

Civitavecchia, lì 23.09.2014

Spett.le Ing. Calogero Burgio
Autorità Portuale di Civitavecchia



A.P. Civitavecchia - PORTILAZIO

Prot. **0012282** del 23/09/2014 ore 12:39:42

Th.

Registro: E

Oggetto: circoscrizione portuale di Civitavecchia;
addendum n.2 del 02.08.2011 (prot. AP. 9349 del 03.08.2011);
relazione attività.

Riferimento: Settembre 2014



23.09.2014 12:04

Allegati:

- Approccio integrato per lo studio della dispersione del materiale dragato nell'ambito dei lavori per la realizzazione delle opere previste nel II lotto funzionale del porto di Civitavecchia

Riferimento	Data	Num. Pag.	Revisione
REL-190-MON-0914-AP	22/09/2014	57	1.0
Redatto			
Dott. Simone Bonamano			
Dott. ssa Viviana Piermattei			
Dott.ssa Valentina Gnisci			
Approvato			
Prof. Marco Marcelli			
Dipartimento di Scienza Ecologiche e Biologiche (DEB) L.go dell'Università s.n.c VT) Tel/Fax +39 0766 366538			

OGGETTO

**Approccio integrato per lo studio della dispersione del materiale dragato
nell'ambito dei lavori per la realizzazione delle opere previste nel II lotto
funzionale del porto di Civitavecchia**

Settembre 2014

Riferimento	Data	Num. Pag.	Revisione
REL-190-MON-0914-AP	22/09/2014	54	1.0
Redatto			
Dott. Simone Bonamano			
Dott. ssa Viviana Piermattei			
Dott.ssa Valentina Gnisci			
Approvato			
Prof. Marco Marcelli			
Dipartimento di Scienza Ecologiche e Biologiche (DEB) L.go dell'Università s.n.c VT) Tel/Fax +39 0766 366538 oceanlab@unitus.it			



Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina
DEB – Università degli Studi della Tuscia

**Approccio integrato per lo studio della dispersione del materiale dragato
nell'ambito dei lavori per la realizzazione delle opere previste nel II lotto
funzionale del porto di Civitavecchia**

INDICE

1. Introduzione	1
2. Oggetto e scopo	2
3. Area di studio	3
3.1 Caratterizzazione morfologica e sedimentologica	3
3.2 Caratterizzazione idrologica	7
3.3 Caratterizzazione meteomarina ed idrodinamica	9
4. Approccio allo studio	10
4.1 Dati centralina meteo e boa ondometrica	12
4.2 Dati stazioni di prossimità e campionamenti in-situ per il monitoraggio della colonna d'acqua	16
4.3 Osservazioni satellitari di clorofilla-a e solido sospeso	21
4.4 Indagini subacquee sulla <i>Posidonia oceanica</i>	23
4.5 Simulazioni numeriche	31
5. Risultati	43
5.1 Scenario di Libeccio	43
5.2 Scenario di Scirocco	45
5.3 Scenario di Ponente	48
5.4 Situazione Reale	50
6. Conclusioni	54

1. Introduzione

L'analisi della dispersione del materiale dragato nell'ambiente marino è di fondamentale importanza per definire gli impatti sulle biocenosi bentoniche che, essendo formati da specie con limitata mobilità, subiscono i maggiori danni.

Per studiare la propagazione dei sedimenti che vengono risospesi dalle attività di dragaggio sono spesso impiegati i modelli numerici che consentono di calcolare e prevedere le correnti marine dovute a vento e moto ondoso e di definire le zone in cui il materiale transita e si depona. In questo modo è possibile analizzare gli effetti dovuti all'aumento di torbidità e di sedimentazione che possono essere dannosi per le piante marine come la *Posidonia oceanica*, indicato come “habitat prioritario” nell'Allegato 1 della Direttiva Habitat (Dir. n.92/43/CEE).

La precisione con cui vengono restituiti i risultati dei modelli matematici dipende dai dati che vengono utilizzati all'interno della simulazione numerica. Molto spesso infatti per simulare il campo idrodinamico o la dispersione di una variabile conservativa e non-conservativa all'interno dell'ambiente marino vengono utilizzati dei dati acquisiti a una grande distanza dall'area di studio. I risultati ottenuti possono contenere un errore significativo in quanto non si tiene nella dovuta considerazione l'elevata variabilità che i parametri atmosferici e marini hanno in corrispondenza della costa. E' sempre auspicabile quindi utilizzare dati provenienti dalla zona che si intende studiare. In questo lavoro vengono utilizzate i dati raccolti da un sistema di misure integrato dell'ambiente marino costiero, messo a punto grazie alla collaborazione tra Autorità Portuale di Civitavecchia e Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina, che prevede l'installazione nell'area portuale di una centralina meteo, un ondometro e una stazione fissa che acquisisce in continuo i principali parametri fisici, chimici e biologici della colonna d'acqua. Vengono inoltre svolte periodicamente campagne di misura per valutare lo stato di salute delle praterie di *Posidonia oceanica* presente lungo il tratto di costa tra Marina di Tarquinia e S. Severa ed estratti dati satellitari per analizzare la distribuzione di clorofilla-a e solido sospeso.

2. Oggetto e scopo

Lo scopo del presente studio è quello di analizzare la dispersione della componente fine del materiale dragato prodotto durante i lavori di ampliamento del porto di Civitavecchia tra Novembre 2012 e Gennaio 2013 al fine di valutare i possibili effetti prodotti sulle praterie di *Posidonia oceanica*. Il lavoro si propone inoltre di mettere a punto una strategia integrata e multidisciplinare costituita da misure in situ, osservazioni satellitari e simulazioni numeriche per monitorare i possibili effetti sull'ambiente marino-costiero prodotti dalle diverse fonti di inquinamento presenti.

3. Area di studio.

È stato preso in esame il tratto di costa del Lazio settentrionale compreso tra Santa Severa e Marina di Tarquinia. Quest'area è caratterizzata da una elevata complessità geomorfologica e da una costa particolarmente articolata.



Fig.1 : area di studio.

3.1 Caratterizzazione morfologica e sedimentologica

L'area di studio presenta una notevole complessità geologica, risultato delle diverse vicende che hanno coinvolto la penisola italiana a partire dall'era Mesozoica. All'interno di questo territorio si ritrovano affioramenti di formazioni vulcaniche, depositi di facies marina e continentale. Questa grande eterogeneità si riflette in modo determinante anche sulla morfologia del paesaggio fisico si presenta ricco di molti elementi: le colline dolci sedimentarie ed i ripiani tufacei, rilievi aguzzi ed aspri delle lave, i laghi craterici o vulcano-tettonici di forma circolare o composta da più circonferenze che si intersecano sovrapponendosi; le forre e i corsi d'acqua a carattere

prevalentemente torrentizio.

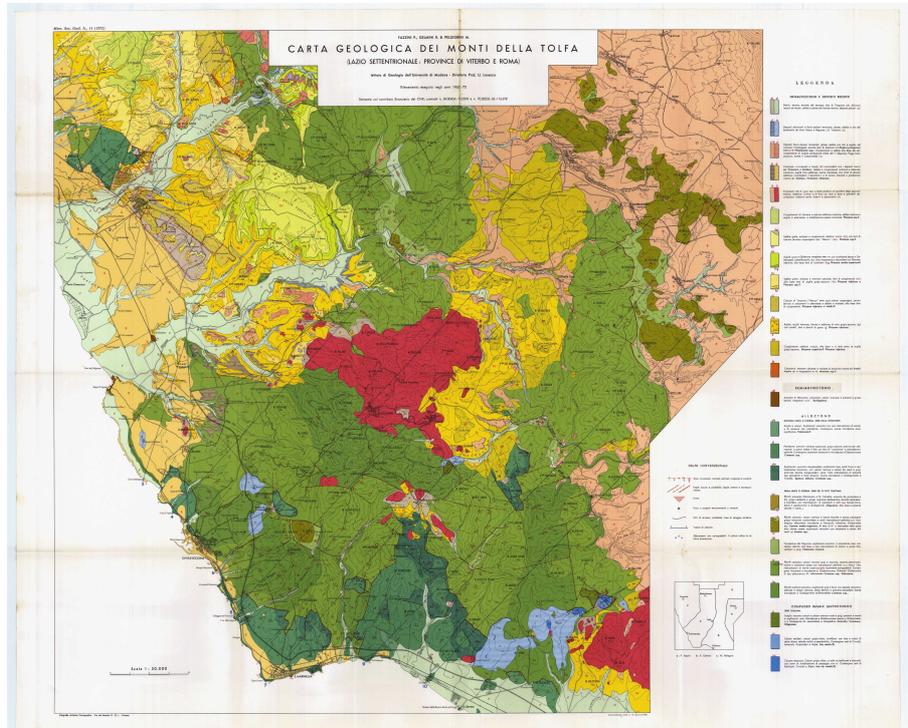


Fig.2 : carta geologica del Lazio settentrionale.

La zona in corrispondenza di Capo Linaro è occupata principalmente dai Monti della Tolfa, costituita da rilievi addolciti, prevalentemente da flysch calcareo-marnoso e secondariamente da ridotti affioramenti di argilloscisti; in prossimità della costa sono presenti piccole percentuali di pietraforte, l'unico litotipo in grado di determinare una certa quantità di alluvioni sabbiose. Alla base dei rilievi montuosi è presente una porzione estesa di depositi di ciottolami di origine continentale del periodo olocenico. Andando verso nord si incontrano numerosi depositi alluvionali di origine recente, in particolare in corrispondenza dei fossi a carattere torrentizio (Fosso Marangone, Fosso Malapasso, Fosso Scarpatosta, Fosso Zampa d'Agnello, Fosso Fiumaretta) fino ad arrivare all'estesa pianura alluvionale del Fiume Mignone e del Fiume Marta. La produttività sabbiosa è inoltre riconducibile alle vulcaniti tracheitiche che alimentano parzialmente il bacino del Mignone nel versante NE dell'area di Tolfa e Allumiere. Le altre due formazioni citate producono quasi esclusivamente materiali di pezzatura grossolana. La produttività di materiale fine di questo complesso risulta essere trascurabile.

L'ampiezza della piattaforma continentale laziale è variabile: è più limitata nel settore centrale, tra Capo Linaro e Capo Circeo (20 Km), mentre è maggiormente estesa nel settore settentrionale tra l'Argentario e Capo Linaro e meridionale tra Capo Circeo e Gaeta (30-40km). La sua pendenza media è di poco inferiore a 0.5° . Il margine verso mare, in corrispondenza del quale ha inizio la scarpata continentale, è ben definito e si trova ad una profondità variabile tra i 120 m e i 150 m. I fondali antistanti la costa, compresi tra la battigia e l'isobata dei 10m., presentano un andamento e un'ampiezza che riflettono i principali lineamenti della morfologia costiera. Nell'area di Montalto di Castro si osservano fondali poco acclivi, associati a un'ampia fascia costiera (Chiocci e La Monica, 1996; La Monica e Raffi, 1996).

L'area di studio si trova a cavallo di due unità fisiografiche. La prima si estende dal promontorio dell'Argentario fino a Capo Linaro. Questa unità presenta due andamenti diversi della piattaforma continentale. Dal promontorio fino a Punta Morelle, la piattaforma ha un andamento abbastanza regolare, con pendenza debolmente degradanti verso il largo. In particolare fra le batimetriche di -15 e -20m sono presenti modeste forme positive allungate parallelamente alle isobate, che si elevano di circa 3m rispetto ai fondali circostanti. Le diverse morfologie, positive e negative, interrompono l'omogeneità dei fondali nel tratto compreso tra Punta Morelle e Capo Linaro. La loro presenza è probabilmente da ricollegare alle praterie a *Posidonia oceanica* o ad accumuli legati all'attività incrostante di organismi bentonici che possono essere collegati o meno alla presenza della *Posidonia*.

A Sud di S. Agostino e fino a Capo Linaro la costa diviene alta e di ciò risentono in modo evidente i fondali, la cui pendenza aumenta vistosamente: l'isobata dei -10 m è ubicata, mediamente, a soli 500 m dalla linea di riva. Anche la seconda unità fisiografica che si estende da Capo Linaro fino a Capo Anzio può essere suddivisa in due settori. Nel primo settore (fino a Palo) i fondali, assai articolati fino ai -20 m di profondità, divengono morfologicamente omogenei e digradano verso il largo prima dolcemente (pendenza media fra le isobate -30 e -40 m pari al 0,5% circa) e poi più bruscamente (pendenza media pari a 1% fra -40 e -50 m e a 1,33% fra -50 e -60 m). Al contrario, a Sud di Palo Laziale i fondali sono omogenei a tutte le profondità. Le caratteristiche della piattaforma continentale interna (ampiezza, pendenza etc.) sono da ricollegare alla presenza del delta che il Fiume Tevere ha costruito nel tempo, utilizzando i sedimenti da esso stesso riversati in mare.

Le attuali caratteristiche dei fondali marini (almeno fino all'isobata dei 120 m) sono il

risultato dell'azione di due fattori diversi: l'apporto di sedimenti dalla terraferma e le variazioni glacioeustatiche pleistoceniche (ultimi 2.000.000 anni), in particolare quelle relative all'ultima risalita del livello del mare, circa 20.000-8000 anni fa (La Monica e Raffi, 1996).

Per la caratterizzazione morfologica dell'area di studio è stato fatto riferimento alla classificazione effettuata da Brondi A. (1994). La classificazione relativa alla costa dell'area di studio è rappresentata nella seguente immagine.

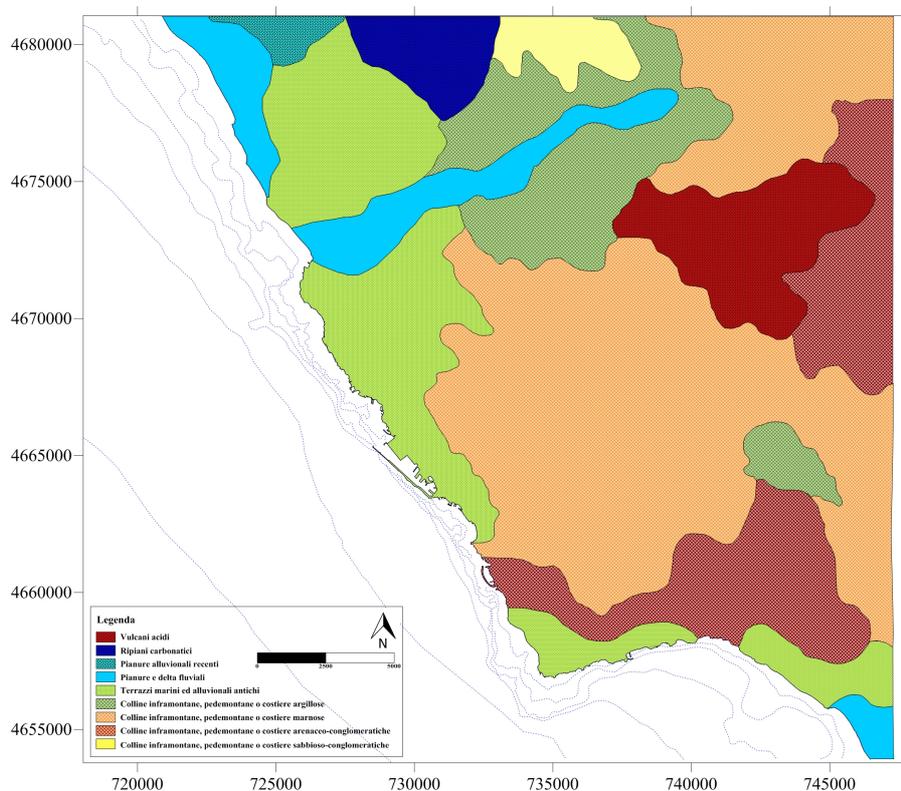


Fig.3 : carta morfologica nell'area di interesse.

Tutto il tratto di costa dell'area di studio presenta una costa alta a terrazzi marini formati a seguito delle variazioni glacioeustatiche; l'entroterra è generalmente costituito da strutture collinari costiere di diversa natura (argillose, marnose, arenaceo-conglomeratiche e sabbioso conglomeratiche); la zona settentrionale vede la presenza importante degli apporti fluviali del fiume Mignone e del fiume Marta.

La sedimentologia della piattaforma interna, per l'area oggetto del presente lavoro, è trattata in maniera estensiva da La Monica e Raffi (1996) nel volume "Il Mare del Lazio".

Nell'unità fisiografica Monte Argentario-Capo Linaro i sedimenti fini (peliti sabbiose) si rinvencono soltanto in corrispondenza delle foci dei numerosi corsi d'acqua, fra cui i fiumi Fiora, Marta e Mignone (Borelli et al., 1986, citati da Chiocci e la Monica, 1996), mentre i sedimenti molto fini (peliti) si rinvencono solo al traverso del Fiume Mignone, già a profondità inferiori ai 20 m. Caratteristica comune a tutto il settore è la mancanza sulla piattaforma interna di sedimenti francamente sabbiosi; infatti i materiali più grossolani presenti sono le sabbie pelitiche. Ciò dimostra che l'azione diretta del moto ondoso su tali fondali è assai modesta, tanto da non riuscire ad allontanare i materiali più fini.

Nel settore settentrionale dell'unità fisiografica Capo Linaro-Capo Anzio (a nord del delta tiberino), come più volte ripetuto, la piattaforma continentale interna è in gran parte sotto l'influenza degli apporti solidi del Fiume Tevere.

Al limite settentrionale (da S.Marinella fino a Ladispoli) la litologia dei fondali è assai monotona in quanto sono presenti soltanto peliti sabbiose, il cui limite verso terra è fortemente condizionato dalla presenza di biocostruzioni. Esse sono presenti su fondali poco più profondi di 10 m, a circa 1 km dalla linea di riva. I sedimenti a elevata componente sabbiosa si rinvencono a SE di Ladispoli (Palo) quando scomparsi i posidonieti e le costruzioni ad opera di organismi incrostanti, inizia a farsi sentire in modo evidente l'influenza degli apporti di origine fluviale del Tevere.

3.2 Caratterizzazione idrologica

L'idrografia dell'area è caratterizzata dalla presenza di una fitta rete di corsi d'acqua, quasi tutti a carattere prevalentemente torrentizio, che confluiscono nei due fiumi più importanti: il Mignone e il Marta. L'insieme di questi corsi d'acqua costituisce un aspetto di notevole interesse ecologico e paesaggistico dal momento che gran parte di essi con la loro forza di erosione hanno scavato e modellato questo territorio.

Il Marta con un bacino imbrifero di 1071 Km² occupa l'intera area nord-occidentale dell'area esaminata; si sviluppa su terreni di natura vulcanica e con il suo sistema di torrenti drena gran parte dell'apparato vulcanico vulsino e vicano. Nei comuni di Blera, Barbarano e Veiano si ritrovano diversi suoi affluenti quali fosso Biedano, fosso Leia, torrente Grignano, i quali scorrendo verso nord vanno ad ingrossare nei pressi di Monte Romano il fosso Traponzo, che subito dopo si getta nel Marta.

