

## PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA

CUP C39B18000060006

CIG 7690329440

RIF. PERIZIA

**P.3062**

TITOLO PROGETTO

### NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO SAMPIERDARENA

TITOLO ELABORATO:

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE – ALLEGATO B  
ANALISI MODELLISTICHE PER LA PROPAGAZIONE  
DI TORBIDITA' NELLE ACQUE MARINE COSTIERE

ELABORATO N°:

MI046R-PF-D-A-R-067-B-00

NOME FILE:

MI046R-PF-D-A-R-067-B-00.docx

DATA	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
31/8/2021	P. De Girolamo	F. Angelotti	A. Lizzadro
REVISIONE	N°	DATA	DESCRIZIONE
	00	31/8/2021	EMISSIONE PER APPROVAZIONE

PROGETTISTI	PROGETTAZIONE
<p>Mandatario: </p> <p>Responsabile dell'integrazione delle prestazioni specialistiche Dott. Ing. Antonio Lizzadro</p> <p>   </p> <p>  </p>	<p></p> <p>Dott. Ing. Antonio Lizzadro</p>

D.E.C.	VERIFICATO	VALIDATO R.U.P.	IL RESP. DELL'ATTUAZIONE
Ing. Francesca Arena		Ing. Marco Vaccari	Dott. Umberto Benezzoli
.....	.....	.....	.....

## **AUTORITÀ DI SISTEMA PORTUALE DEL MAR LIGURE OCCIDENTALE**

### **REALIZZAZIONE DELLA NUOVA DIGA FORANEA DEL PORTO DI GENOVA AMBITO BACINO DI SAMPIERDARENA**

### **PROGETTAZIONE DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA**

#### **STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE – ALLEGATO B**

#### **Analisi modellistiche per la propagazione di torbidità nelle acque marine costiere**

## INDICE

1.	PREMESSE	7
2.	FINALITÀ DELLO STUDIO	8
3.	APPROCCIO METODOLOGICO	10
3.1.	Considerazioni generali	10
3.2.	Il fenomeno fisico	10
3.3.	Riproduzione numerica del fenomeno fisico	12
3.3.1.	L'approccio lagrangiano	12
3.3.2.	La sorgente di risospensione	14
3.3.3.	Il campo idrodinamico	20
3.3.4.	La componente deterministica del processo di diffusione	21
3.3.5.	La componente stocastica del processo di diffusione	22
3.3.6.	Il processo di deposizione	23
3.4.	Analisi e sintesi dei risultati	23
3.5.	Sintesi delle caratteristiche dello studio	24
4.	SCENARI DI SIMULAZIONE	26
4.1.	Forzanti meteomarine	26
4.2.	Definizione delle sorgenti di risospensione	27
4.2.1.	Attività di consolidamento dei terreni di fondazione	27
4.2.2.	Attività di rimozione dello scanno di imbasamento	29
4.2.3.	Attività di dragaggio	30
4.2.4.	Sintesi degli scenari di simulazione	32
5.	SINTESI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI	35
5.1.	Osservazioni generali	35
5.2.	Attività di consolidamento del fondale	43
5.3.	Attività di rimozione dello scanno di imbasamento	44
5.4.	Attività di dragaggio	44
6.	OSSERVAZIONI CONCLUSIVE	46
7.	RISULTATI NUMERICI	48

**ELENCO DELLE FIGURE**

Figura 2-1 – Inquadramento della localizzazione delle aree sensibili.	9
FIGURA 3-1 – SCHEMATIZZAZIONE QUALITATIVA DEL PROCESSO DI RISOSPENSIONE PER ATTIVITÀ DI RIMOZIONE O DRAGAGGIO.	15
Figura 3-2 – Schematizzazione qualitativa del processo di risospensione per attività di consolidamento del fondale.	16
Figura 3-3 – Schematizzazione qualitativa dell’evoluzione temporale delle sorgenti di risospensione	20
Figura 3-4 – Schematizzazione qualitativa della stima della concentrazione media sulla profondità (schema a sinistra) e della concentrazione locale (schema a destra).	24
Figura 4-1 – Schematizzazione qualitativa della sorgente di risospensione per la lavorazione di consolidamento dei terreni di fondazione	27
Figura 4-2 – Localizzazione geografica delle sorgenti di risospensione utilizzate per l’analisi della lavorazione di consolidamento dei terreni di fondazione	28
Figura 4-3 – Localizzazione geografica delle sorgenti di risospensione utilizzate per l’analisi della lavorazione di rimozione della diga esistente.	30
Figura 4-4 – Localizzazione geografica delle sorgenti di risospensione utilizzate per l’analisi della lavorazione di dragaggio del Bacino Sampierdarena e della zona di Avamporto.	32
Figura 5-1 – Campi idrodinamici relativi al vento di libeccio (VL) frequente (F - grafico in alto) e raro (R – grafico in basso) utilizzati per gli scenari delle lavorazioni di consolidamento (C) e Dragaggio.	36
Figura 5-2 – Campi idrodinamici relativi al vento di Scirocco (VS) frequente (F - grafico in alto) e raro (R – grafico in basso) utilizzati per gli scenari delle lavorazioni di consolidamento (C) e Dragaggio.	37
Figura 5-3 – Campi idrodinamici relativi al vento di Libeccio (VL) frequente (F - grafico in alto) e raro (R – grafico in basso) utilizzati per gli scenari della lavorazione di rimozione della diga esistente.	38
Figura 5-4 – Campi idrodinamici relativi al vento di Scirocco (VS) frequente (F - grafico in alto) e raro (R – grafico in basso) utilizzati per gli scenari della lavorazione di rimozione della diga esistente.	39
Figura 5-5 – Esempio di risultato numerico ottenuto per la lavorazione di consolidamento dei terreni di fondazione nel caso di vento frequente proveniente dal settore di Scirocco. I simboli chiari indicano i traccianti passivi depositati sul fondo.	41
Figura 5-6 – Esempio di risultato numerico ottenuto per la lavorazione di consolidamento dei terreni di fondazione nel caso di vento frequente proveniente dal settore di Libeccio. I simboli chiari indicano i traccianti passivi depositati sul fondo.	42
Figura 7-1 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	49

Figura 7-2 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	50
Figura 7-3 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	51
Figura 7-4 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento raro (R) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	52
Figura 7-5 – Rimozione della diga esistente (R). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	53
Figura 7-6 – Rimozione della diga esistente (R). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	54
Figura 7-7 – Rimozione della diga esistente (R). Vento raro (R) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	55
Figura 7-8 – Rimozione della diga esistente (R). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	56
Figura 7-9 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	57
Figura 7-10 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	58
Figura 7-11 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	59
Figura 7-12 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento raro (R) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	60
Figura 7-13 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica ambientale (A). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS) e di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	61
Figura 7-14 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica ambientale (A). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS) e di Libeccio (VL). Risultati numerici in termini di concentrazione media sulla profondità (kg/m <sup>3</sup> ).	62
Figura 7-15 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Traccianti passivi depositati sul fondo.	63

Figura 7-16 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Traccianti passivi depositati sul fondo.	64
Figura 7-17 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Traccianti passivi depositati sul fondo	65
Figura 7-18 – Consolidamento dei terreni di fondazione (C). Vento raro (R) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Traccianti passivi depositati sul fondo	66
Figura 7-19 – Rimozione della diga esistente (R). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Traccianti passivi depositati sul fondo	67
Figura 7-20 – Rimozione della diga esistente (R). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Traccianti passivi depositati sul fondo	68
Figura 7-21 – Rimozione della diga esistente (R). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Traccianti passivi depositati sul fondo	69
Figura 7-22 – Rimozione della diga esistente (R). Vento raro (R) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Traccianti passivi depositati sul fondo	70
Figura 7-23 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Traccianti passivi depositati sul fondo	71
Figura 7-24 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento frequente (F) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Traccianti passivi depositati sul fondo	72
Figura 7-25 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento raro (R) proveniente dal settore di Scirocco (VS). Traccianti passivi depositati sul fondo	73
Figura 7-26 – Dragaggio (D) effettuato con tecnica tradizionale (T). Vento raro (R) proveniente dal settore di Libeccio (VL). Traccianti passivi depositati sul fondo	74

## **ELENCO DELLE TABELLE**

Tabella 4-1 – Sintesi degli scenari meteomarini	26
Tabella 4-2 – Sintesi degli scenari riprodotti (“V” indica il vento considerato, “Dir” la relativa direzione di provenienza, “W” l’intensità del vento, “Lav” il tipo di lavorazione, “P” la localizzazione della sorgente di risospensione, Tecnica la tecnica operativa di movimentazione, “Ns” il numero di traccianti passivi che descrivono un singolo ciclo di movimentazione, “Ntot” il numero totale di traccianti passivi utilizzati per riprodurre la lavorazione giornaliera, “M <sub>c</sub> ” è la massa di sedimento disponibile al campo lontano durante ogni ciclo di lavorazione, “M <sub>p</sub> ” è le massa rappresentativa di ogni tracciante passivo).	33

## **1. PREMESSE**

I paragrafi che seguono hanno l'obiettivo di illustrare lo studio di dettaglio effettuato al fine di valutare la propagazione di torbidità conseguente alle attività di cantiere che possono potenzialmente indurre la risospensione di sedimenti marini.

Nello specifico, come diffusamente descritto nell'ambito di questo documento, il progetto in epigrafe richiede, tra le altre attività:

- la rimozione dello scanno di imbasamento dell'attuale diga foranea;
- il consolidamento del fondale mediante colonne in ghiaia, versamento e spianamento di materiale sciolto per la realizzazione dello scanno di imbasamento dei cassoni della nuova diga.

Inoltre, il progetto in epigrafe prevede il riempimento dei cassoni cellulari con il sedimento proveniente dalle attività di dragaggio del Bacino Sampierdarena e della zona di avamporto.

Le tre attività (rimozione, consolidamento e dragaggio) possono rappresentare potenziali sorgenti di risospensione della componente fine del sedimento che, con meccanismi diversi di generazione di torbida, richiedono la valutazione dell'evoluzione spazio-temporale della concentrazione dei sedimenti sospesi al fine di identificare eventuali impatti sulle aree ambientalmente sensibili localizzate nei pressi delle aree 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 rimozione, consolidamento e dragaggio. È necessario evidenziare che il livello di progettazione (fattibilità tecnico-economica) richiede il ricorso a ragionevoli assunzioni sulle modalità operative.



## 2. FINALITÀ DELLO STUDIO

Come anticipato nelle premesse, lo studio è finalizzato a fornire una stima quantitativa dell'evoluzione spazio-temporale della “nuvola di torbida” generata dalle attività di cantierizzazione che possono potenzialmente rappresentare una sorgente di risospensione della componente fine che costituisce l'ammasso sedimentario del fondale.

Nello specifico, vengono analizzate nel dettaglio le seguenti lavorazioni: consolidamento del fondale (nel seguito indicato semplicemente come “*consolidamento*”); rimozione dello scanno di imbasamento dell'attuale diga (nel seguito indicato semplicemente come “*rimozione*”); dragaggio del Bacino Sampierdarena e della zona di avamposto (nel seguito indicato semplicemente come “*dragaggio*”).

Tutte le attività, pur differenziandosi nei meccanismi di risospensione e nella quantità di sedimento risospeso, possono essere schematizzate come una sorgente di risospensione variabile nel tempo e nello spazio in funzione delle modalità operative.

L'obiettivo finale delle analisi, effettuate con l'approccio metodologico sintetizzato nel seguente paragrafo, è quello di valutare l'incremento della torbidità, ovvero della concentrazione dei sedimenti sospesi, che possono potenzialmente sortire impatti sulle aree sensibili localizzate nei pressi delle aree di intervento.

Con riferimento alla Figura 2-1, si riconosce la presenza di alcune aree potenzialmente sensibili alla propagazione della torbidità conseguente alle attività di consolidamento, rimozione e dragaggio.

- Zona Speciale di Conservazione (ZSC, IT1332576) denominata “Fondali Boccadasse - Nervi”, il cui contorno più vicino al Porto è localizzato a circa 2 km a Est dall'imboccatura di levante;
- Zona Speciale di Conservazione (ZSC, IT1332477) denominata “Fondali Arenzano - Punta Ivrea”, localizzato a circa 10 Km a Ovest dall'imboccatura di Ponente.

A queste due aree si aggiungono alcuni siti di interesse sociale e ambientale costituiti da spiagge “cittadine” presenti sia a Ovest (spiaggia di Voltri) sia a Est (spiagge di Albaro e di Quarto dei Mille) del Porto.

In estrema sintesi, l'obiettivo dello studio è valutare la concentrazione di sedimenti sospesi in colonna d'acqua, ovvero della corrispondente torbidità, riconducibile direttamente alle attività del progetto in epigrafe. A tal fine, le stime quantitative dei sedimenti sospesi in colonna d'acqua devono essere confrontate con i valori normalmente osservabili nelle aree di interesse. Questi ultimi, in prima approssimazione, possono

essere desunti dalla rete regionale di monitoraggio dell'ecosistema marino che, tra i tanti parametri misurati, fornisce una stima che normalmente caratterizza la torbidità delle acque nell'area di interesse.

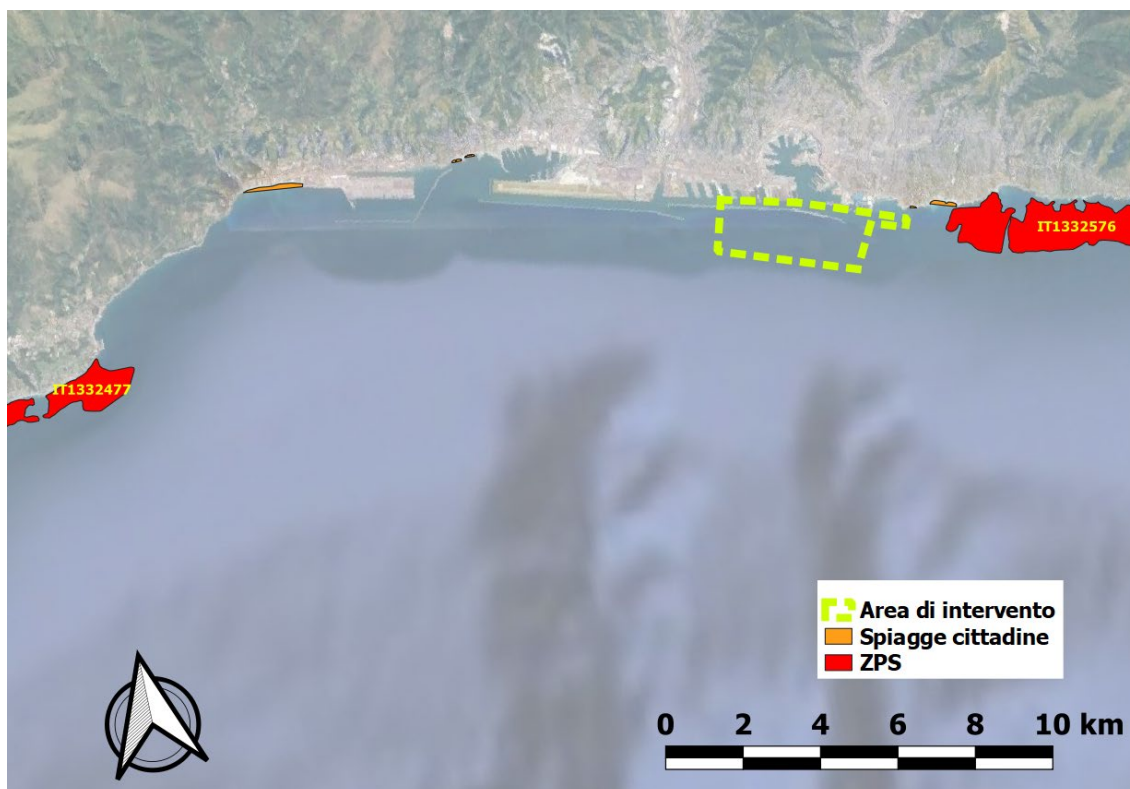


FIGURA 2-1 – INQUADRAMENTO DELLA LOCALIZZAZIONE DELLE AREE SENSIBILI.

### 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., 2017, 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 origini.

In estrema sintesi, 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 a grana fine del sedimento è legato alla dispersione che si verifica a causa della presenza di un campo idrodinamico legato alle condizioni meteomarine. Al fenomeno di dispersione, si affianca il fenomeno della diffusione legato 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 alle caratteristiche granulometriche del materiale sedimentario oggetto di movimentazione. In particolare, per quanto riguarda quest’ultimo aspetto, è di cruciale importanza la percentuale di sedimento appartenente alle classi dei limi e delle argille (diametro

inferiore a 74  $\mu\text{m}$  secondo la classificazione USCS – *Unified Soil Classification System* – oppure inferiore a 63  $\mu\text{m}$  secondo la scala Wentworth).

