

Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sardegna

PORTO DI OLBIA

Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto
Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00 m e i fondali
della Canaletta a -11,00 m
CUP: B91J19000050005

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICA ED ECONOMICA

Titolo elaborato :

**RELAZIONE TECNICA: ANALISI DEI PROCESSI IDRODINAMICI
DIRISOSPENSIONE INDOTTI DALLE ATTIVITA' DI DRAGAGGIO**

2 1 0 1 4 F R 1 0 3 - 0 M A R

IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Ing. Alessandro Meloni

Il Raggruppamento Temporaneo di Professionisti



Mandataria



Mandanti

Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:
	05/2023	0	Emissione per approvazione	Vella	Contini	De Girolamo

Dimensioni foglio:

A4

Visto del Committente:

PROGETTO DI DRAGAGGIO

RELAZIONE TECNICA: ANALISI DEI PROCESSI IDRODINAMICI E DI RISOSPENSIONE INDOTTI DALLE ATTIVITA' DI DRAGAGGI

INDICE

1. Premessa	1
2. Finalità dello studio	2
3. Approccio metodologico	3
3.1. Considerazioni generali	3
3.2. Il fenomeno fisico	3
3.3. Riproduzione numerica del fenomeno fisico	6
3.3.1. L'approccio lagrangiano	6
3.3.2. La sorgente di risospensione	8
3.3.3. Il campo idrodinamico	11
3.3.4. La componente deterministica del processo di diffusione	13
3.3.5. La componente stocastica del processo di diffusione	14
3.4. Analisi e sintesi dei risultati	15
3.5. Sintesi delle caratteristiche dello studio	16
4. Scenari di simulazione	17
4.1. Forzanti meteomarine	17
4.2. Definizione delle sorgenti di risospensione	18
4.3. Sintesi degli scenari di simulazione	19
5. Sintesi e discussione dei risultati	20
5.1. Campi idrodinamici	20
5.2. Diffusione e dispersione dei sedimenti risospesi	20
6. Osservazioni conclusive	39

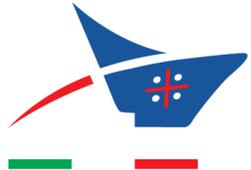
 <p>Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p>Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
---	--

1. Premessa

L'Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna (AdSP Sardegna), con nota prot. n. 0017026 ha affidato all' RTP costituito da Seacon S.r.l. (mandataria), Modimar S.r.l., Ambiente, Biotec e ASPs i servizi di progettazione preliminare dell'intervento denominato "Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del Porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00 m e i fondali della Canaletta a -11,00 m" – CIG 8395204580 - CUP: B91J19000050005.

Questo documento illustra lo studio specialistico finalizzato alla descrizione dei potenziali effetti delle attività di dragaggio sull'incremento della concentrazione della frazione fine dei sedimenti risospesi.



 <p data-bbox="379 138 703 197">Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p data-bbox="762 134 1465 228">Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
---	---

2. Finalità dello studio

I paragrafi che seguono hanno l'obiettivo di illustrare lo studio di dettaglio effettuato al fine di valutare la propagazione della nuvola di sedimenti fini generata a seguito delle attività di movimentazione dei sedimenti marini durante le attività di dragaggio. Tali attività, infatti, possono potenzialmente indurre la risospensione della frazione fine dei sedimenti oggetto del dragaggio e possono disperdersi nell'area di intervento.

Nello specifico, il progetto in epigrafe prevede

- il dragaggio in prossimità di Isola Bianca per la realizzazione del cerchio di evoluzione;
- il dragaggio in prossimità dei Porto Cocciani per la realizzazione del canale di accesso;
- la manutenzione del canale di accesso alla rada.

Le attività di dragaggio, in linea generale, possono rappresentare potenziali sorgenti di risospensione della componente fine del sedimento che, con la generazione di nuvole di torbida, richiedono la valutazione dell'evoluzione spazio-temporale della concentrazione dei sedimenti sospesi al fine di identificare eventuali impatti sulle aree limitrofe a quelle di intervento.

L'obiettivo dello studio, come descritto nel dettaglio nei paragrafi che seguono, è quello di fornire una stima quantitativa dell'evoluzione spazio-temporale della torbida generata dalle attività di dragaggio. È necessario evidenziare che il livello di progettazione (fattibilità tecnico-economica) richiede il ricorso ad una serie di ipotesi relative alle modalità operative del dragaggio.

In sintesi, le attività di dragaggio, pur differenziandosi nei meccanismi di risospensione e nella quantità di sedimento risospeso a seconda della tecnica operativa, possono essere schematizzate come una sorgente di risospensione variabile nel tempo e nello spazio.

L'obiettivo finale delle analisi, effettuate con l'approccio metodologico sintetizzato nel seguito, è di valutare la distribuzione spazio-temporale della concentrazione dei sedimenti sospesi.

In estrema sintesi, l'obiettivo dello studio è valutare la concentrazione di sedimenti sospesi in colonna d'acqua, riconducibile direttamente alle attività di dragaggio.

 <p>Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p>Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
---	--

3. Approccio metodologico

3.1. Considerazioni generali

Gli obiettivi dello studio sono raggiunti tramite applicazione di un modello numerico del tipo *random walk*, suggerito tra gli altri anche dalle Linee Guida redatte Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (Lisi et al., 2017¹, nel seguito indicate semplicemente come “Linee Guida ISPRA”).

Il modello, sinteticamente, riproduce il processo deterministico di dispersione (legato al campo idrodinamico medio) e il processo stocastico di diffusione (legato alle fluttuazioni turbolente del campo idrodinamico) nell’ambito di un approccio lagrangiano. Nel caso in esame, l’approccio lagrangiano permette di ottenere la stima quantitativa dell’evoluzione spazio-temporale della posizione di *traccianti passivi* a cui è associata una massa di sedimenti sospesi direttamente correlata alla sorgente di risospensione da cui traggono origine. La ricostruzione (probabilistica) della posizione di un numero sufficientemente grande di traccianti passivi permette di fornire la stima quantitativa della concentrazione di solidi sospesi e, di conseguenza, della torbidità della colonna d’acqua a seguito di attività di movimentazione di sedimenti marini.

I paragrafi che seguono hanno l’obiettivo di illustrare sinteticamente le caratteristiche salienti dell’approccio.

3.2. Il fenomeno fisico

Da un punto di vista fisico, il fenomeno dell’evoluzione della torbidità a seguito di attività che inducono la risospensione della componente fine del sedimento è legato alla dispersione che si verifica a causa della presenza di un campo idrodinamico indotto dalle condizioni meteomarine. Al fenomeno di dispersione, si affianca il fenomeno della diffusione dovuto alle fluttuazioni turbolente del campo idrodinamico.

La quantità di sedimento disponibile alla dispersione nel cosiddetto campo lontano, è legato alle caratteristiche (intensità e geometria) della sorgente di risospensione e dalle caratteristiche granulometriche della mistura sedimentaria oggetto di movimentazione. In particolare, per quanto riguarda quest’ultimo aspetto, è di cruciale importanza la percentuale di sedimento appartenente

¹ Lisi I., Feola A., Bruschi A., Di Risio M., Pedroncini A., Pasquali D., Romano E. (2017). La modellistica matematica nella valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere. Manuali e Linee Guida ISPRA, 169/2017, pp.144.

alle classi dei limi e delle argille (diametro inferiore a 74 μm secondo la classificazione USCS – Unified Soil Classification System – oppure inferiore a 63 μm secondo la scala Wentworth).

Con l'obiettivo di sintetizzare il fenomeno, senza pretesa di completezza, esso può essere schematizzato in una serie di processi descritti nel seguito.

- *Fenomeno di risospensione*

Dipendentemente dalle modalità operative e dalla tipologia di attività di movimentazione del sedimento, una frazione della componente a grana fine del sedimento è risospesa in colonna d'acqua e abbandona il cosiddetto campo vicino ancor prima di tornare sul fondo. La quantità di sedimento risospesa dipende dalla curva granulometrica (es. Becker et al. 2015²).

- *Fenomeno di dispersione*

La frazione fine a disposizione del campo lontano viene trasportata dal campo idrodinamico. La dispersione è correlata alle caratteristiche del cosiddetto moto medio per cui, in condizioni ragionevolmente stazionarie, non si osservano fenomeni diffusivi legati al campo idrodinamico medio potenzialmente responsabili di diminuzione della concentrazione di sedimenti sospesi.

- *Fenomeno di diffusione*

In funzione dell'intensità del campo idrodinamico, è noto che esso è dato dalla sovrapposizione del moto medio (responsabile del fenomeno della dispersione) e di fluttuazioni che, pur non contribuendo al moto medio (poiché caratterizzate da una media nulla), influenzano l'evoluzione della nuvola di risospensione. Nella sostanza, le fluttuazioni del campo idrodinamico, dalle spiccate caratteristiche stocastiche, inducono un processo diffusivo dei sedimenti (risospesi) la cui concentrazione in colonna d'acqua, pertanto, tende a diminuire all'aumentare della distanza dalla sorgente di risospensione. È bene sottolineare che il fenomeno diffusivo avviene sia nel piano orizzontale, sia lungo la direzione verticale.

- *Fenomeno di deposizione*

Pur in assenza di un marcato processo di sedimentazione, a causa della limitata velocità di sedimentazione della componente di grana fine dei sedimenti disponibili alla dispersione e diffusione nel campo lontano, le fluttuazioni stocastiche del percorso compiuto dalle singole particelle può portare i singoli grani di sedimento a raggiungere il fondale. Tale processo è, a tutti

² Becker, J., van Eekelen, E., van Wiechen, J., de Lange, W., Damsma, T., Smolders, T., & van Koningsveld, M. (2015). Estimating source terms for far field dredge plume modelling. *Journal of environmental management*, 149, 282-293.

 <p data-bbox="384 143 703 197">Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p data-bbox="767 136 1465 226">Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
---	---

gli effetti, inquadrabile nell'ambito di un processo di deposizione che sottrae una frazione di sedimento sospeso al processo di dispersione e diffusione. E' da sottolineare che il fenomeno potrebbe essere esacerbato dalla flocculazione dei sedimenti che, essendo soggetti a forze di superficie, tendono ad aggregarsi in flocculi, caratterizzati da velocità di sedimentazione superiori a quella dei grani che li compongono.



3.3. Riproduzione numerica del fenomeno fisico

3.3.1. L'approccio lagrangiano

In linea generale, lo studio si fonda sull'utilizzo di un modello del tipo *random walk*, tipicamente utilizzato in casi simili a quello in esame (Linee Guida ISPRA, Lisi et al., 2017).

In estrema sintesi, l'evoluzione spazio-temporale della nuvola di torbidità è quantificata tramite l'analisi del percorso di una serie di traccianti passivi trasportato da un campo idrodinamico predeterminato e soggetto ad un fenomeno diffusivo legato alle sue fluttuazioni turbolente.

È importante sottolineare che il tracciante passivo non rappresenta direttamente il singolo grano di sedimento. Piuttosto, esso rappresenta una massa di sedimenti sospesi (definita in funzione delle caratteristiche della sorgente di risospensione) sulla base della quale è possibile stimare la torbidità nel dominio di calcolo.

È noto e dimostrabile che l'approccio lagrangiano sia del tutto congruente con la risoluzione dell'equazione di diffusione e dispersione scritta nell'ambito dell'approccio euleriano (es. Yang et al. 2020).

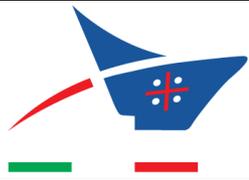
In linea generale, la posizione istantanea del singolo tracciante passivo può essere calcolata come segue, nell'ambito di un metodo di Eulero del primo ordine di risoluzione di equazioni differenziali ordinarie:

$$\begin{aligned}
 x_p(t + \delta t) &= x_p(t) + u_p \delta t + \Delta x_d + \Delta x_s \\
 y_p(t + \delta t) &= y_p(t) + v_p \delta t + \Delta y_d + \Delta y_s \\
 z_p(t + \delta t) &= z_p(t) - w_s \delta t + \Delta z_d + \Delta z_s
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

nella quale:

- t è il tempo;
- δt è il passo temporale di integrazione;
- u_p e v_p sono le componenti orizzontali del campo idrodinamico medio dirette lungo l'asse delle ascisse (x) e lungo l'asse delle ordinate (y) in corrispondenza del punto occupato dal tracciante passivo all'istante t ;

³ Yang, F., Liang, D., Wu, X., & Xiao, Y. (2020). On the application of the depth-averaged random walk method to solute transport simulations. *Journal of Hydroinformatics*, 22(1), 33-45.



- w_s è la velocità di deposizione caratteristica della frazione granulometrica in sospensione (tipicamente molto piccola nel caso di sedimento a grana fine, Di Risio et al., 2017);
- x_p , y_p e z_p rappresentano le coordinate del singolo tracciante passivo nello spazio;
- Δx_d , Δy_d e Δz_d sono gli spostamenti (lungo le tre direzioni x , y e z) del singolo tracciante passivo causate dalla componente deterministica del processo di diffusione;
- Δx_s , Δy_s e Δz_s sono gli spostamenti (lungo le tre direzioni x , y e z) del singolo tracciante passivo causate dalla componente stocastica del processo di diffusione.

L'analisi qualitativa delle equazioni (1) permette di osservare che non è risolta la dinamica delle particelle (non appare la massa del singolo tracciante, né appare il ruolo della gravità), nel rispetto dell'approccio lagrangiano proprio dei modelli numerici del tipo *random walk*. Per contro, le equazioni (1), e la strategia applicata per la loro risoluzione numerica, riproducono tutti i macrofenomeni descritti nel paragrafo precedente.

Fenomeno di risospensione

È riprodotto dalla distribuzione iniziale dei traccianti passivi e dall'istante in cui iniziano il proprio percorso.

- *Fenomeno di dispersione*

È riprodotto dal secondo termine del secondo membro delle prime due equazioni (1), che rappresenta l'estensione (deterministica) del cammino che il tracciante passivo percorre nell'intervallo di tempo δt con velocità costante (pari a u_p e v_p).

- *Fenomeno di diffusione*

È riprodotto dal terzo e dal quarto termine del secondo membro delle equazioni (1). La componente deterministica (terzo termine) è legata alla variazione spaziale dei coefficienti di diffusività, la componente stocastica (quarto termine) è legata alla fluttuazione turbolenta del campo idrodinamico.

- *Fenomeno di deposizione*

È descritto dal secondo termine dell'ultima equazione (1) e, in generale, dalla risoluzione della terza equazione. Laddove il singolo tracciante passivo raggiunge il fondo, esso può essere considerato rappresentativo di un processo di deposizione di una quantità di sedimento corrispondente alla massa di sedimenti sospesi che il tracciante rappresenta.

3.3.2. La sorgente di risospensione

La sorgente di risospensione, rappresentativa dell'attività di dragaggio, è definita in termini di:

- localizzazione;
- geometria;
- intensità;
- evoluzione temporale.

