



**RELAZIONE AVANZAMENTO:
ATTIVITA' RELATIVE ALLA CARATTERIZZAZIONE
MORFODINAMICA E DI TRASPORTO SOLIDO, IDRODINAMICA ED
ECOLOGICA DELL'UNITA' FISIOGRAFICA
CAPO LINARO CAPO D'ANZIO**





Indice

1. Introduzione.....	4
2. Area di studio.....	6
3. Avanzamento attività di ricerca.....	10
3.1 Descrizione dei modelli numerici.....	10
3.1.1. <i>Modello idrodinamico Shyferm</i>	10
3.1.2. <i>Modello di moto ondoso Wave Watch III</i>	14
3.1.3 <i>Modello di trasporto del sedimento SEDTRANS05</i>	15
3.1.4 <i>Modello morfologico X-BEACH</i>	17
3.2. Dataset necessario alla predisposizione dei modelli	19
3.2.1. <i>Analisi delle condizioni al contorno per la predisposizione a scala regionale</i>	19
3.2.2. <i>Integrazioni dei modelli nel Tevere</i>	22
3.3 Risultati preliminari dei modelli.....	24
3.3.1 <i>Risultati preliminari del modello Shyferm</i>	24
3.3.3 <i>Risultati preliminari del modello SEDTRANS</i>	31
3.4. Predisposizione GIS	33
3.5. Acquisizione dei dati di validazione e di input del modello a scala regionale: oceanografia sperimentale.....	34
3.5.1. <i>Campagne di misura colonna d'acqua</i>	34



<i>3.5.2 Studio della distribuzione del solido sospeso, della biomassa fitoplanctonica e della CDOM lungo l'unità fisiografica attraverso osservazioni satellitari</i>	<i>39</i>
<i>3.5.3. Studio della spiaggia sommersa, emersa e del rateo deposizionale.....</i>	<i>43</i>
<i>3.5.4. Caratterizzazione dei principali corsi d'acqua rilevanti ai fini della valutazione degli input fluviali.....</i>	<i>45</i>



1. Introduzione

Il presente progetto si inquadra in un ampio sistema di osservazione, monitoraggio ed analisi dell'ambiente marino che risponde all'esigenza di armonizzare la salvaguardia degli ecosistemi marini con una corretta gestione e sviluppo degli usi delle aree costiere. La risposta dei sistemi naturali alle variazioni generate da specifici interventi sulla costa si sovrappongono alle variazioni indotte dai trend climatici e dalle modifiche territoriali (uso del suolo, interventi sugli alvei, industrie) che avvengono nei bacini afferenti generando una sovrapposizione di effetti che modulano l'evoluzione del tratto di mare ricevente e delle coste a differenti scale spaziali e temporali.

Per poter analizzare un sistema così complesso e separare il più correttamente possibile le variazioni indotte da un'opera rispetto all'evoluzione del sistema stesso è quindi fondamentale conoscere le caratteristiche fisiche e dinamiche dell'area oggetto di studio e l'attuale stato ambientale, attraverso anche un'approfondita analisi dei principali impatti e delle pressioni che influiscono sull'intera area e gli habitat presenti.

Questo progetto si pone l'obiettivo di studiare le caratteristiche fisiche, chimiche, biologiche e dinamiche dell'area compresa tra Capo Linaro e Capo d'Anzio, attraverso uno studio multidisciplinare che prevede l'integrazione di dati osservativi e modellistica numerica al fine di analizzare gli eventuali effetti dovuti agli impatti dovuti alla costruzione delle nuove opere portuali. In questo modo sarà possibile coadiuvare lo sviluppo delle opere e la loro integrazione nell'area supportando la progettualità di interventi di prevenzione e mitigazione.

Le attività del progetto verranno svolte dalla Divisione OPA del CMCC, con il supporto scientifico e la partecipazione alle attività di ricerca di altri Enti e Istituti, quali: il Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (DEB) dell'Università degli studi della Tuscia, lo Scripps Institution of Oceanography UC San Diego, il CNR, il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Alma Mater Studiorum dell'Università di Bologna, il Dipartimento di Scienze dell'Università degli Studi di Roma Tre.

L'area è dominata dalla presenza del fiume Tevere che, essendo il principale corso d'acqua dell'Italia centrale, influenza in maniera significativa il bilancio sedimentario nell'area e la distribuzione delle biocenosi. La stessa area sarà interessata da una serie di attività legate alla realizzazione delle infrastrutture portuali connesse al 'Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino - I Lotto Funzionale'. Le



opere previste saranno realizzate in fasi differenti e le attività descritte nel presente progetto saranno funzionali alla realizzazione del I Stralcio del I Lotto Funzionale, come riportato in Figura 1.

Le opere ascritte al I Stralcio funzionale del I Lotto prevedono la realizzazione della Darsena pescherecci, protetta da opere foranee in parte conformi al I Lotto ed in parte riutilizzabili nel II Stralcio. Si tratta di un'infrastruttura dedicata alla flotta peschereccia di Fiumicino che costituirà il nucleo del I Lotto con 620 m di diga foranea di sopraflutto, 430 m di sottoflutto e 855 metri di banchine a servizio del naviglio con un bacino protetto di 80000 mq.

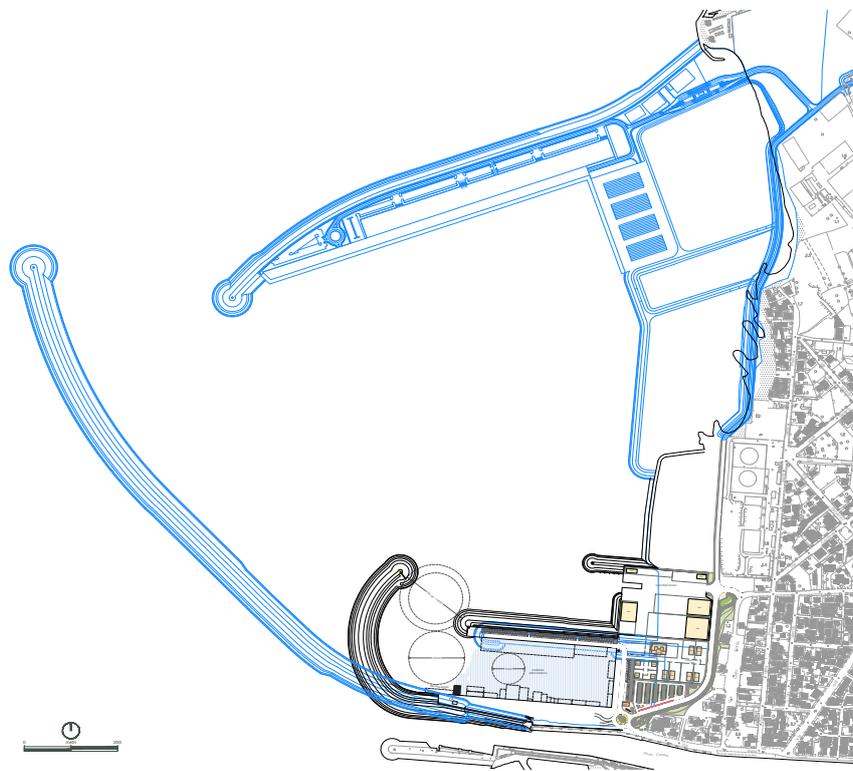


Figura 1. Progetto I Stralcio del I Lotto Funzionale del Nuovo Porto Commerciale di Fiumicino

Il progetto consentirà di acquisire dati utili a rispondere alle ottemperanze relative a due principali requisiti: rispondere alle prescrizioni del Decreto di Valutazione di Impatto Ambientale (V.I.A.) n. 7 del 16.02.2010 e integrare le differenti attività legate allo studio dettagliato dell'ecosistema marino costiero nell'area oggetto delle prescrizioni. Tiene conto, inoltre, delle osservazioni ISPRA di marzo 2015, Osservazioni al documento "Nuovo porto commerciale di Fiumicino. Progetto di monitoraggio



dei comparti biotico, morfodinamico e di trasporto solido lungo l'unità fisiografica "Capo Linaro - Capo d'Anzio" (rev. 1 del 7/2014).

Il progetto prevede quindi attività di campo e indagini a scala di Unità Fisiografica nonché la messa a punto di una serie di modelli numerici di simulazione, il cui avanzamento è di seguito descritto.

2. Area di studio

L'area di studio comprende un tratto di costa lungo circa 100 km e si estende da Capo Linaro a Nord e Capo Anzio a Sud, che costituiscono gli estremi dell'Unità Fisiografica.



Figura 2. Plume del Tevere (Copernicus Sentinel) del giorno 25/02/2019

Al centro dell'unità di questo tratto di costa è presente la cuspidè deltizia del Tevere che, con una lunghezza di 405 km e un bacino idrografico di 17375 km², rappresenta il principale corso d'acqua dell'Italia centrale.



La presenza del fiume Tevere condiziona con il suo apporto di sedimenti (Fig. 2) la natura dei fondali e la morfologia e sedimentologia dei litorali presenti lungo la costa che sono costituiti principalmente da depositi sabbiosi ad eccezione delle porzioni a nord e sud in prossimità dei due capi dove si ritrovano coste di natura rocciosa e ciottolosa.

Dalla analisi dei morfotipi costieri (Fig. 3) si evince come il morfotipo costiero dominante sia infatti quello di pianura alluvionale. Oltre al fiume Tevere, lungo l'area di studio sono presenti 13 bacini idrografici minori che presentano un regime torrentizio la cui portata è condizionata principalmente dal regime pluviometrico.



Figura 3. Morfotipi presenti nel Lazio (Ferretti et Al. 2003)

I fondali costieri (0 – 50 m) prospicienti la costa oggetto di studio presentano una pendenza che varia tra lo 0.4 % e il 2 % e si presentano per lo più con un andamento morfologico che riflette l'andamento della linea di costa ad eccezione di alcune aree (soprattutto nel settore a nord del Tevere) dove sono presenti degli affioramenti rocciosi che costituiscono delle secche di importante valore ecologico.

In particolare, procedendo da nord verso sud si incontrano dapprima le Secche di Macchia Tonda, dinanzi l'omonima riserva naturale, a nord del centro abitato di Cerenova; successivamente si incontrano le Secche di Flavia a largo del centro abitato di Ladispoli, le Secche di Palo a largo di Palidoro.



A sud della foce del Tevere, un'area di particolare rilevanza ecologica è costituita dall'Area Marina Protetta delle Secche di Tor Paterno che, situata ad una distanza tra le 4 e le 7 miglia dalla costa, di fronte alla tenuta presidenziale di Castelporziano, è caratterizzata dall'essere completamente sommersa con un fondale che varia dai 18 ai 60 m.

In generale l'area costiera e deltizia presenta un'alta antropizzazione con conseguente perdita dei tratti caratteristici di spiaggia, con particolare riferimento alle strutture dunali ed alle linee di riva interessate da opere di protezione dall'erosione. Stante la perdita di naturalità dell'area costiera portuale e peri-portuale, a livello preliminare sono state individuate quattro zone rappresentative tre in corrispondenza di aree costiere naturali: a nord Furbara e Passo Scuro, Castel Porziano a sud della foce del Tevere, una in corrispondenza della spiaggia di Fregene che, sebbene presenti un retrospiaggia fortemente antropizzato, costituisce un'area molto sensibile dal punto di vista della dinamica litoranea e dell'uso turistico; inoltre verranno analizzate l'area in prossimità del delta del fiume Tevere e le chiusure, a nord e a sud dell'unità fisiografica. Tali aree sono state successivamente utilizzate, come aree campione dove analizzare le eventuali variazioni ecologiche e geomorfologiche che potrebbero essere generate dalla realizzazione delle nuove opere della Darsena Pescherecci a Fiumicino; mentre tutte le informazioni utili ai fini dell'analisi del campo idrodinamico e della dispersione delle particelle fini e necessarie alla calibrazione dei modelli numerici saranno analizzate a scala di Unità fisiografica.

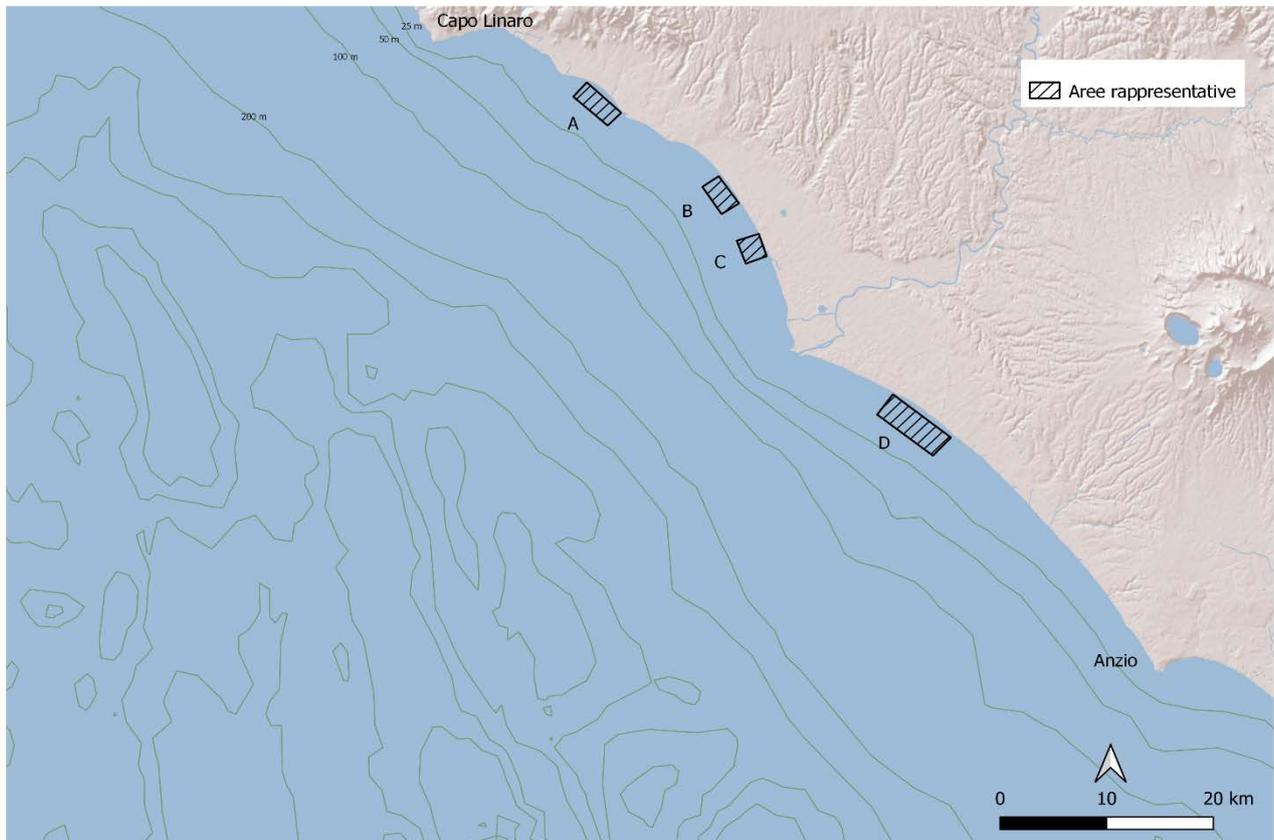


Figura 4. Unità Fisiografica Capo Linaro – Capo Anzio: aree costiere rappresentative presso Furbara (A), Passo Scuro (B), Fregene (C), Castel Porziano (D)



3. Avanzamento attività di ricerca

Le attività hanno avuto inizio a marzo 2020 con la predisposizione della modellistica numerica e delle attività di campo a supporto, per lo studio dei potenziali impatti della realizzazione del I stralcio del I Lotto Funzionale del Nuovo Porto commerciale di Fiumicino. Di seguito è riportata una breve descrizione delle attività predisposte ed effettuate.