Con l'obiettivo di sintetizzare il fenomeno, senza pretesa di completezza, esso può essere schematizzato in una serie di macrofenomeni 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. 2015).

#### Fenomeno di dispersione

- La frazione fine a disposizione del campo lontano viene trasportata dal campo idrodinamico dell'area. 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 torbidità. Nella sostanza, le fluttuazioni del campo idrodinamico, dalle spiccate caratteristiche stocastiche, inducono un processo diffusivo dei sedimenti sospesi 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 gli effetti, inquadrabile nell'ambito di

un processo di deposizione che sottrae una frazione di sedimento sospeso al processo di dispersione e diffusione della nuvola di torbidità.

### 3.3. Riproduzione numerica del fenomeno fisico

Pur nell'estrema semplificazione della descrizione fenomenologica del paragrafo precedente, essa permette di definire l'approccio numerico così come dettagliato nel seguito.

#### 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:

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

nella quale:

- $t$  è il tempo;
- $\delta t$  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  $t$ ;
- $w_s$  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;
- $\Delta x_d$ ,  $\Delta y_d$  e  $\Delta z_d$  sono gli spostamenti (lungo le tre direzioni  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) del singolo tracciante passivo causate dalla componente deterministica del processo di diffusione;
- $\Delta x_s$ ,  $\Delta y_s$  e  $\Delta z_s$  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 (A.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 (A.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 (A.1), che rappresenta l'estensione (deterministica) del cammino che il tracciante passivo percorre nell'intervallo di tempo  $\delta t$  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 (A.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 (A.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 in esame (rimozione, consolidamento ovvero dragaggio), è definita in termini di:

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

#### **Localizzazione**

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

L'attività di rimozione e di dragaggio, nella definizione al livello del progetto di fattibilità tecnico-economica, prevede l'utilizzo di mezzi di tipo meccanico (a grappo, ovvero a benna) che induce potenziali perdite della frazione granulometrica fine lungo l'intera colonna d'acqua.

Il singolo ciclo di movimentazione può essere schematizzato come segue (

Figura 3-1):

- l'elemento di movimentazione (grappo o benna) entra in acqua e scende in direzione pseudo verticale sino al fondo (per il dragaggio) ovvero sino agli elementi da rimuovere (per la rimozione); 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.

Per quanto concerne l'attività di consolidamento del fondale, la procedura di disposizione del materiale granulare (pietrame) non è ancora definita nel dettaglio.

Pertanto, a favore di sicurezza, si prende in considerazione una tecnica per cui il materiale viene rilasciato direttamente dalla superficie tramite l'utilizzo di natanti adeguati. In questo modo il processo di risospensione si localizza principalmente in corrispondenza del fondale (Figura 3-2). Infatti, poiché il materiale utilizzato per il consolidamento è costituito da materiale grossolano (pietrame), si ritengono trascurabili le perdite di frazione fine durante la fase di discesa dell'ammasso granulare.

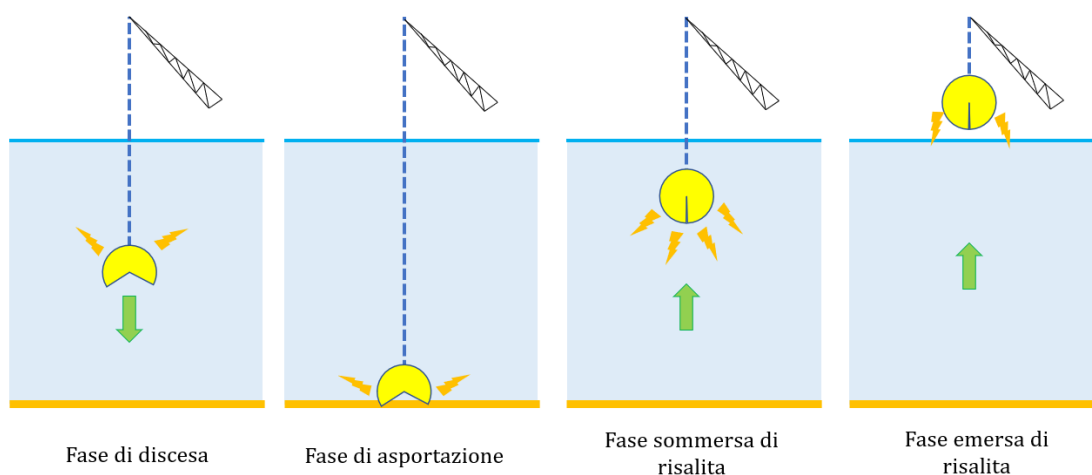


FIGURA 3-1 – SCHEMATIZZAZIONE QUALITATIVA DEL PROCESSO DI RISOSPENSIONE PER ATTIVITÀ DI RIMOZIONE O DRAGAGGIO.





FIGURA 3-2 – SCHEMATIZZAZIONE QUALITATIVA DEL PROCESSO DI RISOSPENSIONE PER ATTIVITÀ DI CONSOLIDAMENTO DEL FONDALE.

### **Geometria**

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

Per le attività di rimozione e dragaggio, 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, 1995).

Per l'attività di consolidamento, la geometria della sorgente può essere assimilata alla dimensione del natante utilizzato per il rilascio, debitamente incrementata per tener conto del processo di deposizione (Lisi et al., 2017).

### **Intensità**

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., 2016). 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 (di asportazione del materiale, nel caso di rimozione e dragaggio, o di rilascio nel caso di consolidamento dei terreni di fondazione).

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:

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

nella  $\sigma_l$  è il 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,  $\rho_s$  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  $\sigma_l$  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 consolidamento considerando, a favore di sicurezza, che tutto il processo di risospensione sia concentrato all'impatto del materiale granulare con il fondo.

Per le lavorazioni di rimozione e dragaggio, il valore del volume di sedimento movimentato  $V_m$  può essere semplicemente correlato alla produttività della movimentazione. Per la lavorazione di consolidamento, il volume movimentato deve

essere correlato allo strato di sedimento naturale (che costituisce il fondale) interessato dal fenomeno di deposito.

La frazione fine totale  $f_f$  è desumibile dalle attività di monitoraggio a supporto del progetto di fattibilità tecnico-economica.

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.

Per quanto riguarda le lavorazioni di rimozione e dragaggio, è possibile definire la durata totale del singolo ciclo ( $T_{tot}$ ) 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 la lavorazione di consolidamento del fondale. In questo caso il volume coinvolto nel processo di risospensione è legato alla superficie di impatto  $A_i$  sul fondo e dello spessore

$\delta z$  interessato dall'impatto e la durata del ciclo è costituito dalla durata  $t_r$  della fase di rilascio dal natante:

$$q_{torb} = \frac{\sigma_l(1-n)\rho_s A_i \delta z f_f}{t_r}$$

Ne consegue, che ad ogni tracciante passivo è associata la massa rappresentativa  $m_{tp}$ :

$$m_{tp} = q_{torb} \frac{t_r}{n_c}$$

Nella quale  $n_c$  è il numero totale di traccianti passivi utilizzati per descrivere il processo di rilascio del materiale granulare.

### **Evoluzione temporale**

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 ( $\delta t$ ), per il raggiungimento della durata dei singoli cicli di movimentazione.

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

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

La Figura 3-3 sintetizza il metodo utilizzato per rappresentare l'evoluzione temporale delle sorgenti di risospensione per tutte le lavorazioni considerate (rimozione, dragaggio, consolidamento).

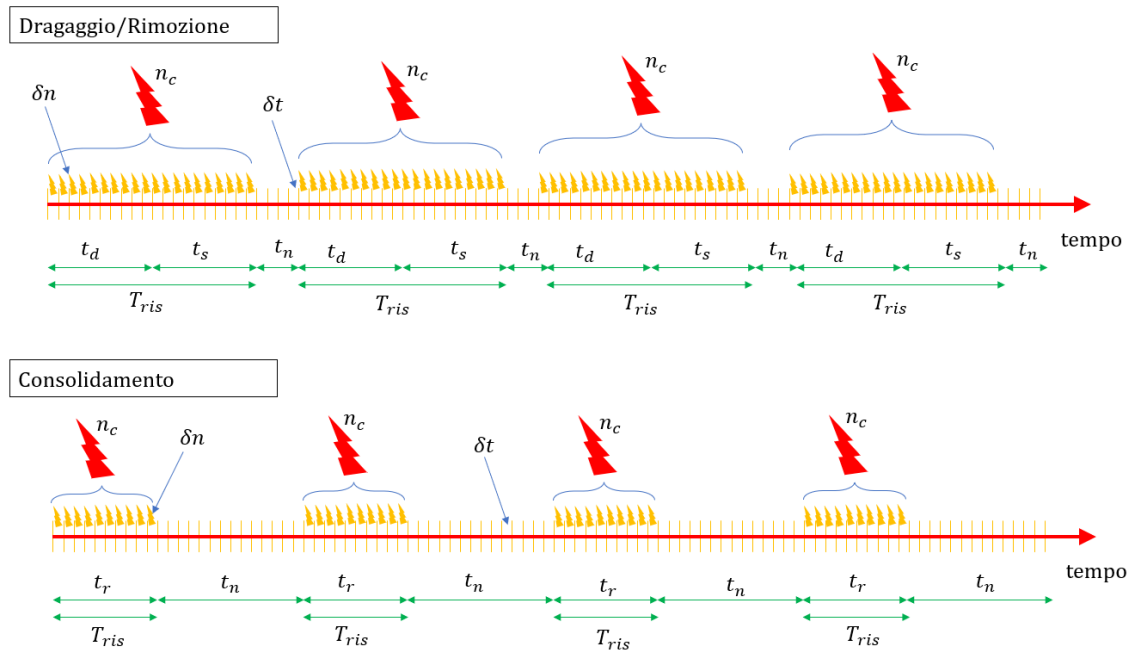


FIGURA 3-3 – SCHEMATIZZAZIONE QUALITATIVA DELL'EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE SORGENTI DI RISOSPENSIONE

### 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 effettuate nell'ambito del progetto in epigrafe, per la stima delle correnti indotte dal vento e necessarie allo svolgimento delle prove con il simulatore di manovra (Relazione “*Le condizioni meteomarine per le manovre di navigazione per le soluzioni d'intervento*”). È da sottolineare che le simulazioni idrodinamiche sono state effettuate con un modello numerico tridimensionale. Tuttavia, la stratificazione del flusso (confrontata anche con misure di campo) è risultata non significativa per cui sono stati presi in considerazione i campi idrodinamici bi-dimensionali (nel piano orizzontale) ottenuti mediando le componenti di velocità ottenuti per gli strati superficiali.

In questo modo sono noti (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 (A.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.

Infine, si evidenzia che le simulazioni necessarie alle prove di navigazione riguardano eventi caratterizzati da una frequenza di apparizione annuale piuttosto limitata (compresa

tra 10 e 20 ore annue). I campi idrodinamici sono stati normalizzati rispetto all'intensità del vento nominale (pari a 12.5 m/s) nell'ambito di un approccio autosimilare per ottenere i campi idrodinamici rappresentativi di venti più frequenti. Si rimanda al successivo paragrafo per la descrizione degli scenari di simulazione.

### 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., 2016; 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  $\varepsilon$  è un parametro empirico.

Studi precedenti hanno dimostrato che  $\varepsilon$  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:

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

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, 1997):

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

Nella quale  $z$  è l'elevazione (misurata rispetto al livello medio e con asse verticale diretto verso l'alto),  $K_a$ ,  $K_b$  e  $\alpha$  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  $\Delta x_d$ ,  $\Delta y_d$  e  $\Delta z_d$  nelle equazioni (A.1). Esse assumono, alla luce delle definizioni dei coefficienti di diffusività, le seguenti forme:

$$\begin{aligned}\Delta x_d &= \frac{\partial D_{xx}}{\partial x} \delta t + \frac{D_{xx}}{h} \frac{\partial h}{\partial x} \delta t \\ \Delta y_d &= \frac{\partial D_{yy}}{\partial y} \delta t + \frac{D_{yy}}{h} \frac{\partial h}{\partial y} \delta t \\ \Delta z_d &= \frac{\partial D_{zz}}{\partial z} \delta t\end{aligned}$$

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  $\Delta x_s$ ,  $\Delta y_s$  e  $\Delta z_s$  nelle equazioni (A.1) forniti dalle seguenti relazioni:

$$\begin{aligned}\Delta x_s &= \sqrt{2D_{xx}\delta t} r_x \\ \Delta y_s &= \sqrt{2D_{yy}\delta t} r_y \\ \Delta z_s &= \sqrt{2D_{zz}\delta t} r_z\end{aligned}$$

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).

### 3.3.6. Il processo di deposizione

Il processo di deposizione è riprodotto dal modello lagrangiano utilizzato rappresentando due fenomeni diversi. Il primo, pur non significativo, è legato alla velocità di sedimentazione che, per la frazione fine dei sedimenti, può essere anche inferiore a 1 mm/s (es. Di Risio et al., 2017). Tale fenomeno è descritto dal secondo termine a secondo membro dell'ultima equazione (A.1).

Un altro fenomeno che può indurre la deposizione del sedimento (inizialmente) risospeso è legato alla componente stocastica del processo di diffusione. Infatti, può accadere che la quota ( $z_p$ ) dei traccianti passivi raggiungano il fondo. In tal caso, la massa rappresentata dal tracciante passivo è considerata come depositata al fondo e viene esclusa dall'aggiornamento della posizione negli istanti temporali successivi.

### 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. Con riferimento allo schema qualitativo di Figura 3-4, la concentrazione media sulla verticale ( $C_m^*$ ) e la concentrazione locale ( $C_z^*$ ) può essere stimata utilizzando le seguenti formulazioni:

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

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



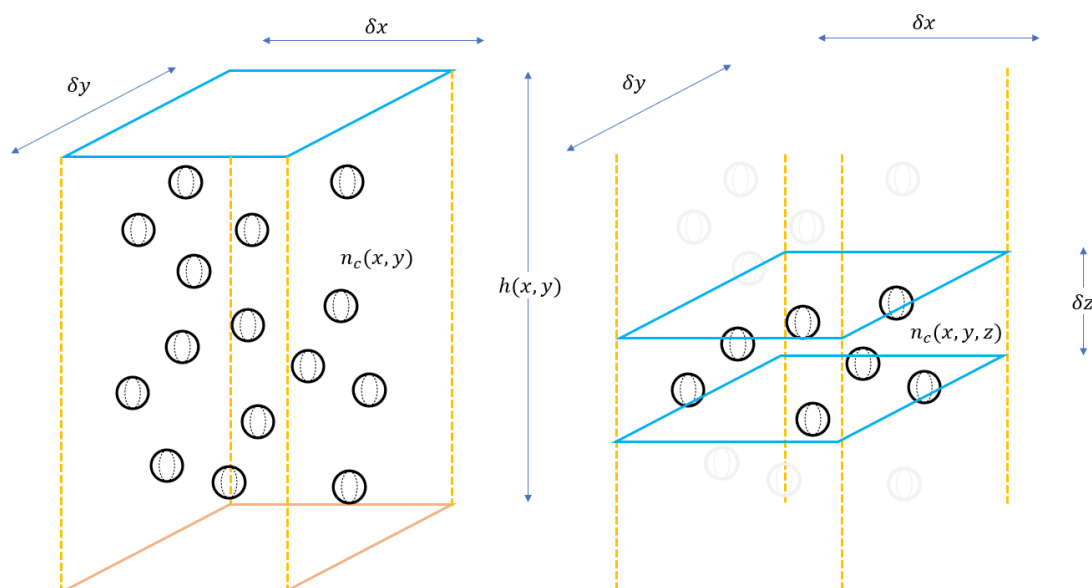


FIGURA 3-4 – SCHEMATIZZAZIONE QUALITATIVA DELLA STIMA DELLA CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (SCHEMA A SINISTRA) E DELLA CONCENTRAZIONE LOCALE (SCHEMA A DESTRA).

I risultati ottenuti sono sintetizzati, per raggiungere gli obiettivi dello studio, così come segue.

- Distribuzione spaziale della massima concentrazione media sulla profondità raggiunta in ogni cella della griglia euleriana.
- Distribuzione spaziale dei traccianti passivi depositati sul fondo.

### 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 per tutte le attività oggetto dell'indagine (rimozione, consolidamento e dragaggio).
- 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. Alla luce delle alte profondità (superiori ai 15 m in tutte le aree di intervento) e del limitato valore del pescaggio dei mezzi marittimi utilizzati, si ritiene tale ipotesi del tutto verosimile.

Poiché il trasporto dei sedimenti è previsto che venga eseguito in assenza di tracimazione (*overflow*), si trascura la sorgente di risospensione legata alla fase di trasporto.