Per quanto riguarda la localizzazione, è necessario riferirsi al meccanismo di risospensione dipendente dalla tipologia di lavorazione.

L'attività di dragaggio può prevedere l'utilizzo di mezzi di tipo meccanico (a grappo, ovvero a benna) ovvero l'utilizzo di tecnologie idrauliche. In entrambi i casi, l'attività induce potenziali perdite della frazione granulometrica fine lungo l'intera colonna d'acqua.

Nel caso del dragaggio meccanico, il singolo ciclo di movimentazione può essere schematizzato come segue:

- l'elemento di movimentazione (grappo o benna) entra in acqua e scende in direzione pseudo verticale sino al fondo; durante questa fase le perdite sedimentarie possono essere ritenute trascurabili a meno del fenomeno di dilavamento delle superfici dell'elemento e per il suo impatto con il fondo;
- l'elemento di movimentazione preleva il materiale e lo solleva sino alla superficie libera; in questa fase la sorgente di risospensione è riconducibile alle perdite della frazione granulometrica fine sia nella fase sommersa, sia nella (breve) fase emersa;
- l'elemento di movimentazione deposita il materiale sul natante di trasporto; in questa fase il contributo alla risospensione può essere ritenuto trascurabile.

La descrizione, pur qualitativa, del processo di risospensione permette di localizzare la sorgente sull'intera colonna d'acqua.

Nel caso del dragaggio idraulico (con o senza disgregatore meccanico), l'asportazione del materiale avviene direttamente in corrispondenza del fondo e la sorgente può collocarsi in corrispondenza di un volume posto in corrispondenza del fondo. Soltanto quando la profondità è relativamente limitata, la sorgente interessa l'intera colonna d'acqua (condizioni di "dragaggio in acqua bassa").

La descrizione qualitativa delle tecniche di movimentazione permette di definire anche la geometria della sorgente di risospensione.

Per le attività di dragaggio meccanico, infatti, la sorgente può essere schematizzata come un cilindro di altezza pari alla profondità e di area di base pari all'area di ingombro dell'elemento di movimentazione (benna o grappo) incrementata per tener conto dell'effetto dinamico di "espulsione" legato alla velocità di ascesa ovvero di discesa (così come suggerito da Collins, 1995⁴).

Nel caso di dragaggio idraulico, la sorgente può essere schematizzata come un semi-ellissoide con dimensioni caratteristiche (i semi assi orizzontali e verticali e l'inclinazione) dipendenti dalla dimensione della testa disgregante (Collins, 1995).

L'intensità della sorgente di risospensione richiede, in linea di principio, una caratterizzazione dettagliata del cosiddetto campo vicino e, più in generale, delle modalità operative di movimentazione. Sono numerose le formulazioni che la letteratura di settore hanno proposto nel corso del tempo (es. Lisi et al., 2016⁵). I metodi, in generale, forniscono una stima della quantità di sedimento che, nell'unità di tempo, alimenta il campo lontano e, quindi, influenza l'evoluzione spazio-temporale della nuvola di torbida.

Così come evidenziato dalle Linee Guida ISPRA, esistono formulazioni parametriche (utilizzabili su base tabellare) e formulazioni empiriche (basate sull'utilizzo di gruppi adimensionali). Le prime, al contrario delle seconde, non richiedono una conoscenza di dettaglio delle modalità operative. Pertanto, nel seguito di questo studio si utilizzano formulazioni parametriche che forniscono la quantità di sedimento disponibile all'evoluzione della nube di torbida in funzione della produttività delle attività di dragaggio.

Analisi di letteratura, basate anche su osservazioni di campo, hanno permesso di definire una serie di "fattori di risospensione". Così come proposto da Becker et al. (2015), è possibile definire una serie di coefficienti empirici che permettono la stima della quantità di sedimento effettivamente disponibile alla dispersione e diffusione nel campo lontano. Tali coefficienti esprimono la parte della frazione fine, rispetto a quella totale disponibile, che può potenzialmente alimentare il processo.

Nello specifico, è possibile quantificare la massa totale (m_{torb}) di sedimento a grana fine che alimenta la nube di torbida:

⁴ Collins M. Dredging Induced Near Field Resuspended Sediment Concentration and Source Strengths. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, p.232. 1995.

⁵ Lisi, I., Di Risio, M., De Girolamo, P., & Gabellini, M. (2016). Engineering tools for the estimation of dredging-induced sediment resuspension and coastal environmental management. Applied Studies of Coastal and Marine Environment, 55-83.

$$m_{torb} = \sigma_l m_{tot}$$

Nella quale σ_l è un coefficiente empirico e m_{tot} rappresenta la massa totale della frazione fine presente nell'ammasso movimentato:

$$m_{tot} = (1 - n)\rho_s V_m f_f$$

nella quale n rappresenta la porosità dell'ammasso, ρ_s è la densità del sedimento, V_m è il volume di sedimento movimentato e f_f rappresenta la frazione fine dell'ammasso sedimentario.

Se ne deduce che la massa disponibile per la dispersione e diffusione può essere stimata come segue:

$$m_{torb} = \sigma_l (1 - n)\rho_s V_m f_f$$

Per attività effettuate con benna o grappo, il coefficiente empirico σ_l è compreso tra un valore pressoché nullo (in particolare per dragaggio di tipo ambientale) e può giungere sino a 0.04 (4%). Lo stesso coefficiente empirico può essere valutato per l'attività di dragaggio effettuato con tecniche idrauliche. In questo caso il coefficiente empirico σ_l è compreso tra un valore pari a 0.01 (1%) e un valore pari a 0.05 (5%). Tali valori si riferiscono all'utilizzo di testa disgregante

La frazione fine totale f_f è desumibile dalle attività di caratterizzazione a supporto del progetto.

In generale, la massa a disposizione per l'evoluzione nel campo lontano è un'informazione non sufficiente a definire l'intensità della sorgente. Tuttavia, nell'ambito di un approccio lagrangiano, essa può essere utilizzata per la definizione della massa caratteristica dei traccianti passivi attraverso la definizione della durata del ciclo di movimentazione.

A tal proposito, nel caso di dragaggio meccanico, è possibile definire la durata totale del singolo ciclo di dragaggio (T_{tot}) in funzione delle fasi di discesa (t_d), salita (t_s) e deposito nel natante di appoggio (t_n):

$$T_{tot} = t_d + t_s + t_n$$

Come anticipato, il processo di risospensione può ritenersi confinato alle sole fasi di discesa e salita, da cui discende la durata T_{ris} del processo di risospensione per ogni ciclo:

$$T_{ris} = t_d + t_s$$

Durante la fase di discesa e quella di salita, il processo di risospensione è verosimilmente diverso. Tuttavia, è da sottolineare che lo studio non è finalizzato a descrivere il campo vicino. Ne discende che è possibile definire il rateo di risospensione q_{torb} (espresso in kg/s) durante un ciclo di movimentazione:

$$q_{torb} = \frac{\sigma_l(1-n)\rho_s V_m f_f}{t_d + t_s}$$

L'approccio lagrangiano utilizzato in questo studio permette di definire il numero di traccianti passivi n_c utilizzati per rappresentare un singolo ciclo di movimentazione. Ne consegue che ad ogni tracciante passivo è associata una massa m_{tp} rappresentativa del processo di risospensione:

$$m_{tp} = q_{torb} \frac{t_d + t_s}{n_c}$$

In maniera del tutto analoga, è possibile definire la massa associata ai traccianti passivi per il dragaggio idraulico. In questo caso il volume coinvolto nel processo di risospensione è riferito all'unità di tempo, per cui il volume V_m e la durata del dragaggio T_{ris} sono sostituiti dalla portata Q_d (kg/s) del dragaggio:

$$q_{torb} = \sigma_l(1-n)\rho_s Q_d f_f$$

Nell'ambito dell'approccio lagrangiano utilizzato, l'evoluzione temporale della sorgente di risospensione è costituita dal numero di traccianti passivi rilasciati, nel singolo passo di integrazione (δt), per la descrizione delle attività di dragaggio

In tal modo, è possibile definire il numero di traccianti passivi (δn) che deve entrare nel dominio di calcolo per ogni passo di integrazione (δt) nel caso in cui questo sia concomitante con una fase del ciclo in cui avviene la risospensione (di durata T_{ris}):

$$\delta n = \frac{n_c}{T_{ris}/\delta t}$$

3.3.3. Il campo idrodinamico

I campi idrodinamici sono costituiti dalle componenti di velocità lungo gli assi coordinati x (componente u) e y (componente v).

Tali informazioni sono desunte dalle simulazioni idrodinamiche effettuate nell'ambito di questo studio tramite l'utilizzo del modello numerico XBeach. Esso è un modello "open-source" che, per

quanto di interesse nell'ambito di questo studio, simula i processi idrodinamici relativi all'idrodinamica non stazionaria indotta dall'azione del vento sulla superficie libera. Sviluppato da un gruppo di ricerca costituito da ricercatori provenienti da diversi enti (l'ente di ricerca olandese Deltares, l'Università di Delft e l'Università di Miami), lo strumento numerico appartiene alla famiglia dei modelli integrati sulla verticale (2DH, bidimensionali - 2D - sul piano orizzontale - H -). Senza necessità di entrare nei dettagli dell'implementazione del modello numerico, le equazioni tengono conto degli effetti della forza di Coriolis, delle tensioni agenti sulla superficie libera, delle tensioni agenti sul fondo a causa della scabrezza del fondale e fornisce l'evoluzione spazio-temporale dei livelli medi e delle componenti cartesiane delle velocità euleriane. Le equazioni sono risolte con il metodo delle differenze finite.

Più nel dettaglio, l'idrodinamica è riprodotta grazie alla risoluzione delle equazioni delle onde non lineari in "acqua bassa", trascurando la deviazione della distribuzione della pressione da quella idrostatica (così come sono trascurate le componenti verticali della velocità), secondo un approccio di media generalizzata lagrangiana sulla verticale (GLM):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(U^L h)}{\partial x} + \frac{\partial(V^L h)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U^L}{\partial t} + U^L \frac{\partial U^L}{\partial x} + V^L \frac{\partial U^L}{\partial y} - f_c V^L - v_h \left(\frac{\partial^2 U^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U^L}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{\rho h} (\tau_{sx} + \tau_{bx}^E)$$

$$\frac{\partial V^L}{\partial t} + U^L \frac{\partial V^L}{\partial x} + V^L \frac{\partial V^L}{\partial y} - f_c U^L - v_h \left(\frac{\partial^2 V^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V^L}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \eta}{\partial y} = \frac{1}{\rho h} (\tau_{sy} + \tau_{by}^E)$$

L'apice "L" indica le grandezze lagrangiane, mentre l'apice "E" quelle euleriane. Nelle precedenti equazioni:

- t è il tempo;
- x,y sono le coordinate cartesiane;
- η è l'elevazione della superficie libera;
- h è la profondità totale;
- U, V sono le componenti cartesiane delle velocità medie sulla verticale;
- f_c è il coefficiente di Coriolis;

- ν_h è il coefficiente di viscosità di vortice orizzontale;
- τ_{sx}, τ_{sy} sono le componenti cartesiane dello sforzo tangenziale agente sulla superficie libera;
- τ_{bx}, τ_{by} sono le componenti cartesiane dello sforzo tangenziale agente al fondo.

Per un approfondimento tecnico sul modello numerico, si rimanda alla letteratura di settore (es. XBeach Team, 2010⁶).

L'utilizzo del modello numerico permette di conoscere (per gli scenari di simulazione descritti nel paragrafo successivo) i valori delle componenti di velocità della corrente nei nodi di calcolo della griglia implementata. Si evidenzia che la risoluzione delle equazioni (1) richiede l'utilizzo delle componenti di velocità (u_p e v_p) in corrispondenza dei punti occupati dai traccianti passivi. A tal fine è stata utilizzata una tecnica di interpolazione bi-lineare.

3.3.4. La componente deterministica del processo di diffusione

La componente deterministica del processo di diffusione è legata alla variazione spaziale dei coefficienti di diffusività (D_{xx}, D_{yy} e D_{zz}) lungo le tre direzioni spaziali (x, y e z).

In generale, i coefficienti di diffusività, infatti, sono legati all'intensità della corrente: crescono (cioè cresce l'importanza del processo diffusivo) al crescere dell'intensità di corrente poiché crescono le fluttuazioni turbolente.

È possibile esprimere la dipendenza del coefficiente di diffusività orizzontale (D_{xx} e D_{yy}) dall'intensità di corrente (es. Lv et al., 2016⁷; Yang et al., 2020):

$$D_{xx} = D_{yy} = \varepsilon h u_*$$

Nella quale h è la profondità locale, u_* è la cosiddetta velocità di attrito e ε è un parametro empirico. Studi precedenti hanno dimostrato che ε assume valori circa pari a 3.3.

La profondità locale può essere desunta dai rilievi batimetrici sulla base dei quali è stata implementata la griglia numerica necessaria ad effettuare le simulazioni idrodinamiche.

La velocità di attrito può essere stimata in funzione della scabrezza (idraulica) del fondo:

⁶ Roelvink, D., Reniers, A. J. H. M., Van Dongeren, A. P., Van Thiel de Vries, J., Lescinski, J., & McCall, R. (2010). XBeach model description and manual. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology. Report June, 21, 2010.

⁷ Lv, X., Liu, B., Yuan, D., Feng, H., & Teo, F. Y. (2016). Random walk method for modeling water exchange: an application to coastal zone environmental management. Journal of hydro-environment research, 13, 66-75.

$$u_* = \frac{g}{k_s h^{1/6}} \sqrt{u^2 + v^2}$$

nella quale k_s indica il coefficiente di scabrezza idraulica di Strickler che può essere stimato sulla base del diametro caratteristico passate al 90% (D_{90}) del sedimento che costituisce il fondo:

$$k_s = \frac{26}{D_{90}^{1/6}}$$

Per quanto riguarda il coefficiente di diffusività lungo la direzione verticale, è possibile riferirsi alla relazione empirica valida per le correnti indotte dal vento (Visser, 1997⁸):

$$D_{zz} = K_a - K_b z \exp(\alpha z)$$

Nella quale z è l'elevazione (misurata rispetto al livello medio e con asse verticale diretto verso l'alto), K_a , K_b e α tre parametri empirici. Visser (1997) suggerisce di $K_a = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, $K_b = 0.006 \text{ m/s}$ e $\alpha = 0.5 \text{ m}^{-1}$.

La componente deterministica del processo di diffusione è descritta dai termini Δx_d , Δy_d e Δz_d nelle equazioni (1). Esse assumono, alla luce delle definizioni dei coefficienti di diffusività, le seguenti forme:

$$\Delta x_d = \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} \delta t + \frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \delta t$$

$$\Delta y_d = \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} \delta t + \frac{D_{yy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \delta t$$

$$\Delta z_d = \frac{\partial D_{zz}}{\partial z} \delta t$$

che possono essere calcolate in funzione dei campi idrodinamici (noti) e della configurazione batimetrica (nota).

