume, con accumuli di sedimento dell’ordine dei 50 cm sull’intera larghezza della sezione. Questi accumuli, indotti da un singolo evento, risultano dello stesso ordine di grandezza di quelli della barra di foce che si vorrebbe evitare.

La simulazione che tiene conto anche dell’effetto della portata del fiume non solo conferma l’impatto negativo dell’eventuale allungamento sulla sedimentazione alla foce, ma evidenzia un significativo maggior interrimento dell’avamposto, con aree interessate da depositi dell’ordine dei 25 cm, molto maggiori rispetto a quello che si avrebbe con la configurazione attuale dell’argine destro.

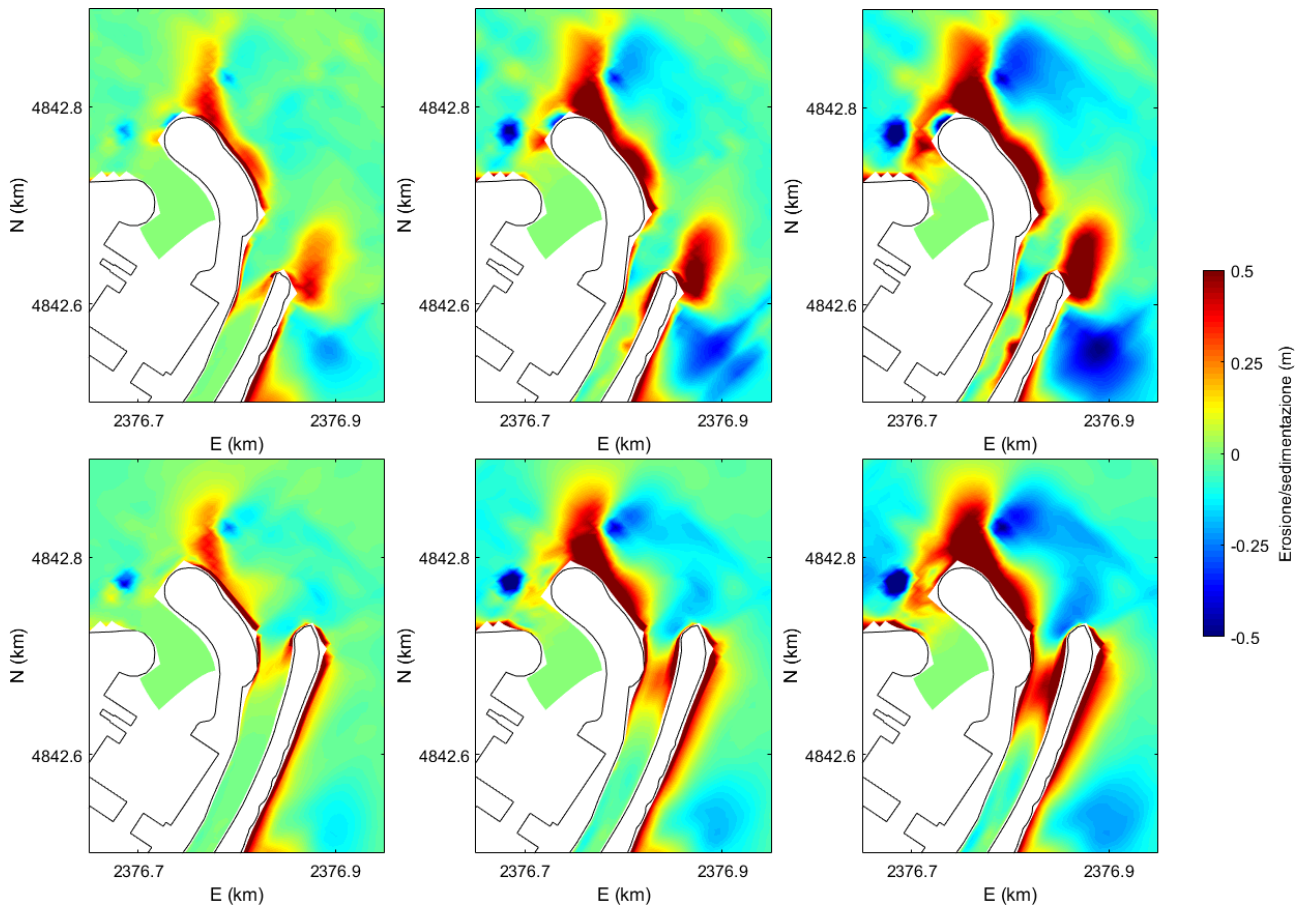


Figura 21 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo 40, 80 e 120 ore dall’inizio della simulazione con rotazione del campo ondoso. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto.

