

FIUMICINO
WATERFRONT

SOGGETTO ESECUTORE E FINANZIATORE



INTERVENTO N. 146



CITTÀ DI
FIUMICINO

SOGGETTO PROPONENTE ED ATTUATORE



RINA CONSULTING S.P.A.

Via Antonio Cecchi 6, 16129 Genova

tel +39 010 31961

www.rina.org

Registro imprese di Genova: 03476550102

Partita IVA: 03476550102



Atelier(s) Alfonso Femia s.r.l.

Via Interiano 3/11, 16124 Genoa

tel. +39 010.540095 fax 010.5702094

Via Cadolini 32/38, 20137 Milan

tel. +39 02.54019701 fax 010.54115512

55 rue des petites écuries, 75010 Paris

tel +331.42462894

genova@atelierfemia.com - www.atelierfemia.com

Registro imprese di Genova: 01601780990

Partita IVA: 01601780990



RESPONSABILE COORDINAMENTO
DELLE DISCIPLINE SPECIALISTICHE

Ing. **ALESSANDRO ODASSO**

Direttore Tecnico - Rina Consulting S.p.A.

GRUPPO DI PROGETTAZIONE

Arch. Alfonso FEMIA - Architettura e Landscape

Ing. Marco COMPAGNINO - Studio di impatto ambientale

Dott. Sandro LORENZATTI - Archeologia

Ing. Michele DI LAZZARO - Studio Idraulico e idrologico

Arch. Riccardo COCCIA - Prevenzione incendi

Ing. Alessandro VITA - Studio Geotecnico

Dott. Geol. Roberto SALUCCI - Geologia

Ing. Federico BARABINO - Sicurezza

Dott. Geol. Paolo RAVASCHIO - Rilievi e indagini

Ing. Flavio MARANGON - Studio trasportistico

Ing. Bruno RAMPINELLI ROTA - Compatibilità vincoli aeronautici

COORDINAMENTO DELLA PROGETTAZIONE

Ing. Marino BALZARINI - Project Management Consultancy

Arch. Paola DEL BIANCO - Project Manager Deputy

Ing. Alessandro PIAZZA - Coordinamento Opere Civili

Ing. Damiano SCARCELLA - Coordinamento Opere Marittime

Arch. Sara GOTTARDO - Coordinamento Architettura e Landscape

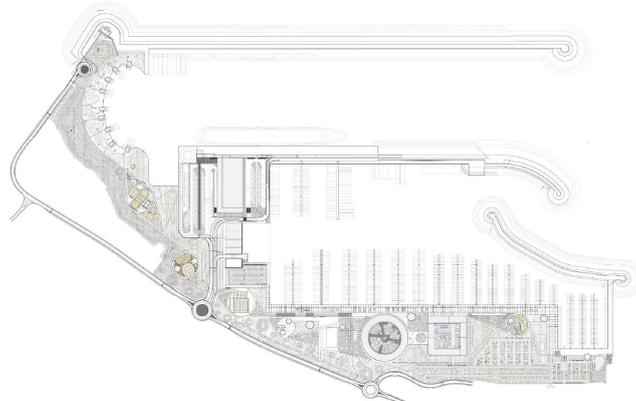
UNITÀ DI PROGETTO

Ing. Massimo GUIDI - Dirigente Comune di Fiumicino

PORTO TURISTICO-CROCIERISTICO DI FIUMICINO ISOLA SACRA

CUP:F1122000320007

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA



OM00 - OPERE MARITTIME RELAZIONI SPECIALISTICHE STUDIO IDRO-MORFODINAMICO

COMMESSA	SERVIZIO LOTTO	OPERA	DISCIPLINA	TIPO	PROG.	REV.	SCALA
P0031150	D0	OM00	RS	REL	05	00	-

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	DATA
00	Emissione per approvazione	L. SARTINI	E. DUCHINI	A. ODASSO	31/07/2023
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

NOME FILE: P0031150-D-0-OM00-RS-REL-05_00

INDICE

	Pag.
LISTA DELLE TABELLE	2
LISTA DELLE FIGURE	2
ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	3
1 INTRODUZIONE	4
2 SCOPO DEL DOCUMENTO	7
3 AREA DI STUDIO	8
4 MODELLISTICA MORFODINAMICA	9
4.1 MODULO IDRODINAMICO	9
4.2 MODULO DI ONDA	11
4.3 MODULO MORFODINAMICO	12
4.4 SIMULAZIONI IDRO-MORFODINAMICHE	12
5 APPLICAZIONE ALL'AREA DI STUDIO	14
5.1.1 Dominio di Calcolo ed Input Batimetrico	14
5.1.2 Condizioni al Contorno ed Iniziali – Marea e Moto Ondoso	15
5.1.3 Forzanti Meteorologiche	15
5.1.4 Presenza di punti di presa/scarico	15
5.1.5 Input Sedimentario	16
6 RISULTATI	17
6.1 IDRODINAMICA GENERALE	17
6.2 CONFIGURAZIONE ATTUALE	17
6.3 CONFIGURAZIONE DI PROGETTO	20
6.4 SINTESI DEI RISULTATI	26
6.4.1 Confronto tra Configurazioni Attuale e di Progetto	26
6.4.2 Configurazione di Progetto – Evoluzione Media Annuale dei Fondali	28
7 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI	29
REFERENZE	30

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 4.1:	Set di Simulazioni Selezionate e Relativo Fattore di Scala Morfologico	13
Tabella 5.1:	Tabella di Sintesi delle Unità Geotecniche (Doc. No. P0031150-D-0-MP00-GI-REL-03_00)	16
Tabella 6.1:	Risultati Relativi alle Stime dei Tassi di Sedimentazione nelle Aree Dragate	26

LISTA DELLE FIGURE

Figura 3.1:	Unità Fisiografica	8
Figura 4.1:	Schema Riassuntivo della Catena Modellistica Morfodinamica	9
Figura 5.1:	Mesh Computazionale di Calcolo del Modello Morfodinamico	14
Figura 5.2:	Batimetria del Modello Morfodinamico	15
Figura 5.3:	Aree 1-5 di Caratterizzazione Geotecnica (Doc. No. P0031150-D-0-MP00-GI-REL-03_00)	16
Figura 6.1:	Campo di Velocità Medio Associato a Mareggiata da Sud-Ovest	18
Figura 6.2:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso (a sinistra) e Tasso di Accumulo/Erosione (a destra) Associato a Mareggiata da Sud-Ovest	18
Figura 6.3:	Campo di Velocità Medio Associato a Mareggiata da Nord-Ovest	19
Figura 6.4:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso (a sinistra) e Tasso di Accumulo/Erosione (a destra) Associato a Mareggiata da Nord-Ovest	19
Figura 6.5:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso (a sinistra) e Tasso di Accumulo/Erosione (a destra) Associato a Mareggiata da Sud	20
Figura 6.6:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso	20
Figura 6.7:	Tasso di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Sud-Ovest – Configurazione di Progetto	21
Figura 6.8:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso e Tasso di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Nord-Ovest – Configurazione di Progetto	21
Figura 6.9:	Campo di Velocità Medio Annuo	22
Figura 6.10:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso - Annuale	22
Figura 6.11:	Tasso di Accumulo/Erosione Annuale	23
Figura 6.12:	Evoluzione Media Annuale del Fondo Marino	23
Figura 6.13:	Ubicazione dei Punti di Estrazione dei Risultati del Modello Morfodinamico	24
Figura 6.14:	Serie Temporalmente della Cumulata di Sedimentazione estratta presso diversi Punti all'Interno del Canale di Navigazione	24
Figura 6.15:	Aree di Analisi ai Fini della Valutazione dei Tassi di Sedimentazione	25
Figura 6.16:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso Associato a Mareggiata da Sud-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto	26
Figura 6.17:	Campo di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Sud-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto	27
Figura 6.18:	Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso Associato a Mareggiata da Nord-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto	27
Figura 6.19:	Campo di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Nord-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto	28

ABBREVIAZIONI E ACRONIMI

CMEMS	Copernicus Marine Environment Monitoring Service
ECMWF	European Center of Medium-range Weather Forecast
ERA5	ECMWF Reanalysis 5th generation
GloFAS	Global Flood Awareness System
HYCOM	Hybrid Coordinate Ocean Model
RON	Rete Ondametrica Nazionale

1 INTRODUZIONE

Il **Mediterraneo** rappresenta il primo mercato a livello mondiale per il settore diportistico ed il secondo per traffico crocieristico. Con quasi 7.500 km di costa, l'Italia ospita oltre 575 mila imbarcazioni (di cui circa 100 mila registrate) a fronte di meno di 160 mila posti barca disponibili. Di questi circa un terzo sono in grado di ospitare solo piccoli natanti ed imbarcazioni, mentre i circa 100 mila posti barca disponibili all'interno di "Marine" capaci di offrire servizi di media e alta qualità, sono distribuiti disomogeneamente sul territorio nazionale, concentrati per oltre il 70% in Liguria, Sardegna, Sicilia, Toscana, Friuli-Venezia Giulia e Campania.

In questo contesto, **Fiumicino** si trova in posizione strategica dal punto di vista marittimo, infrastrutturale e turistico, per la vicinanza alla città di Roma e per uno scenario territoriale ricco di storia e di altissimo interesse storico, archeologico, paesaggistico e gastronomico, per i collegamenti internazionali e nazionali favoriti dalla presenza dell'aeroporto di Fiumicino e dei collegamenti ferroviari e autostradali con Roma e con il resto d'Italia, per la posizione centrale sul versante tirrenico italiano e quindi nel Mediterraneo.

L'area di **Isola Sacra** è una delle 6 aree in cui è suddiviso il Comune di Fiumicino ed è compresa tra i due rami di foce del Tevere: Fiumara Grande in sinistra, che costeggia le rovine dell'antica Ostia e forma la bocca naturale del fiume, ed il canale artificiale di Fiumicino o Fossa Traiana in destra, che costituisce l'entrata del porto fluviale. Ospita circa 15 mila degli oltre 70 mila abitanti del comune ed in essa si è consolidata in questi ultimi anni la sua espansione edilizia, generando un tessuto edilizio è fortemente disomogeneo, con la presenza sia di una serie di nuclei edilizi già consolidati, sia di altri in via di consolidamento.

Il **porto turistico di Fiumicino Isola Sacra** si trova nella parte meridionale dell'area, in adiacenza della Foce di Fiumara Grande. La concessione demaniale per la sua costruzione, di durata novantennale, è stata affidata alla società Iniziative Portuali S.p.a. (IP) nel febbraio 2010 dal Comune di Fiumicino, sulla base di un *Accordo di Programma* sottoscritto con lo stesso comune e con la Regione Lazio.

Il progetto sviluppato da IP prevedeva la realizzazione di 1.400 posti barca e di un cantiere nautico da 10.300 mq. A questi si aggiungevano oltre 40.000 mq di edilizia, destinata in gran parte a residenze, ma anche ad un albergo e superfici commerciali, di ristorazione e di servizio.

Le attività di costruzione del Porto, cominciate nel 2010, sono state interrotte dal concessionario dopo pochi mesi e ad oggi risulta realizzata solo una parte della diga foranea, senza che siano state realizzate né la marina, né le opere edili, né le opere necessarie all'urbanizzazione dell'area in concessione, al soddisfacimento degli standard urbanistici, né quelle aggiuntive previste a servizio di Isola Sacra, lasciando le aree di progetto in un generale stato di degrado.

Credendo nelle potenzialità di questo progetto, il fondo *iCON Infrastructure LLP* (iCON, specializzato in investimenti azionari a lungo termine in attività infrastrutturali private in Europa e Nord America con una raccolta di 3,6 miliardi di USD) e la *Royal Caribbean Group* (RCG, secondo gruppo crocieristico mondiale con base a Miami, US) hanno costituito la *Fiumicino Waterfront s.r.l.* ed attraverso di essa, in qualità di nuovo concessionario subentrato ad IP, si sono impegnati alla realizzazione dell'opera e al suo aggiornamento in termini di fruibilità e sostenibilità in un quadro di rinnovata compatibilità finanziaria.

L'iniziativa si basa sull'opportunità individuata dal RCG di introdurre una funzione crocieristica all'interno del *Porto di Fiumicino Isola Sacra* come variante al progetto del già approvato (Progetto IP2009), mantenendo prevalente la funzione di navigazione da diporto e riducendo al tempo stesso la superficie edilizia a vantaggio di una più estesa fruibilità pubblica dell'area concessa.