3.1 Descrizione dei modelli numerici

3.1.1. Modello idrodinamico *Shyferm*

Il modello idrodinamico implementato sarà SHYFEM (Shallow water HYdrodynamics Finite Element Model) (Umgiesser et Al. 2004) utilizzato in modalità tridimensionale e baroclina, come già implementato con successo e in modo previsionale nelle zone costiere e nelle aree portuali della Puglia. Il modello è basato su un approccio a elementi finiti di tipo a griglia non strutturata riconfigurabile che avrà una risoluzione variabile, dell'ordine di 1 km in mare aperto in modo da potersi annidare su modelli a scala di bacino del sistema Copernicus Marine Service- CMEMS, raggiungendo 50 m sulla linea di costa e di 15 m nella zona portuale e periportuale di Fiumicino. La risoluzione verticale ha griglia non uniforme caratterizzata da 70 livelli.

Il modello risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclina nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nella equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passotemporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione.

Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo k- ϵ del modello GOTM (General Ocean Turbulence Model) descritto in Burchard e Petersen (1999). Le velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle



variabili sono calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Le equazioni, integrate in ogni livello, sono:

$$\frac{\partial U_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial U_l}{\partial y} - fV_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \quad (1)$$

$$-\frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_x^{top(l)} - \tau_x^{bottom(l)}) + A_H \left(\frac{\partial^2 U_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_l}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial V_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial V_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial V_l}{\partial y} + fU_l = -gh_l \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gh_l}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_{-H_l}^{\zeta} \rho' dz + \quad (2)$$

$$-\frac{h_l}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0} (\tau_y^{top(l)} - \tau_y^{bottom(l)}) + A_H \left(\frac{\partial^2 V_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_l}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \sum_l \frac{\partial U_l}{\partial x} + \sum_l \frac{\partial V_l}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

dove:

l = livello verticale,

(U_l, V_l) = trasporti orizzontali in ogni livello (velocità integrate),

f = parametro di Coriolis,

p_a = pressione atmosferica,

g = accelerazione gravitazionale,

ζ = livello del mare,



ρ_0 = densità media del mare,

$\rho = \rho_0 + \rho$ = densità del mare,

τ = stress interni alla superficie e al fondo di ogni strato,

h_l = spessore dello strato

H_l = profondità del fondo dello strato l,

A_H = viscosità orizzontale.

$$\tau_x^{surface} = c_D \rho_a w_x \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad \tau_y^{surface} = c_D \rho_a w_y \sqrt{w_x^2 + w_y^2} \quad (4)$$

$$\tau_x^{bottom} = c_B \rho_0 u_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad \tau_y^{bottom} = c_B \rho_0 v_L \sqrt{u_L^2 + v_L^2} \quad (5)$$

dove:

c_D = coefficiente di attrito del vento,

c_B = coefficiente di attrito al fondo,

ρ_a = densità dell'aria,

(w_x, w_y) = componenti del vento,

(u_L, v_L) = velocità dell'acqua nell'ultimo livello.

Per comprendere la capacità di rimescolamento del sistema e l'evoluzione della salinità, della temperatura dell'acqua o di un qualsivoglia tracciante, è stato studiato il comportamento di una sostanza conservativa disciolta in acqua. In un punto qualsiasi del sistema l'evoluzione della



concentrazione S di un traccianti conservativo è calcolabile applicando il principio di conservazione della massa (Umgiesser, 1997):

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} + \frac{\partial u_l S_l}{\partial x} + \frac{\partial v_l S_l}{\partial y} + \frac{\partial w_l S_l}{\partial z} = \nu_h \left(\frac{\partial^2 S_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_l}{\partial y^2} \right) + \nu_{v,l} \frac{\partial^2 S_l}{\partial z^2} + F \quad (6)$$

dove:

S_l = concentrazione nello strato l ,

ν_h e $\nu_{v,l}$ = coefficienti di diffusione orizzontale e verticale (calcolati dal modello k-E di chiusura della turbolenza),

F = sorgenti esterne.

La temperatura dell'acqua di un bacino varia nello spazio e nel tempo; questo indica che il calore fornito dalla radiazione solare viene assorbito, trasportato dalle correnti e scambiato con l'atmosfera per mezzo di diversi processi, come evaporazione e convezione.

La variazione della temperatura dell'acqua nel tempo è data dall'equazione 6 e gli scambi di calore con l'atmosfera sono contenuti nel termine sorgente $\phi = Q/C$ (Zampato et al., 1998). C è la capacità termica del volume V di fluido considerato con:

$$C = \rho V c$$

$c=4183$ [J/kg K] calore specifico e $\rho=1000.52$ [kg/m³] densità dell'acqua. Q è il flusso di calore per unità di tempo in W/m² scambiato tra l'atmosfera e mare attraverso la superficie marina, che si può scindere nella somma di quattro termini:



$$Q = Q_s + Q_b + Q_e + Q_h$$

I quattro contributi rappresentano altrettanti processi fisici:

- Q_s è il flusso di energia solare attraverso la superficie del mare (short-waveradiation). Q_s presenta un'elevata variabilità giornaliera e stagionale: i suoi valori dipendono da lunghezza del giorno, elevazione del sole, assorbimento da parte dell'atmosfera, copertura nuvolosa, riflessione alla superficie;
- Q_b è il flusso netto di calore tra atmosfera e mare, in base alla legge di Stefan- Boltzmann (long-waveradiation): è dato dalla differenza tra il flusso di energia irraggiato dalla superficie, a temperatura T_s , proporzionale a T_s^4 dalla legge di Stefan, e il flusso ricevuto dall'atmosfera, a temperatura T_a , proporzionale a T_a^4 . Q_b non presenta notevoli variazioni giornaliere o stagionali, né forti variazioni con la latitudine;
- Q_e è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera attraverso i processi di evaporazione e condensazione: è proporzionale al gradiente della concentrazione di vapore acqueo sopra la superficie del mare alla velocità del vento W ;

Q_h è il flusso di calore scambiato con l'atmosfera per conduzione e convezione. Questo termine è proporzionale al gradiente di temperatura nello strato atmosferico sopra la superficie del mare e come Q_e dipende dalla velocità del vento W , che è intesa come scala per l'effetto della turbolenza.

3.1.2. Modello di moto ondoso Wave Watch III

Per riprodurre il moto ondoso verso costa verrà utilizzato il modello Wave Watch III (WWIII) che è in grado di seguire lo stesso approccio della modellistica idrodinamica, ovvero (i) creazione di modelli a griglia non strutturata, e (ii) annidamento in modelli di scala di bacino del sistema Copernicus Marine Service.



WWIII è un modello d'onda di terza generazione sviluppato da NOAA/NCEP, e segue il modello fisico WAM Cycle4 (Gunther et al. 1993). WWIII differisce dai suoi predecessori in diversi punti come: le equazioni generali, la struttura del modello, i metodi numerici e le parametrizzazioni fisiche. Inoltre, WWIII si sta evolvendo da un modello a onde in un framework di modellazione a onde, che consente un facile sviluppo di ulteriori approcci fisici e numerici. Esso risolve l'equazione di "random phasespectral action density balance" per il numero d'onda e la direzione spettrale. L'assunzione implicita di questa equazione è che le proprietà del mezzo (profondità e corrente dell'acqua) nonché il campo d'onda stesso variano su scale temporali e spaziali che sono molto più grandi delle scale di variazione di una singola onda. Il modello ha alcune opzioni relative al termine sorgente in caso di acque estremamente basse ("surf zone"), nonché gli elementi wet/dry della griglia di calcolo. Le equazioni del modello WWIII includono rifrazione e tensione del campo d'onda dovuto alle variazioni temporali e spaziali della profondità media dell'acqua e della corrente media (maree, surge, ecc.). Le parametrizzazioni dei processi fisici includono la crescita e il decadimento delle onde dovuti alle azioni del vento, interazioni di risonanza non lineari, dissipazione ("whitecapping"), attrito del fondo, scattering del fondo, surf-break (ovvero, rottura indotta in profondità) e scattering dovuto a interazioni sul fondo dell'onda. La propagazione delle onde è considerata lineare, pertanto i pertinenti effetti non lineari come le interazioni di risonanza sono inclusi nei termini sorgente. WWIII utilizza una griglia regolarmente distanziata (non è necessario che gli incrementi di latitudine e longitudine siano uguali), di tipo cartesiana e non strutturata. Il modello d'onda WWIII può essere forzato con campi scalari di vento, copertura del ghiaccio, differenza di temperatura aria-mare e correnti e inizializzato con spettri di altezza, periodo e direzione significativi ai boundaries. Lo spettro delle onde sarà discretizzato in 24 direzioni e 30 frequenze a partire da 0.035 Hz (nell'oceano Atlantico) a 0.0417 Hz (nel Mar Mediterraneo), con il 10% di incremento su ciascun asse.

3.1.3 Modello di trasporto del sedimento SEDTRANS05

I risultati dell'accoppiamento del modello idrodinamico con quello di moto ondoso verranno utilizzati dal modello di trasporto dei sedimenti SEDTRANS05 per determinare la dispersione del materiale dragato e le zone di accumulo ed erosione in assenza ed in presenza del primo stralcio del porto. La



dinamica del materiale in sospensione viene descritto dall'equazione 6. Alla superficie e al fondo le condizioni di contorno dell'equazione 6 per i sedimenti sono:

$$+\nu_{v,top} \frac{\partial S_{top}}{\partial z} + w_s S_{top} = FS \quad z=\text{superficie del primo livello}$$

$$-\nu_{v,bot} \frac{\partial S_{bot}}{\partial z} + w_s S_{bot} = ED \quad z=\text{fondo dell'ultimo livello}$$

dove FS è la quantità di sedimento sversata in superficie ed ED è il flusso netto di sedimento tra fondale marino e colonna d'acqua, calcolato come differenza tra deposizione e risospensione. Tale termine viene calcolato dal modello SEDTRANS05 (Neumeier et al., 2008). I fenomeni di erosione e deposizione avvengono principalmente all'interno dello strato limite, situato tra la colonna d'acqua e il fondale. Lo sforzo tangenziale al fondo indotto dai processi idrodinamici viene calcolato applicando la teoria dello strato limite della scarpata continentale ("Continental shelfbottom boundarylayer theory") di Grants e Madsen (1986). La scabrezza del fondale è calcolata ad ogni intervallo temporale, considerando tre diverse tipologie di scabrezza: granulare, della morfologia del fondo e quella indotta dal trasporto al fondo.

SEDTRANS05 non solo calcola i parametri dello strato limite, ma predice anche lo sviluppo delle forme di fondo e i tassi di trasporto solido, sia come carico di fondo sia in sospensione, per sabbie e sedimenti coesivi. Il modello matematico SEDTRANS05 può essere usato per predire il tasso di trasporto e la direzione di sabbia o fango in condizioni di corrente stazionaria oppure onde e correnti combinate, al di fuori della zona di frangimento delle onde. Il modello computa entrambe le tipologie di trasporto dei sedimenti, al fondo per i sedimenti non coesivi e sospeso per sedimenti coesivi e non coesivi. In particolare, il trasporto al fondo per i sedimenti non coesivi può essere calcolato per mezzo di diverse formule presenti all'interno di SEDTRANS05. Diversamente, nel momento in cui lo sforzo



tangenziale al letto supera il valore di sforzo critico per la sospensione, le particelle di sedimenti entrano nella colonna d'acqua e vengono trasportate sotto l'azione delle correnti.

SEDTRANS05 consente inoltre di calcolare il flusso sedimentario netto tra la colonna d'acqua e il fondo sia per i sedimenti coesivi sia per quelli non-coesivi. Per i sedimenti coesivi il flusso è dato semplicemente dalla differenza tra il tasso di erosione e quello di deposizione, mentre per quelli non-coesivi il flusso netto è computato come differenza tra la concentrazione di equilibrio e la concentrazione dello strato più basso della colonna d'acqua. In questo modo, quando la concentrazione dei sedimenti vicino al fondo è inferiore a quella di equilibrio, il flusso netto di sedimenti è diretto dal letto alla colonna d'acqua, viceversa quando la concentrazione vicino al fondo è superiore a quella di equilibrio.

La variazione morfologica del fondale è uguale alla somma dei contributi erosivi e di deposizione delle diverse frazioni sedimentarie presenti nella zona di studio e viene calcolata per entrambe le tipologie di trasporto ad ogni intervallo temporale del modello, in modo tale da aggiornare la topografia per il modello idrodinamico. SEDTRANS05 è in grado inoltre di computare i processi di flocculazione e consolidamento del fondale, di rilevante importanza per sedimenti coesivi.

Per caratterizzare il fondale e suddividere il trasporto di materiale possono essere definite diverse classi granulometriche. Il fondale è rappresentato tramite una sovrapposizione di strati sedimentari indipendenti, ciascuno caratterizzato dalla propria granulometria. Tra di essi il più superficiale rappresenta lo strato attivo per il trasporto di sedimenti. Per ogni frazione di sedimenti viene definito un volume disponibile all'interno di ciascuno strato, limitandone la quantità erodibile. Di conseguenza, il modello può tenere conto la diversa resistenza all'erosione fra gli strati e la distribuzione spaziale dei sedimenti. Nel momento in cui uno strato viene completamente eroso, viene rimosso dalla simulazione e gli strati inferiori vengono rialzati di un livello.

