

**STUDIO DEL TRASPORTO SOLIDO INDOTTO A SEGUITO DI
DRAGAGGIO DEL FONDALE MARINO IN PROSSIMITÀ DEL
TERMINAL PORTUALE DI RAVENNA
REL-AMB-E-09096**

Prof. Ing. Giovanni Besio
Dr. Ing. Francesco De Leo

Genova, 22 settembre 2023

SOMMARIO

INDICE DELLE TABELLE.....	3
1. PREMESSA	4
2. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO	5
3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE NEL SITO DI IMMERSIONE A MARE.....	13
4. CALCOLO DEL TASSO DI INTERRAMENTO DEL CANALE DI ACCESSO ALLA PIATTAFORMA.....	15
5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI SULLA DISPERSIONE DI MATERIALE IMMERSO	18

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Localizzazione del punto hindcast DICCA utilizzato per la definizione delle forzanti ambientali in prossimità del porto di Ravenna.	7
Figura 2. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 04.....	9
Figura 3. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 43.	9
Figura 4. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 82.....	10
Figura 5. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 93.	10
Figura 6. Corrente regionale (a scala di bacino) ai bordi del dominio di calcolo, scenario 4. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in Figura 10).	11
Figura 7. Come in Figura 6 per lo scenario 43.	11
Figura 8. Come in Figura 6 per lo scenario 82.....	12
Figura 9. Come in Figura 6 per lo scenario 93.....	12
Figura 10. Analisi della circolazione litoranea a larga scala rispetto alla corrente critica calcolata tramite Soulsby (1997).	16
Figura 11. Area di deponia RA_3.	18
Figura 12. Planimetria della dispersione della plume di torbida al fondo dopo 1 ora dal rilascio (pannello di sx) e 12 ore dal rilascio (pannello di dx). SR relativo allo spostamento della plume. Scenario meteo-marino 4.....	20
Figura 13. Come in Figura 12 per lo scenario 43.	21
Figura 14. Come in Figura 12 per lo scenario 82.	21
Figura 15. Come in Figura 12 per lo scenario 93.	22
Figura 16. Schema di deposito per rilasci successivi su una sezione trasversale al fondo.	23



INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).	6
Tabella 2. Settori direzionali degli scenari utilizzati – nodo 000185.	8
Tabella 3. Parametri utilizzati per il modello numerico.	14
Tabella 4. Coordinate dei vertici dell'area RA 3 (SR: WGS84)	19





1. PREMESSA

Nello sviluppo dell'ingegneria esecutiva del Progetto al Progetto "FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti" sono state eseguite alcune ottimizzazioni progettuali riguardanti principalmente la sezione offshore dell'opera autorizzata con Decreto n. 3 del 7 novembre 2022 ai sensi dell'art. 5 del D.L. 17 maggio 2022 n. 50 da parte del Commissario straordinario di Governo della Regione Emilia-Romagna (Autorizzazione Unica).

In particolare, sono state eseguite le seguenti ottimizzazioni che hanno richiesto l'aggiornamento dello studio modellistico del trasporto solido indotto, quali: (i) una leggera traslazione verso nord (circa 50 m) del canale di accesso al Terminale a seguito del nuovo posizionamento planimetrico della diga frangi flutti e (ii) l'individuazione della nuova area di immersione dei volumi aggiuntivi di materiale dragato (area RA_3).

E' stata aggiornata la verifica del tasso di interrimento del canale (Rif. Capitolo 4) ed è stata calcolata la dispersione del materiale immersione per il nuovo sito di deposito RA_3 per le quantità aggiuntive di dragaggio.

2. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO

Al fine di caratterizzare i meccanismi di trasporto solido del materiale solido dragato, è necessario dapprima caratterizzare le correnti marine indotte dalle forzanti ambientali (onde, maree etc.).

In quest'ottica, nelle ultime decadi, soprattutto grazie alla crescita esponenziale della potenza di calcolo dei moderni computer, ha assunto un ruolo centrale l'utilizzo di programmi di calcolo in grado di realizzare simulazioni numeriche dell'idrodinamica marina e costiera e dei processi di dispersione, sia da un punto di vista euleriano che da un punto di vista lagrangiano.

Lo studio di tali fenomeni generalmente si basa su un'enorme quantità di informazioni che richiedono elevati tempi di computazione e grandi potenze di calcolo non sempre disponibili: questo, ad esempio, può succedere quando il dataset in esame proviene da un servizio di re-analisi climatologica, caratterizzato da alta risoluzione temporale e spaziale. In questo caso, può essere conveniente ridurre il numero di condizioni ambientali da tenere in considerazione per le simulazioni numeriche, in modo da individuare e conservare i modi più significativi della variabilità del fenomeno.

Risolvere un numero limitato di condizioni ambientali, altresì dette "scenari", è vantaggioso perché non solo permette di selezionare le condizioni più importanti per il processo investigato, bensì riduce significativamente il carico computazionale necessario per risolvere l'intera catena modellistica. A tale fine, è possibile impiegare delle tecniche di "*Data mining*", ovvero di analisi massiva dei dati a disposizione, tramite algoritmi di clusterizzazione ("*clustering*"); tale approccio si rivela particolarmente efficace poiché permette di raggruppare un insieme di dati in classi di oggetti (cluster) sulla base della loro similarità/dissimilarità. Un cluster rappresenta un raggruppamento di elementi che sono simili tra loro e sono dissimili dagli elementi di un altro cluster. Il risultato che si ottiene è un sottoinsieme di cluster rappresentati da elementi in grado di riassumere il dataset iniziale (gli scenari di cui sopra), mantenendo le sue proprietà principali.

Nel presente studio si adotta una metodologia che permette di caratterizzare il clima meteo-marino considerando la velocità del vento, la forzante di marea, le correnti litoranee e le condizioni del moto ondoso. Le variabili meteo-marine impiegate nel presente studio sono state elaborate dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale dell'Università di Genova (DICCA; www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html). Tramite una re-analisi delle condizioni atmosferiche, il DICCA ha ricostruito un database, detto *hindcast*, contenente dati orari di onda, vento e campo barico definiti su una griglia con risoluzione approssimativamente di 10 km lon/lat, estesa a tutto il bacino del Mar

Mediterraneo¹. L'implementazione dell'*hindcast* è avvenuta in seguito alla validazione e alla ottimizzazione della catena di modelli numerici impiegata (WRF per la parte meteo e WaveWatchIII per la parte onde) e, ad oggi, questi dati sono stati utilizzati in numerose ricerche e applicazioni. Il nodo utilizzato per la definizione delle variabili meteo-marine al largo di Ravenna è lo 000185, mostrato in Figura 1 (le coordinate sono riportate nella tabella sottostante).

Tabella 1. Coordinate del nodo *hindcast* utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).

Nodo	Lon	Lat
000185	12.436	44.490

Per lo sviluppo degli algoritmi di identificazione di scenari climatici caratteristici sono state considerate le serie temporali dal 1979 al 2020, su base oraria, di altezza d'onda significativa (H_s), di periodo e direzione di picco (T_p e θ_p , rispettivamente) delle componenti di velocità longitudinale/latitudinale del vento (w_x/w_y) e della pressione media sul livello del mare (mslp), e sono state selezionate serie temporali di una settimana tramite il Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA)². In prima analisi, sono stati estratti 100 scenari climatici, in modo tale da coprire l'intera varianza dei dati in input. A partire da questi, la selezione è stata rifinita per considerare solamente gli scenari meteo-marini significativi ai fini della modellazione numerica dei fenomeni di dispersione.

In seguito, sono state ricavate le forzanti di marea (di seguito $\Delta\eta$) nel nodo selezionato grazie al Software di Previsione di Marea (TPXO.3) fornito dall'Università dello Stato dell'Oregon³. L'escursione di marea è stata estratta nello stesso intervallo di tempo e con la stessa frequenza dei dati meteomarini di *hindcast*.