3.3.5. La componente stocastica del processo di diffusione

Come diffusamente anticipato, la componente stocastica del processo di diffusione è legata agli effetti della fluttuazione turbolenta dei campi idrodinamici. Pertanto, essa può essere rappresentata dalla dipendenza dei coefficienti di diffusività dalle intensità di velocità (si veda il sotto paragrafo precedente). La componente stocastica del processo di diffusione è descritta dai termini Δx_s , Δy_s e Δz_s nelle equazioni (1) forniti dalle seguenti relazioni:

$$\Delta x_s = \sqrt{2D_{xx} \delta t} r_x$$

⁸ Visser, A. W. (1997). Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. Marine Ecology Progress Series, 158, 275-281.

$$\Delta y_s = \sqrt{2D_{yy}\delta t r_y}$$

$$\Delta z_s = \sqrt{2D_{zz}\delta t r_z}$$

Nella quale r_x , r_y e r_z sono realizzazioni di una variabile aleatoria descritta da una distribuzione di probabilità normale con media nulla e deviazione standard unitaria (variabile normale standard).

3.4. Analisi e sintesi dei risultati

Il risultato dell'applicazione del modello lagrangiano random walk descritto nei paragrafi precedenti è costituito dalla ricostruzione dell'evoluzione temporale della posizione dei traccianti passivi che rappresentano una massa di sedimenti risospesi (kg).

È da evidenziare che la posizione istantanea dei traccianti passivi non è dipendente da alcuna griglia di calcolo, nel rispetto dell'approccio lagrangiano utilizzato. D'altra parte, è possibile definire una griglia euleriana per la stima dell'evoluzione spazio-temporale della concentrazione in funzione del numero di particelle presente in ogni cella della griglia. La concentrazione media sulla verticale (C_m^*) può essere stimata utilizzando la seguente formulazione:

$$C_m^*(x, y) = \frac{n_c(x, y)}{\delta x \delta y h(x, y)} m_c \quad [kg/m^3]$$

Si può osservare che le simulazioni per diverse modalità operative (ovvero per dragaggio meccanico e dragaggio idraulico) si differenziano soltanto per il valore della massa associata ad ogni singolo tracciante lagrangiano. Pertanto, è possibile definire una misura della concentrazione normalizzata rispetto alla massa m_c (nel seguito indicata semplicemente come "concentrazione normalizzata"):

$$\widetilde{C}_m(x, y) = \frac{C_m^*(x, y)}{m_c} = \frac{n_c(x, y)}{\delta x \delta y h(x, y)} \quad [1/m^3]$$

I risultati ottenuti sono sintetizzati, per raggiungere gli obiettivi dello studio, fornendo la distribuzione spaziale della massima concentrazione media sulla profondità raggiunta in ogni cella della griglia euleriana.

3.5. Sintesi delle caratteristiche dello studio

L'approccio numerico descritto nei paragrafi precedenti permette di evidenziare le capacità del metodo utilizzato.

- È possibile riprodurre l'effetto delle modalità operative delle attività di movimentazione dei sedimenti.
- È possibile ricostruire la distribuzione spazio-temporale della concentrazione di solidi sospesi per la valutazione degli impatti attesi.
- È possibile riprodurre la caratteristica stocastica del processo di diffusione.
- È possibile riprodurre l'intensità della componente stocastica del processo diffusivo in funzione dell'intensità dei campi idrodinamici.
- È possibile riprodurre gli effetti dell'eterogeneità spaziale della diffusività nel piano orizzontale.
- È possibile riprodurre la diffusività lungo la direzione verticale, in particolare nel caso specifico di idrodinamica indotta dal vento.
- È possibile riprodurre il fenomeno di deposizione dei sedimenti sospesi a causa del processo di sedimentazione e dell'interazione tra il fondo e il processo (stocastico) di diffusione e dispersione.
- Per contro, non vengono riprodotti i seguenti processi fisici.
- A favore di sicurezza, non si riproduce il fenomeno della flocculazione per cui, all'aumentare della concentrazione, aumenta la velocità di sedimentazione dei flocculi.
- Non si riproduce l'effetto di risospensione (e quindi di diffusione e dispersione) legato alla presenza delle eliche dei mezzi marittime.
- Non si riproduce la tracimazione eventualmente utilizzata durante il trasporto dei sedimenti, trascurando la sorgente di risospensione legato alla fase di trasporto.
- La modalità operativa (ovvero dragaggio meccanico e idraulico) sono differenziati soltanto in termini di produzione giornaliera e quantità di sedimenti risospesi, trascurando quindi eventuali modifiche dell'estensione dell'area di dragaggio.

4. Scenari di simulazione

4.1. Forzanti meteomarine

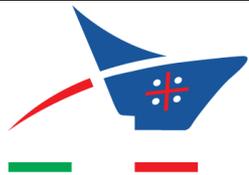
Il Golfo di Olbia risulta completamente schermato dal moto ondoso proveniente da largo, per cui l'unica agitazione ondosa che può essere presente all'interno di esso può essere generata solo localmente. Tenendo conto che all'interno del Golfo è disponibile un'area di generazione per le onde molto piccola (nell'ordine di pochi chilometri), si può facilmente concludere che il moto ondoso all'interno del Golfo risulta estremamente contenuto e in generale non è in grado di influenzare significativamente i processi di dispersione e diffusione dei sedimenti risospesi durante le attività di dragaggio. Ne consegue che, dal punto di vista idrodinamico, la circolazione nel Golfo di Olbia è influenzata prevalentemente da due fattori: la marea astronomica e l'azione del vento. Tuttavia, gli studi di idrodinamica eseguiti nell'ambito della proposta di PRP 2008 hanno messo in evidenza che il campo idrodinamico indotto dalla sola marea astronomica è estremamente modesto.

Alla luce di quanto esposto, le forzanti meteomarine di interesse per l'analisi dei processi di diffusione e dispersione dei sedimenti risospesi si riducono agli eventi anemometrici. A tal proposito, è necessario riferirsi alle condizioni frequenti.

Con diretto riferimento allo studio idrodinamico eseguito nell'ambito della proposta di PRP2008, sono state considerate due direzioni di provenienza del vento (Levante e Libeccio) e due intensità di velocità (7 m/s per il vento proveniente dal settore di Levante, 10 m/s per il vento proveniente dal settore di Libeccio). Le condizioni anemometriche hanno una frequenza di accadimento di circa 200 giorni/anno. Inoltre, sono state riprodotte le condizioni anemometriche caratterizzate da un tempo di ritorno circa pari a 2 anni, incrementando le intensità di velocità a 12 m/s per il settore di Levante e a 15 m/s per il settore di Libeccio. La Tabella 4-1 sintetizza gli scenari di simulazione delle forzanti meteomarine.

Scenario meteomarino	LI-F	LI-R	LE-F	LE-R
Settore di provenienza del vento	Libeccio		Levante	
Direzione di provenienza del vento (°N)	240		70	
Velocità del vento (m/s)	10.0	15.0	7.0	12.0

Tabella 4-1: Condizioni meteomarine. Scenari di simulazione.



4.2. Definizione delle sorgenti di risospensione

L'attività di dragaggio è prevista per l'area relativa al cerchio di evoluzione, per il canale di accesso al Porto Cocciani e per il canale di accesso alla rada. I risultati delle analisi granulometriche hanno rilevato che il materiale da movimentare ha una frazione granulometrica fine variabile (Figura 4-1). Per il dragaggio del cerchio di evoluzione, il valore della frazione fine (f_f) è posta pari a 80%, a favore di sicurezza. Per il dragaggio del canale di accesso al Porto Cocciani pari a 95%. Per il dragaggio del canale di accesso alla rada è posto pari al 75%.

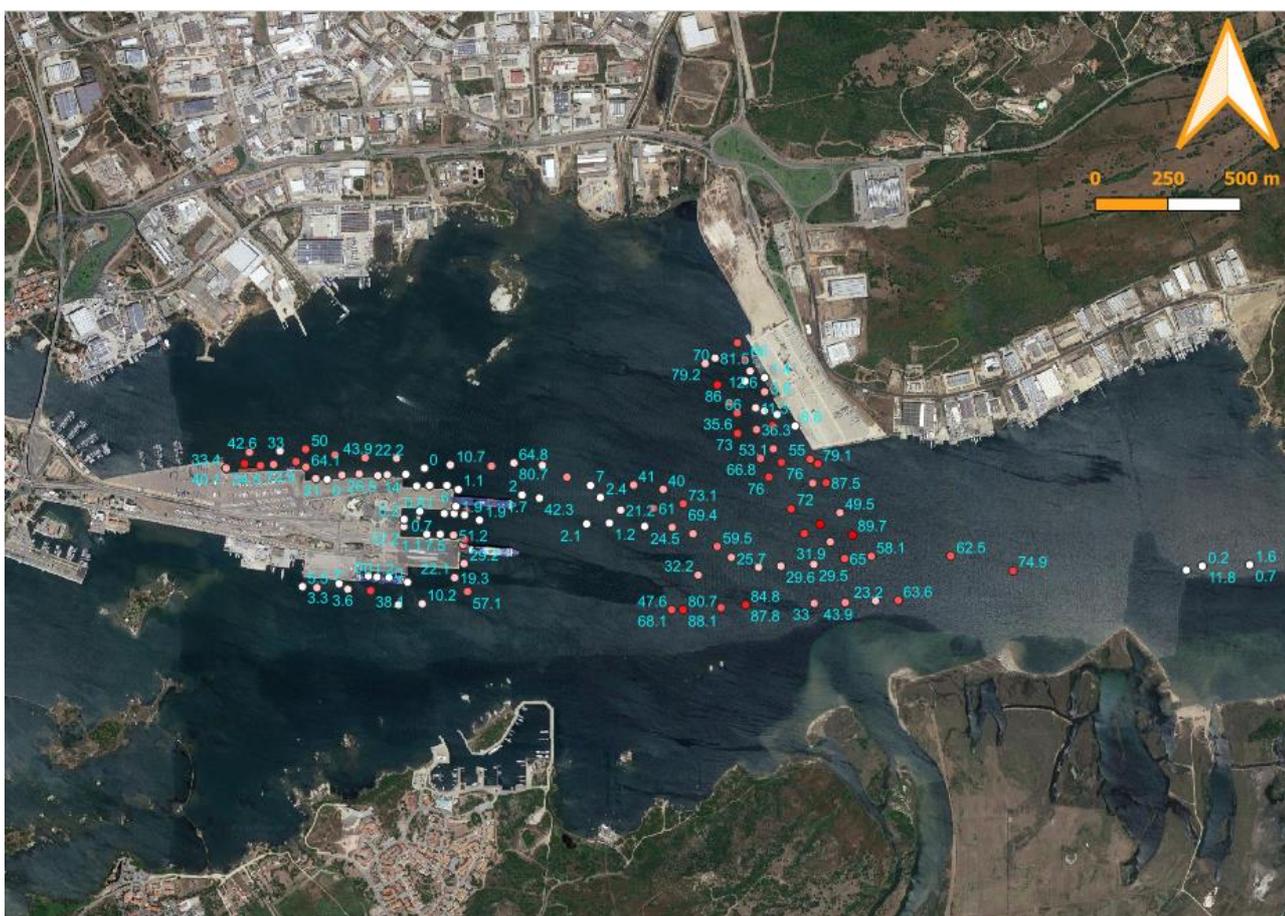


Figura 4-1 - Percentuale fine nei punti di rilievo.

Nel caso di dragaggio meccanico, è possibile ipotizzare una durata di ogni singolo ciclo pari a 6 minuti. La durata della sorgente di risospensione è pari a 5 minuti, considerando il tempo nella fase aerea di durata pari a 1 minuto. Durante l'intera giornata, considerando una durata giornaliera pari a 8 ore, sono previsti circa 80 cicli di rimozione (fase di discesa, risalita e collocazione del materiale nel natante di trasporto). La produzione giornaliera di una singola draga meccanica può essere posta ragionevolmente pari a 1'250 m³. La sorgente di risospensione è localizzata sull'intera colonna d'acqua durante la fase di risalita e di discesa del grappo utilizzato per la rimozione. Le simulazioni

 <p>Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p>Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
--	--

hanno riguardato tre diverse localizzazioni della sorgente di risospensione con l'obiettivo di riprodurre gli effetti della lavorazione per le tre aree di dragaggio. È possibile stimare la quantità di sedimento (a granulometria fine) disponibile al campo lontano. Si considera, a tal fine, una frazione (rispetto alla massa totale disponibile al campo lontano) pari al 4% (es. Becker et al., 2015). Ne consegue che la massa giornaliera a disposizione del campo lontano è pari a 40.0 m³/giorno, 47.5 m³/giorno e 37.5 m³/giorno per il dragaggio del cerchio di evoluzione, del canale di Porto Cocciani e per il canale di accesso alla rada rispettivamente.

Nel caso di dragaggio idraulico, la produzione giornaliera di una singola draga può essere posta ragionevolmente pari a 5'000 m³. Anche in questo caso, è possibile stimare la quantità di sedimento (a granulometria fine) disponibile al campo lontano. Si considera, a tal fine, una frazione (rispetto alla massa totale disponibile al campo lontano) pari al 5% (es. Becker et al., 2015). Ne consegue che la massa giornaliera a disposizione del campo lontano è pari a 200.0 m³/giorno, 237.5 m³/giorno e 187.5 m³/giorno per il dragaggio del cerchio di evoluzione, del canale di Porto Cocciani e per il canale di accesso alla rada rispettivamente.

4.3. Sintesi degli scenari di simulazione

A causa dell'elevato numero di scenari riprodotti, questo paragrafo ha l'obiettivo di sintetizzarne le caratteristiche a favore di chiarezza.

Ogni scenario si differenzia dagli altri per i seguenti aspetti:

- direzione di provenienza del vento (LI – Libeccio; LE – Levante);
- frequenza di superamento delle condizioni anemometriche (R – Raro, F – Frequente);
- localizzazione della sorgente di risospensione (P1 – cerchio di evoluzione; P2 – canale Porto Cocciani; P3 – canale di accesso alla rada).

Inoltre, si è riprodotto anche l'effetto della modalità operativa (M – dragaggio meccanico; I – dragaggio idraulico).

Ogni simulazione, pertanto, è individuata da una sigla costituita da:

“direzione di provenienza del vento– frequenza del vento–localizzazione della sorgente–modalità operativa”

A titolo di esempio, lo scenario “LI-R-P1-M” indica i risultati ottenuti per l'attività di dragaggio per un vento di Libeccio (LI) raro (R) localizzato nel cerchio di evoluzione (P1) ed effettuato con dragaggio meccanico (M).

 <p>Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p>Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
---	--

5. Sintesi e discussione dei risultati

5.1. Campi idrodinamici

Si fa espresso riferimento alle Figure 5.1-5.4.