3.1.4 Modello morfologico X-BEACH

XBeach è un modello 2DH (depth averaged), in grado di simulare il comportamento di una spiaggia soggetta ad eventi intensi di mareggiata, includendo i fenomeni di erosione della duna, inondazione



e formazione di breccie. Il campo di utilizzo di tale modello morfologico è circoscritto in particolare alla scala temporale degli eventi di mareggiata, che in pochi giorni possono causare ingenti fenomeni erosivi della spiaggia. Il suo utilizzo è quindi limitato a scale spaziali relativamente piccole e ad intervalli temporali di breve/medio periodo (giorni/mesi). Il modello è in grado di risolvere coppie di equazioni orizzontali 2D legate ai fenomeni di propagazione dell'onda, di flusso, di trasporto sedimentario e di variazione del fondale, imponendo condizioni al contorno di onde variabili (spettrali) e di flusso. XBeach tiene conto della variazione temporale dell'altezza d'onda e quindi è in grado di risolvere il moto legato alle long-wave, generato da tale variazione. Il moto dell'azione ondosa per le onde corte viene modellato mediante l'equazione:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = - \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma}$$

Dove A è l'azione ondosa, c_x , c_y e c_θ sono le velocità di propagazione nello spazio orizzontale e nello spazio direzionale, D_v è la dissipazione legata alla vegetazione e σ la frequenza dell'onda. La formulazione per il calcolo della dissipazione legata al frangimento dell'onda, D_w , può essere scelta tra 5 diverse formulazioni implementate all'interno del software, mentre la dissipazione legata al fondale D_f è calcolata mediante l'equazione:

$$D_f = \frac{2}{3} \rho f_w \left(\frac{\pi H_{rms}}{T_{m01} \sinh kh} \right)$$

dove ρ è la densità dell'acqua, f_w è il coefficiente di attrito al fondo e H_{rms} è l'altezza d'onda quadratica media. Nella formula, T_{m01} rappresenta il periodo medio dell'onda definito dai momenti di ordine zero e uno dello spettro, k è il numero d'onda e h è la profondità.

Xbeach considera l'energia delle onde come mediata sulla loro lunghezza e quindi non è in grado di simulare la forma dell'onda. Tuttavia, quando le onde si propagano dal largo verso riva la loro forma si modifica gradualmente a causa della combinazione dei processi di shoaling, frangimento e non-linearità. All'interno del modello l'effetto dell'asimmetria e della distorsione dell'onda viene considerato all'interno della equazione di avvezione-diffusione mediante il calcolo della velocità u_a .



La formulazione per il trasporto sedimentario è quella definita da Soulsby-Van Rijn (Soulsby, 1997; van Rijn, 1985) mentre la concentrazione di equilibrio è calcolata come segue:

$$C_{eq} = \max \left(\min \left(C_{eq,b}, \frac{1}{2} C_{max} \right) + \min \left(C_{eq,s}, \frac{1}{2} C_{max} \right), 0 \right)$$

Il sistema di coordinate su cui si basa il modello è caratterizzato dall'asse delle ascisse con orientamento verso la costa e l'asse delle ordinate orientato lungo riva. Il modello utilizza una griglia di calcolo sfalsata, nella quale alcune variabili vengono definite al centro delle celle e altre sulle loro interfacce. XBeach permette di utilizzare una griglia con distanze tra i punti variabili in entrambe le direzioni. Il modello può essere utilizzato in modalità "idrostatica" e "non-idrostatica"; nel primo caso, la variazione dell'ampiezza delle onde corte viene risolta in maniera separata dalle onde lunghe, dalle correnti e dalle variazioni morfologiche mentre nel secondo caso, tali processi vengono risolti includendo l'azione delle onde corte, a discapito del maggiore costo computazionale. Inoltre, XBeach può essere utilizzato in modalità mono-dimensionale (1D) e bi-dimensionale (2D). Nel primo caso il dominio spaziale è limitato al singolo transetto perpendicolare a riva, mentre nel secondo è possibile eseguire simulazioni su aree costiere più estese. La scelta tra le due diverse modalità dipende, in particolare, dallo scopo dell'analisi, in riferimento ai fenomeni da studiare e al compromesso che si vuole raggiungere tra il costo computazionale del modello e la precisione richiesta nei risultati. Per maggiori dettagli sulle formulazioni del modello XBeach, si faccia riferimento a Roelvink et al., (2009).

3.2. Dataset necessario alla predisposizione dei modelli

3.2.1. Analisi delle condizioni al contorno per la predisposizione a scala regionale

Il modello idrodinamico utilizzato in questo studio è SHYFEM (Shallow water HYdrodynamics Finite Element Model) (Umgiesser et Al. 2004) che è stato utilizzato in modalità tridimensionale e baroclina, come già implementato con successo e in modo previsionale nelle zone costiere e nelle aree portuali della Puglia. Il modello calcola campi tridimensionali della velocità delle correnti marine, del livello del mare rispetto alla superficie di riferimento, della temperatura e della salinità



Esso risolve le equazioni primitive, integrate verticalmente su ogni livello. La diffusione orizzontale, il gradiente di pressione e l'avvezione baroclinica nell'equazione del momento sono trattati in modo esplicito. La forza di Coriolis e il gradiente di pressione barotropica nell'equazione del momento e il termine divergenza nella equazione di continuità sono trattati in modo semi-implicito. I termini di stress verticale e il termine di attrito al fondo sono trattati in implicito per ragioni di stabilità. La caratteristica fondamentale del metodo semi-implicito è che unisce i vantaggi di uno schema implicito, incondizionata stabilità per ogni passo temporale scelto, con quelli dello schema esplicito, quali la riduzione della matrice di risoluzione. Per il calcolo della diffusività verticale e viscosità è stato utilizzato uno schema di chiusura turbolenza. Questo schema è un adattamento del modulo k- ϵ del modello GOTM (General Ocean Turbulence Model) descritto in Burchard e Petersen (1999). Le velocità sono calcolate al centro di ogni elemento, mentre il livello temperatura e salinità è calcolato nei nodi della griglia. Verticalmente il modello descrive la colonna d'acqua tramite livelli Z di diverso spessore. La maggior parte delle variabili sono calcolate al centro di ogni strato, mentre i termini di stress e le velocità verticali sono risolti alle interfacce tra gli strati.

Il modello di moto ondoso utilizzato è il Wave Watch III che consiste in un modello d'onda di terza generazione sviluppato da NOAA/NCEP, e segue il modello fisico WAM Cycle4 (Gunther et al. 1993). Il modello è in grado di calcolare i principali parametri del moto ondoso, come altezza d'onda significativa, periodo di picco e direzione media, in ogni punto del dominio di calcolo che è lo stesso del modello idrodinamico Shyftem. Esso risolve l'equazione di "random phasespectral action density balance" per il numero d'onda e la direzione spettrale. Il modello ha alcune opzioni relative al termine sorgente in caso di acque estremamente basse ("surf zone"), nonché gli elementi wet/dry della griglia di calcolo. Le equazioni del modello WWIII includono rifrazione e tensione del campo d'onda dovuto alle variazioni temporali e spaziali della profondità media dell'acqua e della corrente media (maree, surge, ecc.). Le parametrizzazioni dei processi fisici includono la crescita e il decadimento delle onde dovuti alle azioni del vento, interazioni di risonanza non lineari, dissipazione ("whitecapping"), attrito del fondo, scattering del fondo, surf-break (ovvero, rottura indotta in profondità) e scattering dovuto a interazioni sul fondo dell'onda. La propagazione delle onde è considerata lineare, pertanto i pertinenti effetti non lineari come le interazioni di risonanza sono inclusi nei termini sorgente.



Il dominio del modello Shyftem e del modello Wave Watch III si estende da Civitavecchia a nord a Torre Astura a sud e comprende l'unità fisiografica Capo Linaro-Capo Anzio che costituisce l'area di studio del presente progetto. La linea di costa è stata ricavata utilizzando immagini satellitari ad alta risoluzione relativi alla stessa stagione, integrate con quella più aggiornata (sempre nella stessa stagione delle immagini satellitari) presente nel dataset di Open Stree Map. Il dominio si estende a largo fino alla batimetria dei - 1000 m che si trovano a circa 35 km di distanza dalla costa. In seguito è stato costruito un nuovo dominio di calcolo dove è stata integrata la configurazione del primo stralcio del nuovo porto di Fiumicino, al fine di simulare l'effetto della nuova opera sulla dinamica costiera e per valutare le differenze con la situazione ante operam. La morfologia sommersa è stata riprodotta utilizzando i rilievi di dettaglio forniti dall'Autorità di Sistema Portuale nella zona in cui verrà realizzata la nuova opera, a cui sono stati integrati i dati disponibili nella piattaforma Emodnet. Il dominio è costituito da una griglia orizzontale agli elementi finiti con risoluzione variabile da 3000 m in mare aperto a 50/100 m lungo la costa dell'unità fisiografica e con infittimenti maggiori fino a 20 m a nord di Fiumara Piccola, dove verrà realizzato il primo stralcio del nuovo Porto di Fiumicino (Fig. 1). Gli strati della griglia verticale hanno uno spessore non uniforme, con una maggiore risoluzione nella zona superficiale (spessore degli strati di 1 m).

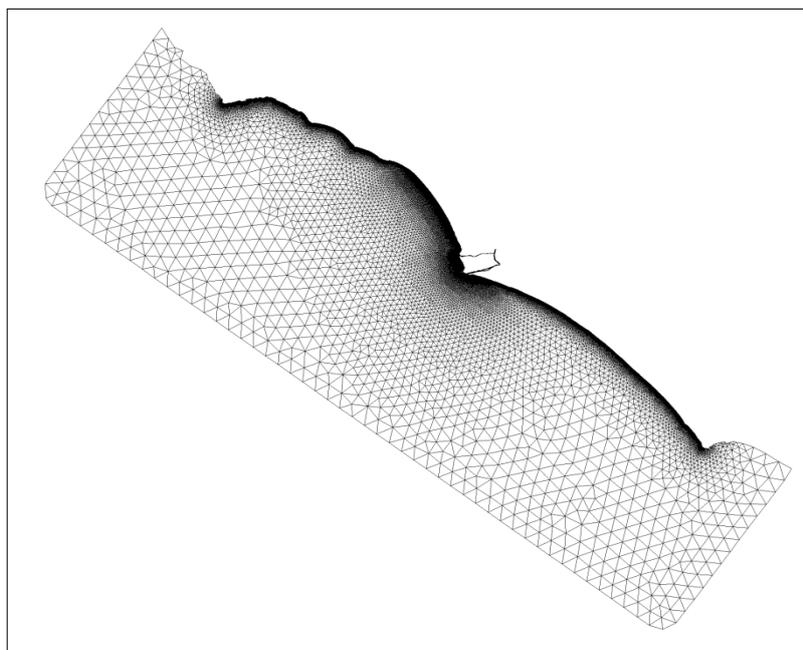


Figura 5 griglia di calcolo del modello Shyftem e del modello Wave Watch III



Il modello Shyfer è inizializzato e annidato nel sistema Copernicus, forzato alle condizioni al contorno da MFS e da OTPS (OSU Tidal Prediction Software, codice in grado di fornire il segnale di marea) e forzato alla superficie dai campi di ECMWF. Così come il modello Shyfer, anche Wave Watch III è inizializzato e annidato nel sistema Copernicus, forzato alle condizioni al contorno dal modello WAM applicato sull'intero bacino del mar Mediterraneo e forzato alla superficie dai campi di ECMWF.

Il modello Shyfer e il modello Wave Watch III sono stati utilizzati per riprodurre le condizioni idrodinamiche e di moto ondoso che sono intercorse tra il 2018 e il 2019 all'interno dell'area di studio. I risultati delle simulazioni sono stati utilizzati per analizzare la distribuzione mensile e stagionale della temperatura, salinità, corrente marina e parametri del moto ondoso nella zona di interesse.

Per calcolare il trasporto del sedimento all'interno del dominio di calcolo viene utilizzato il modello SEDTRANS che tiene conto dei risultati dei due modelli precedenti per determinare lo spostamento del materiale sedimentario. Il modello calcola la concentrazione di sedimento di diversa granulometria e le zone soggette a processi di sedimentazione e di erosione (morfologia sommersa). Il modello è stato inizializzato con i dati granulometrici relativi a campionamenti del fondale svolti negli anni passati all'interno dell'unità fisiografica ed effettuati dalla linea di riva fino ad una profondità di circa 20 m. Sono stati definiti parametri statistici dei sedimenti come il D50 e la percentuale di ghiaia, sabbia e limo per permettere al modello SEDTRANS05 di partire da una condizione molto vicina a quella reale.

3.2.2. Integrazione dei modelli nel Tevere

I fiumi con una maggiore portata liquida annuale media all'interno del tratto di costa che delimita l'unità fisiografica sono Fiumara Piccola e Fiumara Grande. Rappresentano i due rami terminali del Tevere che è il principale fiume dell'Italia centrale e peninsulare; con 405 km di corso è il terzo fiume italiano per lunghezza dopo il Po e l'Adige. I dati di livello e di portata liquida relativi al 2018-2019, scelto come periodo di indagine, sono forniti dall'Ufficio Idrografico della Regione Lazio che detiene diverse stazioni di rilevamento lungo tutto il percorso del fiume Tevere. Quelle scelte per questo



studio sono la stazione di Ripetta per quanto riguarda la portata liquida e la stazione di Capo Due Rami per quanto concerne il livello idrometrico. L'input fluviale è stato aggiunto nella simulazione idrodinamica del modello Shyftem che riproduce le condizioni intercorse tra il 2018 e il 2019. La portata del fiume è stata riprodotta quindi utilizzando direttamente i dati orari forniti dall'Ufficio Idrografico della Regione Lazio.

Sono state analizzate due diverse configurazioni per stabilire quale delle due fornisce risultati migliori:

1) CONF1 : immissione di dati di portata liquida, temperatura e salinità a monte del punto di intersezione dei due rami del fiume Tevere (in prossimità di Capo due Rami);

2) CONF2: immissione diretta nella zona delle foci di Fiumara Piccola e Fiumara Grande inserendo differenti valori di portata liquida calcolata sulla base dei più recenti riferimenti bibliografici (la portata di Fiumara Piccola è di 1/5 rispetto a quella di Fiumara Grande).

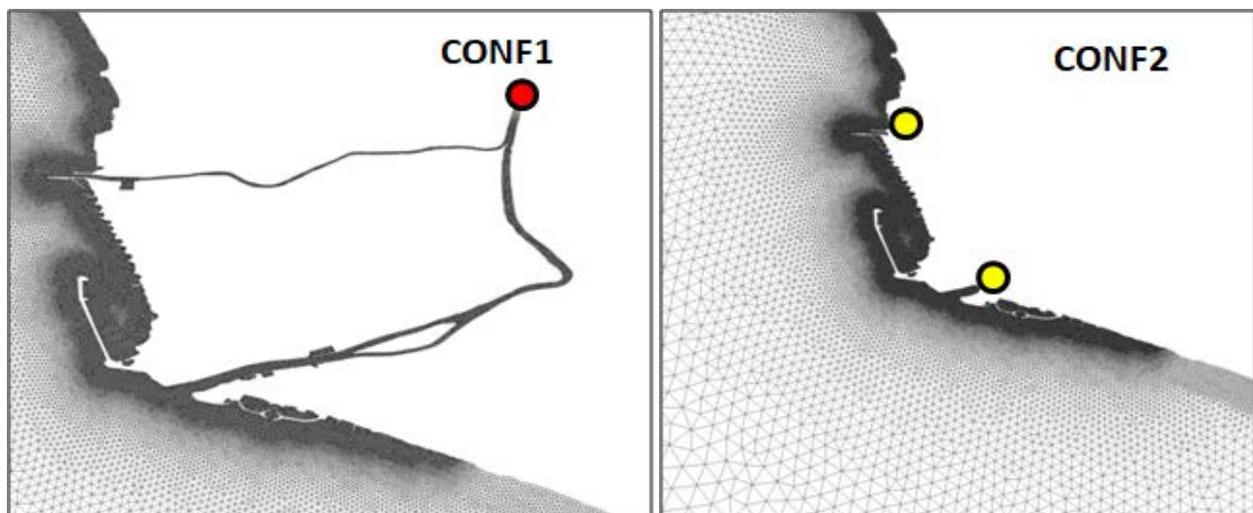


Figura 6 configurazioni utilizzate nel modello Shyftem per riprodurre l'input fluviale del fiume Tevere

Anche nel modello SEDTRANS05 è stato utilizzato l'input fluviale per riprodurre l'apporto di materiale sedimentario del fiume Tevere. In mancanza di dati misurati la portata solida è stata



calcolata dalla formulazione di Van Rijn utilizzando i dati di portata liquida, livello idrometrico, la sezione del fiume nel punto di rilascio e la granulometria dei sedimenti presenti nell'alveo.