Infine, sono stati estratti i dati di corrente a scala di bacino dal repository del Copernicus Marine Service (di seguito abbreviato in CMS; <https://marine.copernicus.eu/it>). Anche in questo caso, le serie temporali sono state selezionate in concomitanza degli scenari meteomarini precedentemente identificati.

¹ Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. *Journal of Coastal Research*, (65 (10065)), 1551-1556.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, 90, 82-94.

² Camus, P., Mendez, F. J., Medina, R., & Cofiño, A. S. (2011). Analysis of clustering and selection algorithms for the study of multivariate wave climate. *Coastal Engineering*, 58(6), 453-462.

³ Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.

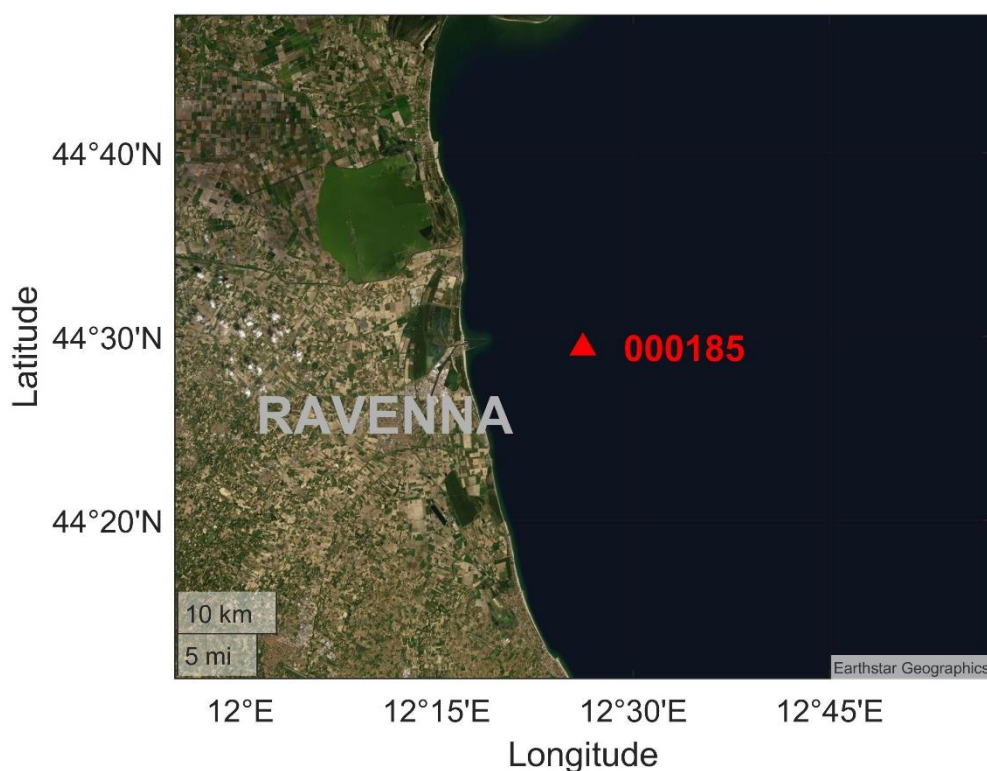


Figura 1. Localizzazione del punto hindcast DICCA utilizzato per la definizione delle forzanti ambientali in prossimità del porto di Ravenna.

L'obiettivo della selezione di diversi scenari per la realizzazione del presente studio ha lo scopo di estrarre un gruppo di diverse serie temporali diverse tra loro, al fine di caratterizzare in modo esaustivo la variabilità climatica nei paraggi di Ravenna. Sono stati assunti a riferimento scenari di durata pari ad una settimana: tale finestra di tempo risulta essere adeguata al tipo di processo che si vuole studiare, ovvero la descrizione della dispersione di inquinanti/sedimenti/particelle in acque costiere, poiché i processi di dispersione degli scarichi delle FSRU, soprattutto per quanto riguarda l'evoluzione della temperatura e della concentrazione di cloro, possono avere un tempo scala di qualche giorno.

I 4 scenari selezionati sono lo 04, 43, 82, 93 (numerazione derivante dall'analisi cluster); tali scenari differiscono per le condizioni di intensità e direzione di provenienza di vento e onde, così come mostrato nelle figure successive. Una sintesi delle forzanti ambientali associate a ciascun cluster è di seguito riportata (la velocità e la direzione del vento, espressa secondo la convenzione nautica, sono definite come U_w e θ_w).

Lo **scenario 04** (Figura 2) descrive un evento meteo-marino di intensità medio-alta, caratterizzato da due picchi all'inizio e alla fine della mareggiata in riferimento a vento ed onde, le cui direzioni sono stabilmente associate ai settori di Grecale e Levante.

Lo **scenario 43** (Figura 3) mostra uno stato di bonaccia, associato a stati di mare e vento di scarsa intensità, e con direzioni di propagazione variabili in tutto lo spazio trigonometrico (i.e., $0-2\pi$). Tale scenario rappresenta uno stato critico, poiché non favorisce la dispersione ed il rimescolamento dei reflui.

Lo **scenario 82** (Figura 4) è associato ad una mareggiata di intensità medio/alta, il cui picco è centrato rispetto alla settimana considerata. Le direzioni delle onde sono tipiche del settore di Scirocco, mentre i venti spirano in prevalenza da Nord, sebbene i dati presentino una marcata variabilità.

Lo **scenario 93** (Figura 5) si presenta con caratteristiche direzionali simili a quelle dello scenario 82, con intensità di vento e onda tuttavia inferiori a quest'ultimo e caratterizzate da profili più irregolari.

In Tabella 2 si mostra una sintesi delle caratteristiche di onda e vento associate agli scenari selezionati; le immagini da Figura 6 a Figura 9 mostra le correnti oceaniche estratte ai bordi del dominio computazionale in corrispondenza di ciascuno scenario.

Tabella 2. Settori direzionali degli scenari utilizzati – nodo 000185.

N° Scenario	Direzione del moto ondoso	Direzione del vento
4	Levante	Grecale/Levante
43	Variabile su tutta la rosa	Variabile su tutta la rosa
82	Levante/Scirocco	Variabile (prevalente da Nord)
93	Levante	Variabile (prevalente da Nord)



SCENARIO 4

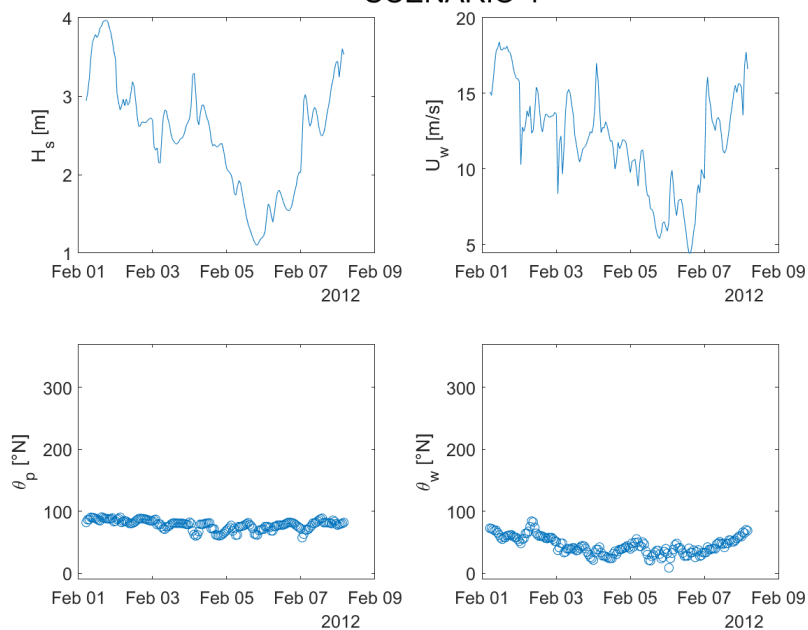


Figura 2. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 04.