Il Mignone con un bacino imbrifero di 496 Km², una portata media alla foce di circa 4 m³/sec e una lunghezza totale di oltre 65 Km è il più importante corso d'acqua della provincia di Roma non affluente del Tevere. Nasce nel territorio del comune di Veiano e dopo aver attraversato affioramenti poco permeabili di natura flyscioide e depositi marini argilloso-sabbiosi, arriva al mare nei pressi di Civitavecchia. Il suo deflusso idrico è quindi chiaramente influenzato dal ruscellamento superficiale, che determina un regime fortemente impulsivo con episodi di piena molto rilevanti ed a rapido esaurimento. I suoi affluenti principali sono: torrente Vesca, fosso Lenta, fosso della Palombara e fosso Bicione. Al di fuori del suo bacino imbrifero nel comprensorio certite-tolfetano sono presenti anche altri due importanti corsi d'acqua: il primo denominato fosso Marangone che nasce nei pressi di Allumiere; il secondo Rio Fiume (comune di Tolfa) che attraversando i monti Ceriti arriva in mare nei pressi di Santa Marinella.

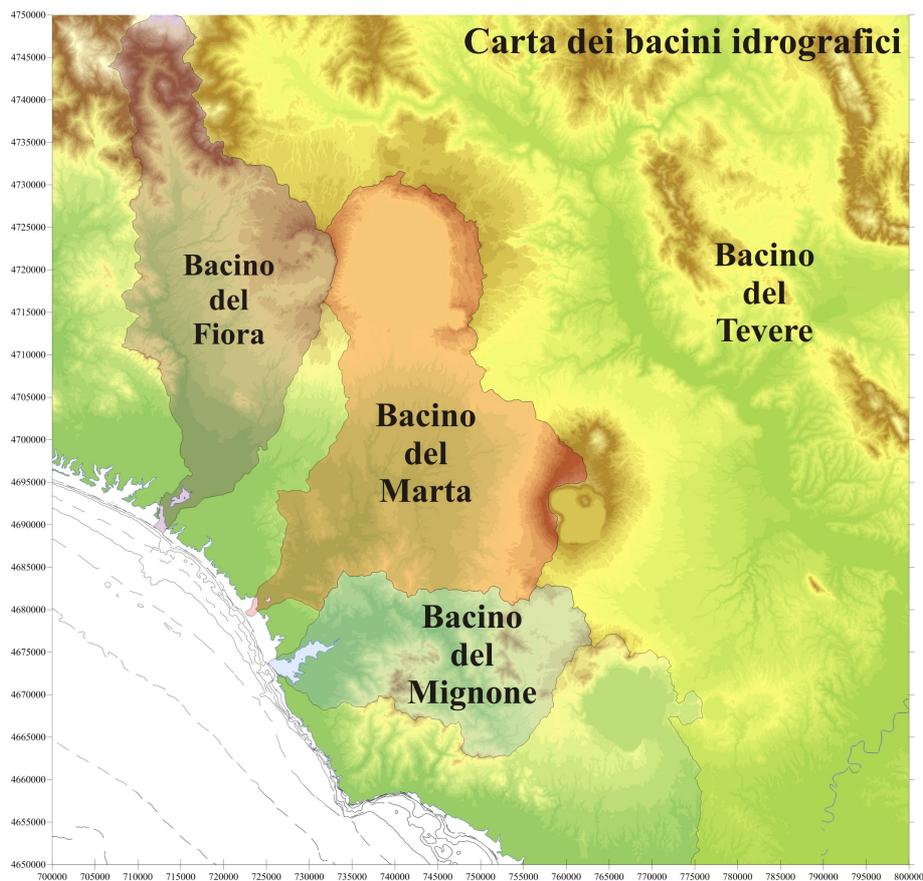


Fig.4 : carta dei bacini idrografici dei corsi d'acqua dell'area di studio.

3.3 Caratterizzazione meteomarina ed idrodinamica

L'area di studio si estende tra due unità fisiografiche che si susseguono in corrispondenza di Capo Linaro, in cui si osservano diverse derive litorali in base all'orientamento della costa rispetto ai venti dominanti.

Il tratto di costa a nord di Capo Linaro è interessata prevalentemente dai mari provenienti da sud (Mezzogiorno), sud-ovest (Libeccio) e ovest (Ponente) (Milli, 1993). In particolare per i mari da sud la deriva litorale è diretta sempre verso NO, i mari da SO generano due correnti di deriva che si muovono verso SE nel settore settentrionale del litorale e verso nord-ovest in quello meridionale; mentre i mari da ovest influenzano solo l'area tra Punta delle Morelle e Civitavecchia determinando una corrente diretta verso SE (Milli, 1993).

L'azione combinata di queste correnti determina una risultante negli spostamenti dei materiali lungo riva, tale da permettere la distinzione di due settori:

Settore compreso tra Ansedonia e Punta delle Morelle: è caratterizzato da una prevalente deriva litorale verso SE nel tratto compreso tra il Lago di Burano e la località di Sughereto, e da una corrente lungo riva verso NO nel tratto compreso tra la località di Sughereto e Punta delle Morelle; la località Sughereto, ubicata in posizione centrale rispetto ai due tratti costieri, costituisce così una zona di accumulo di sedimenti (Milli, 1993).

Settore compreso tra Punta delle Morelle e Torre Sant'Agostino: la corrente di deriva è diretta verso SE nel tratto compreso tra Punta delle Morelle e la foce del torrente del Gesso e verso NO nel tratto compreso tra Torre S. Agostino e la foce del torrente del Gesso (Milli, 1993).

Studi di carattere compositivo hanno individuato in questo litorale un generale trasporto lungo costa dei sedimenti verso NO (Anselmi et al., 1976), avvalorato dall'andamento del tratto terminale delle aste dei fiumi Marta e Mignone e dei loro modesti apparati deltizi che risultano appunto spostati verso NO.

Il tratto di costa compreso tra Capo Linaro e Fiumicino è direttamente interessato dalle ondate provocate dai venti foranei provenienti dal II, III e IV quadrante, che innescano per i mari provenienti da sud una corrente di deriva litorale diretta costantemente verso NO; l'ondata da SO, soprattutto in corrispondenza dell'aggetto apicale del delta del Tevere, determina condizioni di deriva litorale in opposte direzioni (NO e SE), mentre per i mari provenienti da ovest la corrente di deriva è sempre diretta verso SE (Milli, 1993).

4. Approccio allo studio

L'analisi della dispersione del solido sospeso durante le operazioni di dragaggio è stata condotta integrando diversi dati provenienti da differenti piattaforme di misura al fine di fornire una risposta attendibile riguardante le zone costiere maggiormente influenzate dal materiale fine proveniente dal porto di Civitavecchia e i relativi effetti sulle principali biocenosi bentoniche (*Posidonia oceanica*) presenti. I dati raccolti, relativi alle condizioni meteomarine e a quelle della colonna d'acqua all'interno dell'area di studio nel periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio (Novembre 2012 – Gennaio 2013), sono stati in seguito utilizzati all'interno dei modelli numerici per simulare i processi di trasporto e sedimentazione del materiale fine. Le informazioni riguardanti la distribuzione spaziale e lo stato di salute delle praterie di *Posidonia oceanica* ha consentito infine di definire i possibili impatti ai danni di questo habitat. Nella figura in basso viene raffigurato in maniera schematica la Rete di Monitoraggio dell'ambiente marino-costiero messa a punto grazie alla collaborazione tra Autorità Portuale di Civitavecchia e Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina.



Fig.5 : schema relativo al funzionamento della Rete di Monitoraggio dell'ambiente marino costiero.

4.1 Dati centralina meteo e boa ondometrica

La centralina meteo è stata installata agli inizi del 2007 ed è stata posizionata all'interno del Porto di Civitavecchia. Tale strumento restituisce con un elevatissima frequenza temporale (10 minuti) le seguenti variabili: la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa, la pressione atmosferica, le precipitazioni, la velocità e la direzione del vento.

I grafici di figura 6 rappresentano l'andamento temporale dell'intensità e della direzione del vento durante il periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio all'interno del porto di Civitavecchia. Le velocità maggiori sono state registrate tra il 27 e 28 Novembre dove il vento, proveniente dai quadranti meridionali, è arrivato fino a 16 m/s. Il restante periodo è caratterizzato invece da eventi provenienti da nord che, come riportato anche dalla rosa dei venti (Fig. 7), risultano essere quelli regnanti insieme ai venti provenienti da Scirocco.

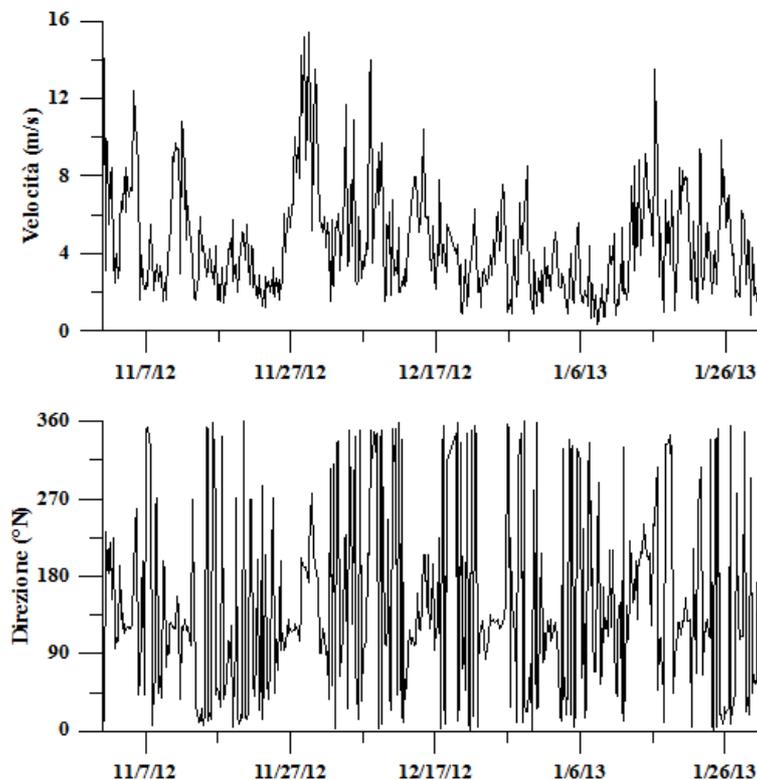


Fig.6 : andamento temporale della velocità e della direzione del vento durante il periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio.

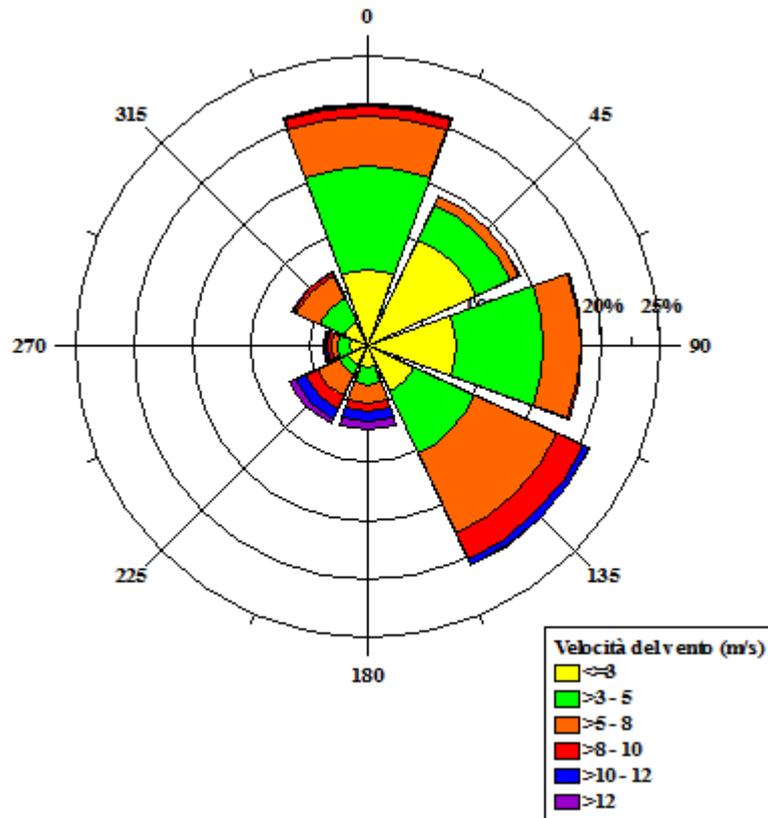


Fig.7 : rosa dei venti durante il periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio.

La pressione atmosferica subisce, in corrispondenza del periodo in cui viene registrata la massima intensità di vento, una forte e repentino abbassamento, passando da 1025 mbar a 985 mbar. Anche la temperatura e l'umidità relativa presentano i valori più bassi del periodo d'indagine: l'aria si raffredda fino a 5 °C e perde circa il 50 % di umidità relativa passando da 80 % al 30 %.

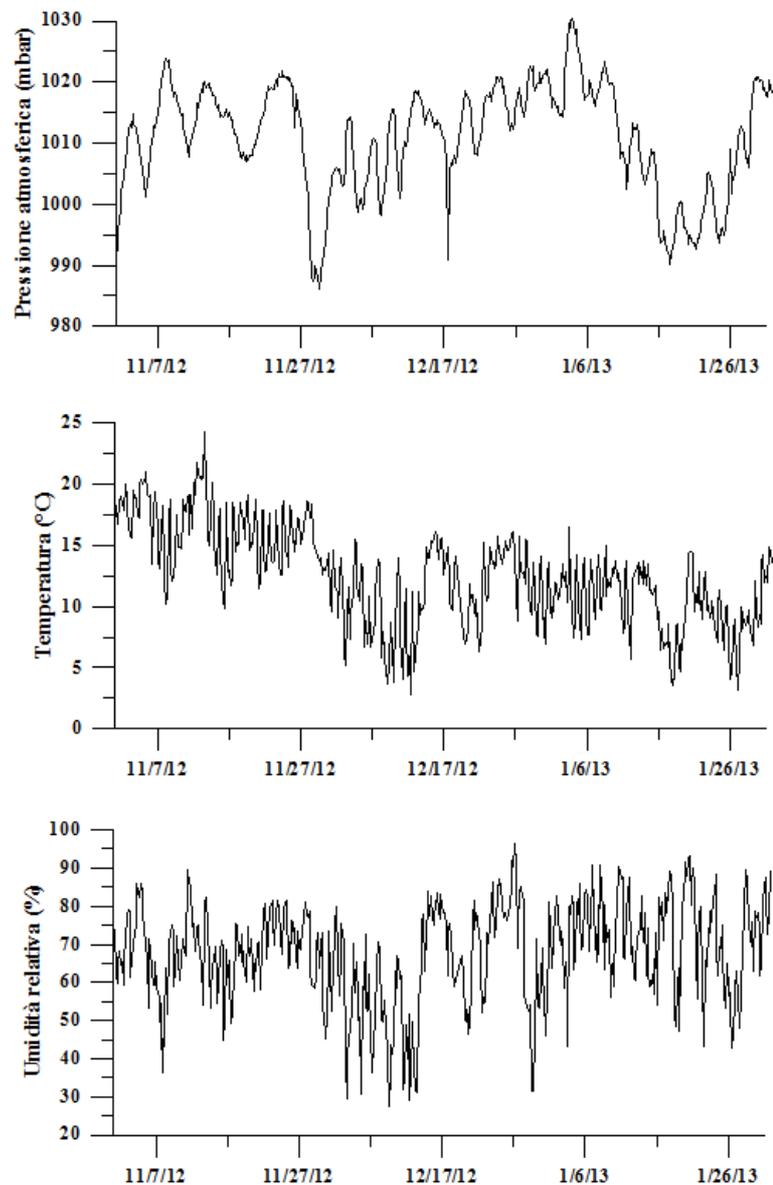


Fig.8 : andamento temporale di alcune variabili misurate dalla centralina meteo durante il periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio.

La boa ondamentrica è stata posizionata a metà Novembre del 2012 ad una distanza di circa 2 km dall'imboccatura del porto di Civitavecchia (Lat. 42.097 °N, Long. 011.744 °E) dall'impresa Pietro Cidonio S.p.A.

Come mostrato dai grafici di figura 9, nel periodo compreso tra il 27 e 28 Novembre, anche il moto ondoso presenta la sua massima intensità con un'altezza che raggiunge circa i 5 m associata ad una direzione di 135 °N (Sirocco). Altezze d'onda superiori a 2 m si registrano anche nella

prima metà di Dicembre e a fine Gennaio. La direzione di provenienza di tali eventi è prevalentemente quella di Libeccio che, come evidenziato anche dal clima ondoso, risulta essere quella più frequente.

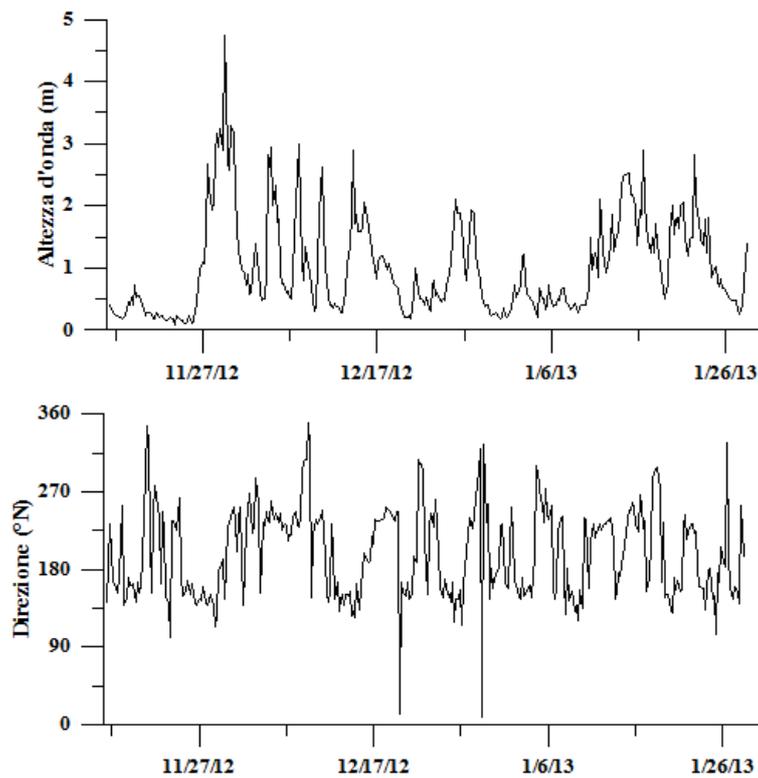


Fig.9 : andamento temporale dell'altezza e della direzione del moto ondoso misurate dalla boa ondometrica durante il periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio.