## 4. SCENARI DI SIMULAZIONE

### 4.1. Forzanti meteomarine

Nel rispetto delle finalità dello studio, sono state prese in considerazione due condizioni di vento (Libeccio, direzione di provenienza del vento 230°N; Scirocco, direzione di provenienza del vento 115°N) e due frequenze di superamento (vento frequente e vento raro).

In particolare, la Tabella 8-1 sintetizza le caratteristiche delle forzanti meteomarine. La velocità del vento per le simulazioni di “Libeccio” è pari a 4 m/s (VLF – Vento Libeccio Frequente) e 12.5 m/s (VLR – Vento Libeccio Raro). La relativa frequenza di superamento è pari a 85 gg/anno e 20 ore/anno rispettivamente. La velocità del vento per le simulazioni di “Scirocco” è pari a 6 m/s (VSF – Vento Scirocco Frequente) e 12.5 m/s (VSR – Vento Scirocco Raro). La relativa frequenza di superamento è pari a 40 gg/anno e 10 ore/anno rispettivamente.

La scelta degli scenari è stata effettuata con il fine di fornire i risultati per condizioni piuttosto frequenti (frequenze di non superamento superiori a 9 mesi/anno) e per condizioni rare, ma che accadono almeno con frequenza annuale (frequenze di superamento di poche ore anno).

TABELLA 4-1 – SINTESI DEGLI SCENARI METEOMARINI

Scenario meteomarinario	VL-R	VL-F	VS-R	VS-F
Settore di provenienza del vento	Libeccio		Scirocco	
Direzione di provenienza del vento (°N)	230	230	115	115
Velocità del vento (m/s)	12.5	4.0	12.5	6.0
Frequenza di superamento (gg/anno)	≈0.8	≈85	≈0.4	≈40
Frequenza di non superamento (gg/anno)	≈364.4	≈280	≈364.8	≈325

## 4.2. Definizione delle sorgenti di risospensione

Per ognuna delle lavorazioni considerate (consolidamento, rimozione e dragaggio) sono state considerati tre “percorsi” con l’obiettivo di valutare quantitativamente l’evoluzione spazio-temporale della nube di torbida per diverse fasi di avanzamento delle lavorazioni stesse. Nei seguenti sotto-paragrafi si illustrano nel dettaglio, per ognuna delle attività, le caratteristiche degli scenari di simulazione.

### 4.2.1. Attività di consolidamento dei terreni di fondazione

L’attività di consolidamento è costituita dalla posa in opera di ghiaia che permetta la realizzazione dello scanno di imbasamento dei cassoni tramite la tecnica *Wet Top-Feed Blanket*. Essa consiste nel collocamento sul fondo di uno strato di materiale granulare (frantumato da roccia resistente e durevole) con fuso granulometrico compreso tra 10 mm e 80 mm. Tale attività, della durata prevista dal cronoprogramma di 30 mesi, sarà effettuata nella configurazione attuale (cioè in presenza della diga attuale) ed avrà luogo lungo l’asse della nuova diga. L’area di consolidamento è costituita da sabbie medio-fini con una frazione di granulometria fine (inferiore a 74  $\mu\text{m}$ ) dell’ordine del 30%.

A favore di sicurezza, lo sversamento è previsto direttamente dalla superficie libera con l’utilizzo di natanti che rilasciano il materiale verso il fondo. La dimensione caratteristica dell’impronta di rilascio è definita pari a 10 m. Tenendo conto della durata prevista per l’intera lavorazione (30 mesi), la durata del singolo sversamento è definita pari a 10 minuti, da effettuarsi con cadenza oraria e durata giornaliera delle operazioni pari a 8 ore.

La sorgente di risospensione è localizzata in corrispondenza del fondo entro uno strato di spessore pari a 1 m. La Figura 4-1 mostra una sintesi dei parametri geometrici della sorgente di risospensione.

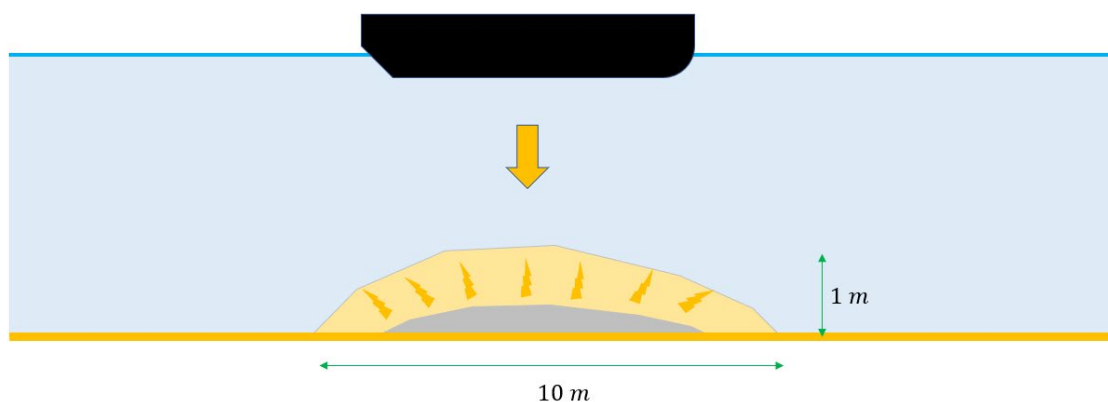


FIGURA 4-1 – SCHEMATIZZAZIONE QUALITATIVA DELLA SORGENTE DI RISOSPENSIONE PER LA LAVORAZIONE DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE

Il sedimento naturale (presente sul fondo) coinvolto nel processo di risospensione è definito di spessore pari a 0.50 m. Il numero di traccianti passivi utilizzati per descrivere ogni singolo sversamento è pari a 8'000. Il numero totale di traccianti passivi utilizzati per descrivere un'intera giornata di attività è dunque pari a 64'000.

Le simulazioni hanno riguardato tre diverse localizzazioni della sorgente di risospensione con l'obiettivo di riprodurre gli effetti della lavorazione per diversi stati di avanzamento. La Figura 4-2 mostra le tre localizzazioni delle sorgenti di risospensione (C-P1, C-P2 e C-P3) collocate sulla giacitura della nuova diga.

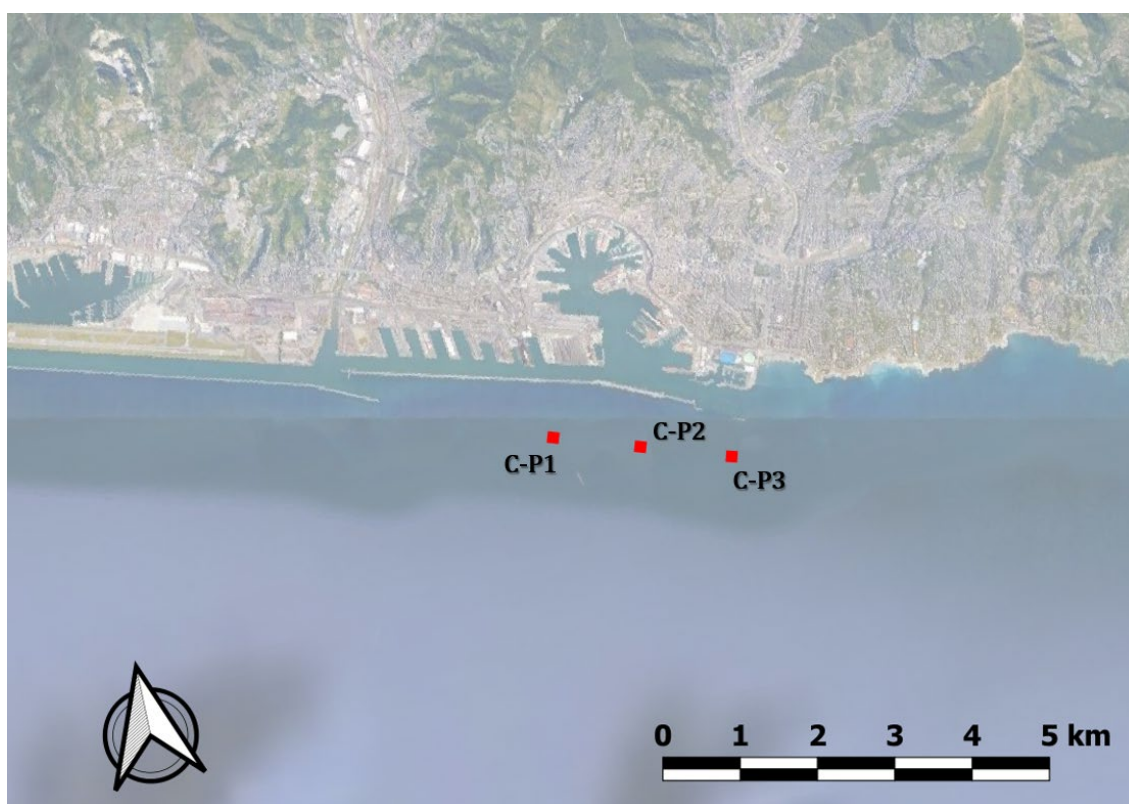


FIGURA 4-2 – LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DELLE SORGENTI DI RISOSPENSIONE UTILIZZATE PER L'ANALISI DELLA LAVORAZIONE DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE

Con le informazioni quantitative descritte, 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). Si ottiene, per ogni sversamento, una massa di sedimento disponibile al campo lontano pari a circa 937 kg (a cui corrisponde una quantità giornaliera pari a circa 7500

kg). Da ciò si deduce che ogni tracciante passivo è associato ad una massa pari a circa 0.117 kg.

Si ritiene che lo scenario riprodotto rappresenti, a favore di sicurezza, il meccanismo di risospensione. Infatti, nell'ambito dei successivi livelli di progettazione (definitivo ed esecutivo), la tecnica dello sversamento potrebbe essere prevista in diretta corrispondenza del fondo con conseguente diminuzione dell'intensità della sorgente di risospensione.

#### 4.2.2. Attività di rimozione dello scanno di imbasamento

È previsto che l'attività di rimozione dello scanno di imbasamento della diga esistente verrà effettuato con un mezzo marittimo che asporterà meccanicamente gli elementi dello scanno. Tale attività, della durata prevista dal cronoprogramma di 21 mesi, sarà effettuata dopo la realizzazione della diga in progetto. È verosimile che il materiale movimentato abbia una frazione granulometrica fine piuttosto limitata, comunque inferiore al 10%.

La durata giornaliera delle operazioni è pari a 8 ore. La durata di ogni singolo ciclo è posta pari a 10 minuti. La durata della sorgente di risospensione è pari a 8 minuti, considerando il tempo nella fase aerea di durata pari a 2 minuti. Durante l'intera giornata, quindi, sono previsti 48 cicli di rimozione (fase di discesa, risalita e collocazione del materiale nel natante di trasporto).

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.

Il numero di traccianti passivi utilizzati per descrivere ogni ciclo di movimentazione è pari a 500. Il numero totale di traccianti passivi utilizzati per descrivere un'intera giornata di attività è dunque pari a 24'000.

In analogia con la lavorazione di consolidamento dei terreni di fondazione, le simulazioni hanno riguardato tre diverse localizzazioni della sorgente di risospensione con l'obiettivo di riprodurre gli effetti della lavorazione per diversi stati di avanzamento. La Figura 4-3 mostra le tre localizzazioni delle sorgenti di risospensione (R-P1, R-P2 e R-P3) collocate sulla giacitura della diga esistente.

Con le informazioni quantitative descritte, 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). Si ottiene, per ogni ciclo di rimozione, una massa di sedimento disponibile al campo lontano pari a circa 140 kg (a cui corrisponde una quantità giornaliera pari a circa

6700 kg). Da ciò si deduce che ogni tracciante passivo è associato ad una massa pari a circa 0.278 kg.



FIGURA 4-3 – LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DELLE SORGENTI DI RISOSPENSIONE UTILIZZATE PER L'ANALISI DELLA LAVORAZIONE DI RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE.

#### 4.2.3. Attività di dragaggio

L'attività di dragaggio del Bacino Sampierdarena e dell'avamposto orientale, della durata prevista dal cronoprogramma di 8 mesi, sarà effettuata prima della realizzazione della diga in progetto e della rimozione della diga attuale. I risultati delle analisi granulometriche hanno rilevato che il materiale movimentato ha una frazione granulometrica fine piuttosto elevata. Nel Bacino Sampierdarena la frazione fine raggiunge un valore circa pari all'80%. Nell'area dell'avamposto, la frazione scende a circa il 30%.

La durata giornaliera delle operazioni è pari a 8 ore. La durata di ogni singolo ciclo è posta 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,

*Pag. 30 di 74*

quindi, sono previsti circa 80 cicli di rimozione (fase di discesa, risalita e collocazione del materiale nel natante di trasporto). In tal modo, l'azione contemporanea di tre draghe permette il rispetto della durata del cronoprogramma delle lavorazioni con una produttività giornaliera di circa 3'750 m<sup>3</sup>.

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.

Il numero di traccianti passivi utilizzati per descrivere ogni ciclo di movimentazione è pari a 500. Il numero totale di traccianti passivi utilizzati per descrivere un'intera giornata di attività è dunque pari a 40'000.

In analogia con le lavorazioni descritte nei paragrafi precedenti, le simulazioni hanno riguardato tre diverse localizzazioni della sorgente di risospensione con l'obiettivo di riprodurre gli effetti della lavorazione per diversi stati di avanzamento. La Figura 4-4 mostra le tre localizzazioni delle sorgenti di risospensione (D-P1, D-P2 e D-P3) collocate sulla giacitura della diga esistente.

Con le informazioni quantitative descritte, 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).

Considerando tre draghe che agiscono contemporaneamente in corrispondenza della stessa area, si ottiene, per ogni ciclo di dragaggio nel Bacino Sampierdarena, una massa di sedimento disponibile al campo lontano pari a circa 3340 kg (a cui corrisponde una quantità giornaliera pari a circa 270000 kg), a cui corrisponde una massa associata ad ogni tracciante passivo pari a circa 6.68 kg. Per le attività di dragaggio nell'area di avamposto, si ottiene una massa di sedimento disponibile al campo lontano pari a circa 1250 kg (a cui corrisponde una quantità giornaliera pari a circa 100000 kg) e una massa associata ad ogni tracciante passivo pari a circa 2.50 kg.

A causa dell'elevata frazione di componente fine nel bacino di Sampierdarena, sono state effettuate ulteriori simulazioni volte a valutare gli effetti dell'utilizzo di una draga di tipo ambientale. In questo caso, è possibile decrementare la percentuale di massa di sedimento che si rende disponibile al campo lontano ad un valore pari a 1% decrementando la produttività giornaliera di circa il 20%. In questo modo, la massa disponibile è pari a 534 kg (a cui corrisponde una quantità giornaliera pari a circa 45000 kg) a cui corrisponde una massa associata ad ogni tracciante passivo pari a circa 1.07 kg.



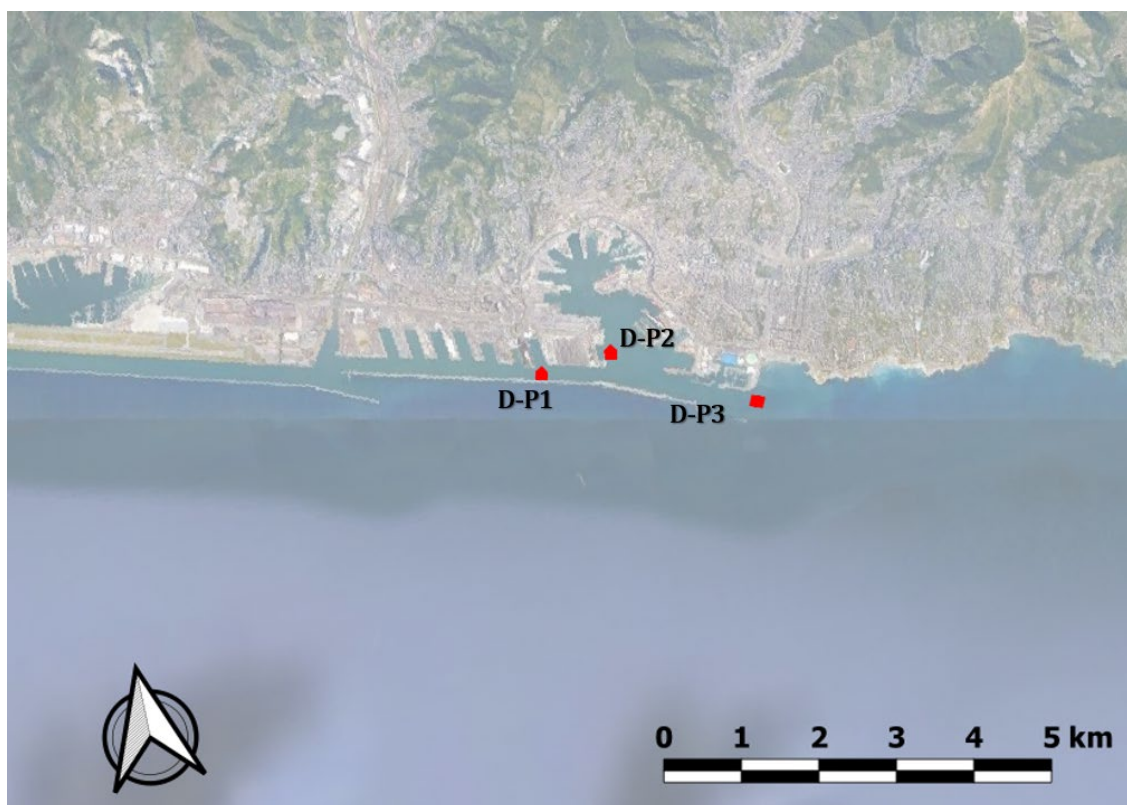


FIGURA 4-4 – LOCALIZZAZIONE GEOGRAFICA DELLE SORGENTI DI RISOSPENSIONE UTILIZZATE PER L'ANALISI DELLA LAVORAZIONE DI DRAGAGGIO DEL BACINO SAMPIERDARENA E DELLA ZONA DI AVAMPORTO.