SCENARIO 43

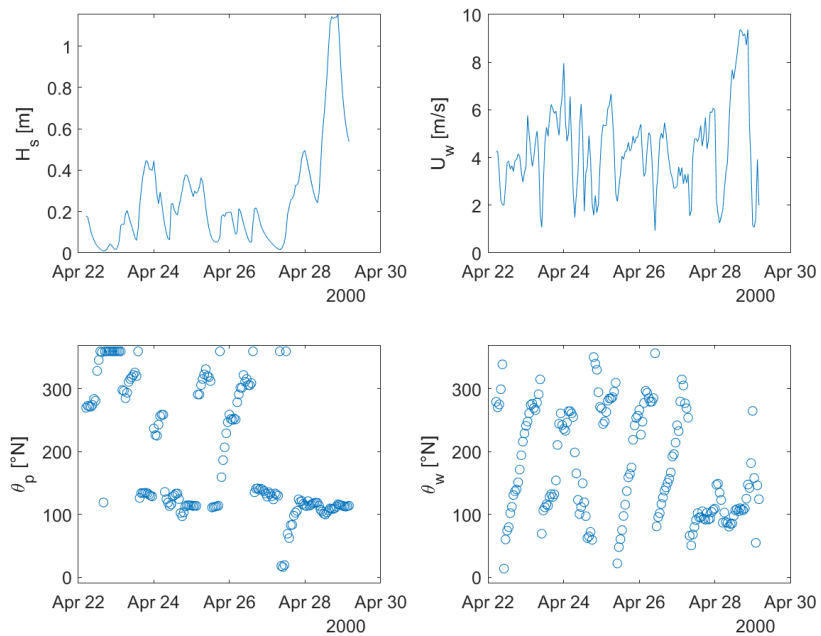


Figura 3. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 43.



SCENARIO 82

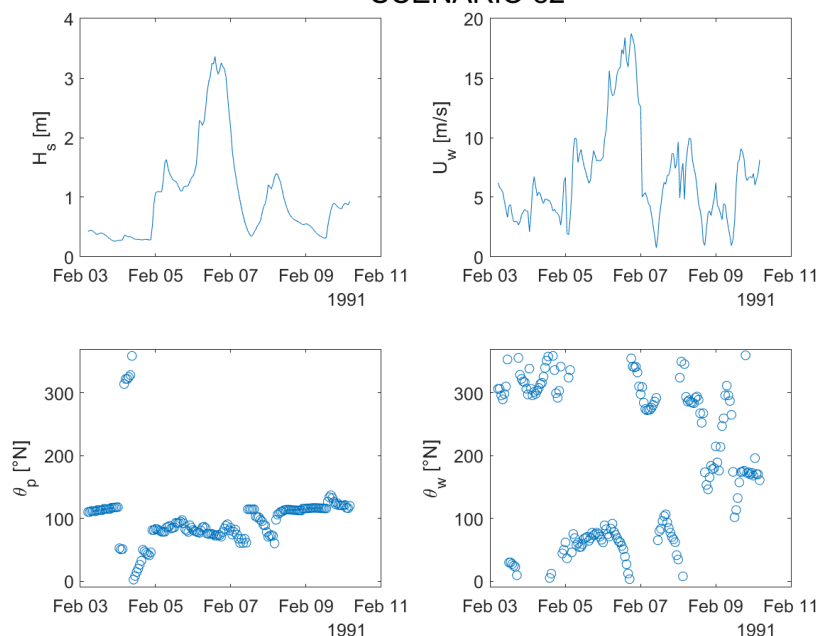


Figura 4. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 82.

SCENARIO 93

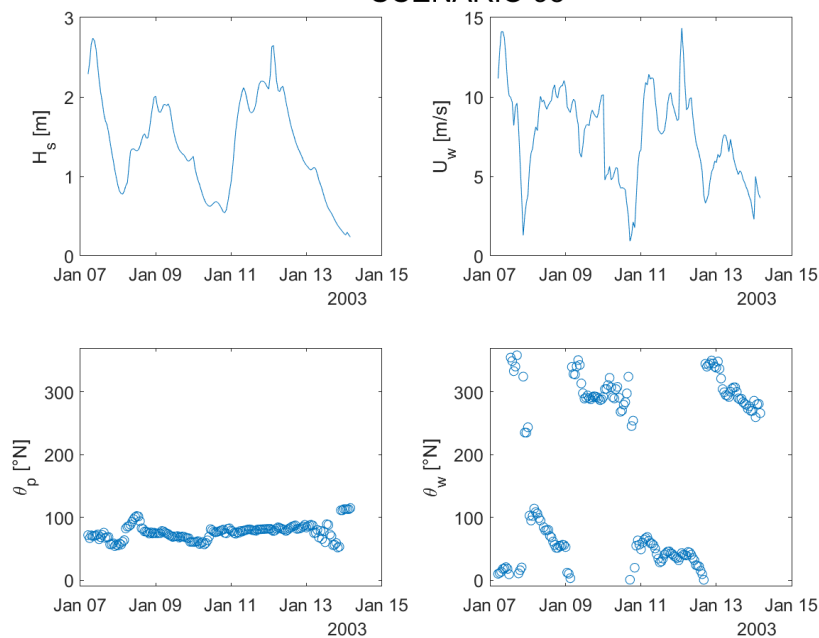


Figura 5. Forzanti meteo-marine associate allo scenario 93.

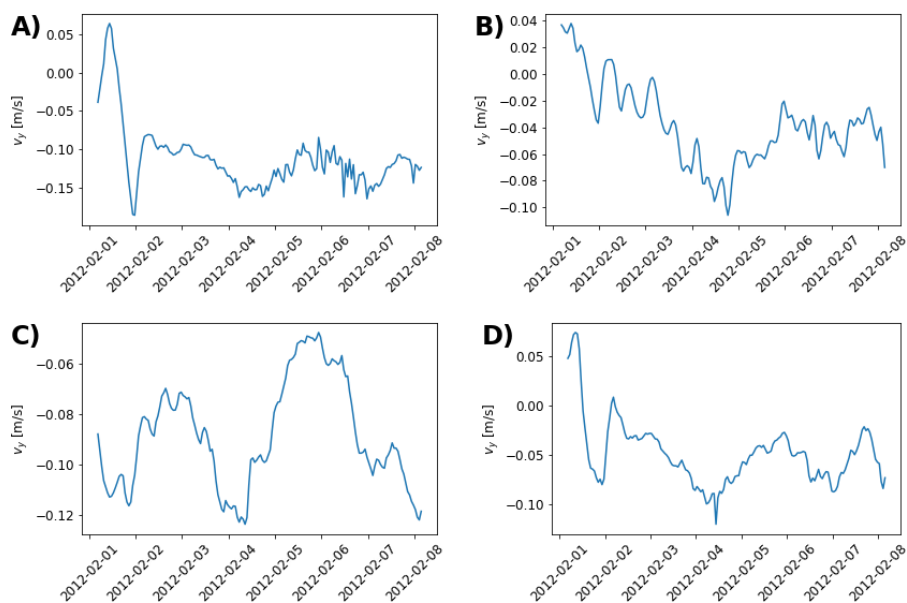


Figura 6. Corrente regionale (a scala di bacino) ai bordi del dominio di calcolo, scenario 4. Pannello A: angolo no. 1; pannello B): angolo no. 2; pannello C): angolo no. 3; pannello D): angolo no. 4 (la numerazione degli angoli è visibile in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**).