Lo *Studio di Fattibilità* completato nel 2018 (SDF2018), ha esaminato preliminarmente tutti i necessari profili amministrativi, economici, progettuali e di mercato ed è stato sottoposto volontariamente a *Conferenza dei Servizi Preliminare* e *Scoping Ambientale* nel 2019 (CSP2019, SA2019). Il procedimento si è concluso con alcune prescrizioni, ma senza evidenziare cause ostative allo sviluppo della Variante e all'introduzione della funzione crocieristica, confermando la preliminare fattibilità amministrativa del progetto ed il suo allineamento con il contesto di sviluppo previsto per le aree da parte degli Enti coinvolti. Le osservazioni e le prescrizioni indicate da CSP2019 e SA2019, insieme ad ulteriori affinamenti tecnici e di layout sono stati infine recepiti e sviluppati nel nuovo *Masterplan* del progetto, completato a ottobre 2022 (MP2022).

Nel corso di questo processo RCG ha:

- ✓ acquisito la concessione a febbraio 2022, ceduta poi alla *Fiumicino Waterfront s.r.l.*

- ✓ commissionato a *RINA Consulting S.p.a.* in associazione con *Alfonso Femia AF517 Atelier(s)* e con il contributo di *EY Italia* e *Telos S.r.l.* l'esecuzione del progetto fino alla consegna della variante al *Progetto Definitivo IP2009* ed al completamento dell'iter approvativo composto da *Valutazione di Impatto Ambientale* nazionale e *Conferenza dei Servizi*.
- ✓ Ceduto la quota di maggioranza ed il controllo della *Fiumicino Waterfront s.r.l.* al fondo *iCON*.

A Giugno 2023, l'opera veniva identificata dal Governo Italiano come strategica per il *Giubileo 2025* nell'ambito di intervento "Accoglienza per i pellegrini e i visitatori" in ragione della sua funzione di ulteriore via di pellegrinaggio e "porta" di accesso a Roma, ed inserita con la denominazione *Porto turistico-crociéristico di Fiumicino Isola Sacra* nella relativa lista del *Dpcm 8 giugno 2023* come scheda n.146, indicando il *Comune di Fiumicino* nel ruolo di "soggetto attuatore". L'iter approvativo dell'opera sarà quindi svolto nell'alveo delle procedure speciali stabilite dal decreto, che risultano in un sostanziale contingentamento dei tempi per le procedure *VIA-VAS* e *Conferenza dei Servizi* per garantire l'esecuzione della stessa nei tempi necessari.

La proposta, si propone di rinnovare ed aggiornare l'immagine del progetto, di allineare l'offerta alle mutate condizioni del mercato nautico e di quello immobiliare, e prevede uno sviluppo ecosostenibile dell'area portuale, nonché la realizzazione di aree verdi e di interventi di rinaturalizzazione, con conseguente miglioramento della qualità ambientale e paesistica di un'area degradata ed occupata dal cantiere di costruzione. Oltre ai ritorni economici ed occupazionali legati al mix di produzioni e servizi che si propone di attivare, il progetto contribuisce alla riqualificazione dell'area e rappresenta un elemento di attrattività e di qualità sia per gli utenti, che per gli abitanti dell'area.

Il **porto turistico**, improntato a principi di ecosostenibilità e integrazione con il territorio, concorre a qualificare la rete del diportismo nazionale. La struttura offrirà un ormeggio stanziale e stagionale, servizi di cantieristica, di sorveglianza, di connessione in rete, di banchine attrezzate per l'accoglienza e l'assistenza al cliente tutto l'anno. La struttura amplia la sua offerta ad utenti di una tipologia di imbarcazione medio-alta. Infatti, dei 1200 posti barca previsti almeno il 10% saranno rivolti a imbarcazioni superiori ai 40 m e con lunghezza fino a 110 m (super, mega e giga yacht). Il **cantiere navale** costituirà uno dei tratti essenziali dell'identità del porto, in grado di garantire tanto assistenza "a secco" (per imbarcazioni fino a 40 m), quanto "a bordo".

L'esistente porticciolo in subconcessione verrà spostato nell'area nord del porto, dove sorgerà anche la scuola velica. Il **vecchio faro** sarà ristrutturato e messo a disposizione del Comune di Fiumicino come area espositiva, i **bilancioni** verranno rivisitati mantenendone la peculiare tipologia architettonica e convertiti in spazi ricreativi, associativi e di ristorazione.

I volumi edilizi sono ora costituiti da un **hotel** da 250 stanze con aparthotel per soggiorni di maggiore durata e dagli edifici di servizio alla marina e alla crociéristica, ai quali si aggiungono una grande piazza pubblica coperta, luogo di ritrovo, spazio per eventi o mercato cittadino ed un'area a verde destinata a **parco pubblico** pari a 150,000 mq, disseminata di aree e edifici minori attrezzati per lo sport e attività ricreative intergenerazionali, ristoro e vita associativa (community hubs). E' stata invece del tutto rimossa dal progetto la funzione residenziale, riducendo in modo sostanziale i volumi e la pressione urbanistica rispetto a quanto autorizzato per il progetto originale.

Via del Faro viene interamente adeguata e dotata di **parcheeggi** pubblici nel tratto tra il faro e la Rotatoria Falcone, mentre ampie aree parcheggio sono previste nell'area in concessione, applicando un concetto *green* caratterizzato da superfici permeabili e alberature per ombreggiamento. Il drenaggio dell'area in concessione è improntato strettamente ai criteri dell'invarianza idraulica e del riuso. In generale, la progettazione è orientata alla conservazione delle risorse naturali attraverso strategie *net-carbon* e di **autosufficienza energetica** ed alla minimizzazione degli impatti residui. Oltre 12 milioni di euro sono previsti quale contributo speciale per interventi nell'area di Isola Sacra prevalentemente dedicati alla **viabilità**, da concordare con il Comune di Fiumicino in sede di *Convenzione Urbanistica*.

Per quanto riguarda il **settore crociéristico**, il progetto è altamente compatibile con il contesto attuale: il nuovo porto, insieme al porto commerciale di Fiumicino Nord e a quello di Civitavecchia, può rappresentare un nuovo sistema di porti con offerta crociéristica complementari e non in competizione. In particolare, l'investimento prevede la realizzazione di un impianto di *shore-power* (o *cold ironing*), che consente di spegnere i motori della nave ormeggiata, azzerandone le emissioni, per un importo di circa 20 milioni di euro. Tale intervento che normalmente viene realizzato con fondi governativi dalle Autorità Portuali o dall'ente pubblico competente, in questo caso sarà parte dell'investimento del concessionario e quindi a totale carico di FW.

L'investimento previsto è di quasi 600 Milioni di Euro coperti da capitali interamente privati, dei quali oltre la metà entro il 2025 per la realizzazione dell'infrastruttura complessiva e delle opere funzionali agli obiettivi Giubileo 2025 ed il resto nel decennio 2025-2035 per il completamento dell'opera. Alla luce di quanto sopra, il *Progetto di Fattibilità Tecnico Economica* (PFTE) e *Studio di Impatto Ambientale* (SIA) del *Porto Turistico-Crociéristico di Fiumicino Isola Sacra* relativi al nuovo assetto proposto per l'area in concessione verranno sottoposti a processo di approvazione secondo le procedure previste dal *Dpcm 8 giugno 2023*.

Il *Comune di Fiumicino*, come soggetto promotore e attuatore, e *Fiumicino Waterfront*, come soggetto esecutore e finanziatore, provvederanno quindi a dare seguito agli obblighi derivanti dalla concessione come aggiornati dalla procedura approvativa, sottoponendo a *Verifica di Ottemperanza* il PFTE adeguato sulla base delle prescrizioni ricevute e ad elaborare il *Progetto Esecutivo*, eventualmente per lotti, in modo da affidare e completare i lavori di costruzione delle opere funzionali agli obiettivi del Giubileo nei tempi previsti.

2 SCOPO DEL DOCUMENTO

Il presente studio si pone l'obiettivo di definire una valutazione della possibile variazione del fondale marino a seguito della realizzazione della costruzione portuale prevista per l'area in esame.

Al fine di evidenziare eventuali impatti della costruzione portuale lungo l'area costiera adiacente e di stimare i tassi di sedimentazione attesi lungo il canale di navigazione e all'interno dell'area del bacino di manovra, verranno eseguite simulazioni numeriche delle condizioni idro-morfodinamiche nell'area di studio.

Saranno prese in considerazione due configurazioni: lo scenario attuale e lo scenario di progetto (cioè il layout finale del porto). I dati meteomarini di base sono quelli definiti all'interno dello Studio Meteomarino sviluppato per il presente progetto.

Lo studio morfodinamico analizzerà l'idro-morfodinamica costiera nell'area di studio e stimerà l'evoluzione media annua dei fondali marini mediante modelli numerici che riproducono i principali processi costieri. I processi di sedimentazione saranno studiati mediante analisi di onde, correnti, batimetria, granulometria dei fondali e geometria delle aree dragate.

Lo studio fornirà una valutazione quantitativa delle tendenze erosive o di deposizione per condizioni tipiche meteomarine. Le analisi saranno eseguite attraverso la combinazione di diverse metodologie basate fortemente su modellistica numerica allo stato dell'arte.

3 AREA DI STUDIO

L'unità fisiografica in cui ricade il tratto di costa oggetto di studio è compresa tra Capo Linaro a Nord e Capo Anzio a Sud e si estende per circa 90 km; la foce del F. Tevere è situata nel tratto centrale di tale unità; il paraggio in esame risulta, pertanto, esposto ad un ampio settore di traversia, tutto principale, di ampiezza pari a circa 150°, compreso tra 160°N (Capo Anzio) e 310°N (Capo Linaro).

Ponendosi al largo di tali estremi geografici, ad una profondità di circa 100 m e ad una distanza di circa 13 Km dalla costa, il paraggio è geograficamente esposto ad un settore di traversia più ampio che si estende tra 120°N (Capo Circeo) e 320°N (Porto S. Stefano).

Il sito in esame si affaccia quindi sul mar Tirreno centrale ed è limitato dalla costa ligure a Nord –Nord Ovest (300°N- 310°N), dalla costa orientale della Corsica a Nord-Ovest (DD 270°N- 300°N), dalla costa orientale della Sardegna a Ovest (220°N-270°N), dalla costa nordafricana della Tunisia a sud-ovest (180°N- 220°N) ed infine dalla costa settentrionale della Sicilia a Sud- Sud Est (150°N- 180°N).

Per quanto concerne la circolazione d'insieme relativa all'unità fisiografica in esame, i dati reperiti, provenienti dal database HYCOM, confermano quanto riportato nell'Atlante delle correnti superficiali dell'Istituto Idrografico della Marina, dove si riscontra nel medio alto Tirreno, una prevalenza delle correnti dirette da Sud verso Nord (prevalentemente verso 330°N) con intensità variabili da 0.50 a 0.80 nodi.



Figura 3.1: Unità Fisiografica

4 MODELLISTICA MORFODINAMICA

Lo studio utilizzerà i dati meteomarini definiti all'interno dello studio Meteomarino (Doc. No. P0031150-D-0-OM00-RS-REL-01_00) come input e valuterà i seguenti aspetti principali:

- ✓ Evoluzione dei fondali marini;
- ✓ Volumi di trasporto dei sedimenti;
- ✓ Aree di deposizione dei sedimenti e valori min/max;
- ✓ Aree di erosione dei sedimenti e valori min/max;
- ✓ Trasporto sedimentario costiero – confronto tra configurazione attuale e di progetto;
- ✓ Tassi di sedimentazione nelle aree dragate.

Lo studio è basato su modellistica numerica idro-morfodinamica allo stato dell'arte. In particolare, il modello Delft3D è stato utilizzato per la simulazione della propagazione delle onde, dei flussi idrodinamici e dei processi di trasporto, compresa la dinamica dei sedimenti. I moduli applicati sono Delft3D-WAVE, -FLOW e -MOR. Tali moduli lavorano in cascata e interagiscono in continuo tra di loro come mostrato dal seguente diagramma di flusso generale (Figura 4.1).

Nei capitoli seguenti vengono brevemente descritte le caratteristiche principali del modello numerico e successivamente viene presentata l'applicazione al presente caso studio, in termini di dati di input, schematizzazione del dominio di calcolo e di risultati ottenuti.

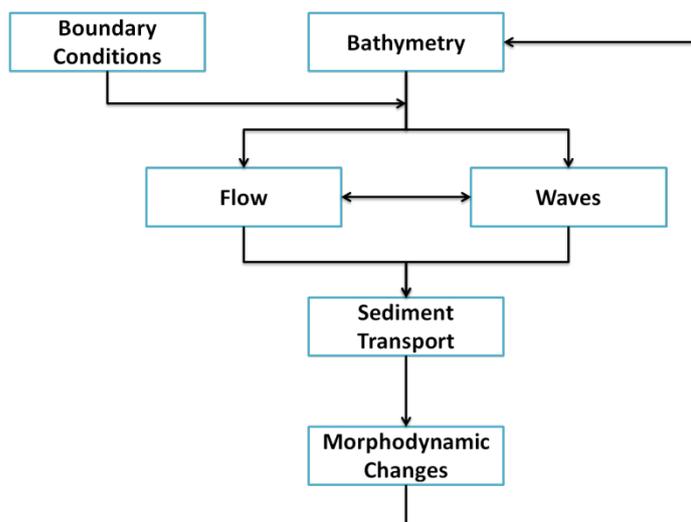


Figura 4.1 Schema Riassuntivo della Catena Modellistica Morfodinamica

4.1 MODULO IDRODINAMICO

Il modulo idrodinamico Delft3D-FLOW simula fenomeni di flusso e trasporto non stazionari bidimensionali (2DH, in profondità) o tridimensionali (3D) derivanti da forzanti mareali e/o meteorologiche, incluso l'effetto delle differenze di densità dovute a una distribuzione non uniforme della temperatura e della salinità (correnti di densità).