#### 4.2.4. 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.

Per ognuna delle attività (C – Consolidamento; R – Rimozione; D – Dragaggio), ogni scenario si differenzia dagli altri per i seguenti aspetti:

- direzione di provenienza del vento (VL – Libeccio; VS – Scirocco);
- frequenza di superamento delle condizioni anemometriche (R – Raro, F – Frequente);
- localizzazione della sorgente di risospensione (P1 – prima localizzazione; P2 – secondo percorso; P3 – terza localizzazione).

Inoltre, per quanto riguarda l'attività di dragaggio del Bacino Sampierdarena, si è riprodotto anche l'effetto della modalità operativa (T – tecnica tradizionale; A – dragaggio ambientale).

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

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

A titolo di esempio, lo scenario “D-VL-R-P1-T” indica i risultati ottenuti per l’attività di dragaggio (D) per un vento di Libeccio (VL) raro (R) localizzato nel punto 1 (P1) ed effettuato con tecnica tradizionale (T).

La Tabella 8-2 elenca i 40 scenari riprodotti.

TABELLA 4-2 – SINTESI DEGLI SCENARI RIPRODOTTI (“V” INDICA IL VENTO CONSIDERATO, “DIR” LA RELATIVA DIREZIONE DI PROVENIENZA, “W” L’INTENSITÀ DEL VENTO, “LAV” IL TIPO DI LAVORAZIONE, “P” LA LOCALIZZAZIONE DELLA SORGENTE DI RISOSPENSIONE, TECNICA LA TECNICA OPERATIVA DI MOVIMENTAZIONE, “Ns” IL NUMERO DI TRACCIANTI PASSIVI CHE DESCRIVONO UN SINGOLO CICLO DI MOVIMENTAZIONE, “Ntot” IL NUMERO TOTALE DI TRACCIANTI PASSIVI UTILIZZATI PER RIPRODURRE LA LAVORAZIONE GIORNALIERA, “M<sub>c</sub>” È LA MASSA DI SEDIMENTO DISPONIBILE AL CAMPO LONTANO DURANTE OGNI CICLO DI LAVORAZIONE, “M<sub>p</sub>” È LE MASSA RAPPRESENTATIVA DI OGNI TRACCIANTE PASSIVO).

Num.	V	Dir (°N)	W (m/s)	Lav.	P	Tecnica	Sigla	N <sub>s</sub>	N <sub>tot</sub>	m <sub>c</sub> (kg)	m <sub>p</sub> (kg)
1					1	Tradizionale	C-VL-C-P1-T				
2	Libeccio	230	12.5		2	Tradizionale	C-VL-C-P2-T				
3					3	Tradizionale	C-VL-C-P3-T				
4					1	Tradizionale	C-VS-C-P1-T				
5	Scirocco	115	12.5		2	Tradizionale	C-VS-C-P2-T				
6					3	Tradizionale	C-VS-C-P3-T				
7				Consolidamento	1	Tradizionale	C-VL-F-P1-T	8000	48000	937	0.117
8	Libeccio	230	4		2	Tradizionale	C-VL-F-P2-T				
9					3	Tradizionale	C-VL-F-P3-T				
10					1	Tradizionale	C-VS-F-P1-T				
11	Scirocco	115	6		2	Tradizionale	C-VS-F-P2-T				
12					3	Tradizionale	C-VS-F-P3-T				
13					1	Tradizionale	R-VL-R-P1-T				
14	Libeccio	230	12.5		2	Tradizionale	R-VL-R-P2-T				
15					3	Tradizionale	R-VL-R-P3-T				
16					1	Tradizionale	R-VS-R-P1-T				
17	Scirocco	115	12.5	Rimozione	2	Tradizionale	R-VS-R-P2-T	500	24000	140	0.278
18					3	Tradizionale	R-VS-R-P3-T				
19					1	Tradizionale	R-VL-F-P1-T				
20	Libeccio	230	4		2	Tradizionale	R-VL-F-P2-T				

Rev.00	Data: Agosto 2021			El. MI046R-PF-D-A-R-067-B-00				
21				3	Tradizionale	R-VL-F-P3-T		
22				1	Tradizionale	R-VS-F-P1-T		
23	Scirocco	115	6	2	Tradizionale	R-VS-F-P2-T		
24				3	Tradizionale	R-VS-F-P3-T		
25				1	Tradizionale	D-VL-R-P1-T	3340	6.68
26	Libeccio	230	12.5	2	Tradizionale	D-VL-R-P2-T	1250	2.50
27				3	Tradizionale	D-VL-R-P3-T		
28				1	Tradizionale	D-VS-R-P1-T	3340	6.68
29	Scirocco	115	12.5	2	Tradizionale	D-VS-R-P2-T	1250	2.50
30				3	Tradizionale	D-VS-R-P3-T		
31	Libeccio	230	12.5	1	Ambientale	D-VL-R-P1-A	534	1.07
32	Scirocco	115	12.5	1	Ambientale	D-VS-R-P1-A		
33				1	Tradizionale	D-VL-F-P1-T	3340	6.68
34	Libeccio	230	4	2	Tradizionale	D-VL-F-P2-T	1250	2.50
35				3	Tradizionale	D-VL-F-P3-T		
36				1	Tradizionale	D-VS-F-P1-T	3340	6.68
37	Scirocco	115	6	2	Tradizionale	D-VS-F-P2-T	1250	2.50
38				3	Tradizionale	D-VS-F-P3-T		
39	Libeccio	230	4	1	Ambientale	D-VL-F-P1-A	534	1.07
40	Scirocco	115	6	1	Ambientale	D-VS-F-P1-A		

Dragaggio

500 40000

## **5. SINTESI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI**

### **5.1. Osservazioni generali**

I campi idrodinamici sono riportati in Figura 5-1, Figura 5-2, Figura 5-3 e Figura 5-4. Essi sono relativi a tutti gli scenari riprodotti per le lavorazioni di consolidamento dei terreni e dragaggio (Figura 5-1 e Figura 5-2) e per l'attività di rimozione della diga esistente (Figura 5-3 e Figura 5-4).

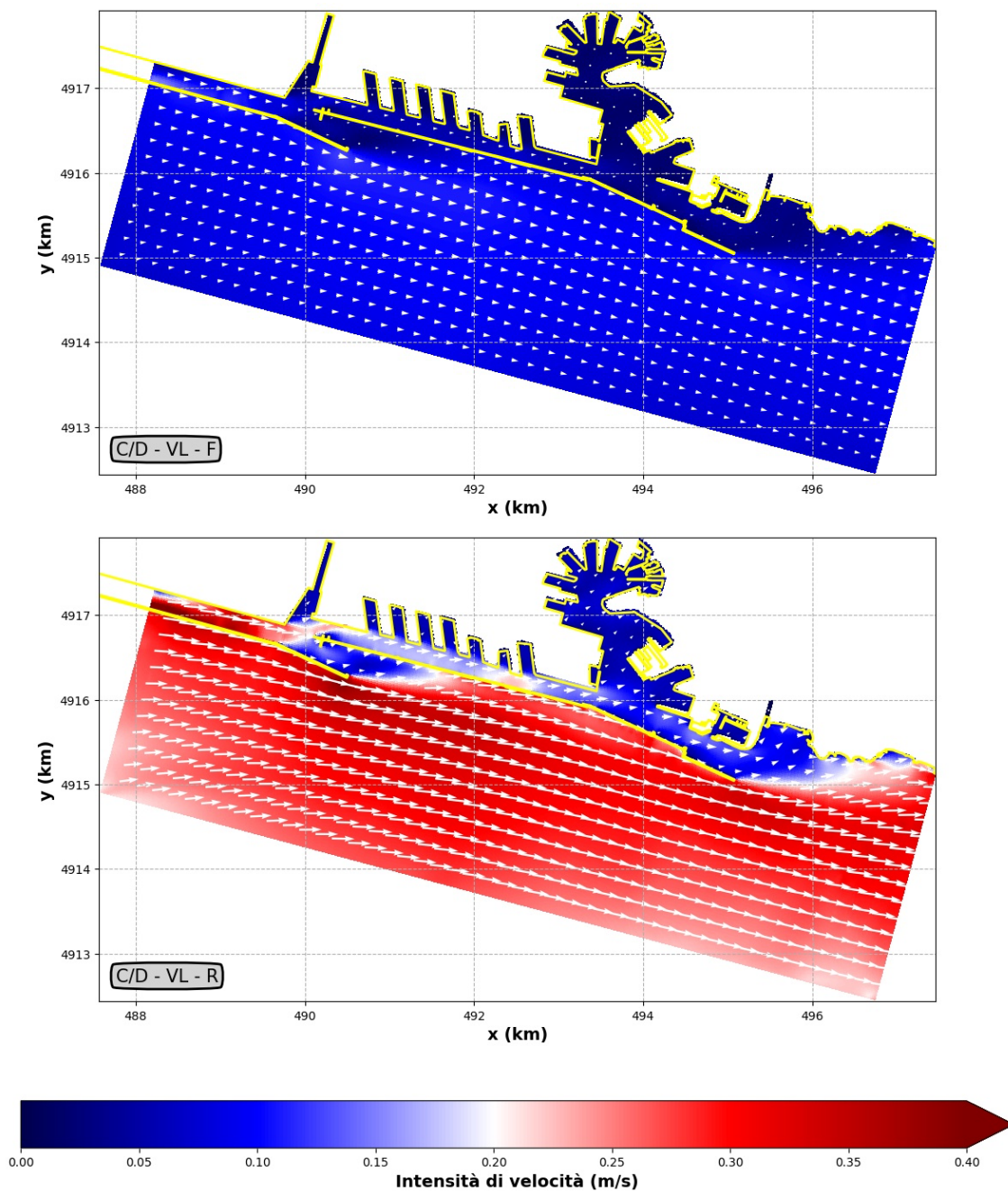


FIGURA 5-1 – CAMPI IDRODINAMICI RELATIVI AL VENTO DI LIBECCIO (VL) FREQUENTE (F - GRAFICO IN ALTO) E RARO (R - GRAFICO IN BASSO) UTILIZZATI PER GLI SCENARI DELLE LAVORAZIONI DI CONSOLIDAMENTO (C) E DRAGAGGIO.

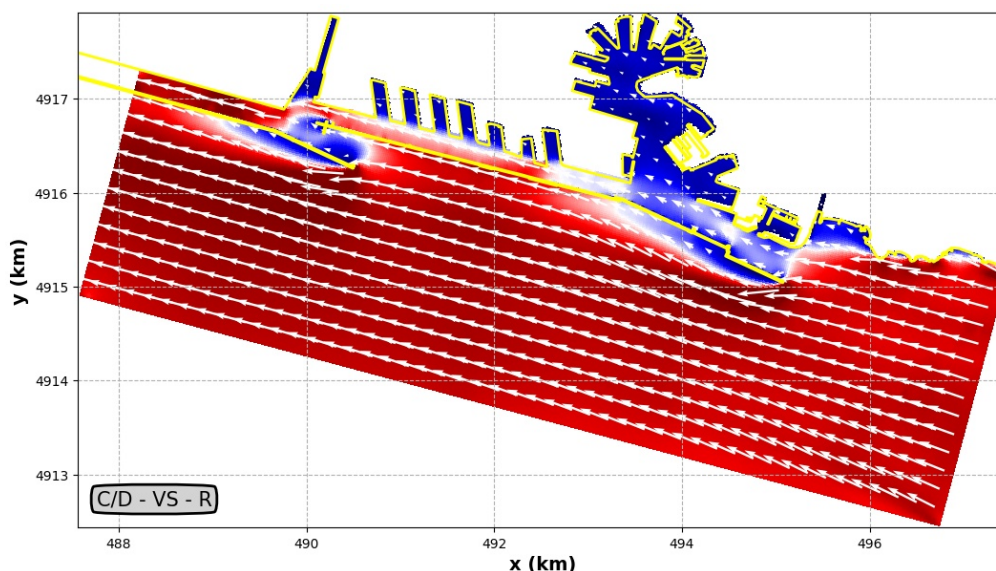
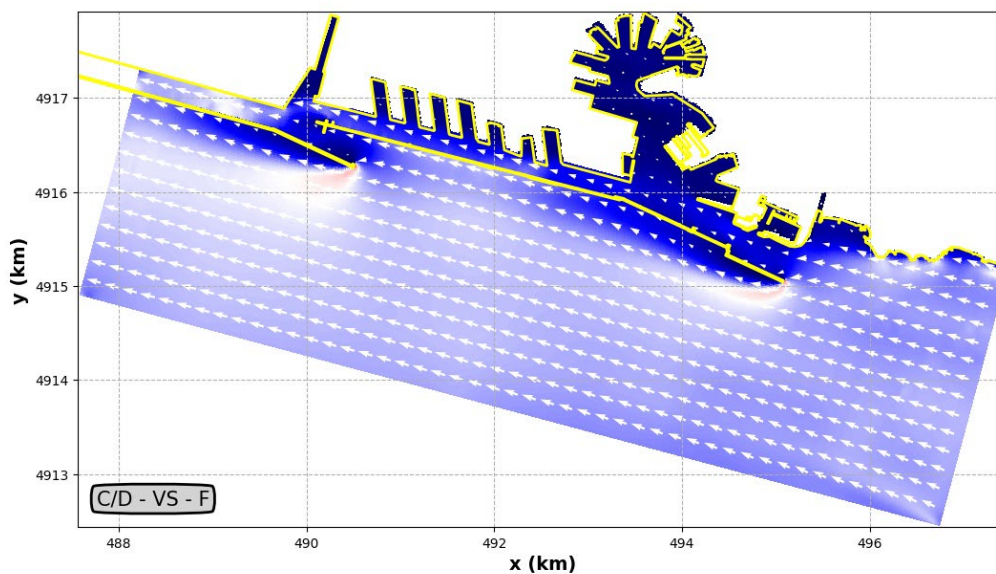


FIGURA 5-2 – CAMPI IDRODINAMICI RELATIVI AL VENTO DI SCIROCCO (VS) FREQUENTE (F - GRAFICO IN ALTO) E RARO (R – GRAFICO IN BASSO) UTILIZZATI PER GLI SCENARI DELLE LAVORAZIONI DI CONSOLIDAMENTO (C) E DRAGAGGIO.