3.3 Risultati preliminari dei modelli

3.3.1 Risultati preliminari del modello Shyfer

I risultati del modello Shyfer sono stati inizialmente confrontati con i risultati del modello MFS per verificare che le modalità con cui vengono fornite le condizioni iniziali e al contorno siano corrette. Per effettuare il confronto è stato considerato un punto a largo di Fiumicino, denominato OP, dove sono stati costruiti diagrammi polari che definiscono la direzione e l'intensità della corrente superficiale su base annuale e stagionale.



Figura 7 punto utilizzato per confronto con i risultati del modello MFS

In figura 8 si può vedere come la direzione della corrente marina predominante dell'area di studio sia da Sud-Est verso Nord-Ovest e che il modello Shyfer, per entrambe le configurazioni implementate, fornisce risultati molto simili ad MFS sia in termini di intensità che direzione.

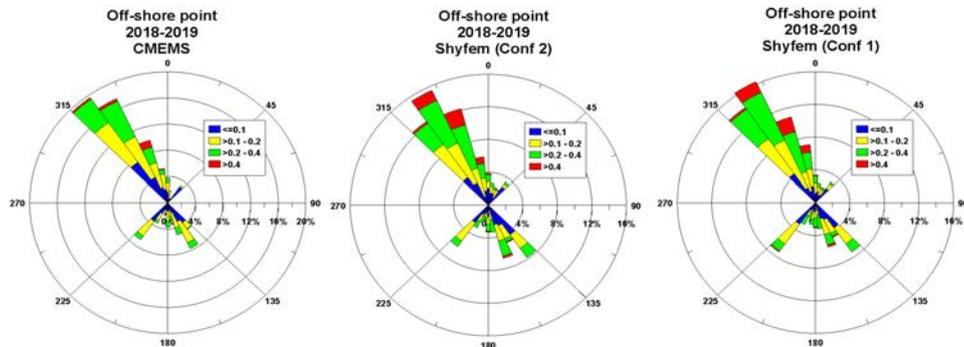


Figura 8 diagrammi polari delle correnti marine calcolate con il modello MFS e con le due diverse configurazioni del modello Shyfer

La temperatura calcolata dal modello Shyfer è stata confrontata con quella rilevata da satellite nel periodo compreso tra il 2018 e il 2019. Il risultato evidenzia che esiste una stretta relazione tra i dati satellitari e del modello nel periodo invernale in cui la temperatura dell'acqua superficiale è molto bassa, mentre c'è una maggiore discrepanza durante il resto dell'anno ed in particolare nel periodo estivo.

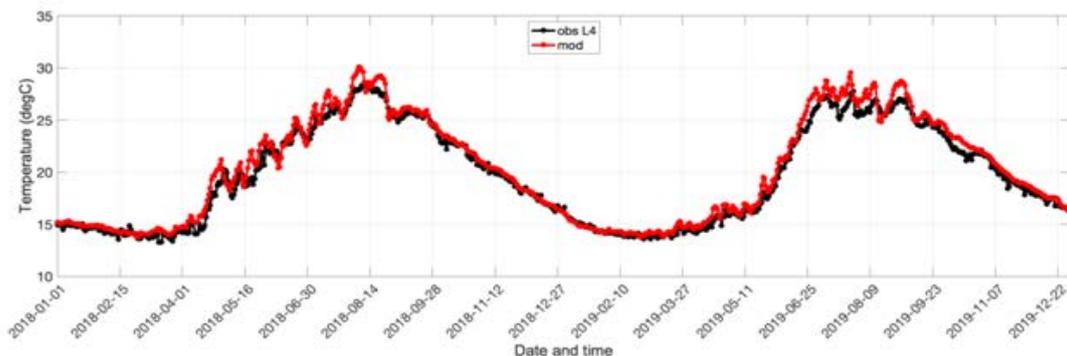


Figura 9 confronto tra la temperatura misurata da satellite (nero) e quella calcolata da Shyfer (rosso)

E' stata in seguito misurata anche l'affidabilità con cui il modello riproduce la variazione verticale di temperatura e salinità utilizzando dati acquisiti dalla sonda multiparametrica nel punto CO3 nel periodo compreso tra Giugno ed Agosto del 2019 (per un totale di 51 profili verticali).

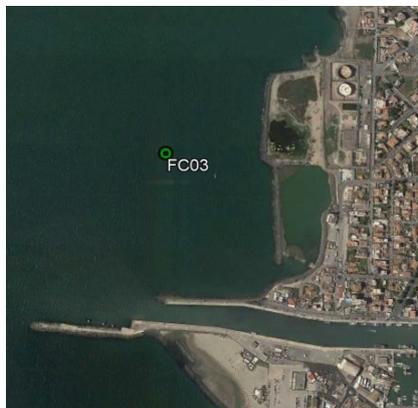


Figura 10 Punto in cui sono stati effettuati i campionamenti con la sonda multiparametrica nel periodo di Giugno-Agosto 2019

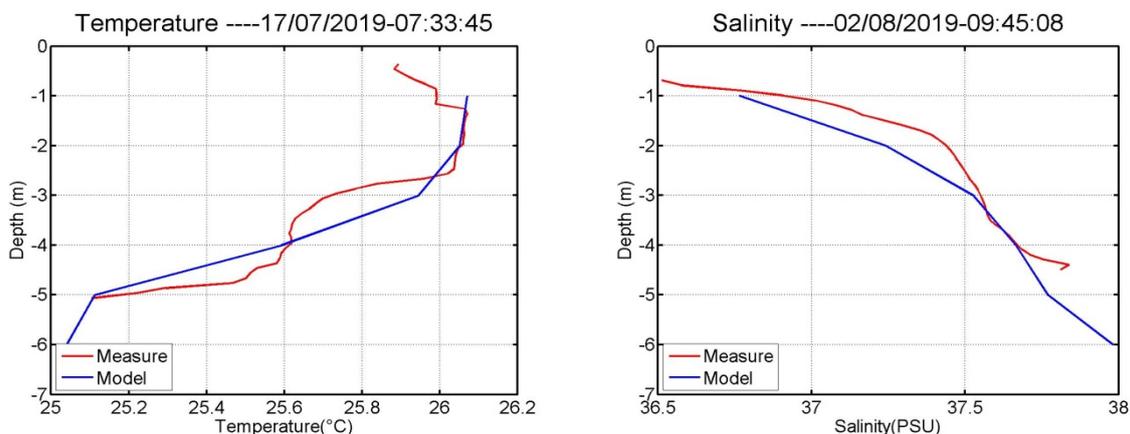


Figura 11 confronto tra i profili di temperatura (a sinistra) e salinità (a destra) ottenuti con le misure in situ (rosso) e il modello (blu)

I risultati delle simulazioni relative al periodo 2018 e 2019 sono stati analizzati sull'intera unità fisiografica oggetto di studio, al fine di determinare la media mensile e quella stagionale della temperatura, salinità e velocità delle correnti marine superficiali. Di seguito viene riportata la situazione dei soli mesi invernali.



Per quanto riguarda la temperatura, nei mesi invernali il modello evidenzia un gradiente ben definito tra le acque costiere più fredde e quelle di largo più calde; mentre in corrispondenza delle foci fluviali la temperatura superficiale del mare è di pochi gradi inferiore a quella dell'ambiente circostante.

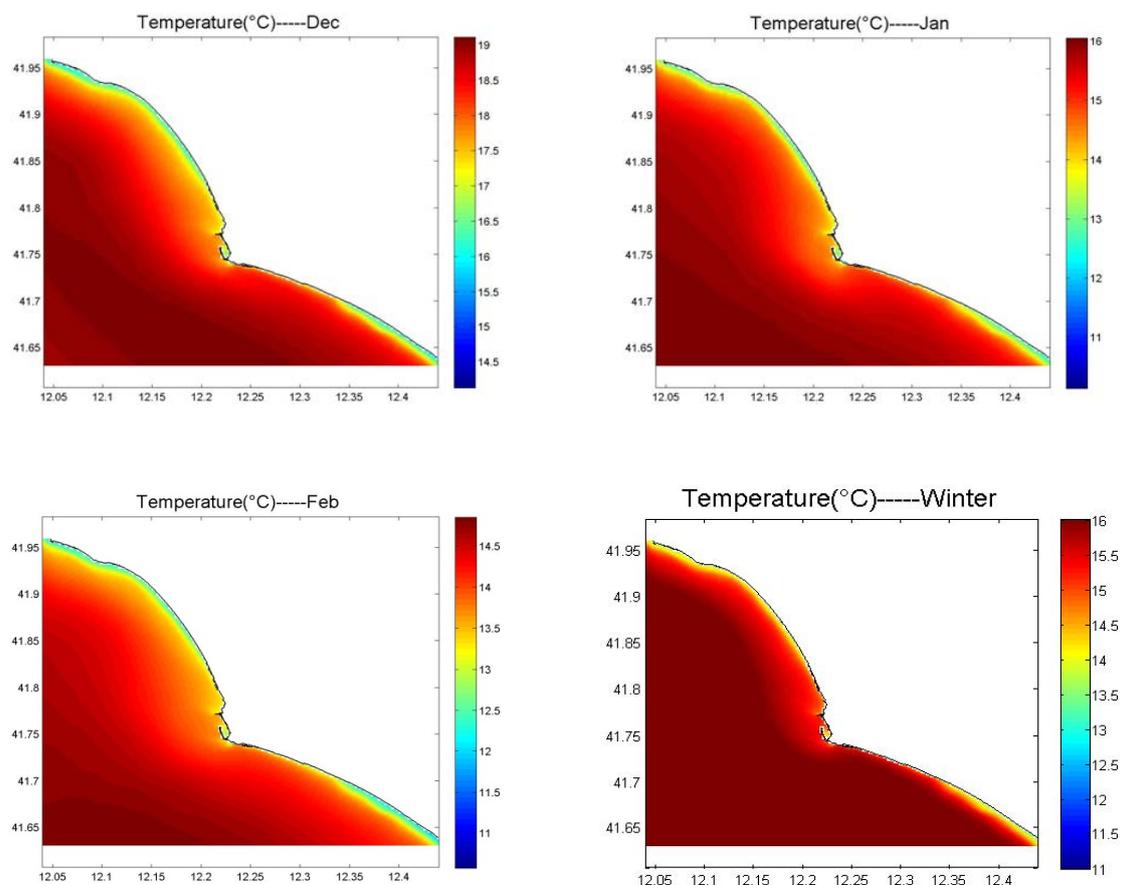


Figura 12 Distribuzione di temperatura nei mesi invernali

Così come per la temperatura anche la salinità in inverno mostra un gradiente costa-largo con acque più salate nella zona off-shore e più dolci in prossimità della linea di riva. Nel periodo invernale l'effetto dei corsi d'acqua è visibile nella parte a nord con un'estensione massima nel mese di Dicembre.

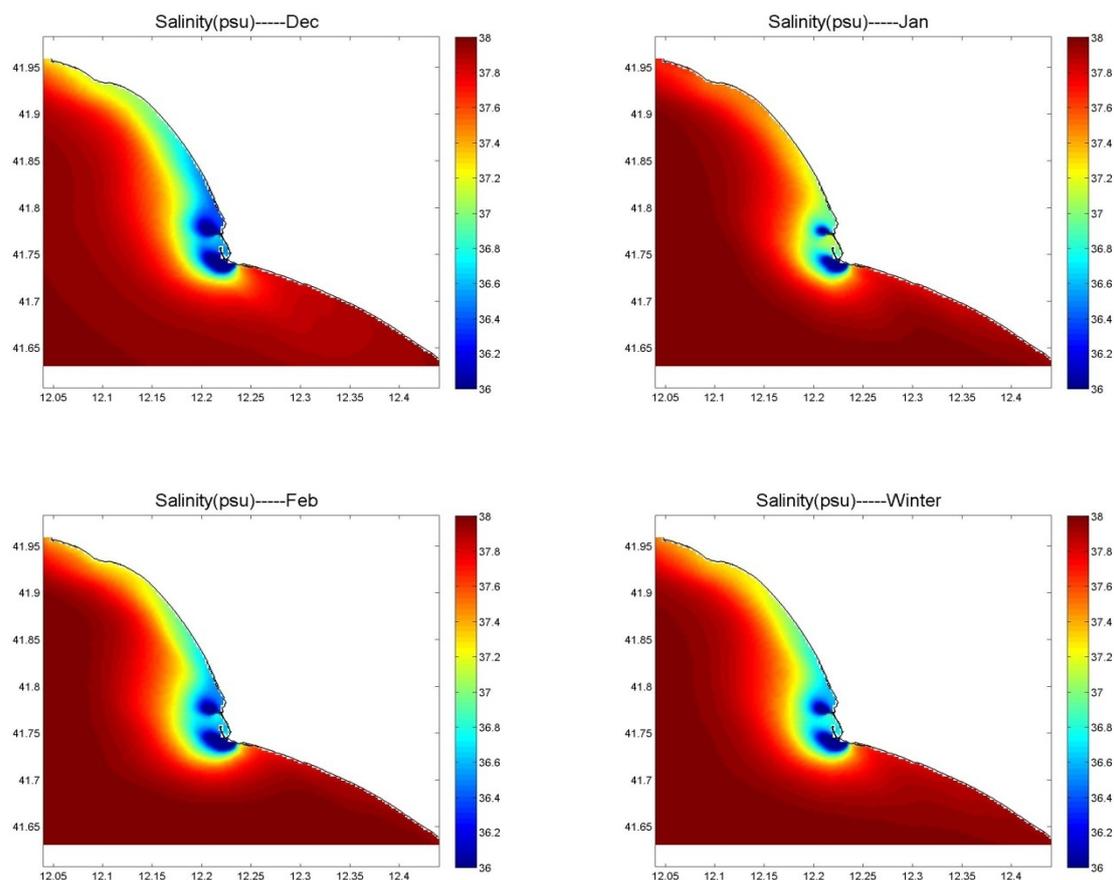


Figura 13 Distribuzione di salinità nei mesi invernali

Nel periodo invernale la corrente marina è diretta verso nord con una maggiore intensificazione a largo, soprattutto nel mese di Dicembre, ed in corrispondenza dei due corsi d'acqua (Fiumara Piccola e Fiumara Grande). Fa eccezione Gennaio in cui la corrente risulta parzialmente diretta verso sud con la presenza di un vortice anticiclonico nella parte costiera a nord dell'area di studio.

