



Comune di Rimini

DIREZIONE GENERALE
Settore Infrastrutture e Qualità Ambientale

AVAMPORTO DI RIMINI

COMPLETAMENTO OPERE DI DIFESA FORANEE

“Fondo per la progettazione di fattibilità delle infrastrutture e degli insediamenti prioritari per lo sviluppo del Paese, nonché per la project review delle infrastrutture già finanziate - secondo l'art. 202 del Codice dei Contratti Pubblici (Dlgs 50/2016 e s.m.i.), definito dal Decreto del Ministro delle infrastrutture e dei trasporti n. 171 del 10 maggio 2019 e dal Decreto direttoriale n. 8060 dell'8 agosto 2019”

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO- ECONOMICA



ELABORATO 9: STUDIO MODELLAZIONE IDROMORFODINAMICA COSTIERA

MODELLAZIONE

Ing. Stefano Bagli

Ing. Paolo Mazzoli

Ing. Antonio Sartini



PROGETTAZIONE



RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:

Ing. Alberto Dellavalle

SUPPORTO AL RUP:

Ing. Massimo Paganelli

Ing. Enrico Miani

Dott. ssa Elena Favi





INDICE

1 Premessa 5

2 Dati di progetto 5

3 Analisi delle condizioni di trasporto 7

4 Condizioni al contorno 16

 4.1 Batimetria 16

 4.2 Clima meteomarinario - Altezza e direzione d’onda 20

 4.3 Portata del fiume Marecchia..... 29

 4.4 Trasporto solido del fiume Marecchia 30

5 Modello idro fluido dinamico CFD – FLOW-3D HYDRO 31

 5.1 Equazioni del moto 32

 5.1.1 Sistemi di coordinate 32

 5.1.2 Equazione di continuità della massa e sue variazioni 32

 5.1.3 Equazioni del moto 34

6 Scenari di simulazione..... 34

 6.1 Scenario 1 – condizioni di calma..... 35

 6.1.1 Meshing 35

 6.1.2 Portata Marecchia 36

 6.1.3 Moto ondoso – condizioni al contorno 36

 6.1.4 Tempo di simulazione 36

 6.1.5 Risultati 36

 6.1.5.1 Scenario 1 *ante-operam* 36

 6.1.5.2 Scenario 1 *post-operam* lotto 1 41

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	2	di	104	00			23	03	23



6.1.5.3	Scenario 1 <i>post-operam</i> lotto 2	44
6.2	Scenario 2a – condizioni di onda da Nord-Ovest – W5.....	55
6.2.1	Meshing.....	56
6.2.2	Portata Marecchia	57
6.2.3	Moto ondoso – condizioni al contorno	57
6.2.4	Tempo di simulazione.....	58
6.2.5	Risultati	58
6.2.5.1	Scenario 2a <i>ante-operam</i>	58
6.2.5.2	Scenario 2a <i>post-operam</i> lotto 1.....	61
6.2.5.3	Scenario 2a <i>post-operam</i> lotto 2.....	64
6.3	Scenario 2b – condizioni di onda da Nord-Ovest – W1	70
6.3.1	Meshing.....	70
6.3.2	Portata Marecchia	71
6.3.3	Moto ondoso – condizioni al contorno	72
6.3.4	Tempo di simulazione.....	73
6.3.5	Risultati	73
6.3.5.1	Scenario 2b <i>ante-operam</i>	73
6.3.5.2	Scenario 2b <i>post-operam</i> lotto 1.....	76
6.3.5.3	Scenario 2b <i>post-operam</i> lotto 2.....	79
6.4	Scenario 3 – condizioni di onda da Nord.....	85
6.4.1	Meshing.....	85
6.4.2	Portata Marecchia	86
6.4.3	Moto ondoso – condizioni al contorno	87

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	3	di	104	00			23	03	23



6.4.4	Tempo di simulazione	87
6.4.5	Risultati	87
6.4.5.1	Scenario 3 <i>ante-operam</i>	87
6.4.5.2	Scenario 3 <i>post-operam</i> lotto 1	91
6.4.5.3	Scenario 3 <i>post-operam</i> lotto 2	94
7	Conclusioni	101
8	Bibliografia	104

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	4	di	104	00			23	03	23



1 PREMESSA

Le finalità dello studio in esame riguarda lo sviluppo di un modello idro-fluido-dinamico (CFD) costiero per il tratto di costa compreso fra la foce del Fiume Marecchia ed il progetto del nuovo Avamporto di Rimini, in grado di simulare sia le condizioni del moto ondoso sia il trasporto solido determinato dall'immissione di sedimenti apportati dal sistema fluviale della foce del Fiume Marecchia.

In particolare, le simulazioni modellistiche saranno condotte nelle condizioni *ante-operam* e in due distinti scenari *post-operam*, sulla base della realizzazione dei diversi lotti previsti per la realizzazione del nuovo avamporto.

Il modello di idrodinamica costiera sarà utilizzato per simulare la propagazione del moto ondoso dal largo verso la costa e le sue interazioni idrodinamiche e di trasporto solido con i nuovi manufatti previsti dalla realizzazione dell'avamporto.

Verranno identificate le condizioni più critiche di interazione fra la portata veicolata dal fiume Marecchia ed il trasporto solido costiero, valutando in particolare gli effetti determinati dal progetto del nuovo avamporto.

2 DATI DI PROGETTO

Il progetto di realizzazione del nuovo Avamporto di Rimini prevede il prolungamento del molo di Levante e la realizzazione di una nuova scogliera in adiacenza al molo di Ponente ([1], [2]); la figura seguente, tratta dalla planimetria di progetto del progetto di fattibilità tecnico-economica approvato dal Comune di Rimini.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	5	di	104	00			23	03	23



Figura 1: planimetria generale di progetto del nuovo avamposto di Rimini

Le opere a scogliera, secondo quanto riportato in [1] sono costituite da:

- Una mantellata di materiale di pezzatura idonea a resistere all'azione ondosa di progetto;
- Uno strato di filtro, per garantire la necessaria permeabilità alla protezione di sponda e prevenire la fuoriuscita di materiale dal corpo dell'argine
- Un nucleo in materiale più fine, o *tout venant*.

Il progetto prevede la realizzazione di due lotti distinti e consecutivi: il primo lotto relativo al prolungamento e completamento del molo di Levante ed il secondo lotto relativo al prolungamento e completamento del molo di Ponente.

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	6	di	104	00		23	03	23



3 ANALISI DELLE CONDIZIONI DI TRASPORTO

Nella Relazione tecnica idraulica [3] vengono analizzate l'andamento della linea di costa e le condizioni di trasporto del sedimento in corrispondenza della spiaggia di San Giuliano, finalizzate al progetto di salpamento delle scogliere foranee emerse esistenti nel tratto di litorale della spiaggia di S. Giuliano situato tra la foce del F. Marecchia ed il porto turistico di Rimini; vengono in particolare riportate le seguenti considerazioni:

- La portata solida che accompagna le piene del Deviatore Marecchia tende a depositarsi lungo l'asse della foce con granulometrie decrescenti verso il largo formando una barra di foce che viene successivamente smantellata dalle onde. Poiché il verso prevalente della portata solida longitudinale, (come confermato anche dagli studi effettuati dalla società HR WALLINGFORD "Studi supporto all'intervento di messa in sicurezza dell'imboccatura portuale" effettuati per il Comune di Rimini) è diretto verso Bellaria (da destra a sinistra per chi guarda il mare) i sedimenti vengono sospinti verso la spiaggia di Rivabella – Viserba. Solo una piccola parte di sabbia più fine entra nella spiaggia di San Giuliano accrescendo i fondali.

- Il bilancio sedimentario della spiaggia di San Giuliano ha quindi apporti molto ridotti dall'esterno, è una baia chiusa dove gli spostamenti della linea di riva sono legate principalmente alla diffrazione delle onde che incidono la scogliera esistente con diverse direzioni.

La relazione fra gli apporti del fiume Marecchia e le condizioni di trasporto/deposizione nel tratto di mare prospiciente la spiaggia di San Giuliano sono dettagliate anche nella relazione tecnica specialistica [4] relativa alla definizione delle soluzioni per la messa in sicurezza dell'imboccatura del porto Canale. Si riportano di seguito le valutazioni contenute nel documento citato.

Le seguenti figure mostrano la distribuzione delle velocità del getto, associate a piene del Marecchia con tempi di ritorno di 10 e 100 anni (con portate rispettivamente di 664 e 1202m³s⁻¹), calcolata assumendo un coefficiente di attrito adimensionale pari a 0.05 e profondità del fondale variabile linearmente.

In entrambi i casi esaminati si evidenzia il fatto che il campo di velocità, e quindi il trasporto di sedimenti ad esso connesso, pur riducendosi verso il largo, rimane di una certa entità fino di fronte all'area portuale.

I sedimenti grossolani (sabbie) vengono spinti dalle correnti marine verso la spiaggia di S. Giuliano come risulta dall'avanzamento verificatosi nell'ultimo decennio. I sedimenti in sospensione vengono trasportati verso il largo e trascinati dalla corrente generale di circolazione dell'Adriatico verso Sud.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	7	di	104	00			23	03	23

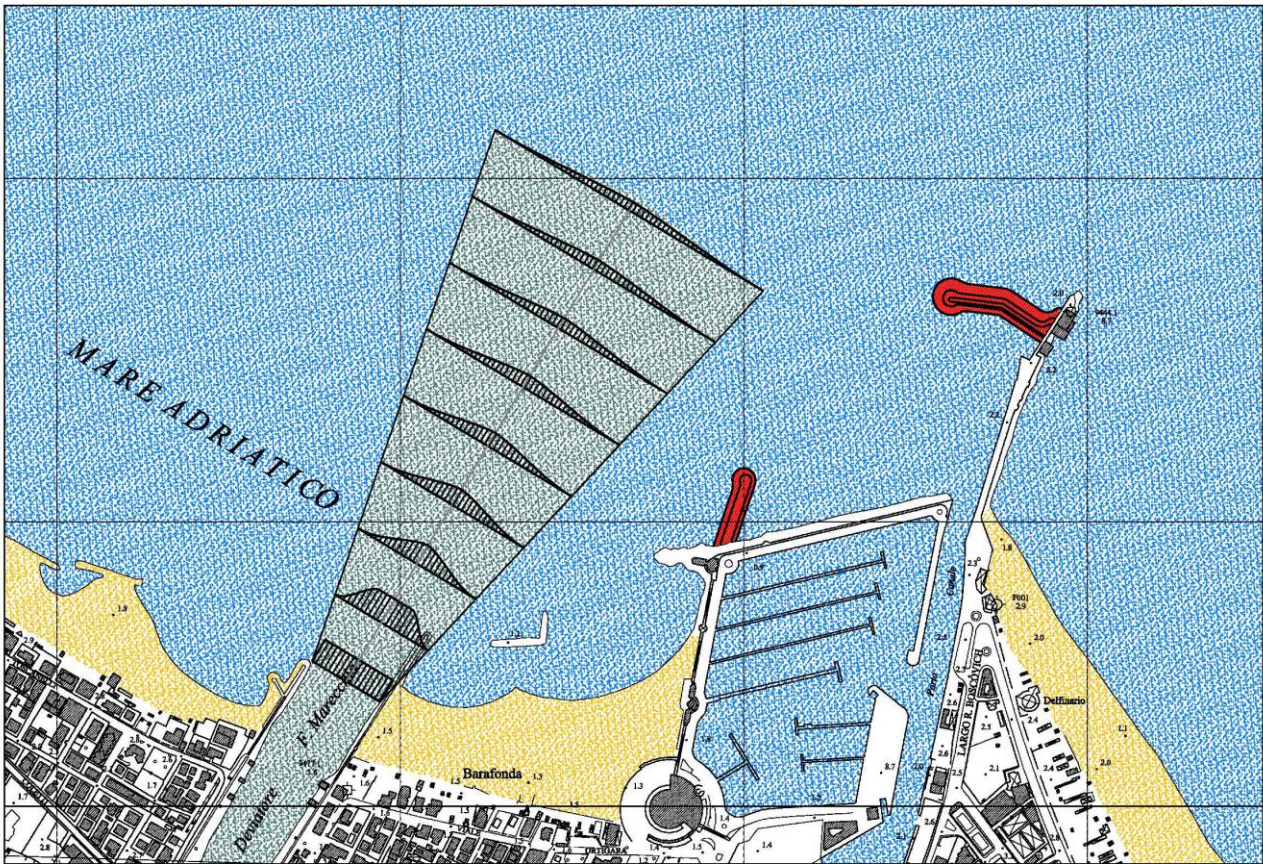


Figura 2: Espansione del getto e distribuzione delle velocità in mare (piena con Tr 10anni) (figura 7.2 di [4])

° Documento:	Foglio				Rev.:		
Relazione Tecnica	8	di	104	00	23	03	23

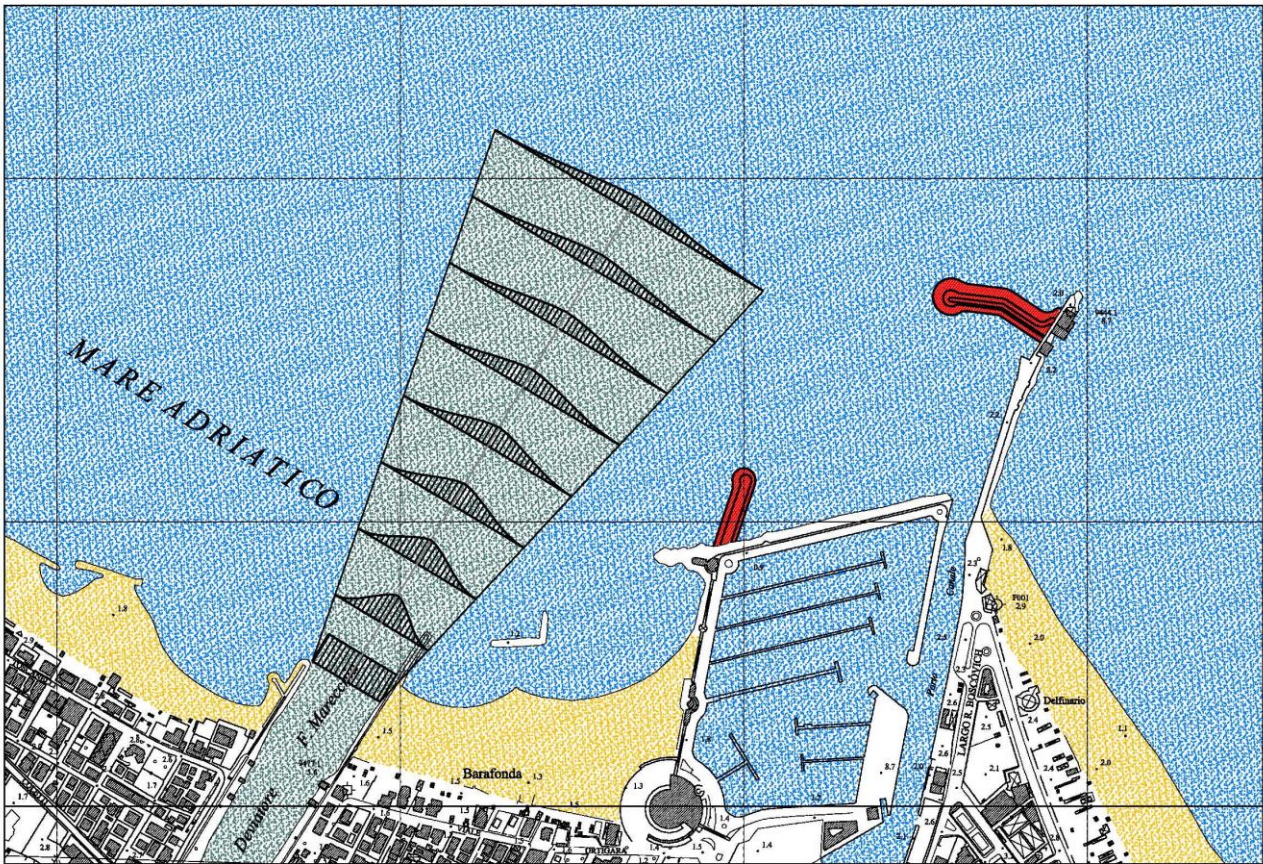


Figura 3: Espansione del getto e distribuzione delle velocità in mare (piena con Tr 100anni) (figura 7.3 di [4])

In presenza di moto ondoso incidente dal settore di NordOvest il pennacchio potrebbe essere spinto, a seconda dell'intensità della mareggiata, verso l'imboccatura portuale. Come dimostra lo studio eseguito dalla HR-Wallingford a corredo della procedura di V.I.A., le mareggiate da NordOvest sono comunque caratterizzate da altezza d'onda molto contenuta (vedi Fig.3.9 del sopracitato studio) e bassa frequenza.

° Documento:	Foglio				Rev.:		
Relazione Tecnica	9	di	104	00	23	03	23



Figura 4: Deviazione del pennacchio dovuta ad una mareggiata da NordOvest (figura 7.4 di [4])

La presenza del secondo tratto di scogliera, radicato alla diga di sopraflutto del porto turistico, nel caso di mareggiata dal settore di NordOvest, potrebbe favorire l'allontanamento del getto dalla zona dell'imboccatura, favorendone l'espansione più al largo. Rispetto alla situazione senza il secondo braccio di scogliera l'apporto di materiale solido verso l'imboccatura del porto sarebbe molto ridotto.

° Documento:	Foglio				Rev.:		
Relazione Tecnica	10	di	104	00	23	03	23

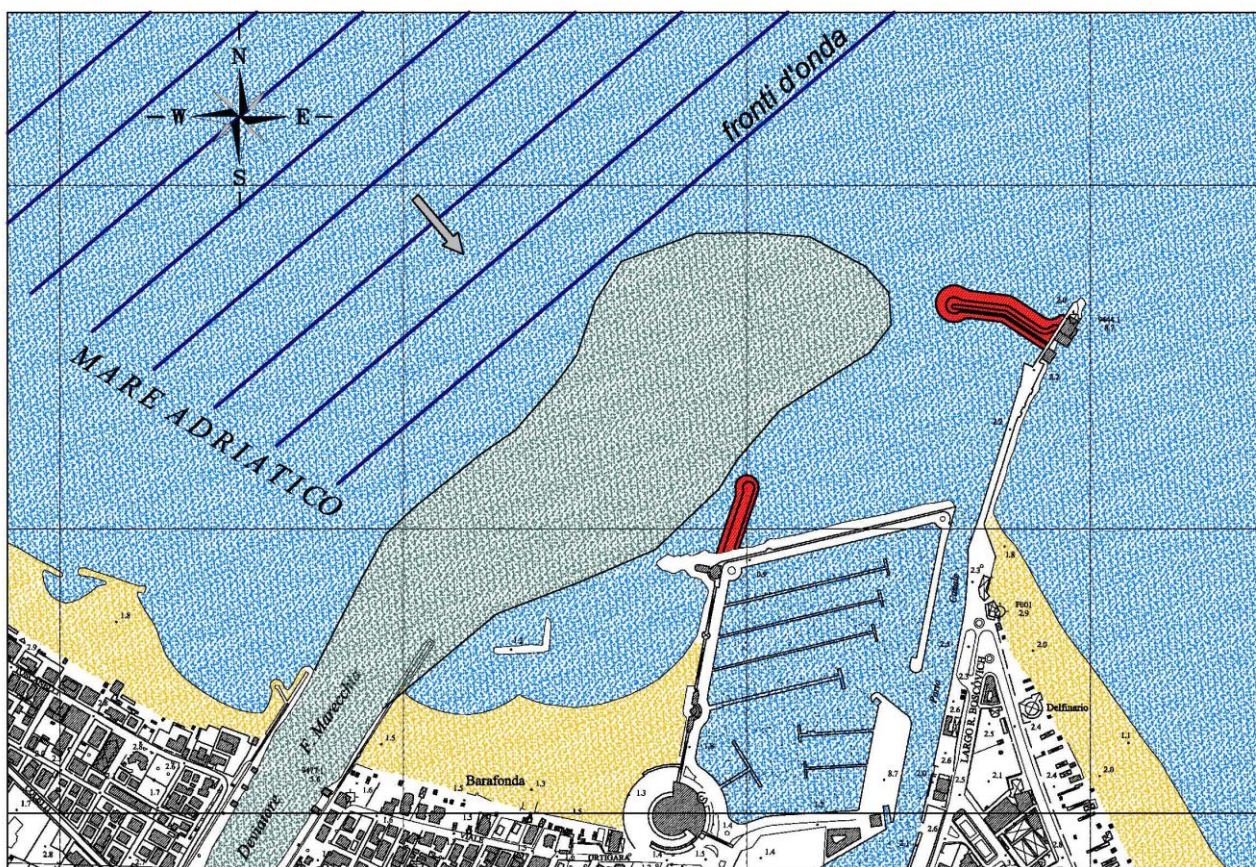


Figura 5: Deviazione del pennacchio dovuta ad una mareggiata da NordOvest in presenza del tratto di scogliera radicato alla diga di sopraflutto del porto turistico (figura 7.5 di [4])

Con i mari prevalenti dal 1° quadrante i sedimenti vengono spinti verso Bellaria, come dimostra il sopraccitato studio della Hr-Wallingford [...] il trasporto solido longitudinale è prevalentemente diretto verso NordOvest.

Le condizioni di trasporto evidenziate nelle relazioni sopra citate sono riscontrabili anche dall'analisi delle foto satellitari disponibili (fonte: Sentinel 2, [5]).

In Figura 6 ed in Figura 7 sono riportate rispettivamente l'immagine satellitare Sentinel 2 -level 2A relativa alla foce del Marecchia il giorno 10/01/2023 alle ore 10:00 UTC; è ben identificabile un pennacchio determinato dal flusso di sedimenti che viene deviato verso la spiaggia e le strutture portuali. Le condizioni di onda registrate dalla boa Nausicaa e riportate da ARPAE SIMC ([6]) per il 10/01/2023 mostrano una direzione prevalente da NO con altezza media H_s pari a 0.48 m e periodo di picco T_p pari a 3.2 s.

° Documento:	Foglio				Rev.:		
Relazione Tecnica	11	di	104	00	23	03	23

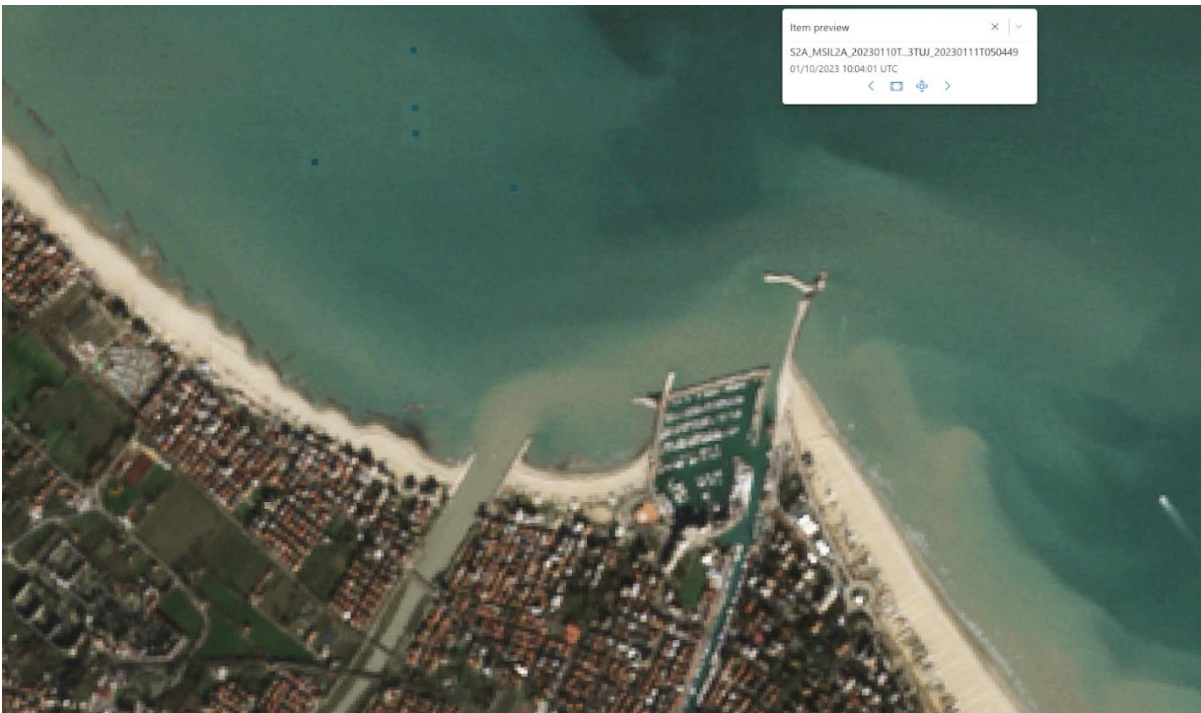


Figura 6: immagine satellitare Sentinel 2, 10/01/2023 ore 10:00 UTC

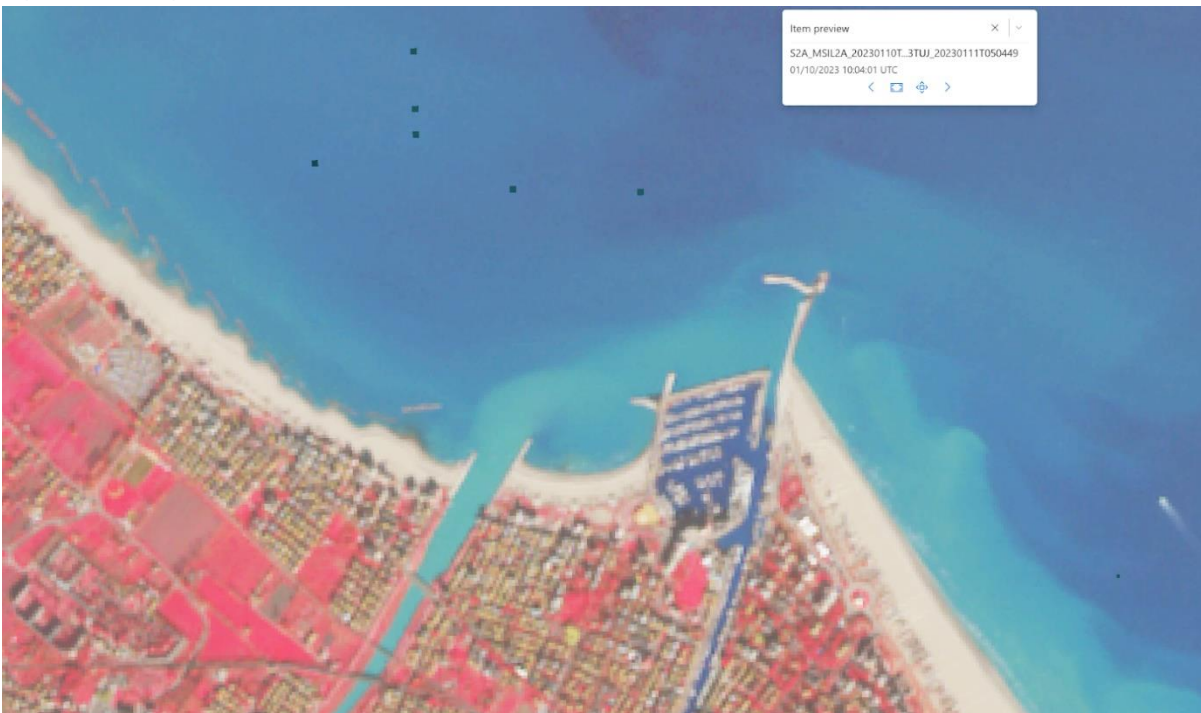


Figura 7: immagine satellitare Sentinel 2, 10/01/2023 ore 10:00 UTC colorata all'infrarosso

Nel caso le condizioni ondose non siano sufficienti alla deviazione del *plume* ed il moto indotto dalla corrente del Marecchia sia superiore a quello indotto dal moto ondoso si può assistere ad una

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	12	di	104	00		23	03	23

diffusione verso il mare aperto, con un interessamento residuo delle strutture portuali, come mostrato nelle figure seguenti.

In Figura 8 si riporta l'immagine satellitare Sentinel 2 relativa al 02/02/2023 alle ore 10:12; l'onda misurata dalla boa Nausicaa ([6]) per il giorno in esame presenta una direzione prevalente da NO, un'altezza d'onda media H_s pari a 0.21 m ed un periodo di picco medio T_p pari a 2.2 s.

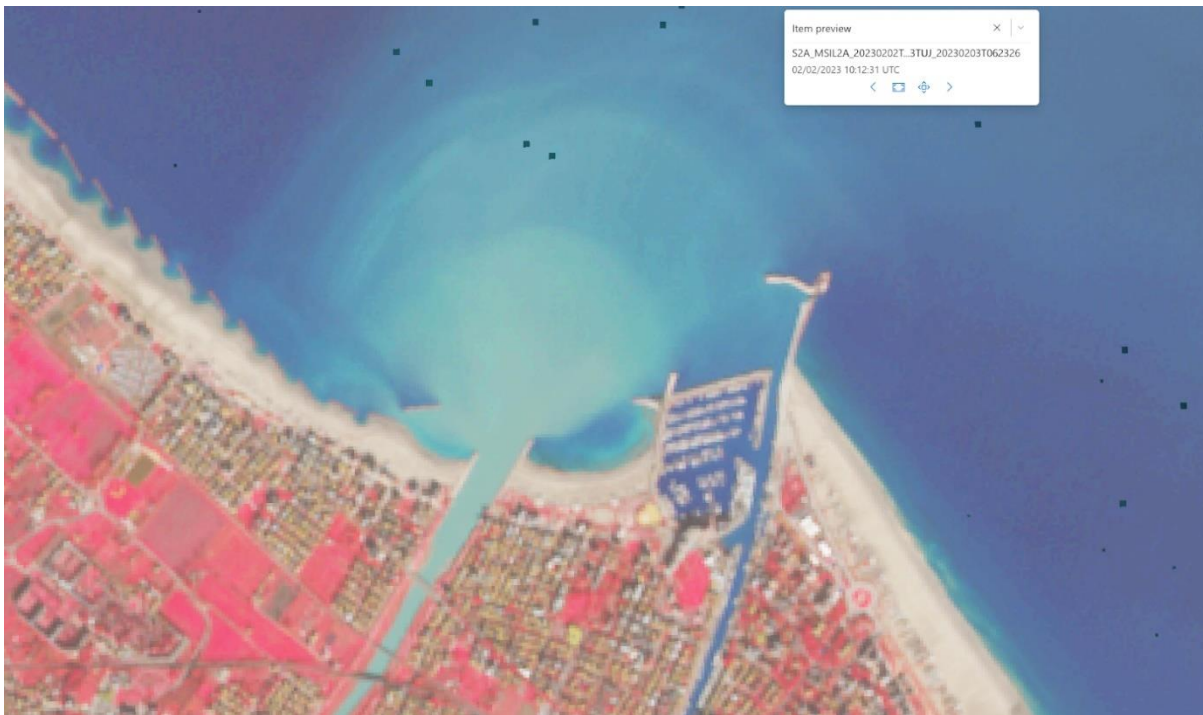


Figura 8: immagine satellitare Sentinel 2, 02/02/2023 ore 10:12 UTC colorata all'infrarosso

In Figura 9 si riporta l'immagine satellitare Sentinel relativa al 19/02/2023 alle ore 10:00; l'onda misurata dalla boa Nausicaa ([6]) per il giorno in esame presenta una direzione prevalente da N-NE, un'altezza d'onda media H_s pari a 0.10 m ed un periodo di picco medio T_p pari a 4.5 s.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	13	di	104	00		23 03 23

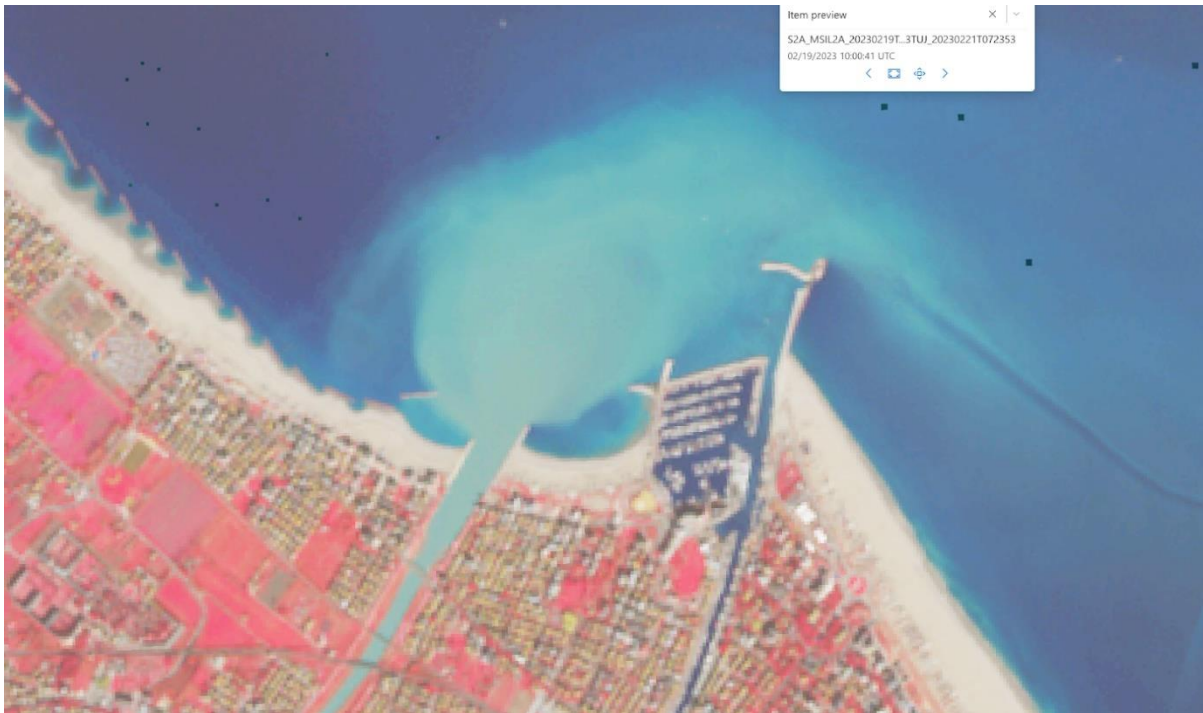


Figura 9: immagine satellitare Sentinel 2, 19/02/2023 ore 10:00 UTC colorata all'infrarosso

Un esempio della condizione di trasporto del *plume* verso le spiagge di Rivabella è invece mostrato in Figura 10, in cui si riporta l'immagine satellitare Sentinel relativa al 24/02/2023 alle ore 10:00; l'onda misurata dalla boa Nausicaa ([6]) per il giorno in esame presenta una direzione prevalente da E-NE, un'altezza d'onda media H_s pari a 0.09 m ed un periodo di picco medio T_p pari a 3.3 s.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	14	di	104	00		23 03 23

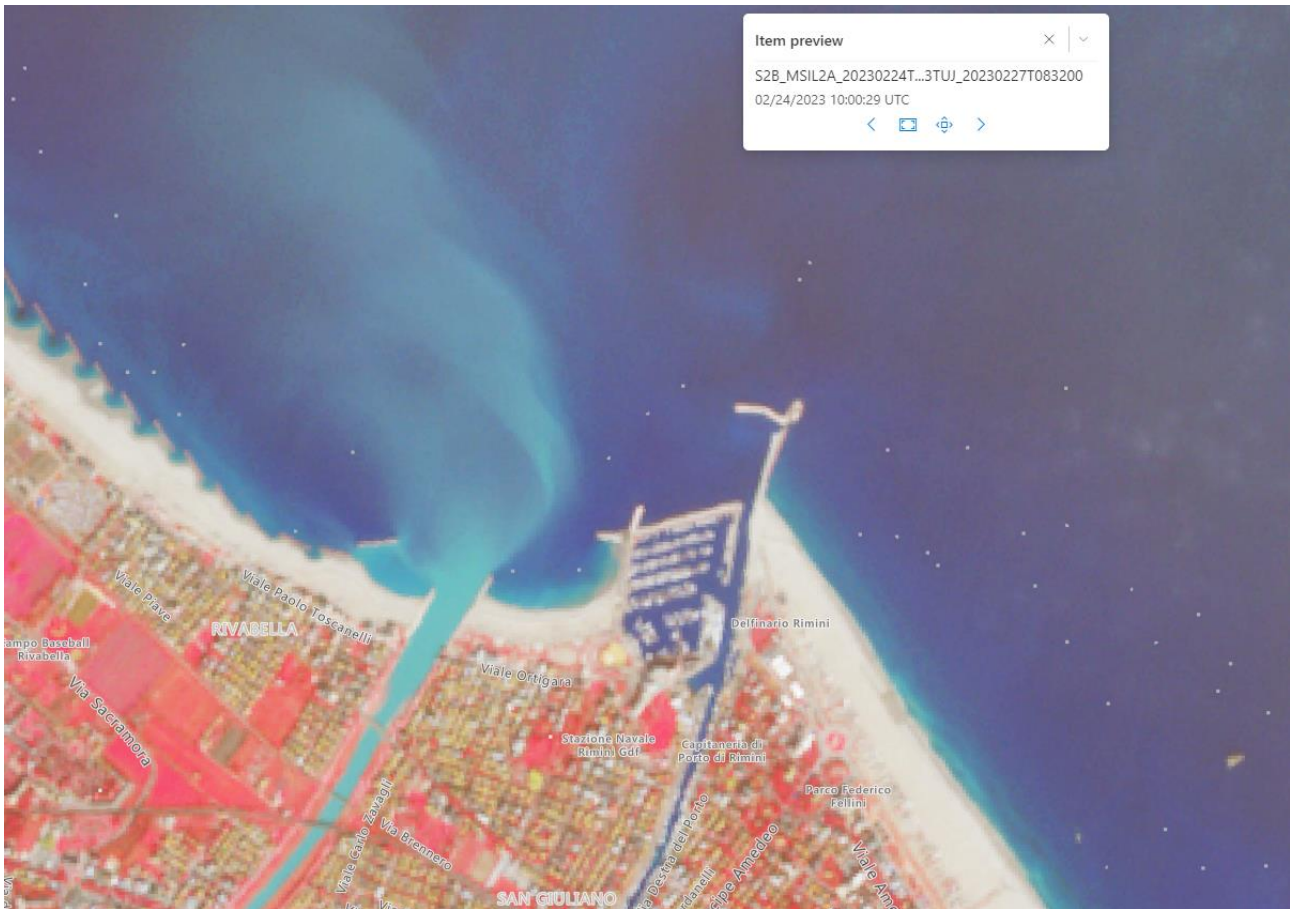


Figura 10: immagine satellitare Sentinel 2, 24/02/2023 ore 10:00 UTC colorata all'infrarosso

° Documento:	Foglio				Rev.:				
Relazione Tecnica	15	di	104	00			23	03	23



4 CONDIZIONI AL CONTORNO

4.1 BATIMETRIA

La batimetria aggiornata per l'area di studio nello scenario *ante-operam* è la medesima utilizzata nell'ambito del progetto di fattibilità tecnico-economica dell'avamposto di Rimini ([1] [2]), ottenuta in particolare dall'integrazione delle seguenti basi dati:

- Rilievo topo-batimetrico morfologico di dettaglio con tecnologia SBES per l'area prospiciente il porto, eseguito da AdriaRilievi in data 16/04/2021
- Planimetria "as built" delle scogliere del porto di Rimini degli anni 2012-2015, fornite dal Comune di Rimini
- DBM 2012 fornito dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna

I dati batimetrici sono stati integrati e mosaicati fra loro privilegiando quelli più recenti ed infine ricampionati a passo 0.5 m, ottenendo il modello digitale batimetrico per l'area in esame riportato in Figura 11 ed in Figura 12.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	16	di	104	00			23	03	23

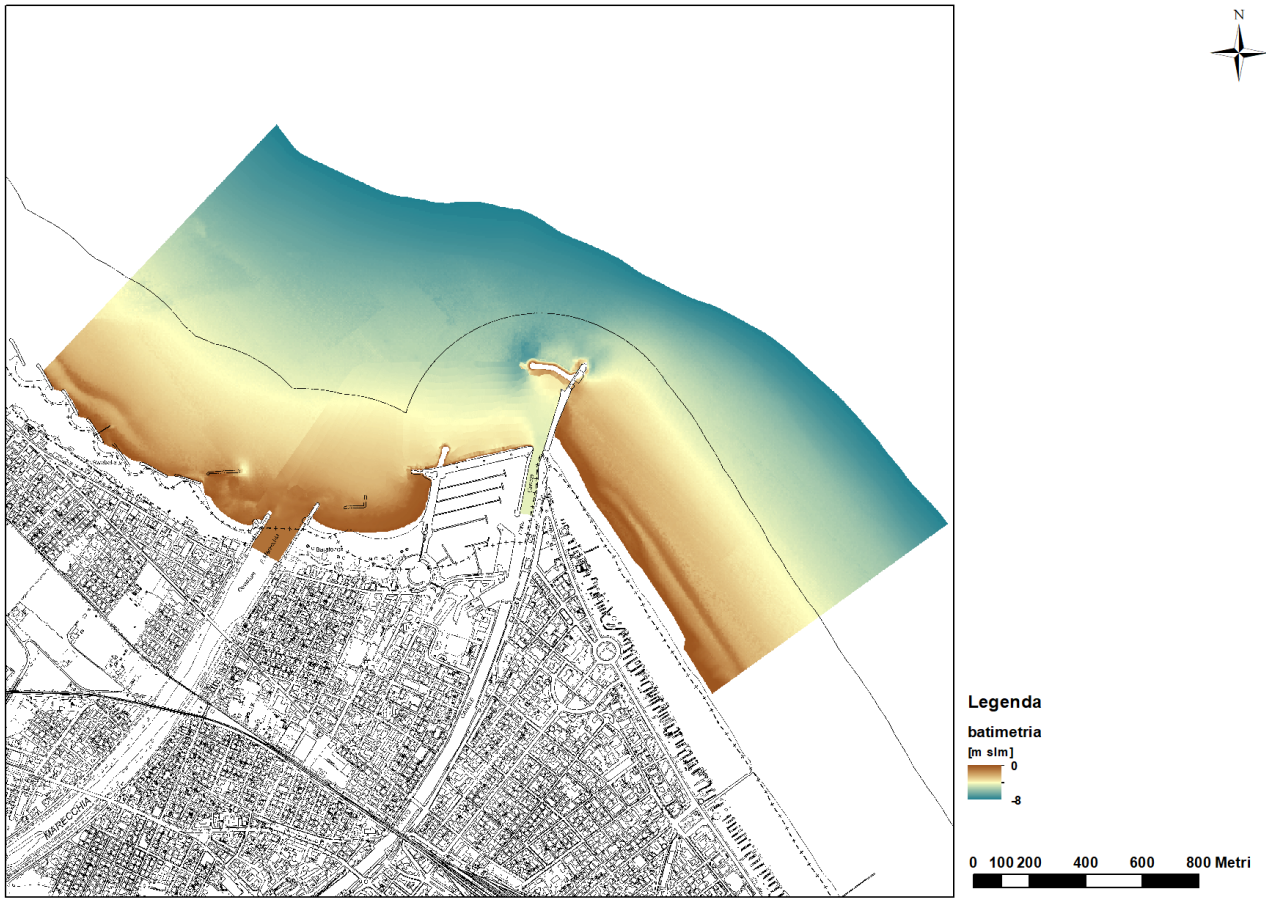


Figura 11: modello digitale batimetrico nello scenario *ante-operam*, quote in m s.l.m.m. su base ctr (fonte: http://servizigis.regione.emilia-romagna.it/wms/dbtr_ctrmultiscala?)