L'analisi dei campi idrodinamici denota l'instaurarsi di correnti di intensità molto limitata, inferiore ad un valore approssimativo di circa 5 cm/s. In generale, le correnti sono allineate con la direzione del vento in corrispondenza del canale di accesso alla rada, mentre sono influenzate dai processi convettivi nelle aree limitrofe.

5.2. Diffusione e dispersione dei sedimenti risospesi

Si fa espresso riferimento alle Figure 5.5-5.16 e a quanto sintetizzato in Tabella 5.1.

L'analisi dei risultati ottenuti permette di osservare che le attività di dragaggio inducono concentrazioni di sedimento risospeso che diminuiscono rapidamente all'aumentare della distanza dall'area di movimentazione dei sedimenti. I sedimenti sospesi rimangono sostanzialmente confinati nelle aree prossime all'area di intervento. Le concentrazioni massime, quindi, si verificano in corrispondenza delle aree di intervento e il processo di diffusione e dispersione induce un'estensione della nube di torbida piuttosto limitata. Le simulazioni mostrano, infatti, che dopo 16 ore dal termine di un turno giornaliero (di durata pari a 8 ore), l'estensione della nube di torbida è limitata a qualche centinaio di metri. In particolare, per le aree di dragaggio relative al cerchio di evoluzione (punto P1 negli scenari di simulazione) e al canale di Porto Cocciani (punto P2 negli scenari di simulazione), l'estensione della nube di torbida può essere stimata approssimativamente nell'ordine dei 500-600 m. Per quanto riguarda il dragaggio del canale di accesso alla rada (punto P3 negli scenari di simulazione) si osserva che l'estensione della nube di torbida è superiore rispetto agli altri scenari. La nube di torbida, soltanto per lo scenario di venti rari, è estesa e raggiunge Isola Bianca (per il vento proveniente dal settore di levante), ovvero si esce dalla rada (per il vento proveniente dal settore di libeccio).

I valori di concentrazione media dipendono dalla modalità operativa. A causa della maggiore produzione giornaliera e del (lieve) incremento della frazione di sedimenti risospesi, la modalità operativa di dragaggio idraulico appare indurre concentrazioni superiori rispetto al dragaggio meccanico. È da sottolineare che, nel caso di dragaggio idraulico, è necessario anche il trasporto dei sedimenti che potrebbe avvenire anche con trascinamento delle stive. Pertanto, pur permettendo una compressione dei tempi di lavorazione, per il dragaggio idraulico si stimano valori della concentrazione media superiori a quelli relativi al dragaggio meccanico.

 <p data-bbox="379 141 703 197">Autorità di Sistema Portuale del Mare di Sardegna</p>	<p data-bbox="762 136 1465 226">Dragaggi Golfo di Olbia per portare i fondali del porto Isola Bianca e del Porto Cocciani a -10,00m e i fondali della Canaletta a -11,00m</p>
---	---

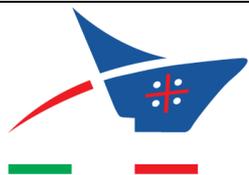
In linea generale, per gli scenari di evento frequente le concentrazioni medie sono superiori a quelle ottenute per gli scenari di eventi rari. Infatti, a fronte della riduzione dell'intensità del vento (e quindi dell'intensità delle correnti idrodinamiche), si riduce l'estensione della nube di torbida e, quindi, si incrementa il valore della concentrazione media. Per lo stesso motivo, le concentrazioni stimate sono più elevate nelle aree di dragaggio ove le correnti idrodinamiche sono più deboli (ovvero nell'area del cerchio di evoluzione e del canale di Porto Cocciani).

Per il dragaggio meccanico, le concentrazioni medie

- non superano i 10 mg/l nell'area del cerchio di evoluzione;
- non superano i 5.5 mg/l nell'area del canale di Porto Cocciani;
- non superano i 2.5 mg/l nell'area del canale di accesso alla rada.

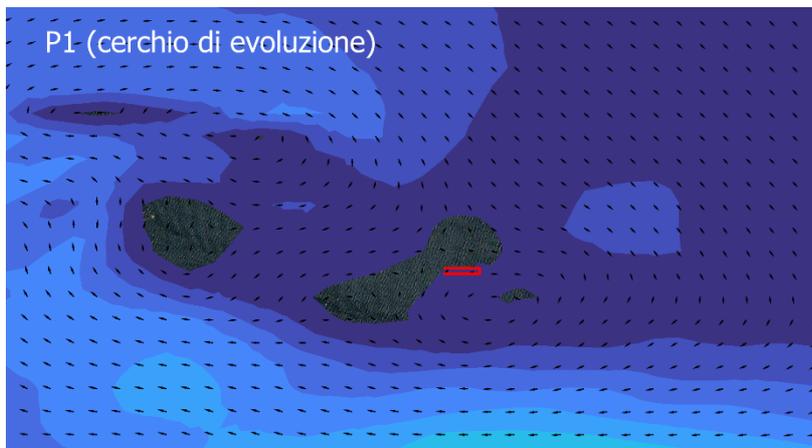
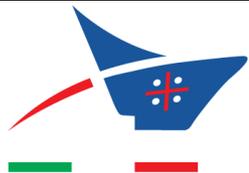
Analogamente, per il dragaggio idraulico, a meno del contributo dell'operazione di trasporto, le concentrazioni medie:

- non superano i 40 mg/l nell'area del cerchio di evoluzione (non superano 20 mg/l escludendo lo scenario frequente di vento proveniente dal settore di Libeccio);
- non superano i 33 mg/l nell'area del canale di Porto Cocciani (non superano 23 mg/l escludendo lo scenario frequente di vento proveniente dal settore di Libeccio);
- non superano i 10.5 mg/l nell'area del canale di accesso alla rada.



SCENARIO	LOCALIZZAZIONE SORGENTE	MODALITA' OPERATIVA	Concentrazione normalizzata (1/m ³)		Concentrazione (kg/m ³)	
			Massima	Media	Massima	Media
LE_F	P1	M	4.88	0.35	129.19	9.25
		I			538.28	38.54
	P2	M	4.78	0.25	150.35	7.88
I	626.46	32.84				
LE_R	P1	M	4.63	0.18	122.56	4.70
		I			510.68	19.56
	P2	M	3.67	0.16	115.39	5.16
I	480.77	21.52				
LI_F	P1	M	5.38	0.17	142.44	4.38
		I			593.49	18.23
	P2	M	4.00	0.17	125.88	5.30
I	524.48	22.09				
LI_R	P1	M	3.87	0.14	102.69	3.67
		I			427.86	15.29
	P2	M	3.33	0.14	104.90	4.37
I	437.07	18.20				
LI_F	P1	M	2.54	0.09	63.17	2.26
		I			263.22	9.42
	P2	M	2.34	0.09	58.04	2.32
I	241.84	9.67				

Tabella 5-1: Sintesi dei risultati ottenuti.



LE-F
(Levante - Frequente)



0 100 200 300 m



V = 7 m/s
Dir = 70°N

Vel. (m s ⁻¹)	
<= 0.002000	0.024000 - 0.026000
0.002000 - 0.004000	0.026000 - 0.028000
0.004000 - 0.006000	0.028000 - 0.030000
0.006000 - 0.008000	0.030000 - 0.032000
0.008000 - 0.010000	0.032000 - 0.034000
0.010000 - 0.012000	0.034000 - 0.036000
0.012000 - 0.014000	0.036000 - 0.038000
0.014000 - 0.016000	0.038000 - 0.040000
0.016000 - 0.018000	0.040000 - 0.042000
0.018000 - 0.020000	0.042000 - 0.044000
0.020000 - 0.022000	0.044000 - 0.046000
0.022000 - 0.024000	0.046000 - 0.048000
	> 0.048000

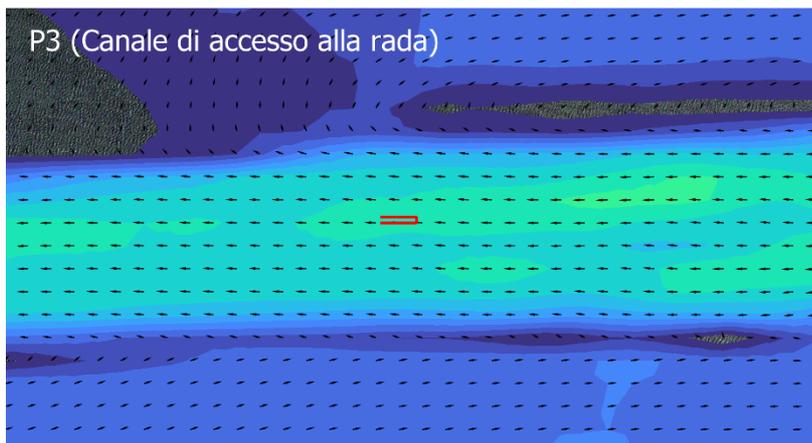
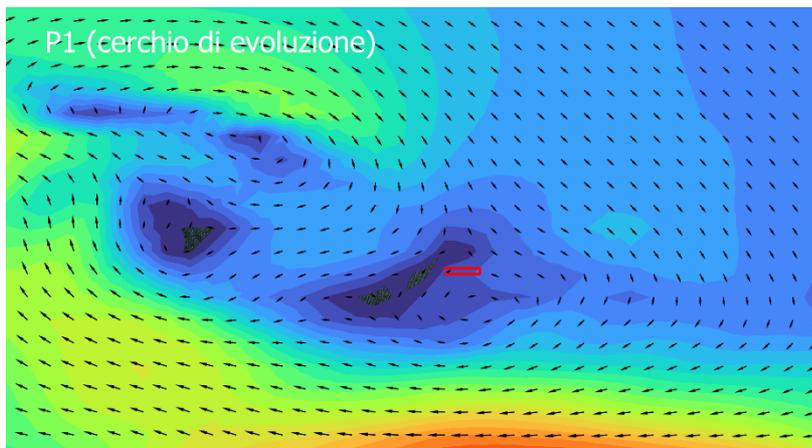
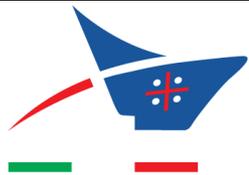


Figura 5-1 – Risultati numerici dell'idrodinamica indotta dal vento. Scenario LE_F.

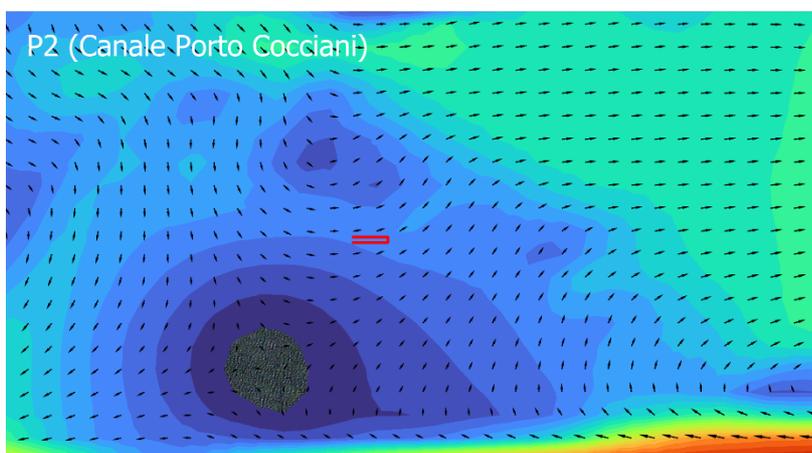




LE-R
(Levante - Raro)



0 100 200 300 m



V = 12 m/s
Dir = 70°N

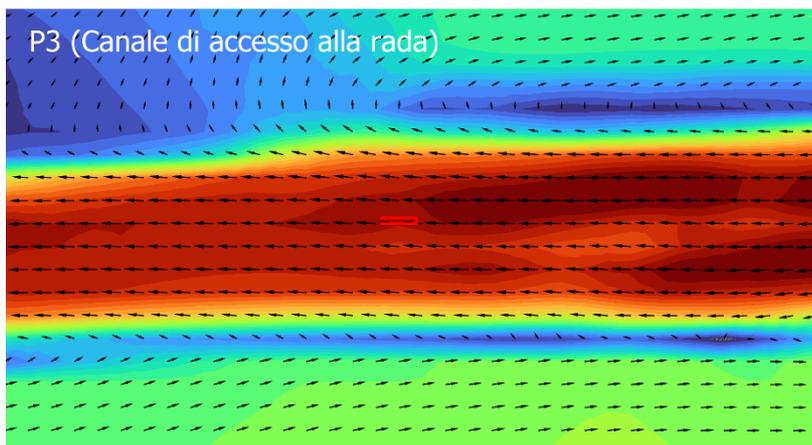
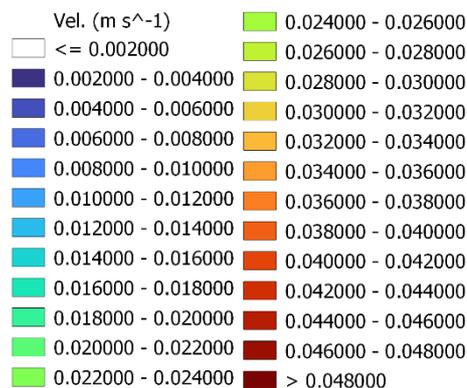
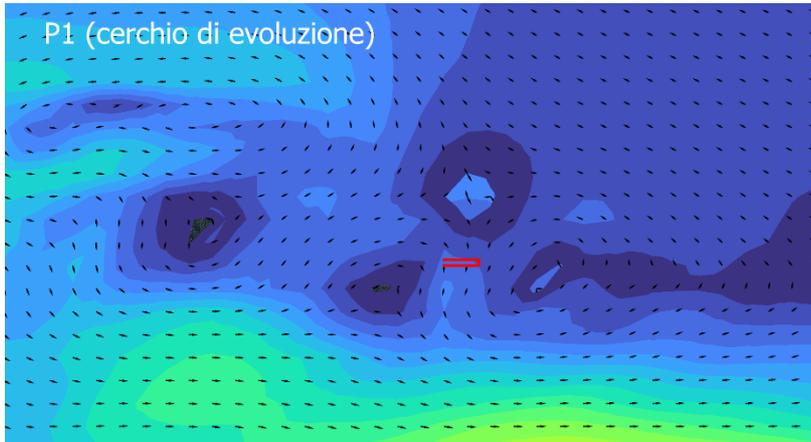
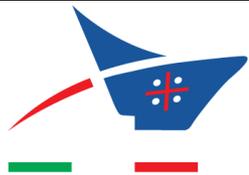


Figura 5-2 – Risultati numerici dell'idrodinamica indotta dal vento. Scenario LE_R.