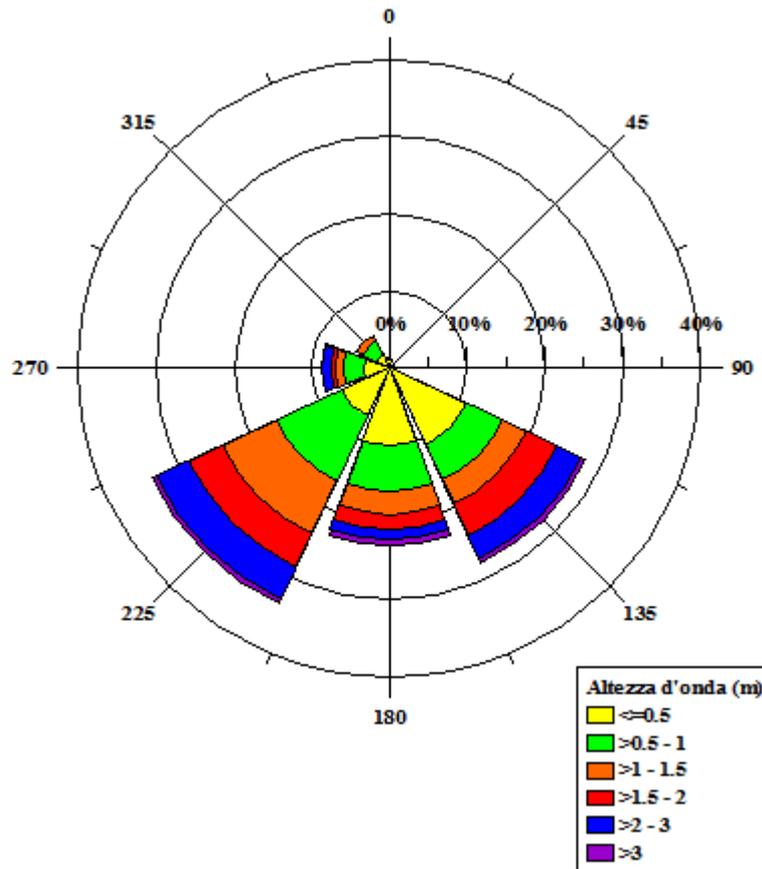


Fig.10 : clima ondoso durante il periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio.

4.2 Dati stazioni di prossimità e campionamenti in-situ per il monitoraggio della colonna d'acqua

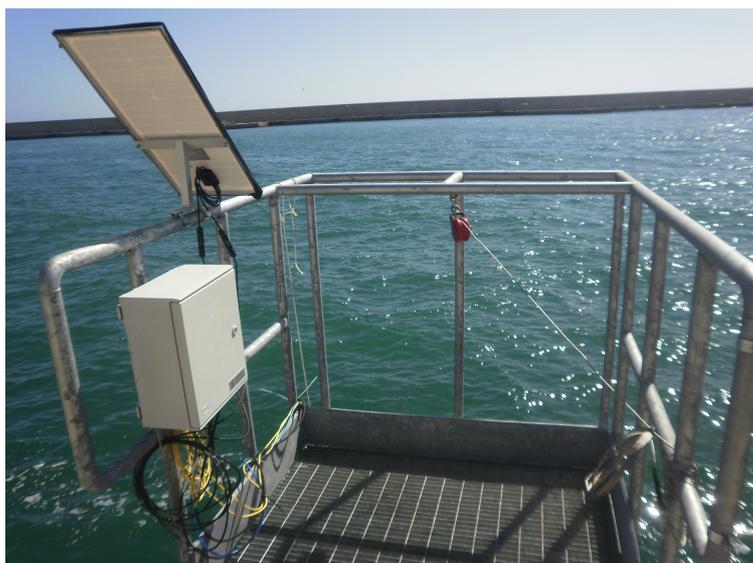
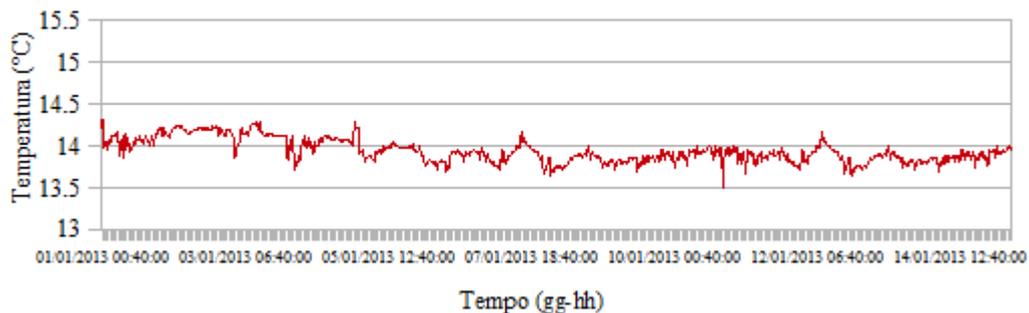


Fig.11 : stazione di prossimità.

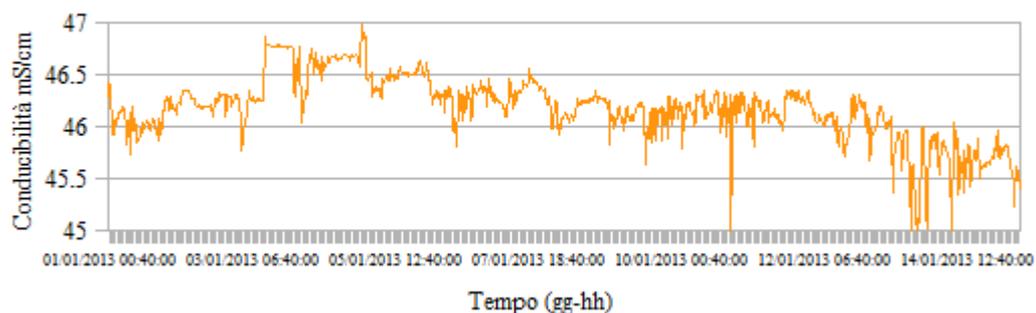
La stazione di prossimità è costituita da una serie di sensori integrati *ad hoc* per l'acquisizione in continuo dei seguenti parametri: temperatura, conducibilità, ossigeno disciolto, pH, torbidità, fluorescenza della clorofilla a.

L'acquisizione in continuo delle variabili fisiche, chimiche e biologiche, garantisce una visione sinottica dell'area dell'area studiata, garantendo il rispetto della qualità ambiente. A titolo di esempio, vengono di seguito presentati i grafici relativi alle variabili acquisite in un intervallo di tempo compreso nel periodo in cui sono state svolte le attività di dragaggio.

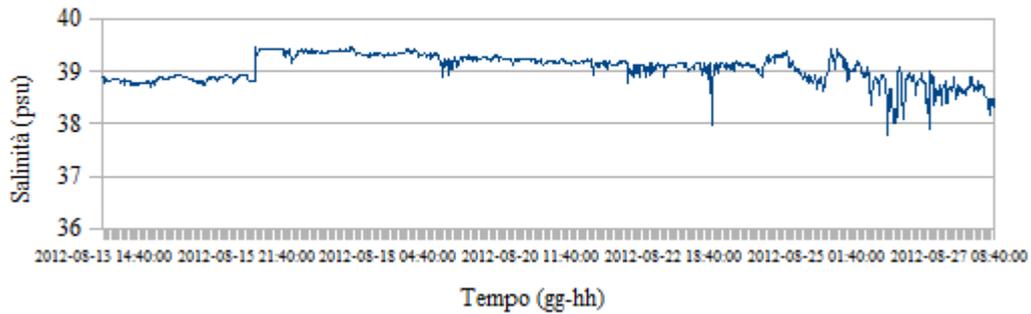
Temperatura Stazione Banchina



Conducibilità Stazione Banchina



Salinità Stazione Banchina



Torbidità Stazione Banchina

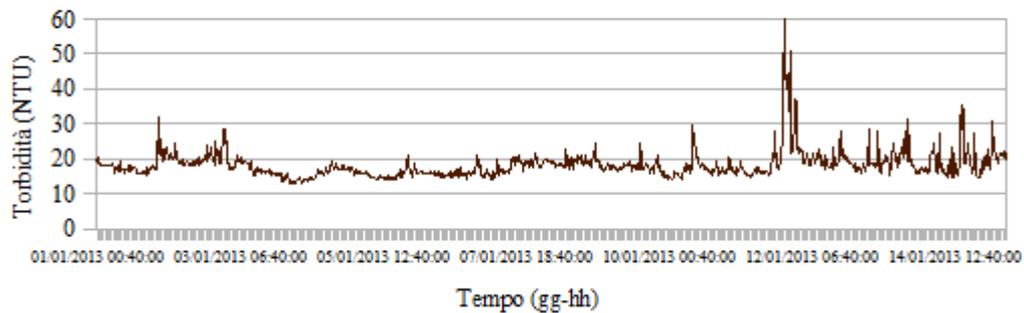
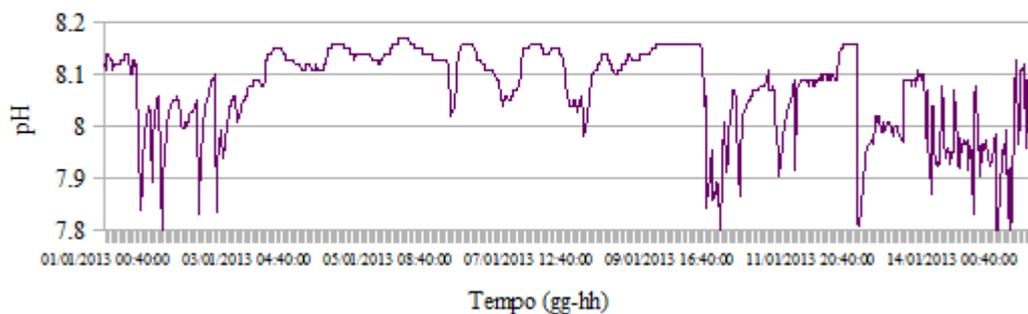
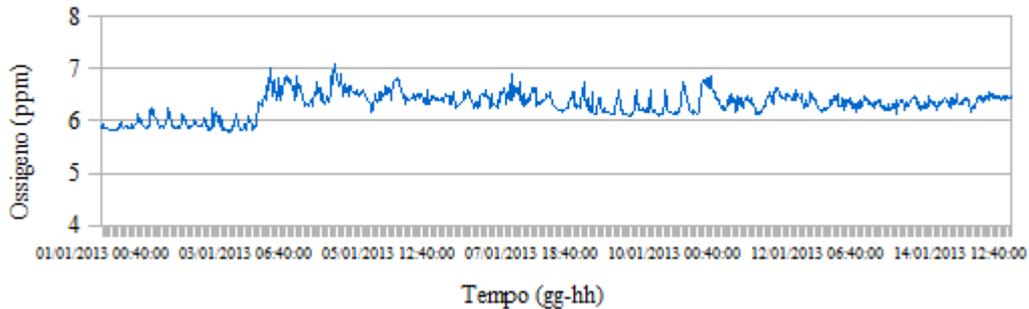


Fig. 12 : andamento temporale delle variabili fisiche misurate dalla stazione di prossimità durante le attività di dragaggio

pH Stazione Banchina



Ossigeno Disciolto Stazione Banchina



Clorofilla a Stazione Banchina

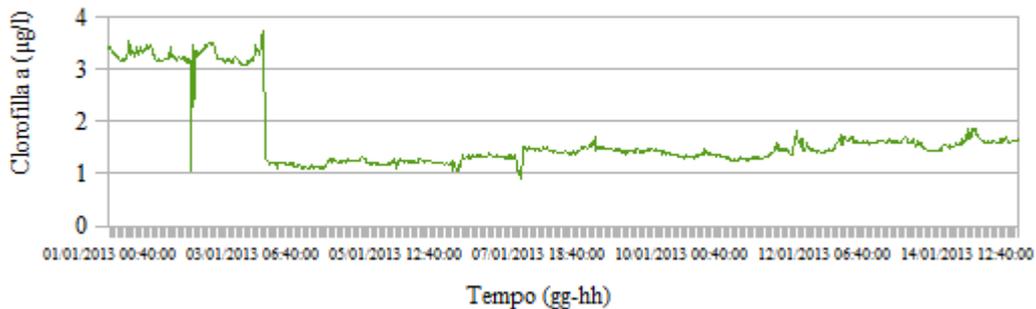


Fig. 13 : andamento temporale delle variabili chimiche e biologiche misurate dalla stazione di prossimità durante le attività di dragaggio

Contestualmente alle misure in continuo effettuate attraverso la stazione di prossimità, i parametri fisici, chimici e biologici della colonna d'acqua vengono acquisite periodicamente anche attraverso delle indagini in-situ. I campionamenti sono stati svolti con sonde multiparametriche e campionamenti di acqua che hanno permesso di definire la variazione dei parametri lungo la colonna d'acqua. Di seguito vengono presentati i dati raccolti durante un intervallo di tempo compreso nel periodo in cui sono state svolte le attività di dragaggio.

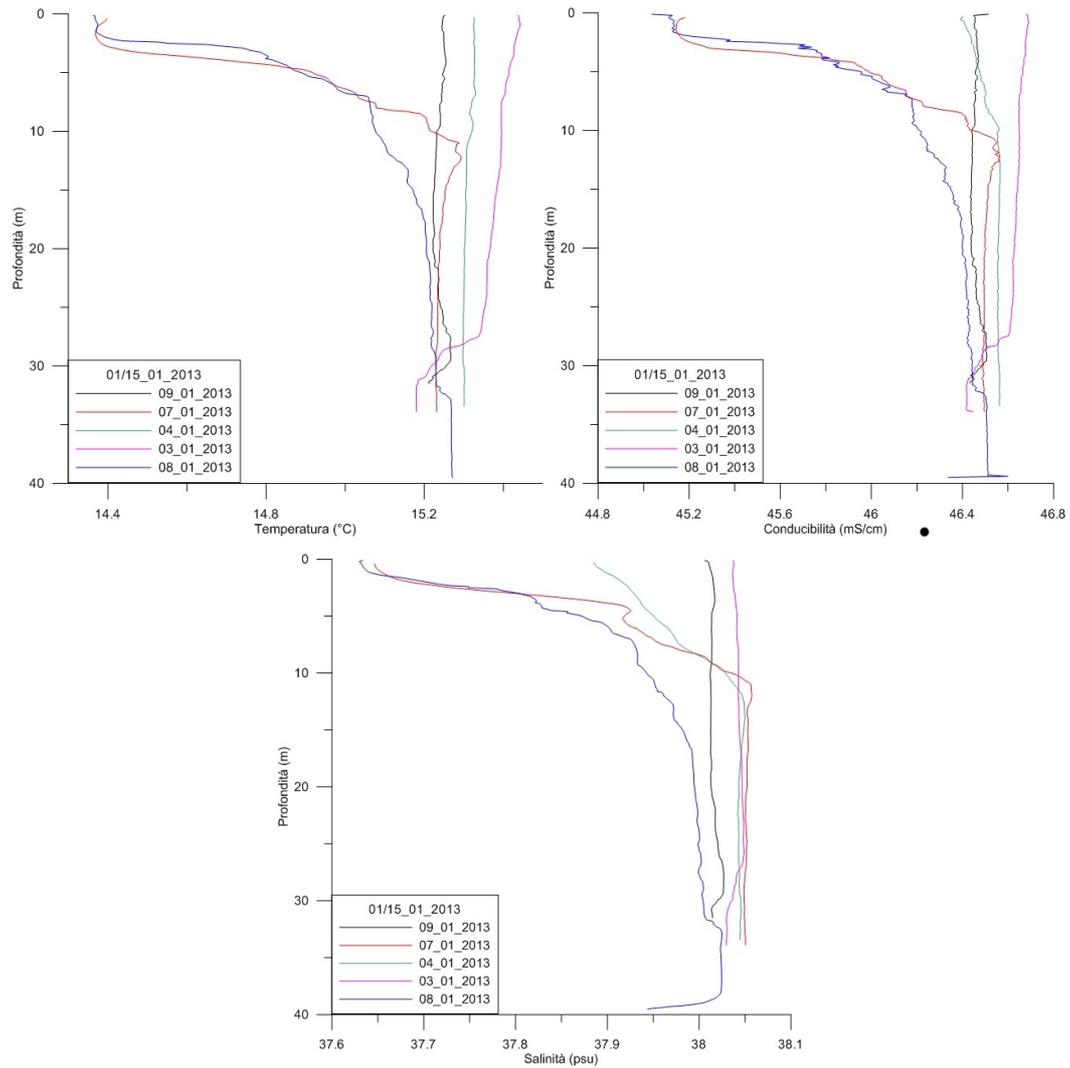


Fig. 14: Profili delle variabili fisiche misurate durante periodiche campagne di misura in situ nel periodo in cui sono state svolte le operazioni di dragaggio

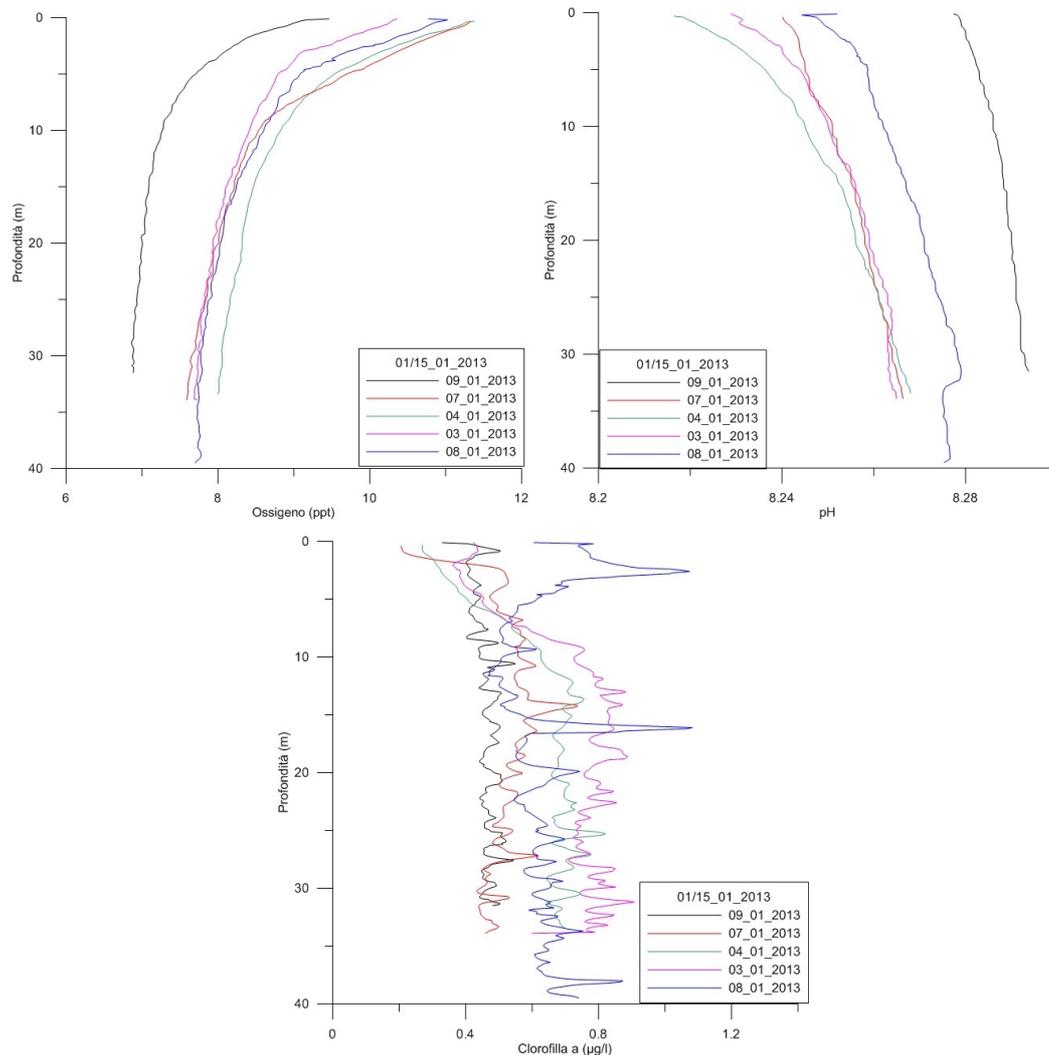


Fig. 15: Profili delle variabili chimiche e biologiche misurate durante periodiche campagne di misura in situ nel periodo in cui sono state svolte le operazioni di dragaggio

4.3 Osservazioni satellitari di clorofilla-a e solido sospeso

Le osservazioni satellitari sono l'unico strumento che consente di ottenere una rappresentazione dettagliata e sinottica di una variabile otticamente attiva nell'ambiente marino. Tuttavia l'elevata quantità di misure in-situ necessaria per l'elaborazione dei dati e la risoluzione (500 m – 1 km) che non permette di descrivere con sufficiente dettaglio i fenomeni in prossimità della costa, rendono l'utilizzo di questa piattaforma idonea solo per analizzare la dinamica ad una determinata scala spaziale. A tal proposito, in questo studio è riportata la distribuzione della clorofilla *a* e del solido sospeso lungo il tratto di costa compreso tra la foce del fiume Tevere e il

Promontorio dell'Argentario.