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	17	di	104	00		23	03	23

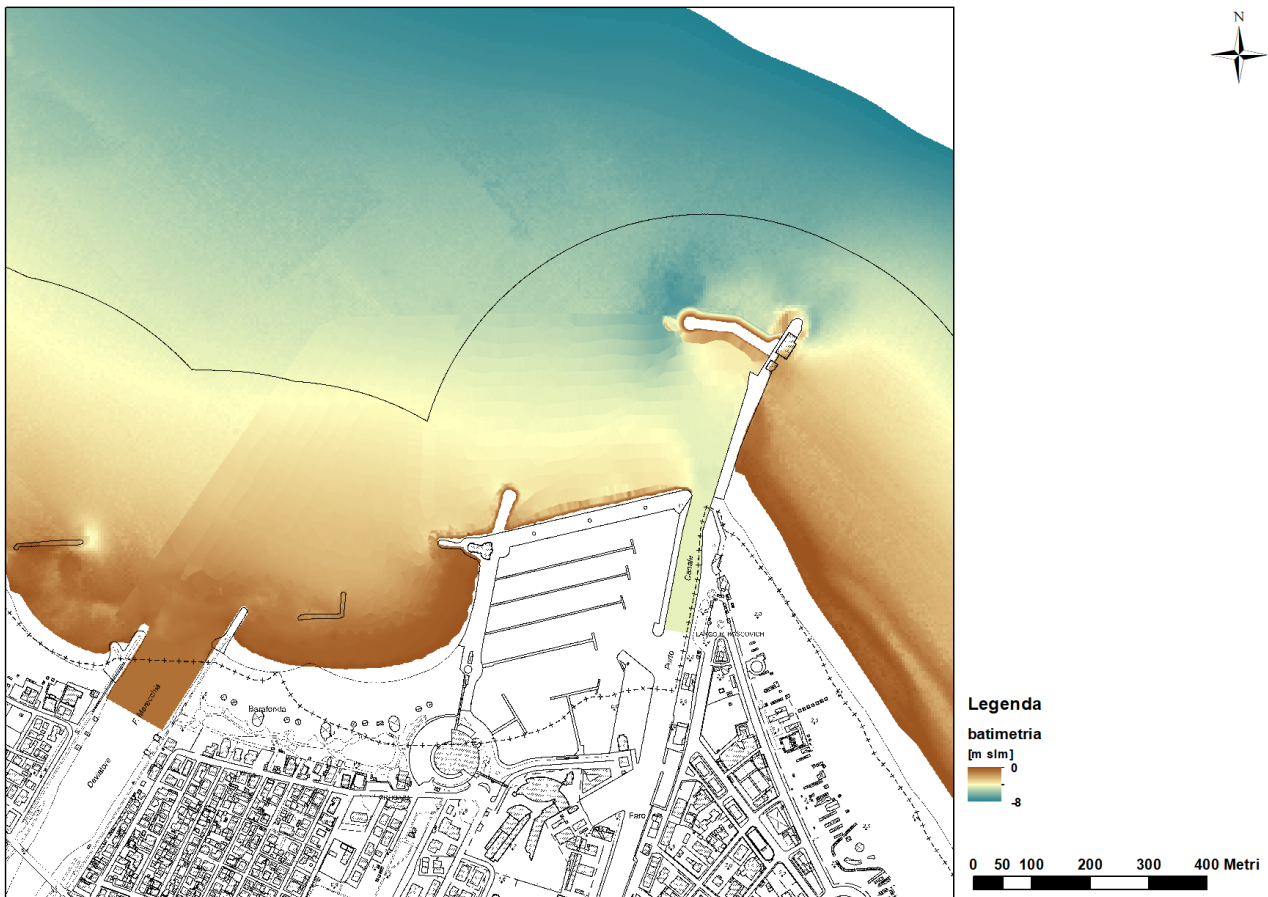


Figura 12: modello digitale batimetrico nello scenario *ante-operam*, dettaglio dell'area del porto e della spiaggia di San Giuliano, quote in m s.l.m.m. su base ctr (fonte: http://servizigis.regione.emilia-romagna.it/wms/dbtr_ctrmultiscala?)

La batimetria negli scenari *post-operam* è stata costruita a partire dalla condizione attuale, inserendo le scogliere di progetto relative ad entrambi gli scenari opportunamente raccordate a quelle esistenti e modificando, per lo scenario *post-operam lotto 2*, la batimetria nell'area di intervento come da progetto, con dragaggio a -5 m s.l.m.m e raccordi con pendenza 1:10 alla batimetria esistente nell'area prospiciente il dragaggio.

Nelle figure seguenti si riporta il modello digitale batimetrico nello scenario *post-operam lotto 2*.

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	18	di	104	00		23	03	23

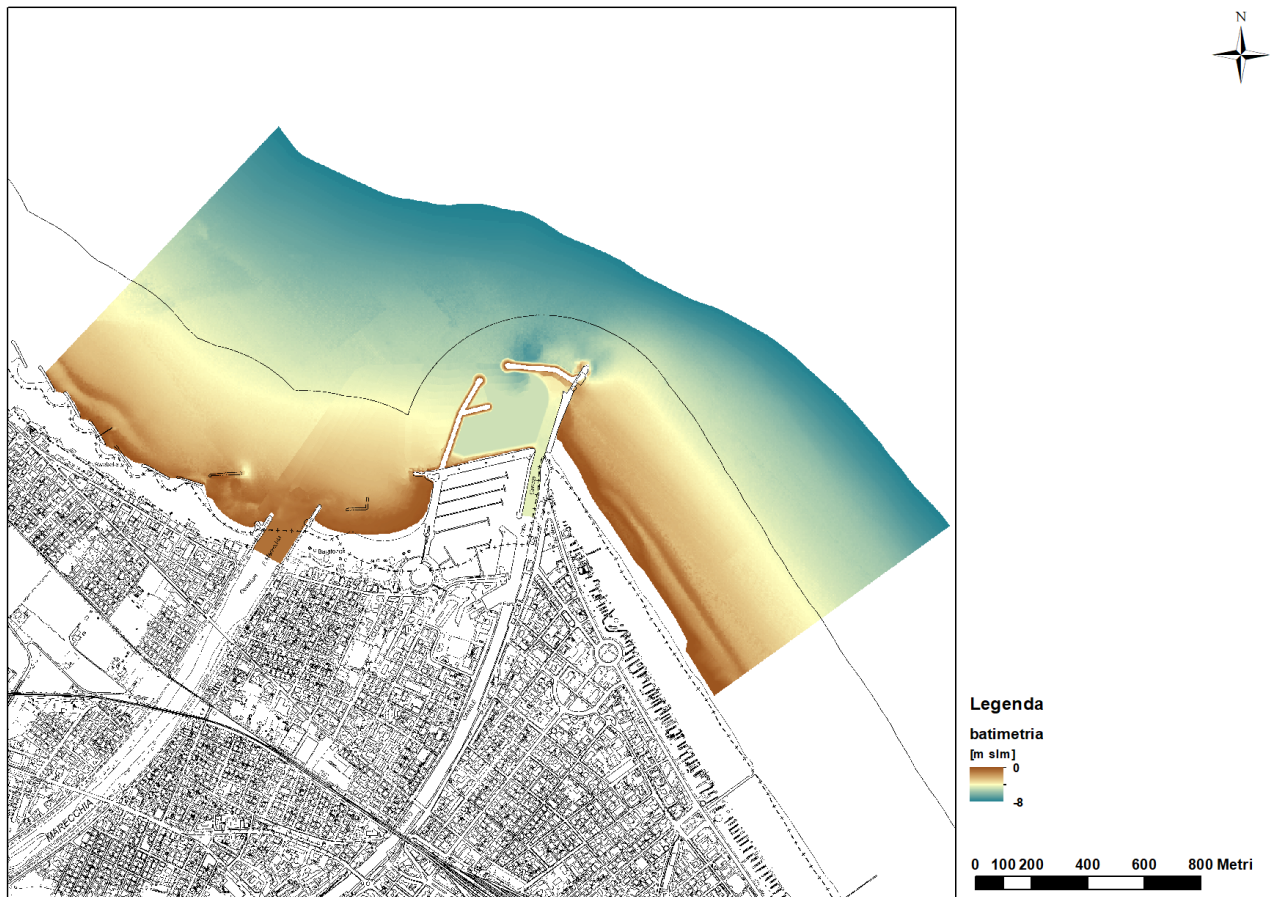


Figura 13: modello digitale batimetrico nello scenario *post-operam lotto 2*, quote in m s.l.m.m. su base ctr (fonte: http://servizigis.regione.emilia-romagna.it/wms/dbtr_ctrmultiscala?)

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	19	di	104	00		23	03	23

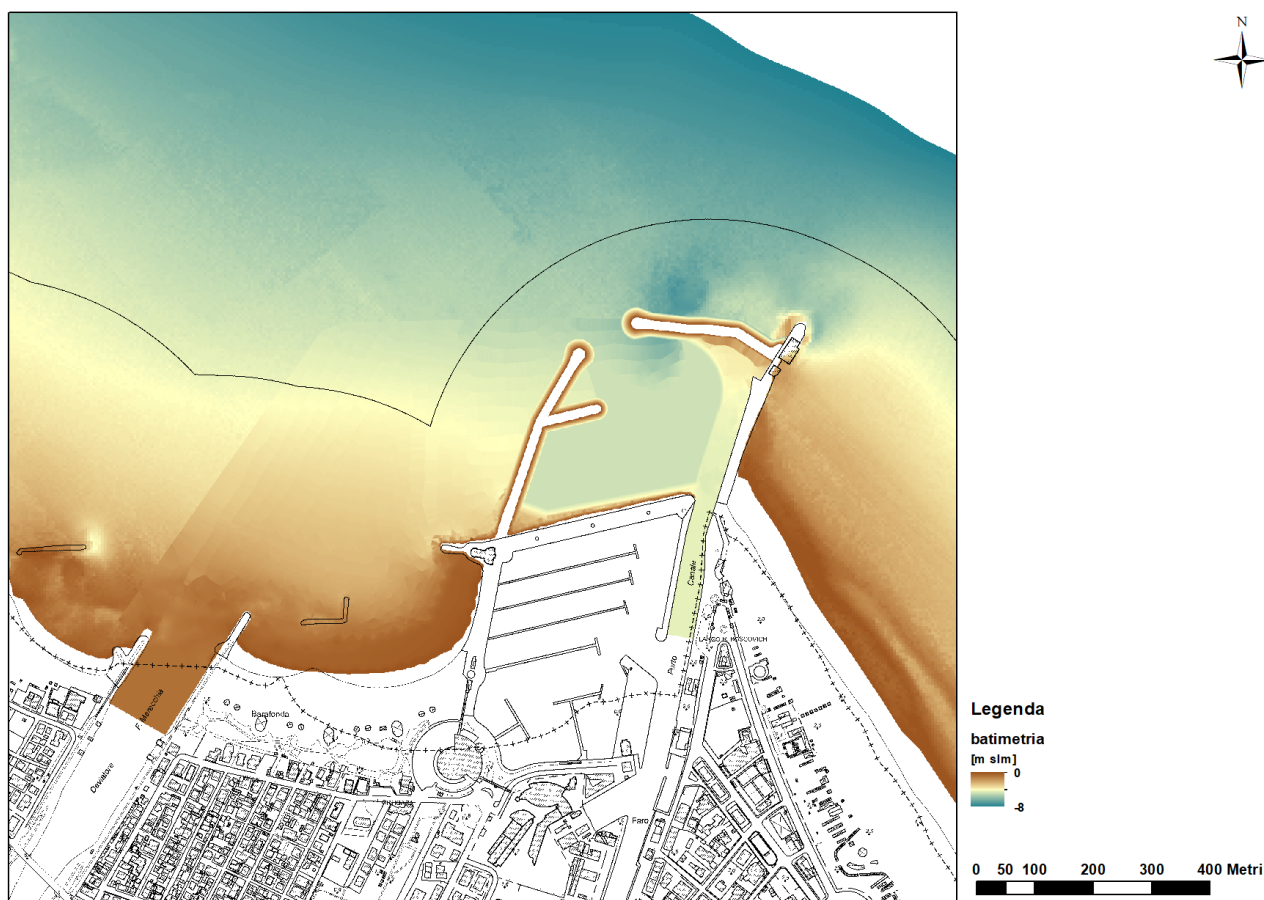


Figura 14: modello digitale batimetrico nello scenario *post-operam ipotesi A lotto 2*, dettaglio dell'area del porto e della spiagge di San Giuliano, quote in m s.l.m.m. su base ctr (fonte: http://servizigis.regione.emilia-romagna.it/wms/dbtr_ctrmultiscala?)

4.2 CLIMA METEOMARINO - ALTEZZA E DIREZIONE D'ONDA

Per la definizione delle condizioni di onda da applicare al modello, si fa riferimento alle analisi effettuate nell'ambito del progetto di fattibilità tecnico-economica dell'avamposto di Rimini ([1] [2]). Tali analisi sono di seguito riassunte per completezza, rimandando agli elaborati originali per ogni approfondimento.

Le caratteristiche dell'onda incidente di progetto sono state definite, in funzione del tempo di ritorno, mediante un'analisi statistica basata su una serie temporale di valori relativi ad un periodo

° Documento:	Foglio				Rev.:		
Relazione Tecnica	20	di	104	00	23	03	23

di 27 anni (1993-2019). I dati di input sono stati ottenuti dal Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS, <https://marine.copernicus.eu/>), e rappresentano i valori simulati da un modello numerico esteso al bacino del Mediterraneo costantemente aggiornato e validato sulla base di valori misurati.

La serie temporale utilizzata è riferita al punto P di coordinate 44.10417°N, 12.54167°E situato pochi km a Nord-Est del porto di Rimini, dove il fondale è alla quota di -8m s.l.m.m; la serie temporale di input concorda con i dati misurati dalla boa Nausicaa posizionata circa 8km al largo di Cesenatico: entrambe le serie mostrano le stesse mareggiate significative, mentre la maggiore altezza d'onda misurata in generale da Nausicaa è spiegabile dalla posizione della boa su un fondale maggiore rispetto al punto P.

Con riferimento ai parametri dell'onda incidente Hs (altezza significativa), Tm (periodo medio) e Tp (periodo di picco), l'analisi statistica è consistita nelle seguenti attività:

- Individuazione dei 27 valori massimi annuali per ognuno degli 8 settori direzionali principali di provenienza (classi di 45°);
- Per ognuna delle 8 direzioni principali, analisi di inferenza statistica sui valori massimi annuali con una distribuzione di Gumbel a 2 parametri

Le caratteristiche dell'onda incidente definite a seguito dell'analisi statistica sono riportate, rispettivamente per TR = 1 anno e TR = 5 anni, nelle tabelle seguenti. Le direzioni più critiche di onda, quelle che possono cioè provocare una interazione diretta fra la portata solida veicolata dal fiume Marecchia e la baia di San Giuliano e l'adiacente porto, sono quelle provenienti dai quadranti Nord e Nord-Ovest, pertanto in Tabella 1 ed in Tabella 2 sono riportate solo le onde provenienti da tali direzioni.

Tempo di ritorno 1 anno			
Dir [°]	Hs [m]	Tm [s]	Tp [s]
N-O (292.5° ÷ 337.5°)	0.5	3	5

Tabella 1: caratteristiche onda incidente per gli scenari simulati – TR=1 anno

Tempo di ritorno 5 anni			
Dir [°]	Hs [m]	Tm [s]	Tp [s]
N-O (292.5° ÷ 337.5°)	0.8	3.8	8.3
N (-22.5° ÷ 22.5°)	1.5	5.3	10.4

Tabella 2: caratteristiche onda incidente per gli scenari simulati – TR=5 anni

° Documento:	Foglio				Rev.:				
Relazione Tecnica	21	di	104	00			23	03	23



Per quanto riguarda le direzioni di provenienza, si fa riferimento alle analisi riportate in [1] che mostrano le distribuzioni probabilistiche dei parametri H_s (altezza significativa) e F (flusso di energia, proporzionale a $H_s^2 * T_m$) nel punto P della griglia CMEMS, valutate sull'intera serie temporale di 27 anni utilizzata per l'analisi di inferenza statistica.

Tali analisi sono di seguito riassunte.

I parametri sono valutati per intervalli direzionali di 10°.

I diagrammi polari di Figura 7 mostrano, anche graficamente, come le mareggiate da N-E e da E siano comunque predominanti in termini di probabilità di accadimento, ed in particolare il grafico del flusso di energia dimostra che le mareggiate caratterizzate da una maggiore energia (proporzionale al quadrato dell'altezza d'onda) siano quelle provenienti da N-E.

I diagrammi analoghi facenti parte del Progetto Esecutivo delle medesime opere di difesa foranea risalente al 2012 (vedi Figura 8, dunque riferiti ai valori di agitazione ondosa misurati dalla boa ondometrica di Ancona, mostrano una distribuzione più omogenea delle direzioni, probabilmente dovuta alla maggiore distanza dalla costa della boa rispetto al punto P che permette la misurazione di onde sviluppatesi lungo il fetch che separa la costa dalla boa. Nonostante questa differenza, in analogia con il paraggo di Rimini prevalgono al largo di Ancona le mareggiate di Grecale e quelle da E-S-E.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	22	di	104	00			23	03	23

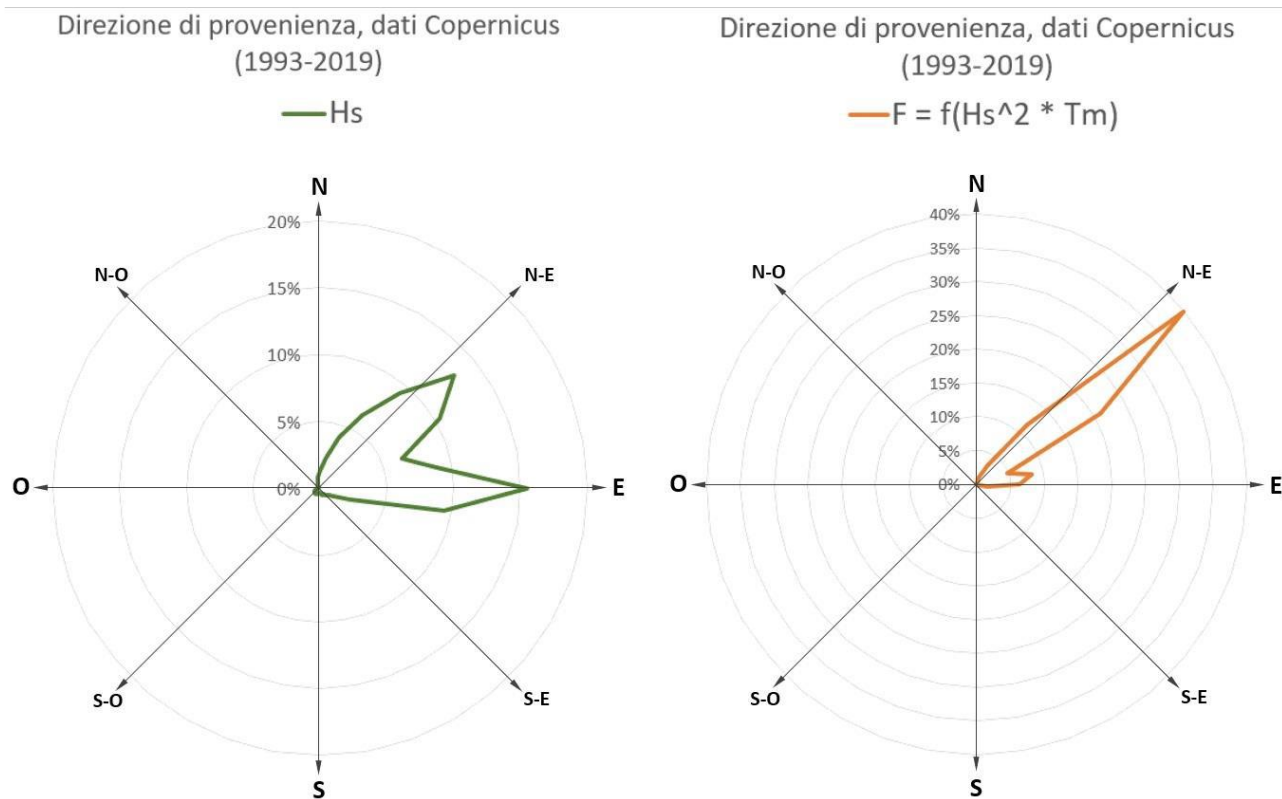


Figura 15: Distribuzione probabilistica dell'altezza d'onda significativa (a sinistra) e del flusso di energia ondosa (a destra) in funzione della direzione di provenienza (figura 7 in [1])

° Documento:	Foglio			Rev.:			
Relazione Tecnica	23	di	104	00			23 03 23

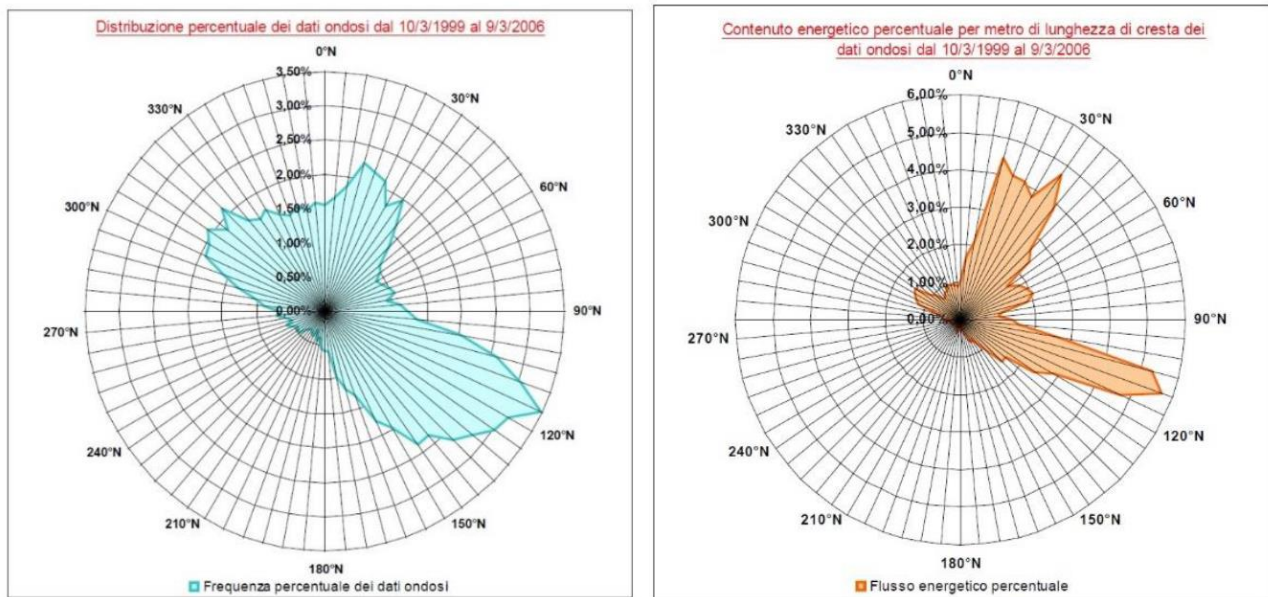


Figura 16: Distribuzione probabilistica dell'altezza d'onda significativa (a sinistra) e del flusso di energia ondosa (a destra) in funzione della direzione di provenienza relativamente ai dati utilizzati nell'ambito del Progetto Esecutivo del 2012 (figura 8 in [1])

Una ulteriore valutazione riguardante il clima ondoso sulla costa romagnola può essere ricavata da [7], che riporta un'analisi storica sui dati rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo 2012-2018.

I dati ondometrici, rilevati dalla boa Nausicaa tra aprile 2012 e ottobre 2018, sono stati elaborati per ricostruire il regime del moto ondoso medio annuo caratteristico del periodo in esame. La Tabella 11 mostra la distribuzione delle onde, suddivise per classi d'altezza, nei diversi settori di provenienza, ampi ciascuno 22,5°. Il periodo in esame è stato caratterizzato da condizioni di calma, cioè con onde di altezza inferiore ai 20 cm, per oltre il 30% dei casi misurati. Il settore da cui proviene il maggior numero di onde, pari al 20% del totale, è quello E o di Levante (90° N), seguito dal settore ESE (112,5° N) con circa il 13% e dal settore ENE (67,5° N) con poco più del 12% degli eventi. Relativamente alla distribuzione delle onde per classi di altezza si può notare come la classe più frequente sia quella rappresentata dalle onde basse, cioè con $0,20 \leq H_s < 0,50$, con quasi il 40% dei casi registrati. Dal settore ENE proviene il maggior numero di onde medio-alte, ovvero quelle con $H_s > 1,25$ m. Dai dati riportati in tabella si nota che queste onde rappresentano circa il 5,7% del totale registrato dalla boa nel periodo in esame, mentre il settore ENE contribuisce, da solo, con quasi il 3%.

Sempre in merito alle onde di maggiore altezza, anche il settore NE o di bora (45° N) presenta percentuali di occorrenza significative pari a circa l'1,8% del totale. Tali considerazioni sono

° Documento:	Foglio				Rev.:		
Relazione Tecnica	24	di	104	00	23	03	23

evidenziate in maniera più immediata in Figura 41, nella quale si riporta la rosa delle onde ricavata da tutti i dati disponibili da aprile 2012 a ottobre 2018.

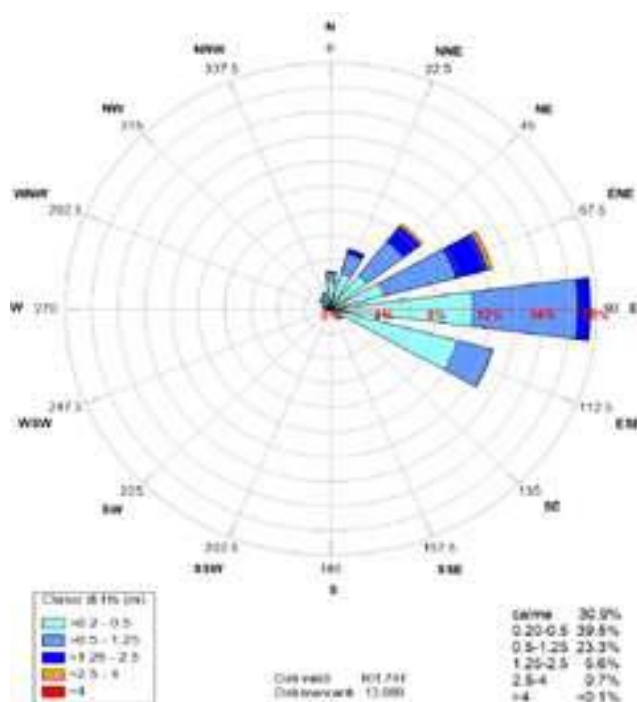


Figura 17: Rosa delle onde ricavata dai dati ondometrici rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo aprile 2012 – ottobre 2018. (figura 41 in [7])

	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Totale
calme																	30,93
0,20-0,5	2,35	3,09	3,48	4,21	10,87	10,22	1,04	0,14	0,11	0,09	0,11	0,27	0,45	0,73	1,07	1,19	39,45
0,5-1,25	0,73	1,72	3,53	5,65	8,15	2,87	0,13	0,02			0,01	0,02	0,02	0,06	0,10	0,27	23,29
1,25-2,5	0,06	0,39	1,59	2,48	0,97	0,03									0,02	0,03	5,62
2,5-4		0,03	0,29	0,37													0,70
>4				0,02													0,02
Totale	3,15	5,24	8,89	12,73	20,00	13,13	1,17	0,17	0,12	0,10	0,12	0,29	0,47	0,79	1,20	1,50	100,00

Tabella 3: Tabella di occorrenza (16 settori direzionali e 5 classi di altezza significativa, più le calme) dei dati ondometrici rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo aprile 2012 – ottobre 2018. (tabella 11 in [7])

Come si vede, le onde più critiche, provenienti dalle direzioni NW sino a N, sono presenti per circa il 6% del periodo di analisi, mentre risultano più rilevanti le condizioni di calma, che si sono verificate per il 31% circa del periodo.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	25	di	104	00		23 03 23

I dati più recenti di descrizione ed analisi del moto ondoso sulla costa romagnola sono disponibili sul portale dei dati ambientali ARPAE [8] che riporta la Rosa delle onde registrate dalla boa ondometrica di Cesenatico negli anni 2019-2021.

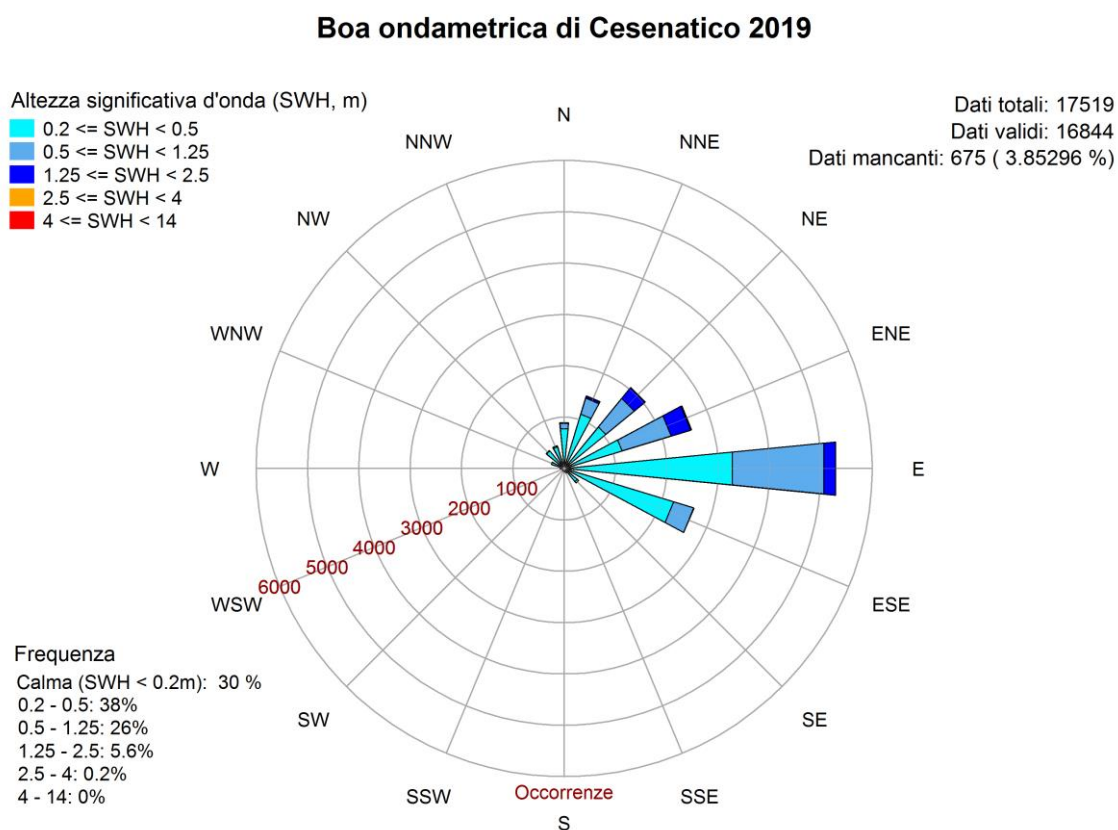


Figura 18: rosa delle onde registrate dalla boa ondometrica di Cesenatico nell'anno 2019 ([8])

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	26	di	104	00	23	03	23		

BOA ONDAMETRICA DI CESENATICO 2020

Frequenza
Calma (SWH < 0,2 m): 40%
0,2 - 0,5: 34%
0,5 - 1,25: 21%
1,25 - 2,5: 4,6%
2,5 - 4: 0,64%
4 - 14: 0%

Dati totali: 17.567
Dati validi: 17.048
Dati mancanti: 519 (2,9544%)

Altezza significativa d'onda (SWH, m)

- 0,2 ≤ SWH < 0,5
- 0,5 ≤ SWH < 1,25
- 1,25 ≤ SWH < 2,5
- 2,5 ≤ SWH < 4
- 4 ≤ SWH < 14

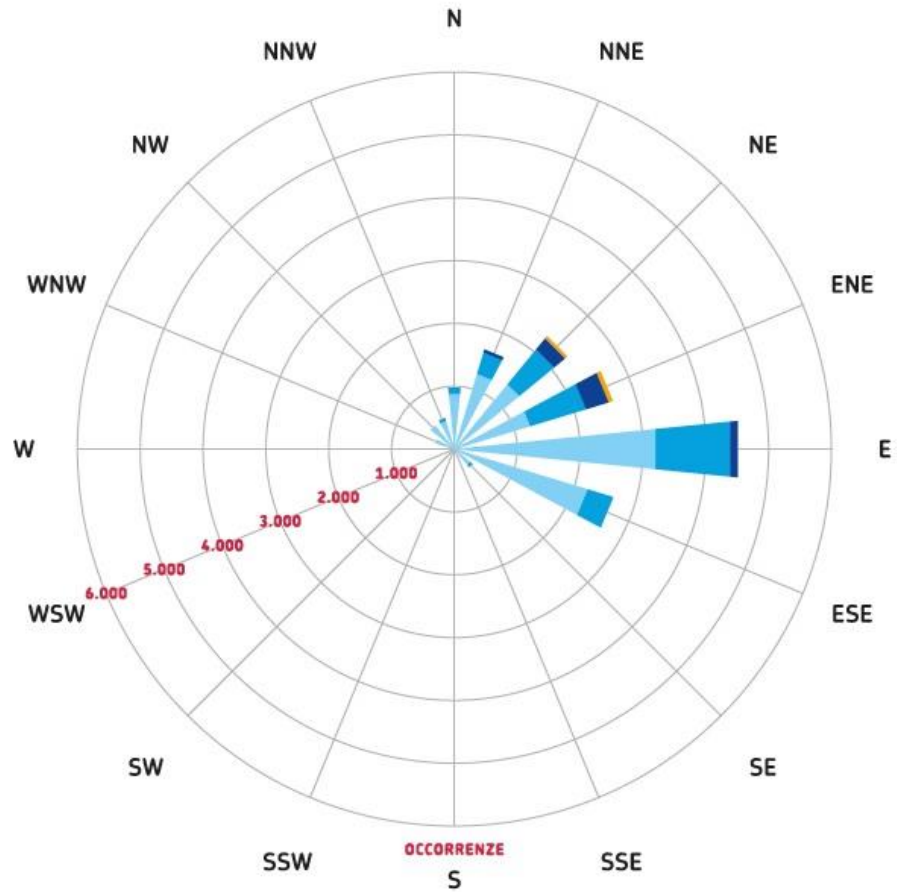


Figura 19: rosa delle onde registrate dalla boa ondometrica di Cesenatico nell'anno 2020 ([8])

° Documento:	Foglio			Rev.:				
Relazione Tecnica	27	di	104	00		23	03	23

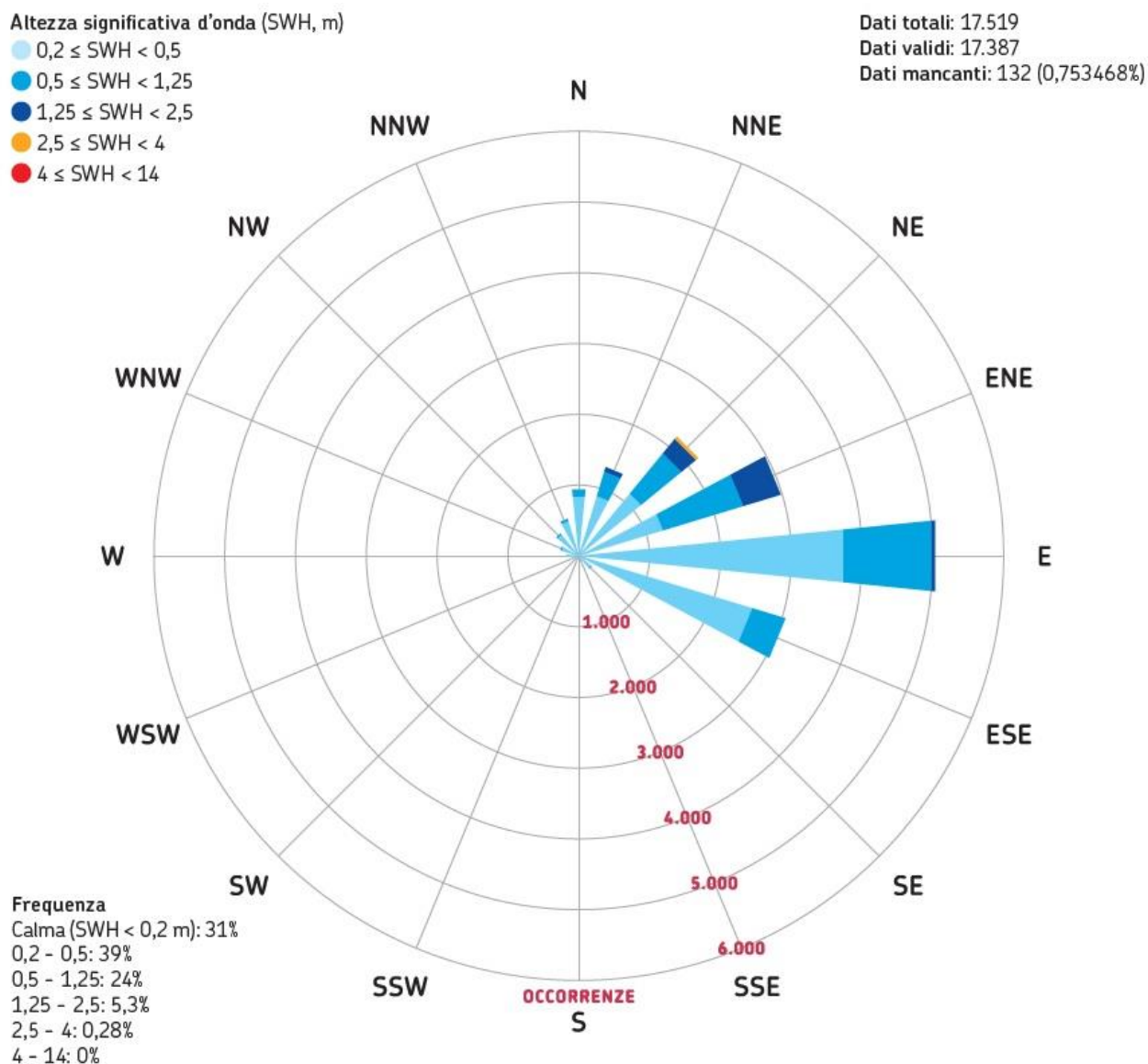


Figura 20: rosa delle onde registrate dalla boa ondometrica di Cesenatico nell'anno 2021 ([8])

Sempre in [8] è riportata l'analisi dei dati annuali dell'anno 2021:

L'analisi del moto ondoso, nel 2021 (figura 1), mostra che le onde prevalenti (quelle con maggiore frequenza) provengono dalle direzioni orientali (ENE-E-ESE), con forte predominanza della direzione da est, mentre le onde dominanti (quelle di maggiore intensità) provengono dalle direzioni nord-orientali (NNE-NE-ENE), associate ai forti venti di Bora, che sono quelli a cui la costa emiliano-romagnola è maggiormente esposta e vulnerabile.