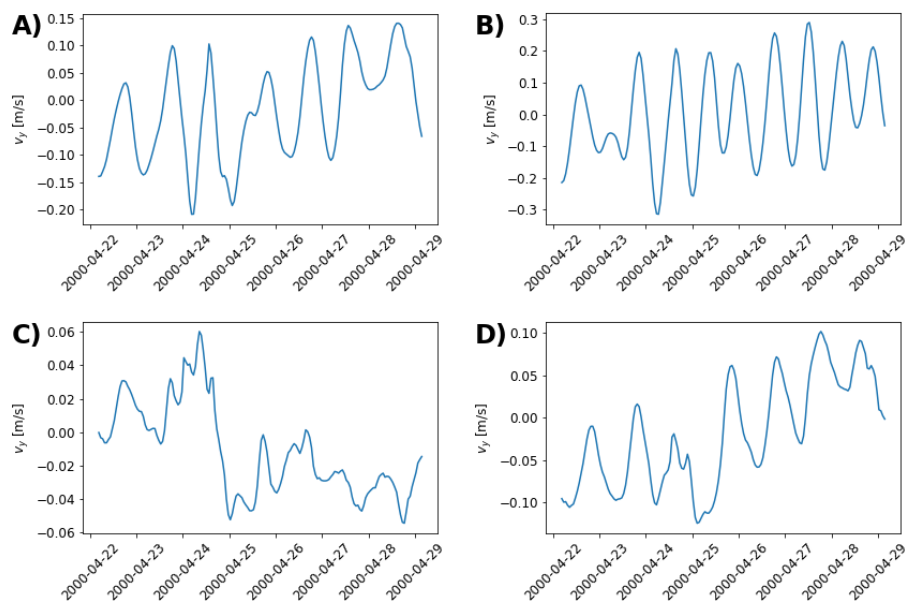


Figura 7. Come in Figura 6 per lo scenario 43.

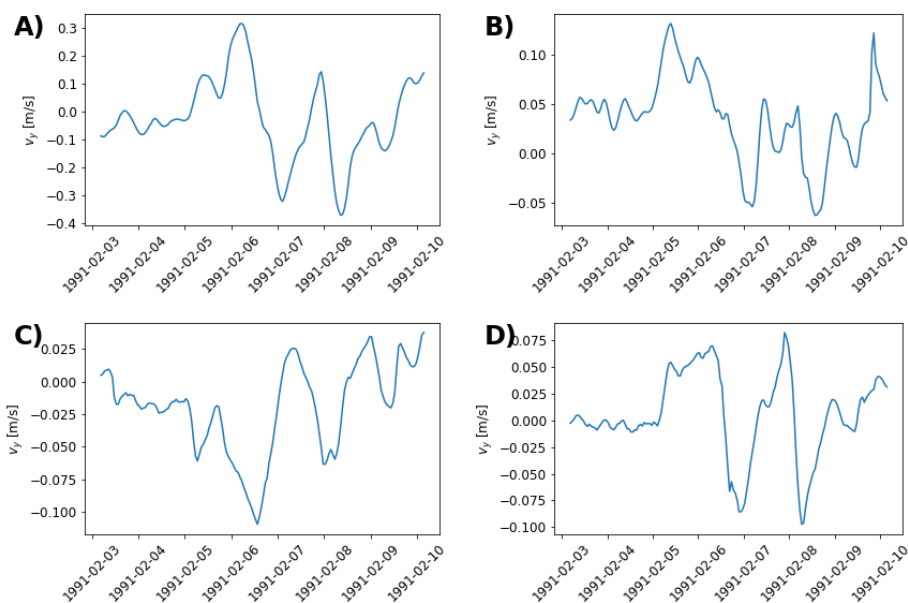


Figura 8. Come in Figura 6 per lo scenario 82.

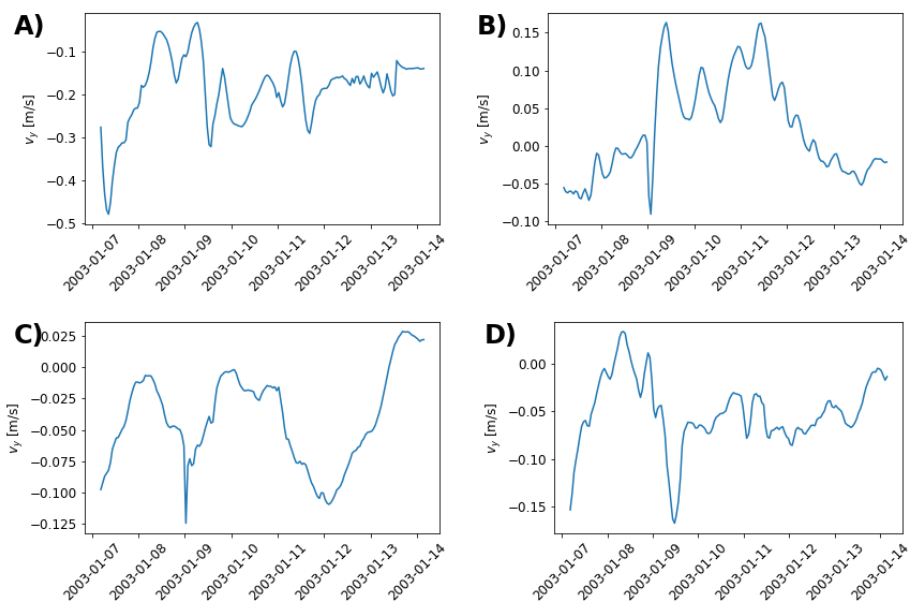


Figura 9. Come in Figura 6 per lo scenario 93.

3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE NEL SITO DI IMMERSIONE A MARE

Per la simulazione dell'idrodinamica e per lo studio dell'evoluzione del materiale solido lungo la colonna d'acqua e sul fondo, è stato impiegato il modello numerico Delft3D, sviluppato e mantenuto da Deltares (precedentemente Delft Hydraulics; <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>). Tale modello numerico è uno dei più robusti e affidabili strumenti per lo studio della dinamica delle correnti, del trasporto di sedimenti, delle onde e della qualità delle acque, sia da un punto di vista applicativo che da un punto di vista di sviluppo e ricerca. Delft3D è composto da diversi moduli che possono essere eseguiti indipendentemente o possono essere accoppiati e interagiscono tra loro, scambiandosi le opportune informazioni. Delft3D-FLOW è uno di questi moduli. Esso è un codice che simula l'idrodinamica e il trasporto solido, prendendo in considerazione una vasta gamma di forzanti, quali eventi meteorologici, maree, scarichi antropici, eccetera.

Per lo sviluppo delle simulazioni idro-morfodinamiche, riassunte nel documento CG.2022.0000018, è stata sviluppata una maglia computazionale cartesiana con estensione sufficiente a coprire un esteso dominio di calcolo, che comprende sia il canale di accesso alla piattaforma che l'area indicata per il rilascio del materiale dragato da parte della barge, visibili nell'Allegato A1. A ciascun nodo della griglia computazionale, è stato successivamente associato un valore di profondità a partire dai dati batimetrici derivati dai dati del repository EMODNET (<https://www.emodnet-bathymetry.eu/>), combinati con i più recenti dati batimetrici forniti da SNAM.

Il modello è stato forzato imponendo le serie di onda e marea sul lato Est della maglia, mentre i dati di vento interessano l'intero dominio di calcolo, ed imponendo le serie del CMS sui lati Nord e Sud del dominio computazionale (figure da Figura 6 a Figura 9).

La risoluzione della dinamica del trasporto dei sedimenti è stata realizzata tramite l'impiego delle equazioni di trasporto e diffusione. Sono state impostate le caratteristiche di diffusività turbolenta, oltre alle caratteristiche dei sedimenti caratteristici per l'area. Per quanto riguarda la granulometria del materiale al fondo, si fa riferimento alle analisi svolte dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Ambiente e della Vita dell'Università degli Studi di Genova sulla base di cinque campioni rilevati nell'area di studio (vedi Allegato A2). Una sintesi dei settaggi del modello è riportata in Tabella 3.



Tabella 3. Parametri utilizzati per il modello numerico.