Le immagini utilizzate nel presente lavoro sono state elaborate dai dati provenienti da diversi sensori: MODIS Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), spettrometro montato sul satellite EOS PM per la misura sia della concentrazione della clorofilla *a* che del solido sospeso totale.

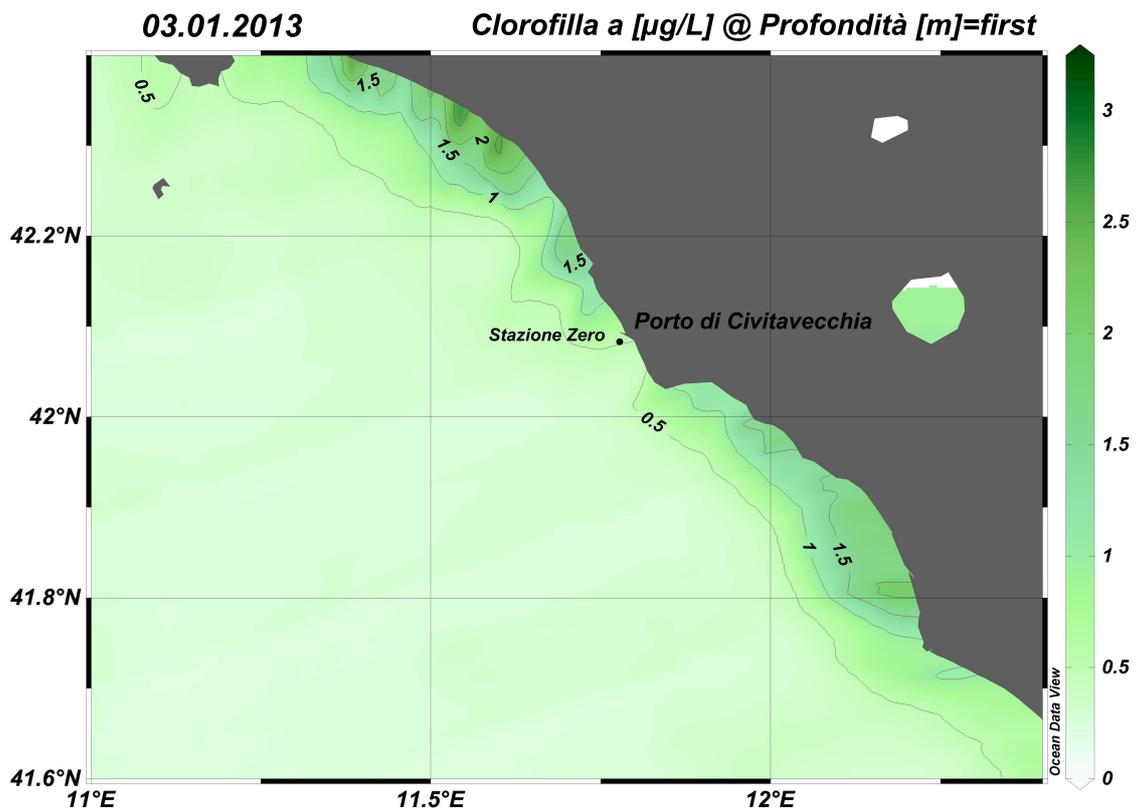


Fig 16: mappa superficiale di clorofilla *a* ottenuta da dati satellitari

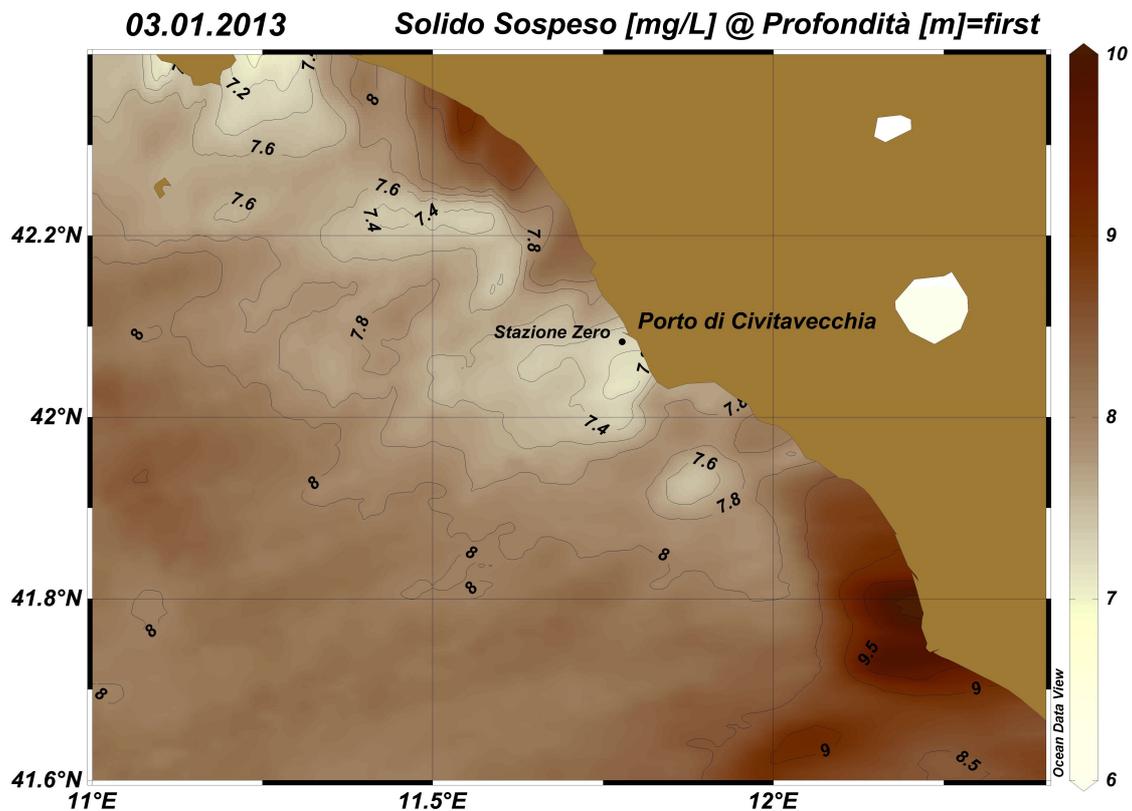


Fig 17 : mappa superficiale di solido sospeso ottenuta da dati satellitari.

4.4 Indagini subacquee sulla *Posidonia oceanica*

Le praterie di *Posidonia oceanica* costituiscono “ecosistemi climax” lungo le coste del mar Mediterraneo, rappresentando il massimo livello di sviluppo e di complessità possibile da raggiungere. Sono considerate, per questo motivo, e per le numerose ed importanti funzioni ecologiche che svolgono, gli ecosistemi più importanti presenti lungo la fascia costiera, inseriti all'interno dell' Allegato I della Direttiva Habitat (Dir. n. 92/43/CEE) come “habitat prioritario”. L'importanza ecologica che riveste e la sua sensibilità alla presenza di fonti di disturbo, rende la *Posidonia oceanica* una specie chiave nel monitoraggio dello stato di salute degli ecosistemi marini costieri.

Le attività di dragaggio, eseguite per l'ampliamento del Porto di Civitavecchia, hanno reso necessario lo studio dello stato di salute delle praterie presenti lungo il litorale.

Le attività di campionamento si sono svolte nel mese di Giugno 2013 in 18 stazioni distribuite lungo la costa all'interno dei 4 siti di interesse comunitario identificati nell'area di

interesse.

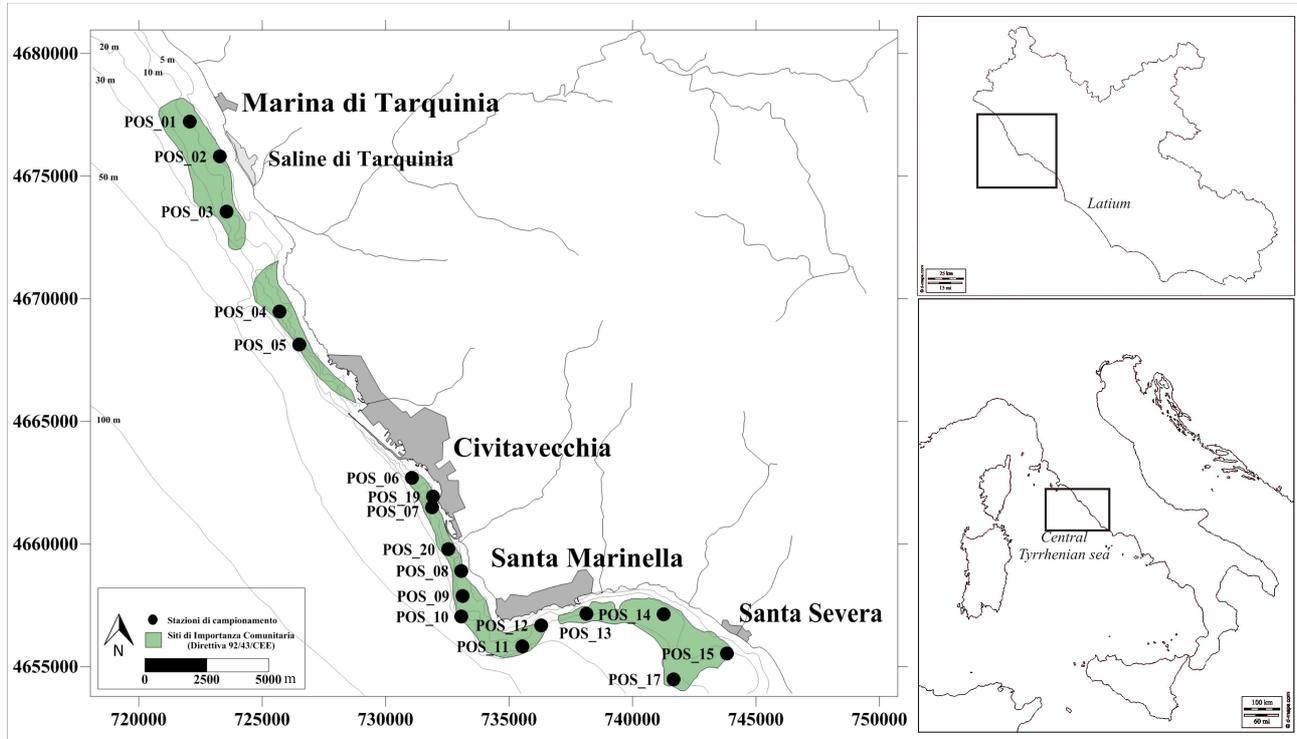


Fig. 18 : piano di campionamento per il monitoraggio delle praterie di *Posidonia oceanica*

Per poter capire l'effetto delle attività di dragaggio sulle praterie è stato eseguito un confronto con i dati raccolti nelle attività di monitoraggio precedenti. I risultati di queste attività verranno confrontati con la campagna di campionamento che verrà eseguita a 4 anni dal termine degli interventi di riassetto logistico. Qui di seguito sono riportate le coordinate (UTM-32T WGS84) delle stazioni di campionamento.

Coordinate metriche (UTM-32T WGS84)			
Stazione	LAT	LONG	Prof(m)
POS_01	4677467	722054	10.0
POS_02	4676134	723266	9.5
POS_03	4673809	723561	13.4
POS_04	4669709	725690	10.3
POS_05	4668364	726491	5.5
POS_06	4662959	731068	4.5
POS_19	4661991	732024	7.5
POS_07	4661443	731789	12.0
POS_20	4660009	732513	10.0
POS_08	4659141	733047	10.3
POS_09	4658047	733112	11.0
POS_10	4657276	733062	16.0
POS_11	4656060	735520	10.9
POS_12	4656902	736307	10.0
POS_13	4657444	738126	13.0
POS_14	4657366	741278	13.2
POS_15	4655767	743820	9.4
POS_17	4654640	741552	13.4

Tab. 1: Coordinate delle 18 stazioni di monitoraggio delle praterie di *Posidonia oceanica*

La valutazione dello stato di salute è stata eseguita attraverso rilievi subacquei, effettuati dal personale subacqueo del Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina (DEB) dell'Università degli studi della Tuscia.

La metodologia di campionamento utilizzata è di tipo gerarchico, così come riportato nell'immagine qui di seguito.

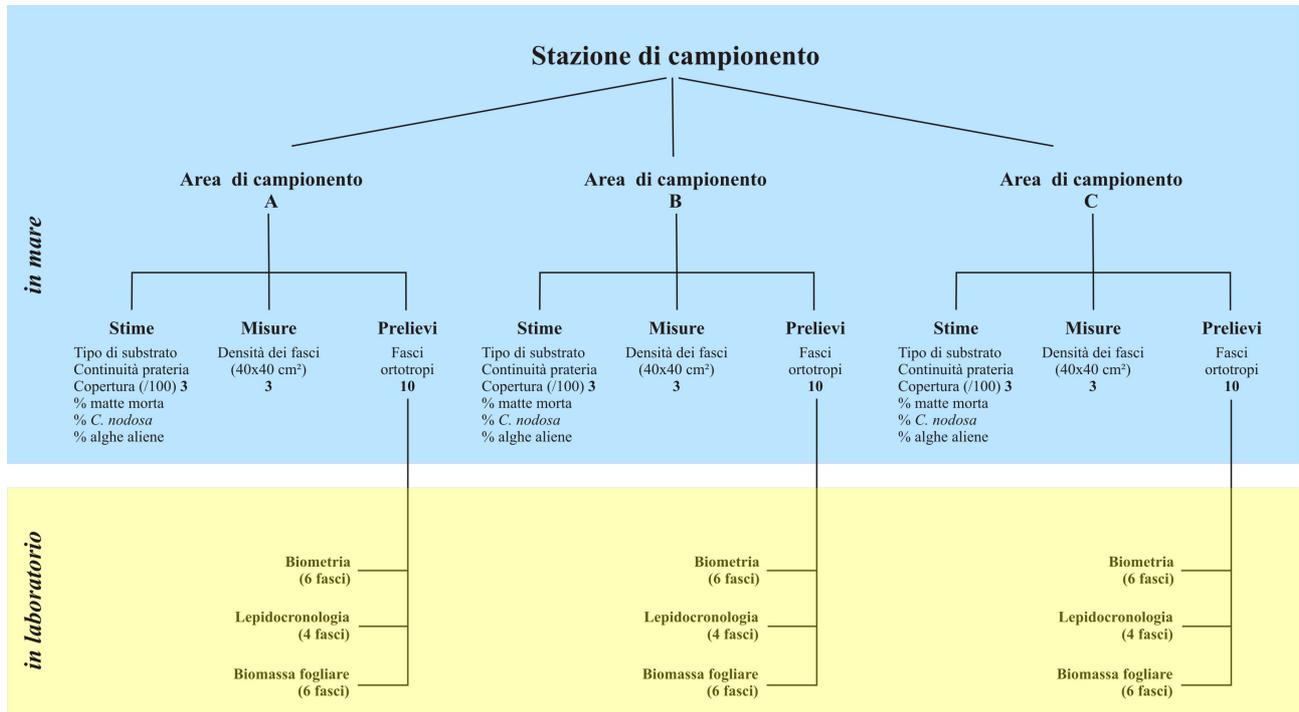


Fig. 19 : Strategia di campionamento gerarchico sulle praterie di *Posidonia oceanica*

Ogni stazione è stata suddivisa in 3 sottoaree distanziate tra loro di almeno 10 m. In ogni sottoarea sono state eseguite 3 conte di densità dei fasci fogliari in un quadrato di riferimento 40 x 40 cm, 3 stime di copertura del substrato da parte della pianta con un quadrato di riferimento di 1 x 1 m e sono stati prelevati 10 rizomi ortotropi per l'esecuzione delle analisi di laboratorio (fenologie e lepidocronologia).

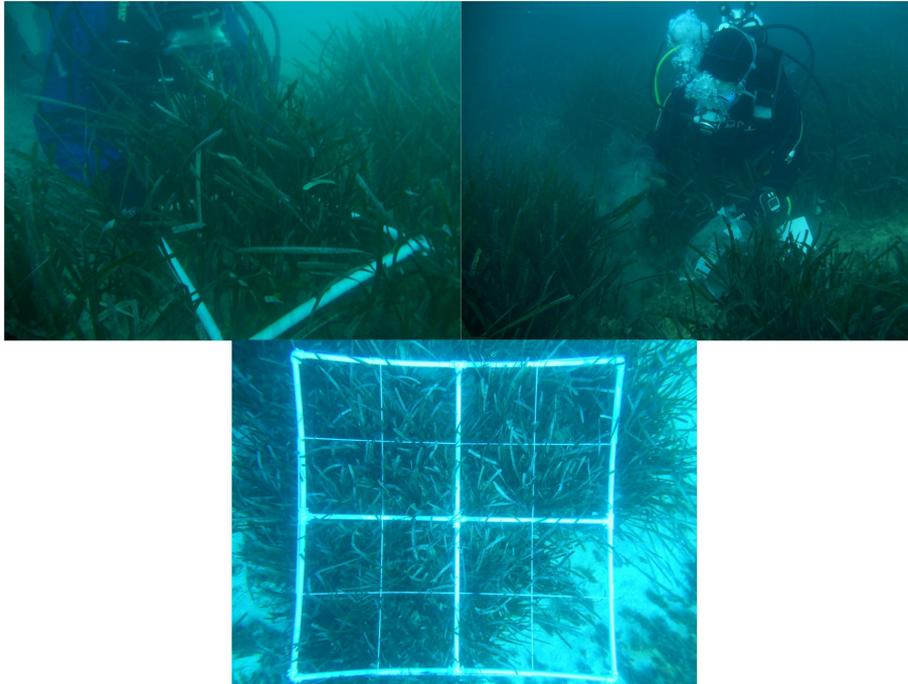


Fig. 20 : Rilievi *in situ* sulle praterie; Stima della densità dei fasci fogliari e della copertura del substrato, prelievo dei rizomi ortotropi per le analisi di laboratorio

I campioni prelevati, opportunamente etichettati, sono stati trasportati all'interno di contenitori portacampioni con acqua di mare in laboratorio e qui immediatamente analizzati per le misure biometriche e per la stima della produzione della pianta attraverso analisi lepidocronologica. Le immagini qui di seguito riportate sono rappresentati i dati rilevati nelle singole stazioni.