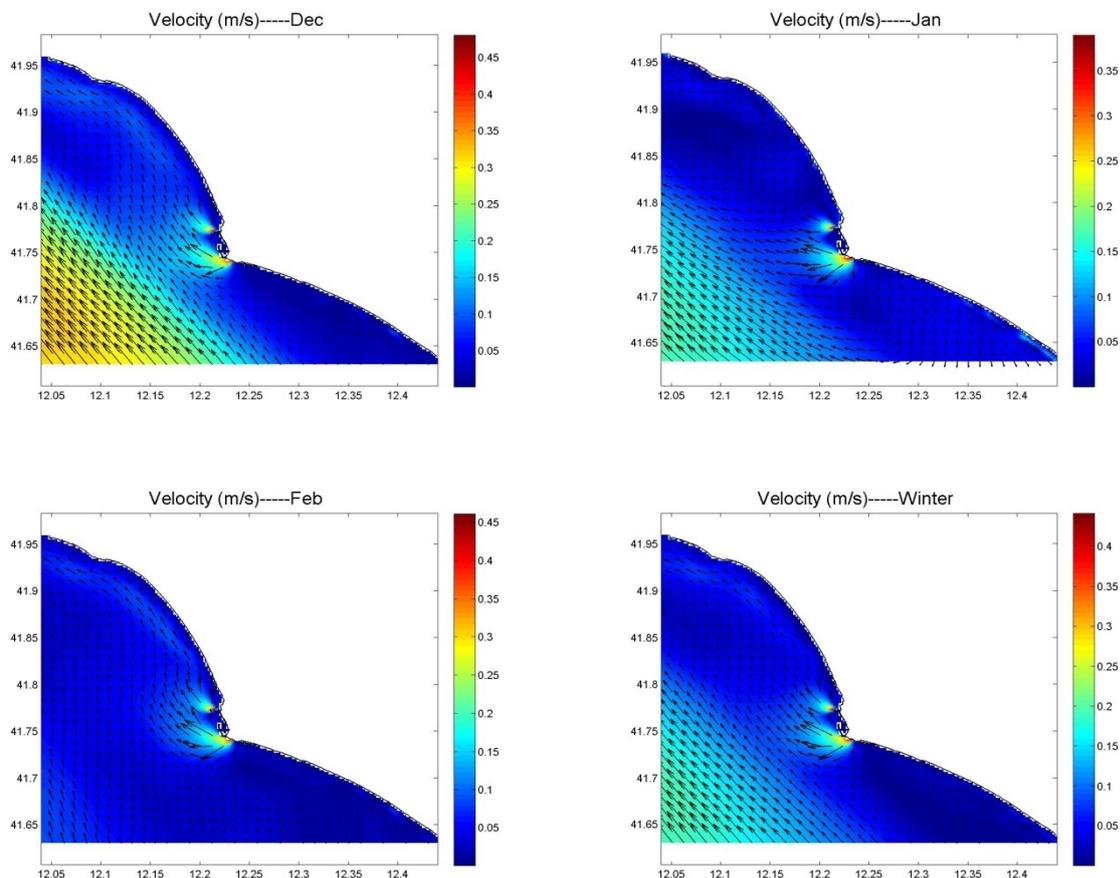


Figura 14 Distribuzione di corrente marina nei mesi invernali

3.3.2 Risultati preliminari del modello Wave Watch III

I risultati del modello Wave Watch III sono stati confrontati con quelli del modello WAM che fornisce le condizioni iniziali e al contorno di WWIII al fine di verificare la correttezza del setup nella zona di studio. A tal fine sono stati scelti 4 punti localizzati in corrispondenza dei boundaries laterali (North e South), di quello off-shore (OFF) e della zona costiera in cui verrà realizzata l'opera. In ognuno di questi sono stati analizzati per tutto il 2018 l'altezza d'onda significativa e la direzione media di provenienza attraverso diagrammi polari. Il confronto evidenzia che nel punto North sono presenti forti discrepanze tra i due modelli sia in termini di altezza che di direzione mentre nella parte a sud del dominio di calcolo c'è un maggiore accordo.

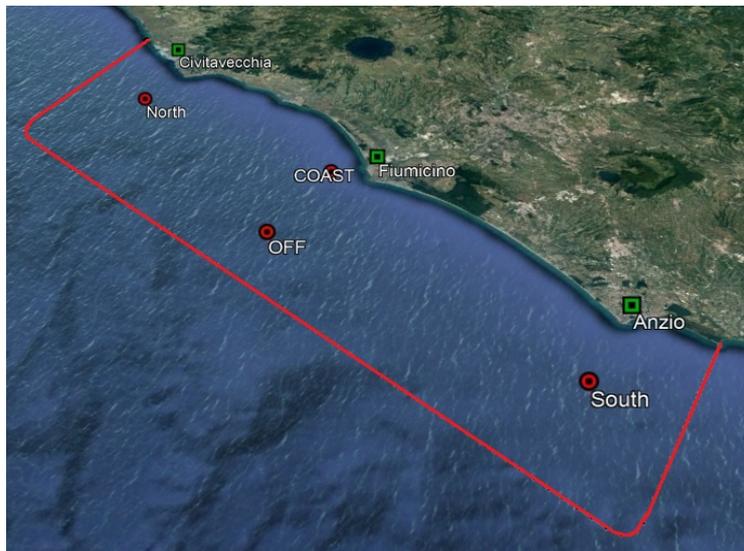


Figura 15 punti utilizzati per il confronto con i risultati del modello WAM

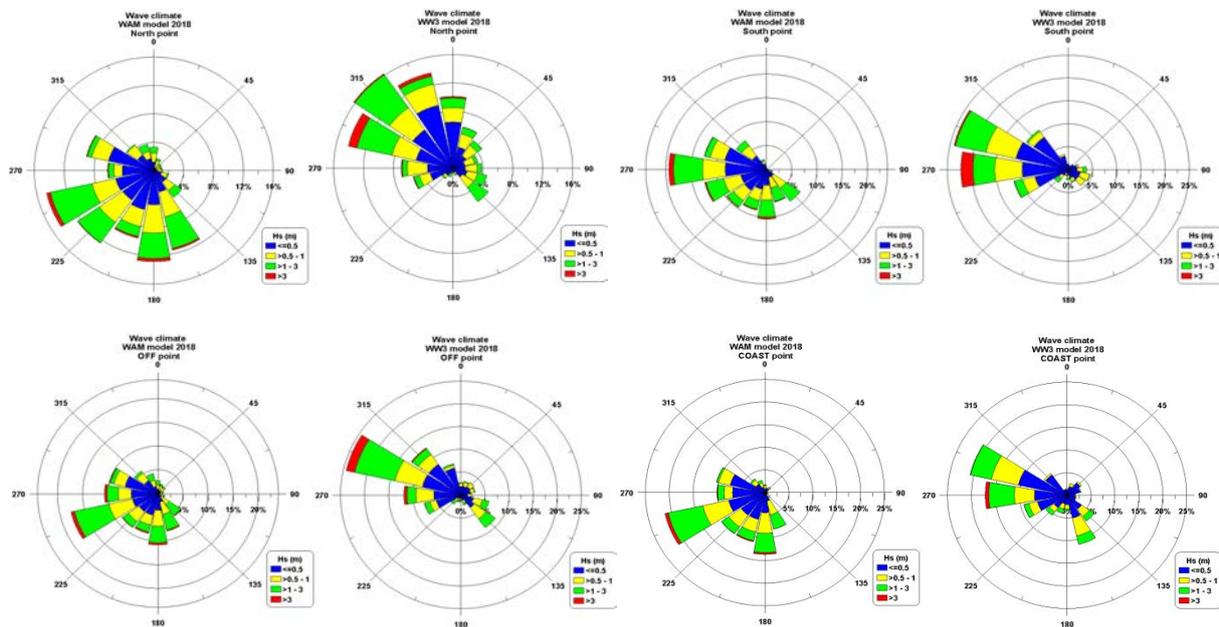


Figura 16 diagrammi polari che rappresentano altezza e direzione del moto ondoso calcolate con il modello WAM e con il modello WWIII nei quattro punti indicati in Figura 15



3.3.3 Risultati preliminari del modello SEDTRANS

Attraverso il modello SEDTRANS05 sono state effettuate delle simulazioni con apporto di sedimenti dalle due foci del Tevere. I risultati mostrano la presenza di zone di accumulo di sedimento in prossimità delle due foci (Fig 17 e Fig 18). Il modello è stato utilizzato per una simulazione di soli 14 giorni, durante il periodo invernale del 2018, di conseguenza i volumi di sedimento depositato non sono particolarmente elevati. In ciascuna delle due foci, si può notare come il sedimento trasportato dal fiume venga in piccola parte depositato verso il largo e in maggior parte trasportato lungo la costa in direzione sud dalle correnti e successivamente depositato.

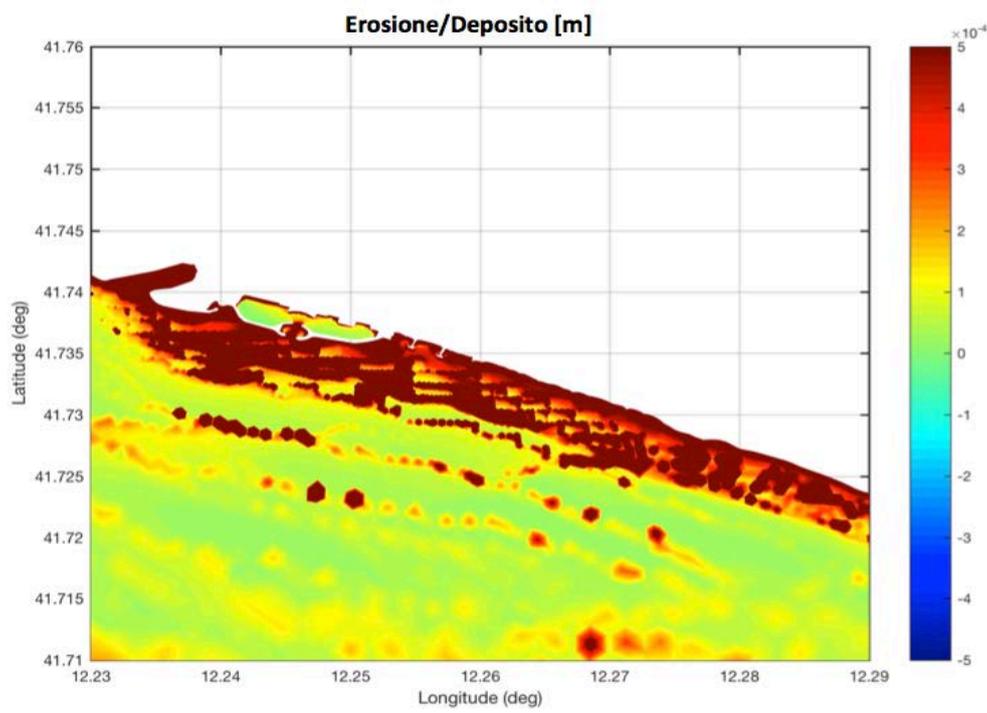


Figura 17 Mappa di erosione e deposizione di sedimento alla foce di Fiumara Grande dopo una simulazione di 14 giorni

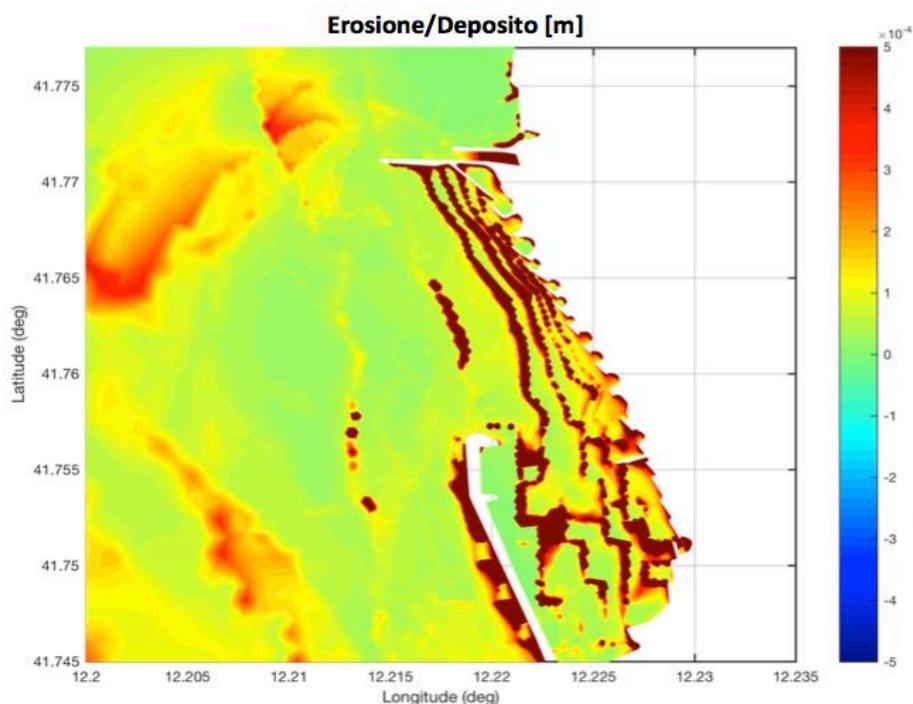


Figura 18 Mappa di erosione e deposizione di sedimento alla foce di Fiumara Piccola dopo una simulazione di 14 giorni



3.4. Predisposizione GIS

Durante i primi mesi di progetto è iniziata l'attività di predisposizione della piattaforma GIS utilizzando come base di dati la linea di costa del litorale laziale e le batimetrie (ricavate da carta nautica). Successivamente i layers verranno implementati utilizzando le batimetrie di dettaglio derivanti dalle campagne *in situ* e i risultati dei modelli numerici di simulazione.