Parametri fisici			
Viscosità		Vento	
Modello di turbolenza	$k - \varepsilon$	Interpolazione	lineare
Viscosità turbolenta orizzontale [m ² /s]	0.1	Coefficiente di attrito	0,0063
Viscosità turbolenta verticale [m ² /s]	1 E-06	D ₅₀ [mm]	0,1
Diffusività turbolenta orizzontale [m ² /s]	1	ρ_s [kg/m ³]	2.065
Diffusività turbolenta verticale [m ² /s]	1 E-06	ρ_w [kg/m ³]	1.025

4. CALCOLO DEL TASSO DI INTERRAMENTO DEL CANALE DI ACCESSO ALLA PIATTAFORMA

Per il calcolo del tasso di interrimento del canale, è bene precisare come la geometria del canale di accesso alla piattaforma sia sostanzialmente invariata rispetto a quella considerata nel documento CG.2022.0000018 (si veda a tal proposito il confronto riportato nell'Allegato A3). Pertanto, nel prosieguo della relazione, si riportano gli iter di calcolo già esplicitati nel summenzionato documento.

Innanzitutto, si è svolta un'analisi parametrica sulle condizioni necessarie a mobilitare il materiale sul fondo, calcolando la corrente critica tramite il modello di Soulsby⁴:

$$U_{cr} = 7 \left(\frac{h}{D_{50}} \right)^{1/7} [g(s-1)D_{50}f(D_*)]^{1/2} \quad (1)$$

Essendo h la profondità del fondale (qui assunta pari a 15 m), g l'accelerazione di gravità (pari a $9,81 \text{ m/s}^2$), s il rapporto tra densità di sedimento e densità dell'acqua di mare (poste pari a 2650 kg/m^3 e 1025 kg/m^3 ; vedi Tabella 3), D_* il diametro critico (funzione dei parametri D_{50} , s , g e della viscosità cinematica dell'acqua ν , posta pari a $1,36 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Il fattore $f(D_*)$ si calcola come:

$$f(D_*) = \frac{0.30}{1+1.2D_*} + 0.055 \times [1 - \exp(-0.02D_*)] \quad (2)$$

La velocità critica U_{cr} rappresenta il valore limite al di sotto del quale il sedimento di assegnato diametro non viene movimentato. Considerando la profondità locale pari a 15 metri, la velocità critica per il caso in esame risulta essere pari a 0,45 m/s. Tale valore di corrente è stato posto a confronto con i dati di corrente ricostruiti dal CMEMS nell'arco dell'anno 2019 (i dati più recenti disponibili) in corrispondenza del canale dragato (coordinate LON/LAT: 12,424/44,478; SR: WGS84). I risultati sono mostrati in Figura 10.

⁴ Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands.

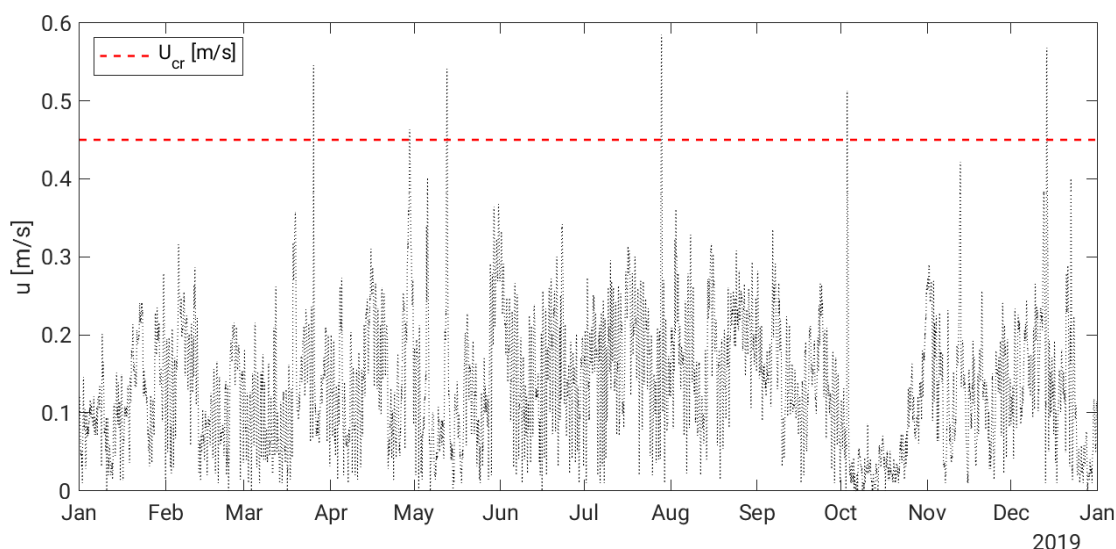


Figura 10. Analisi della circolazione litoranea a larga scala rispetto alla corrente critica calcolata tramite Soulsby (1997).

L'analisi preliminare mostra come le correnti oceaniche a scala di bacino siano mediamente non sufficienti per generare trasporto solido al fondo, essendo la velocità limite U_{cr} ecceduta in rare occasioni nel corso dell'anno.

Tuttavia, bisogna altresì considerare il trasporto di sedimenti indotto da marosi che, seppur non in grado di indurre singolarmente variazioni morfodinamiche tangibili, potrebbero indurre effetti cumulati non irrilevanti nel lungo periodo. In virtù di questa considerazione, è stato verificato il modello proposto da Galvin⁵ per il calcolo del tasso di interrimento medio di un canale in ambiente marino nel lungo periodo. Tale modello si basa sulla equazione sottostante:

$$S_t = Q \left[1 - \frac{d_1^m}{d_2} \right] \quad (3)$$

Dove S_t rappresenta il tasso medio di interrimento per unità di lunghezza del canale, Q il trasporto solido indotto, d_1 e d_2 le profondità prima e dopo il dragaggio, rispettivamente; m è un coefficiente che varia tra 3/2 e 5/2.

Il trasporto solido medio Q è stato calcolato tramite la formula di Soulsby-Van Rijn, sviluppata per considerare ambedue gli effetti di onde e correnti:

⁵ Galvin, C. (1982). Shoaling with bypassing for channels at tidal inlets. *Coastal Engineering Proceedings*, (18), 91-91.



$$Q = A_s \bar{U} \left[\left(\bar{U}^2 + \frac{0.018}{C_D} U_{rms}^2 \right)^{1/2} - U_{cr} \right]^{2.4} (1 - 1.6 \tan \beta) \quad (4)$$

Essendo A_s un parametro che dipende dal diametro medio dei sedimenti, \bar{U} e U_{rms} la velocità media della corrente e la velocità orbitale indotta da un'onda, rispettivamente, C_D il coefficiente di drag; β indica la pendenza media del fondale (assunta in questo caso pari a 0, i.e., il canale è piano).

Sulla base dei dati mostrati in Figura 10, si è assunto un valore \bar{U} pari a 0,14 m/s, mentre la velocità orbitale dell'onda è calcolata utilizzando l'abaco proposto da Soulsby & Smallman (1986)⁶. Per il presente studio, si è assunto un valore pari a 2 m per l'altezza d'onda H_s , quale altezza limite che induca una significativa movimentazione di sedimenti. Successivamente, il periodo T_z è stato associato all'altezza H tramite la formula di Boccotti⁷:

$$T = 8,5\pi \sqrt{\frac{H}{4g}} \quad (5)$$

A partire dal valore di Q è stato possibile calcolare il trasporto medio di sedimenti all'interno del canale per unità di lunghezza tramite l'equazione (3), moltiplicando il valore ottenuto per la larghezza del canale dragato (B_c ; si noti infatti che il parametro Q definisce un *sediment transport rate*, ovvero una portata volumetrica per unità di larghezza). Il valore di trasporto è stato dunque moltiplicato per la lunghezza totale del canale dragato (L_c), al fine di quantificarne la portata volumetrica totale. Per poter calcolare il volume totale annuo di sedimenti potenzialmente "intrappolato" all'interno del canale, si è moltiplicata la portata per il numero medio di ore annue in cui si riscontrano stati di mare caratterizzati da altezze d'onda significativa superiore ai 2 m. Tale statistica risulta essere pari a ca. 200 ore/anno (fonte: dati Hindcast nel periodo 1979-2020). L'analisi è stata replicata per i valori limite del coefficiente m , al fine di sviluppare un'analisi di sensitività.