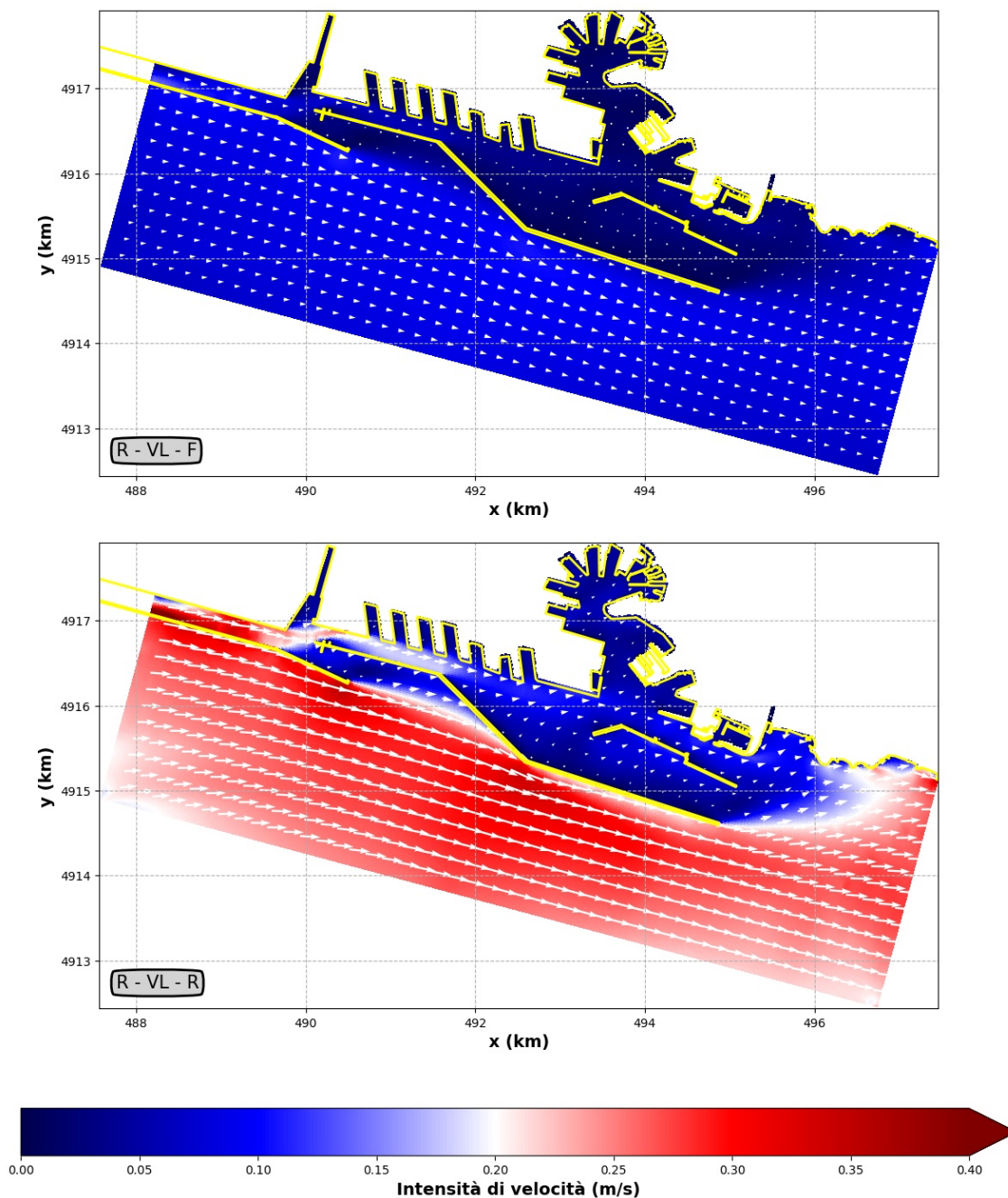


FIGURA 5-3 – CAMPI IDRODINAMICI RELATIVI AL VENTO DI LIBECCIO (VL) FREQUENTE (F - GRAFICO IN ALTO) E RARO (R – GRAFICO IN BASSO) UTILIZZATI PER GLI SCENARI DELLA LAVORAZIONE DI RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE.

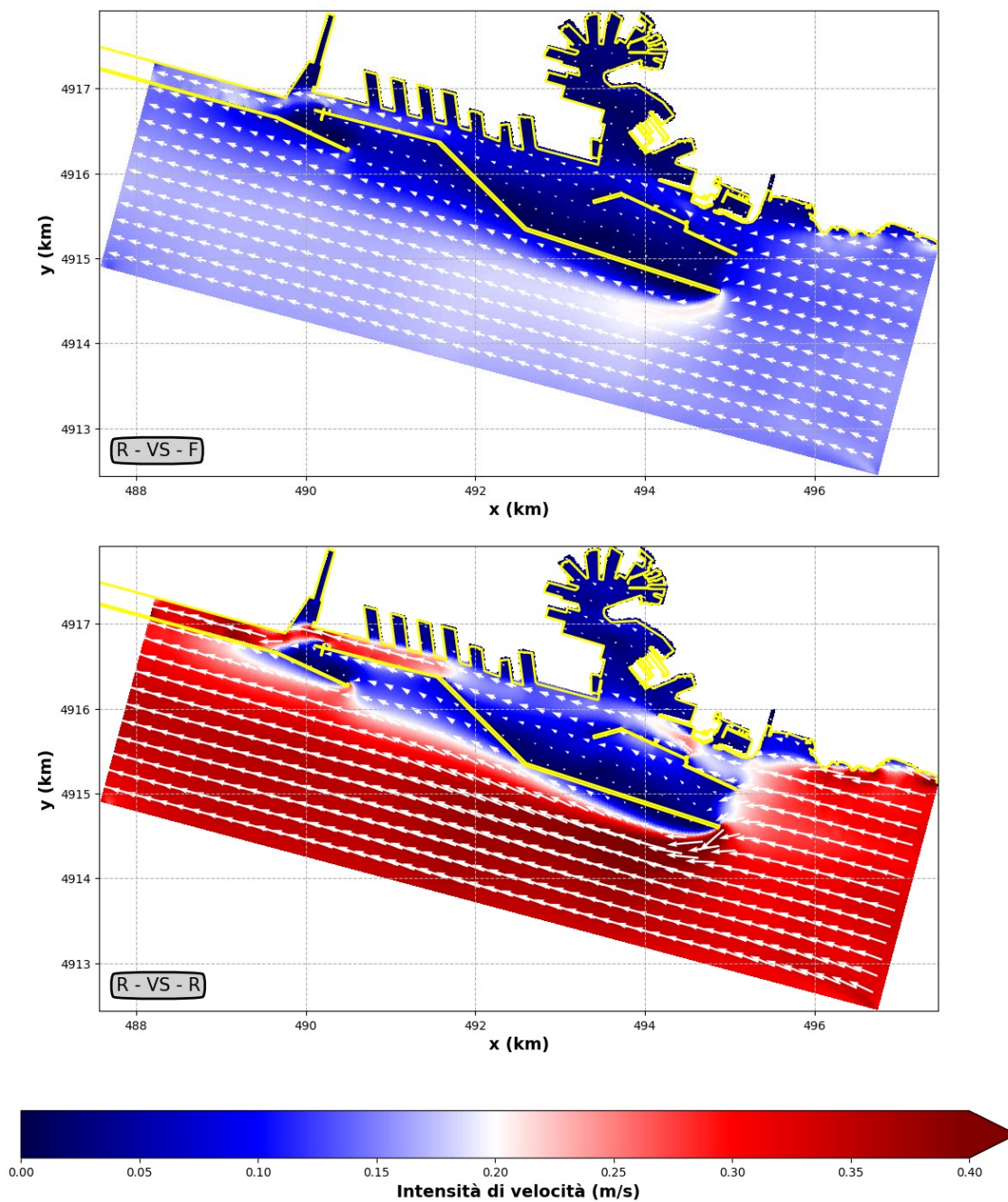


FIGURA 5-4 – CAMPI IDRODINAMICI RELATIVI AL VENTO DI SCIROCCO (VS) FREQUENTE (F - GRAFICO IN ALTO) E RARO (R - GRAFICO IN BASSO) UTILIZZATI PER GLI SCENARI DELLA LAVORAZIONE DI RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE.



Per la condizione anemometrica relativa al vento proveniente dal settore di Libeccio, in configurazione attuale, la struttura principale del campo idrodinamico si presenta pressoché parallela all'asse longitudinale della diga attuale. In corrispondenza del Bacino Sampierdarena si osserva una corrente locale di debole intensità se confrontata con quella a largo della diga esistente.

In configurazione di progetto, le caratteristiche salienti del fenomeno rimangono le stesse con un incremento dell'area interessata da intensità di corrente limitate a causa della presenza della nuova diga foranea.

Per la condizione anemometrica relativa al vento proveniente dal settore di Scirocco, in configurazione attuale, si può osservare che la struttura principale dell'idrodinamica non entra direttamente nel bacino portuale. Essa aggira la testata della diga foranea. All'interno del bacino portuale si osserva una corrente (locale) che si verifica lungo l'asse principale del Bacino Sampierdarena. In configurazione di progetto, le caratteristiche salienti del fenomeno rimangono le stesse con un incremento dell'area interessata da intensità di corrente limitate a causa della presenza della nuova diga foranea.

Per quanto riguarda le intensità di corrente, si può osservare, nella configurazione attuale (configurazione in cui verrà effettuato il dragaggio e il consolidamento dei terreni di fondazione), che nel Bacino Sampierdarena si verificano correnti di intensità circa pari a 0.05-0.15 m/s forzate da venti di Libeccio rari e a circa 0.10-0.20 m/s nel caso di venti di Scirocco rari. L'intensità scende a circa 0.05 m/s nel caso di venti di Libeccio frequenti e a 0.10 m/s nel caso di venti di Scirocco frequenti. All'imboccatura di Levante si osservano correnti dello stesso ordine di grandezza, con punte di circa 0.40 m/s per venti di Scirocco rari. Al largo della diga esistente, le correnti hanno un'intensità comprese tra 0.10 m/s (condizioni frequenti di Libeccio) e 0.35 m/s (condizioni rare di Scirocco). Nella configurazione di progetto (configurazione in cui verrà effettuata la rimozione della diga esistente) si evidenzia l'area ridossata dalla nuova diga che è interessata da correnti di debole intensità. In linea del tutto generale, la dispersione e diffusione dei traccianti passivi è congruente con le caratteristiche salienti dei campi idrodinamici.

A mero titolo esemplificativo, la Figura 5-5 mostra i risultati ottenuti per lo scenario C-VS-F-P2-T (Consolidamento – Vento di Scirocco Frequente – Punto 2 di lavorazione) e la Figura 5-6 per lo scenario C-VL-F-P2-T (Consolidamento – Vento di Libeccio Frequente – Punto 2 di lavorazione).

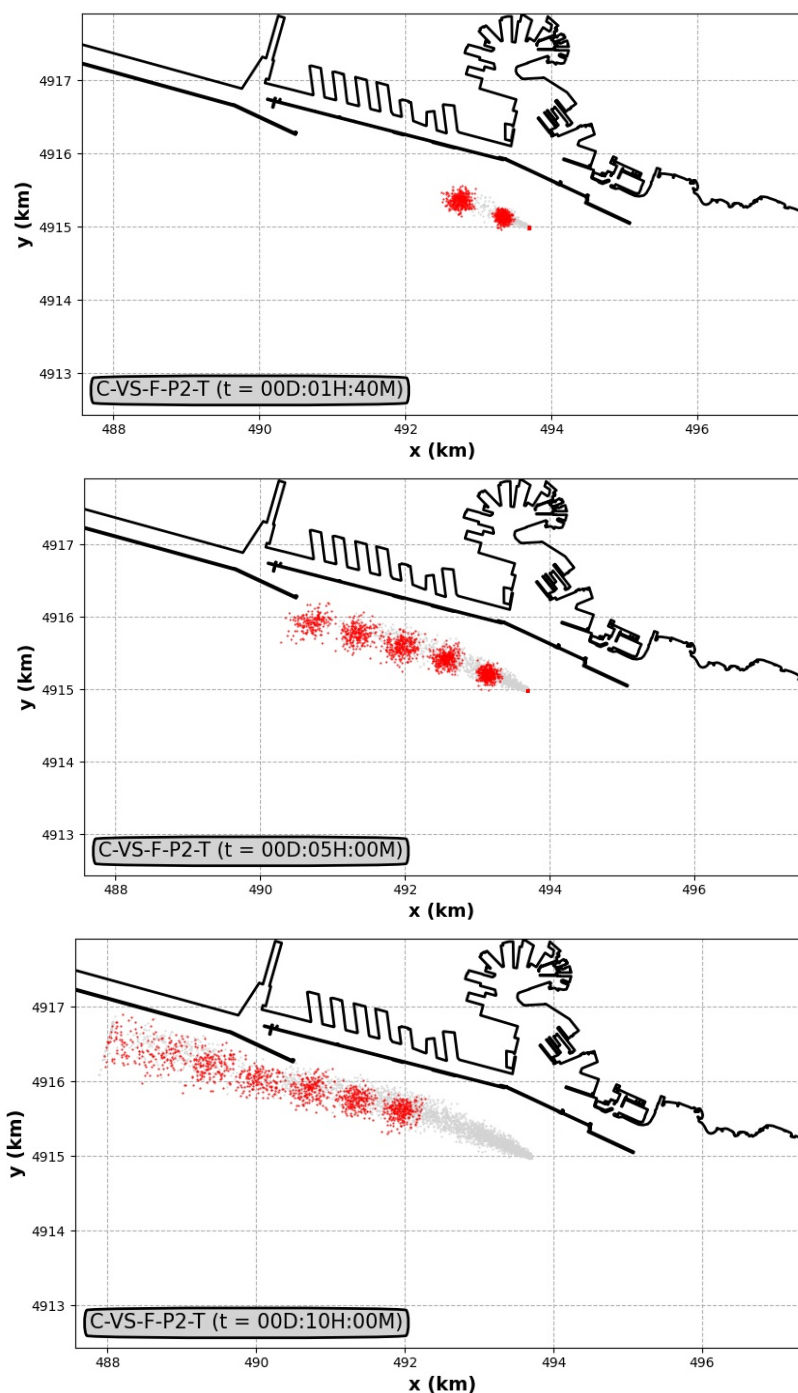


FIGURA 5-5 – ESEMPIO DI RISULTATO NUMERICO OTTENUTO PER LA LAVORAZIONE DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE NEL CASO DI VENTO FREQUENTE PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO. I SIMBOLI CHIARI INDICANO I TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO.

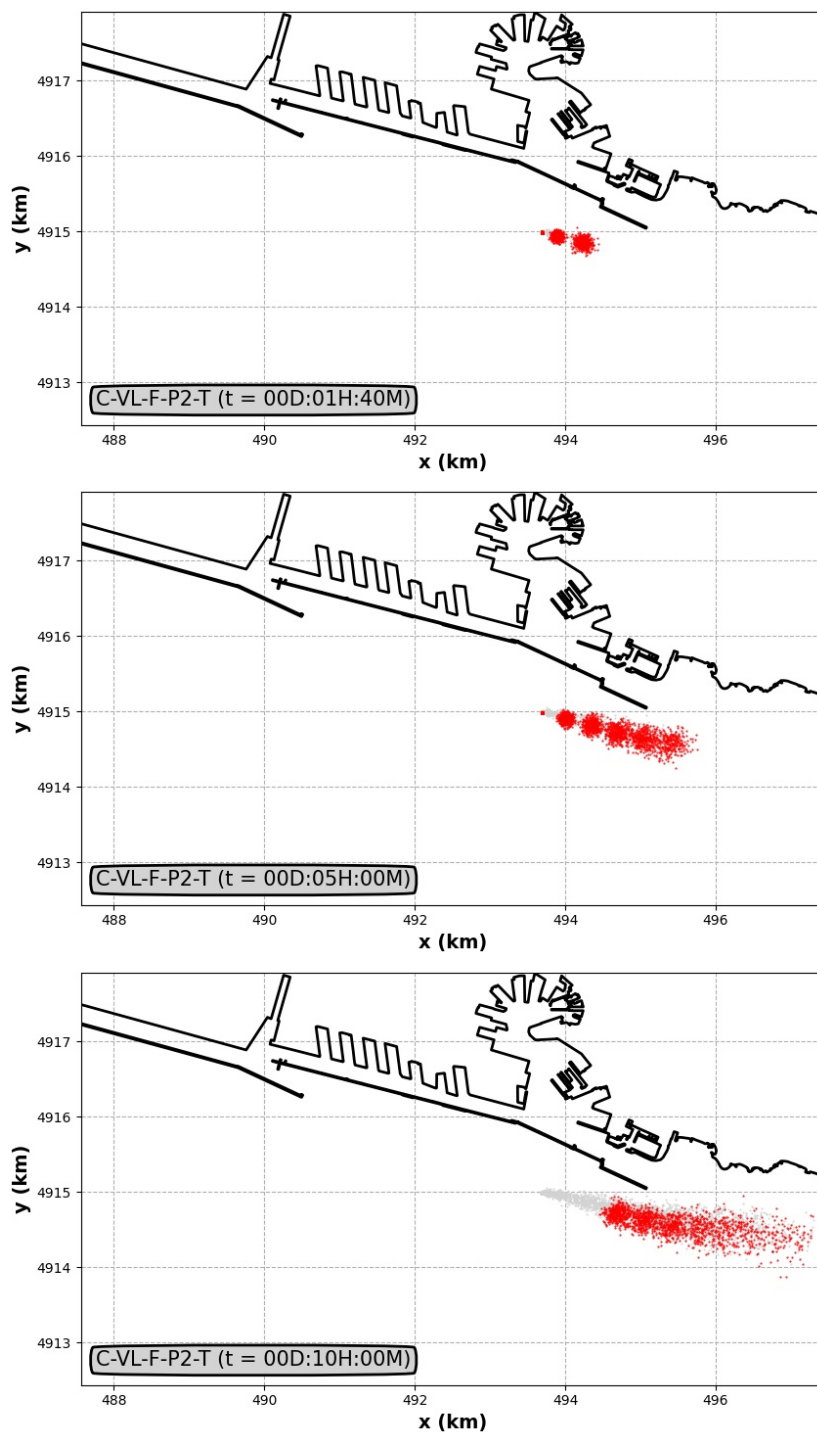


FIGURA 5-6 – ESEMPIO DI RISULTATO NUMERICO OTTENUTO PER LA LAVORAZIONE DI CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE NEL CASO DI VENTO FREQUENTE PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO. I SIMBOLI CHIARI INDICANO I TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO.