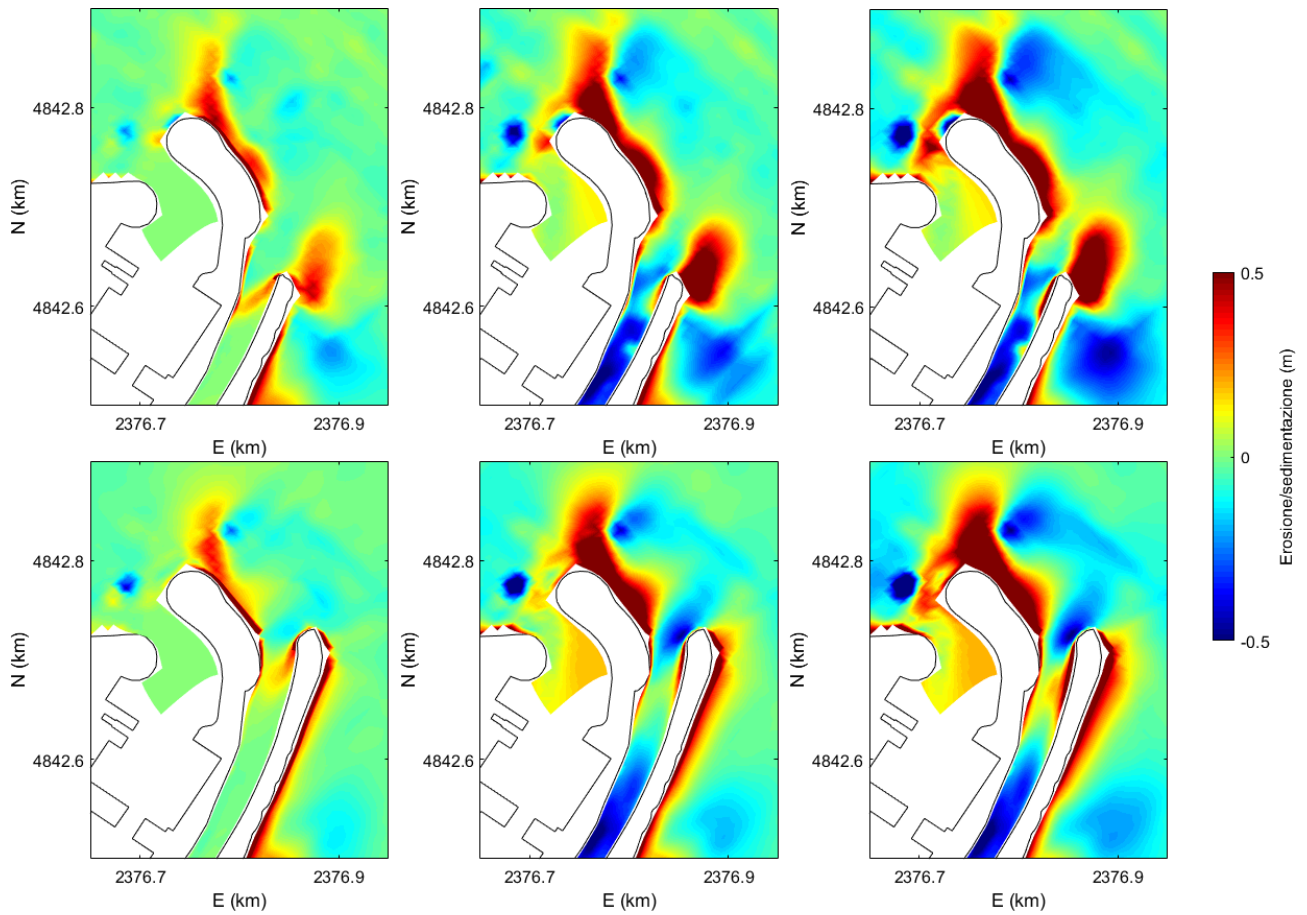


Figura 22 – Da sinistra a destra, mappe di erosione/accumulo dopo 40, 80 e 120 ore dall’inizio della simulazione con rotazione del campo ondoso associato a portata fluviale. La prima e la seconda riga mostrano, rispettivamente, i risultati per la configurazione attuale e di progetto.

Quanto sopra dimostra chiaramente gli effetti negativi in termini di sedimentazione ed interrimento indotti da un eventuale allungamento dell’argine di destra del fiume Misa, relativamente sia alla foce stessa del fiume sia alla vicina area portuale.



## 5. Conclusioni

Il presente studio è stato redatto per valutare il possibile impatto che l'allungamento dell'argine destro del fiume Misa può avere sull'idro-morfodinamica dell'area estuarina e portuale. Si è focalizzata l'attenzione sugli effetti che la configurazione di progetto avrebbe sulla formazione ed evoluzione della barra fluviale e sulla morfodinamica del paraggio circostante, con particolare interesse per l'area portuale. L'analisi è stata realizzata basandosi sia su informazioni provenienti da misure di campo che su risultati di simulazioni numeriche, eseguite sia per la configurazione attuale che per la configurazione di progetto.

Il deposito di sedimenti che si forma ciclicamente alla foce del fiume Misa è generato essenzialmente dal trasporto verso valle dei sedimenti fluviali. Questi sedimentano in prossimità delle sponde interne delle anse del fiume, dove le velocità sono basse. In presenza di portate fluviali, anche modeste, associate a tempi di ritorno di 1 anno, la barra subisce