Infine, si è assunto che il volume totale annuo in ingresso nel canale si depositi uniformemente lungo la superficie del canale dragato; per calcolare la riduzione di profondità nel canale (o, equivalentemente, lo spessore del materiale depositato), è dunque sufficiente dividere il volume suddetto per la superficie del canale.

Lo spessore annuo di deposito così calcolato risulta essere compreso tra 22 cm e 34 cm.

⁶ Soulsby, R. L., & Smallman, J. V. (1986). A direct method of calculating bottom orbital velocity under waves.

⁷ Boccotti, P. (1997). Idraulica marittima. Utet.

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI SULLA DISPERSIONE DI MATERIALE IMMERSO

Le simulazioni descritte nei Paragrafi 2 e 3 sono state accoppiate con una sorgente di materiale solido, modellata al fine di riprodurre lo scarico del materiale dragato ad opera della barge. Le analisi modellistiche di seguito riportate ricalcano quelle riportate nel documento CG.2022.0000018, cui si rimanda per ulteriori dettagli/riferimenti: in quel caso, l'area di rilascio designata si collocava a Nord-Est della piattaforma PETRA, mentre la nuova area (indicata come RA_3), si colloca a Sud-Ovest della stessa, così come mostrato in Figura 11.

18

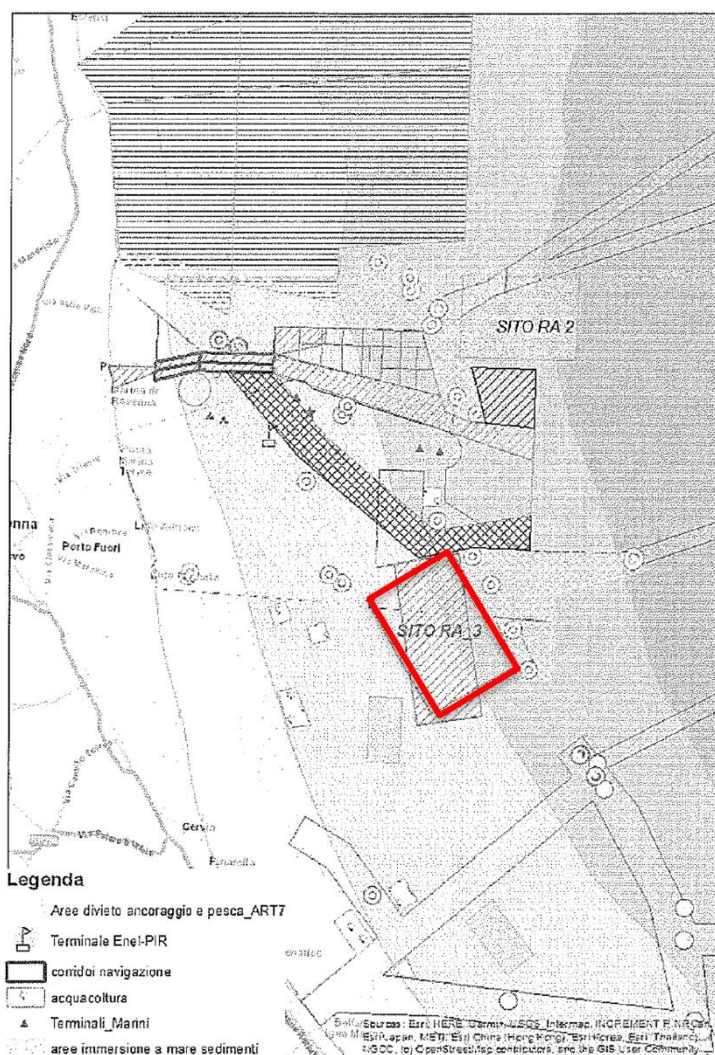


Figura 11. Area di deponia RA_3, evidenziata con il rettangolo in rosso.

Ad ogni modo, la vicinanza delle due aree permette di avvalersi delle stesse simulazioni svolte in precedenza per quanto attiene all'analisi della diffusione *assoluta* di torbida, poiché il clima meteo-marino locale (i.e., gli scenari selezionati) non presenta gradienti significativi su brevi distanze.

Pertanto, l'analisi sullo spessore residuo di sedimenti è di seguito aggiornata esclusivamente sulla base della nuova area designata per l'immersione, le cui coordinate sono riportate in Tabella 4, restituendo una superficie pari a ca. 41 km²

Tabella 4. Coordinate dei vertici dell'area RA 3 (SR: WGS84)

LON	LAT
12°28'18,8443"	44°22'53,0581"
12°31'52,8592"	44°24'27,1248"
12°34'47,5468"	44°21'02,4384"
12°31'13,6579"	44°19'28,4692"

Sono state imposte come condizioni iniziali del modello il flusso di sedimento in ingresso nel sistema (Q_{sed}) e la concentrazione di materiale rilasciata (C_{sed}), calcolate come segue:

$$Q_{sed} = \frac{V_{ship} \times P}{2 \text{ min} \times 60 \text{ s/min}} \quad (6)$$

$$C_{sed} = \rho_s \times P \quad (7)$$

Dove V_{ship} indica la capacità di carico della draga, pari a 3.700 m³, P la porosità del materiale (assunta pari a 0,6), ρ_s il peso specifico dei sedimenti pari a 2.650 kg/m³. I valori per Q_{sed} e C_{sed} risultano essere pari a 18,5 m³/s e 1.590 kg/m³, rispettivamente.

In un primo momento, si è assunto un materiale coesivo, ossia caratterizzato da un elevato grado di addensamento e compattazione quale il limo. I risultati sulla dispersione di torbida sono riportati nelle figure da Figura 12 a Figura 15, dove si mostra l'evoluzione della cosiddetta "nuvola" di sedimenti o *plume* per ciascuno scenario meteo-marino e due assegnati istanti temporali (1 ora e 12 ore dal momento dello scarico). La durata del rilascio è assunta pari a due minuti per tutte le simulazioni e avviene all'interno di una singola cella computazionale in prossimità della superficie libera.

I risultati mostrano come la plume, già dopo un'ora dal rilascio dei sedimenti, si disperda su un'area molto estesa (ordine di km), essendo la concentrazione di torbida diluita in modo significativo. Infatti, per tutti gli scenari meteo-marini considerati, la concentrazione massima di sedimento in sospensione riscontrata si assesta intorno a 1 kg/m^3 (pannelli di sx nelle figure sopracitate), ed è ulteriormente diluita nel tempo grazie dei fenomeni di trasporto e diffusione: dopo 12 ore, la plume si assesta su concentrazioni massime nell'ordine dei $10^1/10^2 \text{ g/m}^3$; dunque, entità marginali se rapportate al quantitativo di materiale rilasciato. Si osserva inoltre come la direzione prevalente di trasporto del materiale sospeso risulti essere NW-SE, in virtù delle direzioni prevalenti di circolazione delle correnti regionali.

Le concentrazioni risultanti, se analizzate lungo tutta la colonna d'acqua, mostrano come il materiale sia prevalentemente mantenuto in sospensione lungo tutta l'area di calcolo, essendo le frazioni depositate sul fondo quantificabili nell'ordine dei millimetri. Tali risultati sono senz'altro alla ridottissima velocità di sedimentazione dei limi, che può approssimativamente essere quantificata in $0,1 \text{ mm/s}$.