L'analisi comparativa qualitativa dei due risultati permette di apprezzare l'effetto della dispersione dei sedimenti risospesi e della componente stocastica del processo di diffusione. È altresì possibile apprezzare la capacità del metodo di cogliere il fenomeno della deposizione al fondo.

I paragrafi che seguono illustrano nel dettaglio i risultati ottenuti per ognuna delle lavorazioni considerate. I risultati sono riportati, in forma grafica, nel paragrafo 8.7.

## **5.2. Attività di consolidamento del fondale**

La lavorazione del consolidamento del fondale è prevista nella prima fase del progetto in epigrafe. Pertanto, la configurazione geometrica delle opere corrisponde a quella attuale. Con riferimento ai risultati mostrati nel capitolo 7, si può osservare, in linea generale, che la concentrazione media (sulla profondità) assume valori particolarmente piccoli a causa degli elevati valori della profondità. Pur considerando i sedimenti sospesi in corrispondenza del fondo, si osservano valori molto piccoli, al più trascurabili rispetto alla torbidità naturale delle acque, come desunto dalle attività di monitoraggio della rete regionale.

Nel dettaglio, per gli scenari di vento proveniente dal settore di Scirocco si può osservare che la concentrazione decade velocemente allontanandosi dall'area di sversamento del materiale necessario al consolidamento. I sedimenti sospesi non entrano nell'area portuale, ma continuano il proprio percorso (casuale) all'esterno delle opere foranee. Per gli scenari relativi al vento proveniente dal settore di Libeccio, i sedimenti sospesi sono diretti lungo il litorale posto a Est del Porto, in direzione delle aree sensibili. Tuttavia, come già sottolineato, le concentrazioni (e quindi la torbidità) sono previste essere molto piccole a meno che nella diretta adiacenza dell'area di sversamento.

Si osserva che la concentrazione dei sedimenti sospesi è lievemente maggiore nel caso di vento frequente rispetto ai risultati ottenuti per vento raro. L'area interessata dalla nube di torbida è lievemente più estesa nel caso di venti frequenti rispetto a quanto stimato per vento raro. Tali osservazioni trovano giustificazione nel processo fisico di dispersione e diffusione che, per venti più intensi, favorisce la migrazione (e quindi la diminuzione della concentrazione) della nube di torbida.

Osservazioni analoghe sono applicabili alle caratteristiche del processo di deposizione sul fondo dei sedimenti inizialmente risospesi. In questo caso, eventi rari tendono ad aumentare la distanza dall'area di sversamento in cui si depositano i sedimenti.

### 5.3. Attività di rimozione dello scanno di imbasamento

La lavorazione di rimozione dello scanno di imbasamento della diga attuale è prevista dopo la realizzazione della diga in progetto. Pertanto, la configurazione geometrica delle opere corrisponde a quella di progetto. Con riferimento ai risultati mostrati nel capitolo 7, si può osservare, in linea generale, che la concentrazione media (sulla profondità) assume valori piuttosto limitati, seppur superiori rispetto a quelli ottenuti per l'attività di consolidamento dei terreni di fondazione. Si può osservare che, come ordine di grandezza, la concentrazione raggiunge localmente valori massimi inferiori a 0.3 mg/l. Può osservarsi che i sedimenti sospesi rimangono confinati all'interno dell'area portuale.

Per gli scenari di vento proveniente dal settore di Scirocco si può osservare che la concentrazione decade velocemente, come atteso, allontanandosi dall'area di rimozione rimanendo, come anticipato, confinata all'interno dell'area portuale. Anche per gli scenari relativi al vento proveniente dal settore di Libeccio, i sedimenti sospesi rimangono confinati all'interno dell'area portuale, anche per la localizzazione più orientale della sorgente di risospensione (scenari P3).

A causa del confinamento all'interno dell'area portuale, non si osservano variazioni significative tra i risultati ottenuti per gli scenari rari e gli scenari frequenti, fatta eccezione per la scala temporale del fenomeno.

In termine di deposizione dei sedimenti risospesi, si può osservare che essa rimane confinata, come atteso, all'interno dell'area portuale.

### 5.4. Attività di dragaggio

La lavorazione del dragaggio dell'area portuale (Bacino Sampierdarena e avamporto) è prevista nella prima fase del progetto in epigrafe. Pertanto, in analogia con la lavorazione di consolidazione, la configurazione geometrica delle opere corrisponde a quella attuale. Con riferimento ai risultati mostrati nel capitolo 7, si può osservare, in linea generale, che la concentrazione media (sulla profondità) assume valori di due ordini di grandezza superiori rispetto a quanto osservato per la lavorazione di consolidamento. Nonostante ciò, si può osservare che la concentrazione raggiunge localmente valori massimi inferiori a 1 mg/l. Come atteso, l'applicazione di tecniche ambientali di dragaggio induce una diminuzione dell'intensità della sorgente e, quindi, della concentrazione dei sedimenti sospesi. In tal caso, la concentrazione non supera, localmente, un valore circa pari a 0.5 mg/l. Inoltre, può osservarsi che i sedimenti sospesi rimangono sostanzialmente confinati all'interno dell'area portuale per cui possono escludersi fenomeni di eventuale

*Pag. 44 di 74*

sovrapposizione con i sedimenti risospesi a causa delle attività di consolidamento del fondale previsti a largo delle opere foranee.

Per gli scenari di vento proveniente dal settore di Scirocco si può osservare che la concentrazione decade velocemente allontanandosi dall'area di dragaggio rimanendo, come anticipato, confinata all'interno dell'area portuale. Anche per gli scenari relativi al vento proveniente dal settore di Libeccio, i sedimenti sospesi rimangono confinati all'interno dell'area portuale fatta eccezione per il punto di dragaggio relativo all'area dell'avamposto. In tal caso, i sedimenti sospesi sono dispersi e diffusi verso Est, ma raggiungono velocemente la costa prima di dirigersi verso le aree sensibili.

Non si osservano variazioni significative se gli scenari rari vengono confrontati con gli scenari frequenti. Ovviamente, tale affermazione non può riferirsi alla scala temporale del fenomeno.

In termine di deposizione dei sedimenti risospesi, si può osservare che essa rimane confinata, come atteso, all'interno dell'area portuale.

## 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 cantiere che prevedono la movimentazione di materiale sedimentario. Nello specifico, tali lavorazioni riguardano: il consolidamento del fondale per la posa in opera dello scanno di imbasamento dei cassoni che costituiranno la nuova diga foranea; la rimozione dello scanno di imbasamento della diga attuale. A tali due lavorazioni, si aggiunge il dragaggio del Bacino Sampierdarena e dalla zona dell'avamposto di Levante che prevede il refluitamento del sedimento dragato nei cassoni cellulari della nuova diga foranea.

Con meccanismi diversi di risospensione del materiale movimentato, ovvero rimaneggiato (nel caso del consolidamento del fondale), tali attività possono indurre la generazione di una nube di torbidità che, in presenza dell'idrodinamica locale, possono essere soggette 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 che possono potenzialmente avere effetti sulle aree sensibili poste nei dintorni dell'area di intervento (a circa 2 km a Est dall'imboccatura di Levante, a circa 10 km dall'imboccatura di Ponente e in corrispondenza delle spiagge cittadine).

L'approccio utilizzato, di tipo lagrangiano, permette di riprodurre l'effetto delle modalità operative delle attività di movimentazione dei sedimenti per tutte le lavorazioni oggetto dell'indagine (rimozione, consolidamento e dragaggio). E' da sottolineare che l'attuale livello di progettazione (fattibilità tecnico-economica) ha richiesto il ricorso a ragionevoli assunzioni sulle modalità operative.

L'applicazione dell'approccio ha reso possibile la ricostruzione della distribuzione spazio-temporale della concentrazione di solidi sospesi per la valutazione degli impatti attesi. 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 marittime poiché, alla luce delle alte profondità (superiori ai 15 m in

tutte le aree di intervento) e del limitato valore del pescaggio dei mezzi marittimi utilizzati, si ritiene tale contributo del tutto trascurabile.

Nel rispetto delle finalità dello studio, sono stati riprodotti diversi scenari (per un totale di 40 simulazioni numeriche). Sono state prese in considerazione due condizioni di vento, volte a rappresentare i campi idrodinamici indotti da venti provenienti dal settore di Libeccio e dal settore di Scirocco caratterizzate da intensità del vento che rappresentano condizioni frequenti e condizioni rare. Per ogni lavorazione sono riprodotte tre diverse aree in cui avvengono le attività di lavorazione con l'obiettivo di identificare le condizioni peggiori rispetto alla migrazione della nube di torbida.

L'analisi dei risultati ottenuti permette di osservare quanto segue.

- L'attività di consolidamento dei terreni di fondazione, in linea generale, induce la generazione (e successiva migrazione) di una nuvola di torbida caratterizzata da una concentrazione trascurabile rispetto alla torbidità naturale delle acque (così come desunto dal monitoraggio della rete regionale).
- L'attività di rimozione dello scanno di imbasamento della diga attuale induce una concentrazione mediamente molto limitata, pur se superiore a quella ottenuta per l'attività di consolidamento. I sedimenti sospesi rimangono confinati all'interno dell'area portuale e, pertanto, sono destinati ad essere drenati verso il largo soggetti ai meccanismi di ricambio idrico del Porto.
- L'attività di dragaggio induce concentrazioni superiori rispetto alle lavorazioni di consolidamento dei terreni di fondazione e rimozione dello scanno di imbasamento della diga attuale. Tuttavia, le concentrazioni stimate risultano limitate ed accettabili già a distanza limitata dalle aree di escavo. I sedimenti sospesi rimangono sostanzialmente confinati all'interno dell'area portuale per cui possono escludersi fenomeni di eventuale sovrapposizione con i sedimenti risospesi a causa delle attività di consolidamento del fondale previsti a largo delle opere foranee. Fa eccezione, nel caso di venti provenienti dal settore di Libeccio, il dragaggio dell'area dell'avamposto. In tal caso, i sedimenti sospesi sono dispersi e diffusi al di fuori dell'area portuale, ma raggiungono velocemente la costa prima di dirigersi verso le aree sensibili localizzate più a Est. Al fine di limitare i sedimenti risospesi causati dal dragaggio dell'avamposto che riescono a spostarsi verso Est in presenza di vento di Libeccio, si è verificato che l'impiego di una draga meccanica di tipo ambientale riesce a ridurre drasticamente la quantità di materiale disponibile al campo lontano riducendo di conseguenza eventuali impatti sulle coste adiacenti.



## **7. RISULTATI NUMERICI**

Nelle pagine seguenti vengono riportati i risultati grafici dello studio.

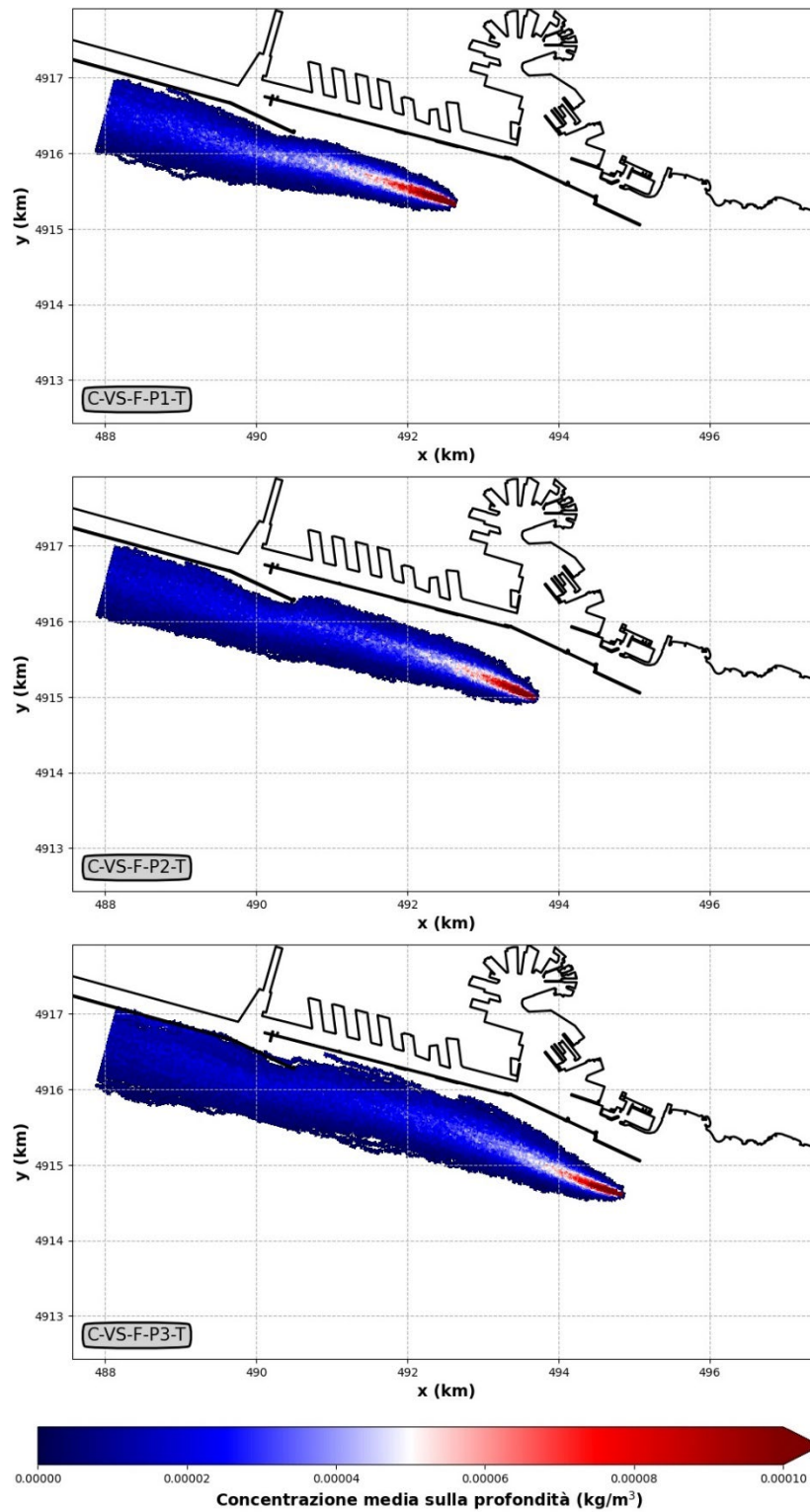


FIGURA 7-1 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

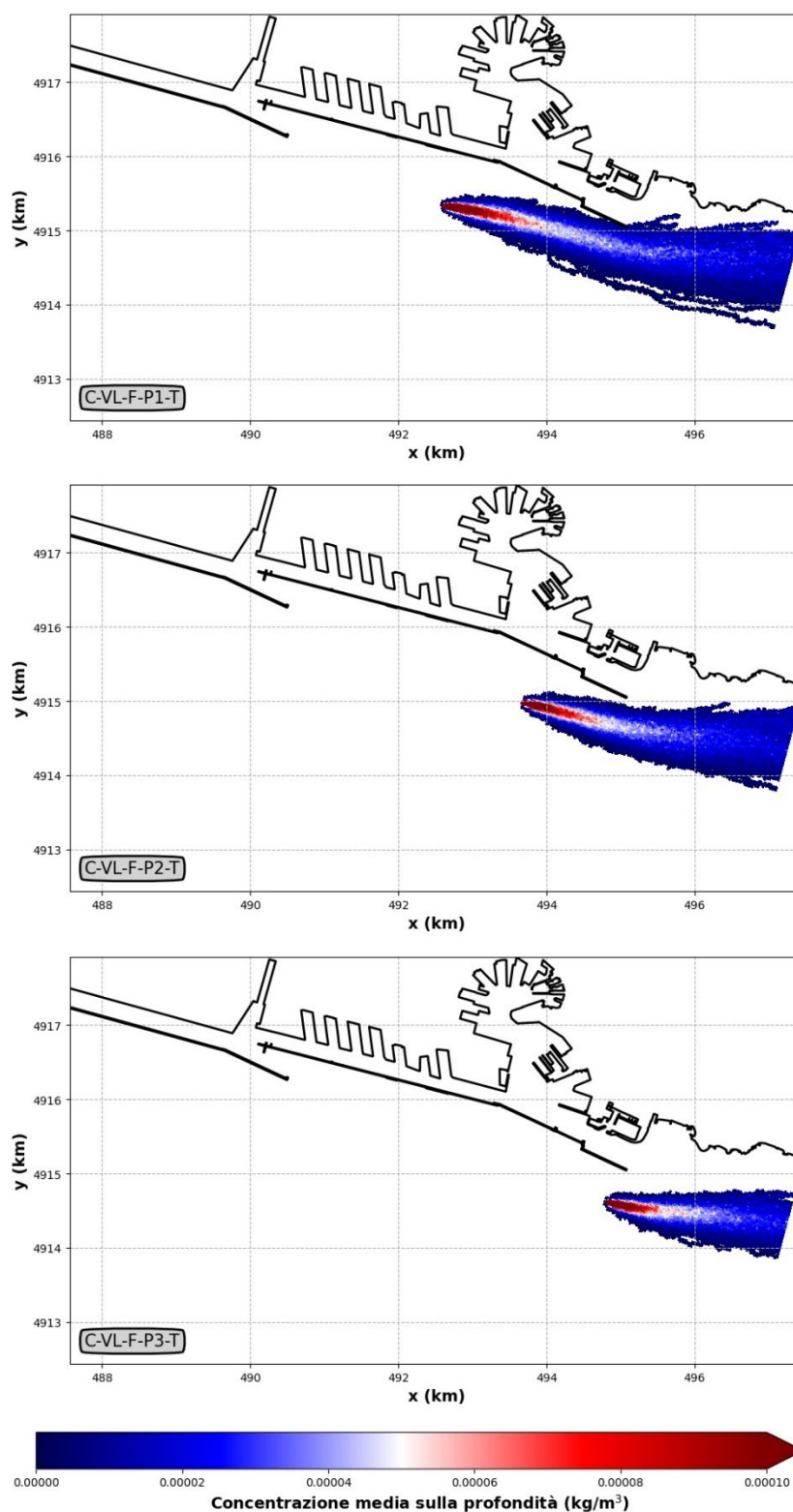


FIGURA 7-2 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ ( $\text{KG/M}^3$ ).