una migrazione netta verso mare e può essere completamente espulsa dal canale. Questo comportamento è stato osservato nel corso degli anni grazie al sistema di video-monitoraggio SGS (Figura 7, Figura 8) ed è stato confermato dalle simulazioni numeriche. Queste hanno evidenziato la capacità del flusso fluviale di erodere la barra, anche in presenza di concomitante forzante ondosa (Figura 9). Inoltre, si è calcolato che la percentuale di area erosa risulta maggiore o uguale nella configurazione attuale rispetto a quella di progetto. Anche l'azione delle onde contribuisce all'evoluzione della barra di foce, causandone una migrazione verso monte. Tuttavia, i risultati ottenuti da Baldoni et al. (2021) dimostrano che la migrazione verso monte causata da tempeste associate a tempi di ritorno maggiori o uguali a 5 anni è minore rispetto alla migrazione verso mare indotta da portate fluviali con tempo di ritorno di 1 anno. Questo conferma il ruolo dominante dell'azione fluviale sull'evoluzione del deposito. Le simulazioni numeriche hanno permesso di osservare anche il problema dell'interrimento della foce causato dalle onde, per ridurre il quale è stato proposto l'allungamento dell'argine destro del fiume. Figura 14 mostra che la foce viene maggiormente intasata nella configurazione di progetto quando le onde provengono da 45°N, mentre non si osservano differenze significative tra le due configurazioni per le onde da Scirocco. Evidente è il peggioramento dell'accumulo di sedimenti alla foce causato dalla rotazione del campo ondoso nella configurazione di progetto (Figura 21).