Dato che la colonna d'acqua nella zona costiera può essere assunta non stratificata e ben rappresentata da un profilo di densità barotropica, è stata adottata la modalità 2DH per simulare l'area del Progetto.

Il modello descrive onde, correnti, trasporto di sedimenti e cambiamenti del livello del fondo marino attraverso una serie di equazioni matematiche basate sulla conservazione della massa, della quantità di moto, dell'energia.

Il modulo principale di Delft3D è il modulo FLOW che calcola i flussi idrodinamici multidimensionali e i fenomeni di trasporto, compresi i sedimenti, principalmente forzati dal campo d'onda fornito dal modulo WAVE.

Delft3D-FLOW calcola i processi di flusso e trasporto non stazionari derivanti da forzanti mareali e meteorologiche su una griglia rettilinea o curvilinea.

Alcune delle caratteristiche di Delft3D-FLOW includono la descrizione di:

- ✓ forzante mareale;
- ✓ forza di Coriolis;
- ✓ correnti di densità;
- ✓ processi di avvezione/diffusione;
- ✓ correnti di densità;
- ✓ vento e pressione atmosferica spazio/tempo varianti;
- ✓ modelli di turbolenza avanzati basati su viscosità turbolenta;
- ✓ sorgenti e pozzi tempo varianti;
- ✓ nesting e decomposizione del dominio di calcolo;
- ✓ stress indotto da onde.

Il modulo è in grado di simulare flussi tridimensionali instabili, tenendo conto delle variazioni di densità, della batimetria e delle forzanti esterne come la meteorologia, le elevazioni delle maree, le correnti e altre condizioni idrografiche. Il modello idrodinamico permette di valutare:

- ✓ Situazioni di allagamento;
- ✓ "Momentum dispersion";
- ✓ Resistenza del fondale;
- ✓ Variazioni di densità;
- ✓ Trasporto di salinità e temperatura;
- ✓ Modellazione della turbolenza incluso l'effetto "buoyancy";
- ✓ Attrito del vento;
- ✓ Scambi con l'atmosfera, inclusi evaporazione e precipitazioni;
- ✓ Stress da radiazione dovuto alle onde;
- ✓ Tracciamento di particelle.

In particolare, il modulo idrodinamico calcola la corrente 2D/3D, il livello dell'acqua, la temperatura e i campi di salinità. Il modulo Delft3D-FLOW è applicabile allo studio di una vasta gamma di fenomeni legati all'idraulica ovunque la struttura tridimensionale del flusso sia importante:

- ✓ scambi di marea e correnti;
- ✓ fluidi stratificati;
- ✓ circolazione oceanografica a larga scala;
- ✓ ricircolo di calore e salinità.

Il sistema di modellazione si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes bi/tridimensionali incomprimibili di Reynolds soggette alle assunzioni di Boussinesq e della pressione idrostatica. Pertanto, il modello consiste in equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità ed è chiuso da uno schema di chiusura turbolento. La densità non dipende dalla pressione, ma solo dalla temperatura e dalla salinità. Per il modello 3D, la superficie libera viene presa in considerazione utilizzando un approccio di trasformazione in coordinate sigma.

Di seguito sono presentate le equazioni che governano il modello utilizzando le coordinate cartesiane. L'equazione di continuità locale è scritta come:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

dove x , y , z rappresentano le coordinate cartesiane, u , v , w sono le componenti della velocità relative alla superficie S , e le due equazioni del momento orizzontale per la componente x e y , rispettivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Nel Modulo Idrodinamico, il calcolo del trasporto di temperatura e salinità seguono le equazioni generali trasporto-diffusione:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + s_s S$$

I termini di diffusione orizzontale sono definiti da:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

Le equazioni per il flusso bidimensionale sono ottenute dall'integrazione delle equazioni sulla profondità. Anche lo scambio di calore con l'atmosfera è incluso.

La discretizzazione spaziale delle equazioni primitive viene eseguita mediante integrazione su volumi finiti.

Le simulazioni sono state effettuate accoppiando i codici Delft3D-WAVE e Delft3d-FLOW, con lo scambio di dati bidirezionale. Con questo accoppiamento vengono presi in considerazione gli effetti delle onde sulla corrente (tramite forzante, maggiore turbolenza e maggiore stress di taglio al fondo) e gli effetti del flusso sulle onde (tramite set-up, rifrazione della corrente e maggiore attrito del fondo).

4.2 MODULO DI ONDA

Per la caratterizzazione delle onde nell'area di studio, è stato utilizzato il modello di onda Delft3D-WAVE, il cui core è basato sul modello spettrale d'onda di terza generazione SWAN [1][2][3][4][5]. Il modello simula la crescita, il decadimento e la trasformazione delle onde generate dal vento e delle onde nelle aree di largo e costiere.

Delft3D-WAVE comprende due diverse formulazioni:

- ✓ Formulazione parametrica disaccoppiata direzionale;
- ✓ Formulazione completamente spettrale.

La formulazione parametrica disaccoppiata direzionale si basa su una parametrizzazione dell'equazione di conservazione dell'azione delle onde. La parametrizzazione è fatta nel dominio della frequenza introducendo il momento zero ed il primo momento dello spettro d'azione delle onde come variabili dipendenti.

La formulazione completamente spettrale si basa sull'equazione di conservazione dell'azione delle onde, come descritto ad esempio in [6][7] e [8][9][10], dove lo spettro direzionale/in frequenza di azione dell'onda è la variabile dipendente. Le equazioni di conservazione di base sono formulate in coordinate cartesiane per applicazioni su piccola scala e coordinate sferiche polari per applicazioni su larga scala.

Il modello include i seguenti fenomeni fisici:

- ✓ Crescita delle onde per azione del vento;
- ✓ Interazione onda non lineare;
- ✓ Dissipazione dovuta al "white-capping";
- ✓ Dissipazione dovuta all'attrito del fondo;
- ✓ Dissipazione dovuta alla rottura delle onde indotta dalla profondità;
- ✓ Rifrazione e shoaling dovuti a variazioni di profondità;
- ✓ Interazione onda-corrente;
- ✓ Effetto della profondità dell'acqua variabile nel tempo e delle inondazioni e dei periodi di secca.

La discretizzazione dell'equazione principale nello spazio geografico e spettrale viene eseguita utilizzando volumi finiti. Nel dominio geografico viene utilizzata una maglia di calcolo non strutturata. L'integrazione temporale viene eseguita utilizzando un approccio a step frazionati in cui viene applicato un metodo esplicito multi-sequenza per la propagazione dell'azione delle onde.

4.3 MODULO MORFODINAMICO

Delft3D-MOR calcola il trasporto di sedimenti (sia il carico totale sospeso che il carico totale al fondo) e i cambiamenti morfologici per un numero arbitrario di frazioni coesive e non coesive.

Le onde che si propagano verso le acque poco profonde inducono, in prossimità del fondo marino, una corrente oscillante orizzontale avente la direzione di propagazione delle onde. Questa corrente rappresenta la causa principale del sollevamento dei sedimenti, che si verifica quando lo stress sul fondo marino supera la resistenza all'attrito tra le particelle di sabbia. Il sedimento sollevato è esposto all'azione della corrente oscillante e alla gravità.

A causa della asimmetria della corrente orbitale, dovuta a sua volta alla asimmetria della forma d'onda tipica delle acque basse, le particelle subiscono movimenti diversi lungo la direzione di propagazione delle onde e lungo la direzione opposta: risulta quindi un trasporto netto (trasporto "cross-shore") verso la costa o verso il largo, in relazione al rapporto tra velocità di caduta dei sedimenti e velocità orbitale delle onde.

Il trasporto dei sedimenti dipende dalle caratteristiche del fondo marino, dei sedimenti e delle onde incidenti. In caso di onde frangenti, avvicinandosi obliquamente alla battigia, la quantità di moto del flusso induce una corrente litoranea che scorre parallela alla costa, confinata principalmente nella zona di "breaking" dell'onda. Sebbene le correnti costiere abbiano generalmente una bassa velocità, sono importanti nei processi litorali perché fluiscono lungo la riva per lungo tempo, trasportando sedimenti mossi dalle onde frangenti. A causa di queste correnti, il sedimento sollevato dalle onde viene trasportato parallelamente alla costa (trasporto costiero).

Sia le correnti che le onde fungono da forze motrici e sono state incorporate un'ampia varietà di formule di trasporto. Per il carico sospeso questo modulo si collega al solutore di avvezione-diffusione 2D o 3D del modulo D-Flow FM; gli effetti della densità possono essere presi in considerazione.

Una caratteristica essenziale di questo modulo è la relazione dinamica con i moduli Delft3D-WAVE e Delft3d-FLOW, che consentono ai flussi e alle onde di adattarsi alla batimetria locale e consentono simulazioni su diverse scale temporali, da giorni (impatto tempesta) ad anni (dinamica del sistema). Può tenere conto della composizione del fondale e quindi costruire una registrazione stratigrafica.

4.4 SIMULAZIONI IDRO-MORFODINAMICHE

Alcuni eventi meteorologici significativi sono stati selezionati per riprodurre la forzante che caratterizza il clima tipico dell'area di studio sulla scala temporale della mareggiata, opportunamente combinato con le variazioni di marea.

Inoltre, Delft3D-FLOW/MOR permette di definire un fattore di scala morfologico: è utile per aumentare a livello spurio il tasso di variazioni morfologiche e quindi riprodurre le tendenze evolutive su periodi di tempo più lunghi dell'arco temporale simulato. A questo proposito, sono stati definiti due diversi set di simulazioni:

- ✓ **Run a breve termine:** mareggiate singole di durata limitata. La durata di tali eventi è stata definita sulla base del clima tipico. In particolare, sono stati individuati 3 eventi significativi corrispondenti a mareggiate importanti provenienti da diversi settori direzionali: da Sud-Ovest, da Nord-Ovest ed infine da Sud, come riportato in Tabella 4.1.

Ogni mareggiata simulata è preceduta e seguita da un periodo tipico di 20 giorni caratterizzato da marea combinata con vento debole (circa 4 m/s) e onde ridotte onde (cioè ≤ 0.4 m).

Per i run a breve termine, il fattore di scala morfologico è impostato pari ad 1 durante il picco delle tempeste, al fine di valutare correttamente i cambiamenti dei fondali marini indotti dalle tempeste, mentre un fattore di 2 viene utilizzato nei 20 giorni precedenti e successivi alla tempesta.

I run a breve termine sono stati eseguiti sia nella configurazione di progetto che in quella attuale, al fine di effettuare un confronto dei risultati ed evidenziare potenziali variazioni morfodinamiche indotte dal progetto nell'area di studio.

- ✓ **Run a lungo termine:** le simulazioni sono ottenute combinando run a medio termine (Run T01, Tabella 4.1) e adottando un valore più elevato di fattore di scala morfologico, necessario per scalare ogni parte del run a medio termine fino alla sua reale frequenza di occorrenza lungo l'anno. I risultati di queste simulazioni sono utilizzati per stimare l'evoluzione media annua del fondo marino.

I run a lungo termine sono stati eseguiti solo nella configurazione di progetto al fine di stimare i tassi di sedimentazione nelle aree dragate.

Tabella 4.1: Set di Simulazioni Selezionate e Relativo Fattore di Scala Morfologico

Evento Meteomarinario	Durata Simulazione (giorni)	Fattore di Scala Morfologico
Run SW	6	1
Run NW	4	1
Run S	8	1
Run T01	75	3

5 APPLICAZIONE ALL'AREA DI STUDIO

Le impostazioni del modello idro-morfodinamico sono riassumibili come segue.

5.1.1 Dominio di Calcolo ed Input Batimetrico

La maglia di calcolo è stata realizzata in modo tale da coprire un'area sufficientemente ampia al fine di valutare la circolazione idrodinamica a sottoscala presso le aree portuali ed al contempo inserirsi in uno schema di circolazione a scala più ampia sufficientemente rappresentativo della circolazione costiera.

La maglia di calcolo di tipo strutturato (362-509 elementi) è a risoluzione di pochi metri, tale da rappresentare i processi costieri di dettaglio a sottoscala (Figura 5.1, configurazione di progetto).