LI-F
(Libeccio - Frequente)



0 100 200 300 m



V = 10 m/s
Dir = 240°N

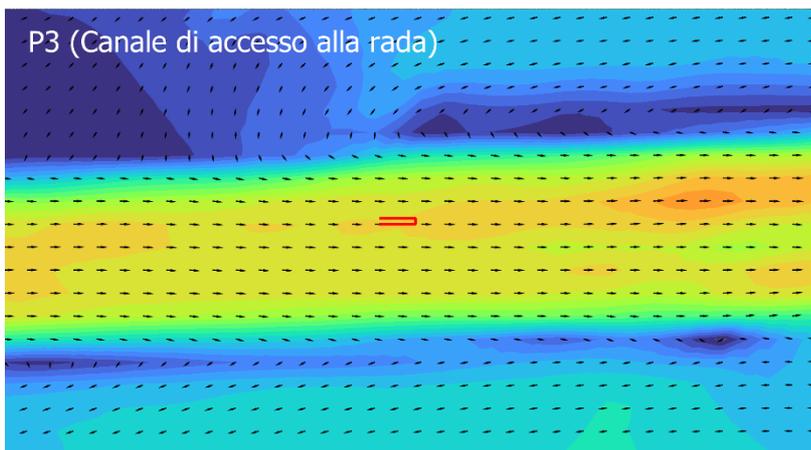
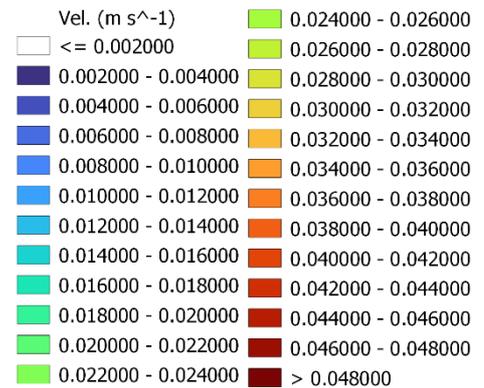
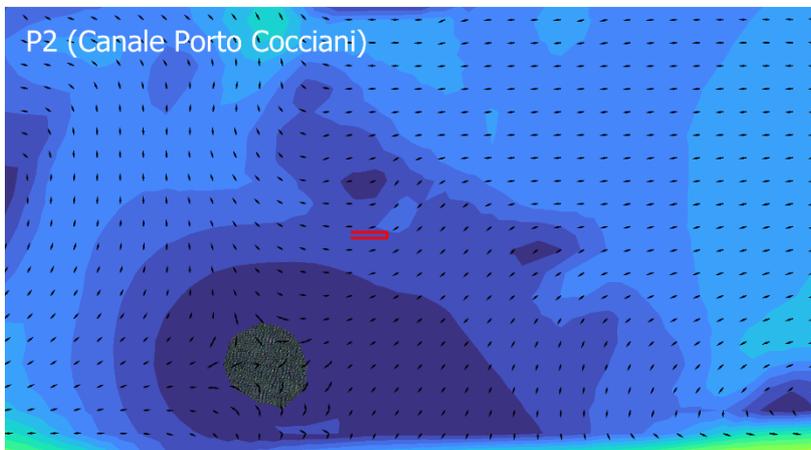
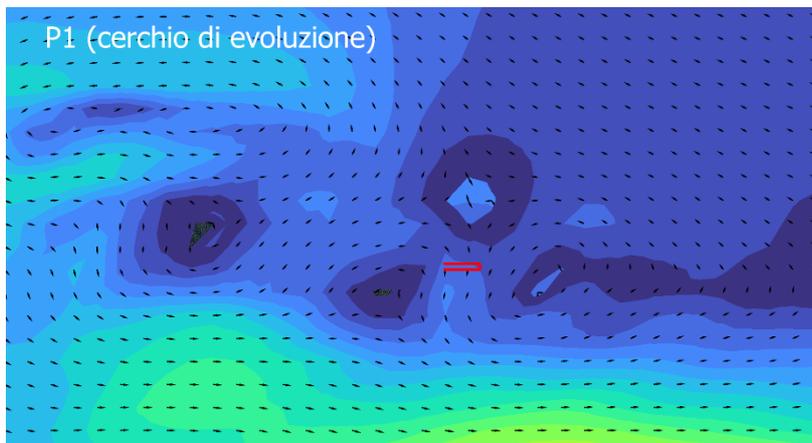
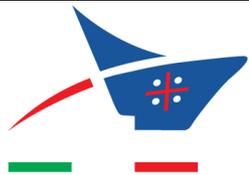
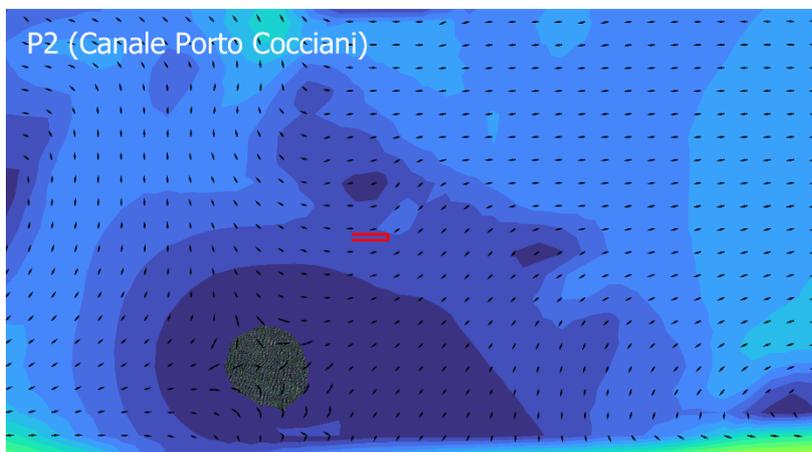


Figura 5-3 – Risultati numerici dell'idrodinamica indotta dal vento. Scenario LI_F.





LI-R
(Libeccio - Raro)



V = 15 m/s
Dir = 240°N

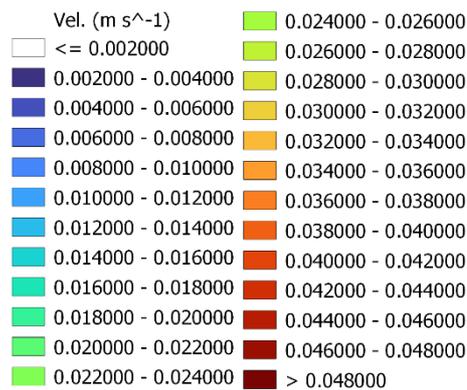
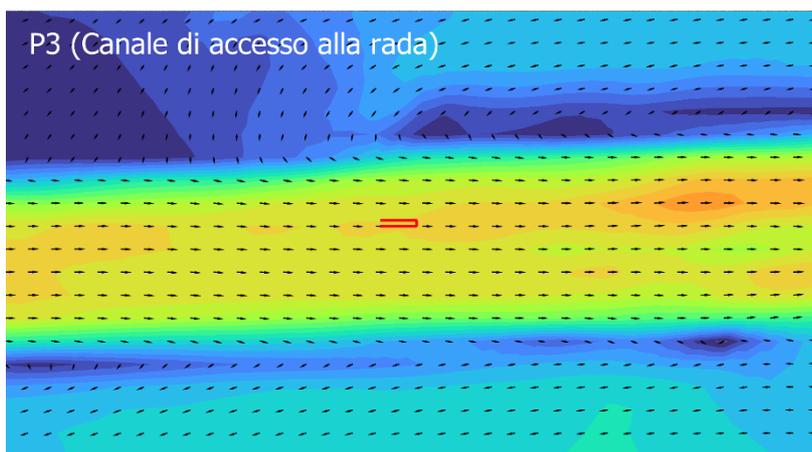


Figura 5-4 – Risultati numerici dell'idrodinamica indotta dal vento. Scenario LI_R.



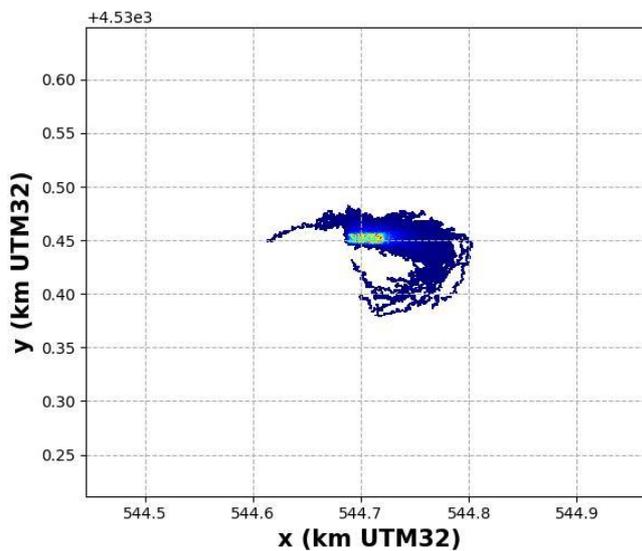
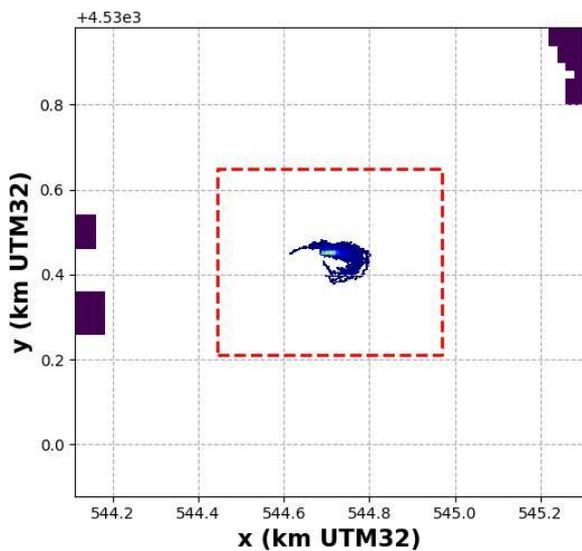
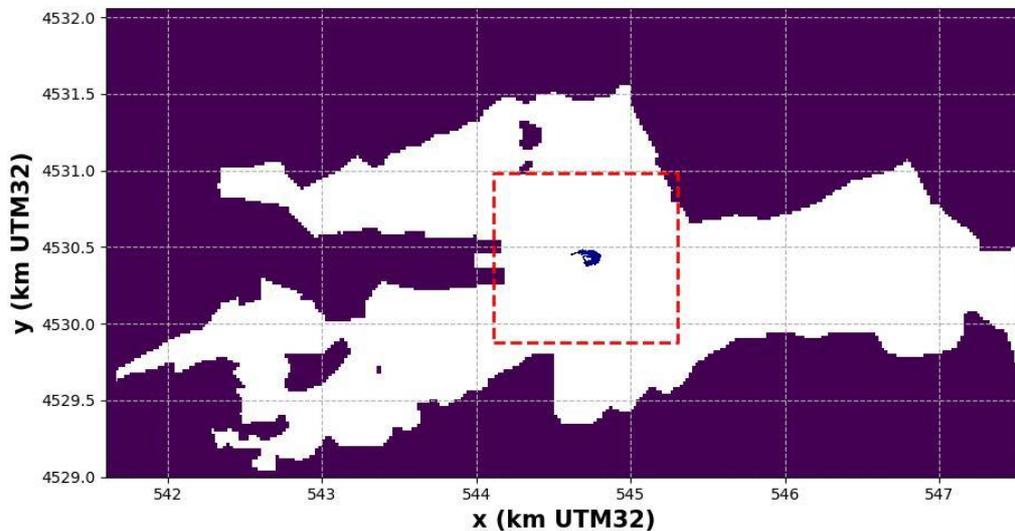
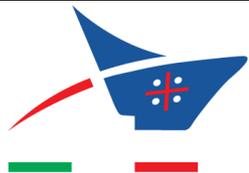


Figura 5-5 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P1_LE_F. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.



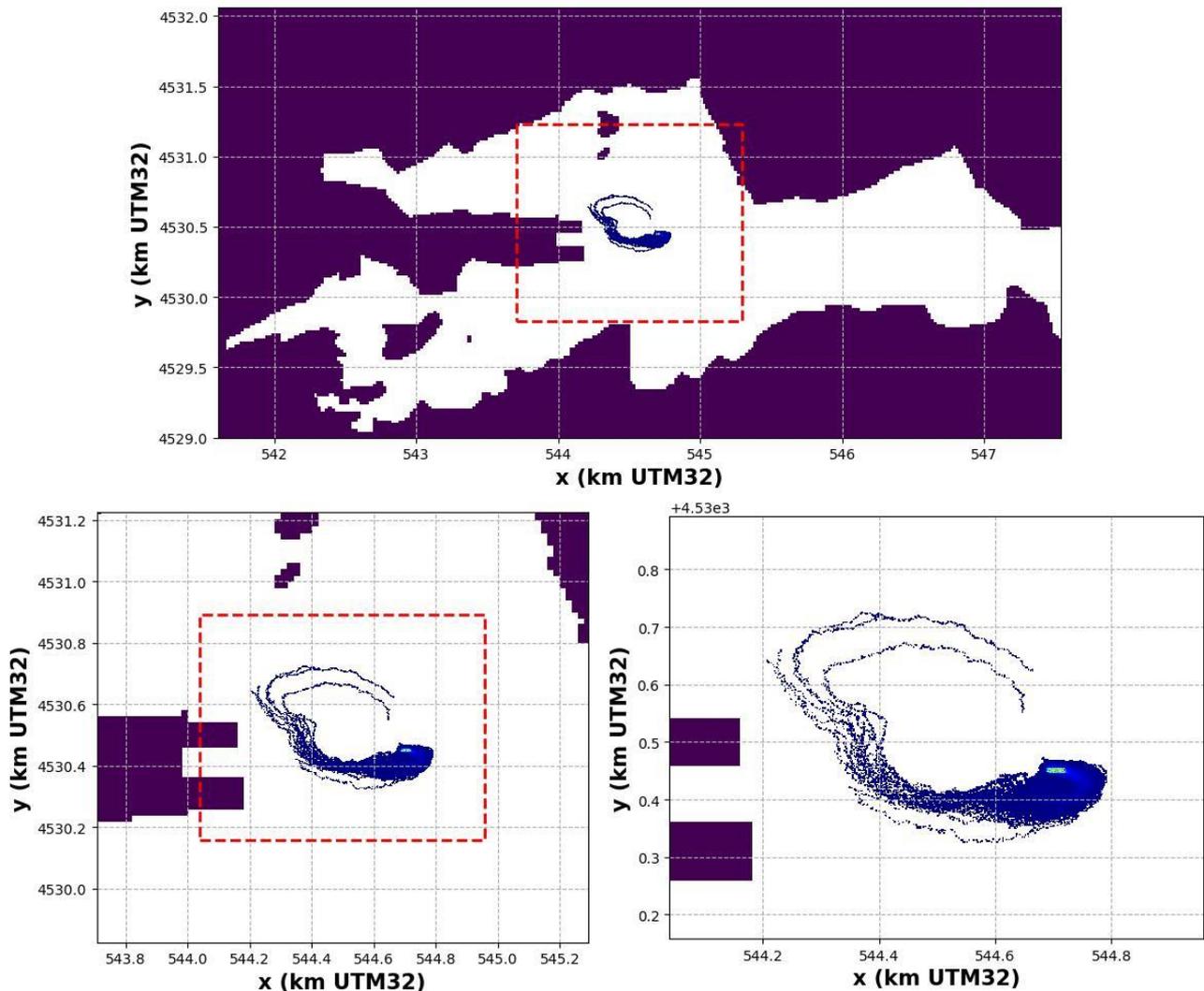
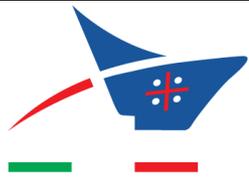


Figura 5-6 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P1_LE_R. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.