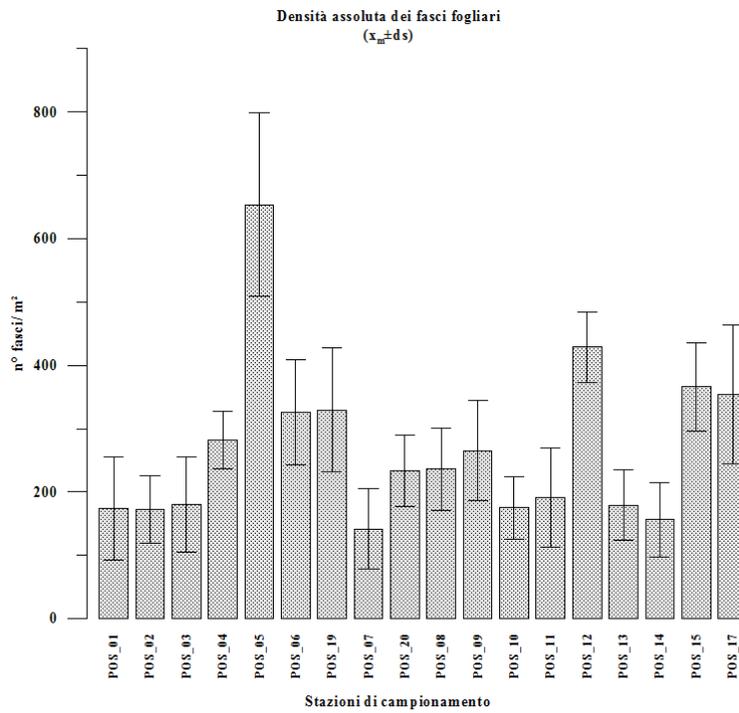


Fig. 21 : valori di densità assoluta dei fasci fogliari nelle campagne di monitoraggio

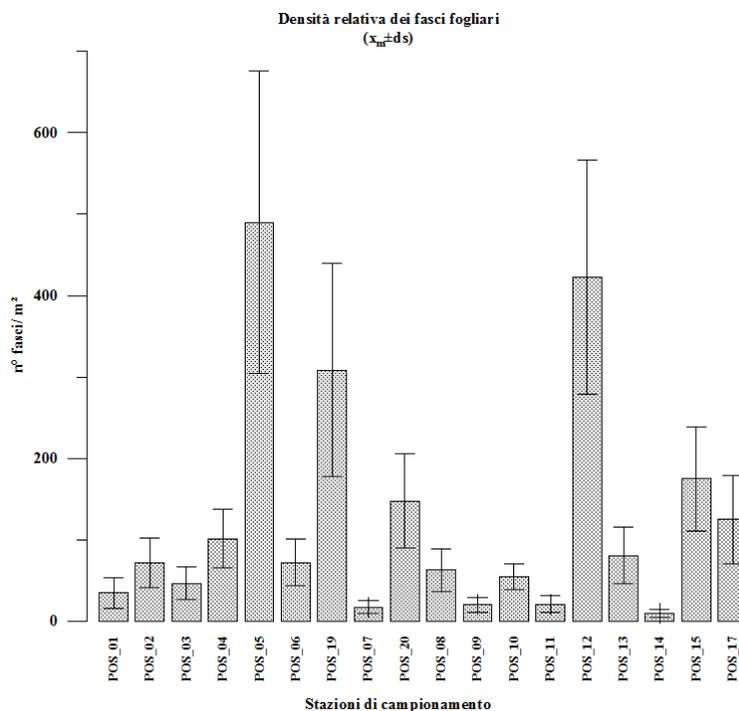


Fig. 22 : valori di densità relativa dei fasci fogliari nelle campagne di monitoraggio

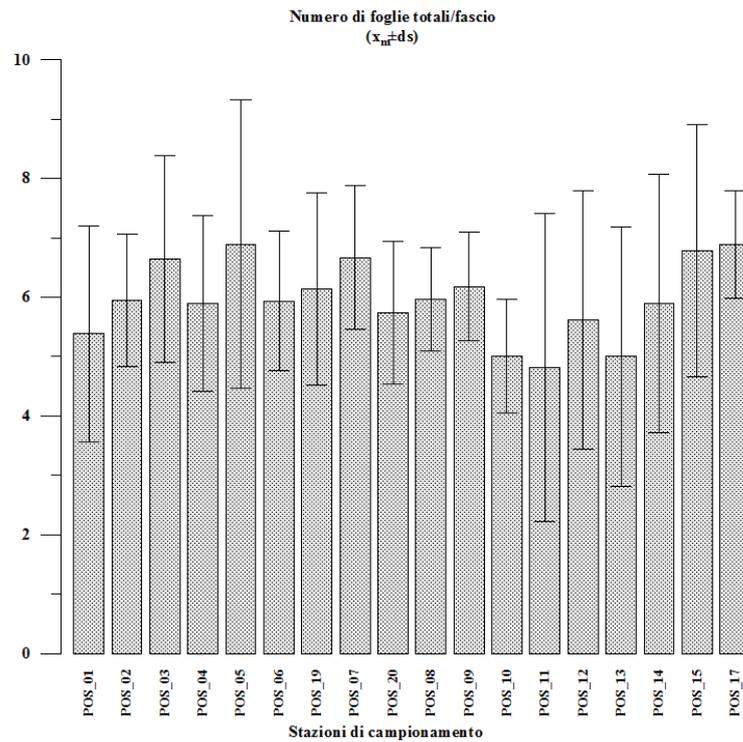


Fig. 23 : valori di numero di foglie per fasci fogliari nelle campagne di monitoraggio

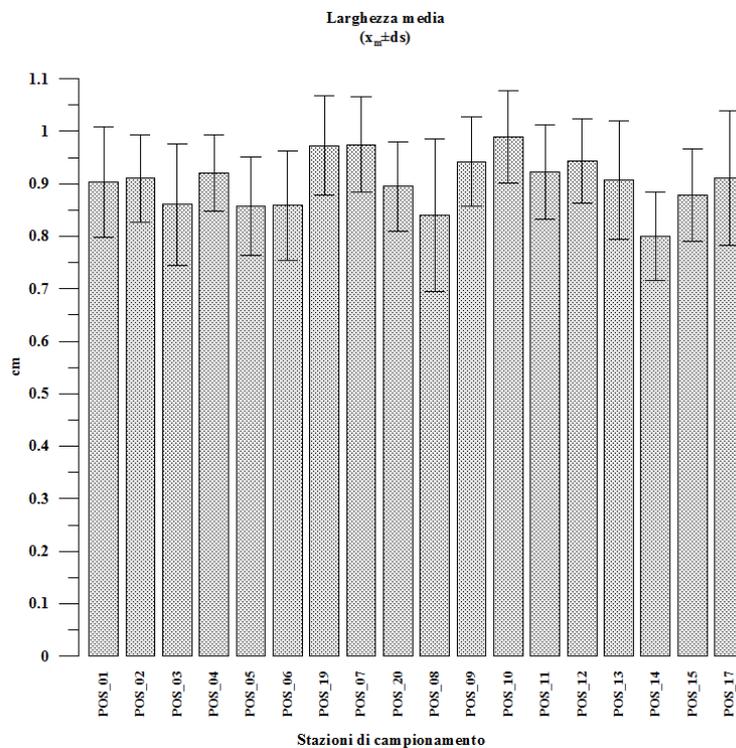


Fig. 24 : valori di larghezza delle foglie nelle campagne di monitoraggio

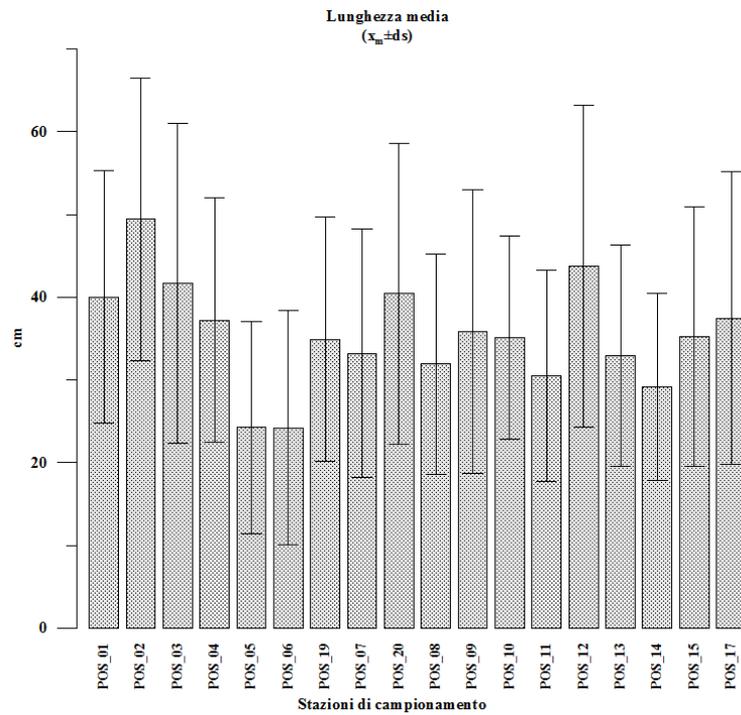


Fig. 25 : valori di lunghezza delle foglie nelle campagne di monitoraggio

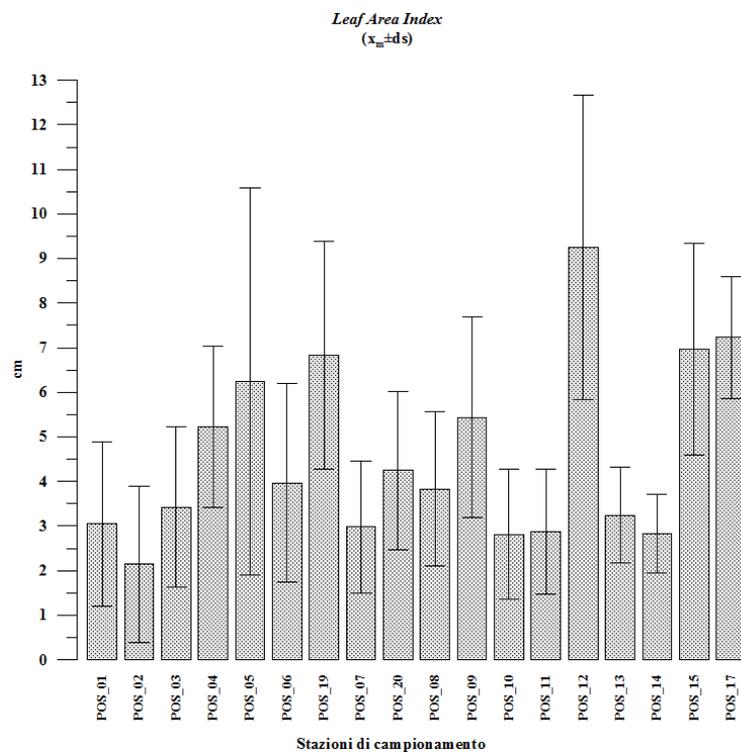


Fig. 26 : valori di *Leaf Area Index* delle foglie nelle campagne di monitoraggio

4.5 Simulazioni numeriche

I dati raccolti dalla Rete di Monitoraggio dell'ambiente marino-costiero sono stati utilizzati come input per i modelli numerici che simulano la corrente marina (ADCIRC), la propagazione del moto ondoso (STWAVE) e la dispersione del materiale dragato (PTM).

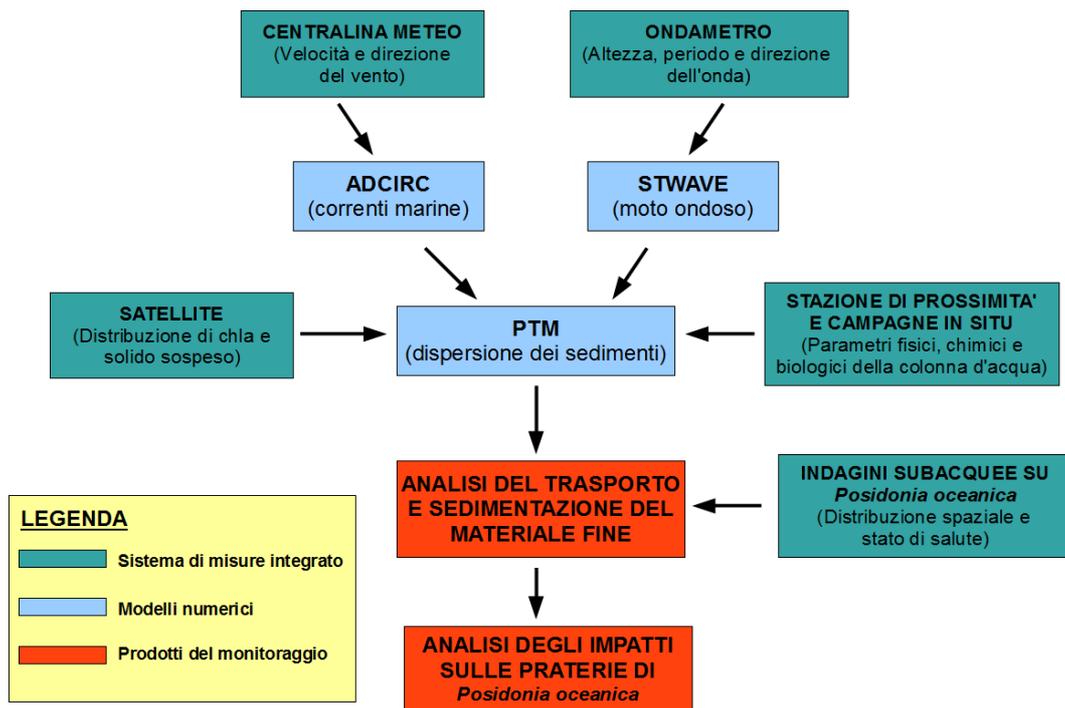


Fig. 27 : diagramma di flusso dove viene messo in evidenza l'interazione tra i dati raccolti dalla Rete di Monitoraggio e i modelli numerici al fine di fornire risposte sugli effetti ai danni delle praterie di *Posidonia oceanica*.

Sulla base delle condizioni meteomarine nel periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio è stato analizzato il campo idrodinamico, il moto ondoso e il trasporto del materiale fine in quattro diversi scenari di simulazione. Come si può vedere nella tabella sono state scelte le maggiori intensità dei tre eventi provenienti da differenti direzioni all'interno del settore di traversia definito a largo delle coste civitavecchiesi. Viene inoltre simulata la settimana (26 Novembre - 3 Dicembre 2012) in cui sono state registrate la massima altezza d'onda e intensità del vento.

Nome scenario	Velocità del vento (m/s)	Direzione del vento (°N)	Altezza d'onda (m)	Direzione dell'onda (m)	Perido di picco (s)
Libeccio	10	225	2.5	225	8
Scirocco	12	150	3	150	8
Ponente	10	300	2	300	8
Reale	Dati registrati tra il 26 Novembre e il 3 Dicembre 2012				

Tab. 2 : scenari di simulazione

Di seguito vengono descritti i tre modelli numerici utilizzati nello studio.

ADCIRC

L' ADCIRC è un modello utilizzato per risolvere le equazioni del moto per un fluido in movimento su un sistema ruotante come quello terrestre. Queste equazioni sono state formulate usando la pressione idrostatica tradizionale e le approssimazioni di Boussinesq. Sono state discretizzate nello spazio usando il metodo agli elementi finiti (FE, finite element) e nel tempo usando il metodo alle differenze finite (FD, finite difference).

Con l' ADCIRC è possibile effettuare simulazioni di problemi idrodinamici in due (two dimensional depth integrated model, 2DDI) o tre dimensioni (three dimensional model, 3D).

In entrambi i casi, l'elevazione è ottenuta dalla soluzione dell' equazione di continuità integrata sulla profondità nella forma “ Generalized Wave-Continuity Equation” (GWCE). La velocità è invece calcolata dalle equazioni della quantità di moto nel modello bidimensionale o tridimensionale. All'interno di queste equazioni tutti i termini non lineari vengono tenuti in considerazione.

L' ADCIRC è in grado di girare utilizzando sia un sistema di coordinate cartesiane che uno sferico.

Le condizioni al contorno che è possibile scegliere nell' ADCIRC includono:

- Specifiche elevazioni (come serie nel tempo o calcolate per mezzo dell'analisi armonica delle costituenti tidali)
- Specifico flusso normale (come serie nel tempo o calcolate per mezzo dell'analisi armonica delle costituenti tidali)
- Flusso normale uguale a 0
- Condizioni di free slip o no slip per la velocità

- Barriere esterne permeabili (il flusso fuoriesce dal dominio)
- Barriere interne permeabili (il flusso arriva in altre aree del dominio)
- Stress superficiale (provocato dal vento e/o dal wave radiation stress)
- Pressione atmosferica
- Radiazione esterna delle onde (condizione di Sommerfield)
- L' ADCIRC può essere invece forzato con:
- Condizioni di elevazioni al contorno
- Condizioni di flusso normale al contorno
- Condizione di stress superficiale al contorno
- Potenziale tidale
- Earth load/self attraction tide

L'ADCIRC comprende anche una parte dove è inclusa l' analisi dei minimi quadrati che computa le costituenti armoniche per l'elevazione e la velocità durante il corso della simulazione senza la necessità di trascrivere lunghe serie temporali per il post-processing.

Le equazioni utilizzate per risolvere il campo idrodinamico sono quelle relative al modello bidimensionale (2DDI) espresse in coordinate cartesiane.

Il programma ADCIRC risolve l' equazione di continuità primitiva:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0$$

e le equazioni della quantità di moto (nella forma non conservativa):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + fV = - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y$$

Per evitare problemi numerici che nascono dall'uso del metodo di Galerkin per la discretizzazione spaziale delle suddette equazioni, l'equazione di continuità primitiva viene trattata

matematicamente fino ad ottenere la “Generalized Wave Continuity Equation” (GWCE):

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \tau_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} - UH \frac{\partial \tau_0}{\partial x} - VH \frac{\partial \tau_0}{\partial y} = 0$$

dove:

$$A_x \equiv \frac{\partial UH}{\partial t} + \tau_0 UH = \frac{\partial Q_x}{\partial t} + \tau_0 Q_x$$

$$A_y \equiv \frac{\partial VH}{\partial t} + \tau_0 VH = \frac{\partial Q_y}{\partial t} + \tau_0 Q_y$$

Usando la regola del concatenamento dei differenziali sui termini derivati nel tempo nelle espressioni per A_x e A_y , e sostituendo opportunamente le equazioni della quantità di moto si ottiene:

$$A_x = U \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial U}{\partial x} - V \frac{\partial U}{\partial y} + fV - \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0 H} + D_x - B_x + \tau_0 U \right\}$$

$$A_y = V \frac{\partial H}{\partial t} + H \left\{ -U \frac{\partial V}{\partial x} - V \frac{\partial V}{\partial y} + fU - \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{p_s}{\rho_0} + g\zeta - g(\eta + \gamma) \right] + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0 H} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0 H} + D_y - B_y + \tau_0 V \right\}$$

La forma finale della GWCE risulta sostituendo queste espressioni per A_x e A_y nell'equazione 4. Per calcolare l'elevazione della superficie dell'acqua, l'ADCIRC può risolvere la GWCE risultante, l'equazione di continuità primitiva o un ibrido tra le due determinato dal parametro τ_0 .