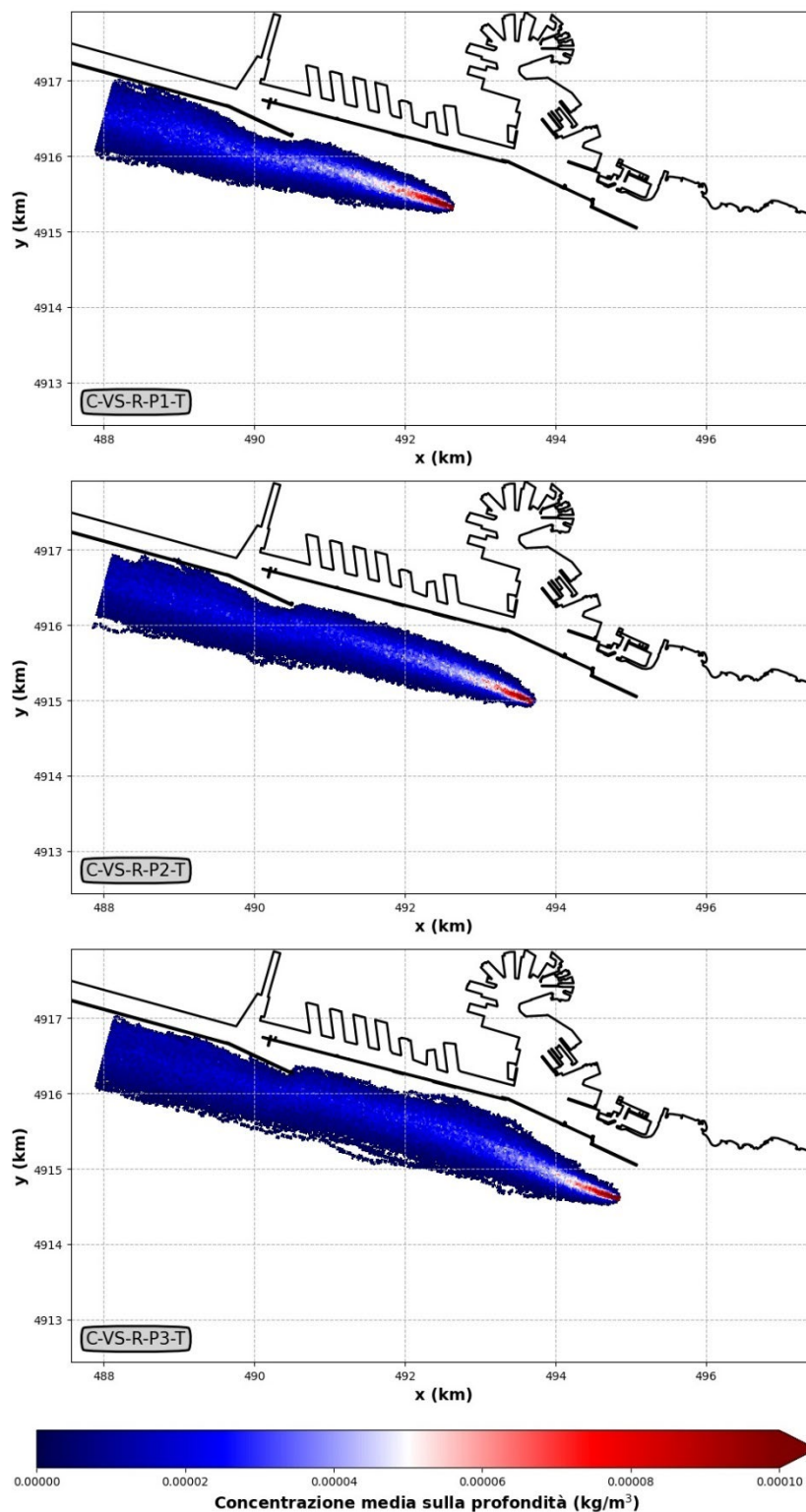


FIGURA 7-3 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

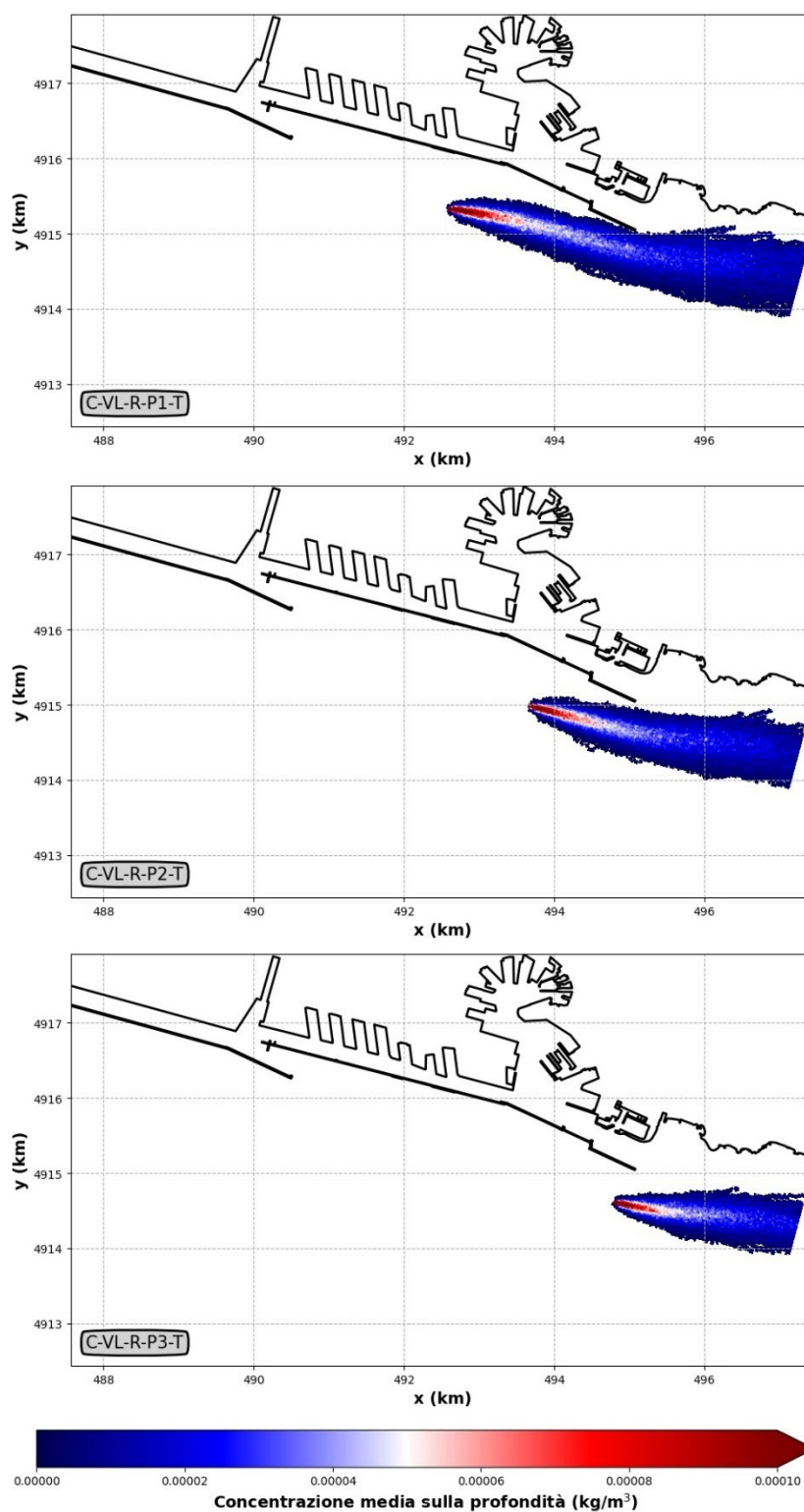


FIGURA 7-4 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

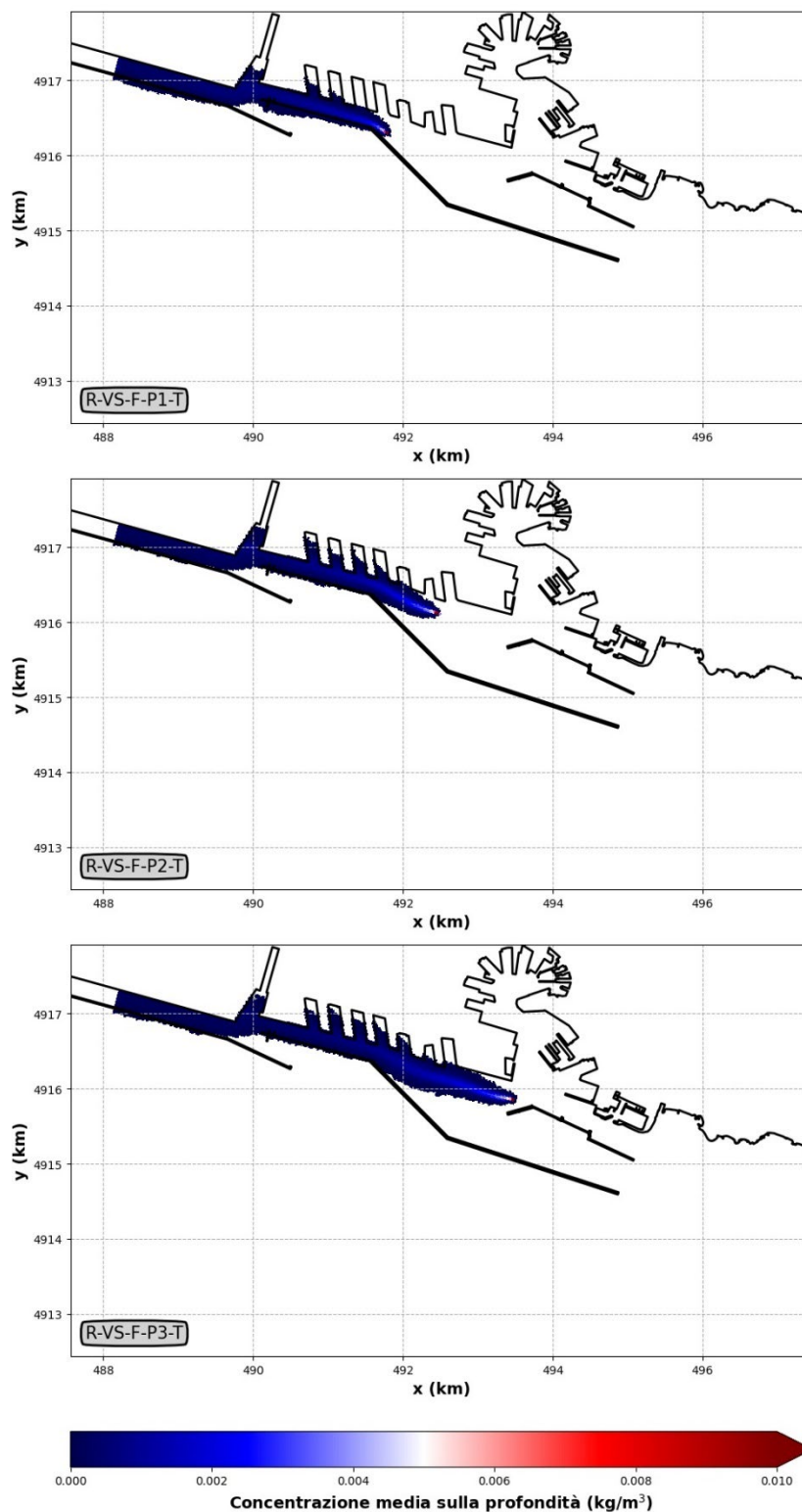


FIGURA 7-5 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

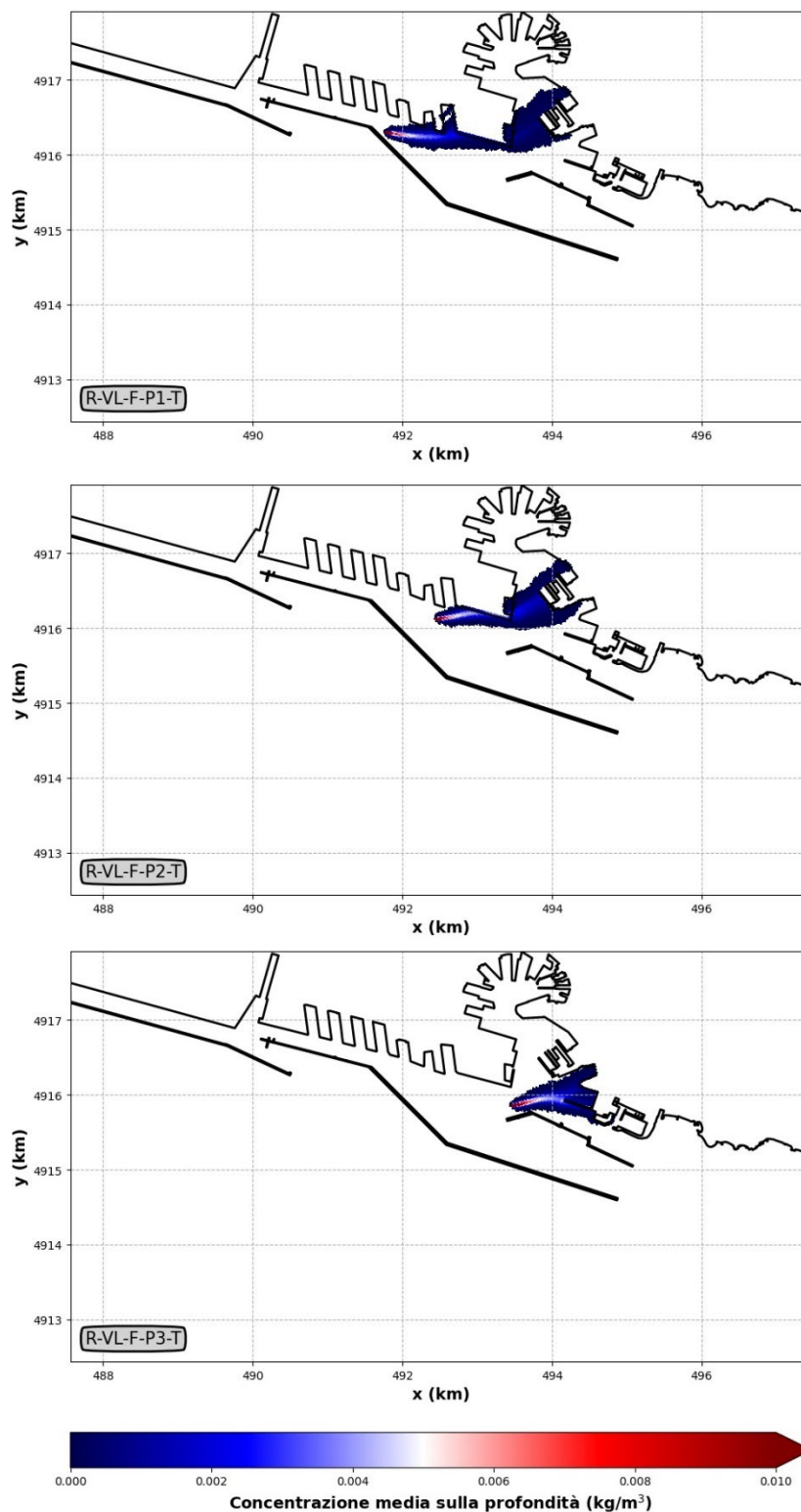


FIGURA 7-6 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