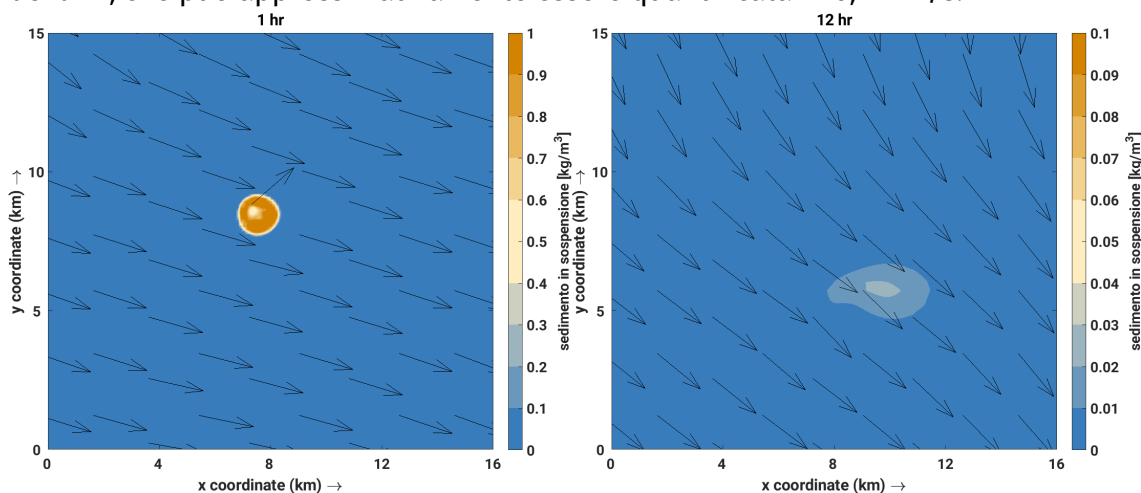


Figura 12. Planimetria della dispersione della plume di torbida al fondo dopo 1 ora dal rilascio (pannello di sx) e 12 ore dal rilascio (pannello di dx). SR relativo allo spostamento della plume. Scenario meteo-marino 4.

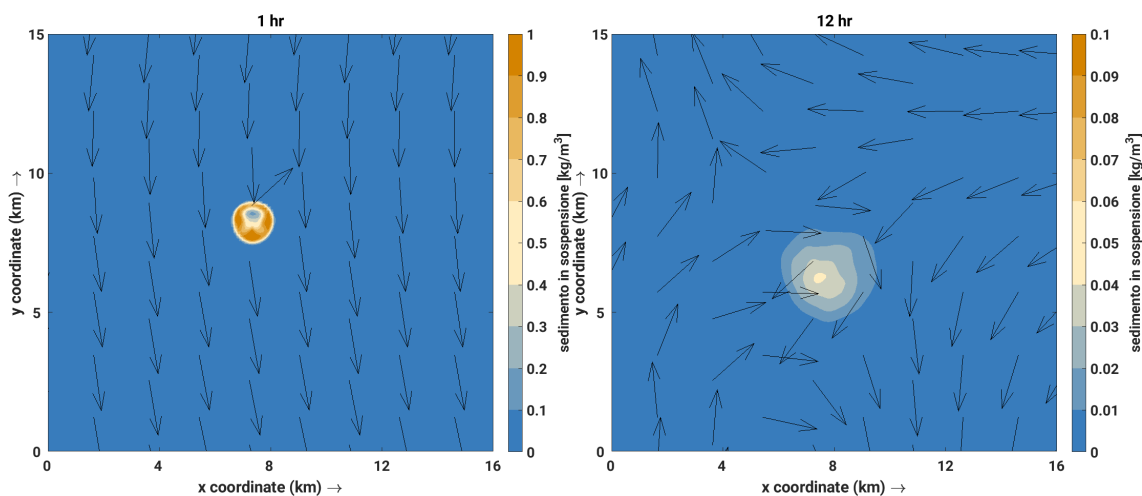


Figura 13. Come in Figura 12 per lo scenario 43.

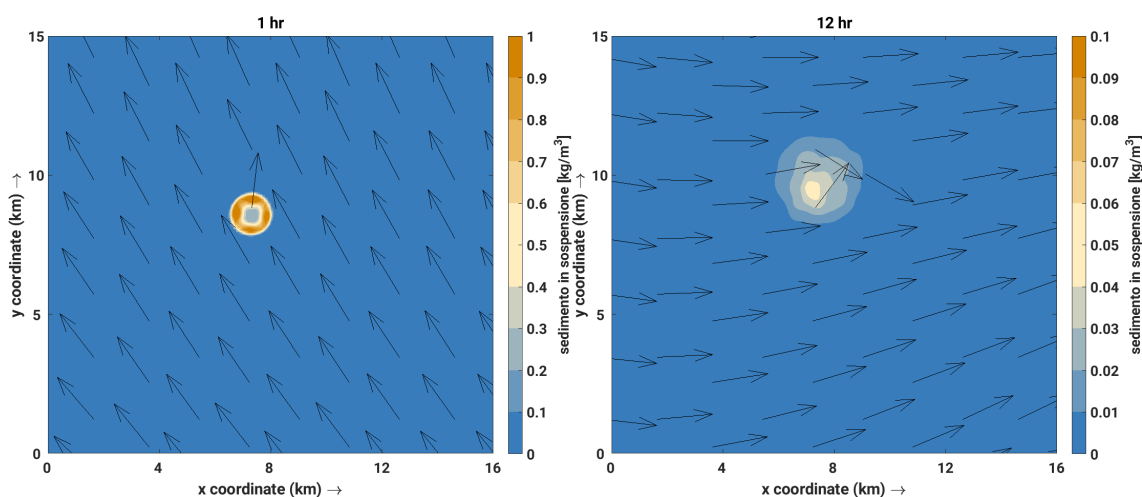


Figura 14. Come in Figura 12 per lo scenario 82.

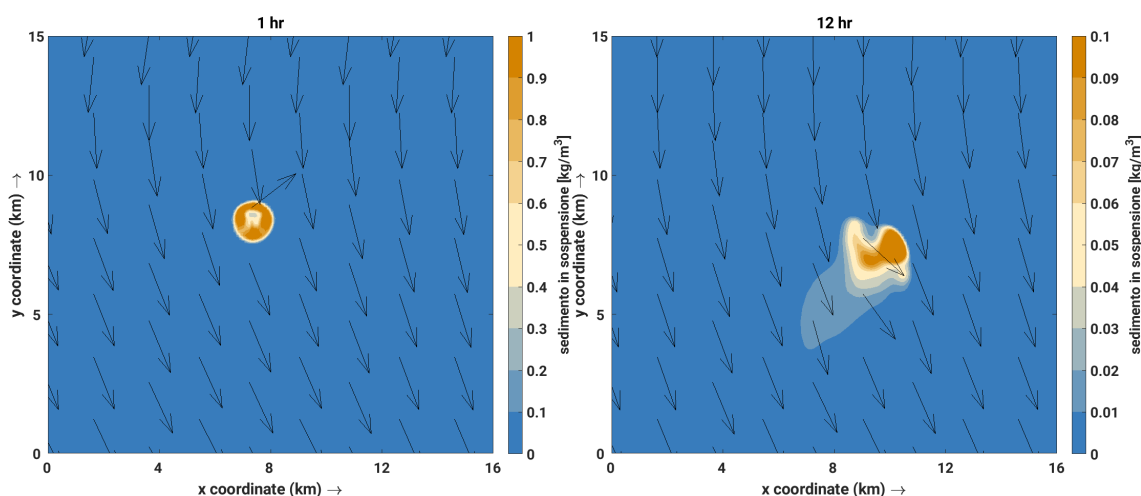


Figura 15. Come in Figura 12 per lo scenario 93.