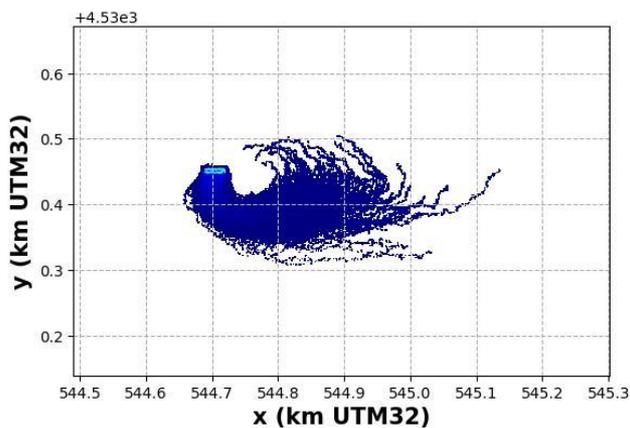
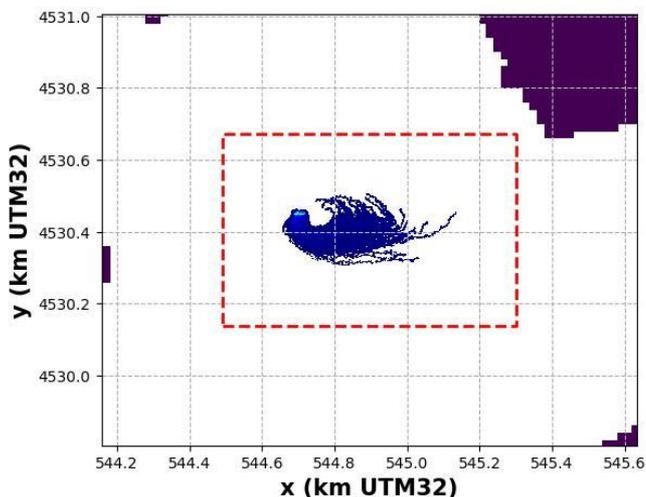
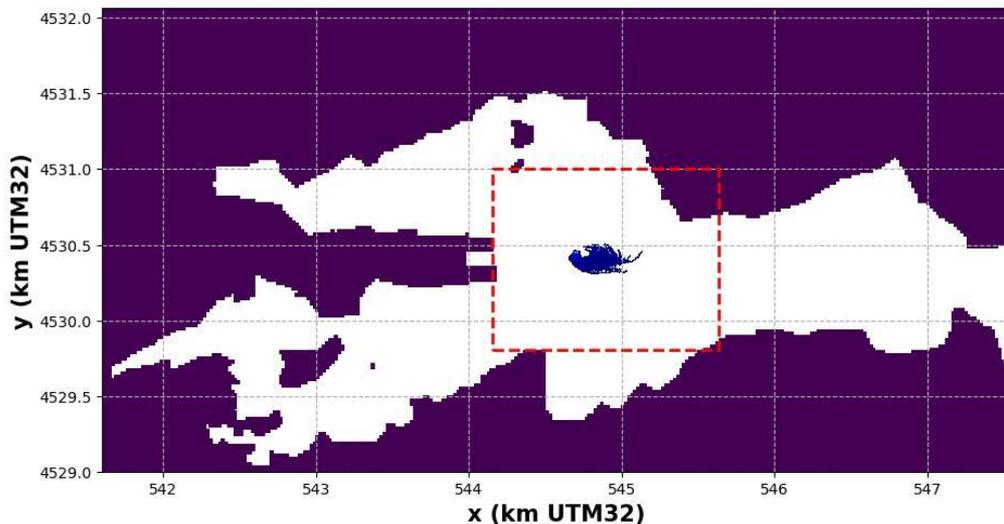
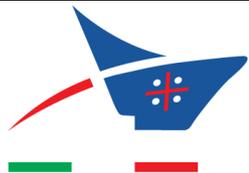


Figura 5-7 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P1_LI_F. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.



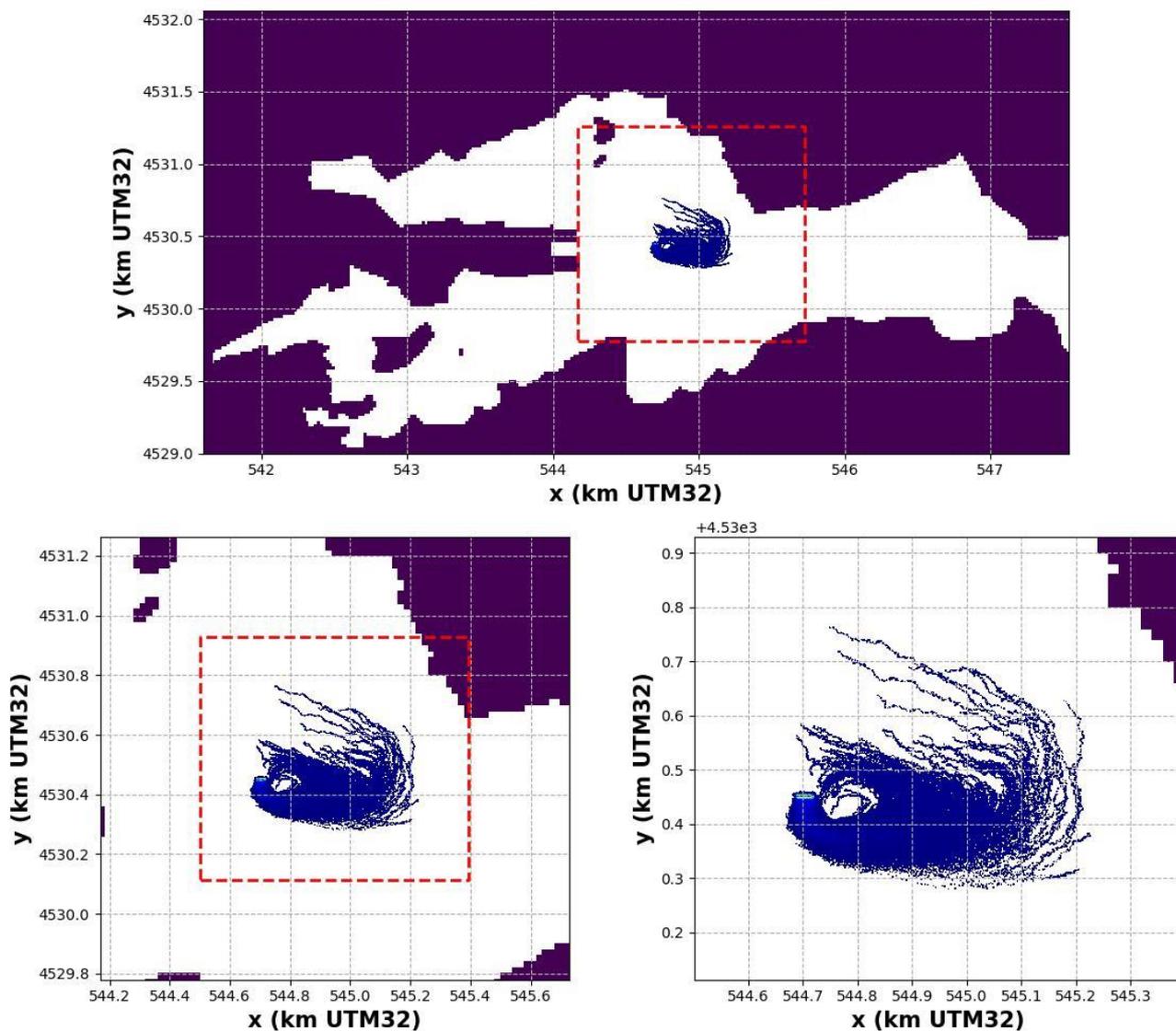
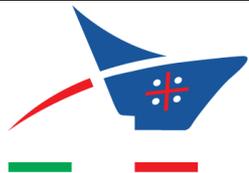


Figura 5-8 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P1_LI_R. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.

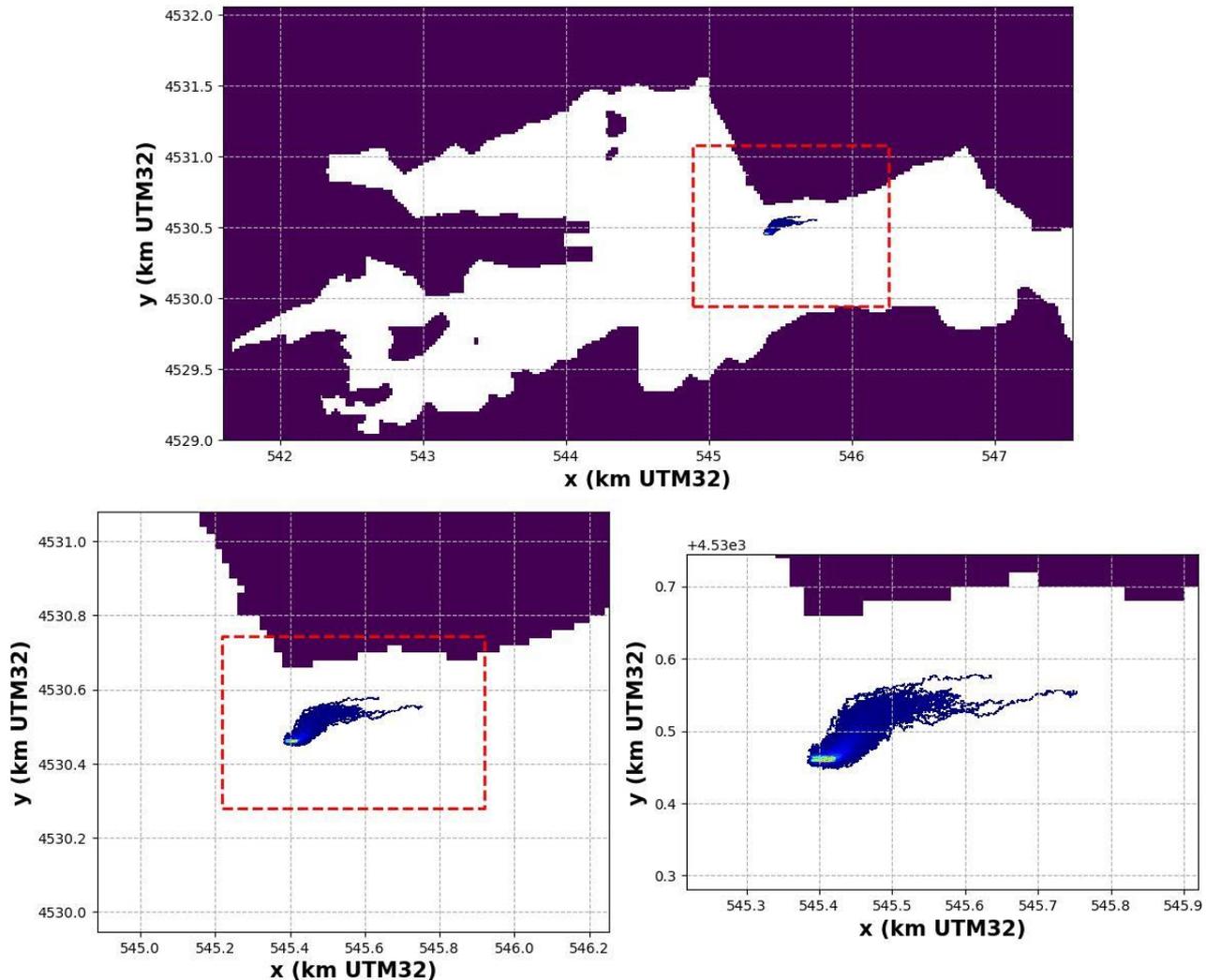
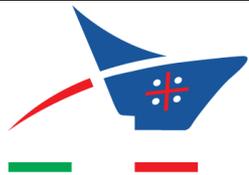


Figura 5-9 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P2_LE_F. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.

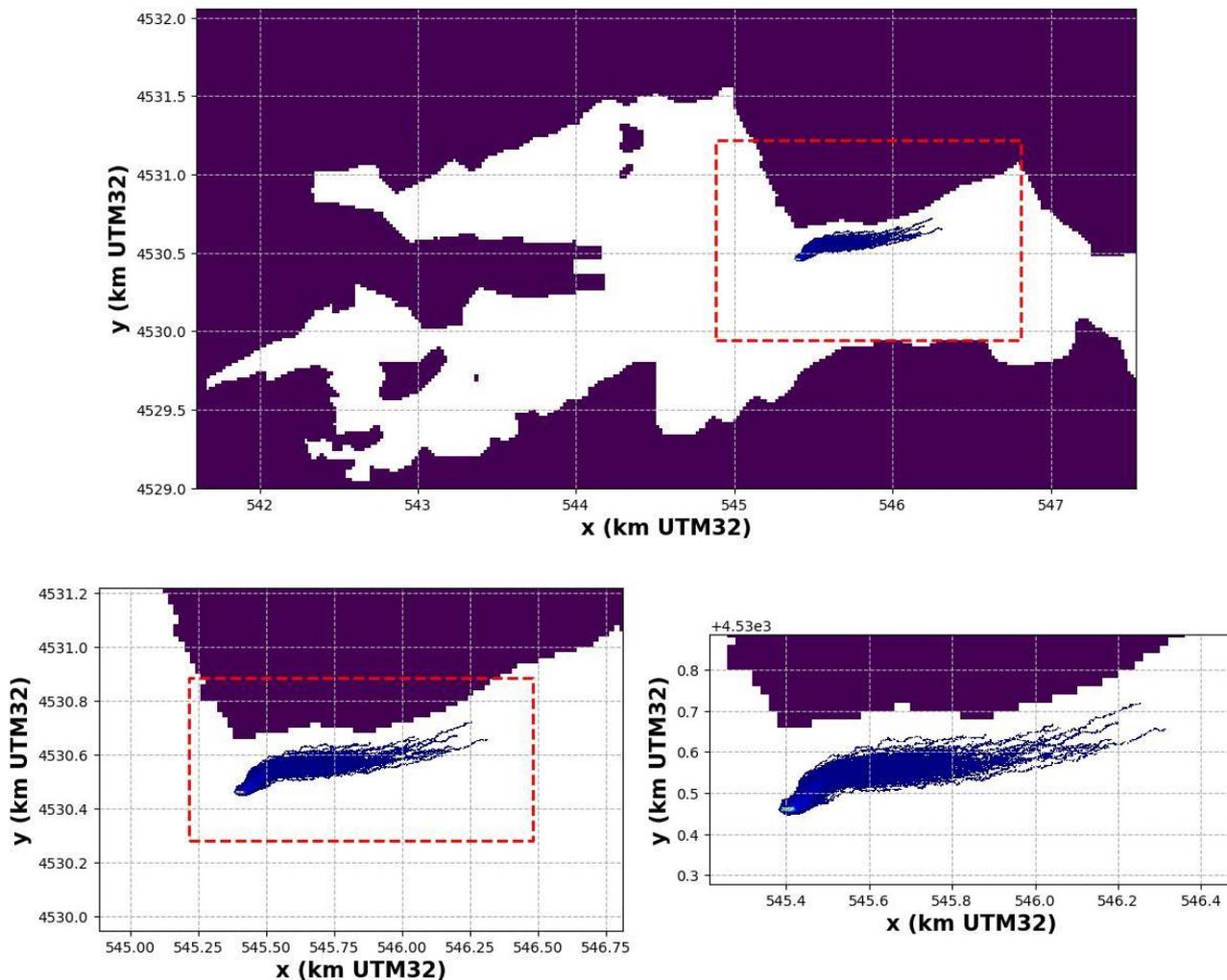
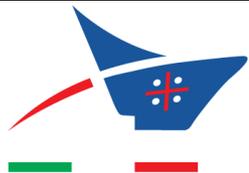


Figura 5-10 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P2_LE_R. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.