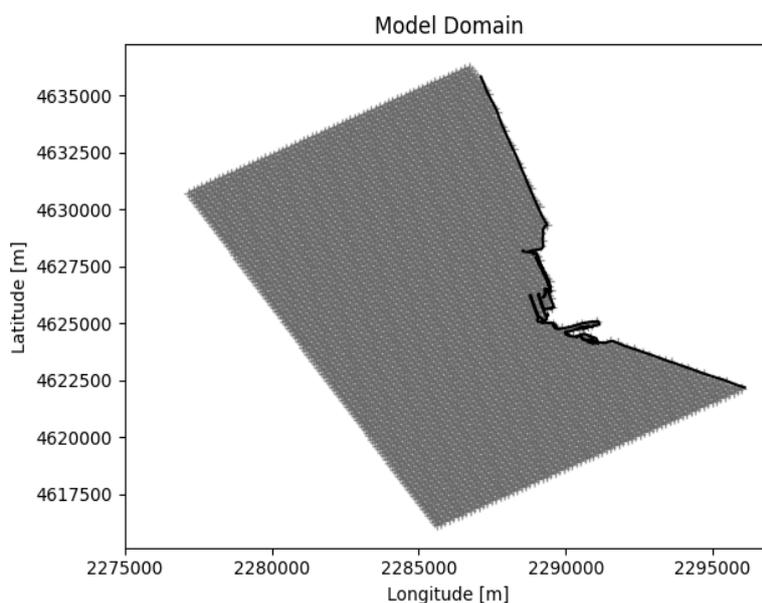


Figura 5.1: Mesh Computazionale di Calcolo del Modello Morfodinamico

La batimetria dell'area di studio (Figura 5.2, configurazione di progetto) è stata definita considerando le seguenti fonti di dati:

- ✓ Carte nautiche dal software IMC (<https://www.c-map.com/all-charts/chart-features/>);
- ✓ Dati misurati forniti dal Cliente (campagna di misure 2022, Doc. No. P0031150-2-H02);
- ✓ Aree oggetto di dragaggio - schemi progettuali (Doc. No. P0031150-2-H02).

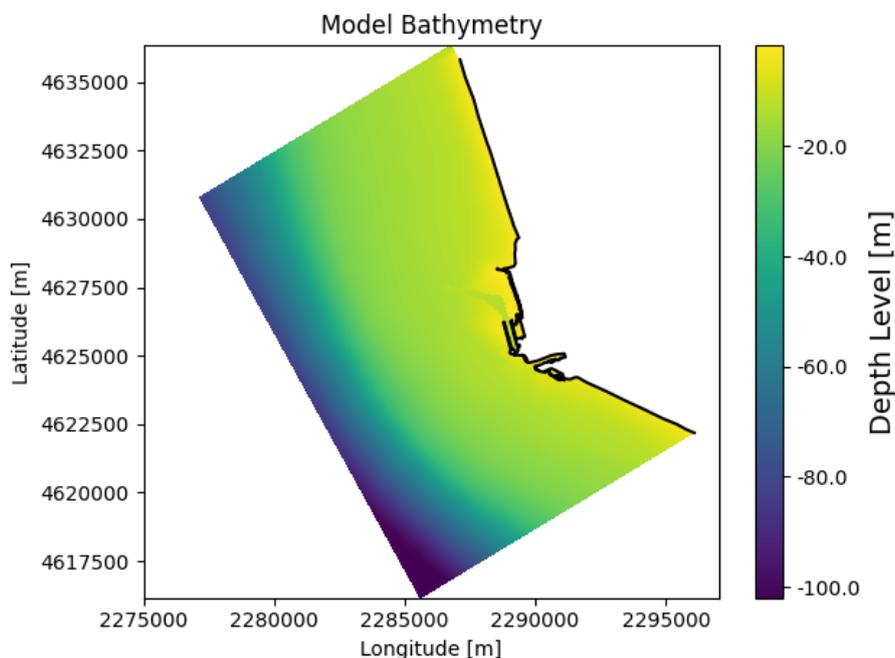


Figura 5.2: Batimetria del Modello Morfodinamico

5.1.2 Condizioni al Contorno ed Iniziali – Marea e Moto Ondoso

La forzante di marea applicata ai contorni aperti è stata estratta dai modelli OTPS e TPXO. Questi modelli sono stati sviluppati dalla Oregon State University [13][14]. Le previsioni si basano su soluzioni di marea inversa barotropica globale e/o regionale ottenute con il modello OTIS (OSU Tidal Inversion Software), che utilizza database misurati per le oscillazioni di marea hindcast nel punto di interesse. TPXO è una versione attuale di un modello globale delle maree oceaniche, che meglio si adatta, in senso minimo quadrato, alle equazioni di marea di Laplace e ai dati medi lungo traccia di TOPEX / Poseidon e Jason (sulle tracce TOPEX / POSEIDON dal 2002) ottenuti con OTIS.

Le condizioni al contorno per il modello d'onda, invece, sono state ottenute da CMEMS MED - Waves, il database di hindcast del "Mediterranean Sea Waves forecasting system" (WAM 4.5.4). Tale database viene aggiornato annualmente e consiste in dati di onda orari aventi una risoluzione spaziale di 0.042° nel Mar Mediterraneo.

Tali dati sono stati opportunamente validati mediante comparazione con i dati forniti dalle boe appartenenti alla Rete Ondametrica Nazionale (RON), secondo quanto esposto nello Studio Meteomarine (Doc. P0031150-D-0-OM00-RS-REL-01_00).

5.1.3 Forzanti Meteorologiche

I campi di pressione atmosferica e del vento, spazio e tempo varianti, estratti dal database globale ECMWF ERA5, pubblicato dall'European Centre for Medium-Range Weather Forecast, sono stati utilizzati come forzante meteorologica.

I dati di vento sono stati opportunamente validati mediante comparazione con le misure di vento rilevate dalle stazioni di Civitavecchia, Anzio e Ponza della Rete Mareografica Nazionale (RMN), come ampiamente descritto nello Studio Meteomarine (Doc. No. P0031150-D-0-OM00-RS-REL-01_00).

5.1.4 Presenza di punti di presa/scarico

Gli scarichi idrici del fiume Tevere, variabili nel tempo, sono stati inseriti nel modello ed estratti dai relativi dati storici del "Global Flood Awareness System" (GloFAS).

5.1.5 Input Sedimentario

Le aree sedimentarie sono state caratterizzate sia dal punto di vista spaziale nonché sulle diverse profondità all'interno del dominio di calcolo secondo la stratigrafia di progetto (Doc. No. P0031150-D-0-MP00-GI-REL-03_00), la quale si compone di quattro unità principali (Figura 5.3), caratterizzate da frazioni differenti di sedimenti (Tabella 5.1).



Figura 5.3: Aree 1-5 di Caratterizzazione Geotecnica (Doc. No. P0031150-D-0-MP00-GI-REL-03_00)

Tabella 5.1: Tabella di Sintesi delle Unità Geotecniche (Doc. No. P0031150-D-0-MP00-GI-REL-03_00)

Unità geologica	Unità geotecnica	Descrizione	Simbolo
	MMG	Unità antropica	
	Ib	Unità fangosa	
A	Ia	Unità sabbiosa	
B	Ila	Unità argillosa	
B	Ilb	Unità argillosa	
C		Unità ghiaiosa	

6 RISULTATI

6.1 IDRODINAMICA GENERALE

Studi precedenti condotti sull'area in esame (Doc. P0031150-D-0-OM00-RS-REL-03_00) hanno evidenziato che in via generale, il regime di corrente tipico nell'area costiera è determinato principalmente dagli eventi di Scirocco (Sud-Est) e Libeccio (Sud-Ovest). Tale regime di vento favorisce lo sviluppo di mareggiate più intense provenienti da Sud-Ovest.

Il regime idrodinamico è quindi caratterizzato da un flusso dominante orientato da Sud-Est a Nord-Ovest. Tale regime di corrente è inoltre caratterizzato dall'instaurarsi di una zona d'ombra a Nord dell'area di studio, chiaramente visibile in figura. Inoltre, il regime sostenuto del suddetto pattern idrodinamico tende a generare una circolazione anticiclonica sia nell'area a Sud che in quella a Nord della nuova struttura portuale.

È inoltre evidente l'instaurarsi di una importante corrente litoranea associata agli eventi di mareggiata provenienti da Sud-Ovest, diretta verso Sud-Est, piuttosto marcata in prossimità della costa a Sud dell'area di studio, nonché visibile a Nord.

Con frequenza minore, le condizioni di venti di Maestrale (Nord-Ovest) generano mareggiate minori, le quali sembrano essere responsabili dell'instaurarsi dell'aumento del regime idrodinamico circolazione in prossimità dell'imboccatura del porto.

Inoltre, si genera una zona d'ombra a Sud dell'area di studio. A tale regime di corrente si osserva un generale aumento dell'intensità delle correnti in prossimità dei bassi fondali e nei dintorni della foce del fiume Tevere.

6.2 CONFIGURAZIONE ATTUALE

Come già descritto in precedenza, le simulazioni numeriche nella configurazione attuale sono state condotte nella sola modalità a breve termine, al fine di valutare la naturale dispersione di sedimenti ad opera delle mareggiate principali che caratterizzano l'area, nonché i tassi di accumulo ed erosione associati ad esse, ed effettuare infine un confronto con la configurazione di progetto.

La mareggiata proveniente da Sud-Ovest, caratterizzata dalle altezze d'onda significative più elevate, è responsabile del regime idrodinamico medio riportato in Figura 6.1.

Si evidenziano strutture vorticosi significative, nonché l'instaurarsi di importanti correnti litoranee, particolarmente evidenti nel tratto più a Sud del litorale.

Il regime idrodinamico medio è responsabile di un'importante azione di dispersione di sedimento, la cui massima concentrazione è riportata in Figura 6.2.

Il tasso finale di accumulo/erosione di sedimento (Figura 6.2) evidenzia una condizione di stabilità attraverso la quasi totalità del dominio di calcolo, mentre sporadiche zone di accumulo si osservano in prossimità delle aree costiere.

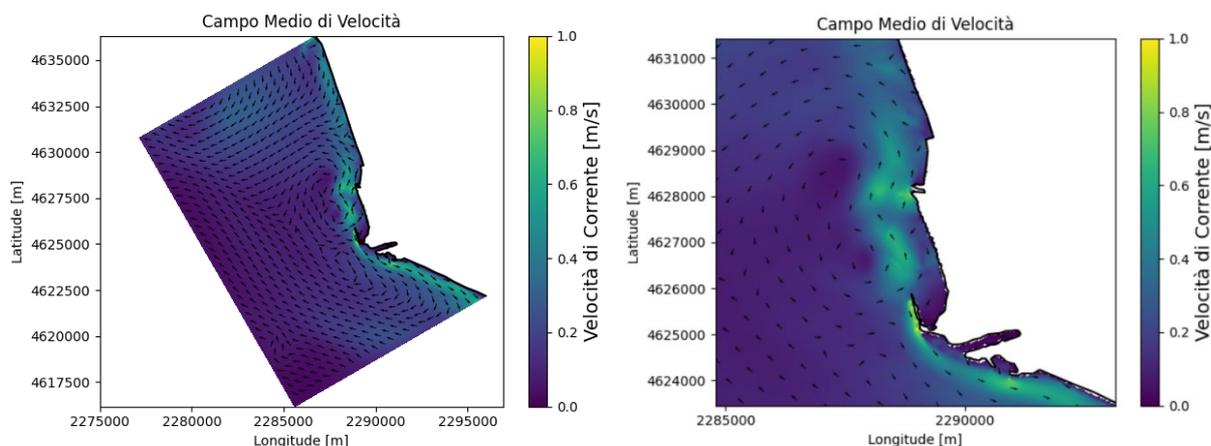


Figura 6.1: Campo di Velocità Medio Associato a Mareggiata da Sud-Ovest

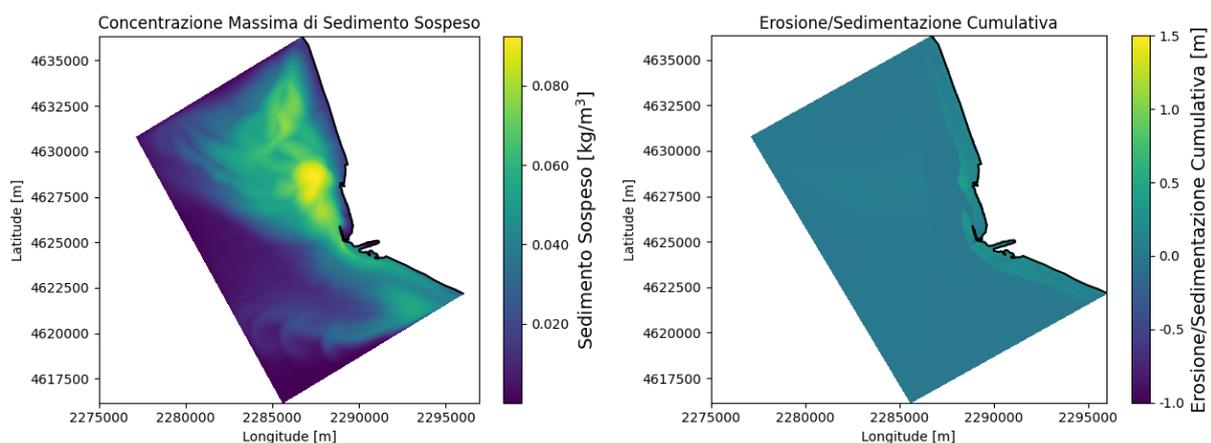


Figura 6.2: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso (a sinistra) e Tasso di Accumulo/Erosione (a destra) Associato a Mareggiata da Sud-Ovest

Il campo di corrente associato a mareggiata da Nord-Ovest, come atteso, è responsabile dell'instaurarsi di un regime idrodinamico a minore intensità, in particolare in termini di correnti litoranee (Figura 6.3).