Il dominio computazionale dell'ADCIRC ha una forma rettangolare ed è delimitato nel tratto costiero dal promontorio dell'Argentario, a Nord, e di Capo Linaro, a Sud, e in mare aperto dalla linea batimetrica dei -200m. Il dominio così definito ha una lunghezza con orientamento SE – NO di circa 100 km, per una larghezza di circa 20 Km.

Ai quattro lati dell'area di calcolo sono state fornite le seguenti condizioni al contorno:

1. a Est la condizione mainland
2. a Sud-Est la condizione normal flow

3. a Ovest la condizione ocean
4. a Nord-Ovest la condizione di normal wave radiation
5. a Est, nei punti definiti dalle foci dei fiumi Fiora e Arrone, la condizione di normal flow

La prima condizione definisce la linea di costa che è stata ricavata dalla ricostruzione dell'unità fisiografica attraverso immagini satellitari o acquisite attraverso rilievi aerofotogrammetrici, opportunamente allineate e successivamente georeferenziate.

Per il contorno terrestre (mainland) è stata scelta la condizione di no slip, ovvero le velocità tangenziali e perpendicolari alla linea di riva hanno un valore pari a 0.

Nel boundary sud del dominio è stata assegnata una condizione di flusso normale in modo da tener conto della corrente generale che lungo questo tratto di costa è diretta verso Nord-Ovest ed assume dei valori che variano da 0.01-0.05 m/s (dati estrapolati dal modello OPA dell'INGV di Bologna).

La condizione di normal wave radiation è definita nella parte di Nord-Ovest e consente alle linee di flusso di attraversare perpendicolarmente il dominio di calcolo.

Nel lungo tratto ad Ovest è stata posta la condizione oceanica con un' elevazione del livello superficiale dell' acqua pari a 0 metri.

All'interno del dominio di calcolo è stata costruita una griglia agli elementi finiti rappresentante l'unità fisiografica (Fig. 28).

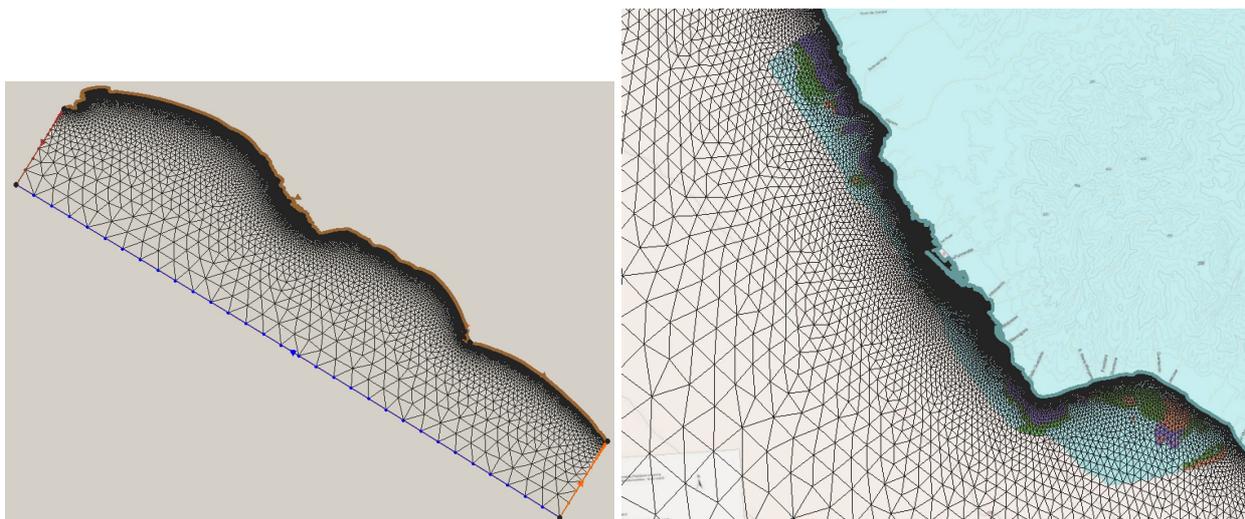


Fig. 28: griglia rappresentante l'intera unità fisiografica e zoom sull'area delle Porto di Civitavecchia.

La griglia è costituita da poco meno di 25000 nodi e da circa 45000 elementi triangolari.

Ai nodi della mesh sono stati riportati i valori di profondità i quali sono stati interpolati dai dati

della carta nautica IGM (scala 1:100000) rappresentativa della zona di interesse.

Nella seguente tabella 4.5.1-1 vengono riportati i principali parametri del modello e il relativo valore:

Parametri	Valore
Sistema di coordinate	Sferico
Gravità	9.81 (m/s ²)
Tipo di modello	Bidimensionale
Includi termini di ampiezza finita	si
Includi termini avvertivi	si
Includi termine di derivata nel tempo	si
Wave continuity (τ_0)	0.01
Viscosità laterale	3.0(m ² /s)
Angolo minimo per flusso tangenziale	90°
Parametro di Coriolis	0.0001 (s ⁻¹)
Tipo di attrito	Costante quadratico
Coefficiente d' attrito	0.0025

Tab. 3: Parametri del modello

Per i principali parametri idrodinamici del modello, come l' attrito al fondo e la viscosità laterale, sono stati utilizzati i valori trovati in bibliografia.

STWAVE

L' STWAVE (STeady-state spectral WAVE model) è un modello alle differenze finite che risolve l'equazione di bilancio dell'azione dell'onda. Lo scopo della sua applicazione in regioni costiere è quello di descrivere quantitativamente i cambiamenti dei parametri dell'onda (come l'altezza, il periodo, la direzione e la deformazione dello spettro) tra la zona offshore e quella nearshore. Infatti, in acque profonde il campo d'onda è relativamente omogeneo, mentre in prossimità della costa, dove le onde sono fortemente influenzate dalle variazioni di batimetria e dalle correnti, i parametri d'onda possono variare significativamente sulla scala di decine di metri.

La caratterizzazione dell'onda nearshore è di fondamentale importanza per dimensionare le

opere di ingegneria costiera e per calcolare le correnti litoranee dalle quali si determina il trasporto sedimentario e il relativo cambiamento morfologico del fondale.

L' STWAVE simula i fenomeni di rifrazione e shoaling indotte dalla profondità, di diffrazione e riflessione causata da ostacoli naturali (coste alte) o artificiali (pennelli o antemurali di porti); calcola i parametri d' onda, come l'altezza, il periodo e la direzione, la zona del dominio dove l'onda frange e il radiation stress. Tiene conto inoltre dell'interazione corrente-onda e vento-onda.

L' equazione fondamentale che risolve l' STWAVE è la relazione di dispersione dell'onda.

L'approccio alla sua formulazione segue dalla descrizione delle variabili su due diversi sistemi di riferimento: quello in movimento con le correnti dove le variabili hanno il pedice r, e quello relativo alla Terra (sistema assoluto) dove le variabili hanno il pedice a.

La relazione di dispersione per un sistema in movimento è data da:

$$\omega_r^2 = g \cdot k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

In un sistema di riferimento assoluto, l'equazione di dispersione è calcolata mediante:

$$\omega_a = \omega_r + k \cdot U \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

Le soluzioni per la rifrazione e lo shoaling richiedono sia la celerità della singola onda, C, sia la celerità di gruppo, C_g. Nel sistema di riferimento relativo alla corrente si ha :

$$C_r = \frac{\omega_r}{k}$$

$$C_{gr} = 0.5 \cdot C_r \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right)$$

La direzione di entrambe le celerità è α , ovvero la direzione ortogonale al fronte d' onda. Nel sistema di riferimento assoluto le espressioni delle velocità dell'onda sono date da :

$$C_a = C_r + U \cdot \cos(\delta - \alpha)$$

$$(C_{ga})_i = (C_{gr})_i + (U)_i$$

dove il pedice i indica la notazione tensoriale per le componenti nella direzione x e y . In questo caso la direzione con cui si propaga la velocità dell'onda singola è perpendicolare al fronte d'onda, mentre la celerità di gruppo definisce il cosiddetto raggio dell'onda. La direzione di quest'ultimo è definita dalla seguente formula:

$$\mu = \tan^{-1} \left(\frac{C_{gr} \cdot \sin(\alpha) + U \cdot \sin(\delta)}{C_{gr} \cdot \cos(\alpha) + U \cdot \cos(\delta)} \right)$$

Si ha quindi che, in presenza di corrente, l'energia dell'onda si muove lungo il suo raggio mentre la direzione effettiva è quella perpendicolare alla sua cresta.

I fenomeni di rifrazione e di shoaling sono implementati nel modello STWAVE applicando l'equazione di conservazione dell'onda che è definita nelle due direzioni sopracitate. Se si considera la propagazione perpendicolare al fronte d'onda (assenza di corrente) si ha :

$$C_{ga} \frac{D\alpha}{DR} = - \frac{C_r \cdot k}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \cdot \frac{Dd}{Dn} \cdot \frac{k_i}{k} \cdot \frac{DU_i}{Dn}$$

mentre se si tiene conto della direzione lungo il raggio d'onda (interazione onda-corrente) si ottiene

$$(C_{ga})_i \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{C_a \cdot C_{ga} \cdot \cos(\mu \cdot \alpha) \cdot E(\omega_a, \alpha)}{\omega_r} = \sum \frac{S}{\omega_r}$$

Il fenomeno di diffrazione viene incluso nel modello attraverso lo smoothing dell'energia dello spettro d'onda in una specifica banda di direzione e frequenza. Il risultato è la seguente espressione:

$$E_j(\omega_a, \alpha) = 0.55 \cdot E_j(\omega_a, \alpha) + 0.255 \cdot [E_{j+1}(\omega_a, \alpha) + E_{j-1}(\omega_a, \alpha)]$$

Il frangimento dell'onda è stato implementato all' interno di STWAVE dalla seguente formula empirica :

$$H_{mo_{max}} = 0.1 \cdot L \cdot \tanh(k \cdot d)$$

I gradienti del radiation stress sono calcolati nel modello per fornire le forzanti al campo idrodinamico sotto forma di correnti nearshore e di cambiamenti del livello dell'acqua (wave setup e setdown). Le correnti indotte dalle onde sono infatti le principali artefici del trasporto sedimentario all'interno della surf zone.

I tensori del radiation stress sono calcolati sulla base della teoria lineare dell'onda :

$$S_{xx} = \rho_w \cdot g \cdot \iint E(f, \alpha) \cdot \left[0.5 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \cdot (\cos^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha$$

$$S_{xy} = \rho_w \cdot g \cdot \iint \frac{E(f, \alpha)}{2} \cdot \left[0.5 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \cdot \sin(2 \cdot \alpha) \right] df d\alpha$$

$$S_{yy} = \rho_w \cdot g \cdot \iint E(f, \alpha) \cdot \left[0.5 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot k \cdot d}{\sinh(2 \cdot k \cdot d)} \right) \cdot (\sin^2 \alpha + 1) - 0.5 \right] df d\alpha$$

I relativi gradienti hanno quindi la seguente forma :

$$\tau_x = - \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} - \frac{\partial S_{xy}}{\partial y}$$

$$\tau_y = - \frac{\partial S_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial S_{yy}}{\partial y}$$

Il dominio del modello STWAVE comprende un piccolo tratto di costa, lungo circa 40 km, posto tra le foci del fiume Mignone, a Nord, e Capo Linaro a Sud.

Il dominio ha una forma rettangolare ed è delimitato a ovest dalla batimetria dei -100 m che, da dati relativi ai periodi di picco (da cui si può calcolare la lunghezza d'onda) misurati per la suddetta area, risulta essere maggiore rispetto alla profondità dove avviene la deformazione delle

onde.

La griglia di calcolo (Fig. 29) è formata da elementi quadrati con un lato di 30 m tale da rappresentare la linea di costa e le opere di protezione in maniera adeguata.

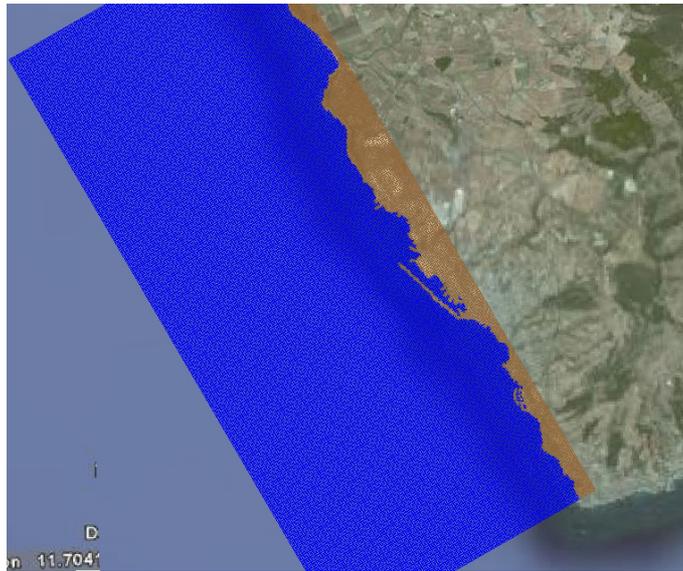


Fig.29 : griglia di calcolo del modello di moto ondoso STWAVE

Sul lato Ovest del dominio viene definita l'onda incidente sotto forma di spettro d'energia bidimensionale. Quest'ultimo descrive, infatti, la distribuzione dell'energia d'onda in funzione della frequenza e della direzione. Lo spettro d'onda incidente può essere specificato all'interno del modello utilizzando un algoritmo che, dati alcuni valori in ingresso, ricostruisce una forma parametrica spettrale. Nel nostro caso è stato utilizzato il metodo TMA (shallow water) che è capace di ricostruire uno spettro incidente dai seguenti parametri: periodo di picco dell'onda (T_p), altezza d'onda, angolo che determina la direzione dello spettro e due altri parametri (γ e nn) che sono funzione del periodo di picco.

Gli altri due lati, a Nord e a Sud del dominio, hanno la condizione di 1D transformed spectrum.

PTM

Il PTM (Particle Tracking Module) è un modello lagrangiano di trasporto sviluppato dal CIRP (Coastal Inlets Research Program) e dal DOER (Dredging Operations and Environmental Research

Program) ad opera della U.S. Army Engineer Research and Development Center.

L'approccio lagrangiano implica la modellazione attraverso la discretizzazione del sedimento in un numero finito di particelle che seguono il trasporto indotto dal campo idrodinamico di base. L'approccio lagrangiano è particolarmente indicato per la simulazione del trasporto a partire da una sorgente definita; ogni particella, nel modello, rappresenta una determinata massa di sedimento (e non una determinata particella o granulometria di sedimento).

Il campo del flusso idrodinamico rappresenta la condizione di input fondamentale per il PTM e, nel caso del presente lavoro, gli scenari precedentemente esposti sono stati utilizzati come condizione di flusso per la simulazione del trasporto in funzione dell'individuazione di due classi granulometriche indicative del tipo di sedimento sversato.

Il PTM è in grado di girare utilizzando un sistema di coordinate cartesiane.

Le capacità del PTM includono:

- campo idrodinamico di input (attraverso l'interpolazione delle condizioni del flusso con la posizione di una data particella);
- mobilità (determinazione della mobilità di una data particella nelle condizioni idrodinamiche definite);
- traiettorie (determinazione della traiettoria di una determinata particella assumendo ininfluente l'inerzia della particella stessa).

Tali risultati possono essere ottenuti scegliendo tra tre differenti tipi di approcci: 2D, Q3-D e 3D.

La rappresentazione 2D fornisce una valutazione preliminare del moto e del trasporto di una determinata particella applicabile quando non c'è interazione sedimentaria significativa tra la natura del fondale e le particelle prodotte dalla sorgente definita.

La rappresentazione Q3-D si fonda sull'unione nell'utilizzo di funzioni empiriche del trasporto di particolato e l'applicazione delle funzioni relative ai fenomeni di avvezione, precipitazione e dispersione per riprodurre alcuni dei fenomeni fondamentali del caso del trasporto in forma tridimensionale. Vengono presi in considerazione alcune caratteristiche di tipo stocastico nel trasporto di particelle; i movimenti orizzontali delle particelle sono determinati a partire dall'elevazione delle stesse rispetto al fondo, in considerazione di fenomeni di mescolamento, deposizione e reimmissione. La posizione verticale delle particelle nel Q3-D viene utilizzata per la determinazione dell'evoluzione dei moti orizzontali tenendo conto di fattori quali la velocità di

caduta in funzione della granulometria e della dispersione.

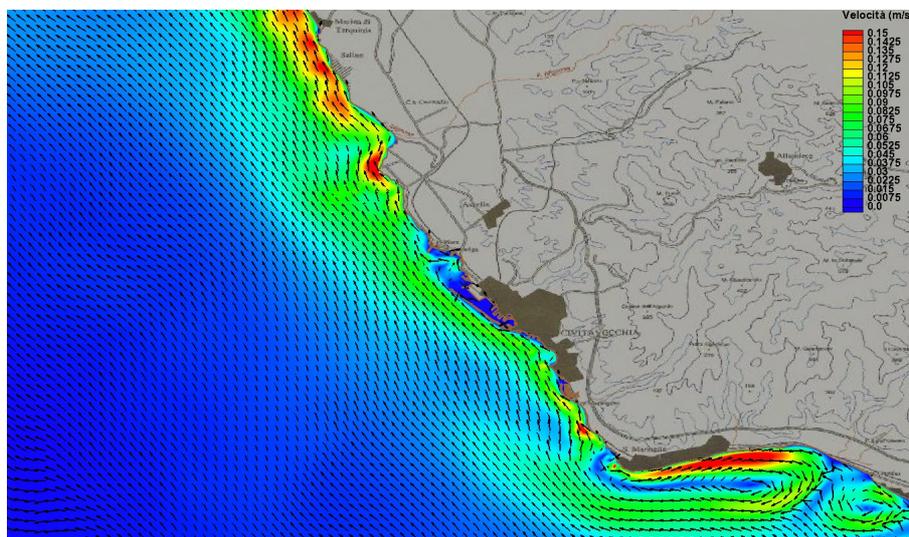
PTM permette inoltre di scegliere tra diversi tipi di sorgenti di particelle; nel caso del presente lavoro è stata impostata una sorgente puntiforme di massa (Point Mass Rate Source) con un determinato livello emissione posizionata all'interno dell'area individuata per lo sversamento.

5. Risultati

Di seguito vengono riportati i risultati delle simulazioni relative al campo idrodinamico, moto ondoso e dispersione del materiale dragato negli scenari descritti in tabella xx

5.1 Scenario di Libeccio

La condizione di Libeccio induce la formazione di due vortici di modeste dimensioni (diametro di circa 2 km) a sud di Capo Linaro, mentre nella parte settentrionale la corrente è diretta verso nord con un intensità media di 0.05 m/s. La velocità assume i valori più alti (maggiori di 0.15 m/s) lungo alcuni tratti di costa: tra S.Marinella e S.Severa, a Punta S.Agostino, nella zona delle Saline di Traquinia ed in prossimità di Marina di Tarquinia. Nella zona in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio, invece, l'intensità della corrente non supera 0.1 m/s. Si notano piccoli vortici orari all'interno del porto di Civitavecchia e a sud del molo Carbone della centrale Torrevaldaliga Nord.