Nel 2021, la distribuzione delle onde appare in linea con quella del periodo precedente, confermando, sostanzialmente, l'andamento del clima del periodo 2007-2020 (figura 2).

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	28	di	104	00		23	03	23

Nel 2021 non sono state registrate variazioni sostanziali nelle direzioni del moto ondoso rispetto al periodo 2007-2020, tuttavia, la direzione ENE è stata caratterizzata da onde con intensità inferiori a quelle del clima del periodo 2007-2020. La rosa delle onde, per il periodo 2021, mostra una percentuale più bassa (pari allo 0,28%) delle onde con altezza compresa tra 2,5 e 4,0 m, rispetto al periodo 2007-2020.

Nell'anno 2021, le massime frequenze di occorrenza si riscontrano per onde con altezza compresa tra 0,2 e 0,5 m nei settori Est (E) e Est-Sud-Est (ESE), con valori rispettivamente di 12,6% e 9,6% del totale (tabella 1), che rispecchiano esattamente l'andamento del periodo 2007-2020 (tabella 2). Per valori con maggiore intensità, compresi tra 2,5 m e 4 m, le frequenze di occorrenza, nel 2021, sono leggermente inferiori a quelle del clima del periodo 2007-2020. In particolare, nel 2021, le frequenze di occorrenza per il settore ENE sono pari a 0,1%, rispetto al valore di 0,3% per la serie storica (2007-2020). I settori orientali, sud-orientali e sud (W, WSW, SW, SSW e S) mostrano frequenze di occorrenze nulle o bassissime, chiaramente dipendenti dall'orientamento SE-NW della costa emiliano-romagnola.

4.3 PORTATA DEL FIUME MARECCHIA

Per la ricostruzione del regime delle portate del fiume Marecchia si è fatto riferimento ai dati riportati negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna pubblicati periodicamente da ARPAE [9].

In particolare, negli annali 2018-2021 sono riportati i valori di portata nella stazione di misura Marecchia a Rimini SS16. Tale stazione è localizzata a 2.39 km dalla foce e sottende un bacino idrografico di estensione pari a circa 531.8 km². Poco a valle della stazione di misura, il Marecchia riceve l'immissione del torrente Ausa, per un bacino drenato complessivo alla foce pari a circa 609.9 km² [10].

La tabella seguente riporta le curve di durata annuali così come riportate negli annali.

	2015	2018	2019	2020	2021	media
giorni	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
10	119	90	70.3	39	44.1	72.5
30	56.3	29.6	24.1	15.8	22.9	29.7
60	20.8	17.2	15	7.18	10.4	14.1
91	13.4	7.16	13	5.14	6.19	9.0

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	29	di	104	00		23 03 23



	2015	2018	2019	2020	2021	media
giorni	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]	[m ³ /s]
135	7.11	3.98	7.34	4.35	4.59	5.5
182	2.99	1.71	3.47	3.47	3.41	3.0
274	1.08	-	0.63	2.63	2.02	1.6
355	0.27	-	0.11	2.23	-	0.9
max	217	190	346	119	88.4	192

Tabella 4: curve di durata annuali riportate negli annali idrologici ARPAE

La portata massima giornaliera nel periodo in esame è stata registrata il 13 maggio 2019 con 346 m³/s, mentre la massima istantanea, registrata sempre nello stesso giorno, è stata pari a 636 m³/s.

4.4 TRASPORTO SOLIDO DEL FIUME MARECCHIA

La tabella seguente riporta i dati di trasporto solido presenti negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna pubblicati periodicamente da ARPAE [8] relativi alla stazione di stazione di misura Marecchia a Rimini SS16.

ELEMENTI CARATTERISTICI PER L'ANNO 2019

		ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre	
Max	{	Kg/m ³	2.390	0.570	1.340	0.083	0.190	1.290	0.135	0.032	0.032	0.100	0.250	2.390	1.290
		Kg/s.....	90.60	20.70	82.00	0.99	4.16	86.90	2.59	0.03	0.03	0.03	0.01	90.20	90.60
Min	{	Kg/m ³	0.016	0.016	0.016	0.016	0.017	0.017	0.016	0.016	0.016	0.017	0.019	0.016	0.016
		Kg/s.....	0.01	0.07	0.05	0.02	0.04	0.15	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06
Med	{	Kg/m ³	0.339	0.130	0.452	0.027	0.058	0.445	0.045	0.023	0.023	0.026	0.045	0.458	0.379
		Kg/s.....	3.66	1.33	8.94	0.08	0.82	17.00	0.18	0.01	0.02	0.01	0.01	7.47	8.35
		10 ³ tonn.....	115.00	3.56	21.60	0.21	2.14	45.50	0.48	0.04	0.05	0.03	0.03	19.40	22.40
		tonn/Km ²	217.00	6.70	40.70	0.40	4.02	85.50	0.90	0.07	0.10	0.06	0.05	36.40	42.10

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	30	di	104	00			23	03	23



ELEMENTI CARATTERISTICI PER L'ANNO 2018

	ANNO	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
Max	K _g /m ³	»	»	»	11.400	0.223	0.134	0.024	»	»	»	»	0.430
		K _g /s.....	»	»	»	2150.00	4.29	1.53	0.09	»	»	»	»
Min	K _g /m ³	»	»	»	0.156	0.023	0.015	0.007	»	»	»	»	0.010
		K _g /s.....	»	»	»	2.49	0.09	0.04	0.01	»	»	»	»
Med	K _g /m ³	»	»	»	4.370	0.107	0.043	0.013	»	»	»	»	0.139
		K _g /s.....	»	»	»	273.00	1.06	0.21	0.02	»	»	»	»
	10 ³ tonn	»	»	»	731.00	2.76	0.57	0.06	»	»	»	»	2.02
	tonn/Km ²	»	»	»	1380.00	5.19	1.07	0.11	»	»	»	»	3.80

ELEMENTI CARATTERISTICI PER IL PERIODO 2017

Max	K _g /m ³	2.410	0.094	0.252	0.105	0.056	0.056	0.058	0.060	0.060	0.063	0.067	1.540	2.410
		K _g /s.....	129.00	4.65	11.40	5.19	2.88	3.07	3.15	3.39	3.51	3.79	4.01	80.00
Min	K _g /m ³	0.000	0.049	0.027	0.038	0.052	0.051	0.054	0.051	0.052	0.051	0.051	0.051	0.000
		K _g /s.....	0.00	2.36	2.00	2.57	2.68	2.62	2.91	2.79	3.04	2.94	2.92	2.69
Med	K _g /m ³	0.151	0.053	0.058	0.054	0.053	0.054	0.055	0.056	0.057	0.057	0.057	0.191	1.070
		K _g /s.....	8.23	2.56	3.15	2.80	2.78	2.86	3.05	3.18	3.28	3.37	3.27	10.50
	10 ³ tonn	260.00	6.86	7.62	7.49	7.22	7.67	7.91	8.50	8.80	8.74	8.75	27.20	153.00
	tonn/Km ²	488.00	12.90	14.30	14.10	13.60	14.40	14.90	16.00	16.50	16.40	16.50	51.10	287.00

Tabella 5: trasporto solido del fiume Marecchia riportate negli annali idrologici ARPAE

L'apporto medio di sedimenti nel periodo di esame è pari a 0.296 kg/m³.

Le simulazioni che seguono fanno riferimento al trasporto avvevivo diffusivo di un *plume* di sedimenti generato dal fiume Marecchia ipotizzando una concentrazione pari a 0.3 g/l, equivalente ad una portata massica pari a 103 kg/sec, ed un diametro equivalente pari a 0.004 mm, al limite fra limo e argilla; nelle simulazioni implementate vengono considerati sia i fenomeni di trasporto sia il progressivo deposito del sedimento per effetto della gravità.

5 MODELLO IDRO FLUIDO DINAMICO CFD – FLOW-3D HYDRO

Le simulazioni dei diversi scenari di moto ondoso e di portate fluviale sono state implementate con il modello idrodinamico tridimensionale di flusso e trasporto FLOW-3D HYDRO.

FLOW-3D HYDRO è un software di fluidodinamica computazionale (CFD) che consente la risoluzione delle equazioni del moto per i fluidi in forma completa (equazioni di Navier-Stokes). Le equazioni di Navier-Stokes costituiscono un sistema di equazioni differenziali del secondo ordine alle derivate parziali non lineari che descrivono il comportamento di un fluido viscoso a livello macroscopico imponendo la conservazione della massa, la conservazione della quantità di moto e considerando il bilancio della energia totale.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	31	di	104	00		23 03 23



FLOW-3D HYDRO risolve le equazioni tramite la discretizzazione del dominio di calcolo in mesh rettangolari strutturate e l'utilizzo di algoritmi di fluidodinamica computazionale ai volumi finiti, ottenendo la descrizione tridimensionale dei campi di moto in condizioni stazionarie e transitorie.

Le tipiche applicazioni di FLOW-3D HYDRO riguardano idraulica fluviale e marittima 3D complessa, pennacchi a galleggiamento termico, scarichi e trasporto di sedimenti e/o contaminanti.

Le applicazioni all'ingegneria portuale, costiera e marittima consentono l'analisi di scenari complessi quali le interazioni tra moto ondoso e strutture, la valutazione dei fenomeni di erosione, trasporto e deposito di sedimenti, lo studio del moto di flussi a temperatura e densità variabile.

5.1 EQUAZIONI DEL MOTO

5.1.1 SISTEMI DI COORDINATE

Le equazioni differenziali del moto sono riferite ad un Sistema di riferimento cartesiano (X, Y, Z).

Tutte le equazioni sono formulate in funzione dell'area della cella di calcolo e del volume di fluido all'interno di essa, definito sulla base di una porosità equivalente. Questa formulazione, definita come FAVOR™ (Fractional Area/Volume Obstacle Representation Method) è usata per modellare regioni geometriche complesse. Ad esempio, regioni con porosità nulla (e quindi zero volume di fluido) sono utilizzate per definire ostacoli, mentre aree a porosità variabile possono essere usate per definire sottili diaframmi porosi. L'utilizzo delle funzioni di porosità introduce anche alcune semplificazioni nella descrizione delle superfici a pelo libero e delle condizioni al contorno a deflusso nullo (*wall*).

Generalmente, in FLOW-3D HYDRO, l'area ed il volume di fluido sono indipendenti dal tempo, ma possono anche variare con l'utilizzo del modulo relativo agli oggetti in movimento (*moving obstacle*).

5.1.2 EQUAZIONE DI CONTINUITÀ DELLA MASSA E SUE VARIAZIONI

L'equazione generale di continuità della massa può essere scritta nella forma:

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	32	di	104	00			23	03	23

$$V_F \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w A_z) = R_{DIFF} + R_{SOR}$$

In cui:

- V_F è la frazione di volume utile per il flusso,
- ρ è la densità del fluido,
- R_{DIFF} è un termine di diffusione turbolenta,
- R_{SOR} è una sorgente di massa.

Le componenti di velocità (u, v, w) sono scritte nel sistema di riferimento (X, Y, Z) o (r, R_{SOR}, z). A_x è la frazione di area utile al flusso in direzione X, A_y e A_z sono similamente le frazioni di area utili al flusso in direzione Y e Z rispettivamente.

Per fluidi incomprimibili, ρ è costante e l'equazione generale di continuità della massa si riduce alla condizione di incomprimibilità

$$\frac{\partial}{\partial x} (u A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (w A_z) = \frac{R_{SOR}}{\rho}$$

Per problemi nei quali la propagazione di onde di pressione acustiche è rilevante, ma il fluido può essere trattato come incomprimibile, la derivata temporale della densità può essere approssimata come:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t}$$

In cui:

- c^2 è il quadrato della velocità del suono
- p è la pressione.

Questa approssimazione è valida nel range $\left| \frac{\partial \rho}{\rho} \right| < 0.1$

Con questa approssimazione l'equazione di continuità modificate diventa allora:

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	33	di	104	00			23	03	23

$$\frac{V_F}{\rho c^2} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho c^2} \left(u A_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v A_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + w A_z \frac{\partial \rho}{\partial z} \right) = \frac{R_{SOR}}{\rho}$$

5.1.3 EQUAZIONI DEL MOTO

Le equazioni del moto per le componenti di velocità (u, v, w) lungo le tre direzioni cardinali sono le equazioni di Navier-Stokes con alcuni termini addizionali

$$\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left\{ u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right\} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z$$

In cui:

- G_x, G_y, G_z sono le accelerazioni degli eventuali oggetti in movimento
- f_x, f_y, f_z sono le accelerazioni viscosi
- b_x, b_y, b_z sono le perdite di carico nei mezzi porosi

6 SCENARI DI SIMULAZIONE

Gli scenari simulati sono relativi a diverse combinazioni di moto ondoso e di portata dal fiume Marecchia, al fine di poter identificare le condizioni più critiche per il trasporto di sedimenti verso l'avamposto e la baia di San Giuliano e valutare gli effetti in condizioni *ante* e *post-operam*.

Vengono in particolare presentati quattro scenari, relativi rispettivamente a condizioni di calma (Scenario 1, frequenza annua 31%), condizioni di onda da NW (Scenario 2a, frequenza annua 0.12% e scenario 2b, frequenza annua 1.07%) e condizioni di onda da N (Scenario 3, frequenza annua 3.15%). Per ogni scenario è stato simulato l'apporto di una certa portata dal fiume Marecchia di acqua dolce, caratterizzata cioè da una densità inferiore rispetto all'acqua marina, con una concentrazione costante di sedimento limo-argilloso in sospensione al fine di identificare le condizioni di trasporto associate all'idrodinamica in prossimità della costa. Nei paragrafi seguenti

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	34	di	104	00		23 03 23

vengono dettagliate le condizioni al contorno di ogni scenario ed i risultati delle simulazioni in condizioni *ante-operam* e *post-operam*.

6.1 SCENARIO 1 – CONDIZIONI DI CALMA

Lo scenario 1 è relativo a condizioni marine di calma, con l'unico apporto idrodinamico dato dal fiume Marecchia. Si descrivono di seguito le condizioni al contorno ed i risultati delle simulazioni

6.1.1 MESHING

La mesh di calcolo per lo scenario 1 in condizioni *ante-operam* e *post-operam* è una mesh a base quadrata, di dimensioni planimetriche 5m x 5m e discretizzazione verticale variabile pari a 1 m; il numero complessivo di celle è pari a 558408.

In Figura 21 è riportata una vista planimetrica della mesh di calcolo; è visibile la suddivisione in blocchi quadrangolari (*mesh block*) funzionale alla corretta definizione delle condizioni al contorno.

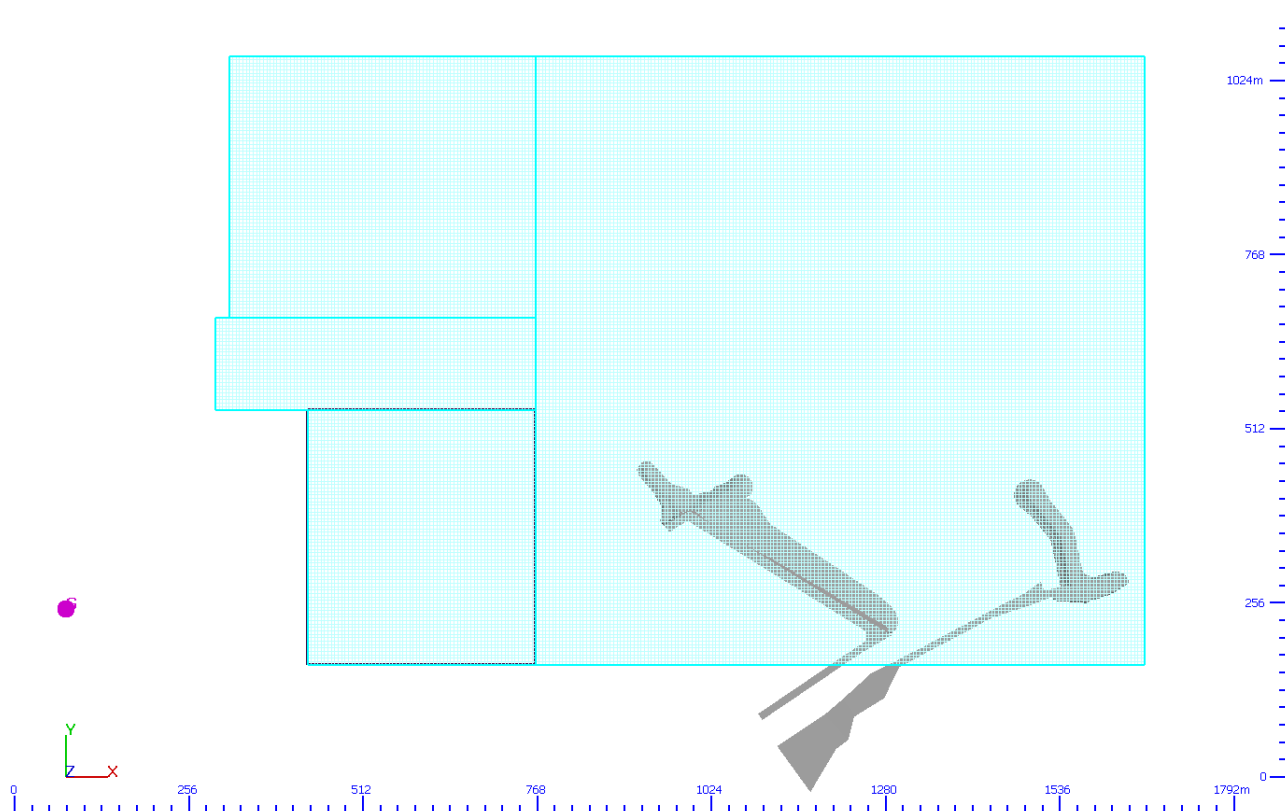


Figura 21: mesh di calcolo per lo scenario 1

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	35	di	104	00	23	03 23



6.1.2 PORTATA MARECCHIA

La portata del fiume Marecchia è stata assunta pari a $346 \text{ m}^3/\text{s}$, pari alla massima portata giornaliera del periodo 2015-2021 riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna (si veda il par. 4.3) e dello stesso ordine di grandezza delle portate con tempo di ritorno annuale. La portata in ingresso presenta una densità caratteristica di acqua dolce, pari a 998.2 kg/m^3 , a differenza dell'acqua marina presente all'interno del dominio, con densità del fluido pari a 1029 kg/m^3 .

Alla portata del fiume Marecchia è associata una concentrazione solidi sospesi (materiale limo argilloso) pari a 0.3 kg/m^3 ovvero 0.3 g/l (valore medio della concentrazione di trasporto torbido misurata e riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna), rilasciato dopo 500 s dall'inizio della simulazione, al fine di valutare l'effetto del trasporto avvevativo indotto dal campo di moto sui materiali a granulometria fine apportati dal fiume.

6.1.3 MOTO ONDOSO – CONDIZIONI AL CONTORNO

Lo scenario 1 non prevede alcun tipo di moto ondosso; le condizioni al contorno sono di carico imposto (condizione di tipo *pressure*) pari quota 0 m slm su tutti i bordi esterni della mesh, fatta eccezione per il fiume Marecchia nel quale la condizione al contorno è del tipo portata in ingresso (condizione di tipo *volume flow rate*).

6.1.4 TEMPO DI SIMULAZIONE

Il tempo di simulazione è pari a 3600 s per tutti gli scenari *ante-* e *post-operam*.

6.1.5 RISULTATI

6.1.5.1 SCENARIO 1 ANTE-OPERAM

La figura seguente riporta la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s). Si può notare come il flusso in uscita dal Marecchia, senza nessuna interazione dovuta al moto ondosso, si diriga al largo con una distribuzione a ventaglio dei vettori di velocità.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	36	di	104	00			23	03	23

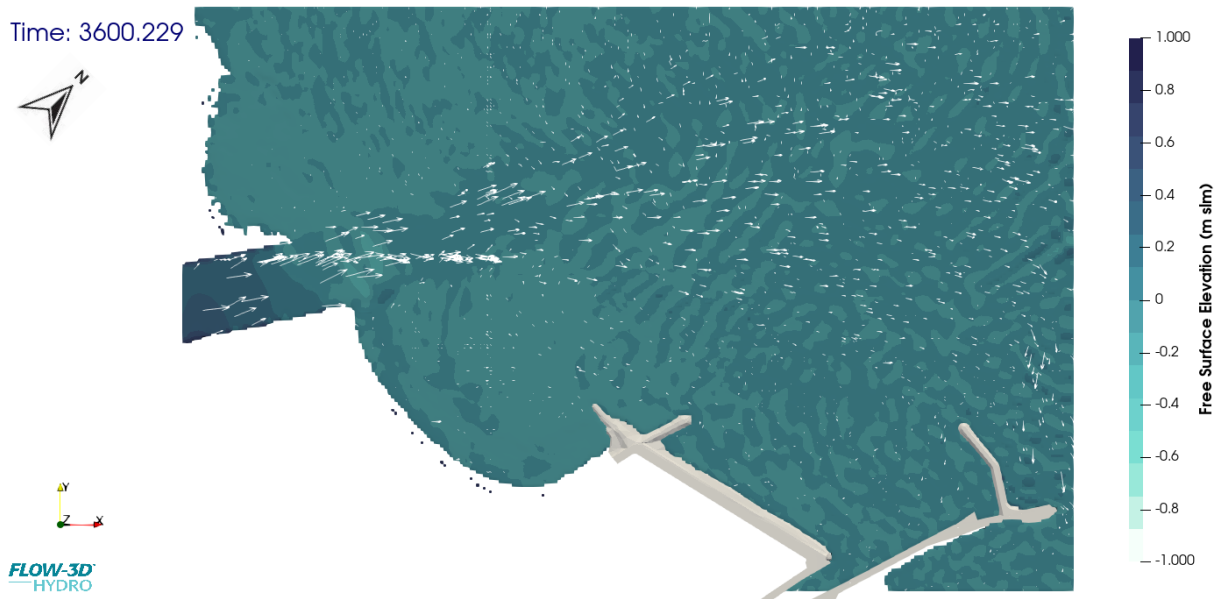


Figura 22: vettori di velocità a termine simulazione (3600 sec) per lo scenario 1 *ante-operam*

La Figura 23 riporta la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s).

Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia (di densità pari a 998.2 kg/m^3) tenda a diffondersi su tutto il dominio trasportata dal flusso mescolandosi all'acqua salata presente (di densità superiore, pari a 1029 kg/m^3), interessando anche la baia e l'avamposto. In Figura 24 è riportato l'andamento della densità lungo una sezione trasversale al flusso; si può notare come l'acqua a minor densità tenda a rimanere in superficie, per effetto dei fenomeni di galleggiamento indotti dalle differenze di densità fra i due fluidi.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	37	di	104	00			23	03	23

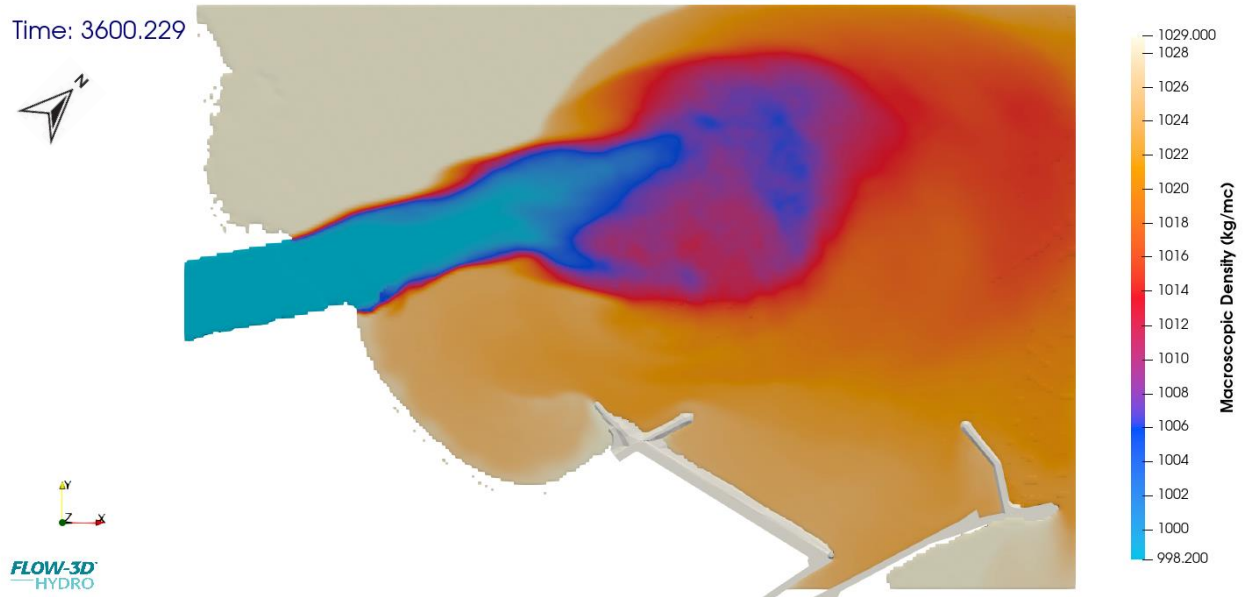
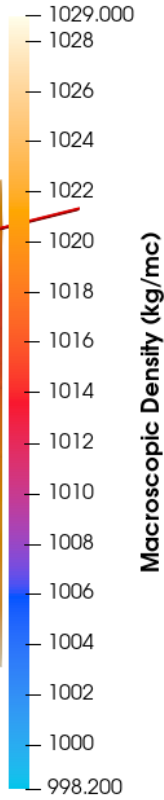
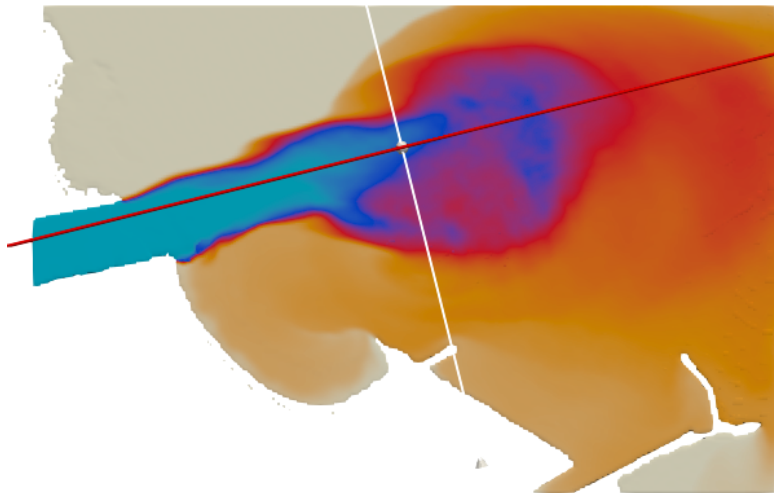


Figura 23: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione (3600 sec) per lo scenario 1 *ante-operam*

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	38	di	104	00		23	03	23

Time: 3600.229



LOW-3D
HYDRO

Figura 24: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 1 *ante-operam* lungo una sezione trasversale al flusso (esagerazione verticale 20:1)

° Documento:	Foglio			Rev.:				
Relazione Tecnica	39	di	104	00		23	03	23

La figura seguente mostra l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene confermato il campo di moto con i fenomeni di trasporto avvevivo e diffusivo. La parte principale del *plume* viene trasportata al largo, interessando anche l'imboccatura del porto, mentre la baia di San Giuliano viene in questo caso interessata in modo al più marginale dal trasporto.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 1 *ante-operam* è disponibile al seguente [link](#).

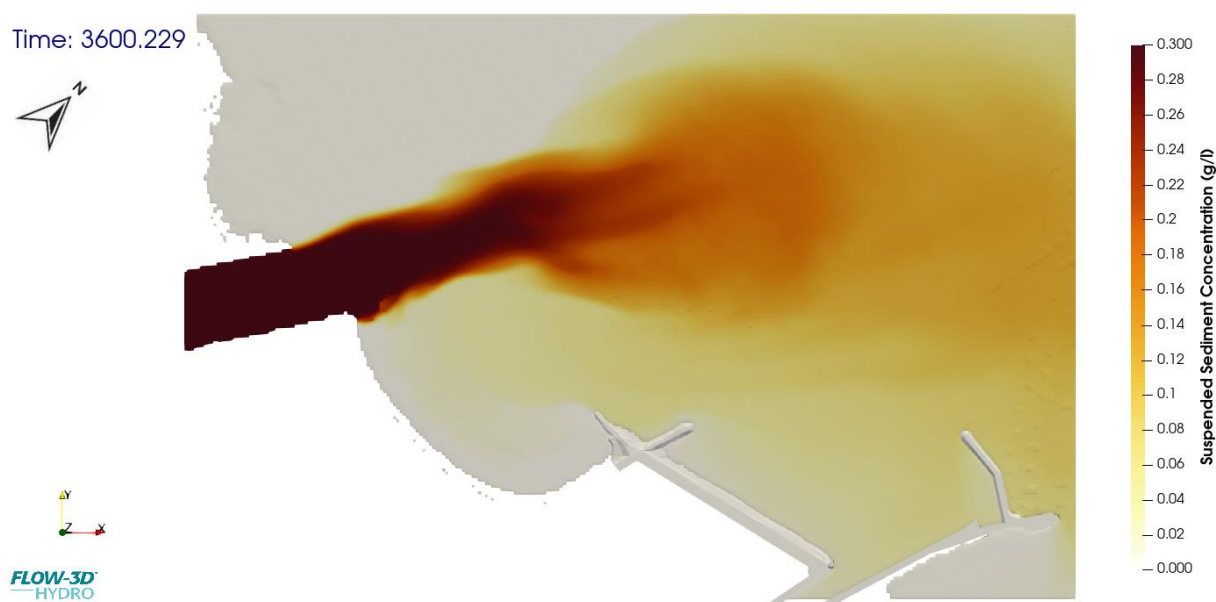


Figura 25: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 1 *ante-operam* (valori in g/L)

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	40	di	104	00			23	03	23

6.1.5.2 SCENARIO 1 *POST-OPERAM* LOTTO 1

La figura seguente riporta la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento della scogliera del moto di Levante. Si può notare come il flusso in uscita dal Marecchia, senza nessuna interazione dovuta al moto ondoso, si diriga al largo con una distribuzione a ventaglio dei vettori di velocità senza apprezzabili differenze rispetto allo scenario 1 *ante-operam*.

Time: 3600.103

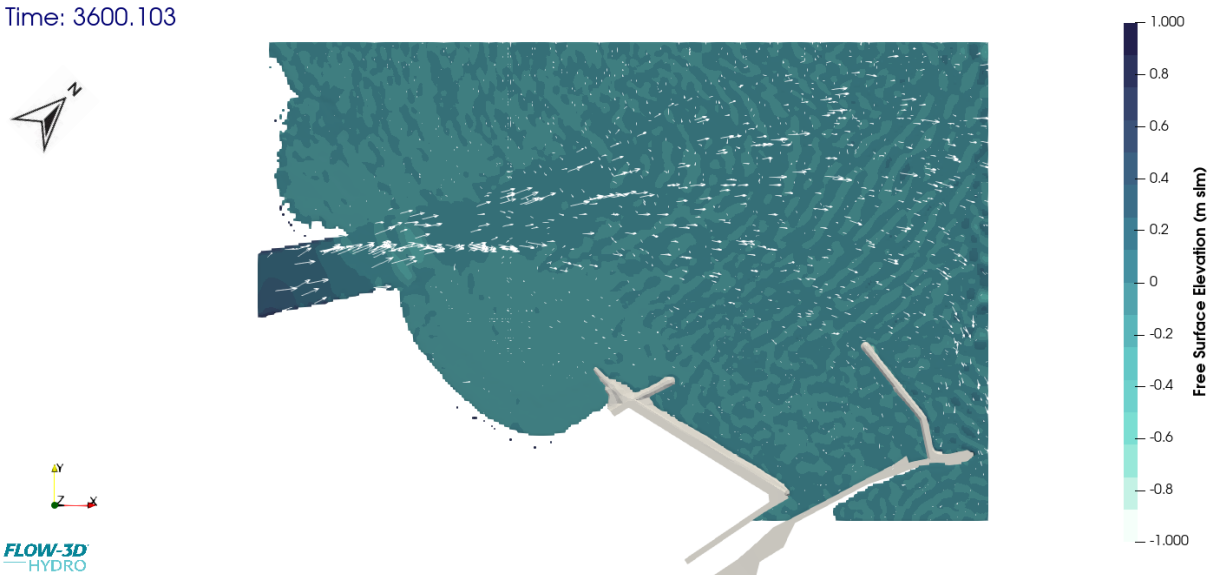


Figura 26: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam1*

La Figura 27 riporta la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a diffondersi su tutto il dominio trasportata dal flusso mescolandosi all'acqua salata presente, interessando anche la baia e l'avamporito, rimanendo più confinata all'interno dell'area portuale rispetto allo scenario *ante-operam*. In Figura 28 è riportato l'andamento della densità lungo una sezione trasversale al flusso, si può notare come l'acqua a minor densità tenda a rimanere in superficie, per effetto dei fenomeni di galleggiamento indotti dalle differenze di densità fra i due fluidi.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	41	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.103

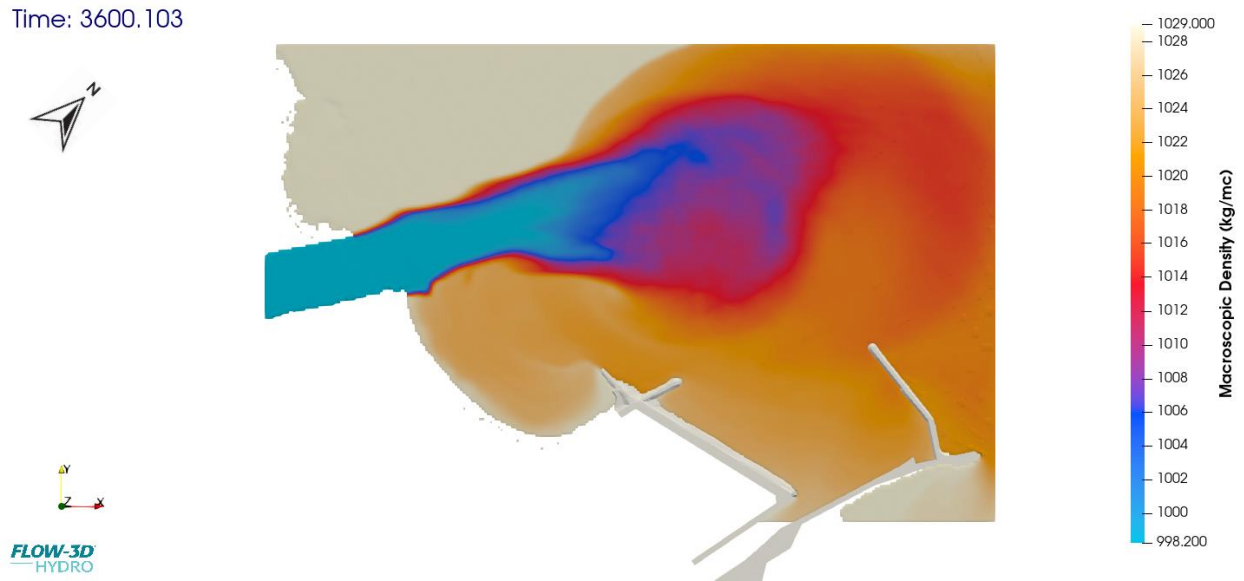


Figura 27: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam1*

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	42	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.103

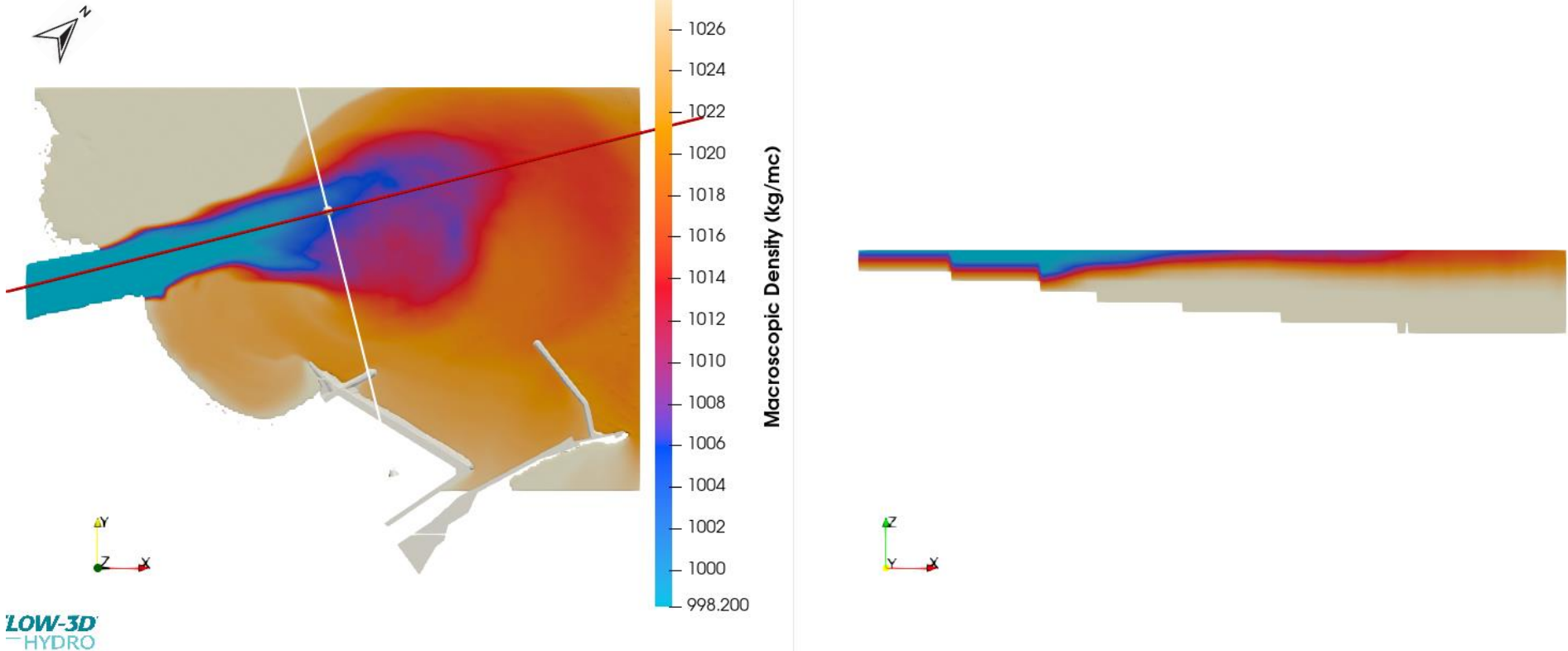


Figura 28: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam1* lungo una sezione trasversale al flusso (esagerazione verticale 20:1)

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	43	di	104	00			23	03	23

La figura seguente mostra l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene confermato il campo di moto con i fenomeni di trasporto avveffivo e diffusivo già visto nelle simulazioni precedenti. La parte principale del *plume* viene trasportata al largo, interessando anche l'imboccatura del porto e mostrando una tendenza all'accumulo lungo il paramento interno della nuova scogliera, mentre la baia di San Giuliano viene anche in questo caso interessata in modo al più marginale dal trasporto.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 1 *post-operam1* è disponibile al seguente [link](#).