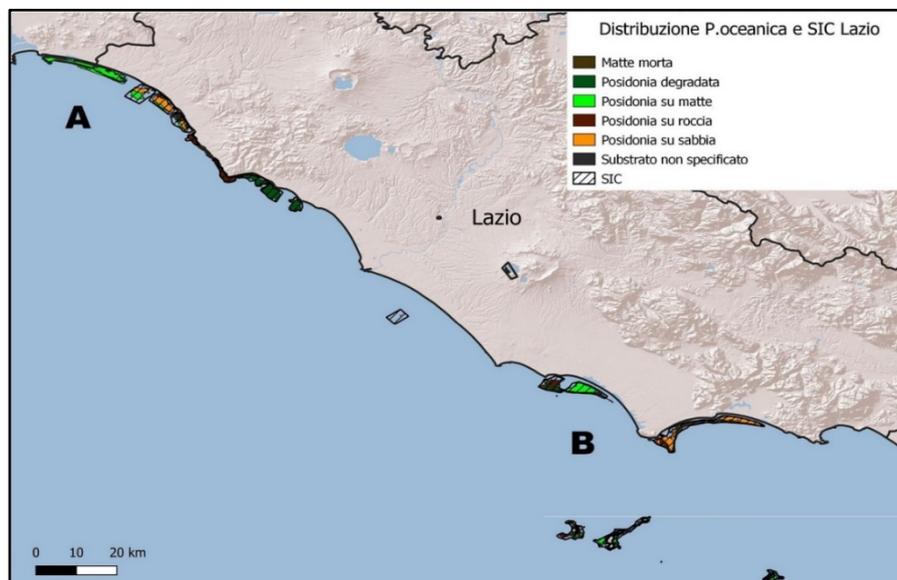


Figura 19 Distribuzione della *P. oceanica* suddivisa per tipologia di substrato e dei SIC nell'area marina della regione Lazio

Per quanto riguarda le biocenosi bentoniche, in questa prima parte del progetto, si è provveduto ad inserire nel GIS le distribuzioni regionali della *P. oceanica* con livello di dettaglio sufficiente a discriminare la tipologia di substrato (Fig. 19). Contestualmente alla *P. oceanica* sono stati inseriti i limiti spaziali dei SIC presenti a cui verranno aggiunti, tramite layer dedicato, le tipologie di vincoli presenti nell'area (rotte di navigazione, divieti di ancoraggio ecc.). Sono al momento in fase di implementazione nel GIS i layers relativi alle distribuzioni sia degli habitat del coralligeno sia le biocenosi bentoniche, facendo riferimento a quanto descritto da Pérès e Picard (1964), ricavati dall'analisi dei dati e delle mappe presenti in letteratura (Fig. 20).

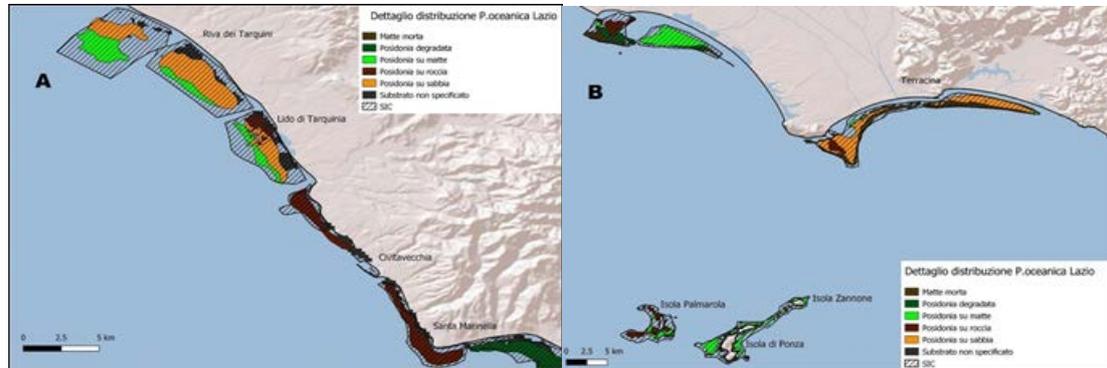


Figura 20 Dettaglio sulle distribuzioni dei substrati della *P. oceanica* della regione Lazio.

3.5. Acquisizione dei dati di validazione e di input del modello a scala regionale: oceanografia sperimentale

3.5.1. Campagne di misura colonna d'acqua

Misure con metodi tradizionali

Lo studio delle variazioni dei parametri fisici, chimici e biologici della colonna d'acqua in ambiente costiero risulta molto complicato in quanto i fenomeni che avvengono in tale zona hanno scale spaziali e temporali molto ridotte e sono caratterizzati da un'elevata dinamica e variabilità. Risultano però fondamentali per la caratterizzazione dell'area oggetto di studio, nonché per l'implementazione della modellistica numerica dal punto di vista della validazione e dell'assimilazione nonché per l'integrazione spaziale dei dati acquisiti con le stazioni fisse.

Nell'arco del progetto saranno effettuati una serie di transetti, come riportati in Fig. 23, lungo tutta l'unità fisiografica, in diverse stagioni e condizioni meteomarine.

Nel periodo intercorso dall'inizio del progetto è stata effettuata una campagna di misura lungo l'intera unità fisiografica. Sono stati effettuati n.9 transetti lungo i quali sono state fatte una serie di stazioni per un totale di n.95 stazioni di misura, in corrispondenza delle quali sono stati effettuati profili lungo colonna d'acqua di temperatura, conducibilità (salinità, densità), ossigeno disciolto, fluorescenza della clorofilla *a* e solido sospeso. In corrispondenza di alcune stazioni sono stati prelevati dei campioni di acqua per l'analisi della clorofilla *a* (n. campioni 26), del solido sospeso (n. campioni 20), della sostanza organica disciolta cromoforica CDOM (Chromophoric Dissolved Organic Matter)



(n. campioni 11) e dell'ossigeno disciolto (n. campioni 18) per un totale di n.75 campioni. I risultati ottenuti dai campioni serviranno sia per la calibrazione dei sensori utilizzati per acquisire i profili verticali che per la validazione dei dati satellitari.

Le procedure adottate per l'analisi dei parametri sopra indicati sono conformi ai metodi standard ISO per il campionamento, la conservazione e l'analisi dei campioni di acqua di mare, alle metodiche descritte nei Manuali e Linee Guida APAT/CNR IRSA n. 29/2003 e successivi aggiornamenti e nelle 'Metodologie Analitiche di Riferimento-Programma di Monitoraggio per il controllo dell'Ambiente marino costiero/Triennio 2001.2003', MATTM, ICRAM, Roma 2001 e successivi aggiornamenti. In particolare: i) l'analisi della concentrazione di clorofilla a per la stima della biomassa fotosintetica verrà effettuata secondo i metodi descritti nei Manuali e Linee Guida ISPRA 56/2010 "Metodologie di studio del Plancton marino" e nel metodo ISO 10260:1992 "Water Quality Measurement of Biochemical Parameters; Spectrometric Determination of the Chlorophyll a Concentration"; ii) i solidi sospesi verranno analizzati in accordo con le metodologie descritte in Strickland & Parsons (1972) "A practical handbook of seawater analysis" e nei Manuali e Linee Guida APAT/CNR IRSA n. 29/2003; iii) la sostanza organica disciolta cromoforica CDOM verrà analizzata secondo le metodologie riportate in Wurl (2009) "Practical guidelines for the analysis of seawater" e nei protocolli NASA "Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation" Volume (IV), Mitchell et al. (2003).

Di seguito si riportano degli esempi dell'elaborazione del transetto n.7, dove è possibile osservare la distribuzione delle variabili lungo sezioni profondità-distanza. In particolare, dall'elaborazione della sezione della temperatura è osservabile una evidente stratificazione della colonna d'acqua, visibile anche nella sezione della salinità; per quanto attiene le variabili bio-ottiche, è possibile vedere come sia presente un DCM (Deep Chlorophyll Maximum) profondo, tra i 70 e i 90 m, mentre per quanto riguarda la torbidità i valori più elevati si trovano nelle parte più profonda dei profili acquisiti lungo la colonna d'acqua.

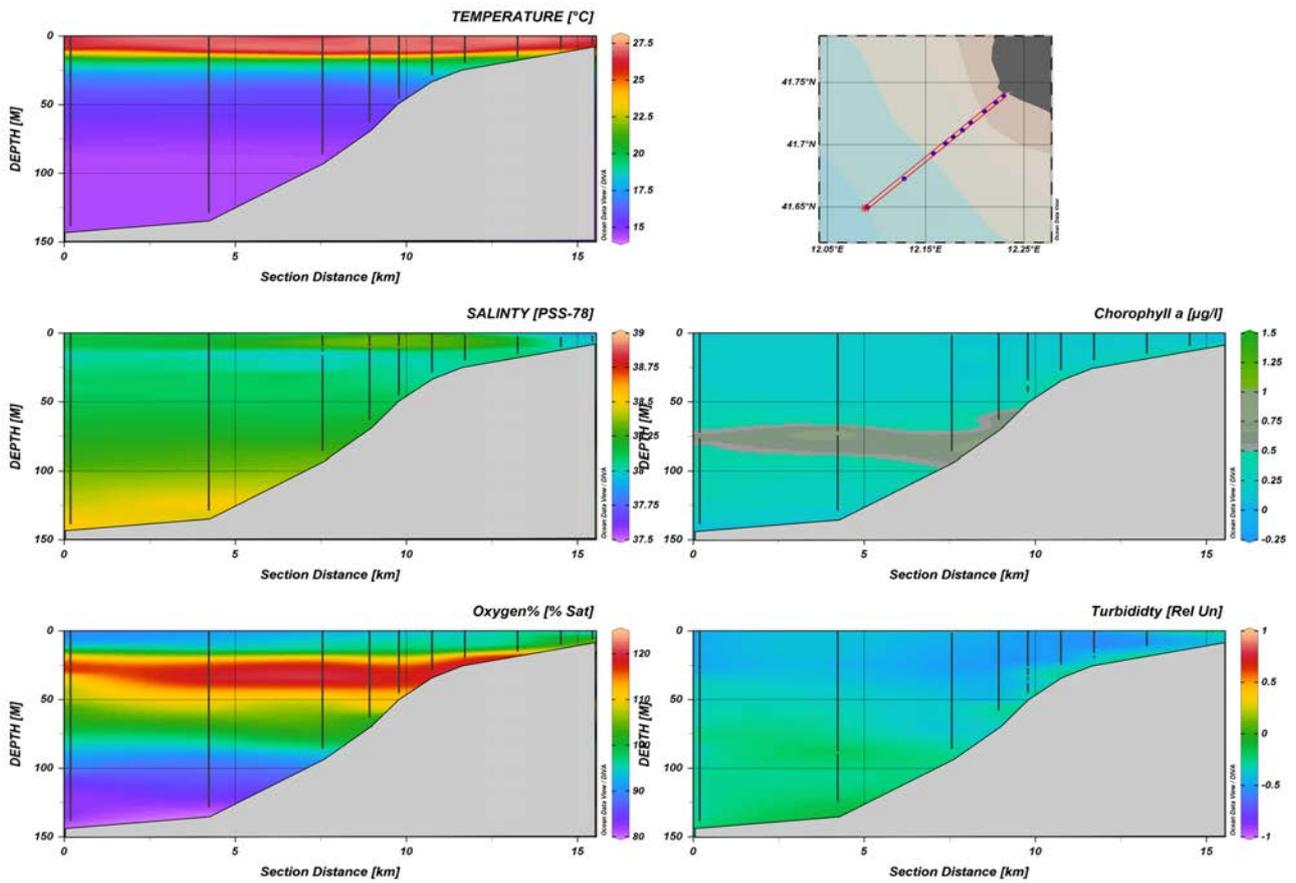


Figura 21 Distribuzione profondità-distanza lungo l'intero transetto n.7 delle variabili temperatura, salinità, clorofilla α , ossigeno disciolto e torbidità

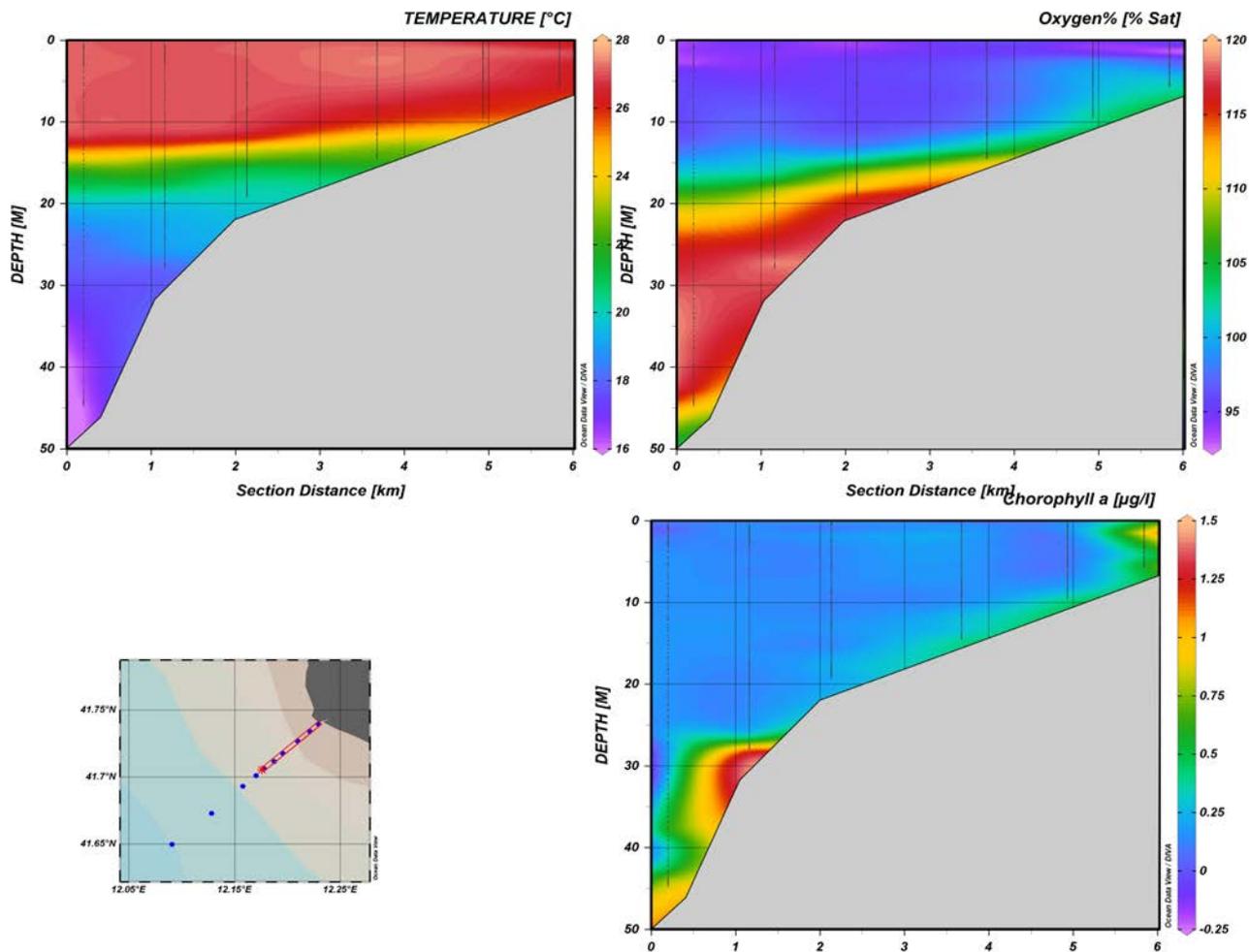


Figura 22a Distribuzione profondità-distanza lungo le stazioni più costiere delle variabili temperatura, clorofilla *a* e ossigeno disciolto