La concentrazione massima di sedimento sospeso indotta dalla mareggiata è inferiore su tutto il dominio di calcolo rispetto alla mareggiata precedente, nonché il tasso di accumulo/erosione ad opera della stessa è praticamente trascurabile (Figura 6.4).

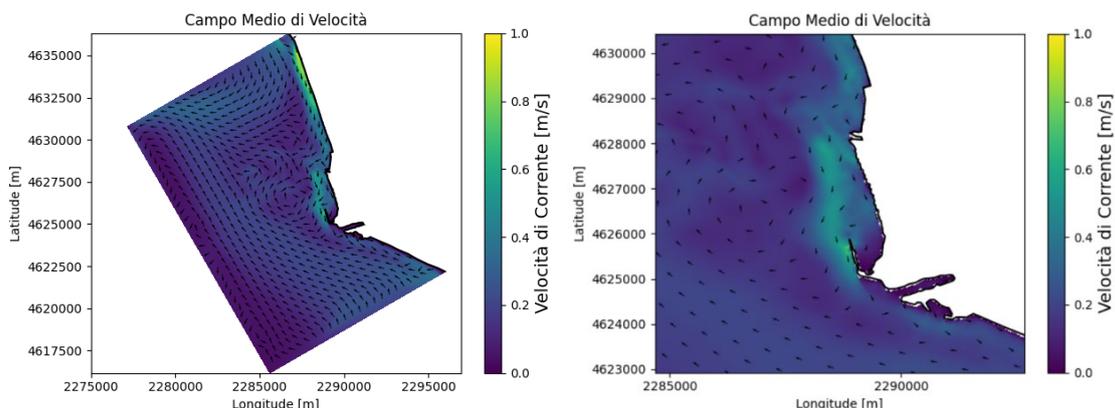


Figura 6.3: Campo di Velocità Medio Associato a Mareggiata da Nord-Ovest

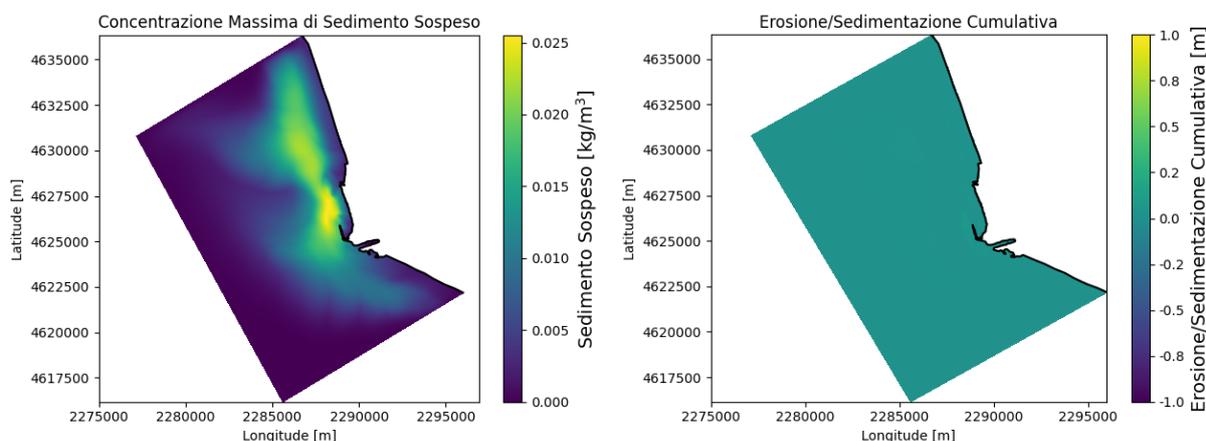


Figura 6.4: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso (a sinistra) e Tasso di Accumulo/Erosione (a destra) Associato a Mareggiata da Nord-Ovest

Una condizione simile a quella descritta per la mareggiata proveniente da Sud-Ovest, si evidenzia anche per le mareggiate provenienti da Sud.

Il sedimento sospeso tende ad essere sospinto verso Nord (Figura 6.5), mentre il tasso di erosione è del tutto simile a quello riportato in Figura 6.2; si osserva, invece, una lieve tendenza all'accumulo in prossimità del tratto litoraneo Nord.

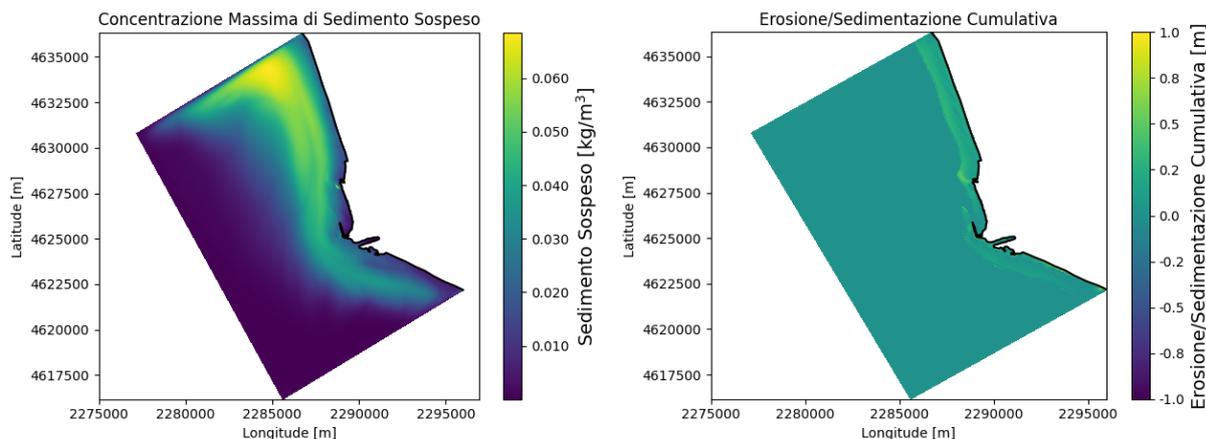


Figura 6.5: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso (a sinistra) e Tasso di Accumulo/Erosione (a destra) Associato a Mareggiata da Sud

6.3 CONFIGURAZIONE DI PROGETTO

Le simulazioni numeriche nella configurazione di progetto sono state condotte sia in modalità a breve termine, al fine di valutare la naturale dispersione di sedimenti ad opera delle mareggiate principali che caratterizzano l'area, nonché i tassi di accumulo ed erosione associati ad esse allo scopo di effettuare un confronto con la configurazione attuale, che a lungo termine, con lo scopo di definire l'evoluzione media annua del fondo marino dettata dalla costruzione delle opere progettuali in esame.

Le simulazioni idrodinamiche condotte nella configurazione di progetto, per quanto concerne la mareggiata più intensa proveniente da Sud-Ovest, non evidenziano cambiamenti significativi del campo di corrente indotto rispetto alla configurazione attuale. Tuttavia, è possibile osservare un lieve aumento della concentrazione di sedimento sospeso in prossimità dell'uscita dell'imbocco dell'area portuale (Figura 6.6), mentre il campo di distribuzione del sedimento a larga scala risulta del tutto simile alla precedente (Figura 5.2).

Analogamente, le zone di accumulo di sedimento in prossimità dell'area portuale (Figura 6.7) risultano essere del tutto simili a quanto riscontrato in configurazione attuale.

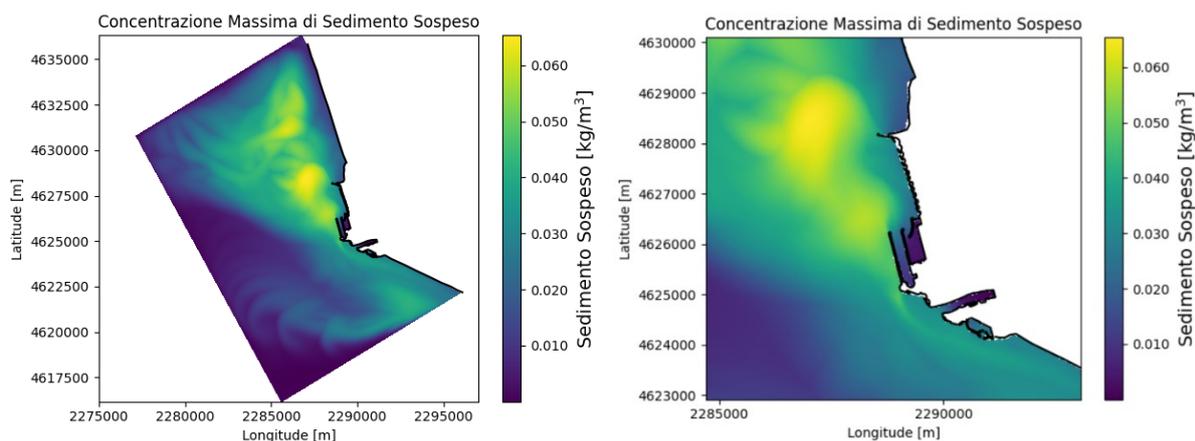


Figura 6.6: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso

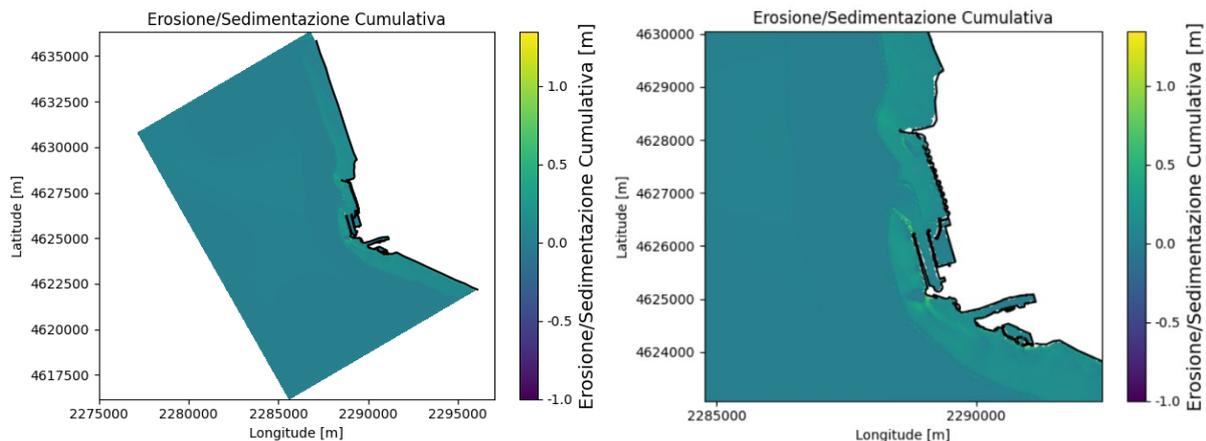


Figura 6.7: Tasso di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Sud-Ovest – Configurazione di Progetto

La configurazione di progetto sembra favorire invece una maggiore dispersione di sedimento sospeso nel caso di mareggiata proveniente da Nord-Ovest, dovuta probabilmente alla presenza dell'opera portuale che induce il flusso da Nord a ruotare verso Sud/Sud-Ovest, trascinando il sedimento verso il largo (Figura 6.8). Di conseguenza, le zone di accumulo di sedimento in prossimità dell'area portuale risultano essere del tutto assenti.