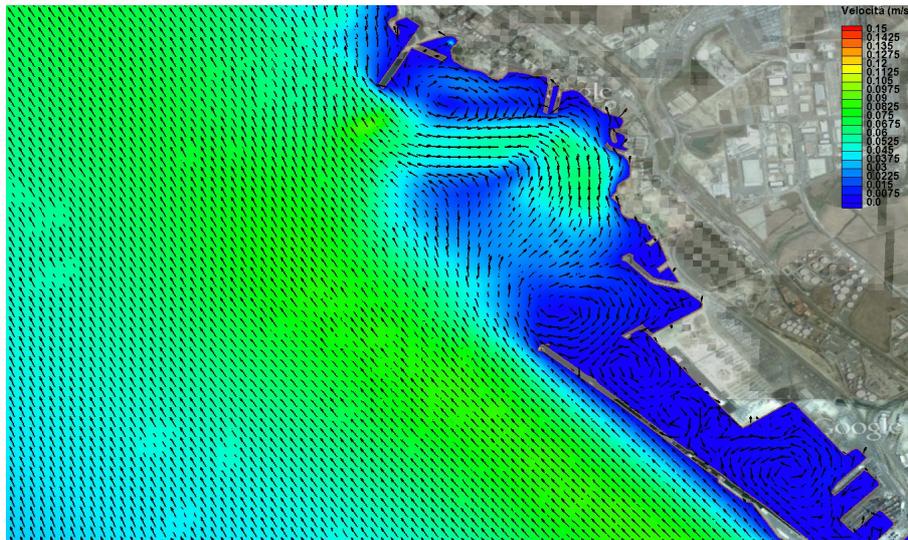


Fig. 30 : campo idrodinamico prodotto dallo scenario di Libeccio.

Come si evince dalla figura 31, il moto ondoso ha un direzione (225 °N) perpendicolare al tratto di costa oggetto di studio. Questo limita i fenomeni di rifrazione e determina un aumento dell'altezza d'onda (fenomeno di shoaling) in alcuni punti del litorale, come nella zona del Pirgo, in corrispondenza della centrale di Torrevaldaliga Nord e di Punta S.Agostino. La presenza del porto di Civitavecchia a nord e di Riva di Traiano, a sud, induce il fenomeno di diffrazione provocando un rapido cambiamento della direzione dell'onda all'interno delle strutture portuali.

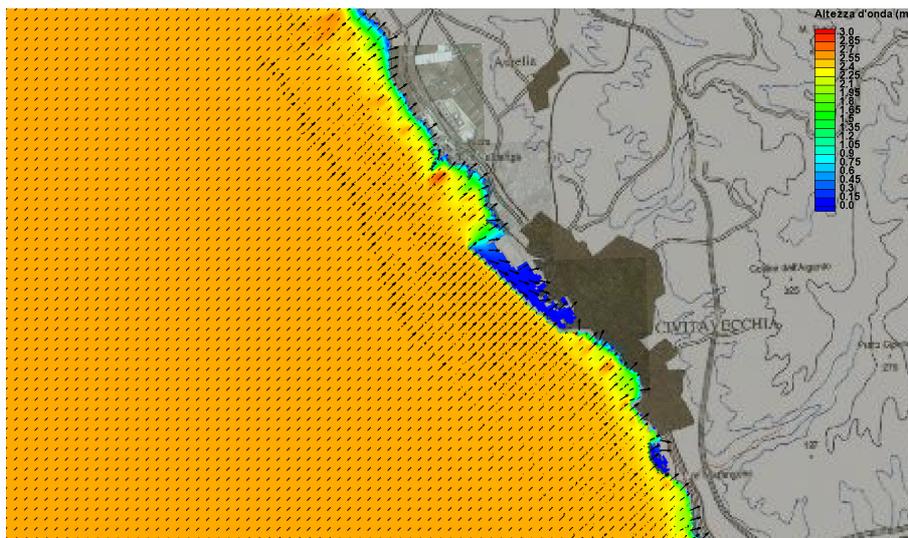


Fig. 31 : propagazione del moto ondoso durante lo scenario di Libeccio.

I sedimenti risospesi dalle operazioni di dragaggio effettuate all'imboccatura portuale vengono trasportate verso nord dalle correnti marine indotte da vento e moto ondoso calcolate dai modelli ADCIRC e STWAVE. La figura 32 mostra come, dopo 4 giorni, le particelle giungono fino a Marina di Tarquinia compiendo circa 16 km rispetto alla zona di emissione. Una parte del sedimento dragato precipita sul fondo (pallini rossi), in particolare a sud della centrale e lungo il tratto costiero compreso tra La Frasca e la foce del fiume Mignone.

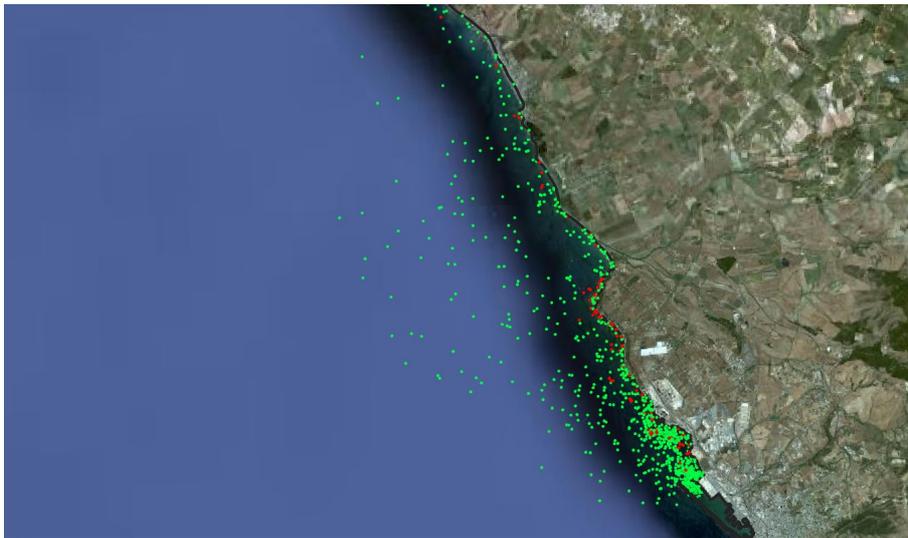


Fig. 32 : dispersione del sedimento dragato prodotto dallo scenario di Libeccio (in verde il materiale in sospensione e in rosso il sedimento deposto).

5.2 Scenario di Scirocco

La condizione di Scirocco (150°N) determina una corrente molto intensa (maggiore di 0.3 m/s) diretta verso nord lungo l'intera fascia costiera dell'area di studio. Tuttavia sono presenti aree in cui la velocità del flusso risulta più bassa come quella compresa tra Capo Linaro e la parte meridionale del porto, la zona della Frasca e il tratto compreso tra punta S. Agostino e S. Giorgio. Anche l'area soggetta alle operazioni di dragaggio presenta un'intensità minore rispetto a quella registrata nella zona di largo. In questo caso i vortici che si formano all'interno del porto di Civitavecchia hanno un verso antiorario.

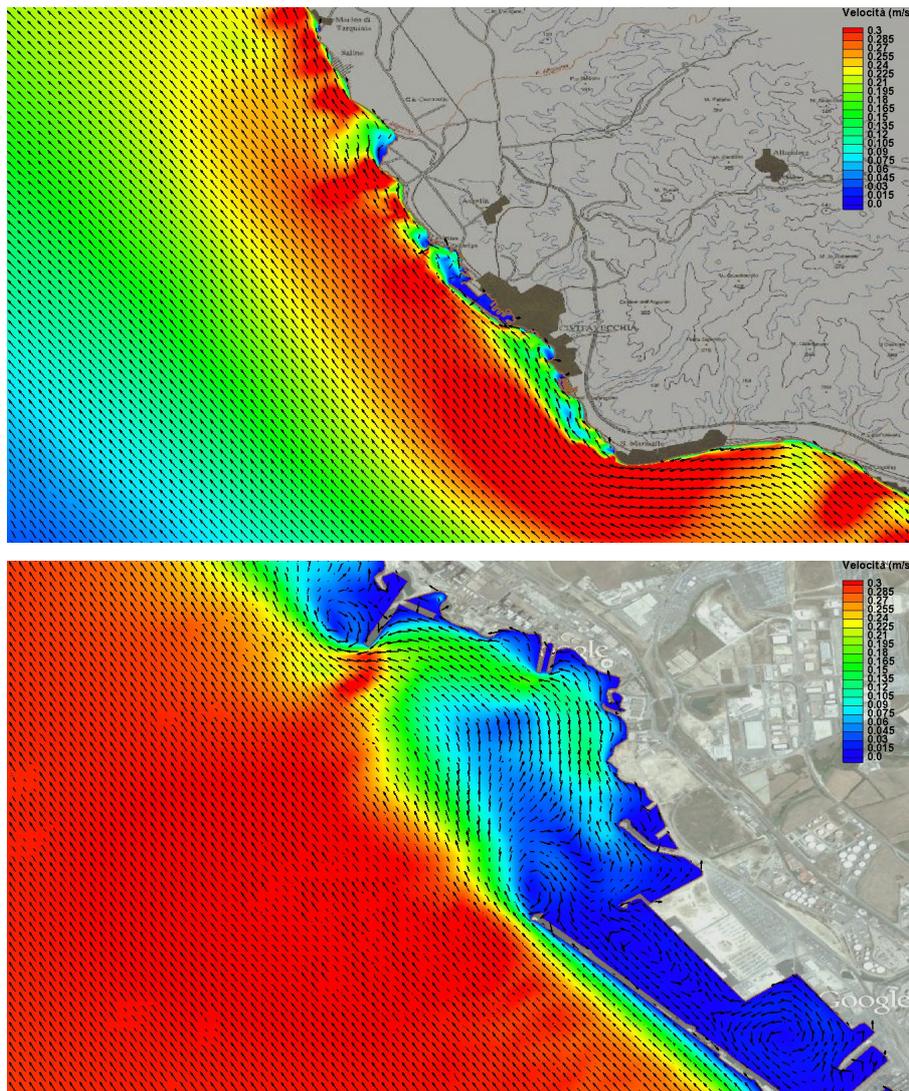


Fig. 33 : campo idrodinamico prodotto dallo scenario di Scirocco.

La direzione del moto ondoso nella condizione di Scirocco rispetto all'orientamento del tratto di costa oggetto di studio produce intensi fenomeni di rifrazione e di diffrazione in corrispondenza del porto Riva di Traiano e di quello di Civitavecchia. L'altezza dell'onda diminuisce rapidamente, passando da 3 a 2 m, a circa 1 km dalla linea di riva, ad eccezione della zona della centrale di Torrevaldaliga Nord dove, a causa dell'andamento del fondale marino, supera i 3 m di altezza (fenomeno di shoaling).

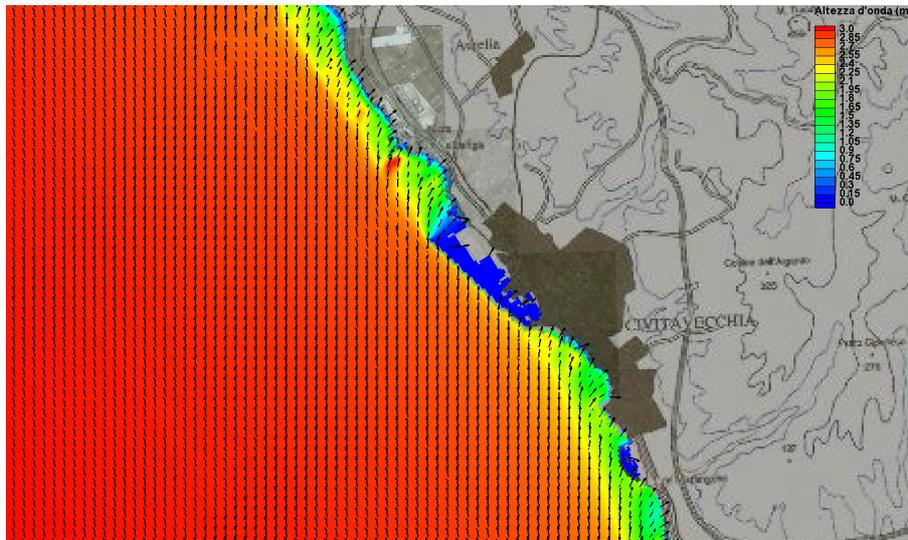


Fig. 34 : propagazione del moto ondoso durante lo scenario di Scirocco.

A causa della direzione e dell'intensità delle condizioni meteomarine la propagazione del materiale fine risospeso dalle attività di dragaggio si propaga fino al promontorio dell'Argentario, compiendo in soli 4 giorni una distanza di circa 70 km. Lungo il percorso una parte delle particelle sedimenta (pallini rossi) nel tratto compreso tra l'imboccatura del porto di Civitavecchia e Punta S. Agostino, tra le Saline di Tarquinia e la foce del fiume Marta ed in corrispondenza del fiume Fiora nella zona di Montalto di Castro.



Fig. 35 : dispersione del sedimento dragato prodotto dallo scenario di Scirocco (in verde il materiale in sospensione e in rosso il sedimento deposto).

5.3 Scenario di Ponente

Il campo idrodinamico indotto dallo scenario di Ponente (300 °N) mostra correnti marine dirette verso sud con elevate velocità (maggiori di 0.25 m/s) registrate in corrispondenza di Punta S. Agostino e Capo Linaro. Lungo il tratto di costa oggetto di studio si trovano anche zone in cui la corrente risulta molto bassa come l'area compresa tra il molo Carbone della centrale Torrevaldaliga Nord e l'imboccatura del porto di Civitavecchia. In tale zona per effetto della diminuzione repentina della velocità si sviluppa un vortice antiorario, mentre all'interno del porto si nota la presenza di strutture orarie.

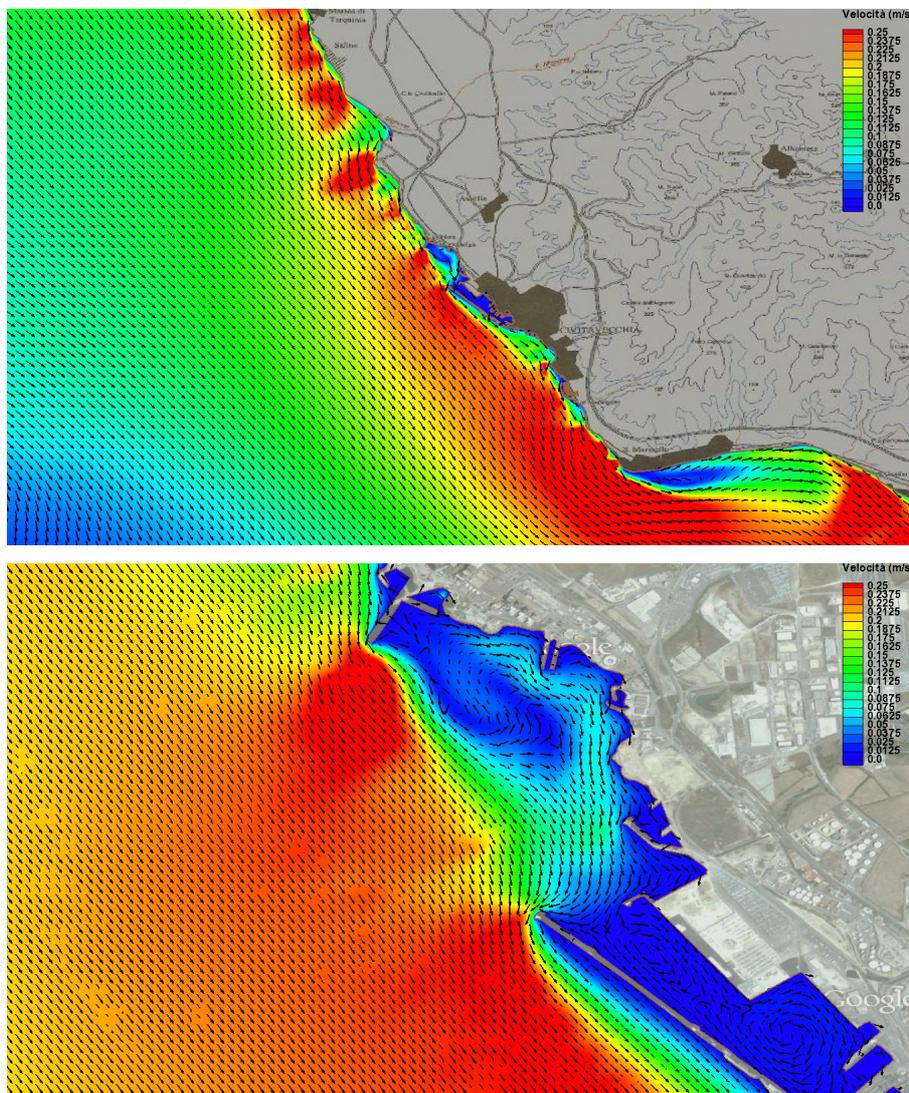


Fig. 36 : campo idrodinamico prodotto dallo scenario di Ponente.

La direzione del moto ondoso determina intensi fenomeni di rifrazione lungo tutto il tratto di costa oggetto di studio all'interno del quale si riscontrano anche piccole zone in cui l'onda aumenta la sua altezza (processo di shoaling). Effetti di diffrazione si vengono a creare non solo all'interno del porto di Civitavecchia e di quello di Riva di Traiano, ma anche in corrispondenza del molo a Carbone di Torrevaldaliga Nord.

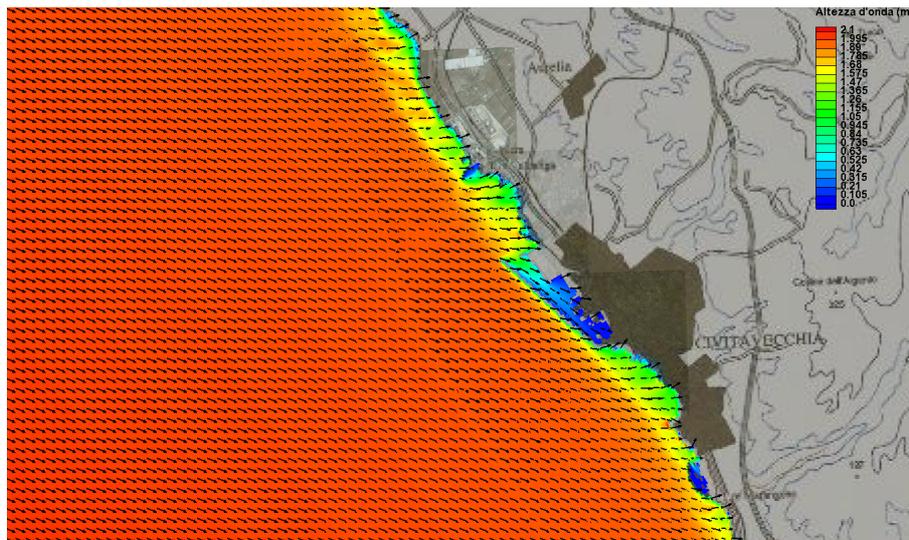


Fig. 37 : propagazione del moto ondoso durante lo scenario di Ponente.