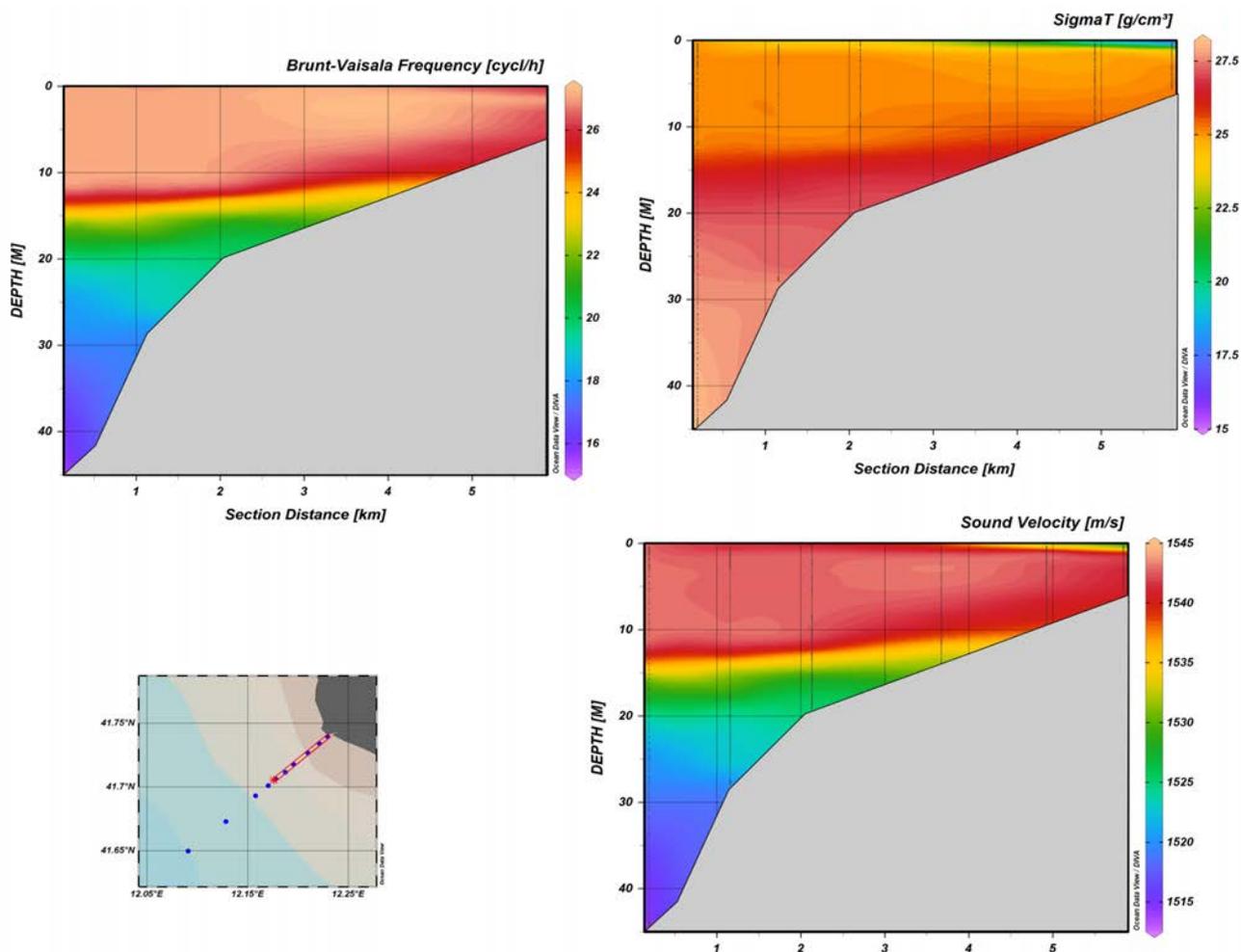


Figura 22b Distribuzione profondità-distanza lungo le stazioni più costiere delle variabili densità (σ_T), frequenza di Brunt-Vaisala e velocità del suono

Studio dello stato trofico delle acque

Al fine di analizzare le condizioni trofiche dell'area di studio e di calcolare l'indice trofico TRIX, individuato dal D.Lgs. 152/06 e successivi aggiornamenti per definire lo stato di qualità delle acque marine costiere così come dal D.M. 260/10 per la classificazione del loro stato ecologico, durante le campagne per la caratterizzazione della colonna d'acqua sono stati effettuati prelievi superficiali per l'analisi dei nutrienti totali e disciolti di azoto e fosforo in corrispondenza di n.5 stazioni, indicate in



Fig. 23. Le metodiche analitiche utilizzate per l'analisi dei nutrienti sono quelle riportate nei Manuali e Linee Guida ISPRA 56/2010 "Metodologie di studio del Plancton marino".

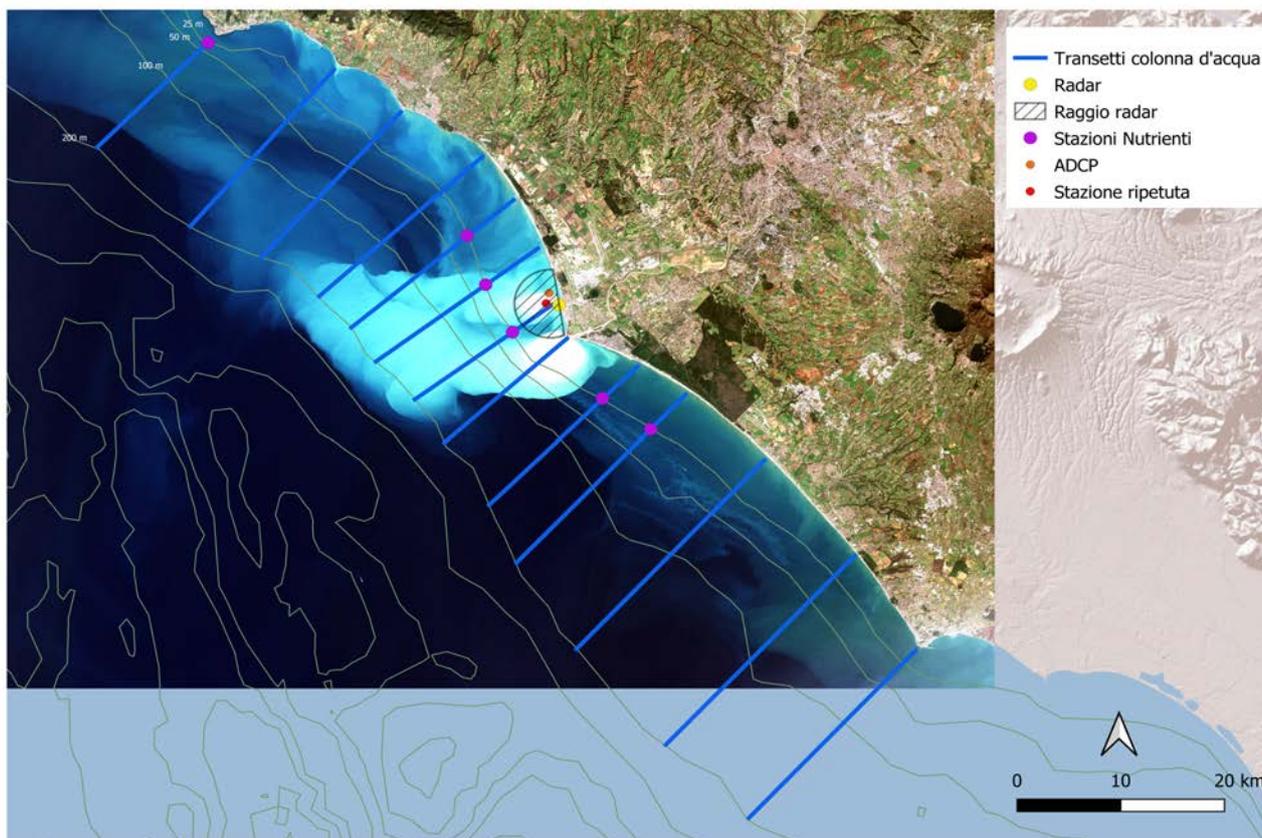


Figura 23 Transetti e stazioni di misura lungo l'unità fisiografica

3.5.2 Studio della distribuzione del solido sospeso, della biomassa fitoplanctonica e della CDOM lungo l'unità fisiografica attraverso osservazioni satellitari

Durante l'intero arco del progetto saranno acquisite le immagini satellitari per l'elaborazione delle mappe superficiali di clorofilla a, solido sospeso e CDOM, ove disponibili. Le mappe acquisite saranno confrontate con i risultati delle analisi dei campioni d'acqua raccolti durante le campagne oceanografiche.

Ad oggi sono state scaricate le immagini acquisite dai satelliti Landsat 8-OLI e Sentinel 2A da gennaio 2019, di seguito si riporta la Tabella 1 dove si riportano le date disponibili con bassa copertura nuvolosa.



SENTINEL	SENTINEL	SENTINEL	LANDSAT
01/01/2019	08/10/2019	09/06/2020	06/03/2019
06/01/2019	13/10/2019	24/06/2020	22/03/2019
11/01/2019	18/10/2019	29/06/2020	07/04/2019
14/01/2019	23/10/2019	14/07/2020	26/06/2019
26/01/2019	28/10/2019	08/08/2020	28/07/2019
29/01/2019	07/11/2019	13/08/2020	13/08/2019
05/02/2019	10/11/2019	18/08/2020	14/09/2019
15/02/2019	20/11/2019	23/08/2020	16/10/2019
20/02/2019	22/11/2019	28/08/2020	01/11/2019
28/02/2019	07/12/2019	07/09/2020	05/02/2020
02/03/2019	12/12/2019	17/09/2020	21/02/2020
12/03/2019	17/12/2019	22/09/2020	08/03/2020
15/03/2019	22/12/2019		24/03/2020
22/03/2019	27/12/2019		09/04/2020
09/04/2019	08/02/2020		25/04/2020
11/04/2019	15/02/2020		11/05/2020
06/05/2019	28/02/2020		27/05/2020
26/05/2019	06/03/2020		12/05/2020
25/06/2019	19/03/2020		28/05/2020
30/06/2019	21/03/2020		14/07/2020
05/07/2019	24/03/2020		30/07/2020
20/07/2019	29/03/2020		15/08/2020
25/07/2019	03/04/2020		16/09/2020
30/07/2019	05/04/2020		
04/08/2019	08/04/2020		
09/08/2019	10/04/2020		
14/08/2019	15/04/2020		
19/08/2019	25/04/2020		
29/08/2019	05/05/2020		
03/09/2019	10/05/2020		
08/09/2019	20/05/2020		
13/09/2019	25/05/2020		
18/09/2019	30/05/2020		
23/09/2019			
28/09/2019			

Tabella 1 Elenco delle date relative alle immagini disponibili



I dati sono stati processati attraverso il software ACOLITE, specifico per la correzione atmosferica. Questo software è stato sviluppato specificatamente per il Landsat8-OLI, ma viene utilizzato anche per l'elaborazione delle immagini Sentinel, poiché l'osservazione da remote sensing delle aree costiere tramite la banda coastal necessita di una più accurata procedura di correzione atmosferica, in particolare per quanto riguarda il contributo dell'aerosol per la radiazione al top dell'atmosfera (TOA); a tale scopo è stato sviluppato uno specifico algoritmo correttivo basato sulla radiazione SWIR (Short Wave InfraRed), il quale permette una migliore restituzione del dato (ad esempio per il solido sospeso) per acque molto torbide, come appunto sono da considerare quelle costiere (Vanhellemont Q., Ruddick K., 2015).

Sono stati quindi utilizzati diversi algoritmi per la restituzione dei dati di clorofilla, solido sospeso e CDOM, che saranno selezionati per le elaborazioni future una volta fatta la correlazione tra i dati satellitari e i dati raccolti in situ. Di seguito alcuni esempi di algoritmi applicati per le diverse variabili ed esempi di mappe di rappresentazione delle variabili.

Clorofilla

- Ocean Color 2 (OC2) e Ocean Color (OC3): sono algoritmi che restituiscono la concentrazione di clorofilla *a* in ($\mu\text{g/l}$) utilizzando il rapporto tra le bande blu/verde (O'Reilly et al., 1998, 2000);

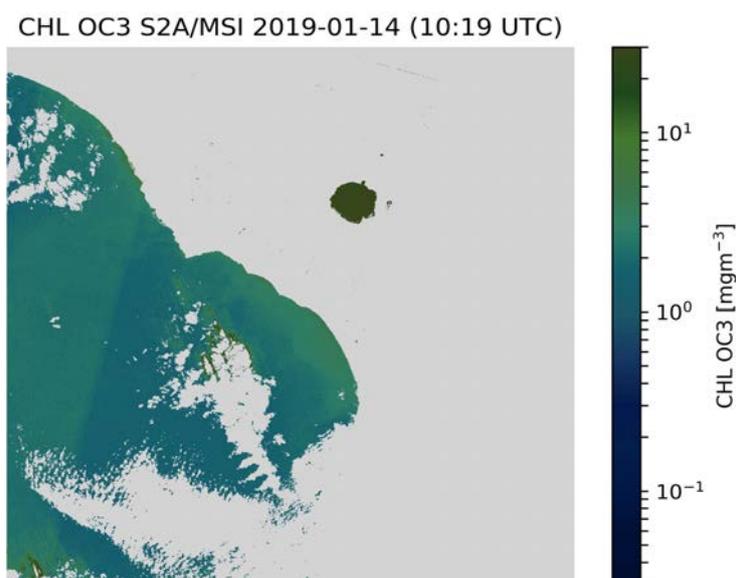


Figura 24 Clorofilla



- chl_re_gons: utilizza l'algoritmo nel picco del rosso di Gons et al. (2002), utilizzando la banda a 780nm come riferimento. I prodotti in uscita sono prodotti per impostazione predefinita solo per le acque in cui $ps664 > 0,005$ e $ps704 / ps664 > 0,63$ (soglie definite da Héloïse Lavigne).