Time: 3600.103

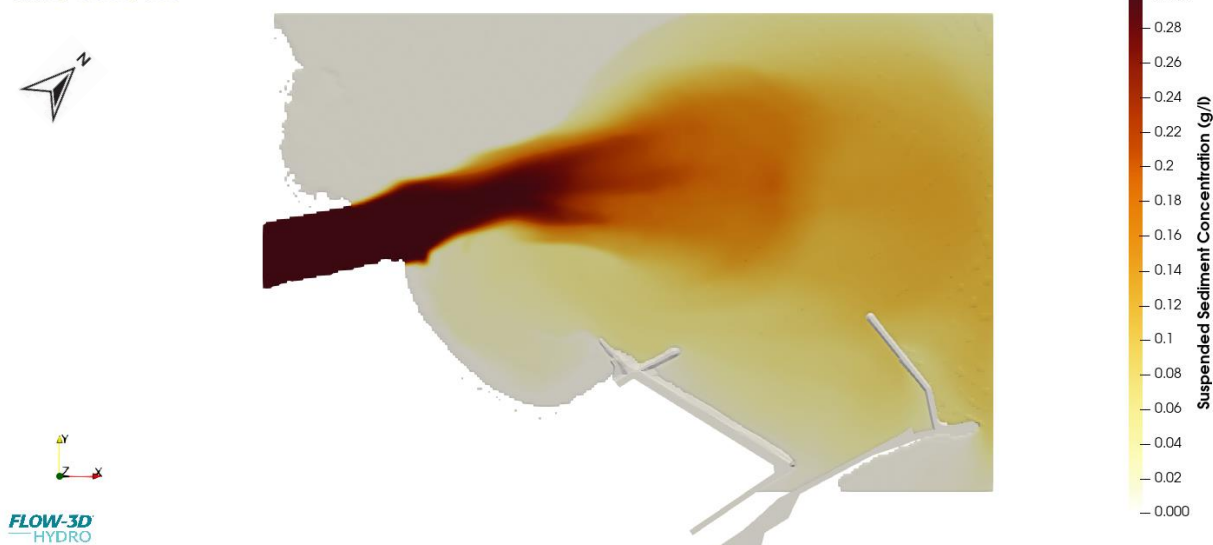


Figura 29: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam1* (valori in g/L)

6.1.5.3 SCENARIO 1 *POST-OPERAM* LOTTO 2

La figura seguente riporta la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento delle scogliere del molo di Levante e del molo di Ponente. Si può notare come il flusso in uscita dal Marecchia, venga in questo caso deviato più in direzione nord, per effetto della riflessione dovuta alla nuova struttura.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	44	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.054

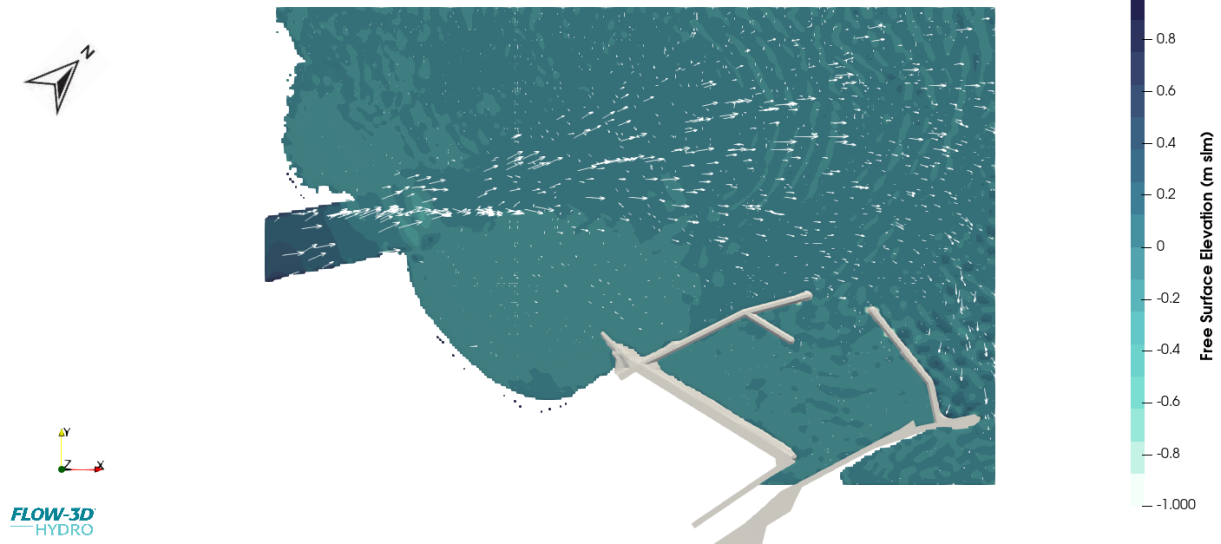


Figura 30: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam2*

La Figura 31 riporta la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a diffondersi interessando in modo più rilevante la parte nord del dominio, verso il mare aperto, con un ridotto ingresso all'interno dell'avamporito. In Figura 32 è riportato l'andamento della densità lungo una sezione trasversale al flusso; si può notare come l'acqua a minor densità tenda a rimanere in superficie, per effetto dei fenomeni di galleggiamento indotti dalle differenze di densità fra i due fluidi.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	45	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.054



FLOW-3D
HYDRO

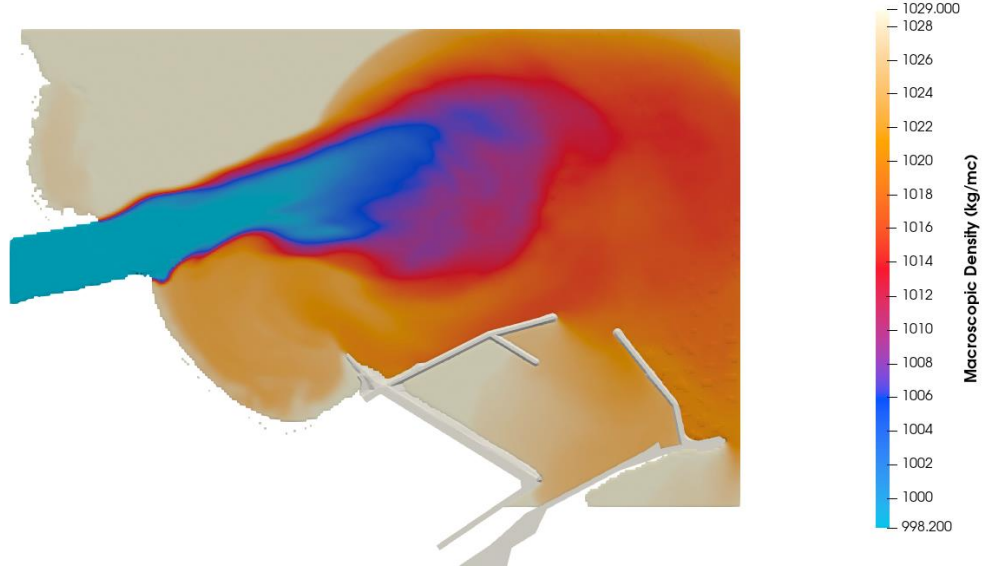
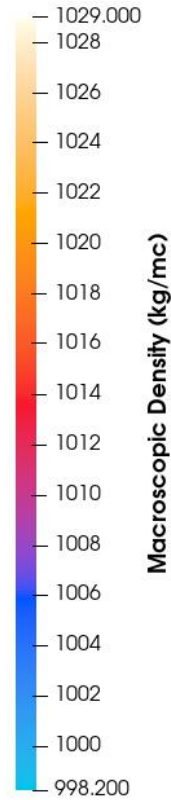
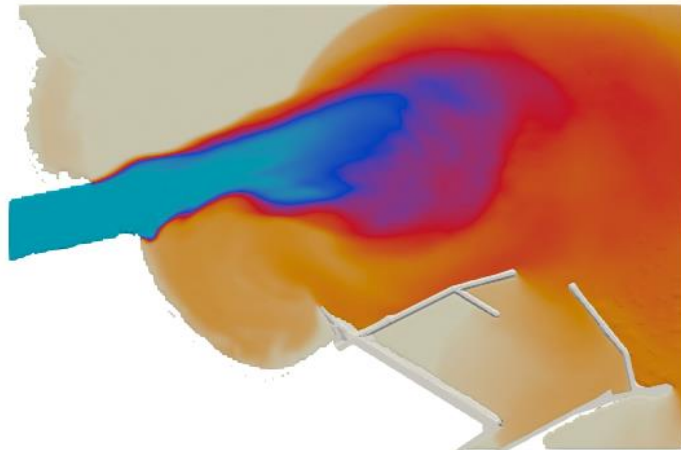


Figura 31: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam2*

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	46	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.054



Macroscopic Density (kg/mc)



LOW-3D
HYDRO

Figura 32: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam2* lungo una sezione trasversale al flusso (esagerazione verticale 20:1)

° Documento:	Foglio			Rev.:				
Relazione Tecnica	47	di	104	00		23	03	23

La figura seguente mostra l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene anche in questo caso confermato il campo di moto con i fenomeni di trasporto avvevivo e diffusivo già visto nelle simulazioni precedenti. La parte principale del *plume* viene trasportata al largo, verso la parte nord del dominio, con un interessamento ridotto dell'imboccatura del porto ed un altrettanto ridotto ingresso all'interno delle acque dell'avamporto; la baia di San Giuliano viene anche in questo caso interessata in modo al più marginale dal trasporto, pur mostrando concentrazioni leggermente maggiori rispetto agli scenari *ante-operam* e *post-operam 1*.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 1 *post-operam2* è disponibile al seguente [link](#).

Time: 3600.054

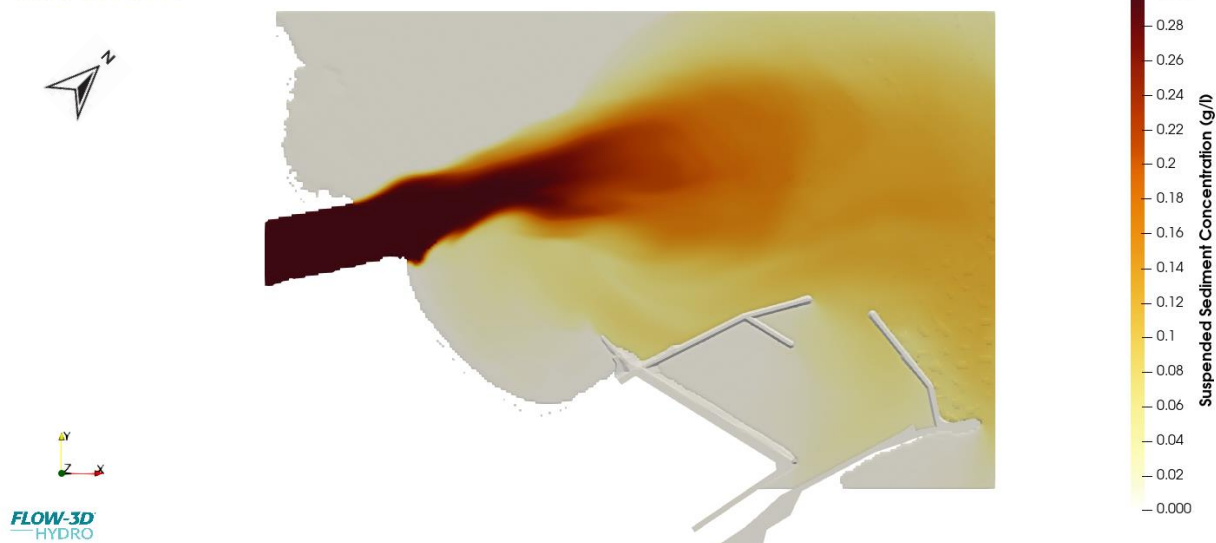


Figura 33: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 1 *post-operam2* (valori in g/L)

Al fine di quantificare l'apporto di sedimento in sospensione nella baia di San Giuliano ed all'interno del porto, sono stati inserite 2 sezioni di controllo all'interno del dominio, rispettivamente all'imbocco della baia e del porto; la figura seguente mostra la posizione delle due sezioni di controllo (la sezione di imbocco del porto varia nelle tre simulazioni in funzione dell'effettiva luce libera di ingresso, come mostrato nelle figure seguenti).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	48	di	104	00		23 03 23

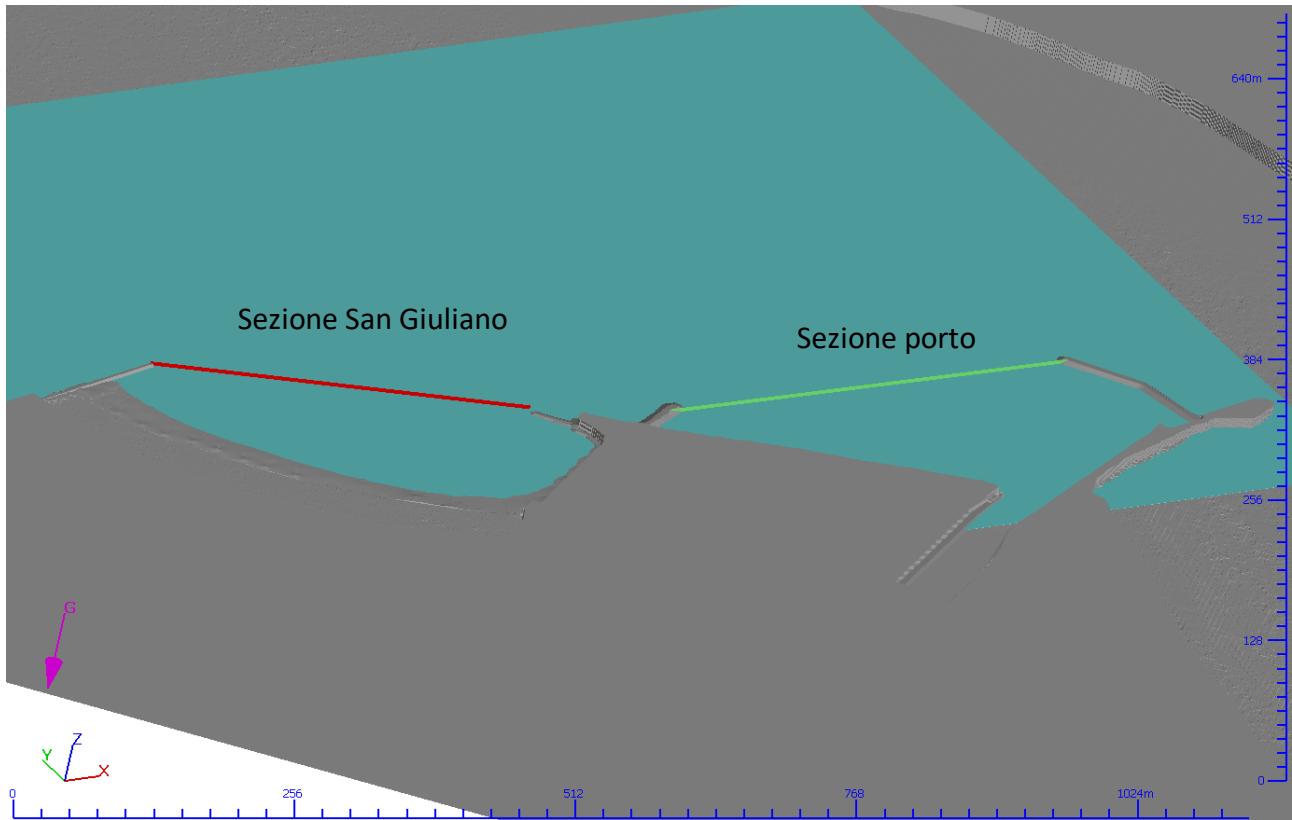


Figura 34: sezioni di controllo inserite all'interno del dominio per lo scenario 1 *ante-operam*

° Documento:	Foglio				Rev.:				
Relazione Tecnica	49	di	104	00			23	03	23

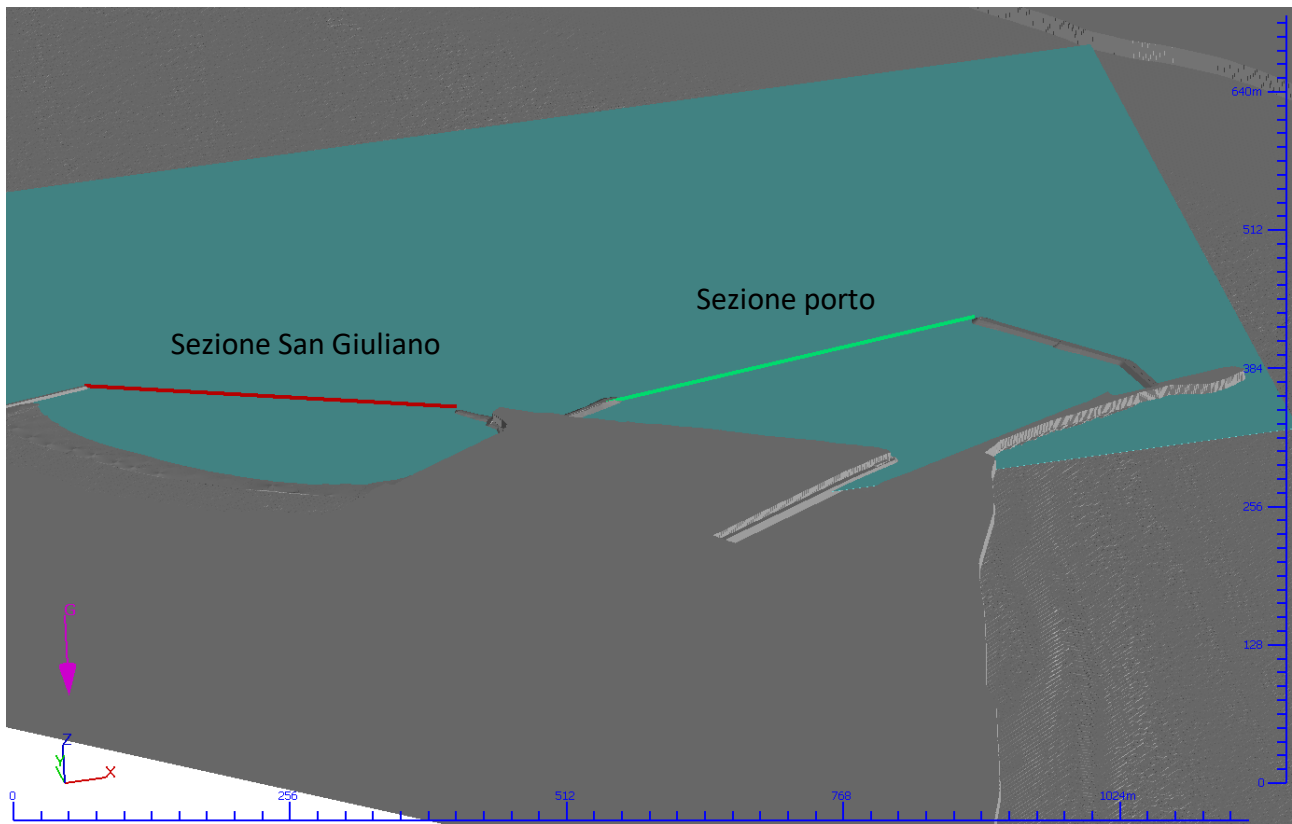


Figura 35: sezioni di controllo inserite all'interno del dominio per lo scenario 1 post-operam lotto 1

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	50	di	104	00			23	03	23

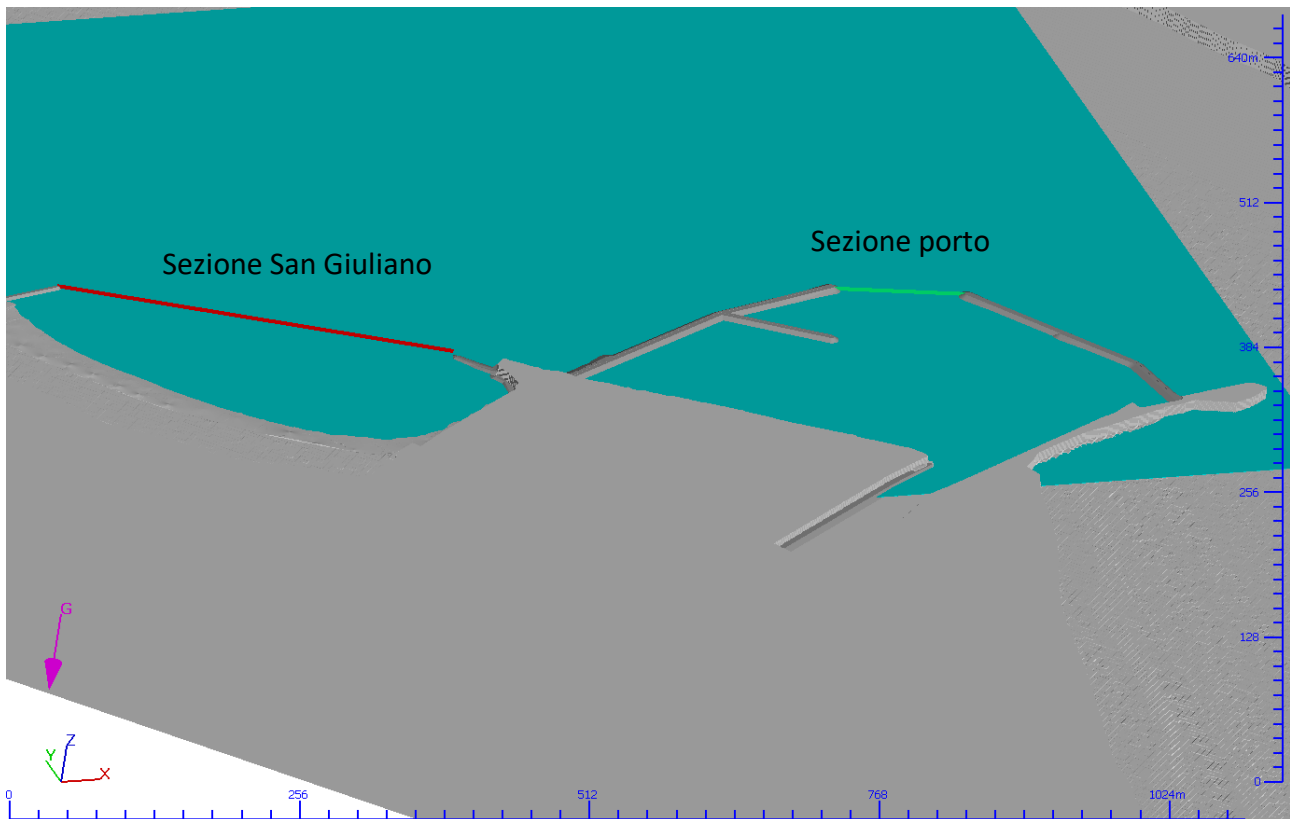


Figura 36: sezioni di controllo inserite all'interno del dominio per lo scenario 1 *post-operam lotto 2*

La tabella seguente riporta la massa cumulata in kg di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo al termine della simulazione (istante $t=3600$ sec) nei tre scenari simulati

	Sedimenti in Sospensione [kg]	
Scenario	Sezione San Giuliano	Sezione porto
sc1_Ante	1809.18	5531.18
sc1_post1	1331.39	9165.84
sc1_post2	1291.36	4209.77

Tabella 6: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo

I grafici seguenti riportano l'andamento nel tempo della massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo per gli scenari simulati.

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	51	di	104	00		23	03	23

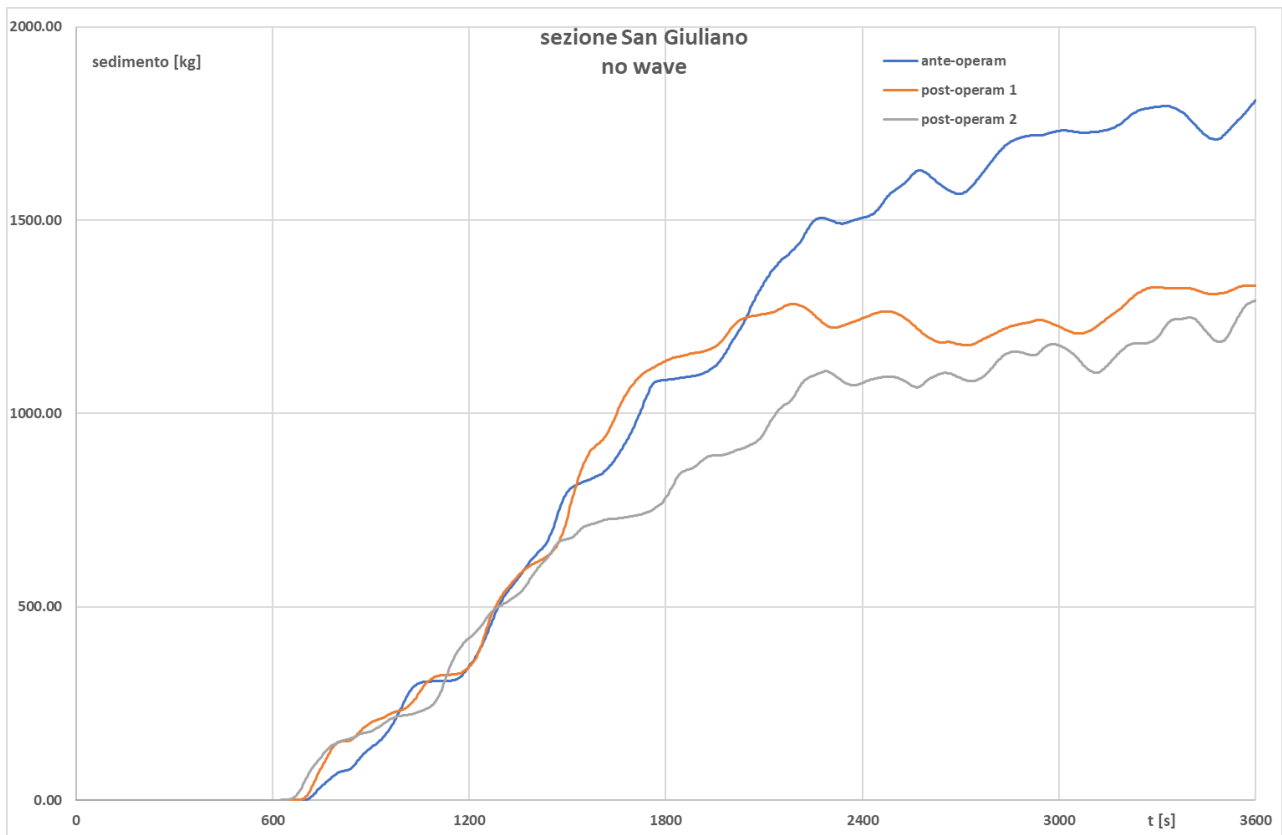


Figura 37: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo della baia di San Giuliano nello scenario 1

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	52	di	104	00		23	03	23

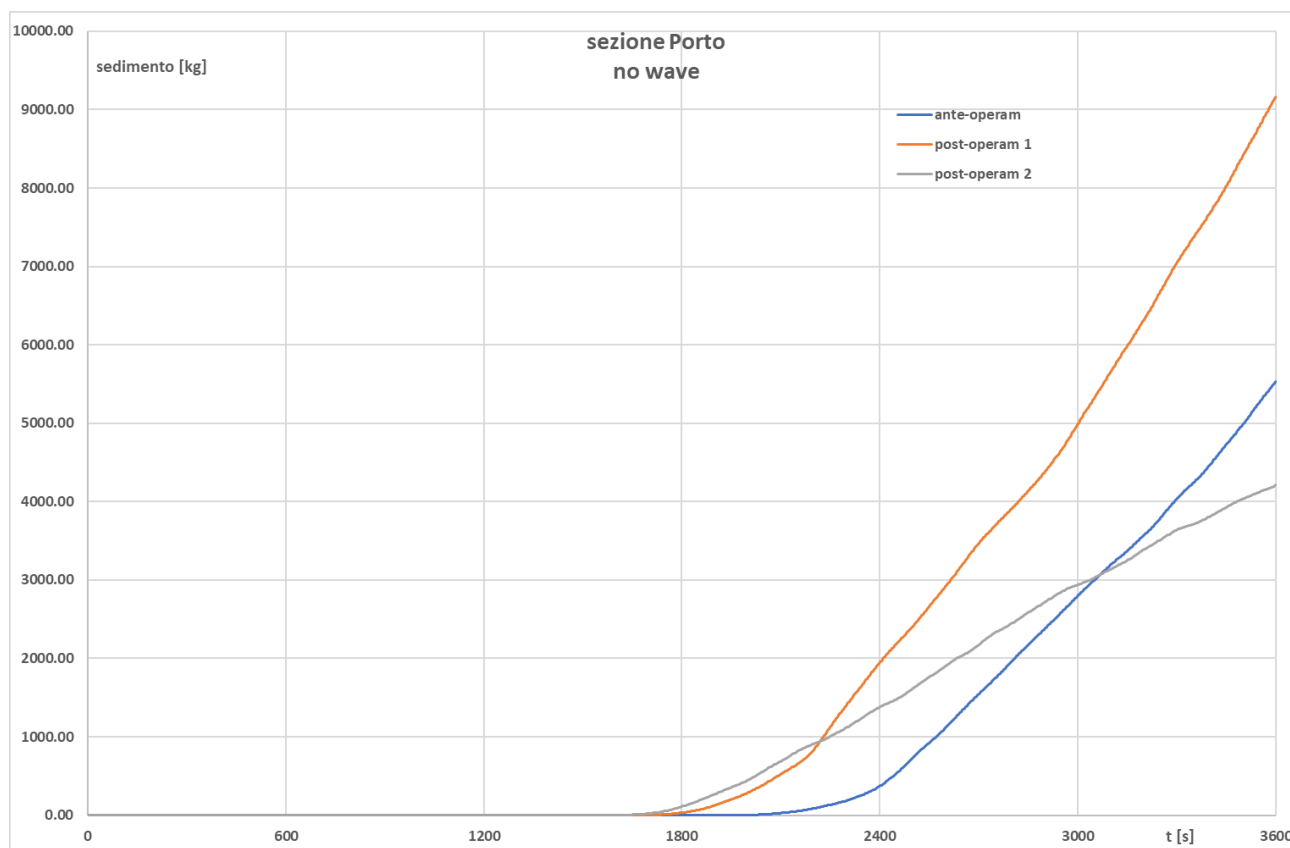


Figura 38: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo del porto nello scenario 1

Per quanto riguarda la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si assiste ad una diminuzione dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo in corrispondenza del port il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre scenario *post-operam lotto1* presenta il valore massimo, anche più alto dello scenario *ante-operam*.

Le condizioni di calma, simulate nello scenario 1, sono relative a circa il 31% dei dati ondametrici rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo aprile 2012 – ottobre 2018 (si veda la Tabella 3).

Per avere infine una valutazione qualitativa sulle modifiche alle tendenze dei *pattern* di erosione o deposito all'interno della baia di San Giuliano, si può calcolare l'integrale nel tempo degli sforzi

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	53	di	104	00			23	03	23

tangenziali in ogni cella del dominio (*total shear load*) e mappare le differenze negli scenari *post-operam lotto1* e *post-operam lotto2* rispetto allo scenario *ante-operam*.

Le mappe seguenti sono qualitative, infatti sono riferite all'orizzonte di simulazione (3600 s) ma restituiscono una utile valutazione su come si modificano le zone di potenziale erosione o potenziale deposito a seguito della realizzazione dei diversi lotti del progetto.

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 1* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).



Figura 39: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 1*

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 2* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	54	di	104	00		23	03	23



Figura 40: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 2*

Come si può vedere, non si evidenziano modifiche apprezzabili nei *pattern* di erosione o deposito all'interno della baia.

6.2 SCENARIO 2A – CONDIZIONI DI ONDA DA NORD-OVEST – W5

Lo scenario 2a è relativo a condizioni marine di onda da Nord-Ovest con tempo di ritorno 5 anni (si veda il par. 4.2), in grado di interagire con l'apporto idrico dato dal fiume Marecchia. Si descrivono di seguito le condizioni al contorno ed i risultati delle simulazioni

° Documento:	Foglio				Rev.:				
Relazione Tecnica	55	di	104	00			23	03	23

6.2.1 MESHING

La mesh di calcolo per lo scenario 2 in condizioni *ante-operam* e *post-operam* è una mesh a base quadrata, di dimensioni planimetriche variabili da 5m x 5m nella zona di interesse a 20m x 20m nelle parti di dominio più distanti dalla costa; la discretizzazione verticale è variabile da 2 a 0.5 m; il numero complessivo di celle è pari a 2008670.

In Figura 21 è riportata una vista planimetrica della mesh di calcolo; è visibile la suddivisione in blocchi quadrangolari (*mesh block*) funzionale alla corretta definizione delle condizioni al contorno.

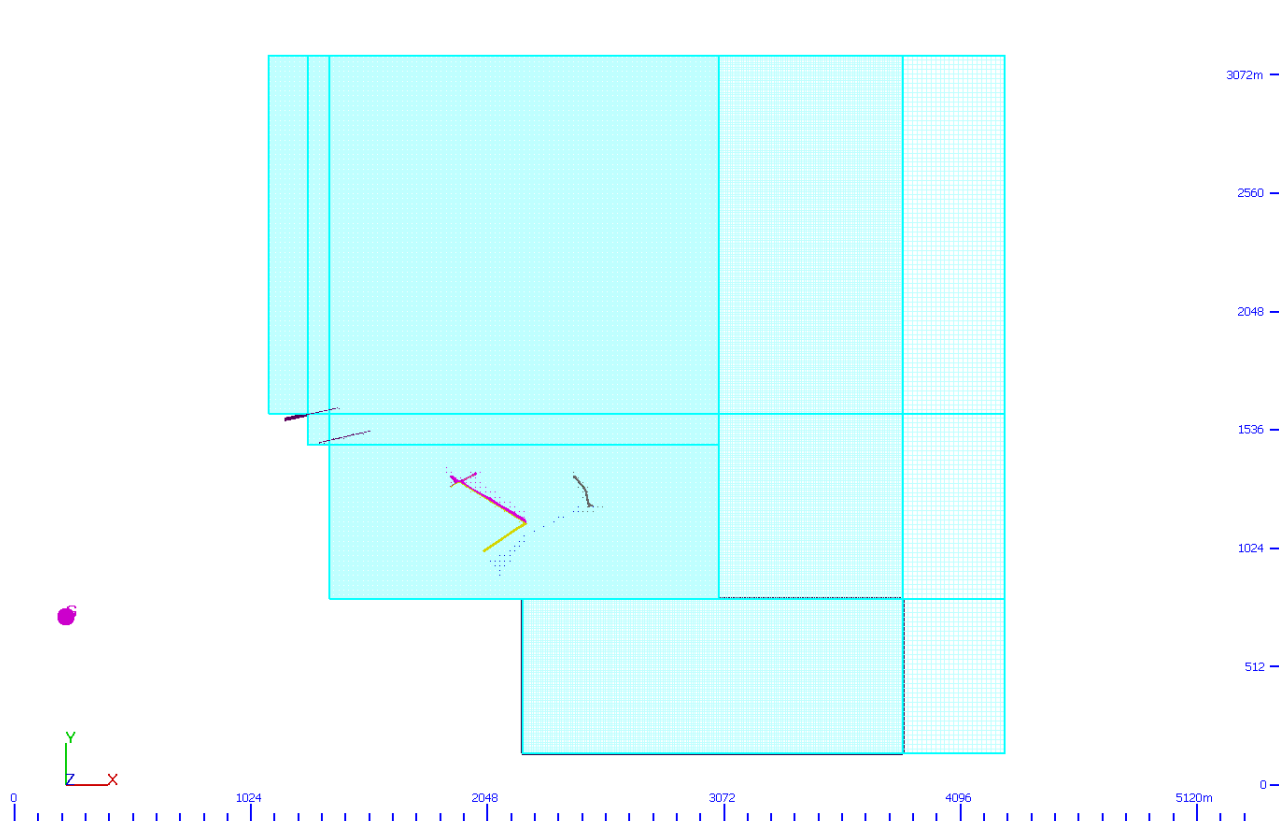


Figura 41: mesh di calcolo per lo scenario 2

La mesh risulta in questo caso notevolmente più estesa rispetto all'area di interesse; questa scelta deriva dalla necessità di allontanare il più possibile le condizioni al contorno dall'area di studio, permettendo la corretta descrizione del regime ondosso ed il corretto sviluppo del campo di moto all'interno del dominio, in particolare nel tratto di mare prospiciente la baia di San Giuliano e l'imboccatura del nuovo avamporporto.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	56	di	104	00			23	03	23

6.2.2 PORTATA MARECCHIA

La portata del fiume Marecchia è stata assunta pari a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, valore indicativo della media dei massimi giornalieri del periodo 2015-2021 riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna (si veda il par. 4.3) e dello stesso ordine di grandezza delle portate con tempo di ritorno annuale. La portata in ingresso presenta una densità caratteristica di acqua dolce, pari a 998.2 kg/m^3 , a differenza dell'acqua marina presente all'interno del dominio, con densità del fluido pari a 1029 kg/m^3 .

Alla portata del fiume Marecchia è associata una concentrazione solidi sospesi (materiale limo argilloso) pari a 0.3 kg/m^3 ovvero 0.3 g/l (valore medio della concentrazione di trasporto torbido misurata e riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna), rilasciato dopo 500 s dall'inizio della simulazione, al fine di valutare l'effetto del trasporto avveffivo indotto dal campo di moto sui materiali a granulometria fine apportati dal fiume.

6.2.3 MOTO ONDOSO – CONDIZIONI AL CONTORNO

Lo scenario 2 prevede un'onda proveniente dal quadrante NW ($292.5^\circ \div 337.5^\circ$) con tempo di ritorno pari a 5 anni ($H_s = 0.8 \text{ m}$, $T_p = 8.3 \text{ s}$, come riportato in Tabella 2). L'onda è modellata come onda non lineare e periodica di Stokes, caratterizzata da altezza d'onda, periodo e profondità media del fluido, come riportato nella figura seguente, tratta dalla documentazione tecnica del software.

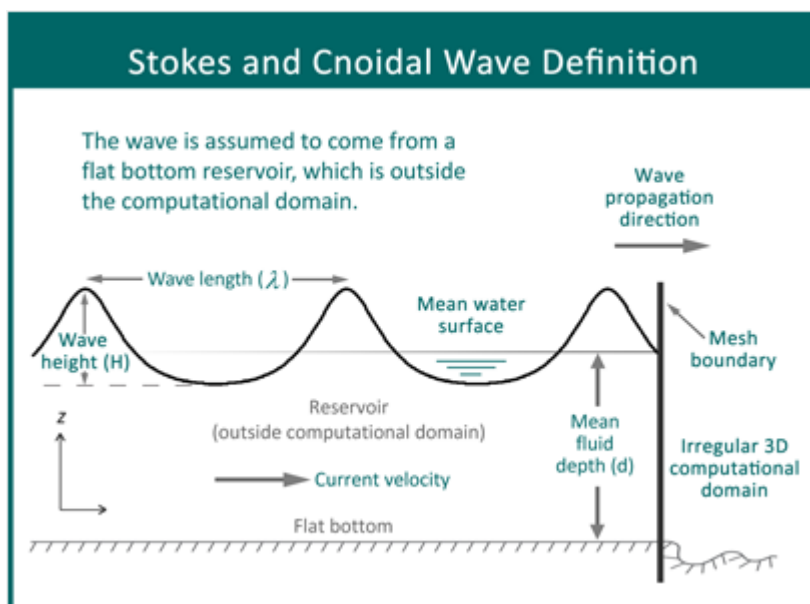


Figura 42: onda non lineare di Stokes

° Documento:	Foglio			Rev.:			
Relazione Tecnica	57	di	104	00	23	03	23

Le condizioni al contorno sono di tipo *Wave* lungo il confine superiore del modello, mentre sono di carico imposto (condizione di tipo *pressure*) pari quota 0 m slm sui rimanenti bordi esterni della mesh, fatta eccezione per il fiume Marecchia nel quale la condizione al contorno è del tipo portata in ingresso (condizione di tipo *volume flow rate*).

6.2.4 TEMPO DI SIMULAZIONE

Il tempo di simulazione è pari a 3600 s per tutti gli scenari *ante-* e *post-operam*.

6.2.5 RISULTATI

6.2.5.1 SCENARIO 2A ANTE-OPERAM

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s). Si può notare come il flusso in uscita dal Marecchia, venga intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigersi verso l'imboccatura del porto per poi deviare verso il tratto di mare a sud-est delle strutture portuali, diffondendosi nel tratto di mare prospiciente la spiaggia di Marina Centro.