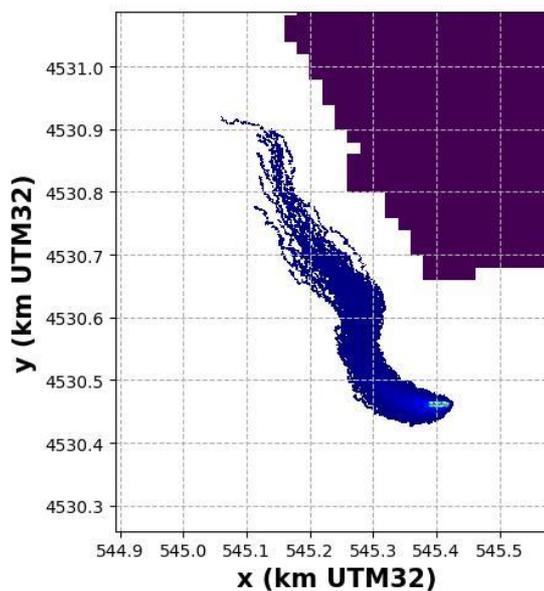
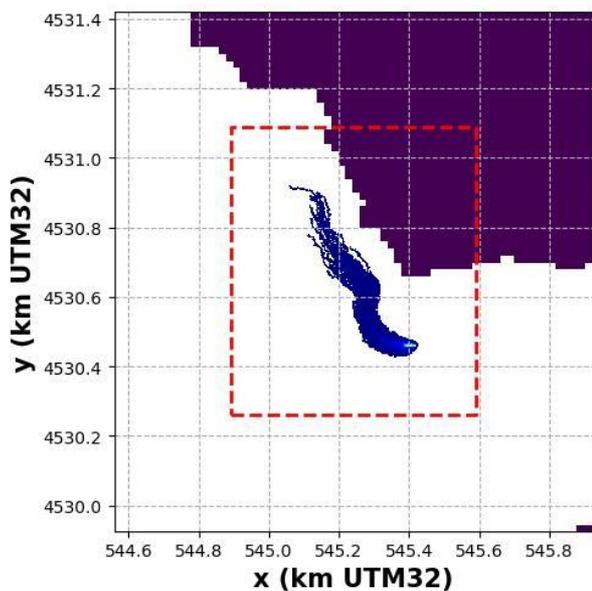
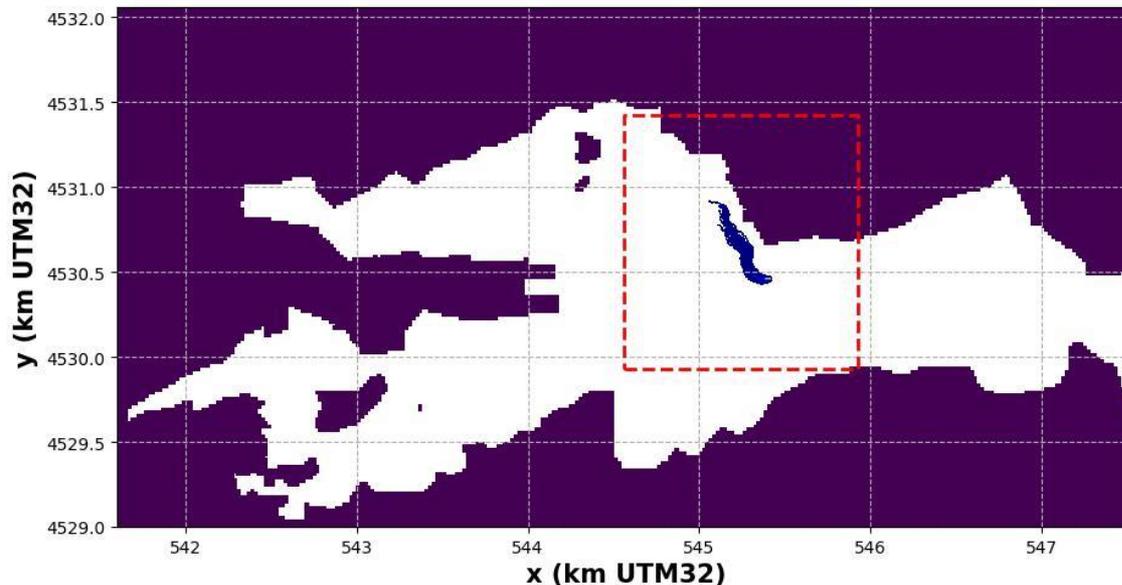
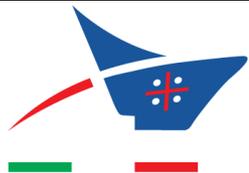


Figura 5-11 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P2_LI_F. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.



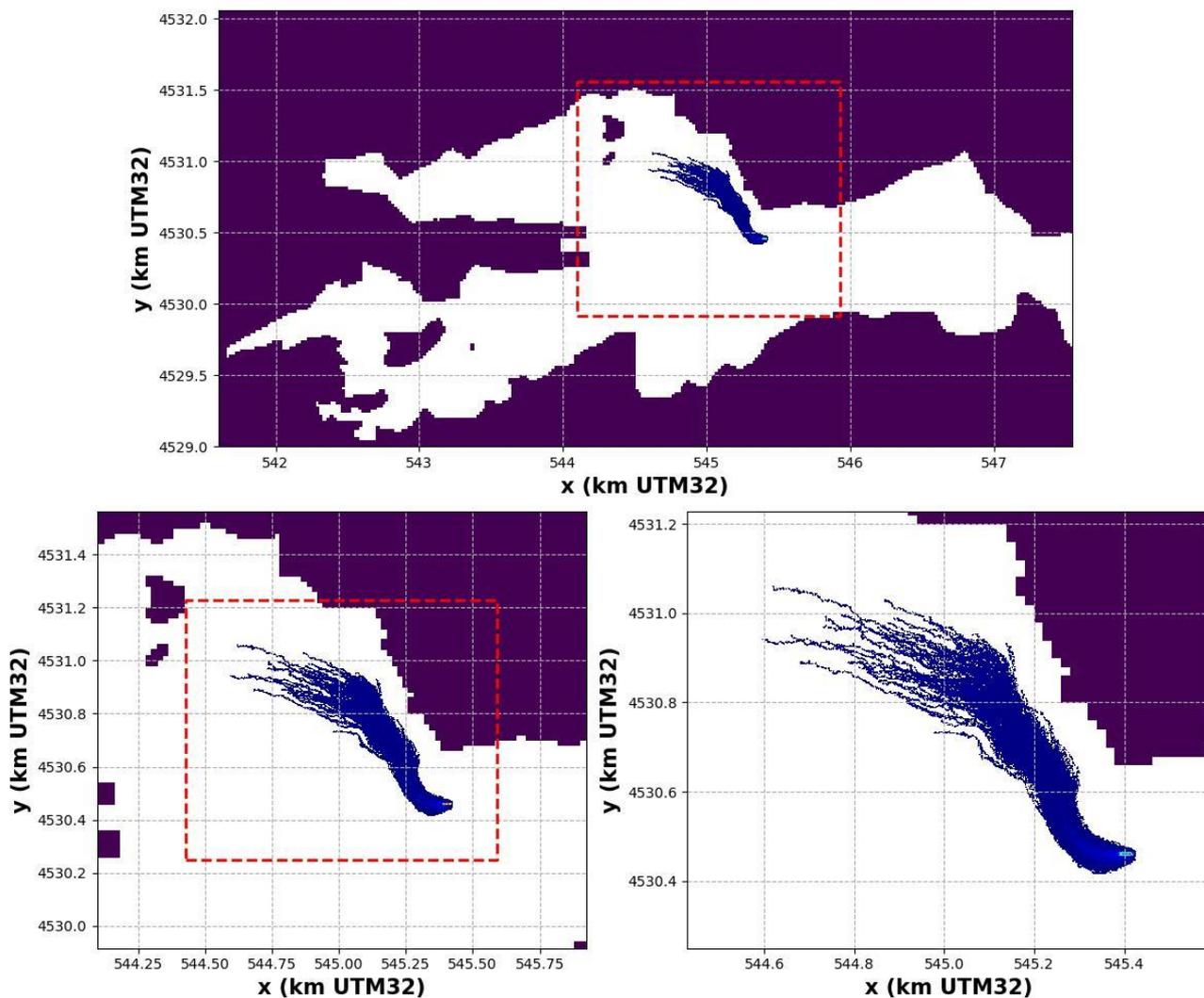
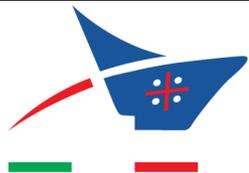


Figura 5-12 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P2_LL_R. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.

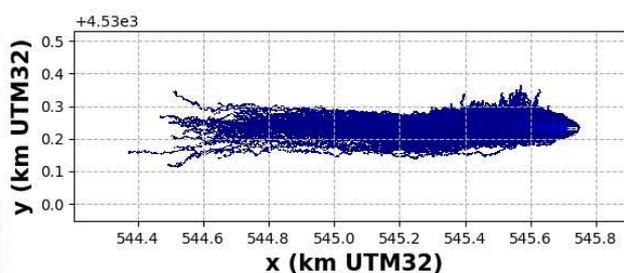
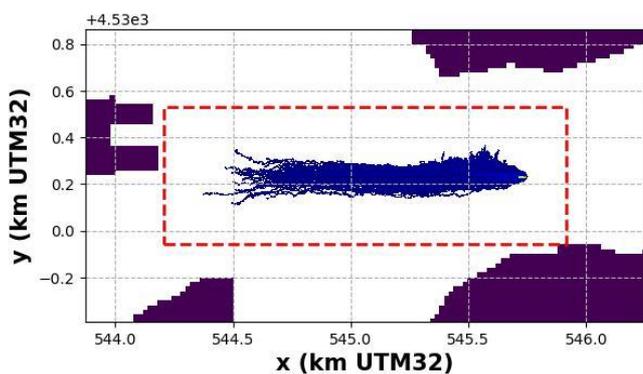
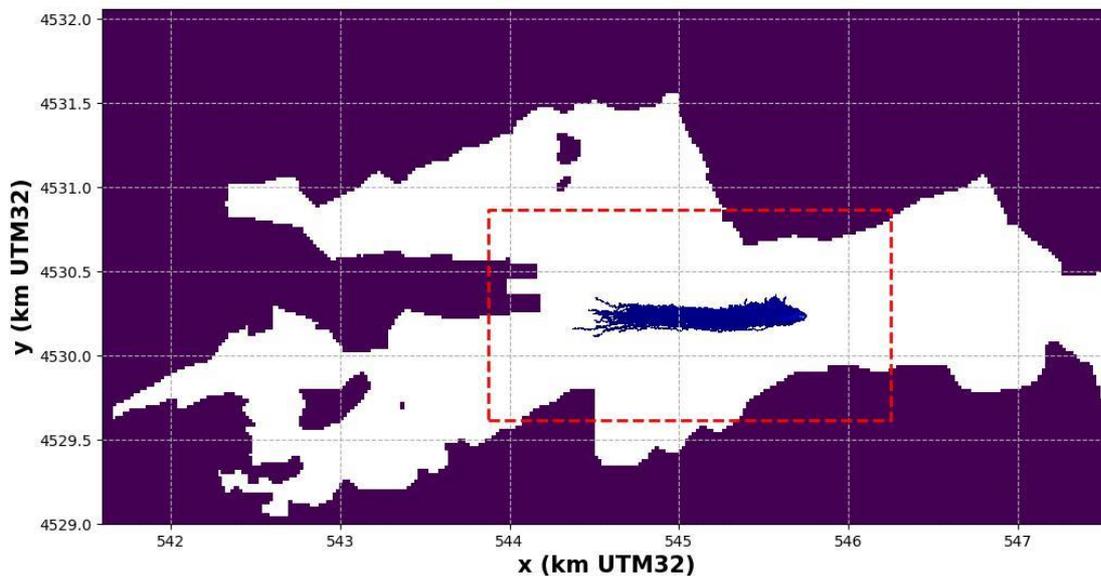
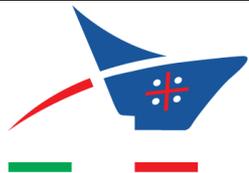


Figura 5-13 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P3_LE_F. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.