Il materiale prodotto dalle attività di dragaggio si sposta verso sud fino ad arrivare alla foce del fiume Tevere, compiendo in solo quattro giorni una distanza di circa 55 km dal punto di emissione. Lungo il percorso parte del sedimento fine sedimenta in prossimità di Punta del Pecoraro e di Capo Linaro che costituisce la zona in cui si trova la più elevata quantità di particelle presenti sul fondo.



Fig. 38 : dispersione del sedimento dragato prodotto dallo scenario di Ponente (in verde il materiale in sospensione e in rosso il sedimento deposto).

5.4 Scenario Reale

Lo scenario reale considerato in questo studio simula le condizioni di vento e moto ondoso, misurate rispettivamente dalla centralina meteo e dalla boa ondometrica, che si sono verificate nella settimana compresa tra il 26 Novembre e il 2 Dicembre del 2012. Tale periodo è caratterizzato da forti venti e da elevate altezze d'onda che provengono principalmente dai quadranti meridionali. Come mostrano le immagini di figura 39 che rappresentano il campo di corrente all'interno dell'area di studio, l'intensità del flusso è molto elevata (si raggiungono valori maggiori di 4 m/s) lungo alcune zone della fascia costiera (S.Severa, Capo Linaro, La Frasca e Marina di Tarquinia) durante i primi giorni mentre tende ad attenuarsi alla fine del periodo considerato. Nell'intero arco di tempo considerato la velocità della corrente risulta diretta da sud verso nord.

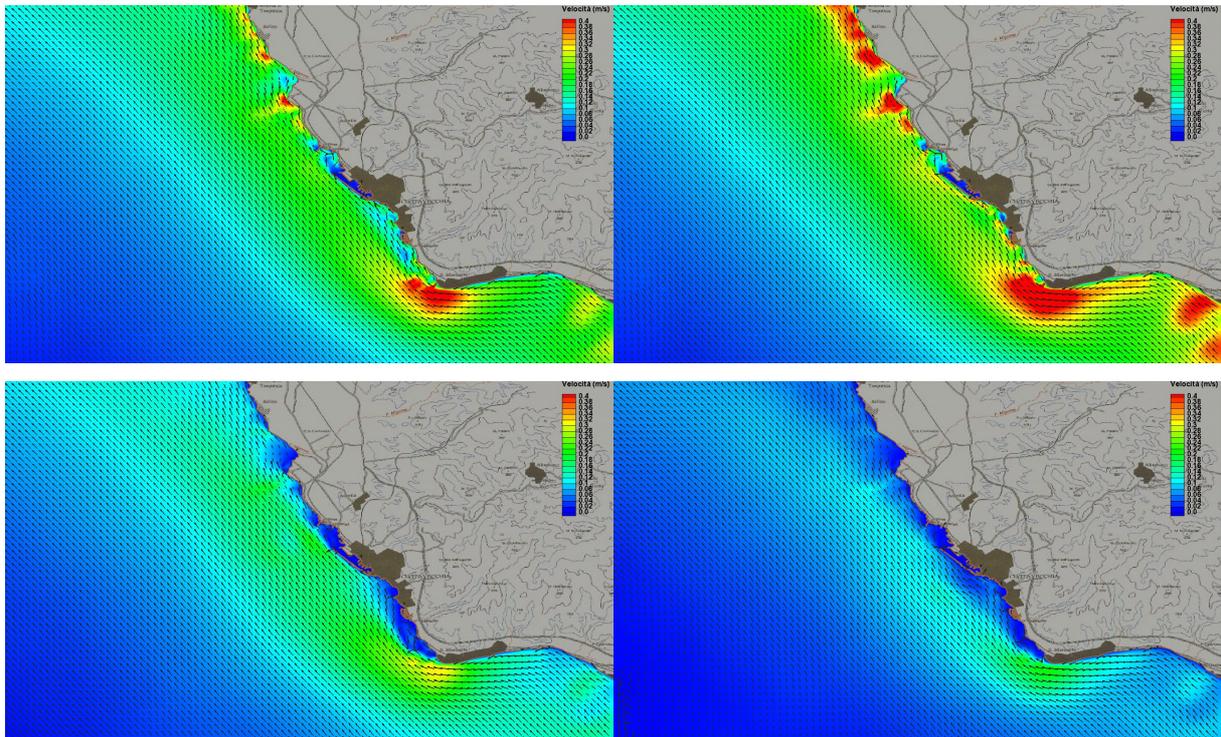
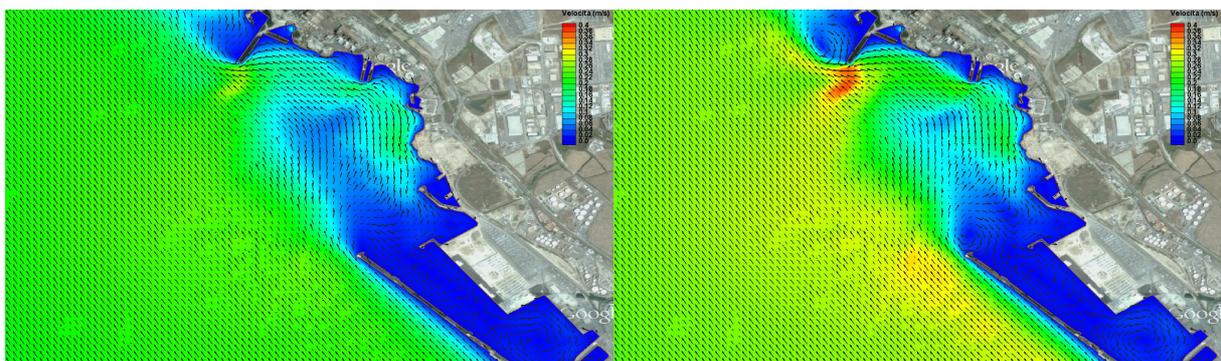


Fig. 39 : campo idrodinamico nel tratto di costa compreso tra S.Severa e Marina di Tarquinia prodotto dalle condizioni meteomarine relative al periodo che va dal 26 Novembre al 2 Dicembre del 2012.

In analogia con la situazione riscontrata lungo l'intera zona di studio, nell'area soggetta alle operazioni di dragaggio l'elevata velocità della flusso riduce la zona d'ombra (area blu) generata dalla presenza dell'antemurale del porto producendo un'intesa corrente (0.22 m/s) tra la cassa di colmata e il molo della Centrale a Carbone. Successivamente, quando il campo idrodinamico diminuisce d'intensità, nell'area compresa tra il porto e la centrale si registrano velocità più basse (0.01 m/s) rispetto a quelle presenti nella zona a largo.



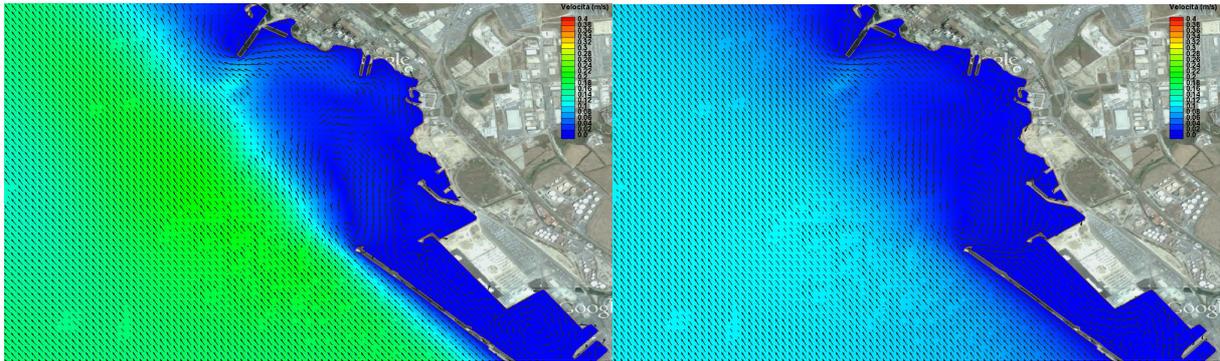
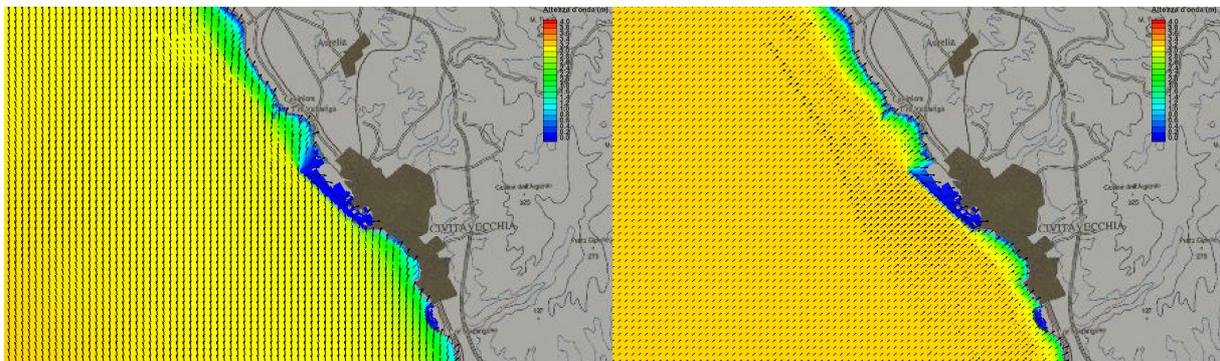


Fig. 40 : campo idrodinamico nella zona soggetta alle operazioni di dragaggio prodotto dalle condizioni meteomarine relative al periodo che va dal 26 Novembre al 2 Dicembre del 2012.

Nel periodo iniziale sono presenti anche elevate altezze d'onda che provengono sia da Mezzogiorno (180°N) che da Libeccio (225°N). Nel primo caso la propagazione del moto ondoso produce intensi fenomeni di rifrazione lungo l'intera fascia costiera e di diffrazione alle imboccature portuali, mentre l'evento proveniente da 225°N induce principalmente effetti di shoaling in prossimità della linea di riva. Negli ultimi giorni della settimana considerata nello studio, si registra una drastica diminuzione dell'altezza d'onda e di conseguenza dei fenomeni ad essa associati.



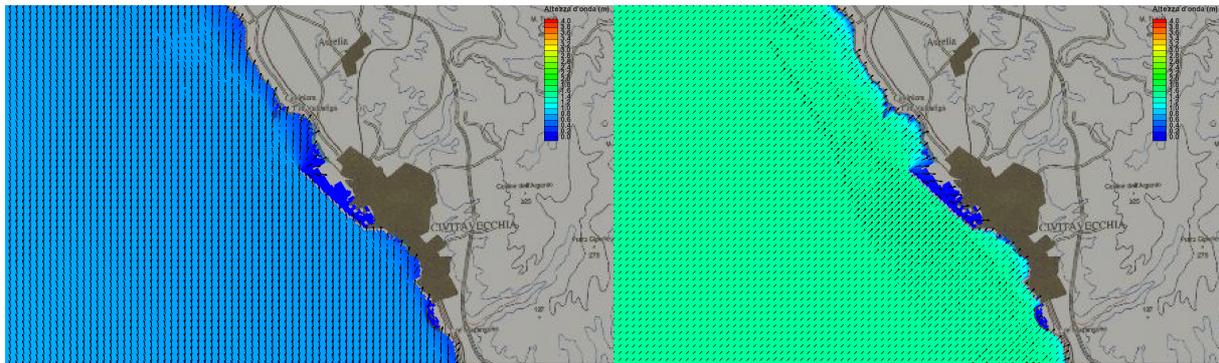


Fig. 41 : propagazione del moto ondoso nel corso del periodo compreso tra il 26 Novembre e il 2 Dicembre del 2012.

Il materiale fine dragato si disperde molto velocemente verso nord durante il periodo iniziale in quanto in soli 3 giorni compie circa 40 km giungendo fino alla spiaggia di Montalto. Parte del sedimento precipita sul fondo (pallini rossi) in maniera omogenea a ridosso della linea di riva lungo il percorso effettuato. Durante gli ultimi 4 giorni considerati nella simulazione una piccola frazione del materiale prodotto dalle attività di dragaggio arriva fino al Promontorio dell'Argentario, coprendo in un tempo maggiore una distanza minore rispetto al periodo precedente. In questi ultimi giorni aumenta la quantità di sedimento che precipita in prossimità del punto di emissione.

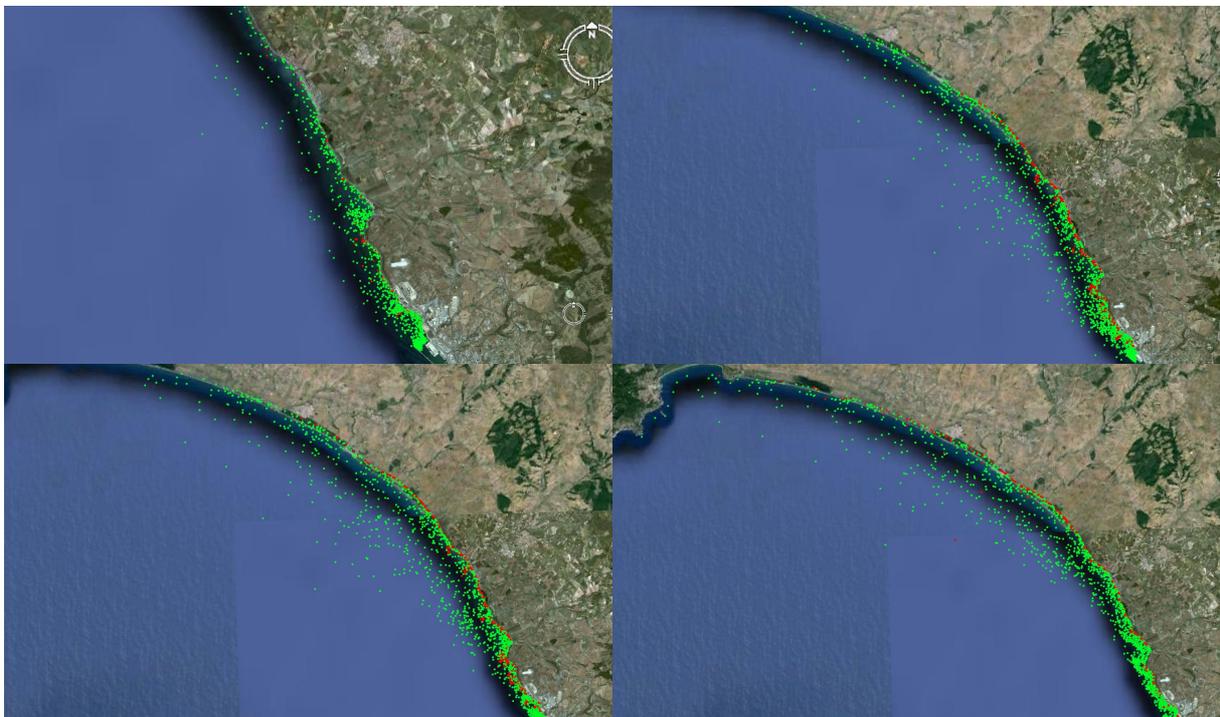


Fig. 33 : dispersione del sedimento dragato durante il periodo compreso tra il 26 Novembre e il 2 Dicembre del 2012 (in verde il materiale in sospensione e in rosso il sedimento deposto).

6. Conclusioni

Nel presente studio è stato utilizzato un approccio integrato costituito da misure in situ, osservazioni satellitari e simulazioni numeriche per analizzare la dispersione del materiale fine prodotto dalle operazioni di dragaggio eseguite all'imboccatura del porto di Civitavecchia. In particolar modo la Rete di Monitoraggio, messa a punto grazie alla collaborazione tra il Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina e l'Autorità Portuale di Civitavecchia, ha permesso di fornire dati di input ai modelli numerici per simulare nel dettaglio le condizioni idrodinamiche locali che sono fondamentali per capire quali sono le principali zone impattate dal sedimento risospeso nell'ambito dei lavori per la costruzioni delle nuove opere comprese nel II Lotto Funzionale del Porto di Civitavecchia. Oltre alla strumentazione fissa, costituita dalla centralina anemometrica, dalla boa ondometrica e dalla stazione di prossimità, la Rete di Monitoraggio comprende anche periodiche campagne di misure in situ per la caratterizzazione fisica, chimica e biologica della colonna d'acqua e dei sedimenti marini e indagini subacquee per acquisire dati relativi allo stato di salute delle praterie di *Posidonia oceanica*. Grazie alla conoscenza dei parametri funzionale e morfologici delle praterie, nonché la loro distribuzione spaziale, è stato possibile in questo studio analizzare i possibili impatti sulla *Posidonia oceanica* dovuti alla dispersione del materiale dragato calcolata attraverso i modelli numerici.

Sulla base dei dati anemometri ed ondometrici acquisiti nel periodo in cui sono state effettuate le operazioni di dragaggio (da inizi Novembre 2012 fino a fine Gennaio 2013) sono stati proposti quattro scenari di simulazione. Tre di questi riproducono la più elevata intensità di vento ed onda proveniente da tre direzione differenti (Libeccio, Scirocco e Ponente), mentre l'altro considera un'intera settimana in cui si sono verificate le condizioni meteomarine peggiori (26 Novembre-2 Dicembre del 2012). Dai risultati emerge che sia nelle condizioni di Libeccio e che in quelle di Scirocco il materiale dragato si disperde verso nord rispetto alla fonte di emissione localizzata all'imboccatura portuale di Civitavecchia. Nel primo caso però i sedimenti arrivano ad interessare i litorali di Marina di Tarquinia mentre durante lo scirocco una parte del materiale giunge fino al Promontorio dell'Argentario compiendo una distanza di circa 60 km. Anche nello scenario di Ponente le particelle risospese dalle operazioni di dragaggio interessano aree che si trovano molto lontane dalla fonte di emissione (foce del fiume Tevere) ma in questo caso la plume sedimentaria è

diretta verso sud. Lo scenario che riproduce le condizioni meteomarine occorse durante una delle settimane (dal 26 Novembre al 2 Dicembre) in cui è stato effettuato il dragaggio mette in evidenza che il materiale risospeso si sposta velocemente verso nord durante i primi giorni arrivando fino a Marina di Montalto, mentre nel periodo successivo, a causa della drastica diminuzione dell'intensità della corrente marina, compie un breve tragitto fino al Promontorio dell'Argentario. In questa seconda parte della settimana si verifica anche un forte aumento della sedimentazione che determina estesi accumuli dall'imboccatura portuale fino a Marina di Tarquinia.

In tale contesto, osservando le simulazioni dei modelli numerici, le praterie di *Posidonia oceanica* che potrebbero subire un maggior impatto potenziale dovuto ai processi di sedimentazione e di aumento della torbidità causato dal materiale fine risospeso dalle operazioni di dragaggio, sono quelle che si trovano nella parte nord dell'area di studio. Per definire con più accuratezza il contributo che questa attività antropica produce sullo stato di salute di questa fanerogama marina, bisogna tener conto anche degli impatti delle altre sorgenti antropiche e naturali (materiale portato in sospensione dai fiumi e corsi d'acqua della zona) che caratterizzano l'area di interesse.