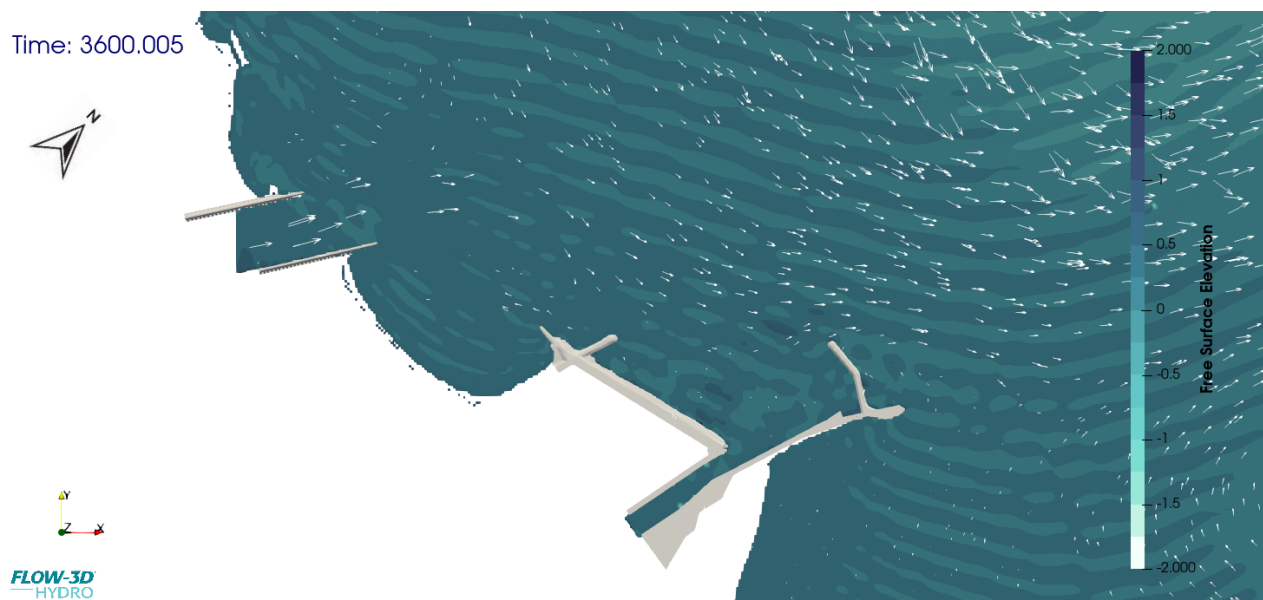


Figura 43: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 2a *ante-operam*

La Figura 44 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua

° Documento:	Foglio			Rev.:			
Relazione Tecnica	58	di	104	00	23	03	23

dolce in arrivo dal Marecchia tenda ad essere indirizzata verso la spiaggia di San Giuliano ed il molo di Ponente, giungendo sino a lambire anche la banchina ed il molo di Levante.

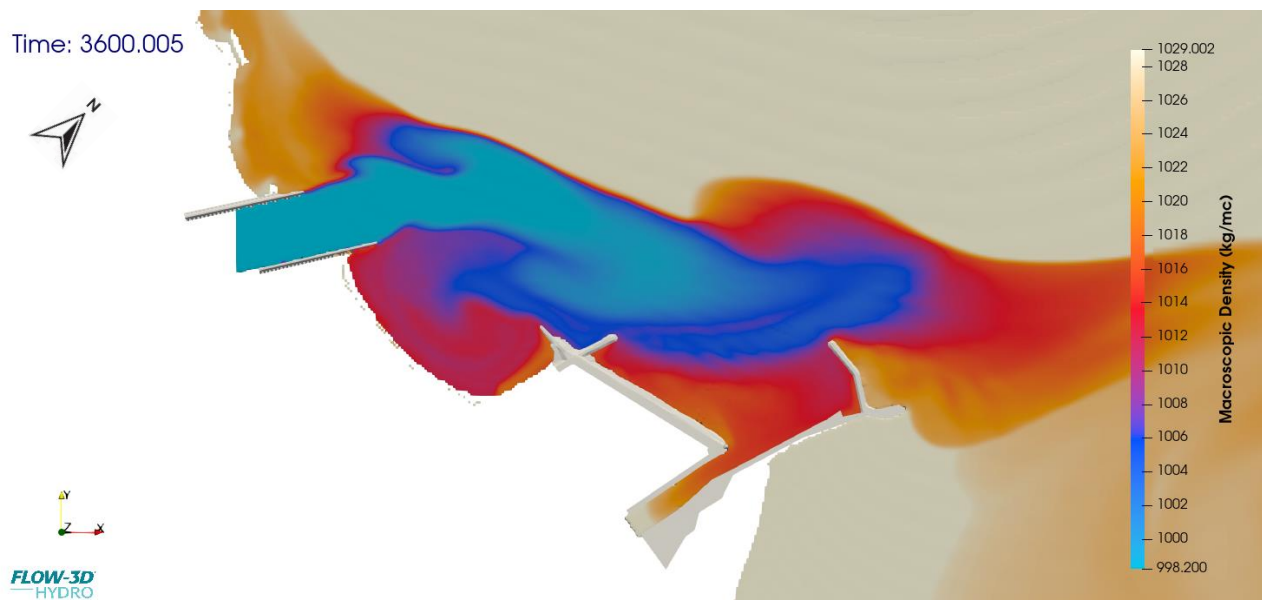


Figura 44: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 2a ante-operam

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in $[\text{g/l}]$ del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a $0.3 [\text{g/l}]$; viene confermato il campo di moto con i fenomeni di trasporto avvevivo e diffusivo. La parte principale del *plume* viene trasportata al largo, interessando anche l'imboccatura del porto, mentre la baia di San Giuliano viene in questo caso interessata in modo al più marginale dal trasporto.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2 ante-operam è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	59	di	104	00			23	03	23

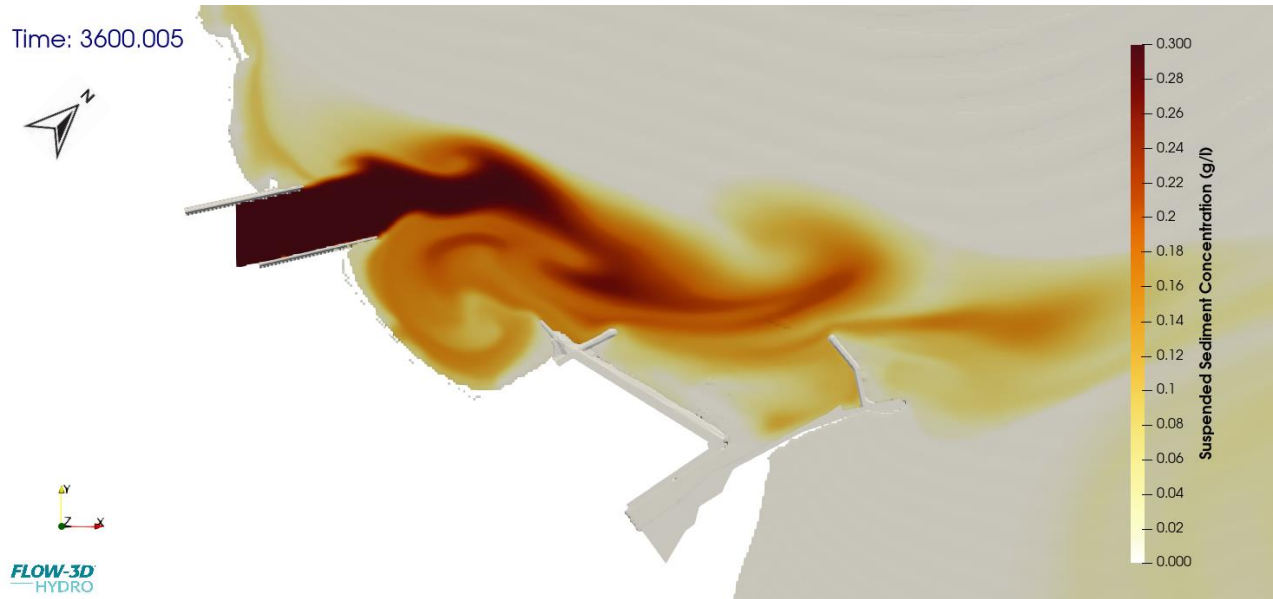


Figura 45: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 2a *ante-operam* (valori in g/l)

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	60	di	104	00			23	03	23

6.2.5.2 SCENARIO 2A *POST-OPERAM* LOTTO 1

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento della scogliera del moto di Levante. Si può notare venga intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigersi verso l'imboccatura del porto per poi deviare verso il tratto di mare a sud-est delle strutture portuali, diffondendosi nel tratto di mare prospiciente la spiaggia di marina centro senza apprezzabili differenze rispetto allo scenario 2 *ante-operam* eccetto per l'area più a ridosso del nuovo molo.

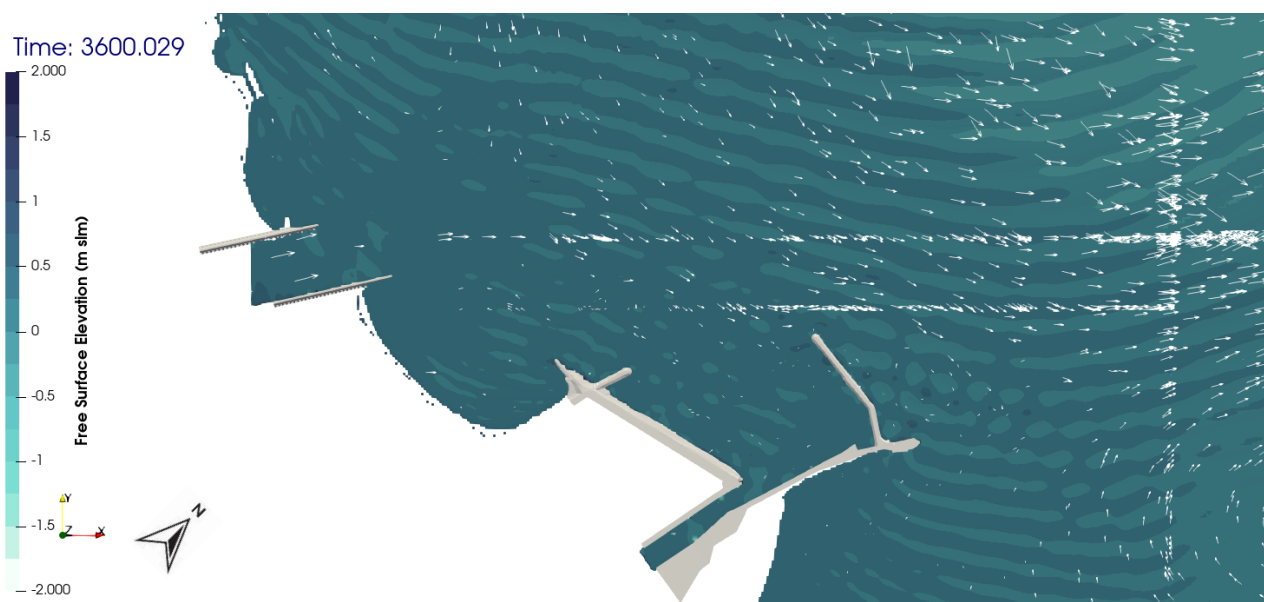


Figura 46: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam*1

La Figura 47 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a diffondersi su tutto il dominio trasportata dal flusso mescolandosi all'acqua salata presente, interessando anche la baia e l'avamporporto, rimanendo più confinata all'interno dell'area portuale rispetto allo scenario *ante-operam*.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	61	di	104	00			23	03	23

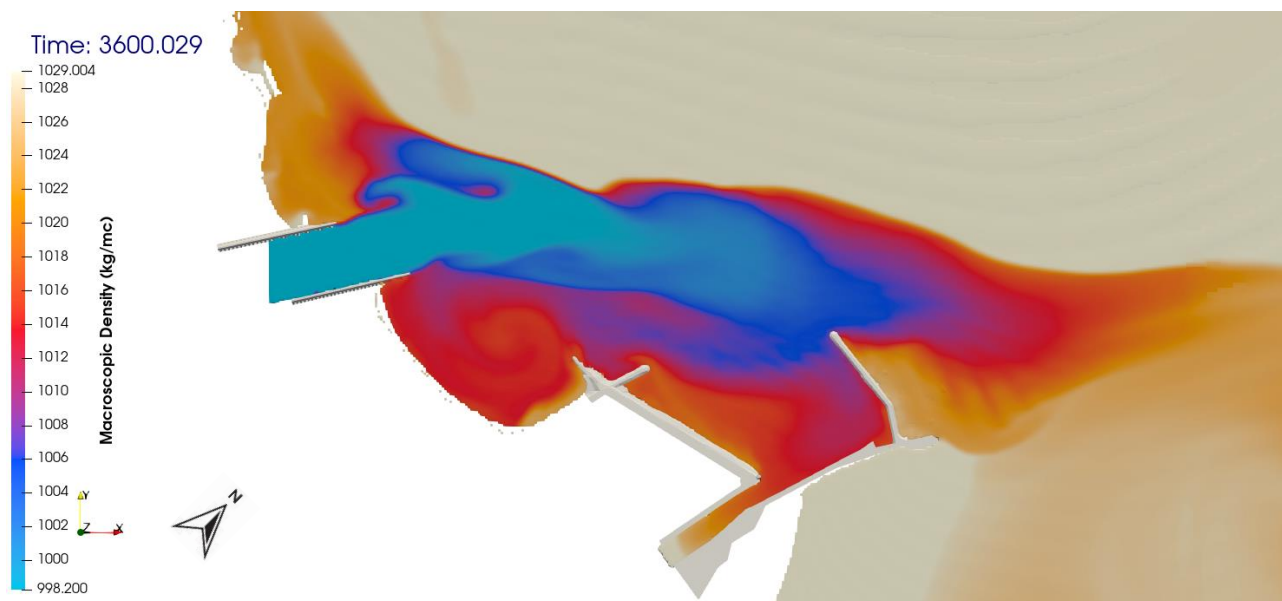


Figura 47: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam1*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene confermato l'interessamento della spiaggia di San Giuliano e del molo di Ponente, con un rilevante trasporto del materiale sino alle soglie dell'imboccatura del Porto Canale.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2 *post-operam1* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	62	di	104	00		23 03 23

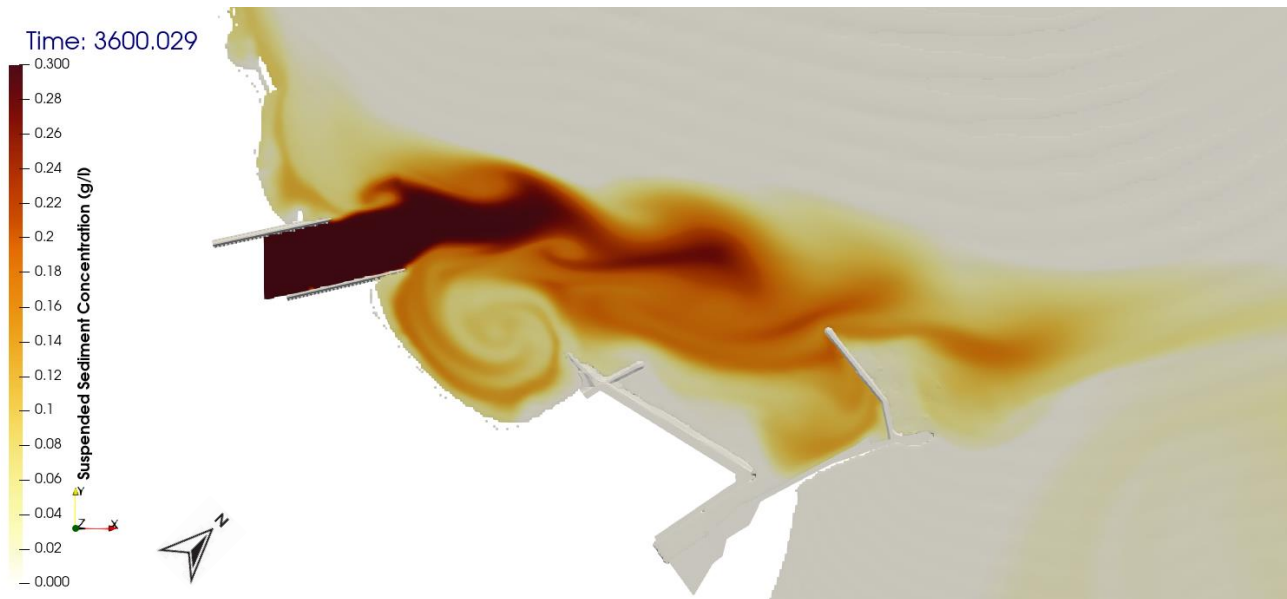


Figura 48: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam1* (valori in g/L)

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	63	di	104	00		23 03 23

6.2.5.3 SCENARIO 2A *POST-OPERAM* LOTTO 2

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento delle scogliere del molo di Levante e del molo di Ponente. Si può notare come in questo caso i vettori di velocità mostrino una più marcata direzione verso Est, bypassando la struttura portuale e diffondendosi a valle di questa; la presenza del molo di Ponente, in particolare, crea una zona di calma nel tratto antistante la spiaggia di San Giuliano che favorisce il trasporto al largo.

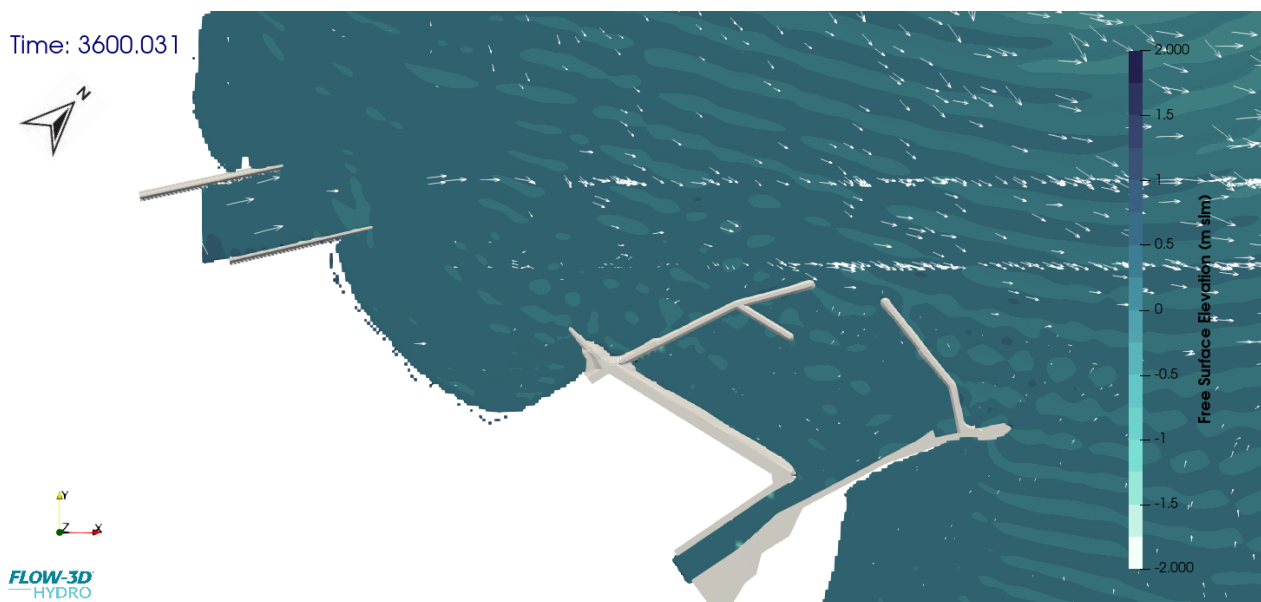


Figura 49: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam2*

La Figura 50 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a dirigersi verso il nuovo molo di Ponente seguendo le strutture e a venir veicolata verso il mare aperto, interessando l'area dell'imboccatura del nuovo avamporbo.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	64	di	104	00			23	03	23

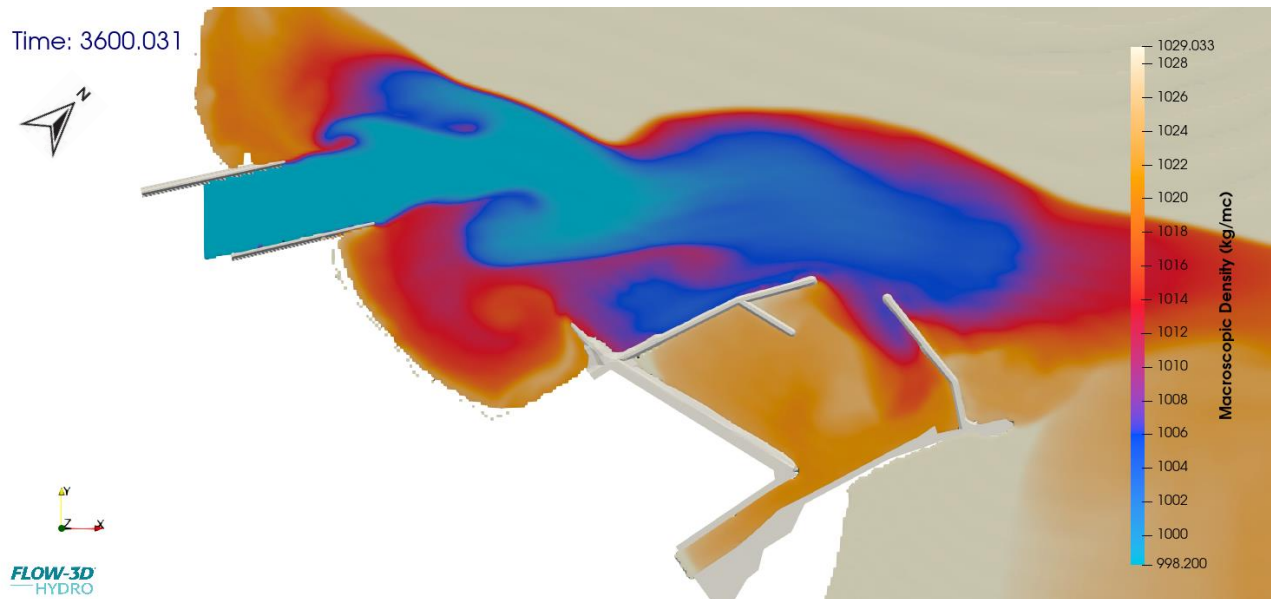


Figura 50: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam2*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in $[\text{g/l}]$ del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a $100 [\text{g/l}]$; viene confermato il trasporto del *plume* in direzione del molo di Ponente e poi al largo, con un ridotto interessamento della spiaggia di San Giuliano.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2 *post-operam2* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	65	di	104	00			23	03	23

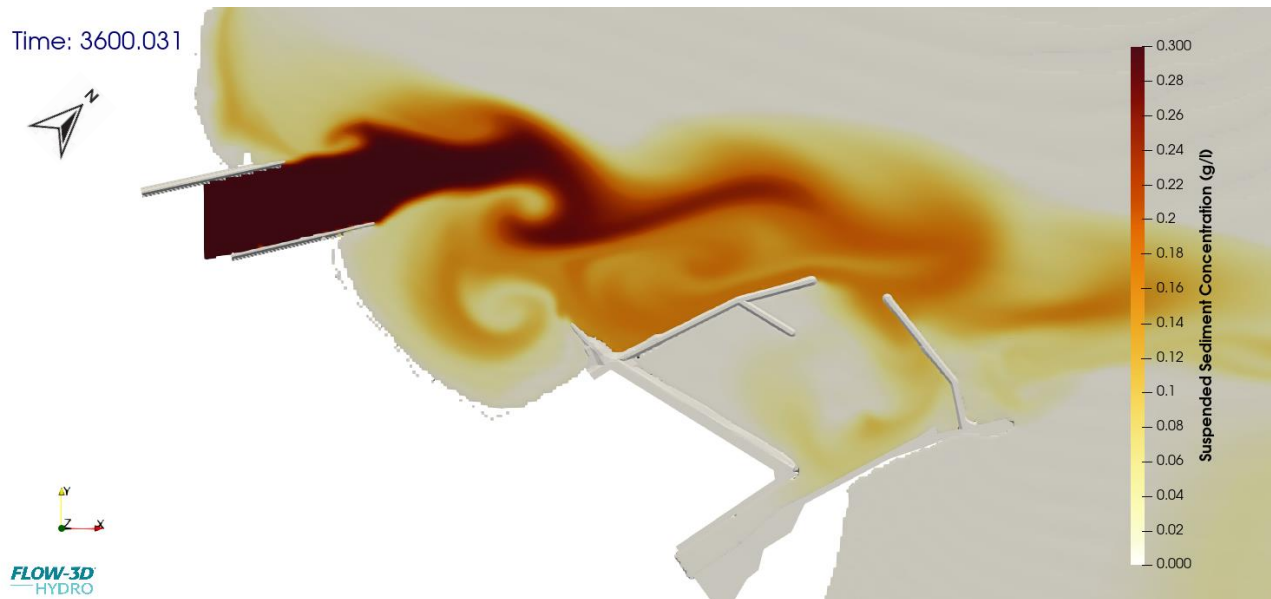


Figura 51: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 2a post-operam2 (valori in g/L)

La tabella seguente riporta la massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo all'interno del dominio, rispettivamente all'imbocco della baia e del porto (si vedano Figura 34 ÷ Figura 36) al termine della simulazione (istante $t=3600$ sec) nei tre scenari simulati.

Scenario	Sedimenti in Sospensione [kg]	
	Sezione San Giuliano	Sezione porto
Sc2a_Ante	11208.20	15094.98
Sc2a_post1	7368.81	27991.77
Sc2a_post2	5474.85	8665.77

Tabella 7: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo

I grafici seguenti riportano l'andamento nel tempo della massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo per gli scenari simulati.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	66	di	104	00		23 03 23

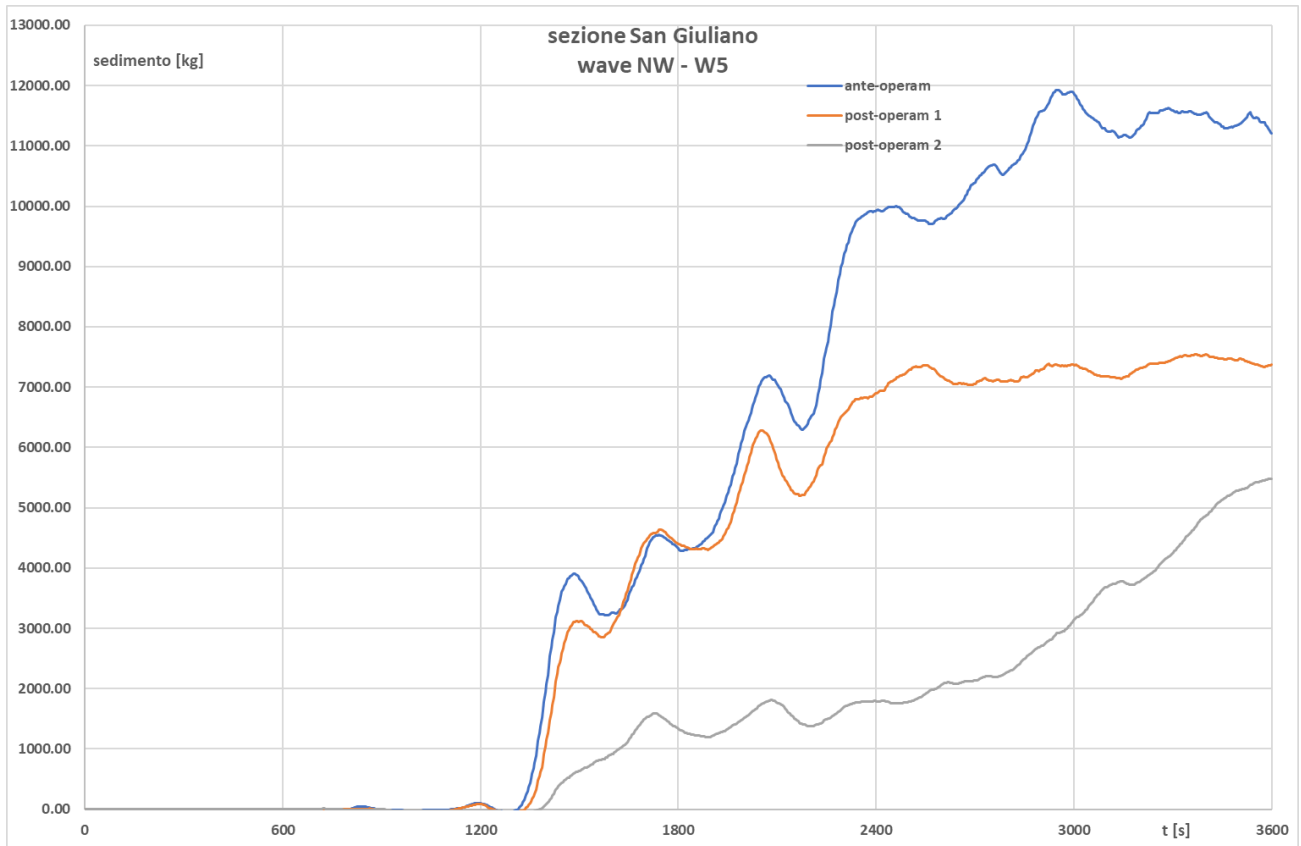


Figura 52: massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo della baia di San Giuliano nello scenario 2a

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	67	di	104	00		23	03	23

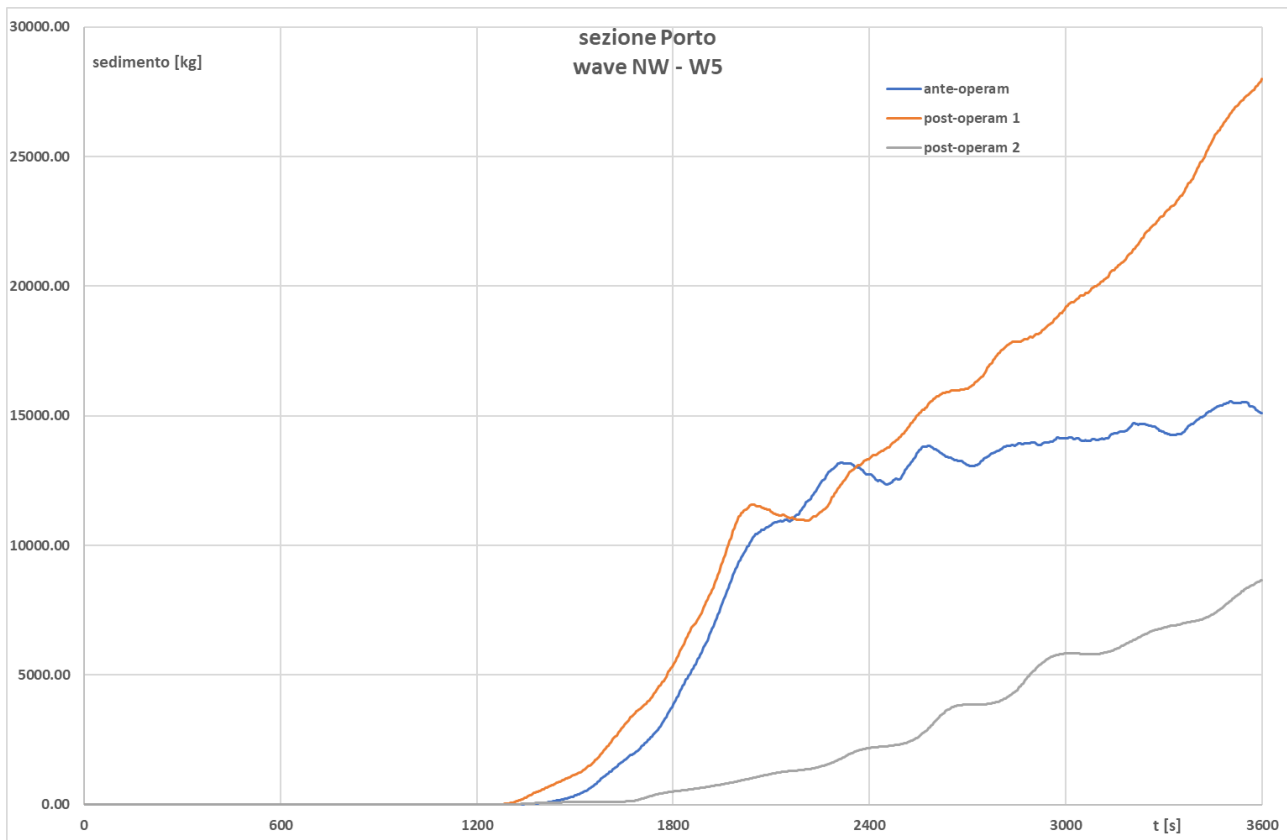


Figura 53: massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo del porto nello scenario 2a

Per quanto riguarda la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si assiste ad una diminuzione dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre scenario *post-operam lotto1* presenta il valore massimo, anche più alto dello scenario *ante-operam*.

Le condizioni di onda da NW con altezza d'onda superiore a 0.5m, simulate nello scenario 2a, sono relative a circa lo 0.12% dei dati ondometrici rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo aprile 2012 – ottobre 2018 (si veda la Tabella 3).

Per avere infine una valutazione qualitativa sulle modifiche alle tendenze dei *pattern* di erosione o deposito all'interno della baia di San Giuliano, si può calcolare l'integrale nel tempo degli sforzi

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	68	di	104	00			23	03	23

tangenziali in ogni cella del dominio (*total shear load*) e mappare le differenze negli scenari *post-operam lotto1* e *post-operam lotto2* rispetto allo scenario *ante-operam*.

Le mappe seguenti sono qualitative, infatti sono riferite all'orizzonte di simulazione (3600 s) ma restituiscono una utile valutazione su come si modificano le zone di potenziale erosione o potenziale deposito a seguito della realizzazione dei diversi lotti del progetto.

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 1* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).



Figura 54: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 1*

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 2* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).

° Documento:	Foglio			Rev.:				
Relazione Tecnica	69	di	104	00		23	03	23



Figura 55: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 2*

Come si può vedere, si evidenzia in entrambi gli scenari una tendenza al deposito all'interno della baia.

6.3 SCENARIO 2B – CONDIZIONI DI ONDA DA NORD-OVEST – W1

Lo scenario 2b è relativo a condizioni marine di onda da NordOvest con tempo di ritorno 1 anno (si veda il par. 4.2), in grado di interagire con l'apporto idrico dato dal fiume Marecchia. Si descrivono di seguito le condizioni al contorno ed i risultati delle simulazioni.

6.3.1 MESHING

° Documento:	Foglio			Rev.:			
Relazione Tecnica	70	di	104	00	23	03	23

La mesh di calcolo per lo scenario 2 in condizioni *ante-operam* e *post-operam* è una mesh a base quadrata, di dimensioni planimetriche variabili da 5m x 5m nella zona di interesse a 20m x 20m nelle parti di dominio più distanti dalla costa; la discretizzazione verticale è variabile da 2 a 0.5 m; il numero complessivo di celle è pari a 2008670.

In Figura 21 è riportata una vista planimetrica della mesh di calcolo; è visibile la suddivisione in blocchi quadrangolari (*mesh block*) funzionale alla corretta definizione delle condizioni al contorno.

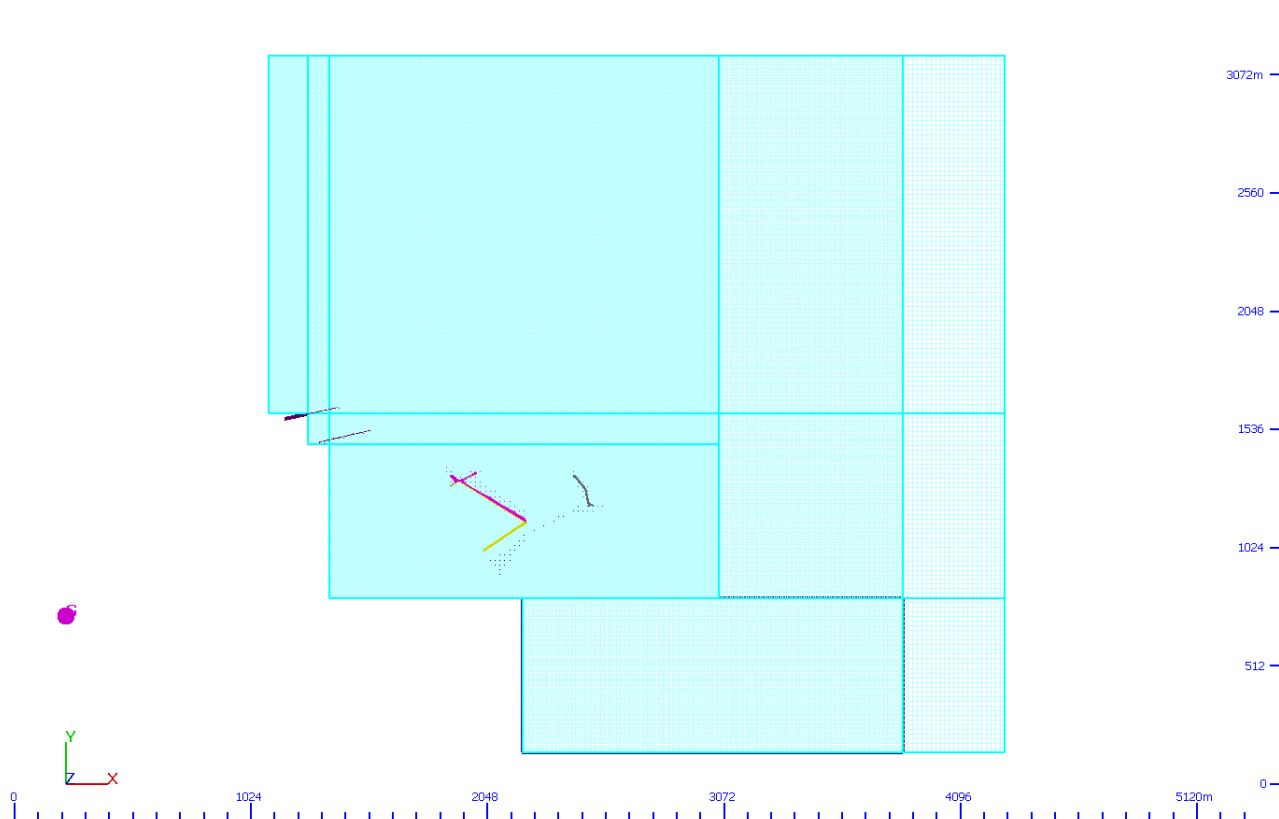


Figura 56: mesh di calcolo per lo scenario 2

La mesh risulta in questo caso notevolmente più estesa rispetto all'area di interesse; questa scelta deriva dalla necessità di allontanare il più possibile le condizioni al contorno dall'area di studio, permettendo la corretta descrizione del regime ondosso ed il corretto sviluppo del campo di moto all'interno del dominio, in particolare nel tratto di mare prospiciente la baia di San Giuliano e l'imboccatura del nuovo avamporporto.

6.3.2 PORTATA MARECCHIA

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	71	di	104	00		23 03 23

La portata del fiume Marecchia è stata assunta pari a $346 \text{ m}^3/\text{s}$, pari alla massima portata giornaliera del periodo 2015-2021 riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna (si veda il par. 4.3) e dello stesso ordine di grandezza delle portate con tempo di ritorno annuale. La portata in ingresso presenta una densità caratteristica di acqua dolce, pari a 998.2 kg/m^3 , a differenza dell'acqua marina presente all'interno del dominio, con densità del fluido pari a 1029 kg/m^3 .

Alla portata del fiume Marecchia è associata una concentrazione solidi sospesi (materiale limo argilloso) pari a 0.3 kg/m^3 ovvero 0.3 g/l (valore medio della concentrazione di trasporto torbido misurata e riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna), rilasciato dopo 500 s dall'inizio della simulazione, al fine di valutare l'effetto del trasporto avvevivo indotto dal campo di moto sui materiali a granulometria fine apportati dal fiume.

6.3.3 MOTO ONDOSO – CONDIZIONI AL CONTORNO

Lo scenario 2 prevede un'onda proveniente dal quadrante NW ($292.5^\circ \div 337.5^\circ$) con tempo di ritorno pari a 1 anni ($H_s = 0.5 \text{ m}$, $T_p = 5 \text{ s}$, come riportato in Tabella 1). L'onda è modellata come onda non lineare e periodica di Stokes, caratterizzata da altezza d'onda, periodo e profondità media del fluido, come riportato nella figura seguente, tratta dalla documentazione tecnica del software.

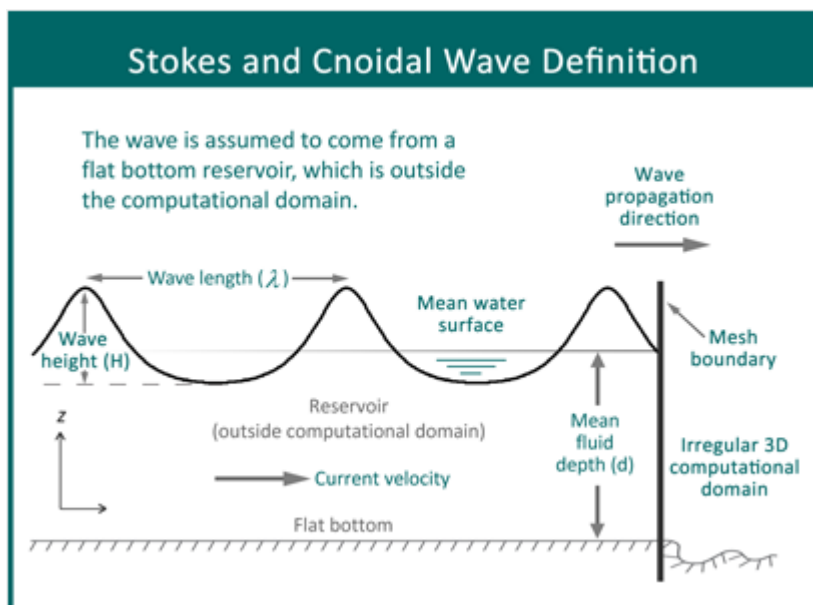


Figura 57: onda non lineare di Stokes

Le condizioni al contorno sono di tipo *Wave* lungo il confine superiore del modello, mentre sono di carico imposto (condizione di tipo *pressure*) pari quota 0 m slm sui rimanenti bordi esterni della

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	72	di	104	00		23 03 23

mesh, fatta eccezione per il fiume Marecchia nel quale la condizione al contorno è del tipo portata in ingresso (condizione di tipo *volume flow rate*).