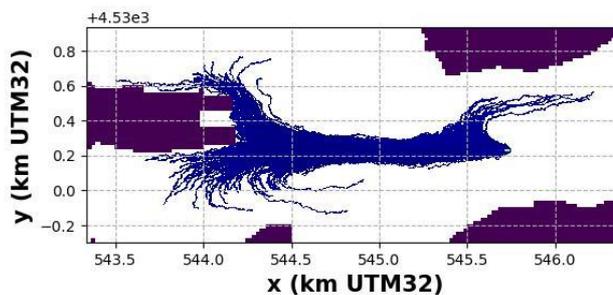
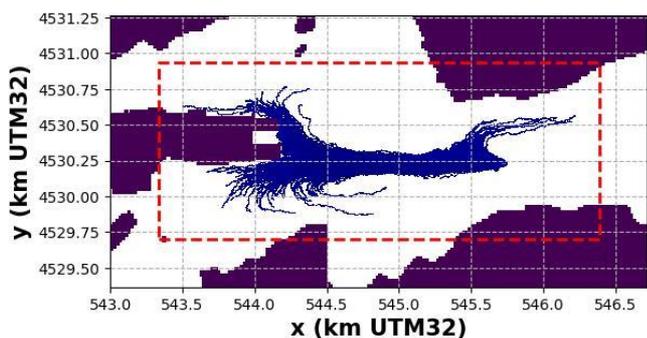
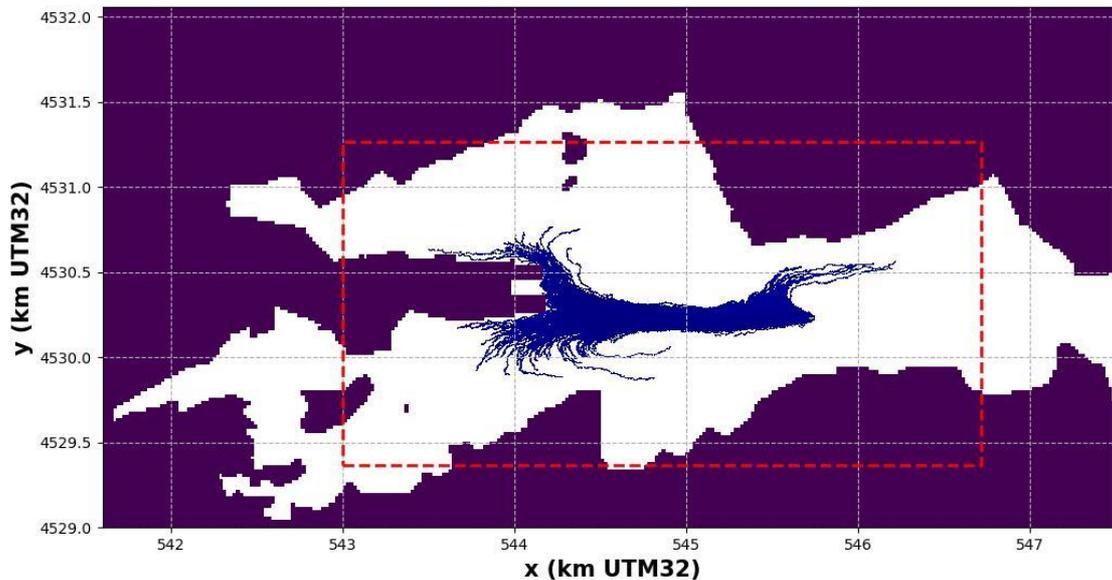
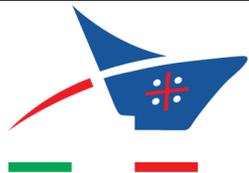


Figura 5-14 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P3_LE_R. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.



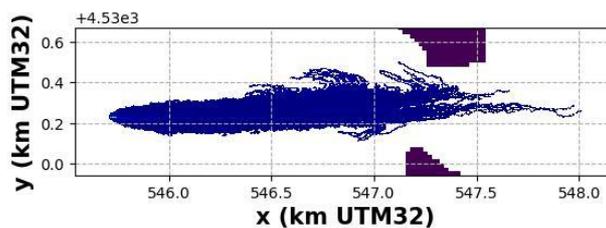
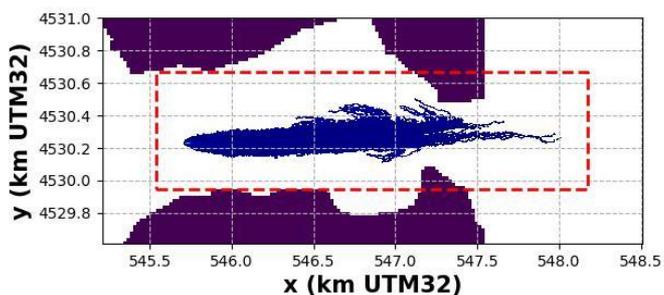
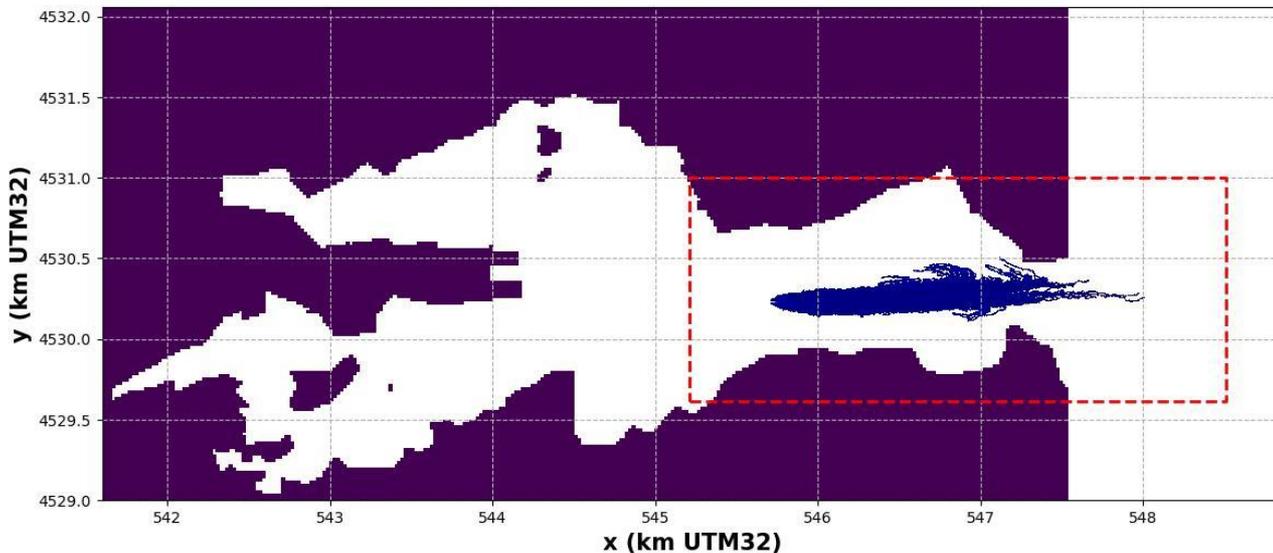
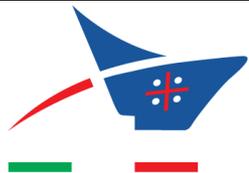


Figura 5-15 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P3_LI_F. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.

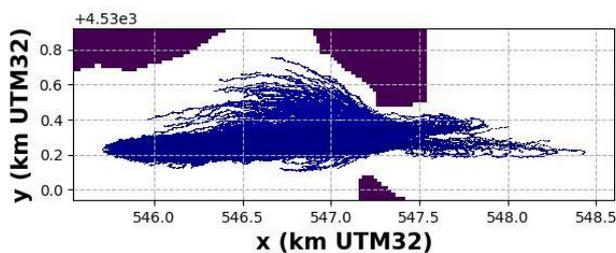
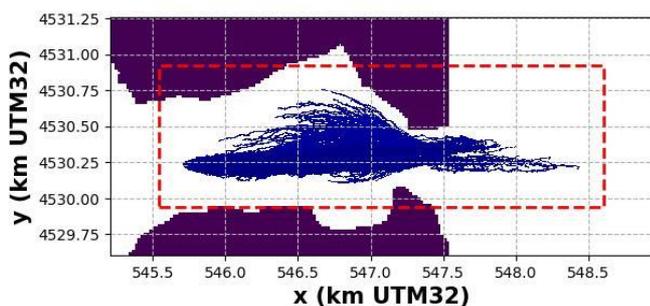
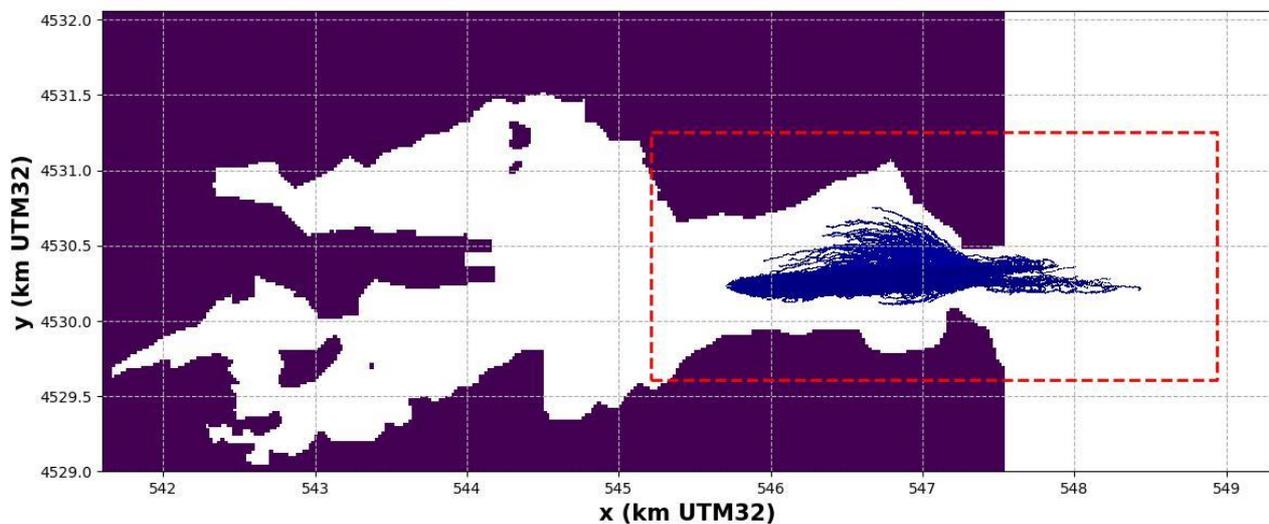
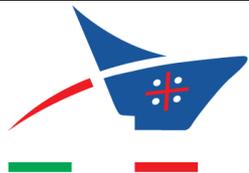


Figura 5-16 – Risultati numerici del processo di diffusione e dispersione. Scenario P3_LL_R. Le mappe indicano il valore della concentrazione normalizzata. I valori caratteristici delle concentrazioni sono riportati in Tabella 5-1.



6. Osservazioni conclusive

Lo studio descritto in questo capitolo ha l'obiettivo di fornire una stima qualitativa e quantitativa delle caratteristiche dei processi di dispersione e diffusione delle nuvole di torbida che possono generarsi a seguito delle attività di dragaggio previste dal progetto in epigrafe. Tale attività, infatti, può indurre la generazione di una nube di torbidità che, in presenza dell'idrodinamica locale, è soggetta a processi di dispersione e diffusione nelle aree limitrofe. L'obiettivo finale dell'analisi è quello di valutare l'entità della concentrazione di sedimenti sospesi.

L'approccio utilizzato, di tipo lagrangiano, permette di riprodurre l'effetto delle modalità operative delle attività di dragaggio ricorrendo a ragionevoli assunzioni sulle modalità operative (compatibili con il livello della progettazione). L'applicazione dell'approccio ha reso possibile la ricostruzione della distribuzione spazio-temporale della concentrazione di solidi sospesi.

La ricostruzione tiene conto delle caratteristiche stocastiche del processo di diffusione, anche lungo la direzione verticale, della nube di torbida, proporzionale alle intensità delle correnti responsabili della dispersione dei sedimenti sospesi. Allo stesso modo, la descrizione del processo di diffusione permette di valutare l'entità della deposizione sul fondo. Si osserva che l'approccio utilizzato, a favore di sicurezza, non mira a riprodurre il fenomeno della flocculazione per cui, all'aumentare della concentrazione, aumenta la velocità di sedimentazione dei flocculi. Viene trascurato l'effetto di risospensione (cioè di generazione della torbida) legato alla presenza delle eliche dei mezzi marittimi.

Nel rispetto delle finalità dello studio, sono stati riprodotti diversi scenari. Sono state prese in considerazione quattro condizioni di vento, volte a rappresentare i campi idrodinamici indotti da venti provenienti dal settore di Libeccio e dal settore di Levanti caratterizzati da intensità che rappresentano condizioni frequenti e condizioni rare. Sono riprodotte tre diverse aree in cui avviene il dragaggio con l'obiettivo di identificare le possibili configurazioni della nube di torbida a seguito delle attività previste.

Le simulazioni idrodinamiche effettuate mostrano, in generale, il verificarsi di correnti di bassa intensità (limitata a qualche centimetro al secondo, fino a valori massimi di circa 5 cm/s), principalmente concentrate nel canale di accesso alla rada.

L'analisi dei risultati ottenuti permette di osservare che le attività di dragaggio inducono concentrazioni di sedimento risospeso che diminuiscono rapidamente all'aumentare della distanza dall'area di movimentazione dei sedimenti. I sedimenti sospesi rimangono sostanzialmente confinati nelle aree prossime all'area di intervento. Le concentrazioni massime, quindi, si verificano in

corrispondenza delle aree di intervento e il processo di diffusione e dispersione induce un'estensione della nube di torbida piuttosto limitata. Le simulazioni mostrano, infatti, che dopo 16 ore dal termine di un turno giornaliero (di durata pari a 8 ore), l'estensione della nube di torbida è limitata a qualche centinaio di metri. In particolare, per le aree di dragaggio relative al cerchio di evoluzione (punto P1 negli scenari di simulazione) e al canale di Porto Cocciani (punto P2 negli scenari di simulazione), l'estensione della nube di torbida può essere stimata approssimativamente nell'ordine dei 500-600 m. Per quanto riguarda il dragaggio del canale di accesso alla rada (punto P3 negli scenari di simulazione) si osserva che l'estensione della nube di torbida è superiore rispetto agli altri scenari. La nube di torbida, soltanto per lo scenario di venti rari, è estesa e raggiunge Isola Bianca (per il vento proveniente dal settore di levante), ovvero si esce dalla rada (per il vento proveniente dal settore di libeccio).

I valori di concentrazione media dipendono dalla modalità operativa. A causa della maggiore produzione giornaliera e del (lieve) incremento della frazione di sedimenti risospesi, la modalità operativa di dragaggio idraulico appare indurre concentrazioni superiori rispetto al dragaggio meccanico.

Per il dragaggio meccanico, le concentrazioni medie

- non superano i 10 mg/l nell'area del cerchio di evoluzione;
- non superano i 5.5 mg/l nell'area del canale di Porto Cocciani;
- non superano i 2.5 mg/l nell'area del canale di accesso alla rada.

Analogamente, per il dragaggio idraulico, a meno del contributo dell'operazione di trasporto, le concentrazioni medie:

- non superano i 40 mg/l nell'area del cerchio di evoluzione (non superano 20 mg/l escludendo lo scenario frequente di vento proveniente dal settore di Libeccio);
- non superano i 33 mg/l nell'area del canale di Porto Cocciani (non superano 23 mg/l escludendo lo scenario frequente di vento proveniente dal settore di Libeccio);
- non superano i 10.5 mg/l nell'area del canale di accesso alla rada.