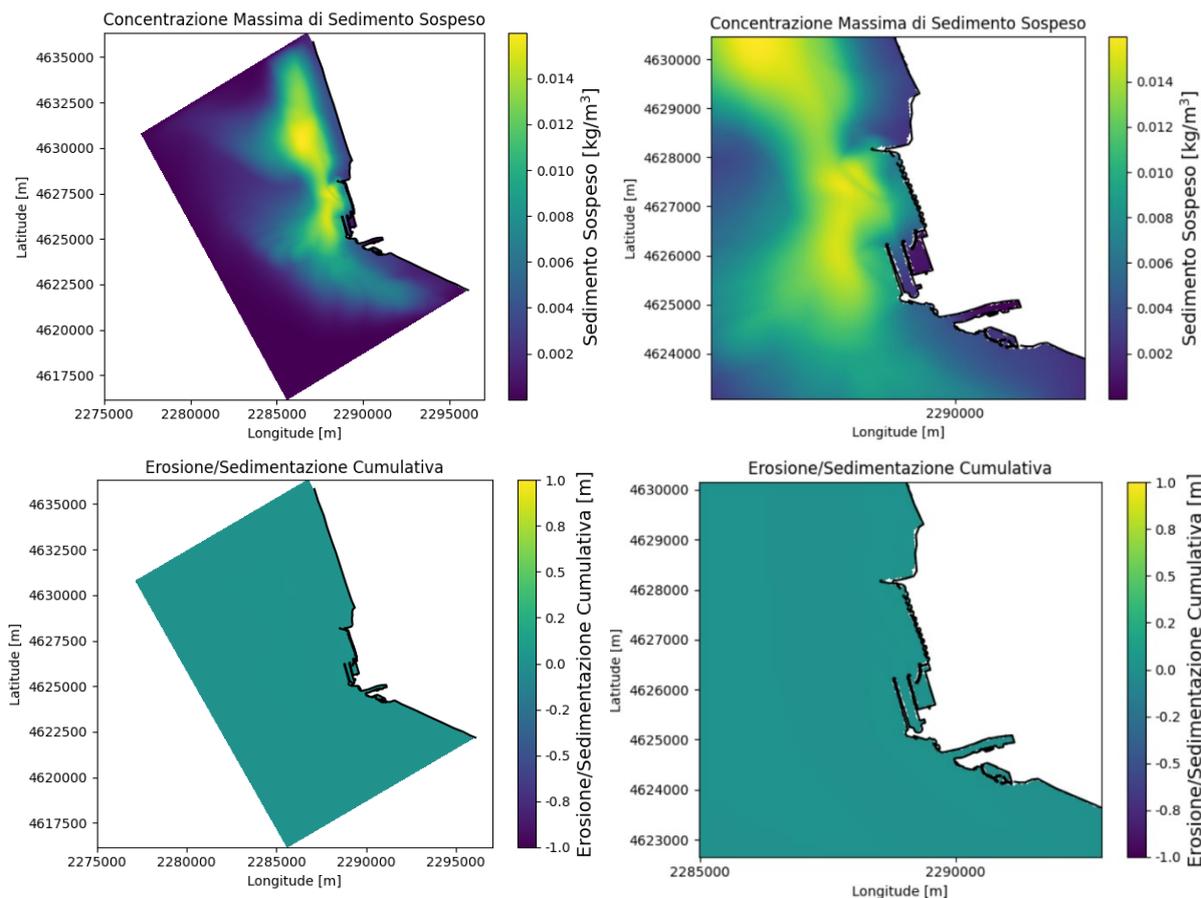


Figura 6.8: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso e Tasso di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Nord-Ovest – Configurazione di Progetto

Non risultano, infine, particolari differenze per quanto concerne i risultati delle simulazioni condotte secondo la configurazione attuale in caso di mareggiata proveniente da Sud.

Il campo di velocità medio annuale è mostrato in Figura 6.9. Il flusso principale è diretto, come atteso, prevalentemente verso Nord-Ovest, con evidente presenza di corrente litoranea significativa e vorticità più marcata presso il litorale sud.

Di conseguenza, la massima dispersione di sedimento sospeso interessa gran parte del dominio di calcolo, con concentrazioni maggiori nelle aree più a Nord (Figura 6.10).

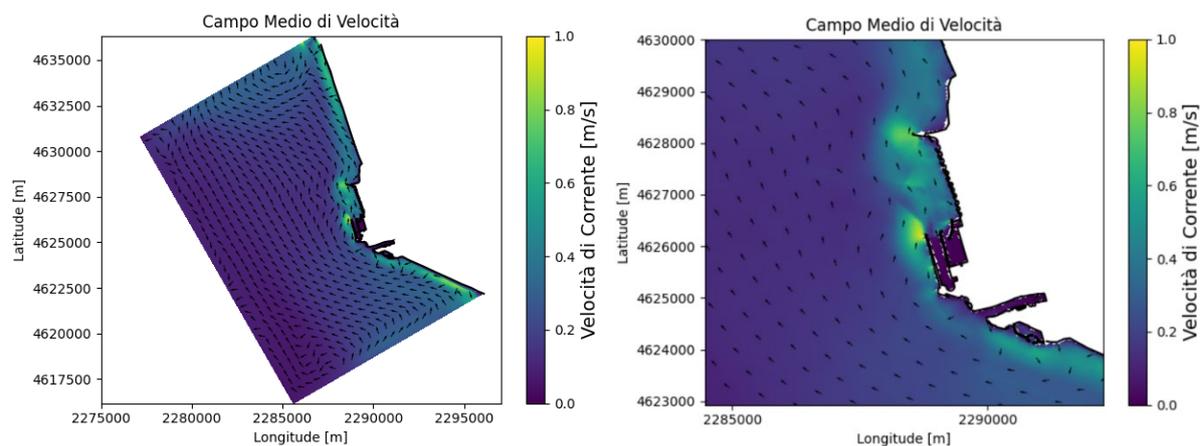


Figura 6.9: Campo di Velocità Medio Annuo

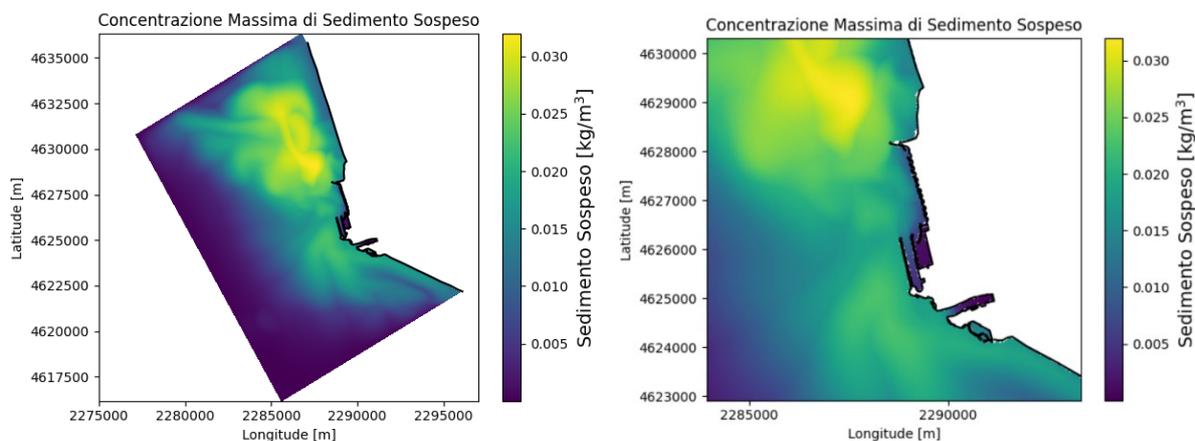


Figura 6.10: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso - Annuale

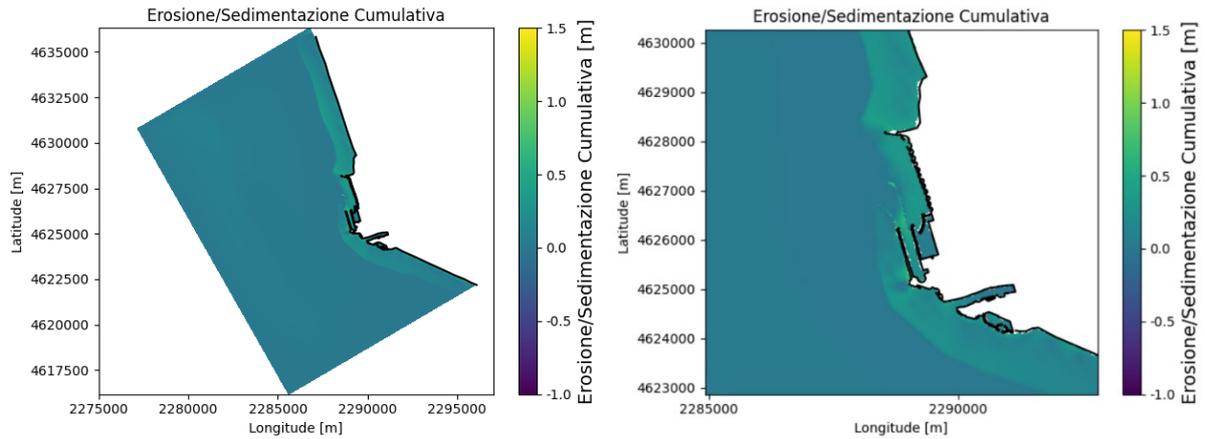


Figura 6.11: Tasso di Accumulo/Erosione Annuale

In Figura 6.12 è mostrata la batimetria dell'area di studio nella configurazione di progetto, all'istante iniziale (immagini superiori) e all'istante finale (immagini inferiori) della simulazione effettuata. Dalle figure si nota che l'evoluzione media annua dei fondali porta alla formazione di una zona di accumulo nei pressi dell'imboccatura portuale e all'interno del bacino di attracco delle navi da crociera e degli yacht.

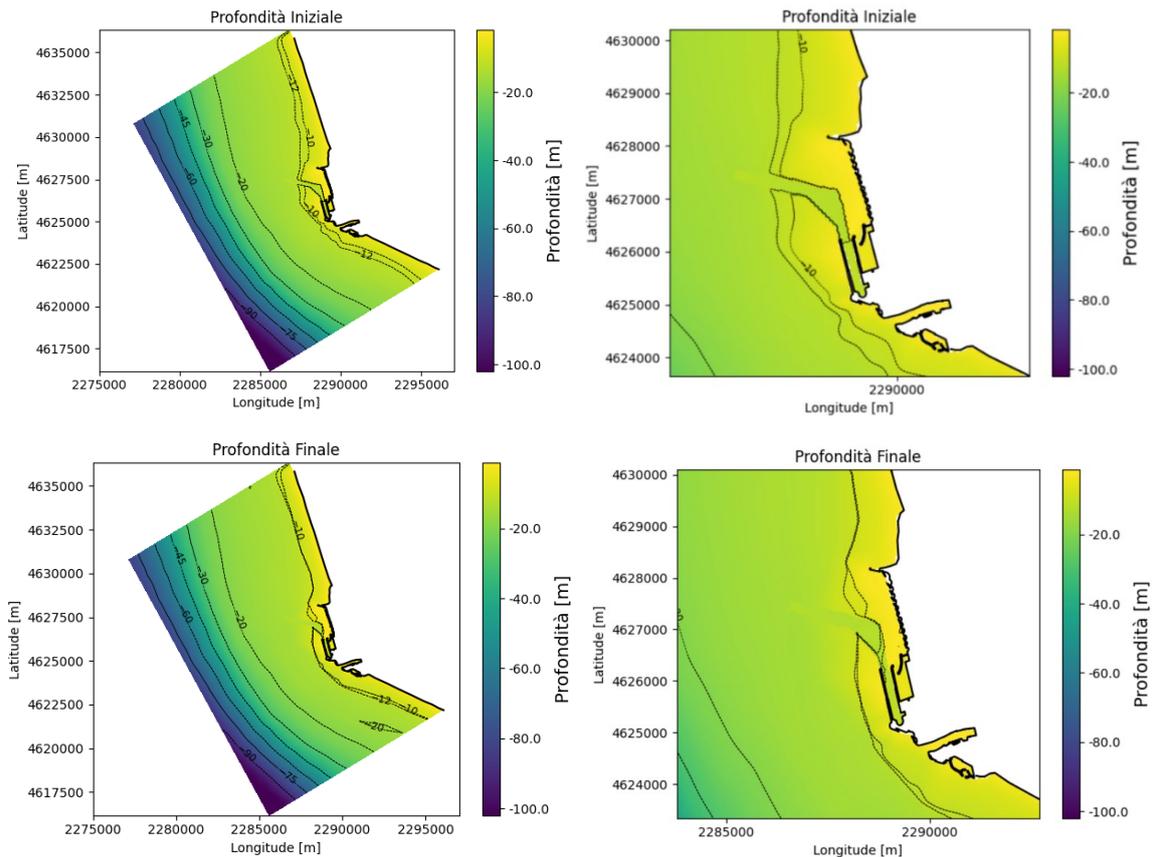


Figura 6.12: Evoluzione Media Annua del Fondo Marino

Al fine di valutare i tassi di sedimentazione all'interno delle aree dragate per la navigazione, sono state estratte le serie temporali di evoluzione del fondale marino in prossimità di diversi punti, i più interessanti dei quali ubicati rispettivamente a metà lunghezza del canale di accesso al terminal (P6), all'ingresso Terminal in corrispondenza

dell'estremità della diga foranea (P7), a circa metà del molo Claudio (P8), a circa metà dell'area di ormeggio (P9) ed infine nel bacino della Marina (P10 e P11) (Figura 6.13).