6.3.4 TEMPO DI SIMULAZIONE

Il tempo di simulazione è pari a 3600 s per tutti gli scenari *ante-* e *post-operam*.

6.3.5 RISULTATI

6.3.5.1 SCENARIO 2B ANTE-OPERAM

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s). Si può notare come il flusso in uscita dal Marecchia, venga intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigersi verso l'imboccatura del porto per poi deviare verso il tratto di mare a sud-est delle strutture portuali, diffondendosi nel tratto di mare prospiciente la spiaggia di Marina Centro, con velocità comunque inferiori allo scenario 2a data la minore altezza d'onda.

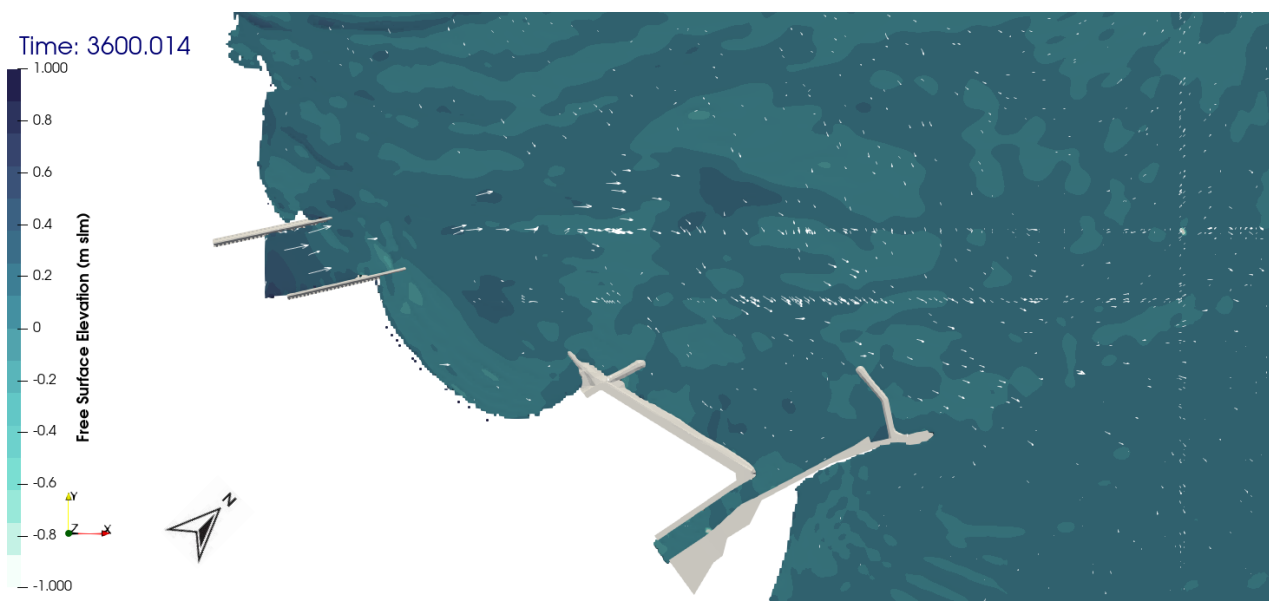


Figura 58: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 2 ante-operam

La Figura 59 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	73	di	104	00		23 03 23

dolce in arrivo dal Marecchia tenda ad essere indirizzata verso la spiaggia di San Giuliano ed il molo di Ponente, giungendo sino a lambire anche la banchina ed il molo di Levante.

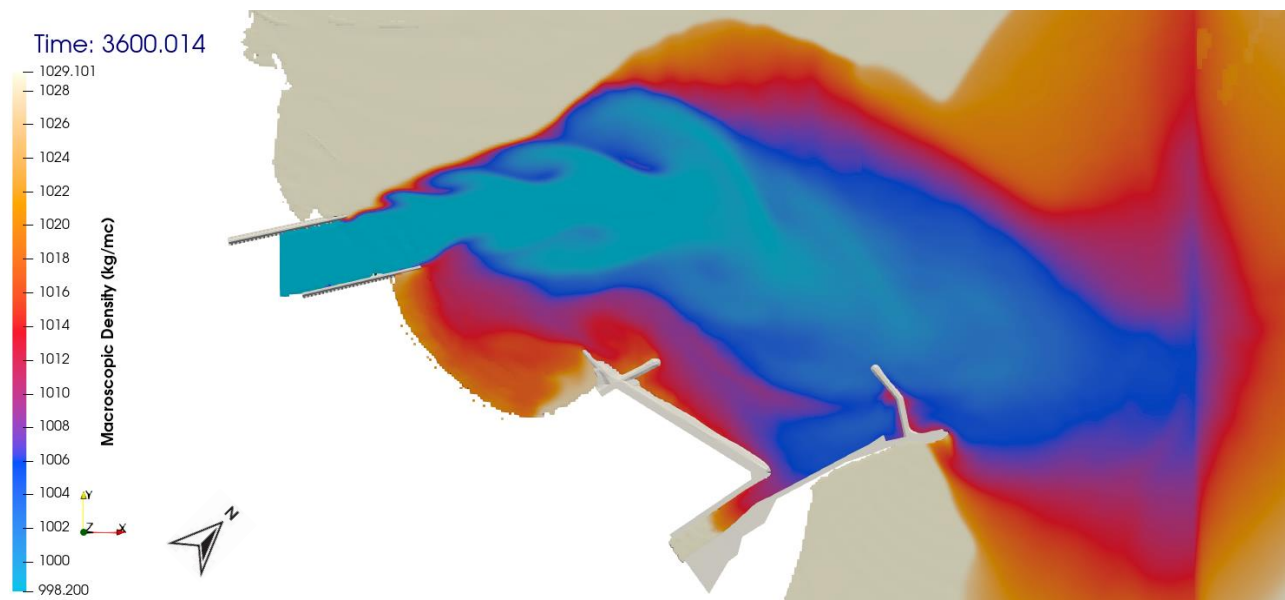


Figura 59: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 2a ante-operam

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in $[\text{g/l}]$ del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a $0.3 [\text{g/l}]$; viene confermato il campo di moto con i fenomeni di trasporto avvevivo e diffusivo. La parte principale del *plume* viene trasportata al largo, interessando anche l'imboccatura del porto e la baia di San Giuliano.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2a ante-operam è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	74	di	104	00			23	03	23

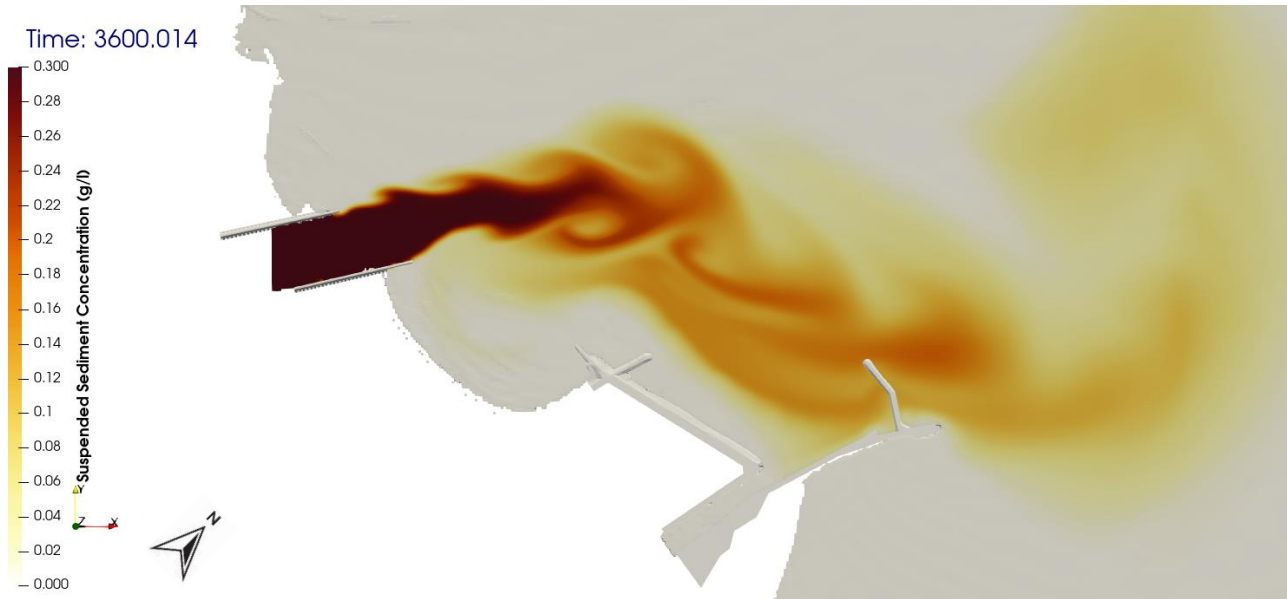


Figura 60: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 2 *ante-operam* (valori in g/L)

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	75	di	104	00		23 03 23

6.3.5.2 SCENARIO 2B *POST-OPERAM* LOTTO 1

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento della scogliera del moto di Levante. Si può notare venga intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigersi verso l'imboccatura del porto per poi deviare verso il tratto di mare a sud-est delle strutture portuali, diffondendosi nel tratto di mare prospiciente la spiaggia di Marina Centro senza apprezzabili differenze rispetto allo scenario 2a *ante-operam* a meno dell'area più a ridosso del nuovo molo.

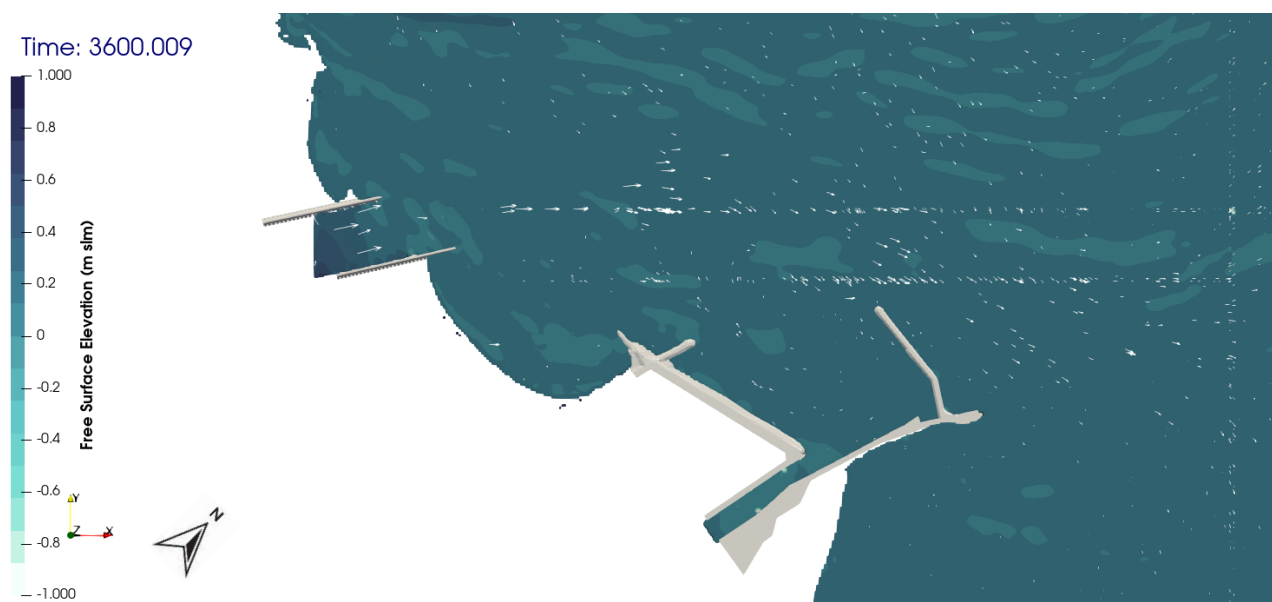


Figura 61: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 2 *post-operam*1

La Figura 62 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a diffondersi su tutto il dominio trasportata dal flusso mescolandosi all'acqua salata presente, interessando anche la baia e l'avamposto, rimanendo più confinata all'interno dell'area portuale rispetto allo scenario *ante-operam*.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	76	di	104	00			23	03	23

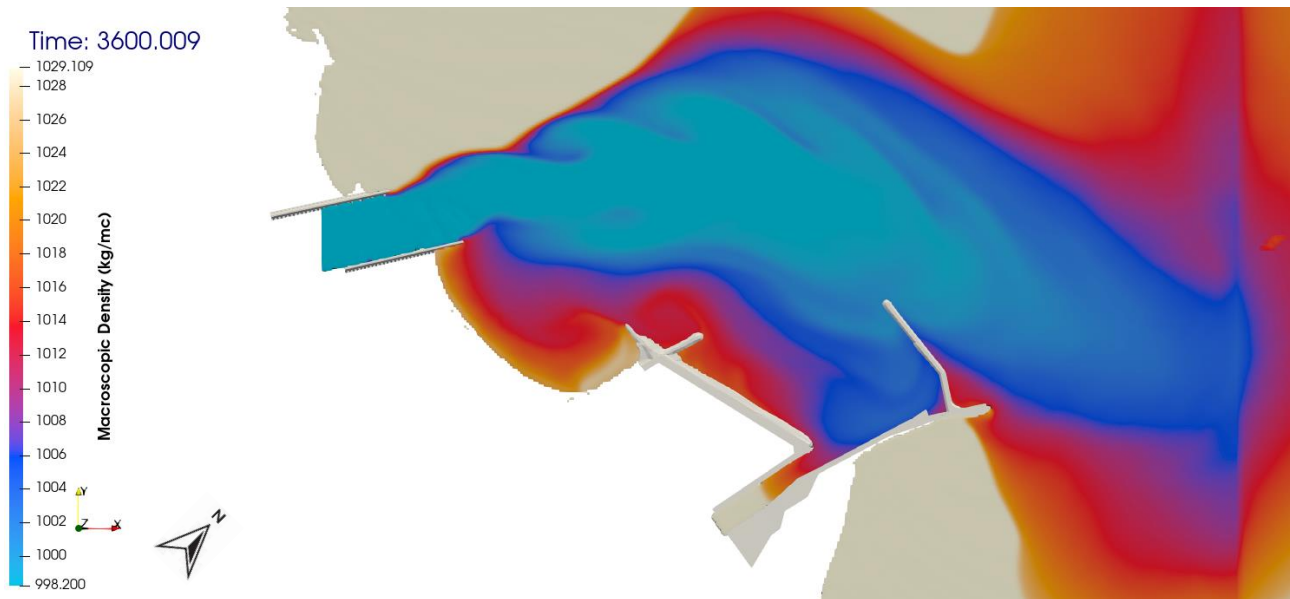


Figura 62: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 2 *post-operam1*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene confermato l'interessamento della spiaggia di San Giuliano e del molo di Ponente, con un rilevante trasporto del materiale sino alle soglie dell'imboccatura del Porto Canale.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2 *post-operam1* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	77	di	104	00		23 03 23

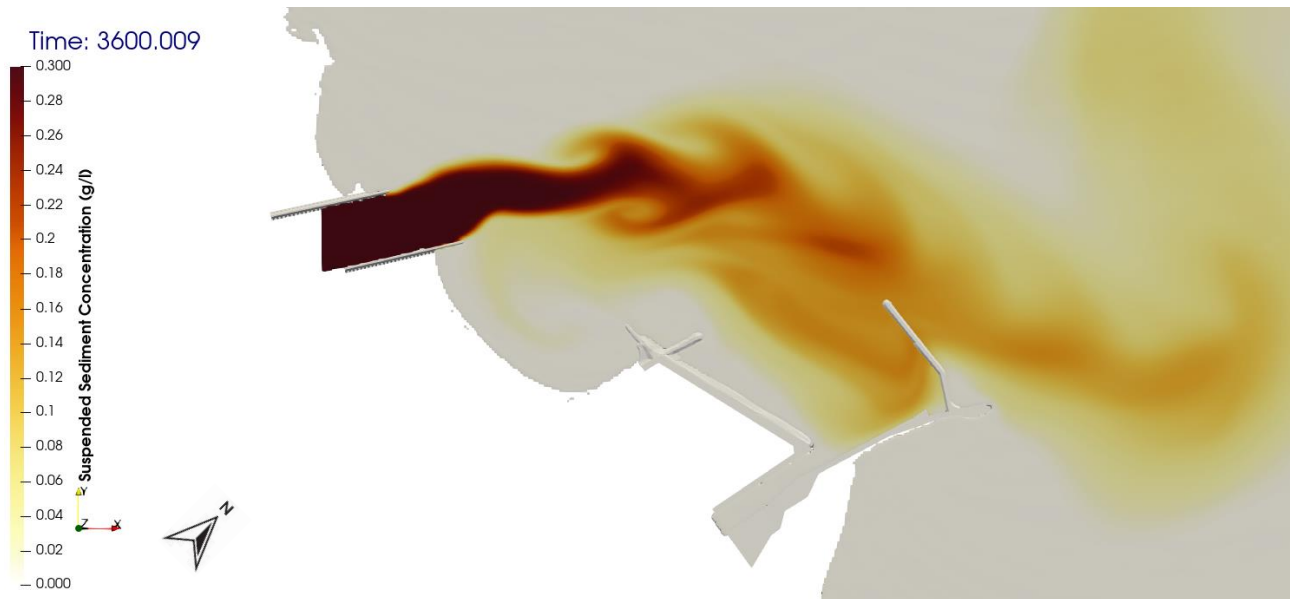


Figura 63: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 2 *post-operam1* (valori in g/l)

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	78	di	104	00		23	03	23

6.3.5.3 SCENARIO 2B *POST-OPERAM* LOTTO 2

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento delle scogliere del molo di Levante e del molo di Ponente. Si può notare come in questo caso i vettori di velocità mostrino una più marcata direzione verso Est, bypassando la struttura portuale e diffondendosi a valle di questa; la presenza del molo di Ponente, in particolare, crea una zona di calma nel tratto antistante la spiaggia di San Giuliano che favorisce il trasporto al largo.

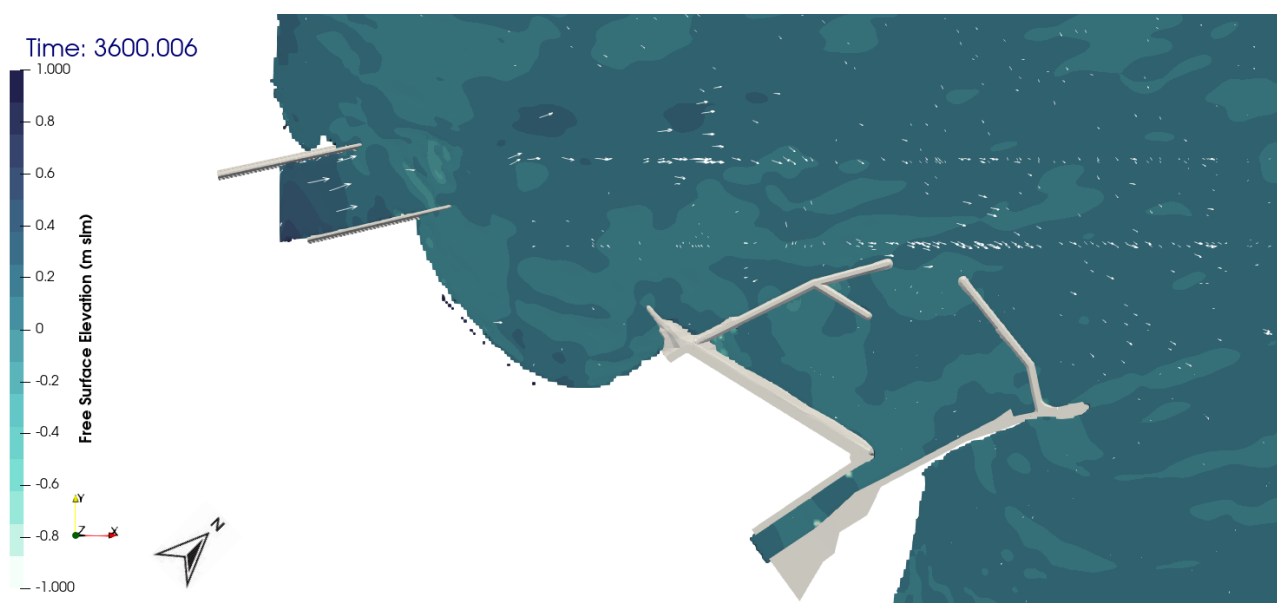


Figura 64: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam2*

La Figura 65 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a dirigersi verso il nuovo molo di Ponente seguendo le strutture e a venir veicolata verso il mare aperto, interessando l'area dell'imboccatura del nuovo avamporito.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	79	di	104	00			23	03	23

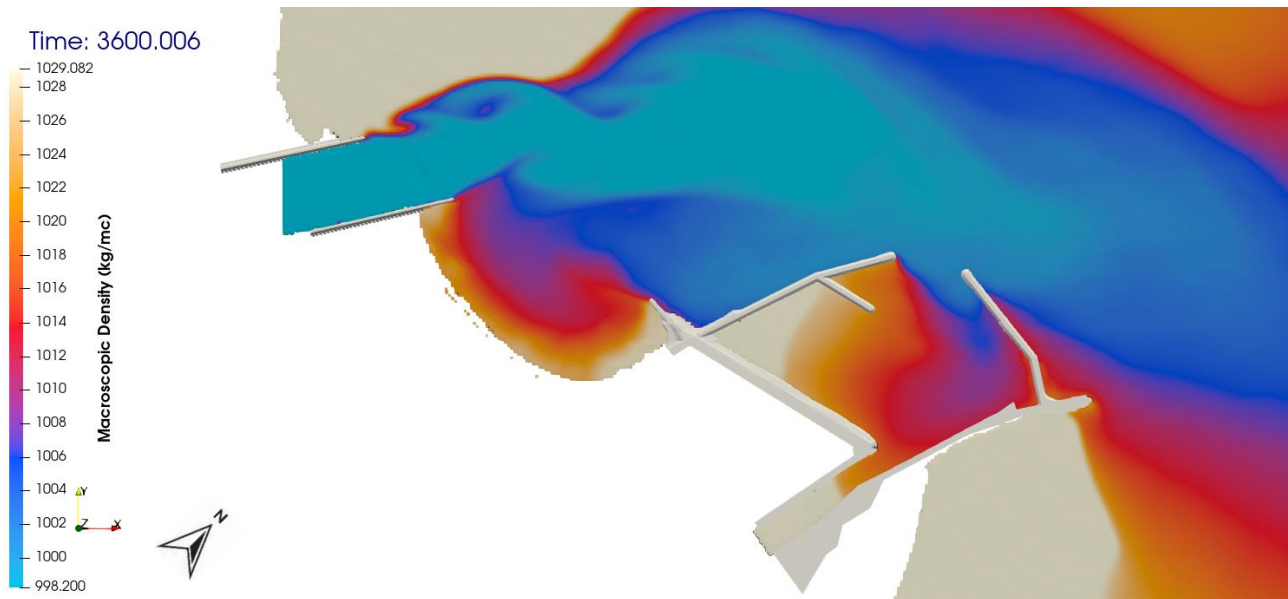


Figura 65: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 2a *post-operam2*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene confermato il trasporto del *plume* in direzione del molo di Ponente e poi al largo, con un ridotto interessamento della spiaggia di San Giuliano.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2 *post-operam2* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	80	di	104	00		23 03 23

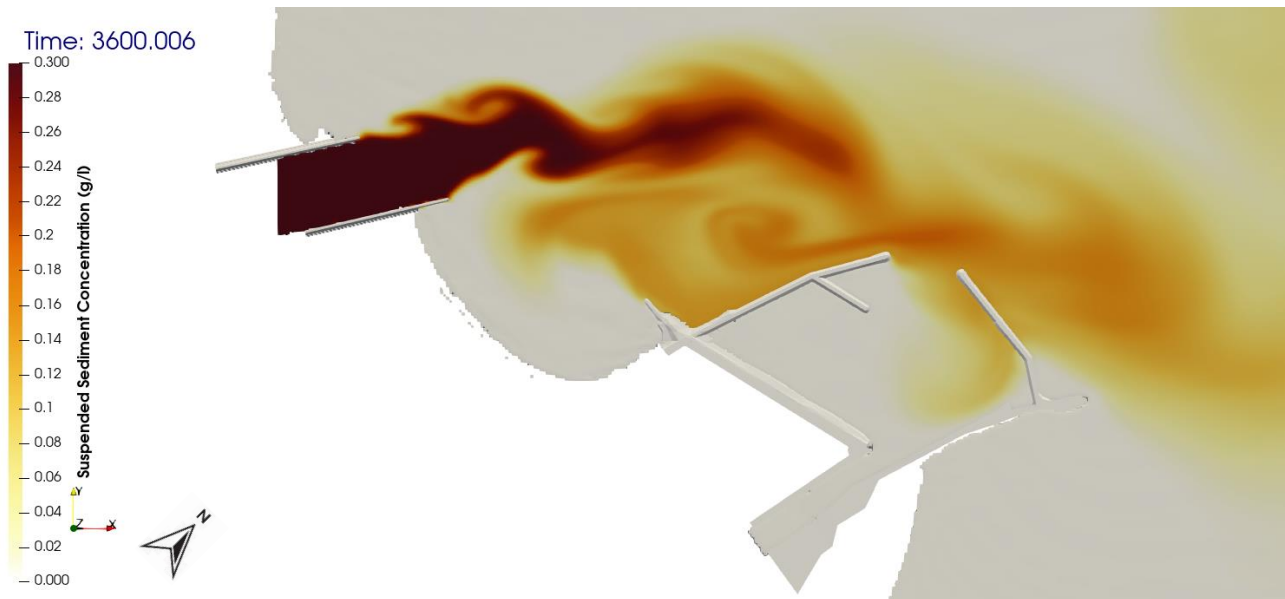


Figura 66: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 2a post-operam2 (valori in g/L)

La tabella seguente riporta la massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo all'interno del dominio, rispettivamente all'imbocco della baia e del porto (si vedano Figura 34 ÷ Figura 36) al termine della simulazione (istante $t=3600$ sec) nei tre scenari simulati.

Scenario	Sedimenti in Sospensione [kg]	
	Sezione San Giuliano	Sezione porto
sc1_Ante	350.29	17433.86
sc1_post1	488.04	24521.70
sc1_post2	606.21	6693.04

Tabella 8: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo

I grafici seguenti riportano l'andamento nel tempo della massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo per gli scenari simulati.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	81	di	104	00		23 03 23

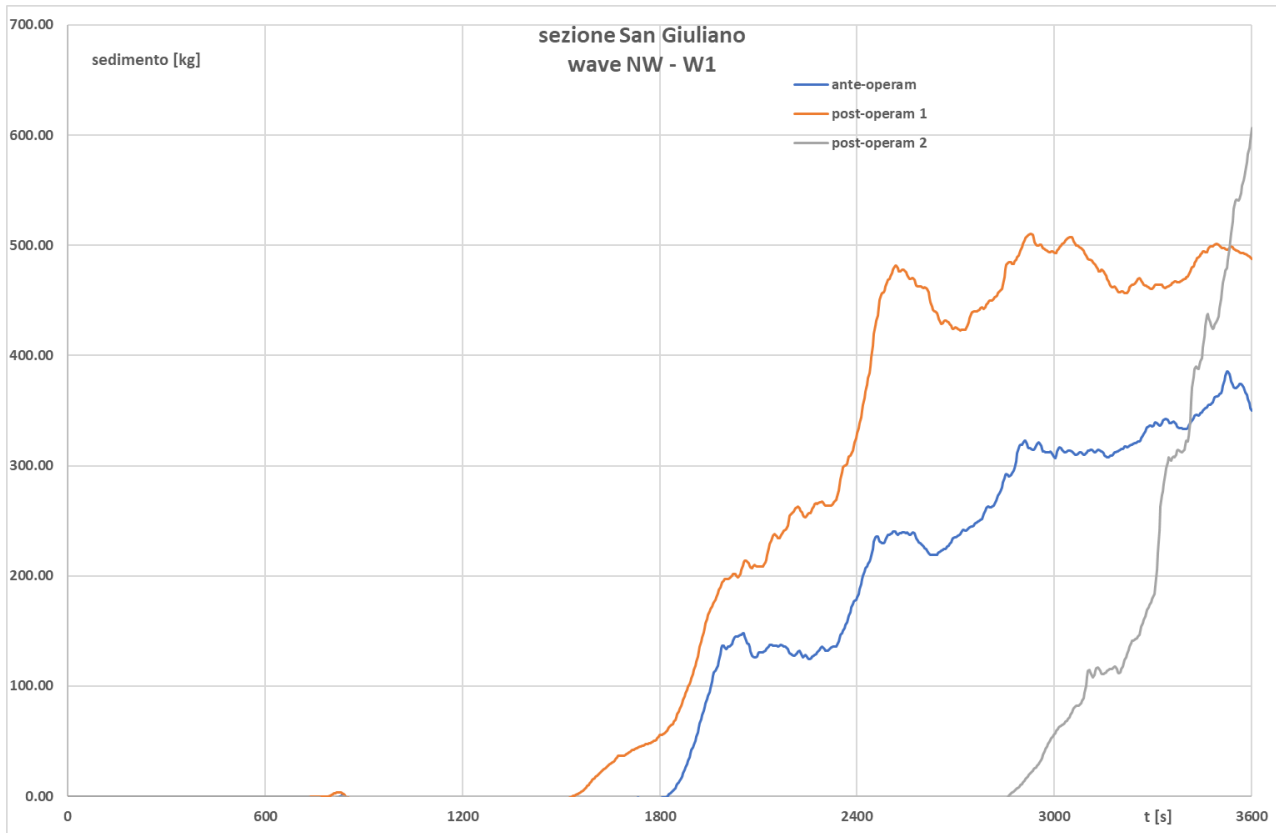


Figura 67: massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo della baia di San Giuliano nello scenario 2b

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	82	di	104	00		23	03	23

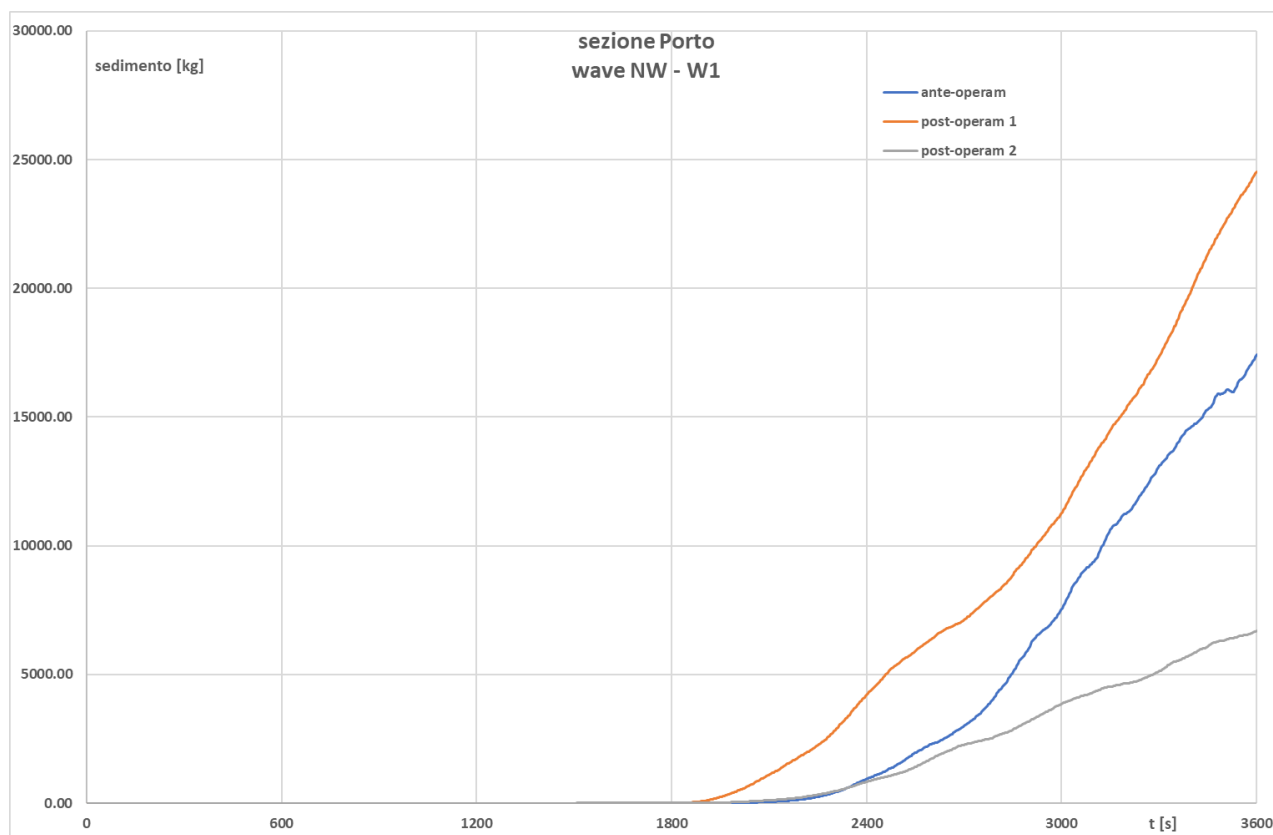


Figura 68: massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo del porto nello scenario 2b

Per quanto riguarda la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si assiste ad un moderato aumento dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre scenario *post-operam lotto1* presenta il valore massimo, anche più alto dello scenario *ante-operam*.

Le condizioni di onda da NW con altezza d'onda inferiore o uguale a 0.5m, simulate nello scenario 2b, sono relative a circa l'1.07% dei dati ondametrici rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo aprile 2012 – ottobre 2018 (si veda la Tabella 3).

Per avere infine una valutazione qualitativa sulle modifiche alle tendenze dei *pattern* di erosione o deposito all'interno della baia di San Giuliano, si può calcolare l'integrale nel tempo degli sforzi

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	83	di	104	00			23	03	23

tangenziali in ogni cella del dominio (*total shear load*) e mappare le differenze negli scenari *post-operam lotto1* e *post-operam lotto2* rispetto allo scenario *ante-operam*.

Le mappe seguenti sono qualitative, infatti sono riferite all'orizzonte di simulazione (3600 s) ma restituiscono una utile valutazione su come si modificano le zone di potenziale erosione o potenziale deposito a seguito della realizzazione dei diversi lotti del progetto.

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 1* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).



Figura 69: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 1*

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 2* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	84	di	104	00		23 03 23



Figura 70: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 2*

Come si può vedere, non si evidenziano modifiche apprezzabili nei *pattern* di erosione o deposito all'interno della baia.

6.4 SCENARIO 3 – CONDIZIONI DI ONDA DA NORD

6.4.1 MESHING

La mesh di calcolo per lo scenario 3 in condizioni *ante-operam* è una mesh a base quadrata, di dimensioni planimetriche 5m x 5m e discretizzazione verticale variabile da 1 a 0.5 m; il numero complessivo di celle è pari a 1105920.

In Figura 71 è riportata una vista planimetrica della mesh di calcolo.

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	85	di	104	00		23	03	23

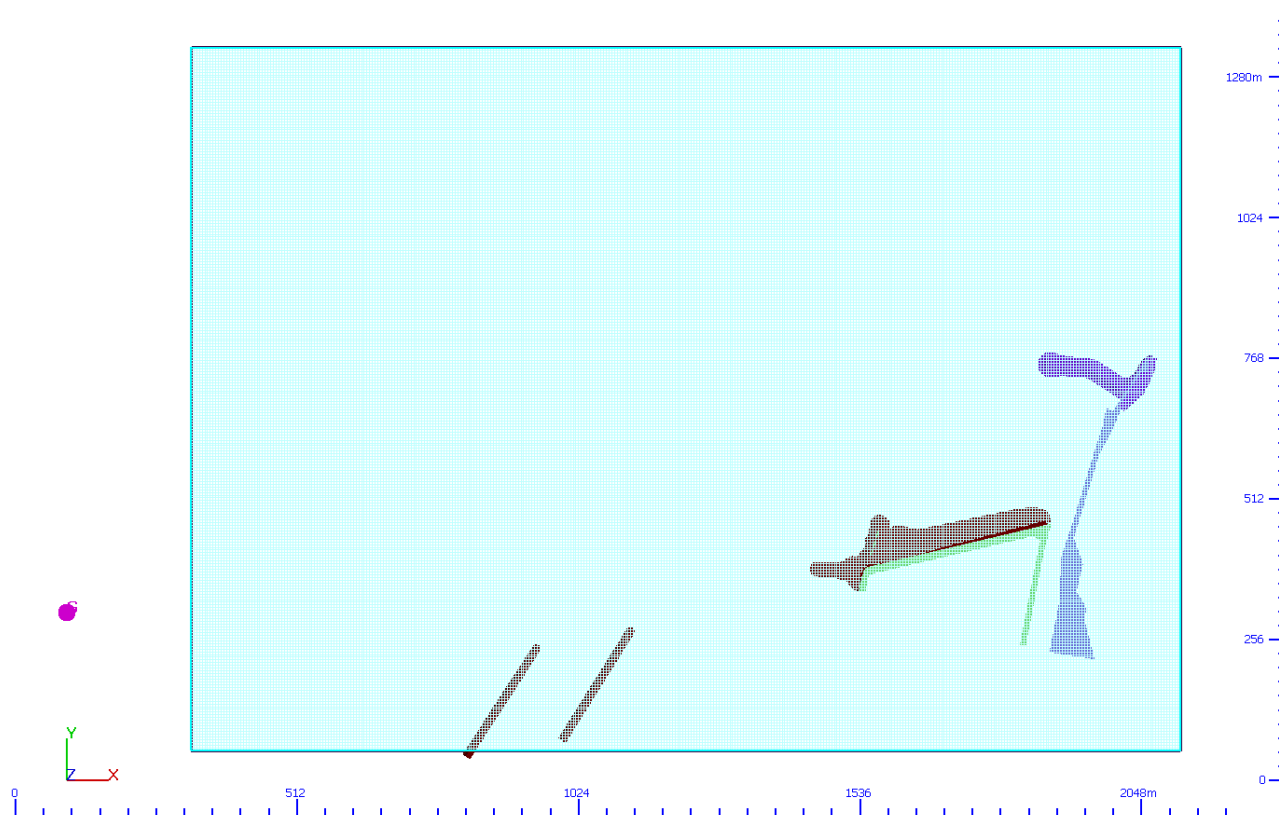


Figura 71: mesh di calcolo per lo scenario 3

6.4.2 PORTATA MARECCHIA

La portata del fiume Marecchia è stata assunta pari a $200 \text{ m}^3/\text{s}$, valore indicativo della media dei massimi giornalieri del periodo 2015-2021 riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna (si veda il par. 4.3) e dello stesso ordine di grandezza delle portate con tempo di ritorno annuale. La portata in ingresso presenta una densità caratteristica di acqua dolce, pari a 998.2 kg/m^3 , a differenza dell'acqua marina presente all'interno del dominio, con densità del fluido pari a 1029 kg/m^3 .

Alla portata del fiume Marecchia è associata una concentrazione solidi sospesi (materiale limo argilloso) pari a 0.3 kg/m^3 ovvero 0.3 g/l (valore medio della concentrazione di trasporto torbido misurata e riportata negli annali idrologici della regione Emilia-Romagna), rilasciato dopo 500 s dall'inizio della simulazione, al fine di valutare l'effetto del trasporto avvevivo indotto dal campo di moto sui materiali a granulometria fine apportati dal fiume.

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	86	di	104	00		23 03 23

6.4.3 MOTO ONDOSO – CONDIZIONI AL CONTORNO

Lo scenario 3 prevede un'onda proveniente dal quadrante N ($-22.5^\circ \div 22.5^\circ$) con tempo di ritorno pari a 5 anni ($H_s = 1.5$ m, $T_p = 10.4$ s, come riportato in Tabella 2). L'onda è modellata come onda non lineare e periodica di Stokes, caratterizzata da altezza d'onda, periodo e profondità media del fluido, come riportato nella figura seguente, tratta dalla documentazione tecnica del software.