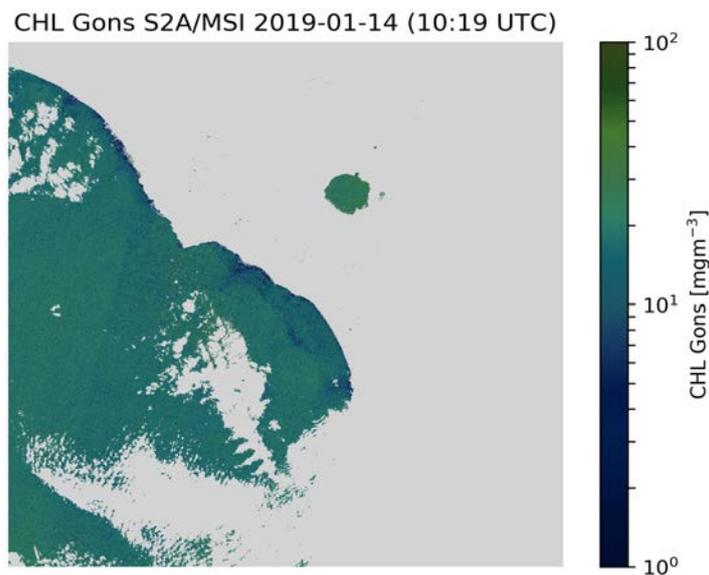


Figura 25 Clorofilla

Solido sospeso

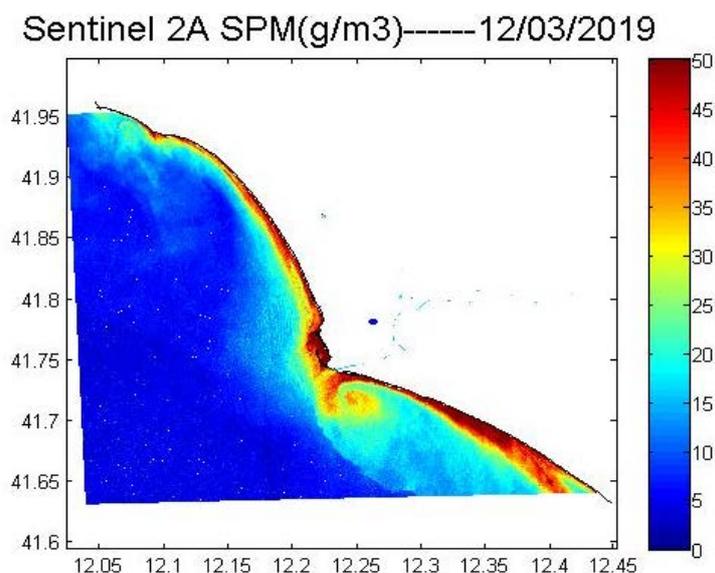


Figura 26 Solido sospeso

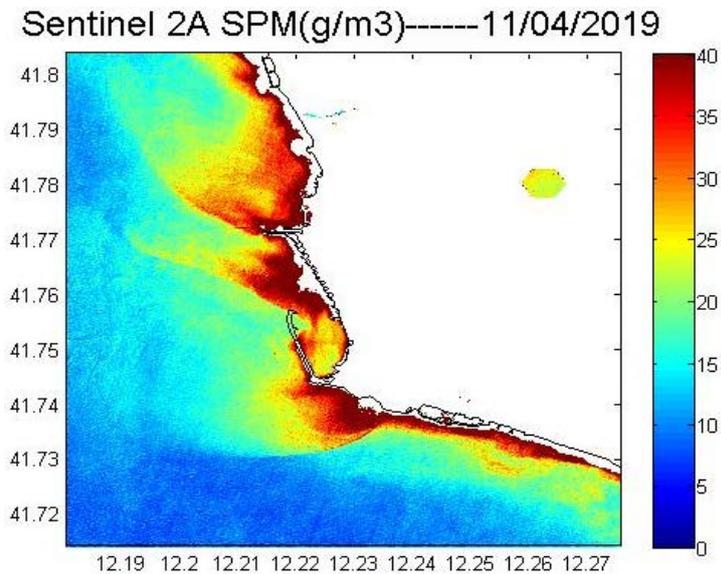


Figura 27 Solido sospeso

Sono state inoltre elaborati, sempre attraverso il software Acolite, le riflettanze, Rrs , in modo da poter elaborare ulteriormente le immagini attraverso altri metodi, al fine di poter applicare altri algoritmi non presenti sulla piattaforma di Acolite. Questo consentirà nel tempo di affinare sempre di più la selezione del miglior algoritmo da applicare all'area oggetto del progetto.

3.5.3. Studio della spiaggia sommersa, emersa e del rateo deposizionale

Caratterizzazione della spiaggia sommersa

Le attività progettuali comprendono una estesa caratterizzazione della spiaggia sommersa utile ad acquisire dati necessari all'implementazione dei modelli matematici. La caratterizzazione della spiaggia sommersa prevede un totale di n.13 transetti costa-largo distribuiti a partire da Capo Linaro fino a Capo Anzio. Lungo i suddetti transetti, vengono effettuate periodicamente indagini morfologiche mediante l'utilizzo di un sistema di misura *single beam*, fino ad una profondità di 35 m. Nel dettaglio, il sistema di misura comprende sistema di posizionamento superficiale, sistema di acquisizione ed elaborazione dati, ecoscandaglio idrografico. Durante i mesi di Agosto 2020 e Settembre 2020 è stata effettuata la prima campagna di misura *in situ* durante la quale sono stati



effettuati n.11 dei n.13 profili previsti. In particolare, sono state effettuate le indagini morfologiche nei n.5 transetti prossimi alla foce de fiume Tevere e n.6 transetti posizionati nell'area più vasta (Fig. 28).

Campionamenti della spiaggia sommersa per calibrazione modelli e strumentazione automatica

In corrispondenza dei transetti relativi alla prima campagna di indagine della morfologia sommersa, sono stati effettuati dei campionamenti di sedimento alle profondità di 2 m, 5 m e 10 m (Fig. 10). I campioni di sedimento della spiaggia sommersa sono stati prelevati utilizzando campionatori a gravità e analizzati dal punto di vista granulometrico. In particolare, vengono analizzate la frazione grossolana (> di 63 micron) e la frazione fine (< 63 micron) mediante *setacciatura meccanica e/o analisi strumentale* (ad esempio granulometria laser). Durante i mesi di Agosto 2020 e Settembre 2020 sono stati effettuati in totale n.33 campionamenti di sedimento, relativi ai n.11 transetti riportati in Fig. 28. I campioni prelevati sono stati asciugati in stufa a 40 °C fino a completa disidratazione e successivamente sottoposti ad analisi granulometrica.

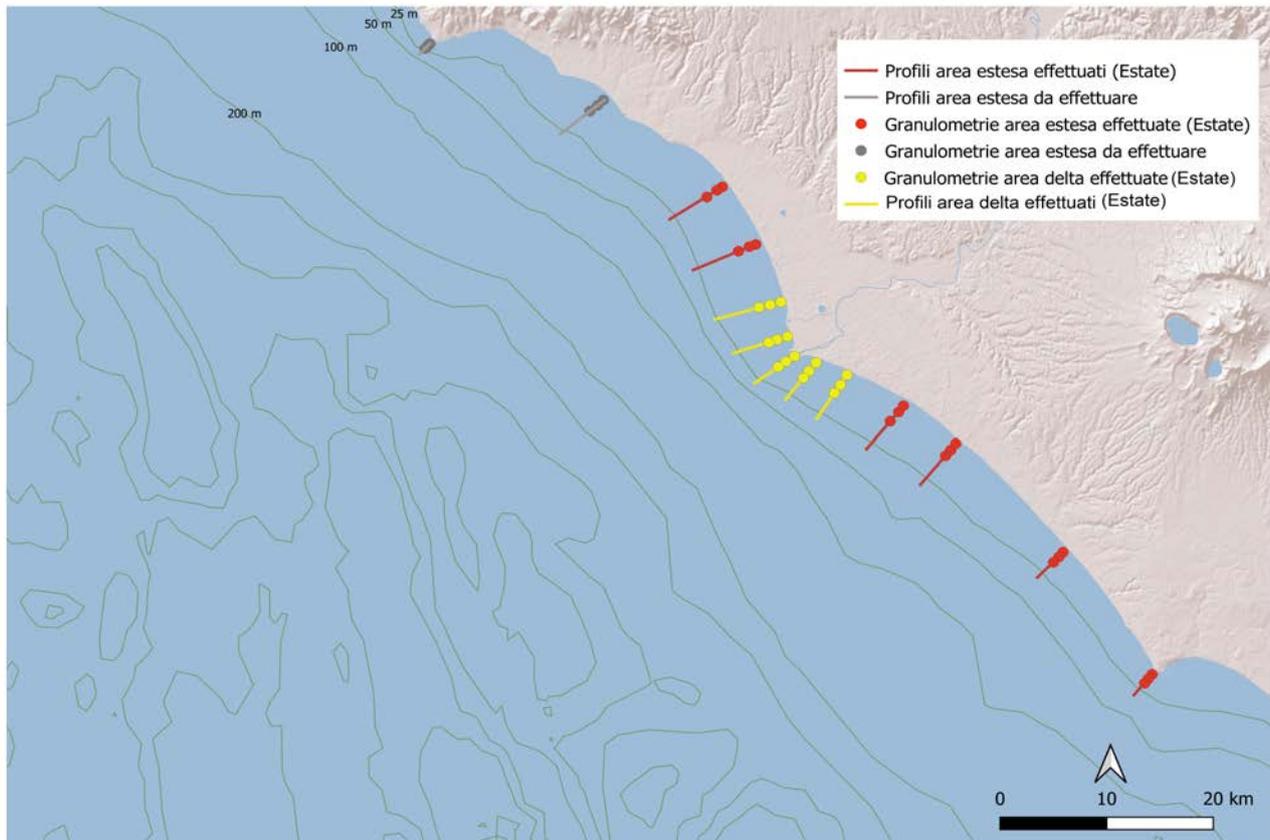


Figura 28 Area di indagine comprensiva di transetti per le indagini morfologiche e ubicazione delle stazioni di campionamento dei sedimenti marini.

3.5.4. Caratterizzazione dei principali corsi d'acqua rilevanti ai fini della valutazione degli input fluviali

Misure di alveo in prossimità della foce

Il progetto prevede l'analisi del trasporto fluviale mediante un approccio diretto basato su campagne di misura *in situ* relative a: (a) misura dell'ampiezza dell'alveo nel tratto fluviale precedente allo sbocco in mare; (b) misura idrometrica; (c) misure della velocità della corrente fluviale nella sezione di misura idrometrica. Durante i mesi di Agosto 2020 e Settembre 2020 sono state effettuate indagini estive su n.4 foci fluviali relativi a n.3 corsi d'acqua: foce del fiume Arrone (Fregene), foce del Tevere di fiumara piccola (Fiumicino), foce del Tevere di Fiumara grande (Fiumicino), foce del canale dei pescatori (Ostia) (Fig.29).



Analisi degli apporti liquidi e solidi dei principali corsi d'acqua

In corrispondenza delle misure di alveo in prossimità delle foci fluviali, sono state predisposte attività di indagine degli apporti fluviali liquidi e solidi. Le indagini degli apporti fluviali seguono un approccio indiretto basato su formulazioni teorico-empiriche geomorfologiche, idrologiche e idrauliche. Per quanto riguarda gli apporti liquidi, durante i mesi di Agosto 2020 e Settembre 2020, in corrispondenza delle foci fluviali indagate sono stati raccolti campioni di acqua utili alla caratterizzazione del quantitativo di solido sospeso. Inoltre, al fine di studiare la composizione degli apporti solidi, sono stati effettuati campionamenti di sedimento delle foci fluviali dei corsi d'acqua considerati. I sedimenti campionati sono stati analizzati dal punto di vista granulometrico mediante setacciatura meccanica.

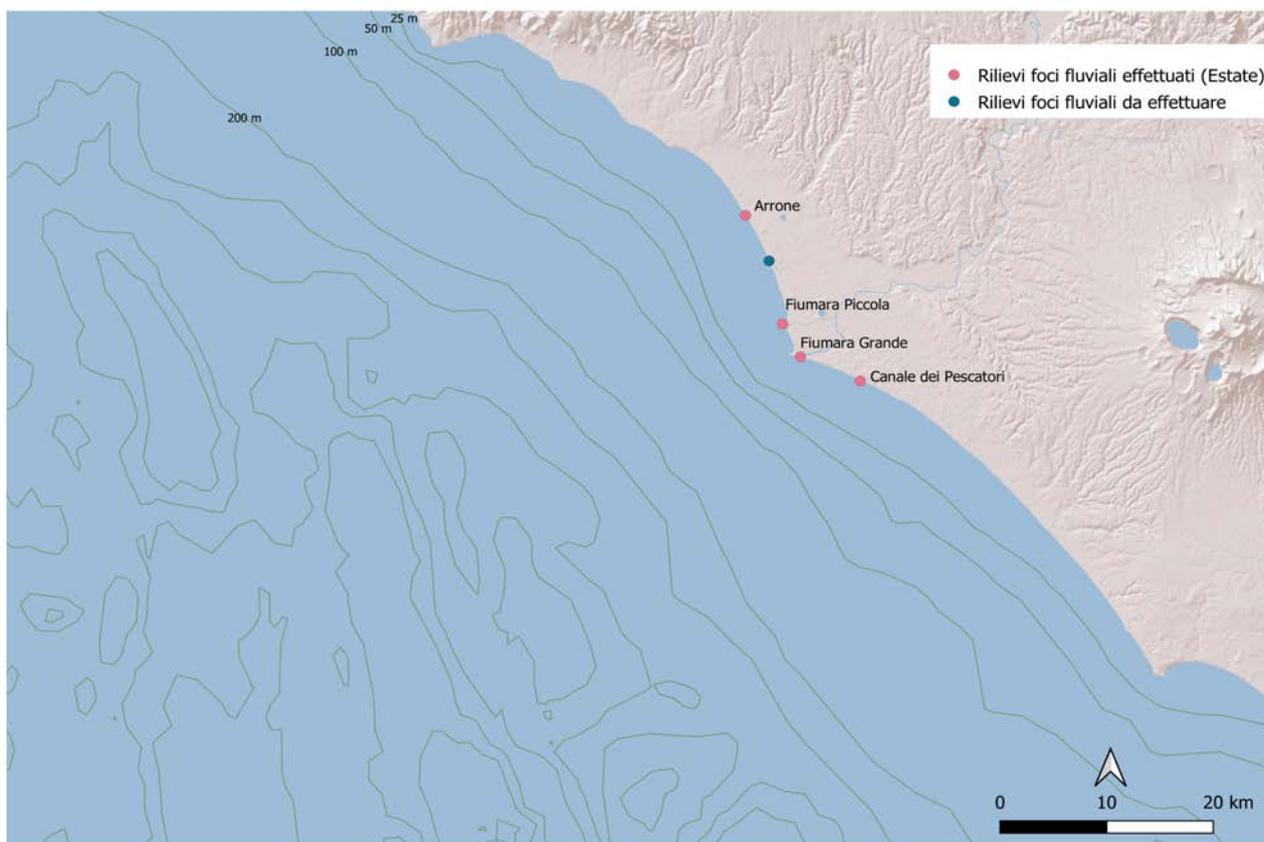


Figura 29 Area di indagine comprensiva delle aree di foce indagate.