È possibile osservare quindi in Figura 6.14 i diversi andamenti della curva cumulativa di sedimentazione in prossimità dei punti più interni selezionati; al termine della simulazione, la quantità massima di sedimento depositato è di circa 0.35 per la località P7, mentre gli altri valori oscillano tra gli 0.10 e 0.30 metri.

Le quantità maggiori sembrano dunque depositarsi all'imboccatura del terminal traghetti (punti P7 e P8) e nell'area più interna dei bacini portuali (punti P9, P10 e P11), mentre al di fuori di essa (punti P5, P4, P3, P2 e P1) la quantità di sedimento accumulato non supera gli 0.10 m mediamente nell'anno.

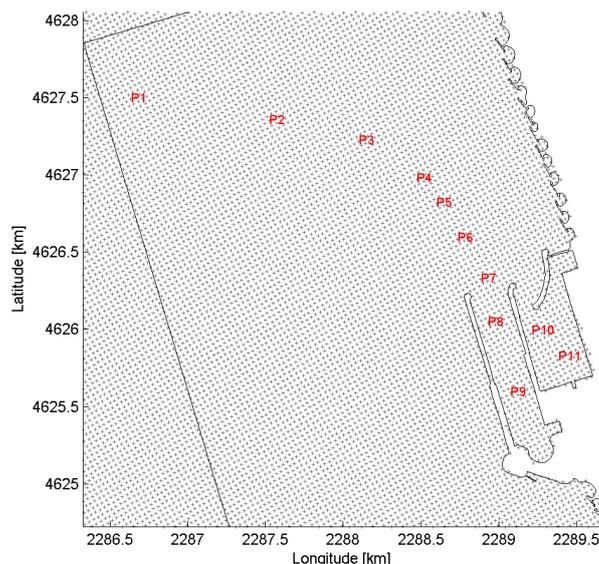


Figura 6.13: Ubicazione dei Punti di Estrazione dei Risultati del Modello Morfodinamico

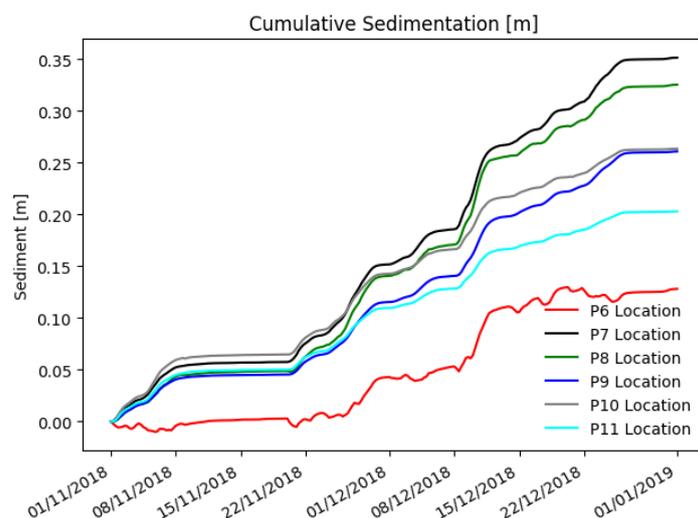


Figura 6.14: Serie Temporali della Cumulata di Sedimentazione estratta presso diversi Punti all'Interno del Canale di Navigazione

Al fine di valutare i tassi di sedimentazione attesi nelle aree dragate per l'accesso delle navi all'interno dell'area portuale, sono state considerate quattro aree di analisi, omogenee dal punto di vista delle caratteristiche batimetriche (Figura 6.15). La prima area (Canale di Accesso) è quella rappresentativa del canale di accesso al largo, zona compresa attualmente tra circa 12.5 m e 10 m di profondità, la seconda area (Bacino di Evoluzione) è

rappresentativa del bacino esterno di evoluzione delle navi, zona compresa attualmente tra circa 10 m e 6 m di profondità, mentre la terza area consiste nell'area più interna del canale di navigazione, caratterizzata da profondità medie attuali di circa 6 m (Canale Interno). L'ultima area (La Marina) è quella più interna del porto e a ridosso di costa, attualmente caratterizzata da fondali molto bassi.

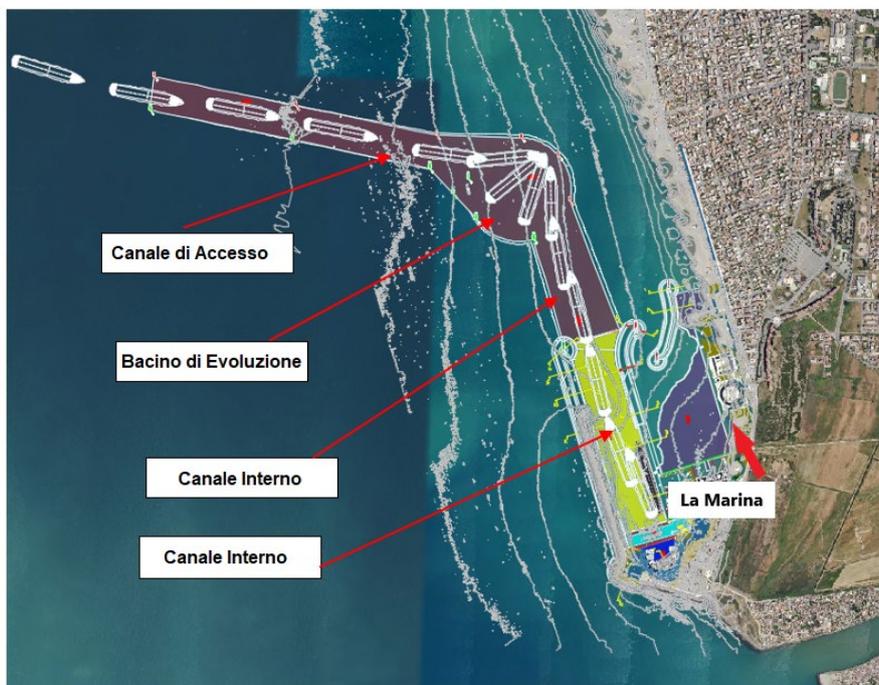


Figura 6.15: Aree di Analisi ai Fini della Valutazione dei Tassi di Sedimentazione

All'interno delle aree di navigazione, considerata la loro notevole estensione, ci si aspetta una sedimentazione variabile, caratterizzata da differenti tempi di sedimentazione:

- ✓ più veloci nelle aree maggiormente confinate quali l'imboccatura portuale e il bacino di attracco delle navi (Canale Interno, Figura 6.15);
- ✓ più lenti nelle aree più estese e su fondali maggiori, quali il bacino di evoluzione e il canale di accesso.

Tale aspetto è legato non solo direttamente alle caratteristiche geometriche delle aree indagate ma anche alle caratteristiche del campo idrodinamico altamente variabile che si instaura in prossimità del bacino stesso e alla natura del sedimento presente nell'area di studio.

I risultati delle valutazioni sono mostrati in Tabella 6.1 per le aree indagate (La Marina, Canale Interno, Bacino di Evoluzione e Canale di Accesso), in termini di tasso di sedimentazione ($m^3/h/m$), tempo in cui si verifica un riempimento medio di circa 1 m e tasso medio annuo di sedimentazione (m/anno).

La tabella mostra che mediamente nell'anno la Marina può essere interessata da tassi di sedimentazione di circa 0.20 m; il Canale Interno (Imboccatura Portuale e "Superyacht and Cruise Marina") da tassi di sedimentazione di circa 0.30 m. Nelle restanti aree sono invece attesi tassi medi annui di circa 0.10 m.

Tabella 6.1: Risultati Relativi alle Stime dei Tassi di Sedimentazione nelle Aree Dragate

Area di Dragaggio	Profondità del Dragaggio (m)	Tasso di Sedimentazione (m ³ /h/m)	Tempo per 1 m di Sedimentazione Media (mesi)	Tasso medio annuo di sedimentazione (m/anno)
Yacht La Marina	4.5	0.0523	48	0.20
Canale Interno – Imboccatura Portuale e “Superyacht and Cruise Marina”	11.5	0.0628	40	0.30
Bacino di Evoluzione	12.0	0.0209	120	0.10
Canale di Accesso	12.0	0.0209	120	0.10

6.4 SINTESI DEI RISULTATI

6.4.1 Confronto tra Configurazioni Attuale e di Progetto

In sintesi, è possibile valutare i risultati delle simulazioni morfodinamiche come segue.

- ✓ In condizioni di mareggiata proveniente da Sud Ovest, nella configurazione progettuale è possibile osservare un lieve aumento della concentrazione di sedimento sospeso in prossimità dell'uscita dell'imbocco dell'area portuale (Figura 6.16);
- ✓ In condizioni di mareggiata proveniente da Sud Ovest, il tasso di erosione/deposito risulta essere del tutto simile tra le due configurazioni indagate (Figura 6.14).

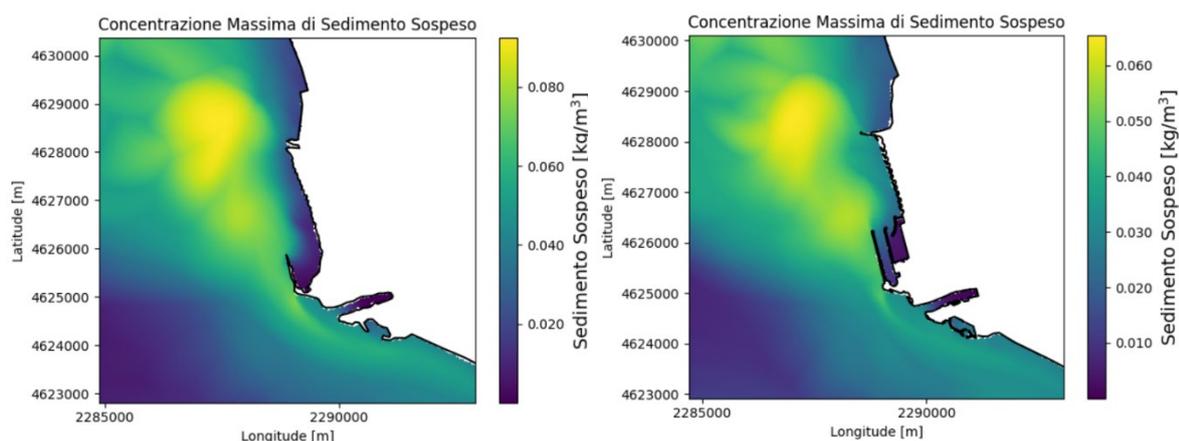


Figura 6.16: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso Associato a Mareggiata da Sud-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto

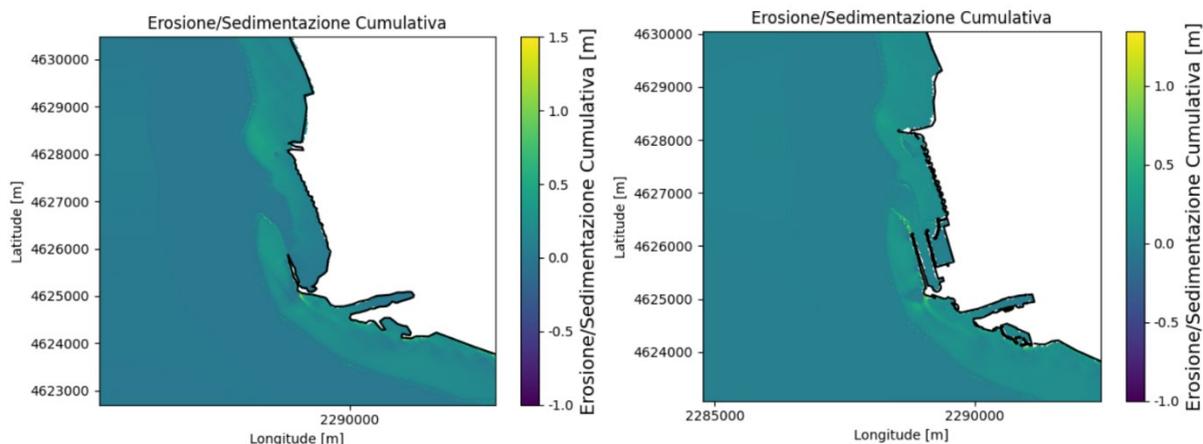


Figura 6.17: Campo di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Sud-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto

- ✓ Non si evidenziano variazioni significative tra le due configurazioni per quanto concerne la dispersione di sedimenti ed i tassi di accumulo/erosione in condizioni di mareggiata proveniente da Sud;
- ✓ In caso di mareggiata proveniente da Nord-Ovest, si osserva una maggiore dispersione di sedimento sospeso verso il largo, dovuta probabilmente alla presenza dell'opera portuale che induce il flusso da Nord a ruotare verso Sud/Sud-Ovest e quindi un trasporto di sedimento verso maggiori profondità (Figura 6.18);
- ✓ In caso di mareggiata proveniente da Nord-Ovest, si osservano tassi erosivi nelle due configurazioni del tutto simili, mentre le zone di leggero accumulo di sedimento a ridosso della diga portuale di sopraflutto risultano essere assenti nel caso di configurazione di progetto (Figura 6.19).