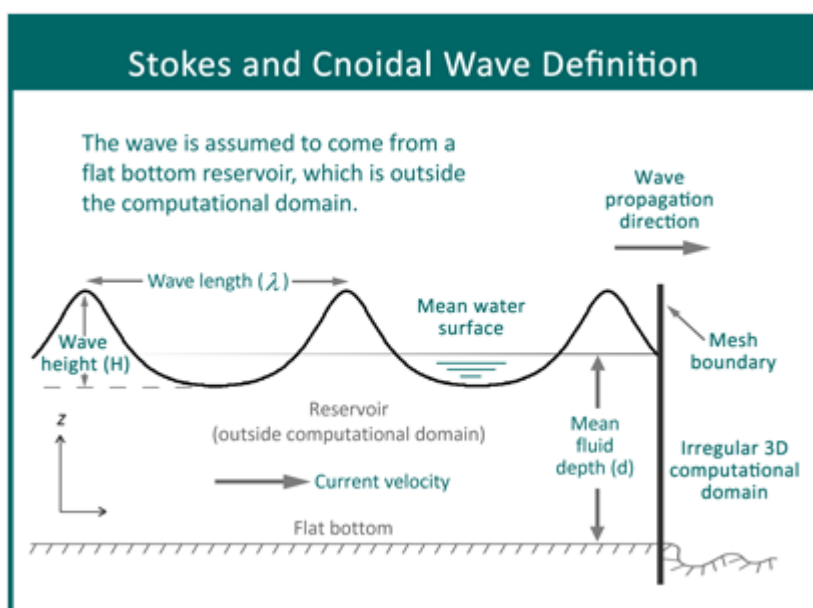


Figura 72: onda non lineare di Stokes

Le condizioni al contorno sono di tipo *Wave* lungo il confine superiore del modello, mentre sono di carico imposto (condizione di tipo *pressure*) pari quota 0 m slm sui rimanenti bordi esterni della mesh, fatta eccezione per il fiume Marecchia nel quale la condizione al contorno è del tipo portata in ingresso (condizione di tipo *volume flow rate*).

6.4.4 TEMPO DI SIMULAZIONE

Il tempo di simulazione è pari a 3600 s.

6.4.5 RISULTATI

6.4.5.1 SCENARIO 3 ANTE-OPERAM

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s). Si può notare come il flusso in uscita dal Marecchia, venga

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	87	di	104	00			23	03	23

intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigerlo verso la costa, in particolare verso la baia di San Giuliano e l'imboccatura del porto.

Time: 3600.007

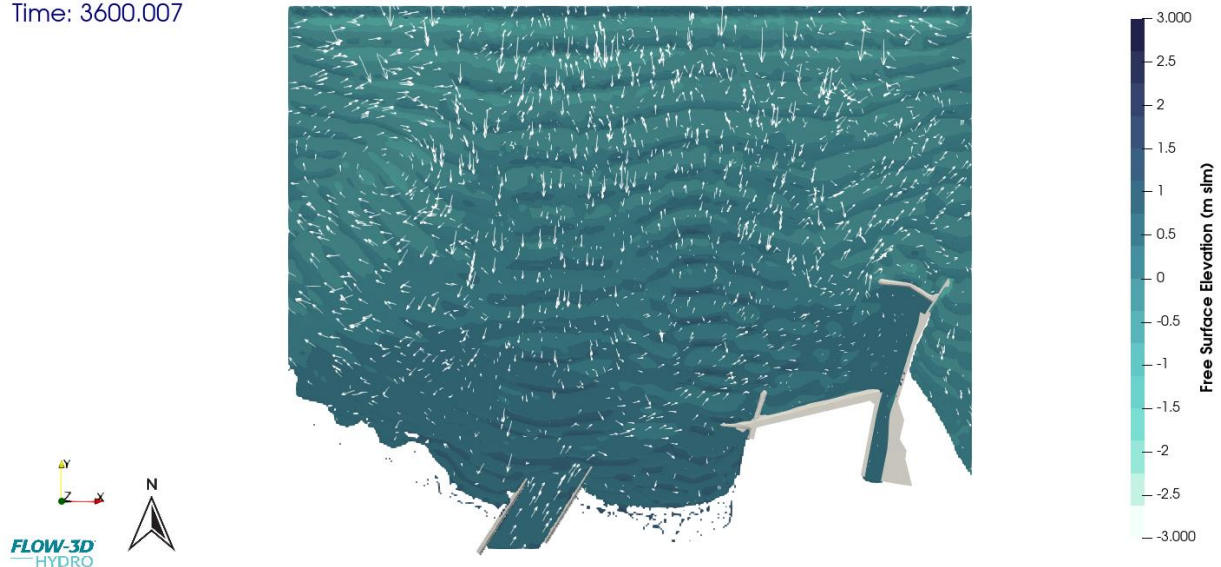


Figura 73: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 3 ante-operam

La Figura 74 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda ad essere indirizzata verso la spiaggia di San Giuliano ed il molo di Ponente, giungendo sino a lambire anche la banchina ed il molo di Levante; sono presenti limitati fenomeni di dispersione del liquido a minor densità verso nord, per effetto del moto ondoso, che comunque non influenzano i risultati nell'area di maggior interesse (avamporlo e baia di san Giuliano).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	88	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.007

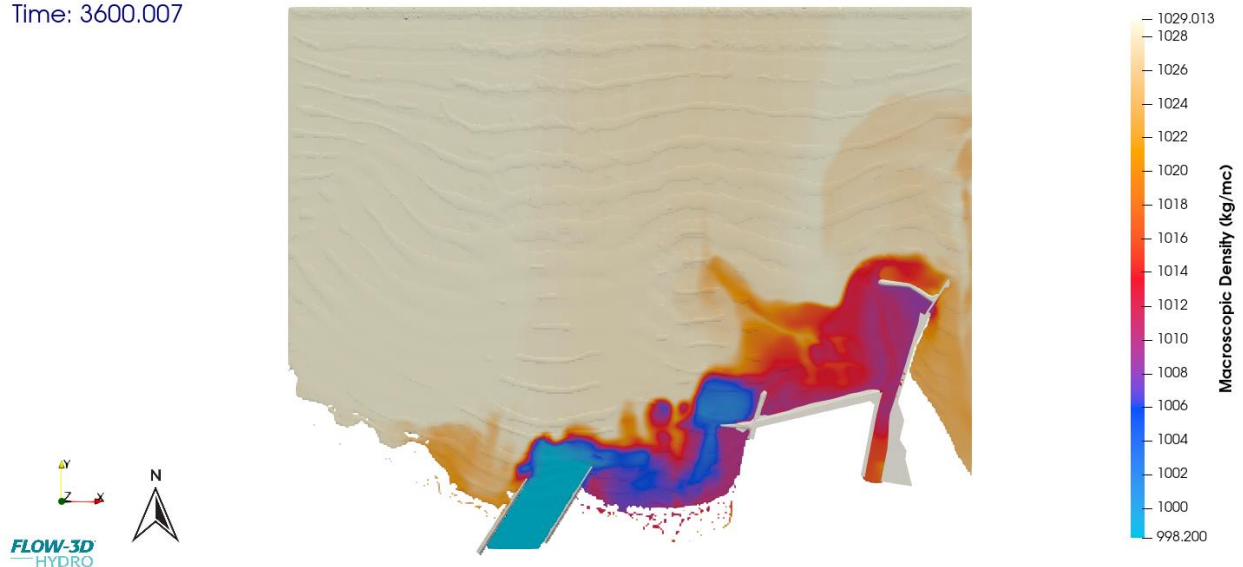


Figura 74: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 3 *ante-operam*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in $[\text{g/l}]$ del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a $0.3 [\text{g/l}]$; viene confermato il campo di moto con i fenomeni di trasporto avettivo e diffusivo. Il *plume* viene trasportato verso la costa, interessando in modo rilevante la baia di San Giuliano e tutta l'area portuale.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 3 *ante-operam* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	89	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.007

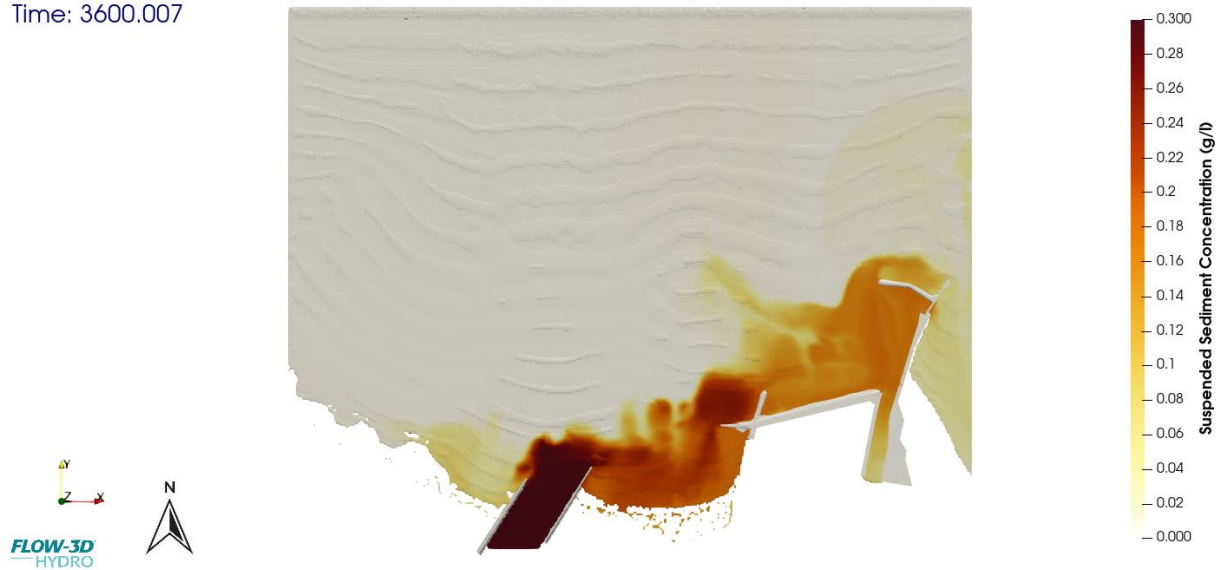


Figura 75: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 3 *ante-operam* (valori in g/l)

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	90	di	104	00			23	03	23

6.4.5.2 SCENARIO 3 *POST-OPERAM* LOTTO 1

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento della scogliera del moto di Levante. Si può notare anche in questo caso come il flusso in uscita dal Marecchia, venga intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigerlo verso la costa, in particolare verso la baia di San Giuliano e l'imboccatura del porto, senza apprezzabili differenze rispetto allo scenario 3 *ante-operam*.

Time: 3600.059

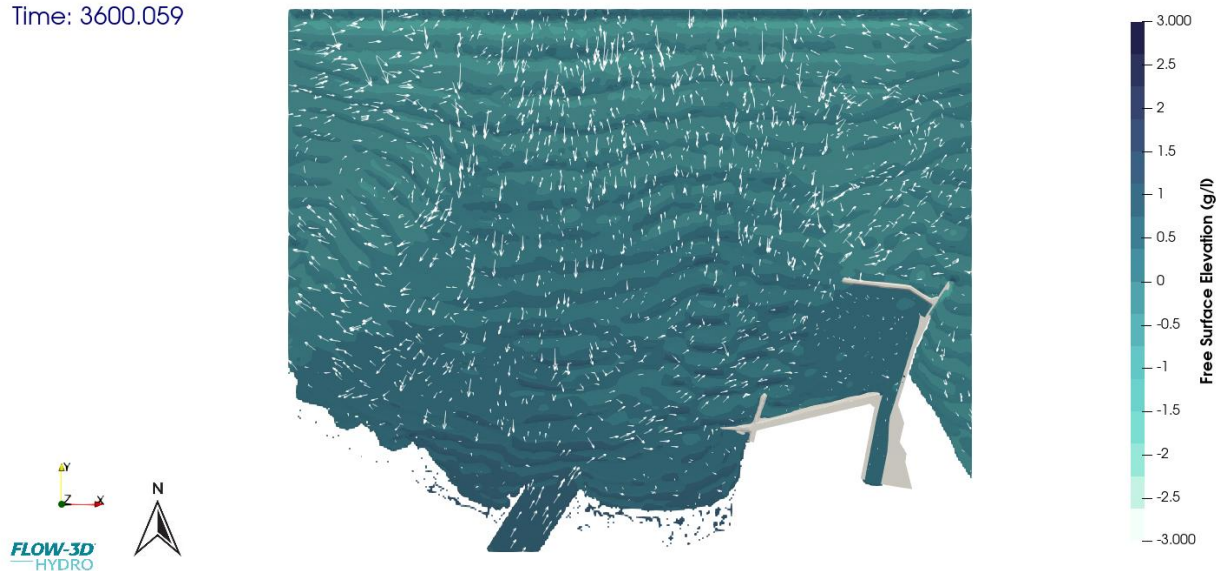


Figura 76: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 3 *post-operam1*

La Figura 77 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda ad essere indirizzata verso la spiaggia di San Giuliano ed il molo di Ponente, giungendo sino a lambire anche la banchina ed il molo di Levante e rimanendo più confinata all'interno del porto a causa del prolungamento del molo; sono presenti limitati fenomeni di dispersione del liquido a minor densità verso nord, per effetto del moto ondoso, che comunque non influenzano i risultati nell'area di maggior interesse (avamporporto e baia di san Giuliano).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	91	di	104	00		07 03 23

Time: 3600.059

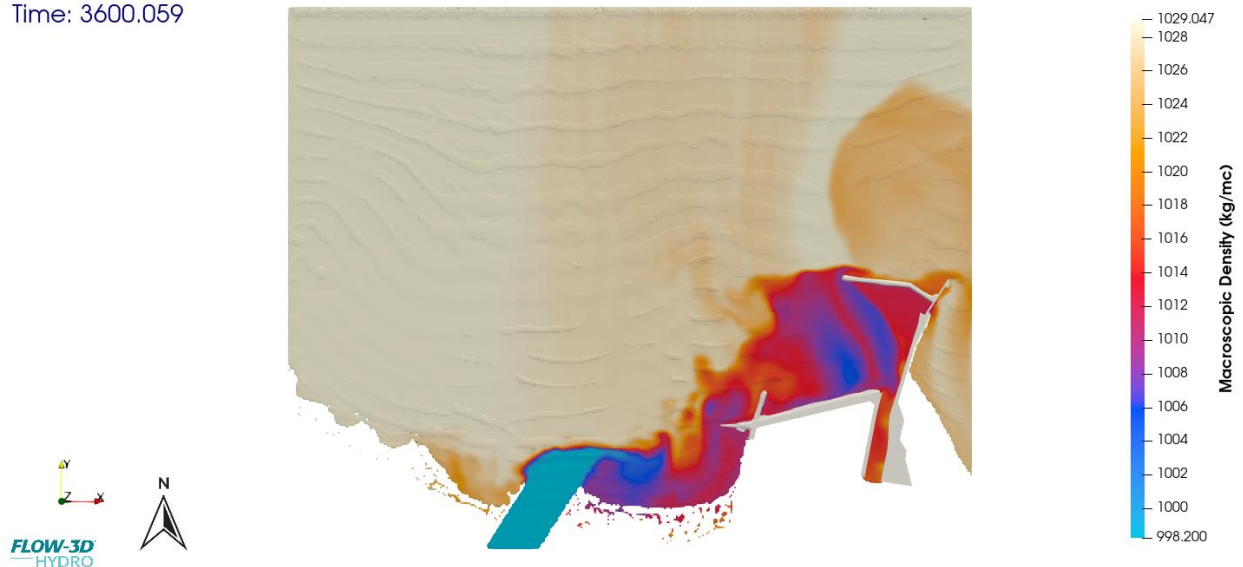


Figura 77: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 3 *post-operam1*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in [g/l] del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a 0.3 [g/l]; viene confermato l'interessamento della spiaggia di San Giuliano e del molo di Ponente, con un rilevante trasporto del materiale sino alle soglie dell'imboccatura del Porto Canale.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 3 *post-operam1* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	92	di	104	00			07	03	23

Time: 3600.059

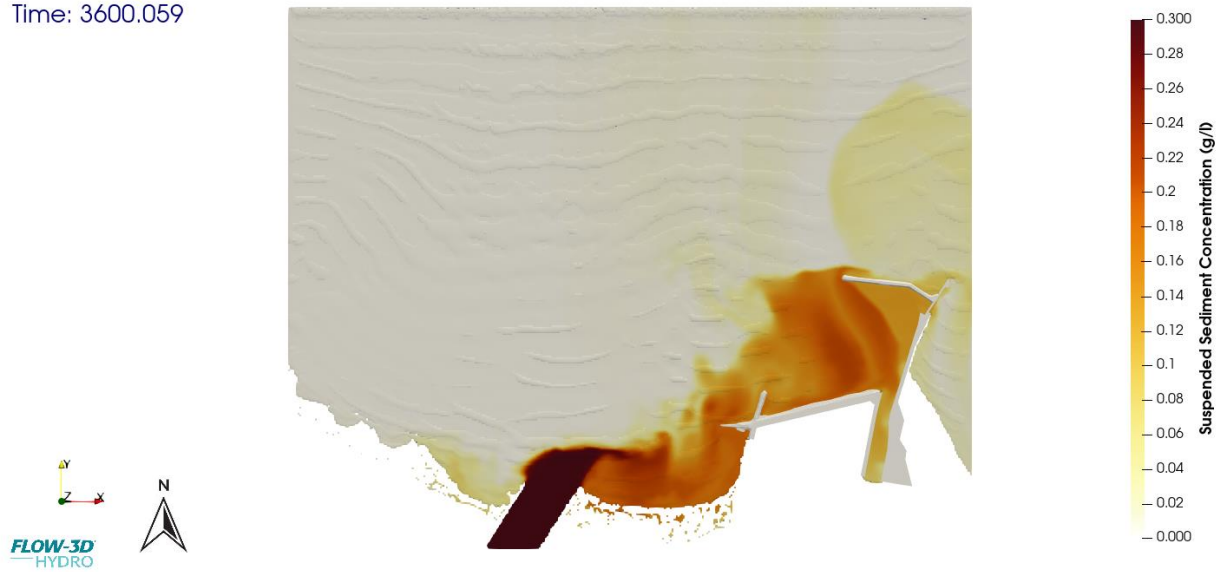


Figura 78: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 3 *post-operam1* (valori in g/L)

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	93	di	104	00			07	03	23

6.4.5.3 SCENARIO 3 *POST-OPERAM* LOTTO 2

La figura seguente riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione dei vettori di velocità al termine della simulazione (3600s) nello scenario con il prolungamento delle scogliere del molo di Levante e del molo di Ponente. Si può notare anche in questo caso come il flusso in uscita dal Marecchia, venga intercettato dal campo di moto indotto dalle onde che tendono a dirigerlo verso la costa, in particolare verso la baia di San Giuliano e l'imboccatura del porto, per poi venire diretto verso il mare aperto seguendo la struttura del molo di ponente.

Time: 3600.014

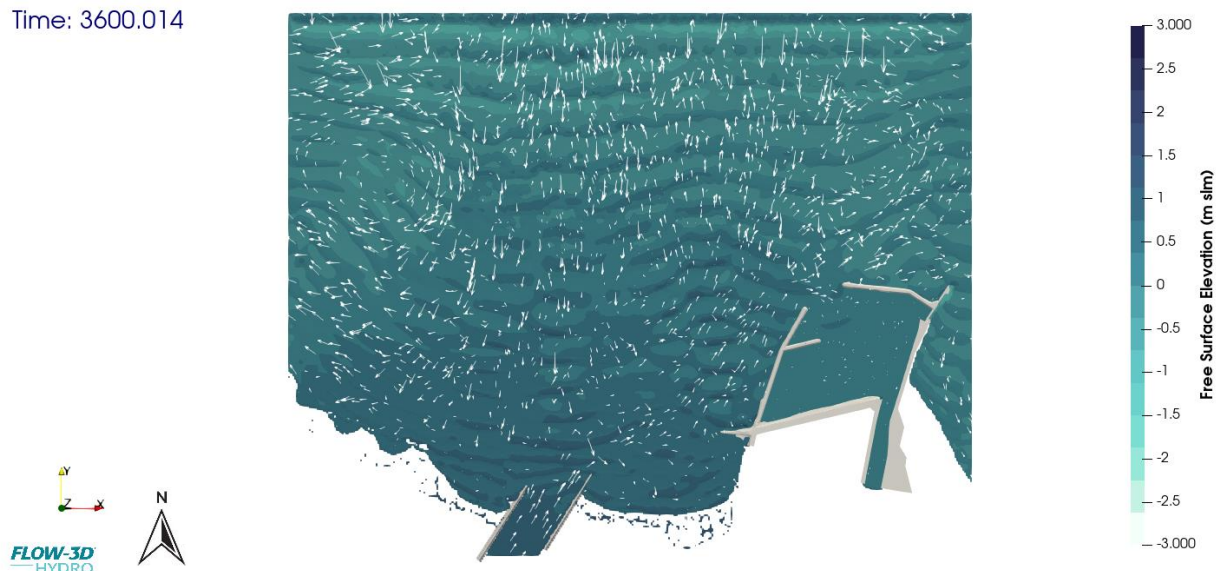


Figura 79: vettori di velocità a termine simulazione per lo scenario 3 *post-operam2*

La Figura 80 riporta, per il dettaglio dell'area di studio, la distribuzione superficiale (sulla superficie del pelo libero) della densità del fluido al termine della simulazione (3600s). Si vede come l'acqua dolce in arrivo dal Marecchia tenda a dirigersi verso il nuovo molo di Ponente seguendo le strutture e a venir veicolata verso il mare aperto, interessando l'area dell'imboccatura del nuovo avamporNO. sono presenti limitati fenomeni di dispersione del liquido a minor densità verso nord, per effetto del moto ondoso, che comunque non influenzano i risultati nell'area di maggior interesse (avamporNO e baia di san Giuliano).

° Documento:	Foglio			Rev.:		
Relazione Tecnica	94	di	104	00		23 03 23

Time: 3600.014

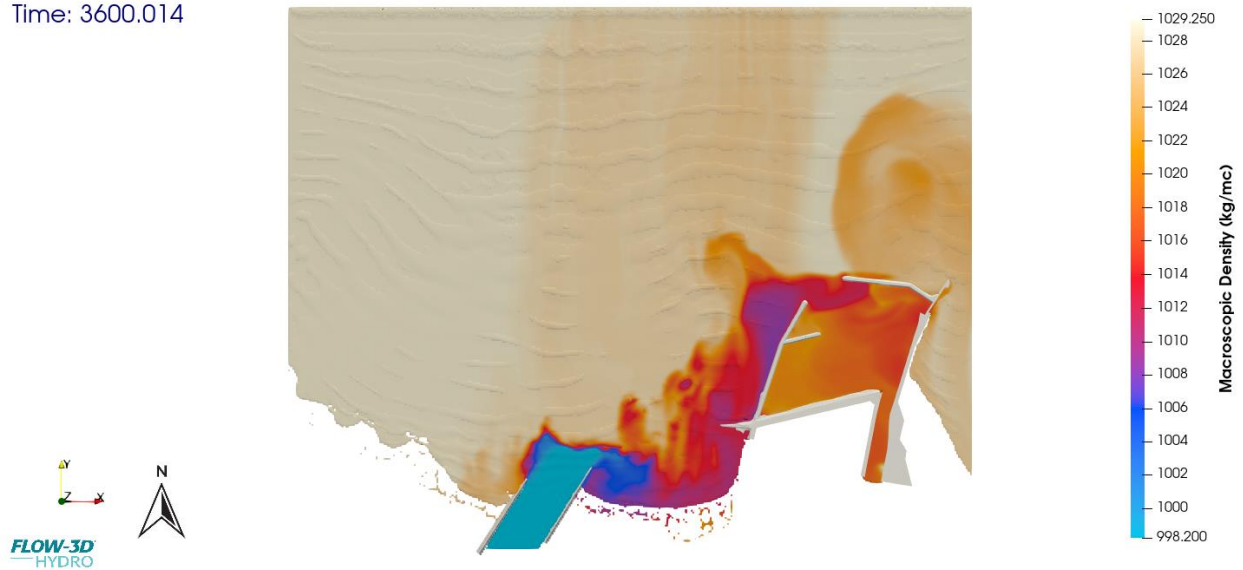


Figura 80: densità del fluido (kg/m^3) a termine simulazione per lo scenario 3 *post-operam2*

La figura seguente mostra, per il dettaglio dell'area di studio, l'andamento della concentrazione in $[\text{g/l}]$ del materiale limo-argilloso in sospensione al termine della simulazione (3600s), ipotizzando una concentrazione in ingresso pari a $0.3 [\text{g/l}]$; viene confermato il trasporto del *plume* in direzione del molo di Ponente e poi al largo, con un ridotto interessamento della spiaggia di San Giuliano.

Un breve video relativo all'andamento del moto ondoso ed alla diffusione del sedimento nello scenario 2 *post-operam2* è disponibile al seguente [link](#).

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	95	di	104	00			23	03	23

Time: 3600.014

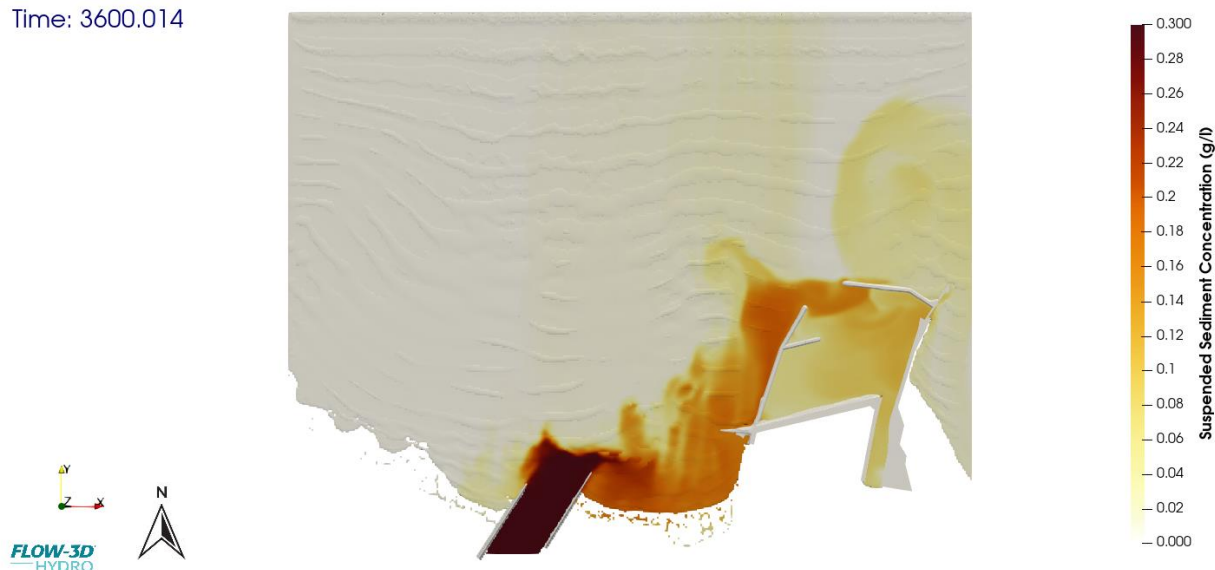


Figura 81: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione per lo scenario 3 *post-operam2* (valori in g/l)

La tabella seguente riporta la massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo all'interno del dominio, rispettivamente all'imbocco della baia e del porto (si vedano Figura 34 ÷ Figura 36) al termine della simulazione (istante $t=3600$ sec) nei tre scenari simulati.

scenario	Sedimenti in Sospensione [kg]	
	Sezione San Giuliano	Sezione porto
Sc3_Ante	37494.17	48007.90
Sc3_post1	36533.26	49716.25
Sc3_post2	35147.76	16011.99

Tabella 9: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo

I grafici seguenti riportano l'andamento nel tempo della massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo per gli scenari simulati.

° Documento:	Foglio				Rev.:				
Relazione Tecnica	96	di	104	00			23	03	23

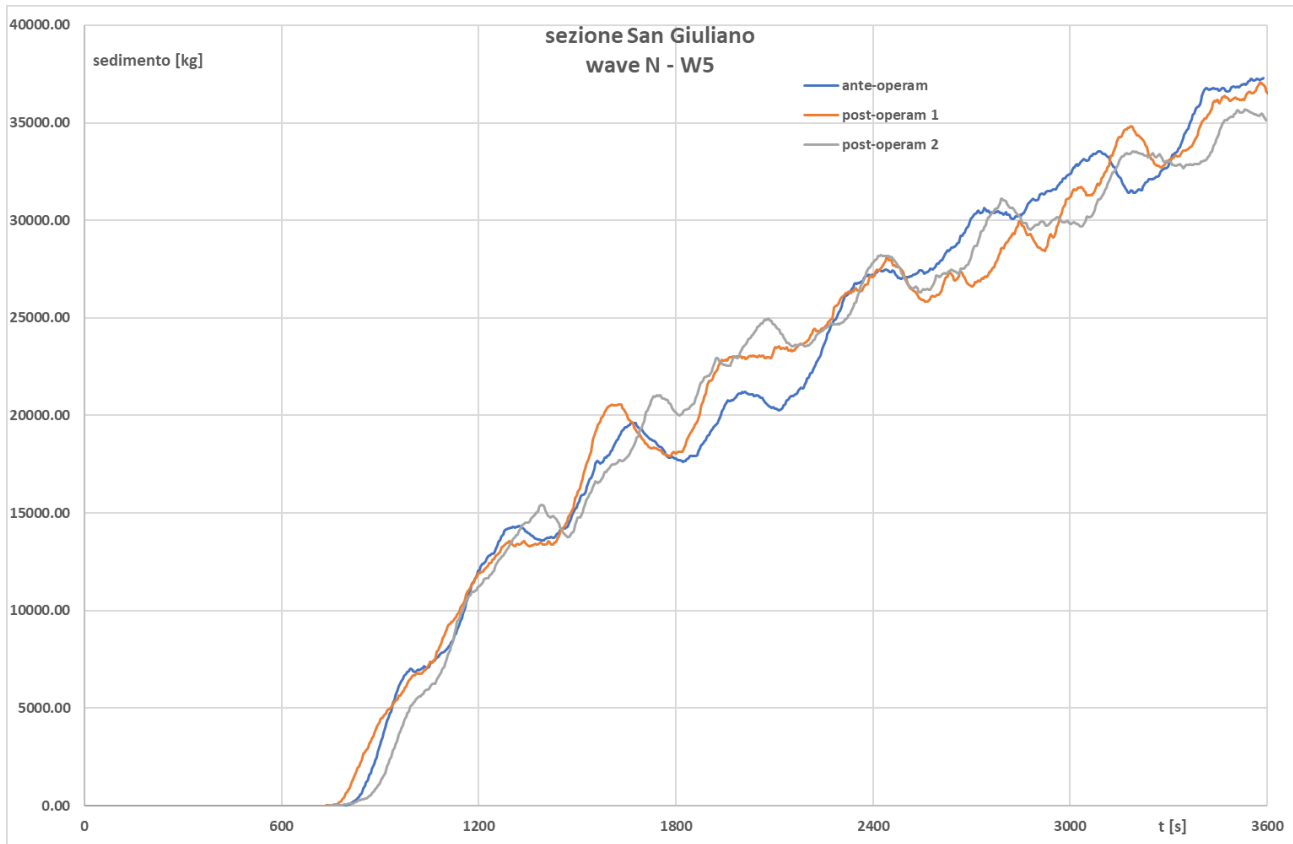


Figura 82: massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo della baia di San Giuliano nello scenario 3

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	97	di	104	00		23	03	23

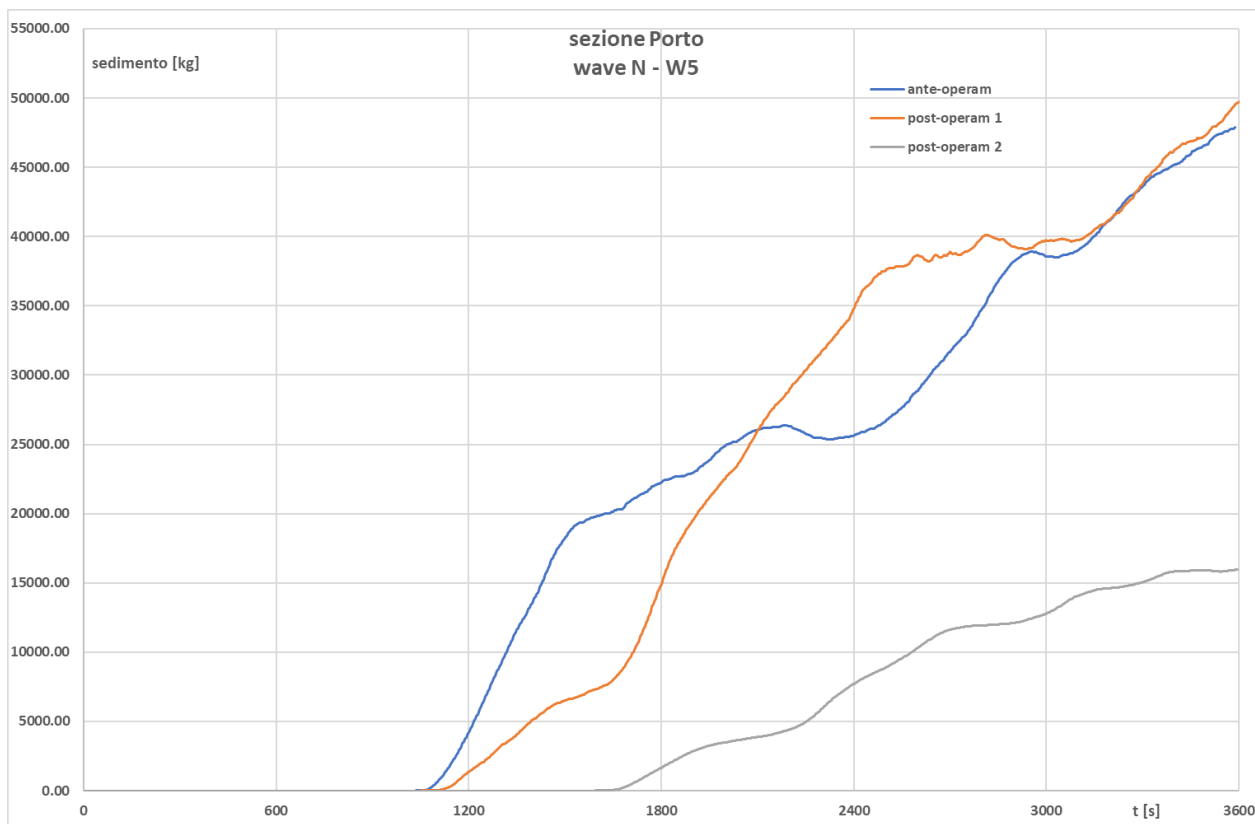


Figura 83: massa complessiva di sedimento in sospensione in ingresso alla sezione di controllo del porto nello scenario 3

Per quanto riguarda la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si non si assiste ad una significativa variazione dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre gli scenari *ante-operam* e *post-operam lotto1* presentano valori analoghi di apporto.

Le condizioni di onda da N, simulate nello scenario 3, sono relative a circa il 3.15% dei dati ondometrici rilevati dalla boa Nausicaa nel periodo aprile 2012 – ottobre 2018 (si veda la Tabella 3).

Per avere infine una valutazione qualitativa sulle modifiche alle tendenze dei *pattern* di erosione o deposito all'interno della baia di San Giuliano, si può calcolare l'integrale nel tempo degli sforzi tangenziali in ogni cella del dominio (total shear load) e mappare le differenze negli scenari *post-operam lotto1* e *post-operam lotto2* rispetto allo scenario *ante-operam*.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	98	di	104	00			23	03	23

Le mappe seguenti sono qualitative, infatti sono riferite all'orizzonte di simulazione (3600 s) ma restituiscono una utile valutazione su come si modificano le zone di potenziale erosione o potenziale deposito a seguito della realizzazione dei diversi lotti del progetto.

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 1* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).



Figura 84: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 1*

La mappa seguente riporta la differenza fra lo scenario *post-operam lotto 2* e lo scenario *ante-operam* per quanto riguarda lo sforzo tangenziale complessivo su tutto l'orizzonte di simulazione (*total shear load*).

° Documento:	Foglio				Rev.:			
Relazione Tecnica	99	di	104	00		23	03	23



Figura 85: locali modifiche ai *pattern* di erosione o deposito nello scenario *post-operam lotto 2*

Come si può vedere, nello scenario *post-operam lotto 2* si evidenzia una tendenza al deposito nella parte occidentale della baia mentre nello scenario *post-operam lotto 1* si evidenzia una tendenza alla redistribuzione del materiale.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	100	di	104	00			23	03	23



7 CONCLUSIONI

Il presente studio ha riguardato lo sviluppo di un modello idrodinamico costiero per il tratto di costa compreso fra la foce del Marecchia ed il nuovo avamposto di Rimini in progetto, in grado di simulare le condizioni del moto ondoso e l'andamento spazio-temporale delle concentrazioni di solidi in sospensione apportati dal sistema fluviale del Fiume Marecchia.

In particolare, le simulazioni modellistiche sono state condotte nelle condizioni *ante-operam* e in due distinti scenari *post-operam*, sulla base della realizzazione dei diversi lotti previsti per la realizzazione del nuovo avamposto.

Sono stati simulati quattro scenari, relativi rispettivamente a condizioni di calma (Scenario 1, frequenza annua 31%), condizioni di onda da NW (Scenario 2a, frequenza annua 0.12% e scenario 2b, frequenza annua 1.07%) e condizioni di onda da N (Scenario 3, frequenza annua 3.15%). Per ogni scenario è stato simulato l'apporto di una portata rappresentativa dal fiume Marecchia di acqua dolce, caratterizzata cioè da una densità inferiore rispetto all'acqua marina, con un tracciante al fine di identificare le condizioni di trasporto associate all'idrodinamica in prossimità della costa.

Sulla base dei risultati delle simulazioni è stato possibile stimare il valore della massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo (baia di San Giuliano e ingresso del porto) al termine della simulazione.

In particolare, in condizioni di calma (scenario 1), per la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si assiste ad una diminuzione dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre scenario *post-operam lotto1* presenta il valore massimo, anche più alto dello scenario *ante-operam*. Per quanto riguarda i *pattern* di erosione o deposito, non si evidenziano modifiche apprezzabili all'interno della baia.

Nello scenario con onda da NordOvest con tempo di ritorno 5 anni (scenario 2a), per quanto riguarda la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si assiste ad un moderato aumento dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre lo scenario *post-operam lotto1* presenta il valore massimo, anche più alto dello scenario *ante-operam*. Per quanto riguarda i *pattern* di erosione o deposito, si evidenzia in entrambi gli scenari una tendenza al deposito all'interno della baia.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	101	di	104	00			23	03	23



Nello scenario con onda da NordOvest con tempo di ritorno 1 anno (scenario 2b), per quanto riguarda la sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* si assiste ad un moderato aumento dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre scenario *post-operam lotto1* presenta il valore massimo, anche più alto dello scenario *ante-operam*. Per quanto riguarda i *pattern* di erosione o deposito, non si evidenziano modifiche apprezzabili all'interno della baia.

Infine nello scenario con onda da Nord (scenario 3) nella sezione di controllo San Giuliano in entrambi gli scenari *post-operam* non si assiste ad una significativa variazione dell'apporto complessivo di sedimenti in sospensione rispetto allo scenario *ante-operam*; per la sezione di controllo porto il minor apporto si verifica nello scenario *post-operam lotto2*, mentre gli scenari *ante-operam* e *post-operam lotto1* presentano valori analoghi di apporto. Per quanto riguarda i *pattern* di erosione o deposito, nello scenario *post-operam lotto 2* si evidenzia una tendenza al deposito nella parte occidentale della baia mentre nello scenario *post-operam lotto 1* si evidenzia una tendenza alla redistribuzione del materiale.

In generale si evidenzia come la realizzazione dell'avamporto non determini significativi incrementi nell'apporto di solidi sospesi per la zona della Baia di San Giuliano Mare né un incremento della tendenza erosiva mentre le condizioni di trasporto rimangono pressoché stabili nella zona dell'avamporto con evidenti riduzioni nell'apporto di sedimenti negli scenari con realizzazione del lotto 2 e completamento dell'avamporto.

Infine si sottolinea come gli scenari simulati fanno riferimento a condizioni meteo marine che determinano una direzione del *plume* di trasporto solido verso l'avamporto e che si registrano complessivamente con frequenze medie annuali del 6% (provenienti dalle direzioni NW sino a N), e del 31% (condizioni di calma); per le restanti condizioni di mare si registra una direzione del *plume* verso nord che non interessa l'area oggetto di studio.

La tabella seguente riassume la massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo all'interno del dominio, rispettivamente all'imbocco della baia e del porto, negli scenari simulati.