In virtù delle precedenti considerazioni, si rende necessaria un'ulteriore analisi che permetta di contemplare le frazioni granulometriche più grosse, le cui caratteristiche non sono infatti adeguatamente catturate dalla modellazione per materiali coesivi. Peraltro, il materiale non coesivo, essendo più grossolano, è quello che maggiormente tende a depositarsi al fondo inducendo di conseguenza un innalzamento della quota del fondale. L'analisi sopra citata è stata dunque replicata al fine di valutare il comportamento di materiale non coesivo, restituendo uno spessore massimo di sedimento residuo pari a ca. 1,2 cm su di una superficie di estensione pari a ca. 1 km² (scenario meteo-marino più critico) mentre le frazioni più leggere e sottili permangono in sospensione e/o vengono trasportate al di fuori dell'area interessata dallo scarico per effetto dei meccanismi di circolazione, così come mostrato nel documento CG.2022.0000018.

Alla luce dei risultati legati al deposito indotto da un singolo rilascio, si ritiene opportuno distanziare i punti per scarichi successivi di 250 m, prevenendo dunque 4 rilasci per km² al fine di minimizzare le ricadute ambientali. Tale distanza permette infatti di cumulare il deposito di rilasci distinti lontano dai rispettivi picchi, dovutamente alla forma gaussiana assunta dal materiale depositato sul fondo (i.e., uno spessore distribuito "a campana"). Questo meccanismo è ben schematizzato in Figura 16. Alla luce di questa tendenza, l'innalzamento massimo del fondale per molteplici rilasci risulterebbe comunque essere contenuta entro valori di $\approx 1,2$ cm, a patto che rilasci successivi siano opportunamente distanziati.

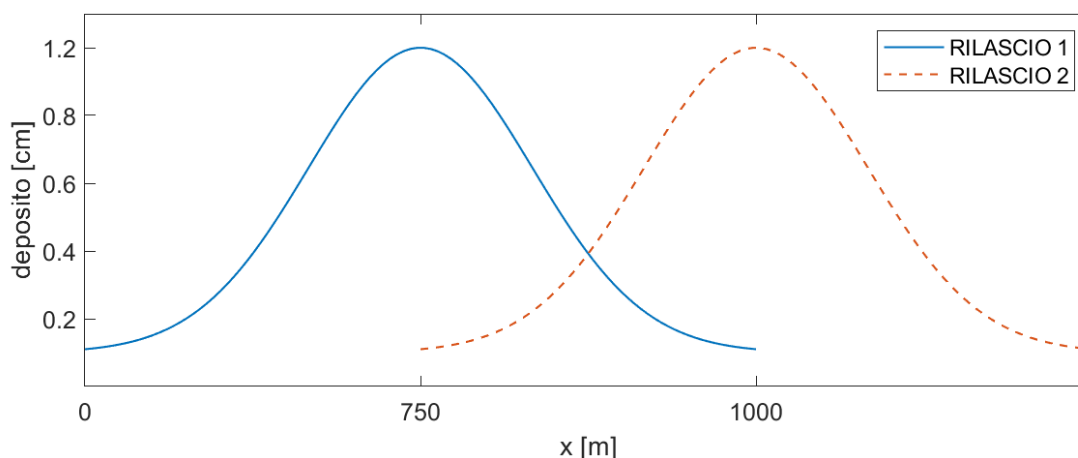


Figura 16. Schema di deposito per rilasci successivi su una sezione trasversale al fondo.

Il calcolo dello spessore totale è stato dunque valutato sulla base del volume totale di sedimento da dragare. Come detto, la capacità di stoccaggio/trasporto della barge ammonta a ca. 3.700 m³, mentre stima del materiale da dragare è pari a ca. 1.350.000 m³ (rispetto al datum LAT, bassa marea astronomica), il che implica ca. 365 scarichi di materiale nell'area di progetto (Figura 11 e Tabella 4). Se si assumono 4 rilasci per km², come da indicazioni previe, si può dunque ottenere il numero di rilasci (o immersioni) che è necessario sovrapporre nell'area individuata dal Proponente:

$$4 \frac{\text{rilasci}}{\text{km}^2} \times 41 \frac{\text{km}^2}{\text{strato}} = 164 \text{ rilasci/strato}$$

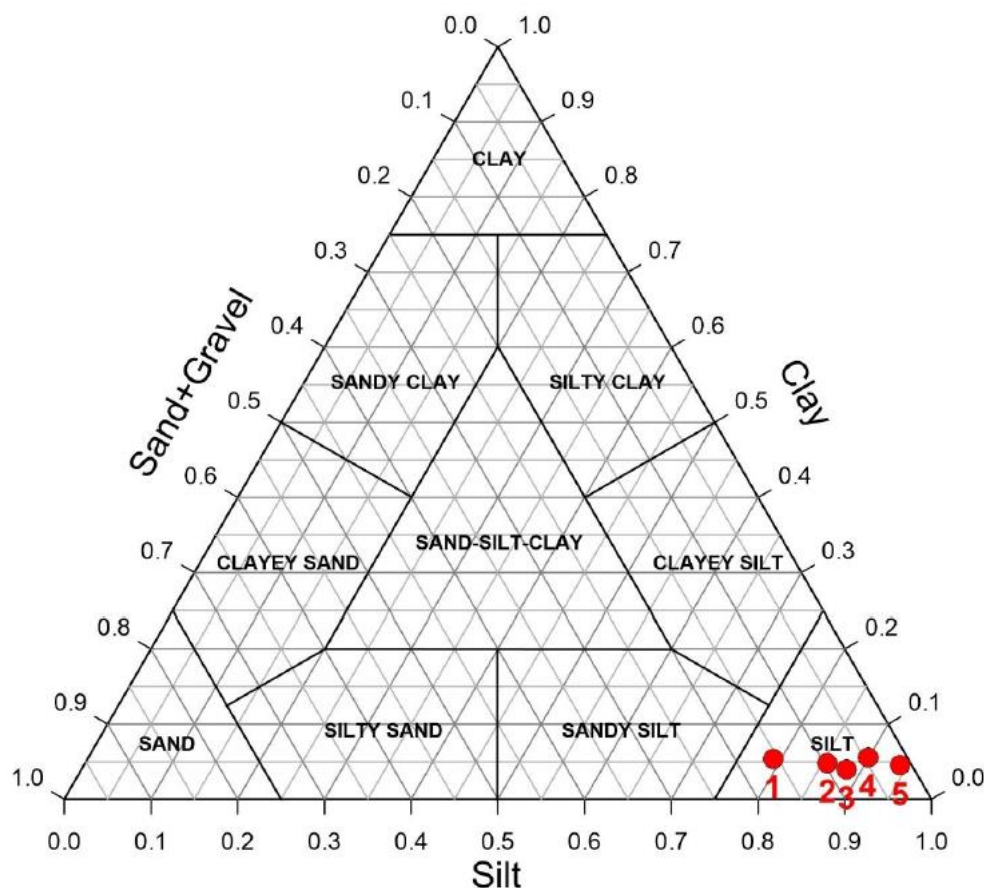
Essendo il numero totale di rilasci previsti pari a 365, si rende dunque necessario il deposito di no. 3 strati, per uno spessore totale residuo nell'area di progetto che seppur non omogeneo, può quantificarsi in un massimo pari a ca. 3,6 cm.

ALLEGATI

Allegato A1. Vedi documento “DIS-AMB-B-35497_r0.pdf”.

24

Allegato A2.



A 1. Risultati delle analisi granulometriche sui campioni di sedimento estratti nell'area di studio (i punti in rosso). In figura è rappresentato un prisma di dimensioni unitarie che riassume le caratteristiche di argille (“clay”), limi (“silt”), sabbia/ciottolato (“sand/gravel”) per assegnati valori dei diametri caratteristici calcolati tramite analisi granulometrica.

Allegato A3. Vedi documento “DIS-AMB-B-35499_r0.pdf”.