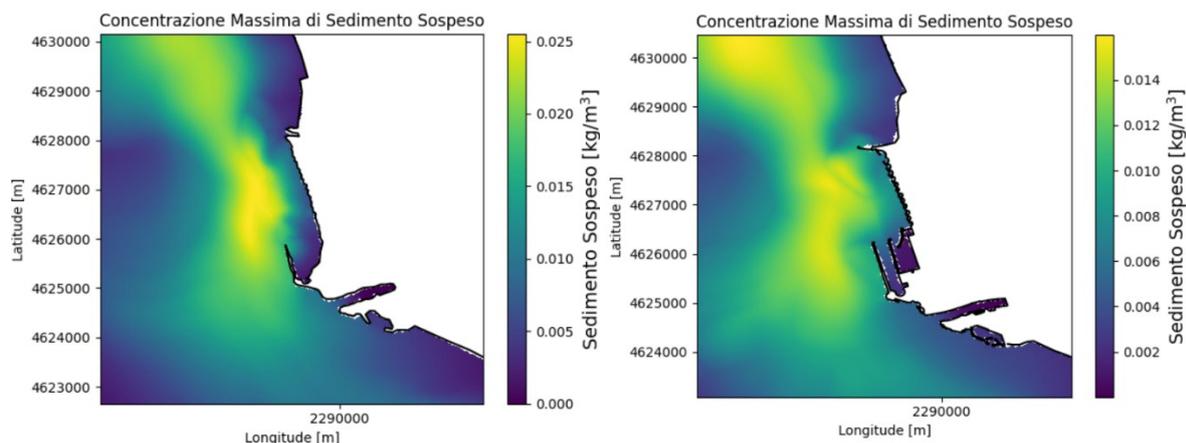


Figura 6.18: Campo di Concentrazione Massima di Sedimento Sospeso Associato a Mareggiata da Nord-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto

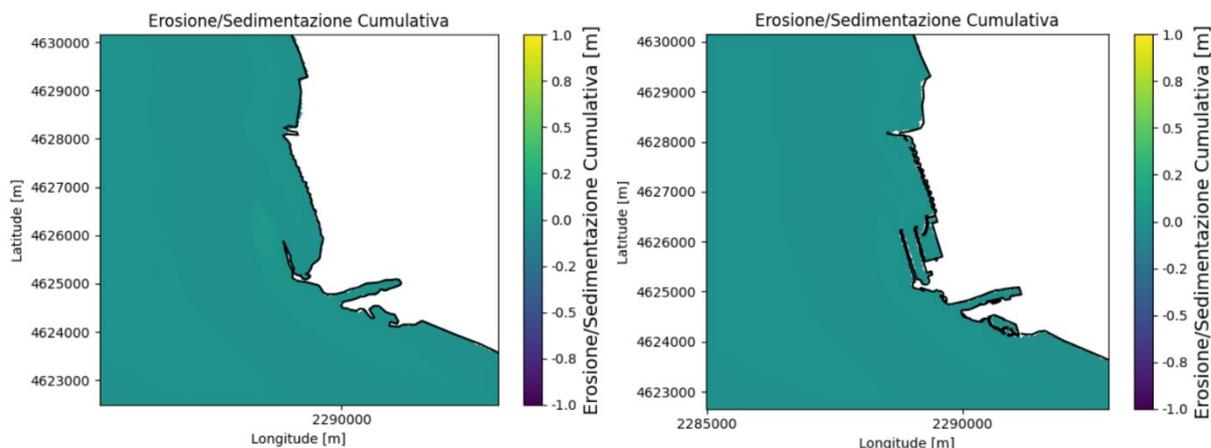


Figura 6.19: Campo di Accumulo/Erosione Associato a Mareggiata da Nord-Ovest – Configurazione Attuale/Configurazione di Progetto

6.4.2 Configurazione di Progetto – Evoluzione Media Annua dei Fondali

Per quanto riguarda l'evoluzione morfodinamica media annuale relativa alla configurazione di progetto, si evidenzia quanto segue:

- ✓ La dispersione di sedimento sospeso interessa gran parte del dominio di calcolo, con concentrazioni maggiori nelle aree a Nord della foce settentrionale del fiume Tevere;
- ✓ I fondali marini interessati dal progetto sono soggetti a sedimentazione nel lungo termine, caratterizzata da tassi variabili a seconda dell'area considerata;
- ✓ Tale sedimentazione è strettamente correlata alla disponibilità di sedimento mobile, alla natura del sedimento, alla batimetria, alle condizioni meteomarine, alle caratteristiche geometriche delle aree dragate e del bacino portuale che inducono variazioni al campo di moto ondoso e alla circolazione costiera;
- ✓ Mediamente nell'anno la Marina può essere interessata da tassi di sedimentazione di circa 0.20 m; il Canale Interno (Imboccatura Portuale e "Superyacht and Cruise Marina") da tassi di sedimentazione di circa 0.30 m. Nelle restanti aree (Bacino di Evoluzione e Canale di Accesso) sono invece attesi tassi medi annui di circa 0.10 m.

7 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI

Il presente studio, basato su simulazioni numeriche idro-morfodinamiche, ha fornito una valutazione della possibile variazione del fondale marino nell'area di studio, nella configurazione attuale e nella configurazione di progetto.

L'area di studio appartiene all'unità fisiografica compresa tra Capo Lınaro a Nord e Capo Anzio a Sud e si estende per circa 90 km; la foce del F. Tevere è situata nel tratto centrale di tale unità; il paraggio in esame risulta, pertanto, esposto ad un ampio settore di traversia, tutto principale, di ampiezza pari a circa 150°, compreso tra 160°N (Capo Anzio) e 310°N (Capo Lınaro).

I principali dati di base dello studio sono la relazione meteomarina (Doc. No. P0031150-D-0-OM00-RS-REL-01_00) e lo studio di caratterizzazione geotecnica dell'area (Doc. No. P0031150-D-0-MP00-GI-REL-03_00).

Per quanto concerne la circolazione generale nell'area di esame, le simulazioni idrodinamiche effettuate evidenziano una prevalenza delle correnti provenienti da Sud-Est e propaganti verso Nord-Ovest, con tendenza alla formazione di una circolazione anticiclonica sia nell'area a Sud che in quella a Nord del complesso portuale. In condizioni di vento di Maestrale, invece, si osserva un generale aumento dell'intensità delle correnti in prossimità dei bassi fondali e nei dintorni della foce del fiume Tevere.

Sono state condotte simulazioni idro-morfodinamiche nella configurazione attuale e nella configurazione di progetto, al fine di individuare potenziali effetti dell'opera a progetto sui litorali adiacenti e per effettuare una stima dei tassi di sedimentazione attesi nelle aree dragate.

Al fine di indagare i potenziali effetti dell'opera a progetto sull'ambiente circostante, dal punto di vista della morfodinamica costiera, sono state selezionate alcune mareggiate significative, sono state poi implementate nella catena modellistica ed è stato infine effettuato il confronto dei risultati ottenuti nelle due configurazioni indagate, attuale e di progetto.

I risultati non hanno evidenziato effetti rilevanti dell'opera sull'ambiente circostante: il progetto non sembra apportare modifiche significative ai campi di moto ondoso, circolazione costiera e morfodinamica costiera nell'area di studio. Le leggere variazioni idro-morfodinamiche rilevate rimangono circoscritte all'area compresa tra le due foci del fiume Tevere.

Sono poi state effettuate simulazioni di lungo termine, sulla configurazione di progetto, al fine di analizzare l'evoluzione media annua dei fondali marini nell'area di studio e di stimare i tassi di sedimentazione attesi nelle aree dragate. I principali risultati delle simulazioni sono i seguenti:

- ✓ le aree oggetto del dragaggio saranno soggette a sedimentazione nel lungo termine, con tassi variabili a seconda della zona considerata;
- ✓ sono stati stimati i seguenti tassi di sedimentazione media annua: la Marina può essere interessata da tassi di sedimentazione di circa 0.20 m; il Canale Interno (Imboccatura Portuale e "Superyacht and Cruise Marina") da tassi di sedimentazione di circa 0.30 m. Nelle restanti aree (Bacino di Evoluzione e Canale di Accesso) sono invece attesi tassi medi annui di circa 0.10 m;
- ✓ le aree più soggette a sedimentazione sono quelle dell'imboccatura portuale e area "Superyacht and Cruise Marina": dati i relativi tassi di sedimentazione, durante l'attività di esercizio del porto sarà necessario effettuare dragaggi manutentivi al fine di mantenere le profondità necessarie per un uso sicuro di tali aree da parte delle imbarcazioni.

Infine, allo scopo di ottimizzare la programmazione delle attività di escavo e la gestione dei materiali, si suggerisce fortemente di pianificare una campagna annuale di misura della sedimentazione nelle aree evidenziate come maggiormente soggette a tale processo. Sulla base delle rilevazioni sul tasso di sedimentazione, sarà possibile fornire alcune raccomandazioni operative quali, per esempio, la riduzione della velocità della nave in marcia addietro nel tratto di interesse (dall'estremità della diga fino all'ormeggio) in modo tale da ridurre i fenomeni di squat ed aumentare il franco sotto chiglia netto disponibile.

LSA01/EDI:/eba04

REFERENZE

- [1] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R.C. Ris, 1993, A spectral wave model for the coastal zone, Proceedings 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, Louisiana, July 25-28, 1993, New York, pp. 630-641
- [2] Holthuijsen, L.H., N. Booij and R. Padilla-Hernandez, 1997, A curvi-linear, third-generation coastal wave model, Conf. Coastal Dynamics '97, Plymouth, 128-136
- [3] Holthuijsen, L.H., N. Booij, R. Ris, J.H. Andorka Gal and J.C.M. de Jong, 1997, A verification of the third-generation wave model "SWAN" along the southern North Sea coast, Proceedings 3rd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, WAVES'97, ASCE, 49-63
- [4] Holthuijsen, L.H., R.C. Ris and N. Booij, 1998, A verification of the third-generation wave model SWAN, 5th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Jan. 27-30, 1998, Melbourne, Florida, 223-230
- [5] Holthuijsen, L.H., N. Booij and I.J.G. Haagsma, 1998, Comparing 1st-, 2nd - and 3rd-generation coastal wave modelling, 26th Int. Conf. Coastal Engng., Copenhagen, 140-149 Admiralty Tide Tables, 2012., Vol2.
- [6] Komen, G.J., P.A.E.M. Janssen, V. Makin, K. Mastenbroek and W. Oost, 1998: Review: On the sea state dependence of the Charnock parameter, J. Glob Atmos. Ocean System, 5, 367-388.
- [7] Komen, G.J., Cavaleri, L., Doneland, M., Hasselmann, K., Hasselmann S. and Janssen, P.A.E.M. (1994) Dynamics and modelling of ocean waves. Cambridge University Press, UK, 560pp.
- [8] Young, I. and L.A. Verhagen, 1996: 'The growth of fetch-limited waves in water of finite depth. Part I and II.', Coastal Engineering, 29 pp.47-99.
- [9] Young, I. and R.M. Gorman, 1995: 'Measurements of the evolution of ocean wave spectra due to bottom friction', J. Geophys. Res, 100, C6, pp.10987- 11004.
- [10] Young, I.R., 1999: Wind generated ocean waves, in Elsevier Ocean Engineering Book Series, Volume 2, Eds. R. Bhattacharyya and M.E. McCormick, Elsevier.
- [11] Mehta, A.J., Hayter, E.J., Parker, W.R., Krone, R.B., and Teeter, A.M., 1989. Cohesive Sediment Transport. I: Process Description. ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, 115(8): 1076–1093.
- [12] R.L. Soulsby, L. Hamm, G. Klopman, D. Myrhaug, R.R. Simons, G.P. Thomas, Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer, Coastal Engineering, Volume 21, Issues 1–3, 1993, Pages 41-69.
- [13] Egbert, G. D., A. F. Bennett, and Foreman M. G. G. , 1994, "TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model", J. Geophys. Res., 99(C12), 24821-24852, doi:10.1029/94JC01894.
- [14] Egbert, G. D., Erofeeva, S. Y., 2002, "Efficient Inverse Modeling of Barotropic Ocean Tides", J. Atmos. Oceanic Technol., 19, 183-204.
- [15] La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere, 2017. ISPRA.