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	102	di	104	00			23	03	23



	Sedimenti in Sospensione [kg]	
Scenario 1	Sezione San Giuliano	Sezione porto
sc1_Ante	1809.18	5531.18
sc1_post1	1331.39	9165.84
sc1_post2	1291.36	4209.77
Scenario 2a	Sezione San Giuliano	Sezione porto
Sc2a_Ante	11208.20	15094.98
Sc2a_post1	7368.81	27991.77
Sc2a_post2	5474.85	8665.77
Scenario 2b	Sezione San Giuliano	Sezione porto
Sc2b_Ante	350.29	17433.86
Sc2b_post1	488.04	24521.70
Sc2b_post2	606.21	6693.04
scenario	Sezione San Giuliano	Sezione porto
Sc3_Ante	37494.17	48007.90
Sc3_post1	36533.26	49716.25
Sc3_post2	35147.76	16011.99

Tabella 10: massa cumulata di sedimento in sospensione in ingresso alle sezioni di controllo negli scenari simulati

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	103	di	104	00			23	03	23



8 BIBLIOGRAFIA

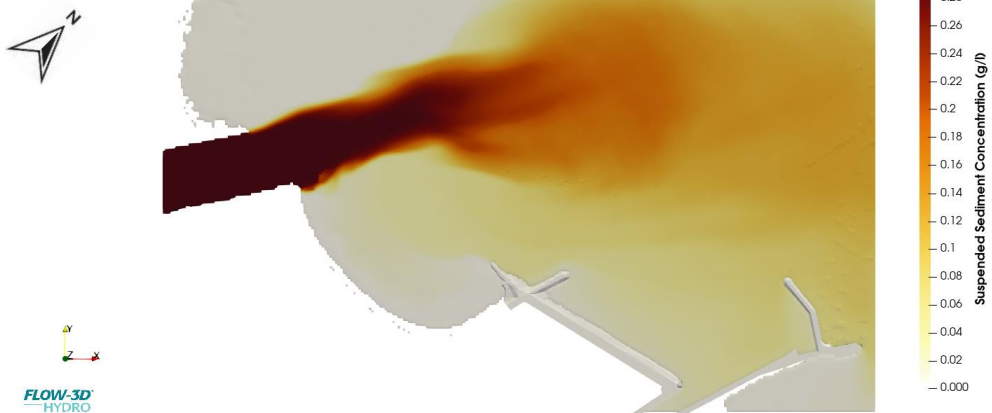
- [1] Comune di Rimini, Avamporlo di Rimini - completamento opere di difesa foranee, Progetto di fattibilità tecnico-economica, Relazione idraulica, ENSER, luglio 2022
- [2] Comune di Rimini, Avamporlo di Rimini - completamento opere di difesa foranee, Progetto di fattibilità tecnico-economica, Studio di propagazione del moto ondos, ENSER, luglio 2022
- [3] Comune di Rimini, Interventi a difesa della costa e dalla balneazione a San Giuliano Mare, Progetto definitivo-esecutivo, all. B Relazione tecnica idraulica, Febbraio 2020
- [4] Comune di Rimini, Soluzioni per la messa in sicurezza dell'imboccatura e il miglioramento della navigazione in prossimità del Porto Canale di Rimini, Progetto esecutivo, elab. C Relazione Tecnica Specialistica
- [5] <https://planetarycomputer.microsoft.com/>
- [6] <https://simc.arpae.it/dext3r/>
- [7] Regione Emilia-Romagna, ARPAE, Stato del litorale emiliano-romagnolo al 2018. Erosione e interventi di difesa, 2020
- [8] <https://webbook.arpae.it/indicatore/Moto-ondoso-00001/>
- [9] <https://www.arpae.it/it/temi-ambientali/meteo/report-meteo/annali-idrologici>
- [10] Autorità Interregionale di Bacino Marecchia – Conca, Prof. Ing. Armando Brath, Studio idrologico ed idraulico del tratto terminale del fiume Marecchia finalizzato all'analisi del nodo idraulico di Rimini, Relazione, Settembre 2005

° Documento:	Foglio			Rev.:					
Relazione Tecnica	104	di	104	00			23	03	23

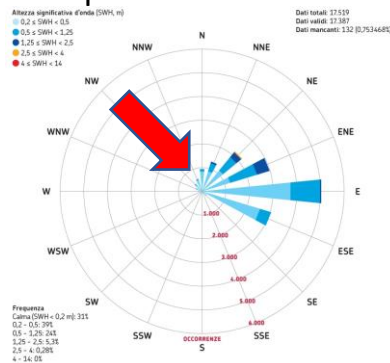
Tavola sinottica Scenario 1: condizioni di calma

Scenario 1 ante operam: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

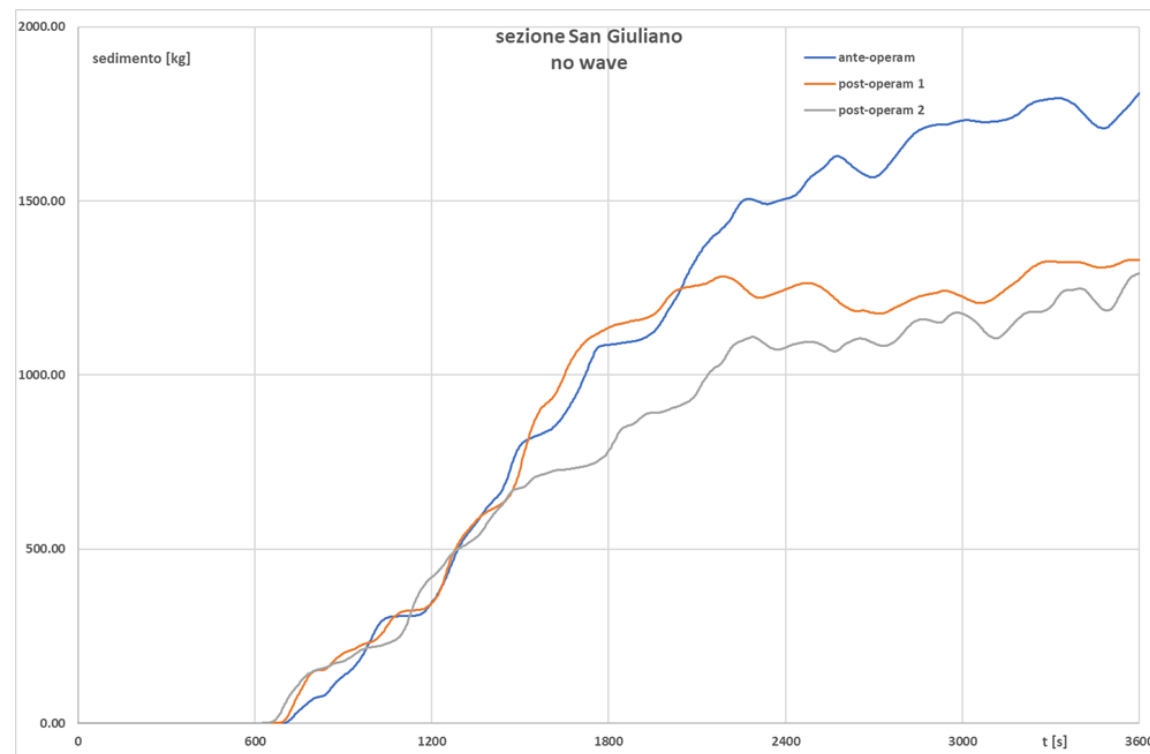
Time: 3600.229



Frequenza annua 31%

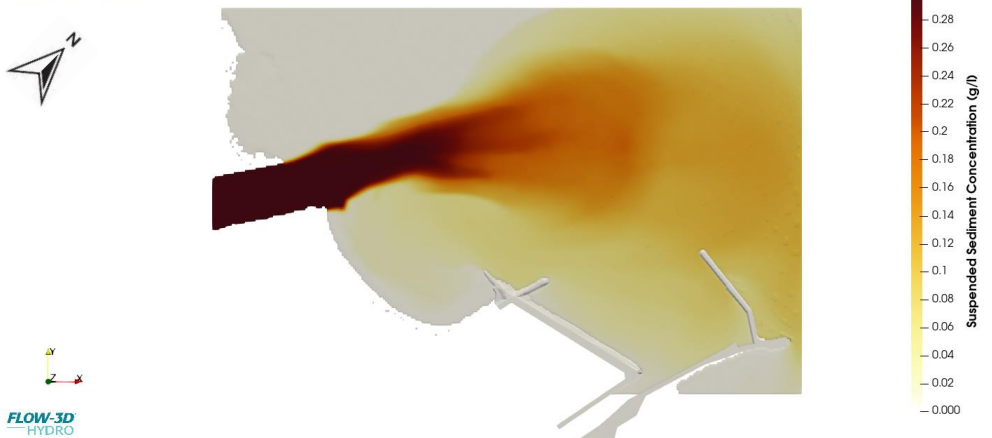


Apporto di sedimento nelle sezioni di controllo



Scenario 1 post-operam 1: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

Time: 3600.103



Scenario 1 post-operam 2: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

Time: 3600.054

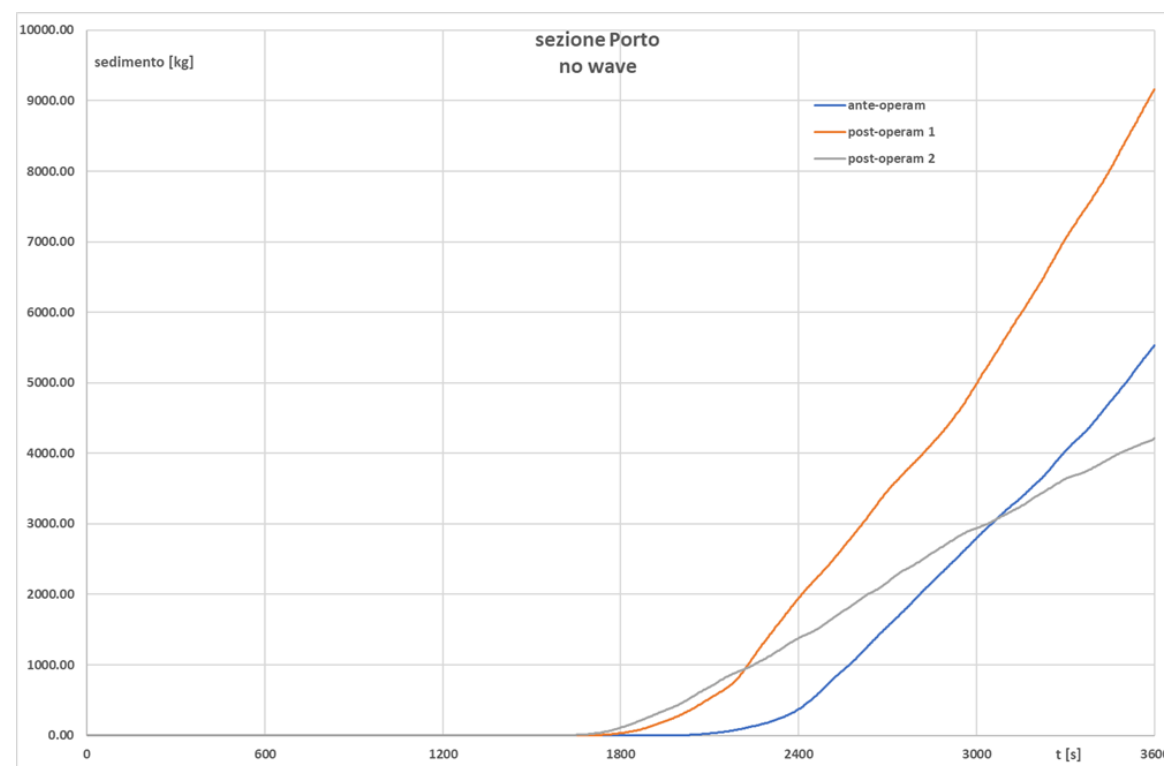
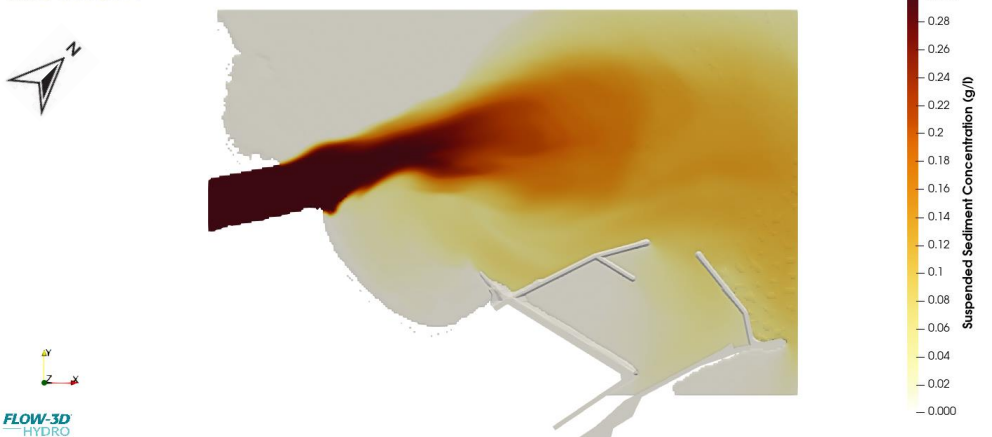
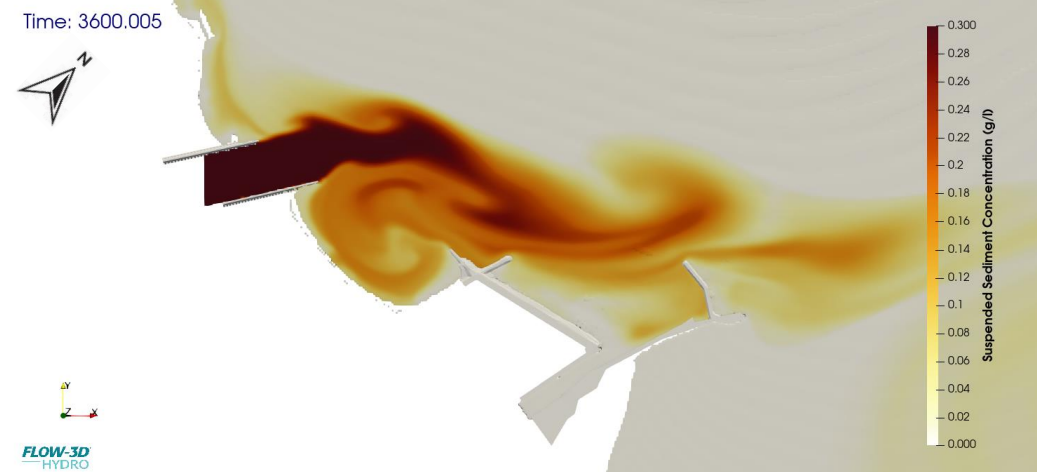
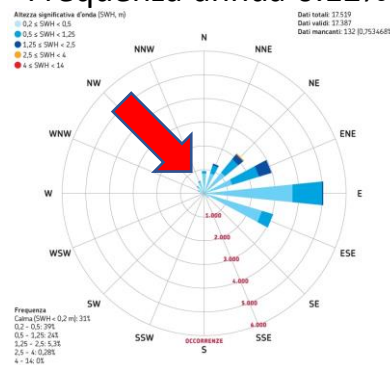


Tavola sinottica Scenario 2a: condizioni di onda da NordOvest – W5

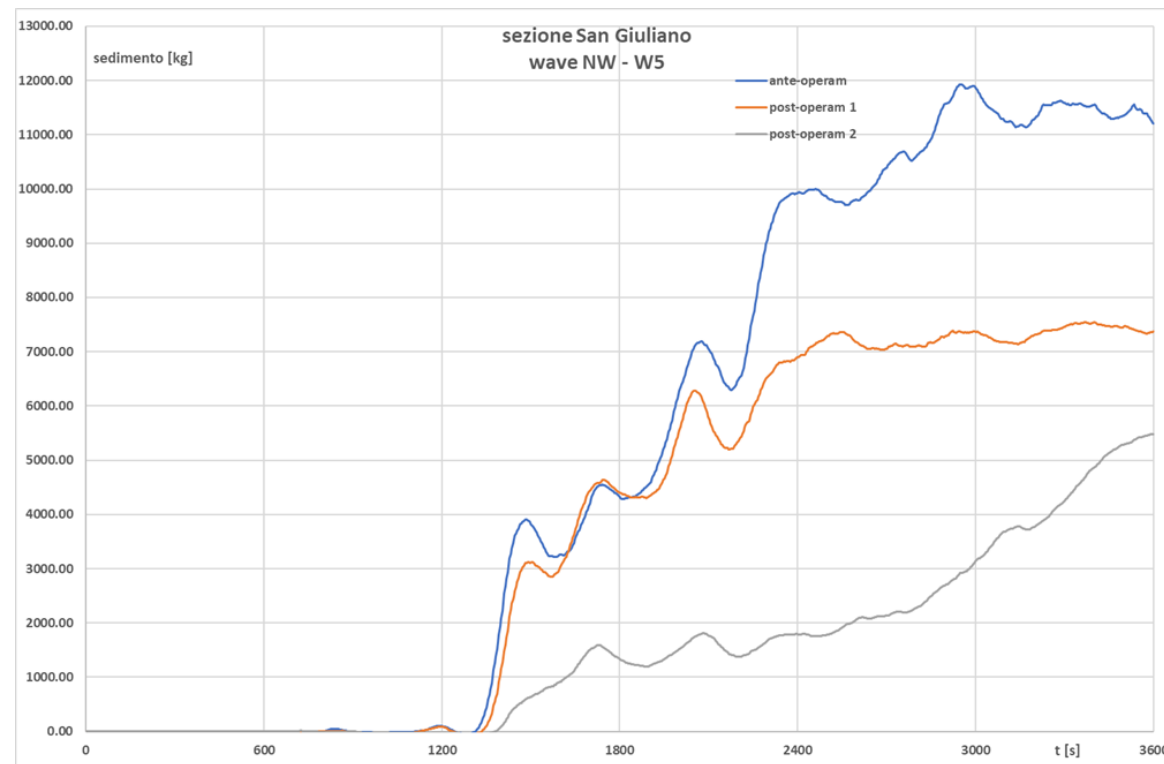
Scenario 2a ante operam: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione



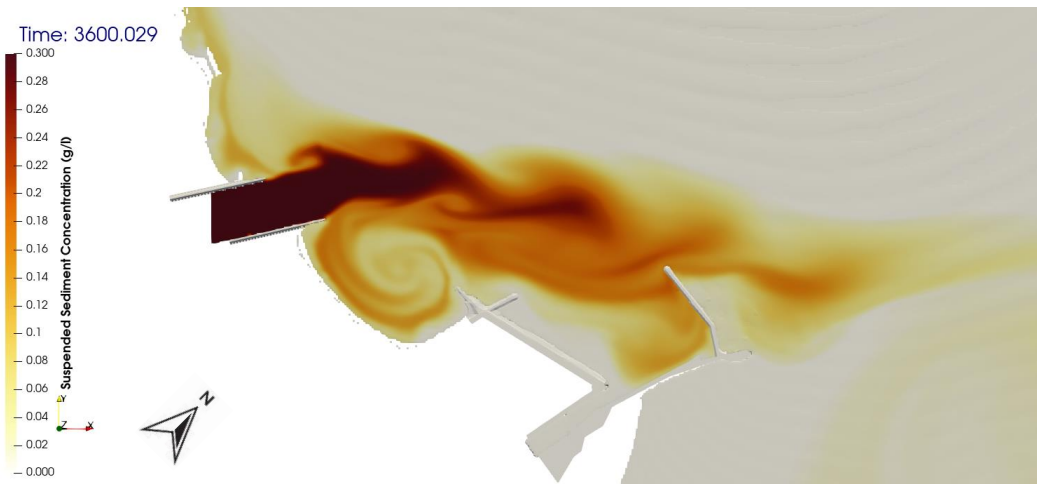
Frequenza annua 0.12%



Apporto di sedimento nelle sezioni di controllo



Scenario 2a post-operam 1: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione



Scenario 2a post-operam 2: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

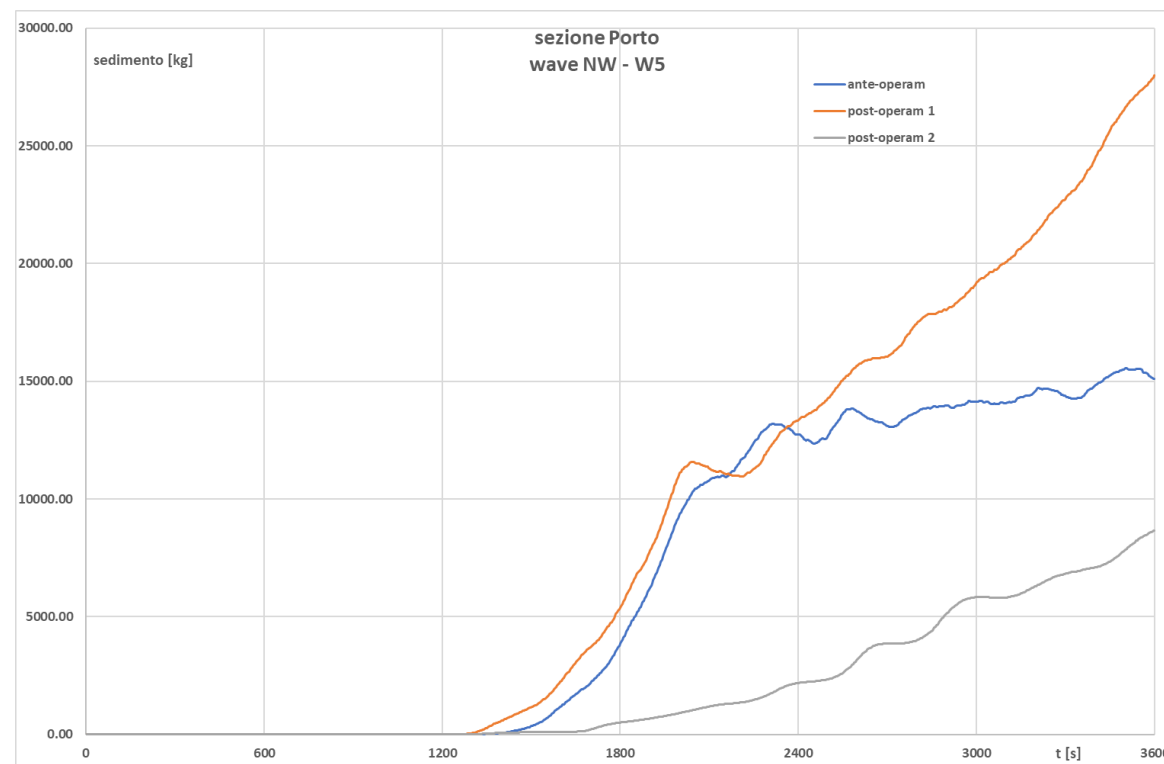
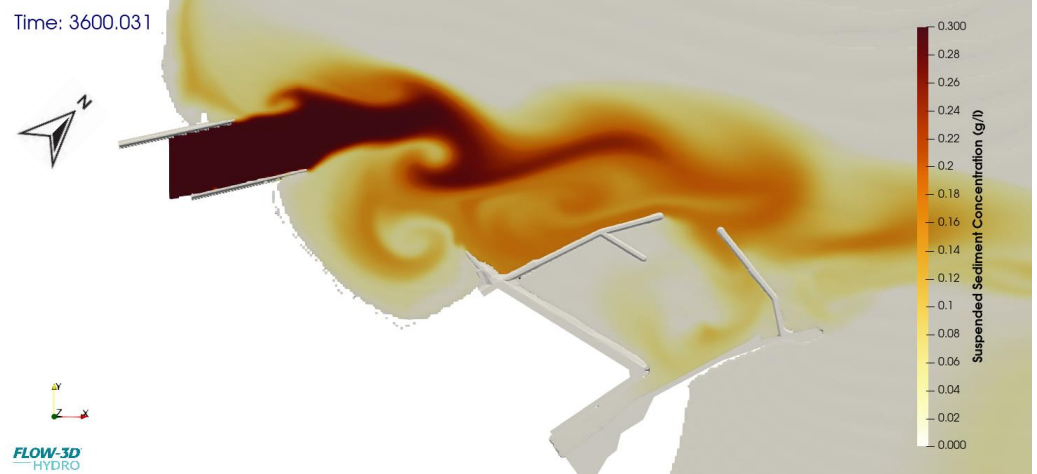
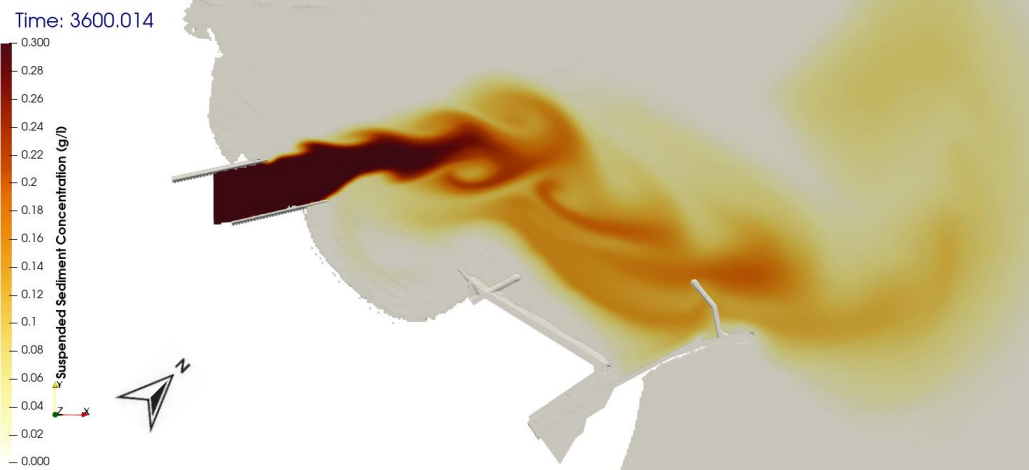
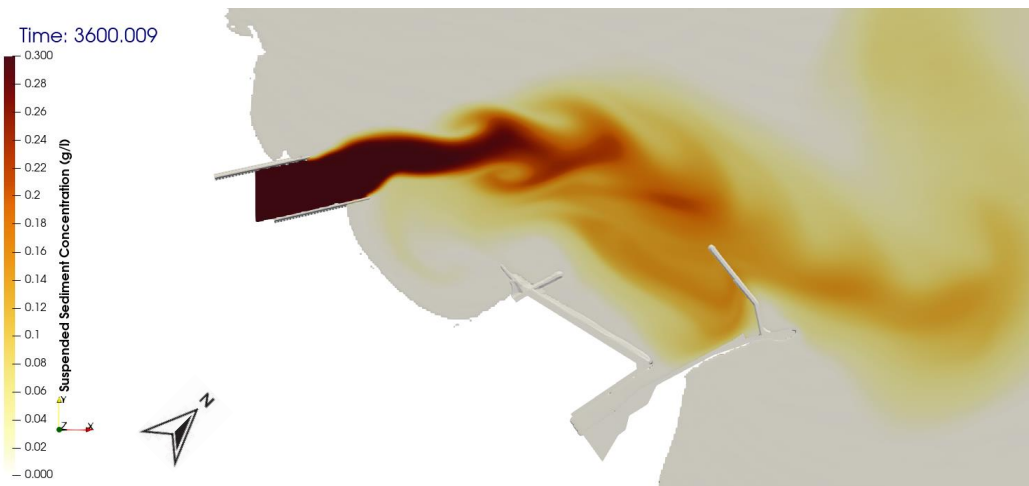


Tavola sinottica Scenario 2b: condizioni di onda da NordOvest – W1

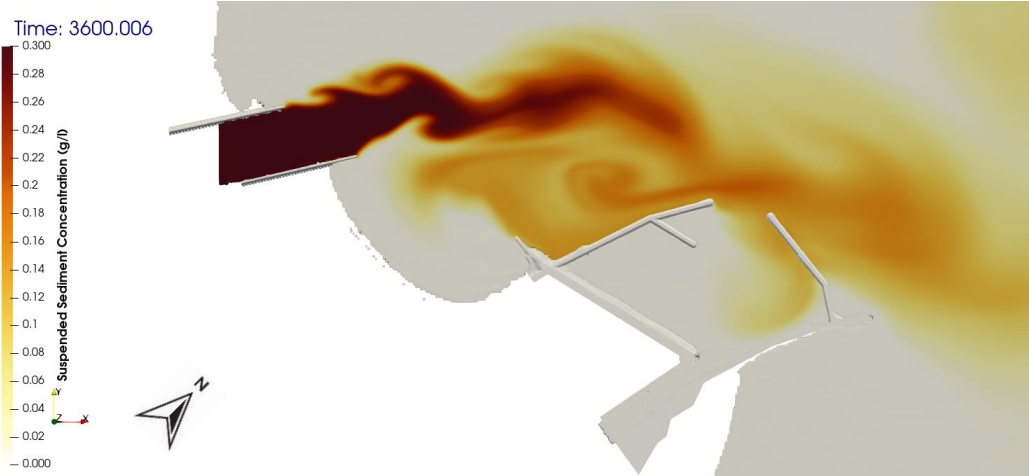
Scenario 2b ante operam: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione



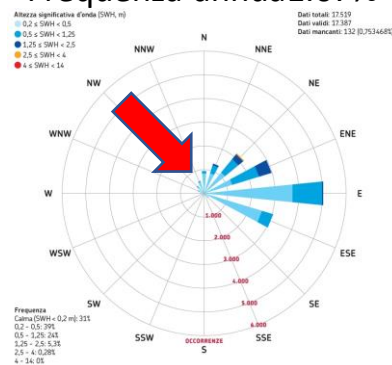
Scenario 2b post-operam 1: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione



Scenario 2b post-operam 2: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione



Frequenza annua 1.07%



Apporto di sedimento nelle sezioni di controllo

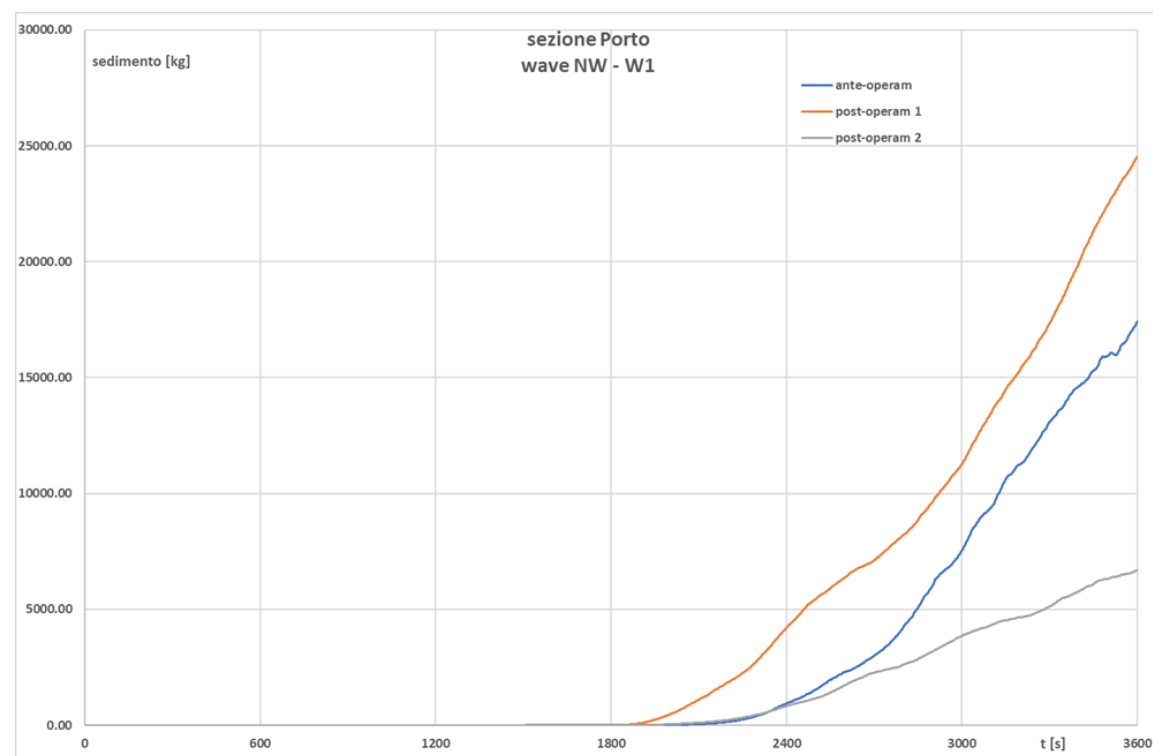
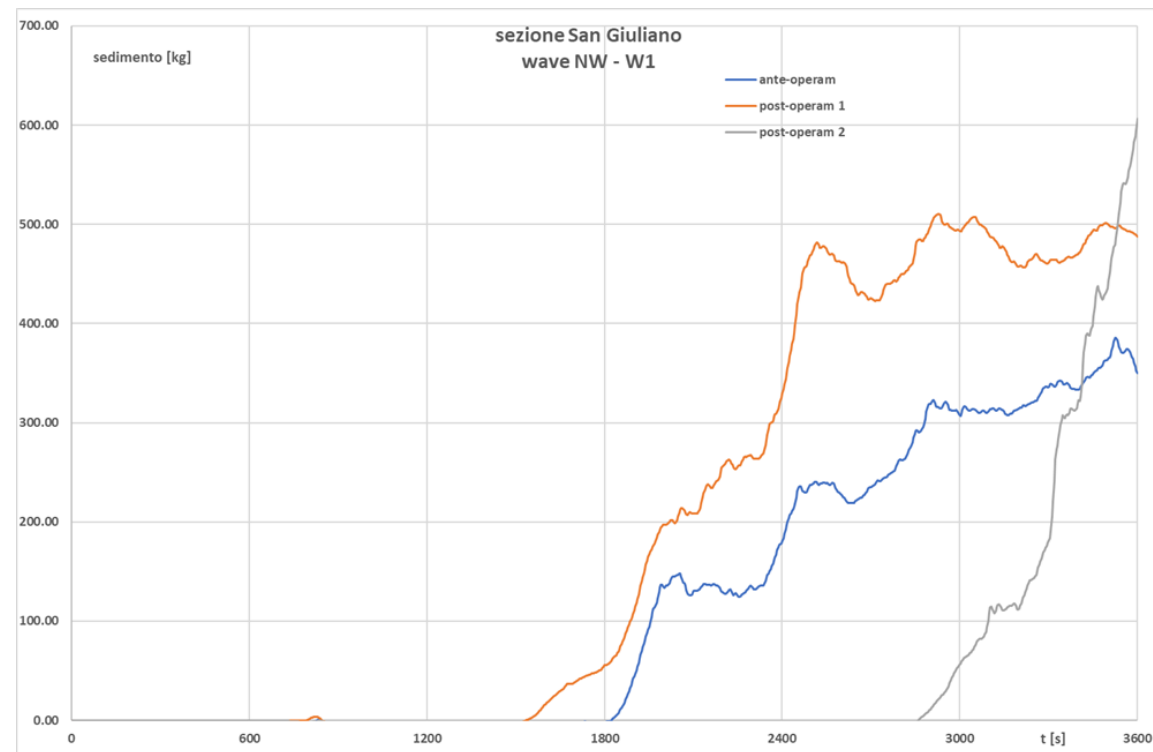
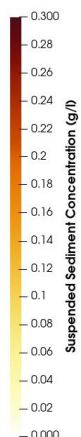
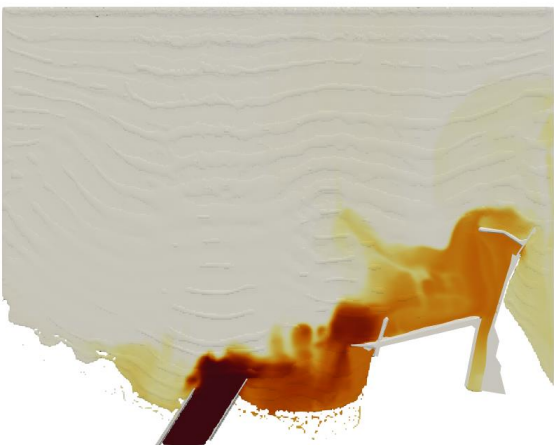


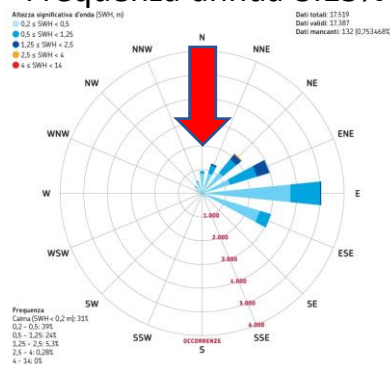
Tavola sinottica Scenario 3: condizioni di onda da Nord – W5

Scenario 3 ante operam: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

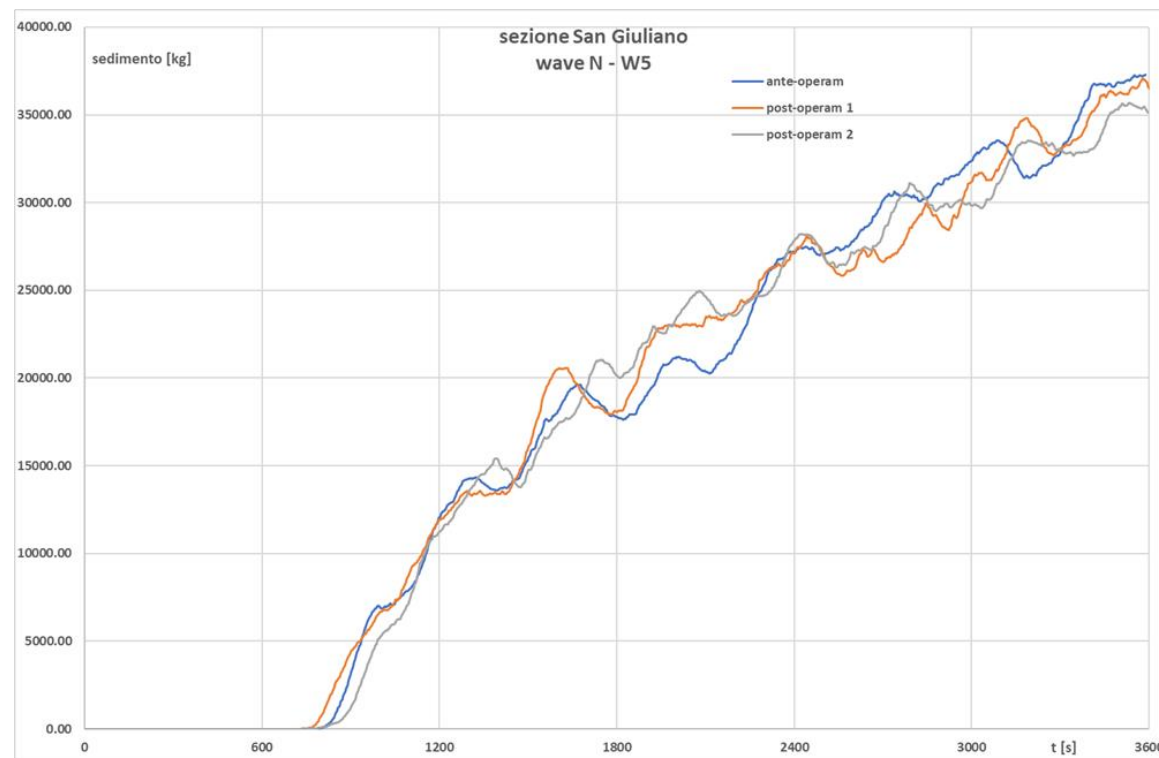
Time: 3600.007



Frequenza annua 3.15%

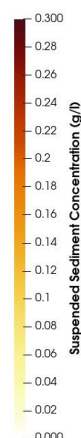
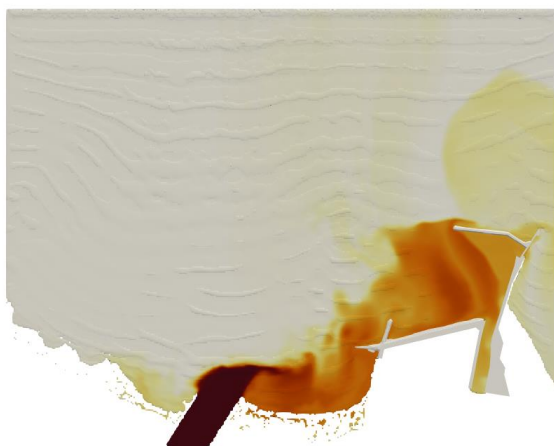


Apporto di sedimento nelle sezioni di controllo



Scenario 3 post-operam 1: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

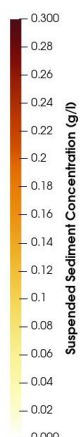
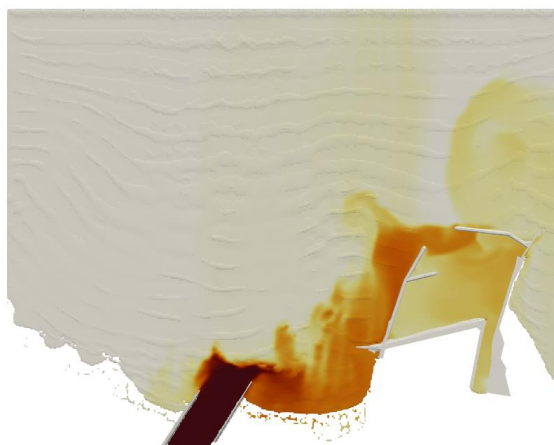
Time: 3600.059



FLOW-3D HYDRO

Scenario 3 post-operam 2: concentrazione di materiale limo/argilloso a termine simulazione

Time: 3600.014



FLOW-3D HYDRO