Il prolungamento dell'argine di destra del fiume Misa impatta anche sull'idro-morfodinamica del paraggio circostante, in particolare dell'area portuale. In presenza di sola forzante ondosa, non si evidenziano grandi differenze sull'evoluzione del fondo in corrispondenza dell'imboccatura del porto tra le due configurazioni. Questo è vero soprattutto per le onde da Bora, mentre per le onde da Scirocco, nella configurazione di progetto, l'accumulo di sedimenti all'imboccatura del porto è leggermente minore rispetto alla configurazione attuale. La situazione è molto diversa, invece, nel caso di portate fluviali associate a forzante ondosa. Il prolungamento dell'argine destro fa sì che la foce venga a trovarsi più vicina all'imboccatura del porto e causa la deviazione del pennacchio in uscita dal fiume verso NO (Figura 16). Di conseguenza, l'evoluzione del fondo mostrata in Figura 15 evidenzia un maggiore tasso di accumulo all'interno del porto nella configurazione di progetto. Lo stesso risultato viene ottenuto in presenza di rotazione del campo ondoso, sia per gli eventi reali (Figura 19, Figura 20) che per quello parametrico (Figura 22).

Quanto sopra dimostra che l'eventuale allungamento dell'argine di destra del fiume Misa ha impatti negativi in termini di sedimentazione ed interrimento sia sulla foce stessa del fiume sia sulla vicina area portuale.

## Bibliografia

AQUATER - REGIONE MARCHE (1982) – Studio Generale per la difesa delle coste. Prima fase. Vol. II: rapporto di settore.

Baldoni, A., Perugini, E., Penna, P., Parlagreco, L. & Brocchini, M. (2022). A comprehensive study of the river plume in a microtidal setting. Inviato per la pubblicazione a *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.

Baldoni, A., Perugini, E., Soldini, L., Calantoni, J. & Brocchini, M. (2021). Long-term evolution of an inner bar at the mouth of a microtidal river. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* **262**, 107573.

Brocchini, M., Calantoni, J., Postacchini, M., Sheremet, A., Staples, T., Smith, J., Reed, A.H., Braithwaite, E.F., Lorenzoni, C., Russo, A., Corvaro, S., Mancinelli, A. & Soldini, L. (2017). Comparison between the wintertime and summertime dynamics of the Misa River estuary. *Marine Geology* **385**, 27-40.

Consorzio di Bonifica (2019). Fiume Misa. Mitigazione del rischio idraulico della città di Senigallia. Intervento 1: pulizia idraulica e dragaggio del tratto Terminale del canale a valle del ponte RFI. Relazione Geologica. 29pp.

Darvini, G. & Memmola, F. (2020). Assessment of the impact of climate variability and human activities on the runoff in five catchments of the Adriatic Coast of south-central Italy. *Journal of Hydrology: Regional Studies* **31**, 100712.

De Girolamo, A. M., Pappagallo, G. & Porto, A. L. (2015). Temporal variability of suspended sediment transport and rating curves in a Mediterranean river basin: The Celone (SE Italy). *Catena* **128**, 135-143.

Dinamica della sedimentazione marina e impatto sulla costa.pdf (Regione Marche).

Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., Sorgente, D., Alvisi, F. & Albertazzi, S. (2005). Fine-sediment mass balance in the western Adriatic continental shelf over a century time scale. *Marine Geology* **222**, 113-133.

Melito, L., Parlagreco, L., Perugini, E., Postacchini, M., Devoti, S., Soldini, L., Zitti, G., Liberti, L. & Brocchini, M. (2020). Sandbar dynamics in microtidal environments: Migration patterns in unprotected and bounded beaches. *Coastal Engineering* **161**, 103768.

Milliman, J. D. & Syvitski, J. P. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The journal of Geology* **100(5)**, 525-544.

Postacchini, M., Soldini, L., Lorenzoni, C. & Mancinelli, A. (2017). Medium-term dynamics of a middle Adriatic barred beach. *Ocean Science* **13(5)**, 719-734.