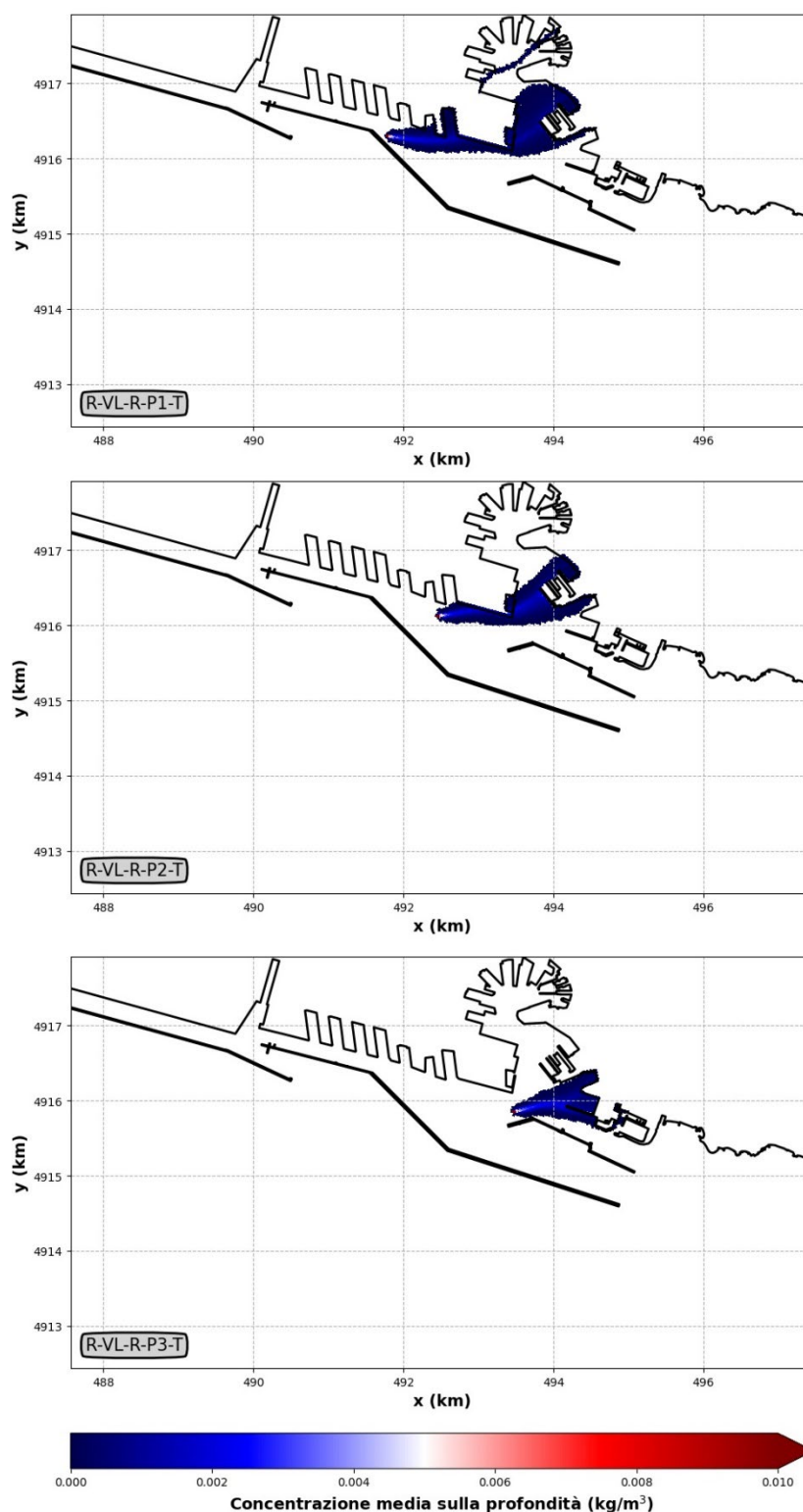


FIGURA 7-7 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).



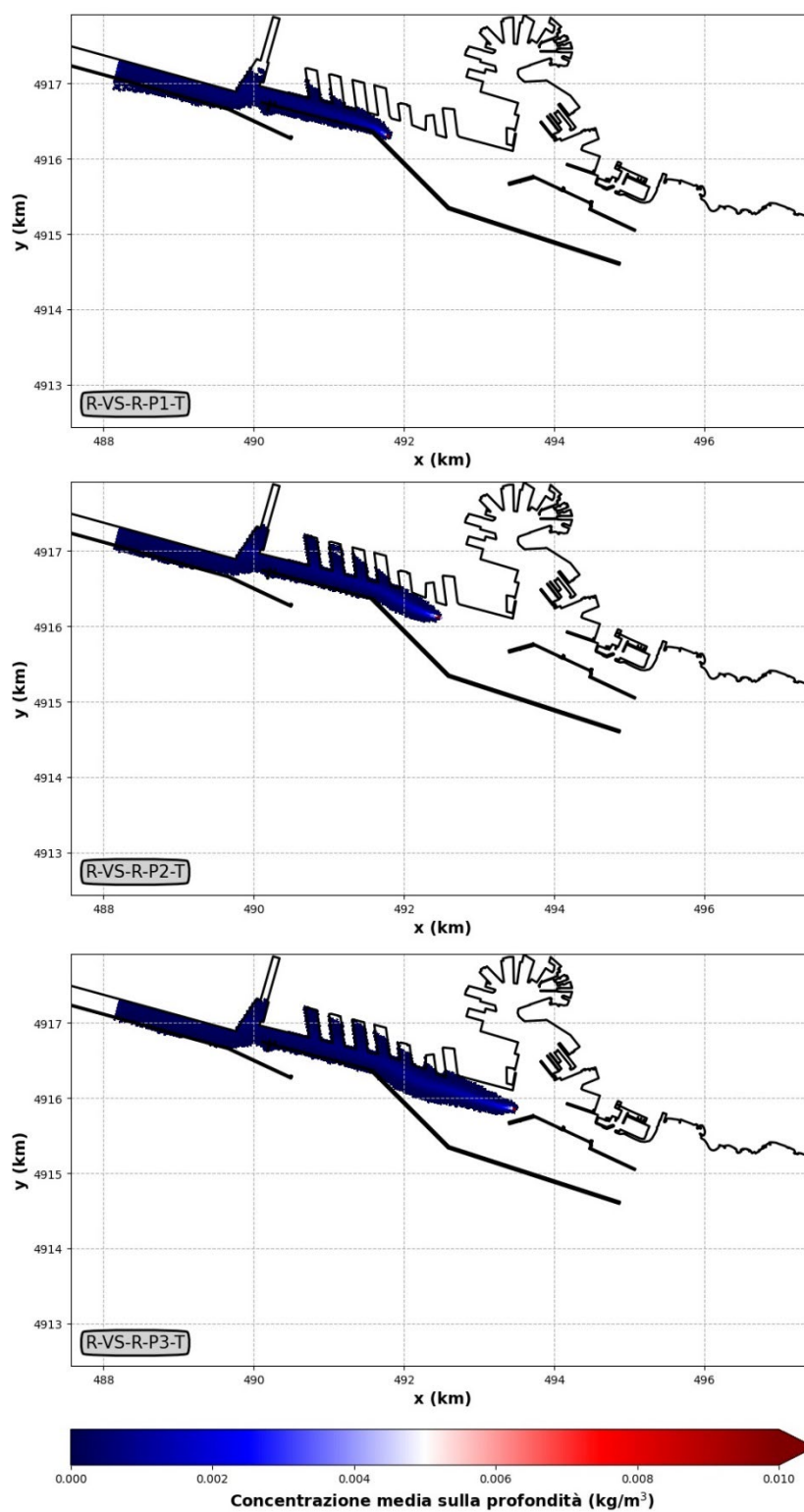


FIGURA 7-8 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

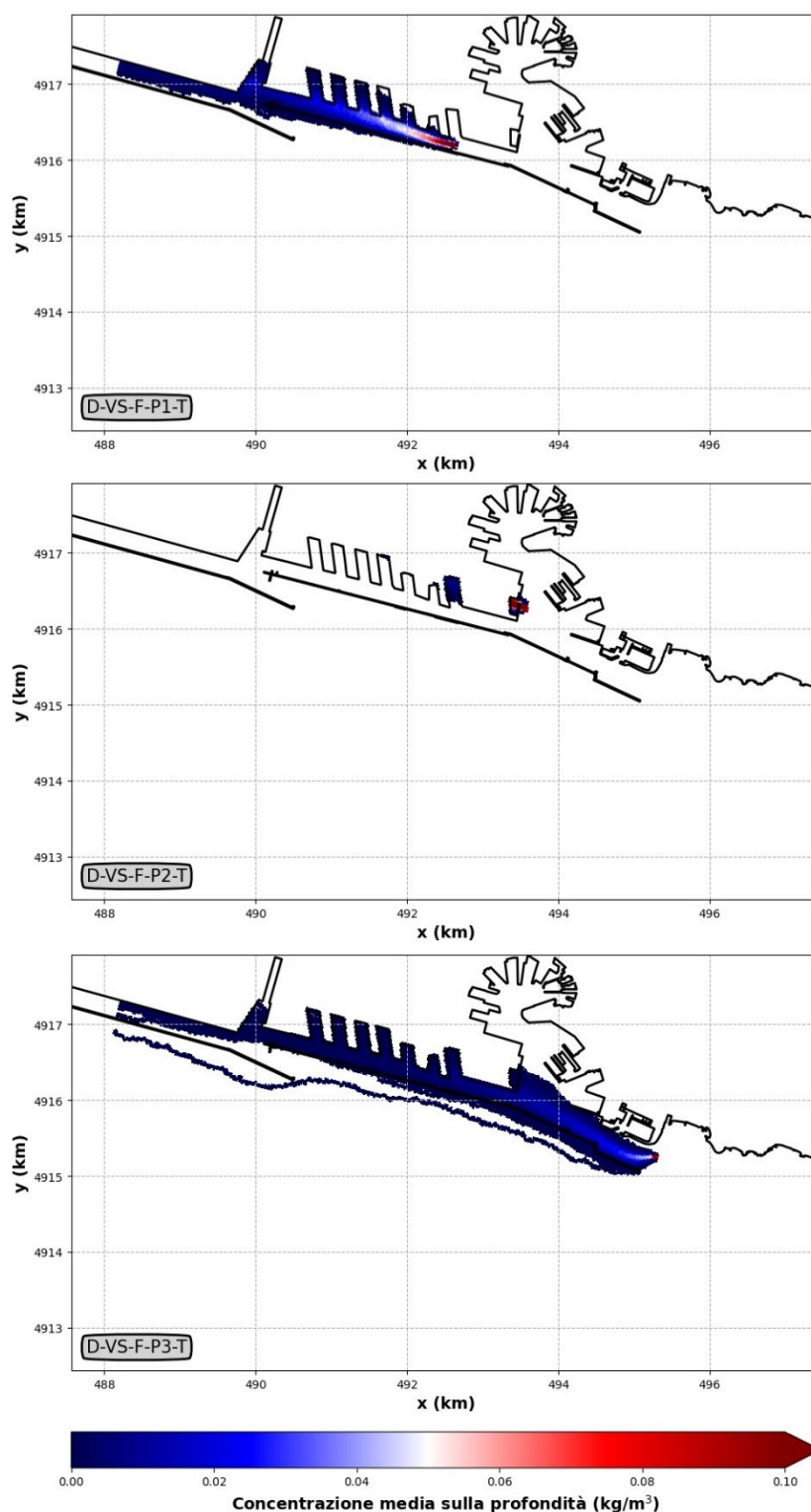


FIGURA 7-9 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ ( $\text{KG/M}^3$ ).

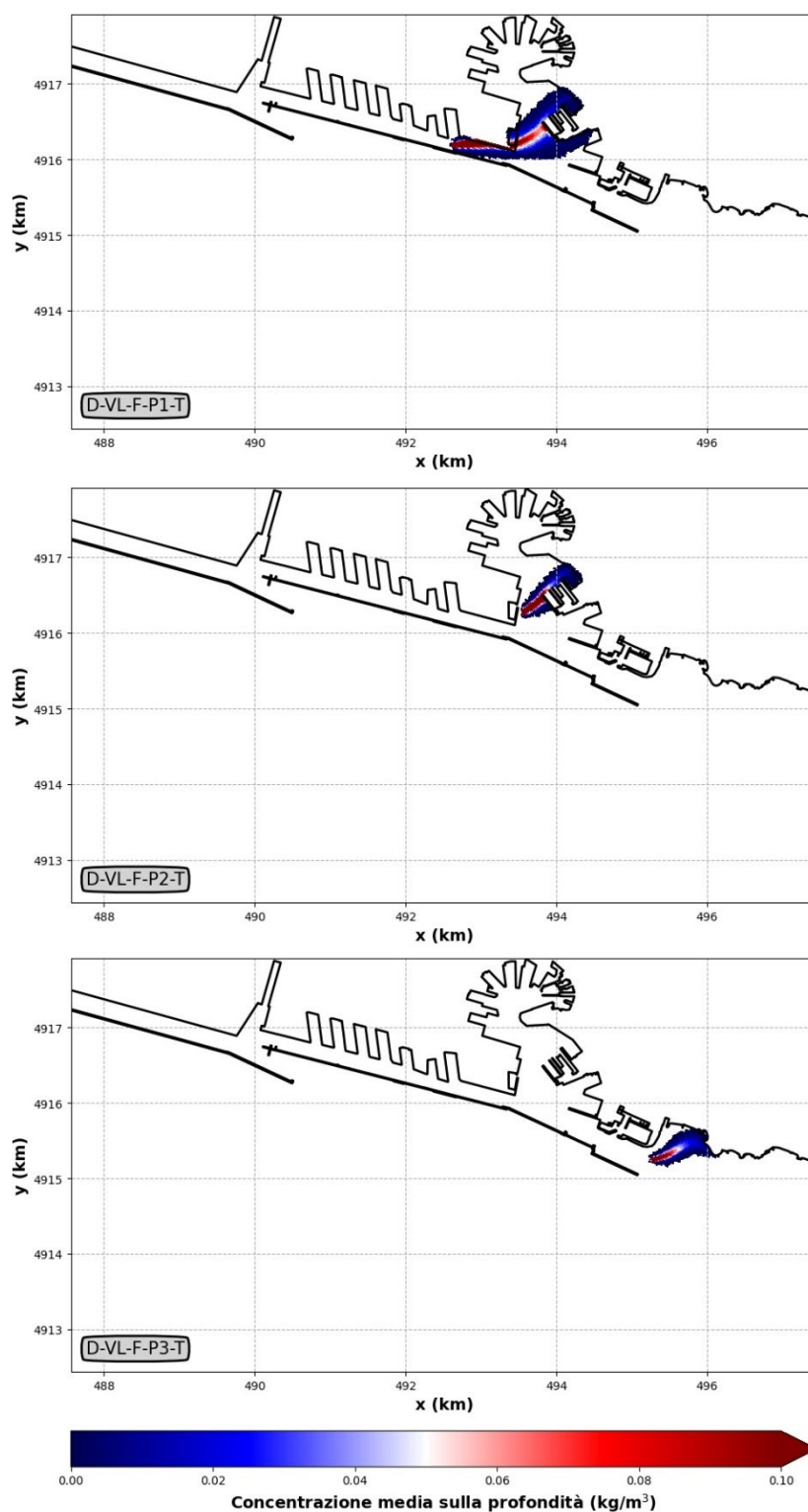


FIGURA 7-10 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

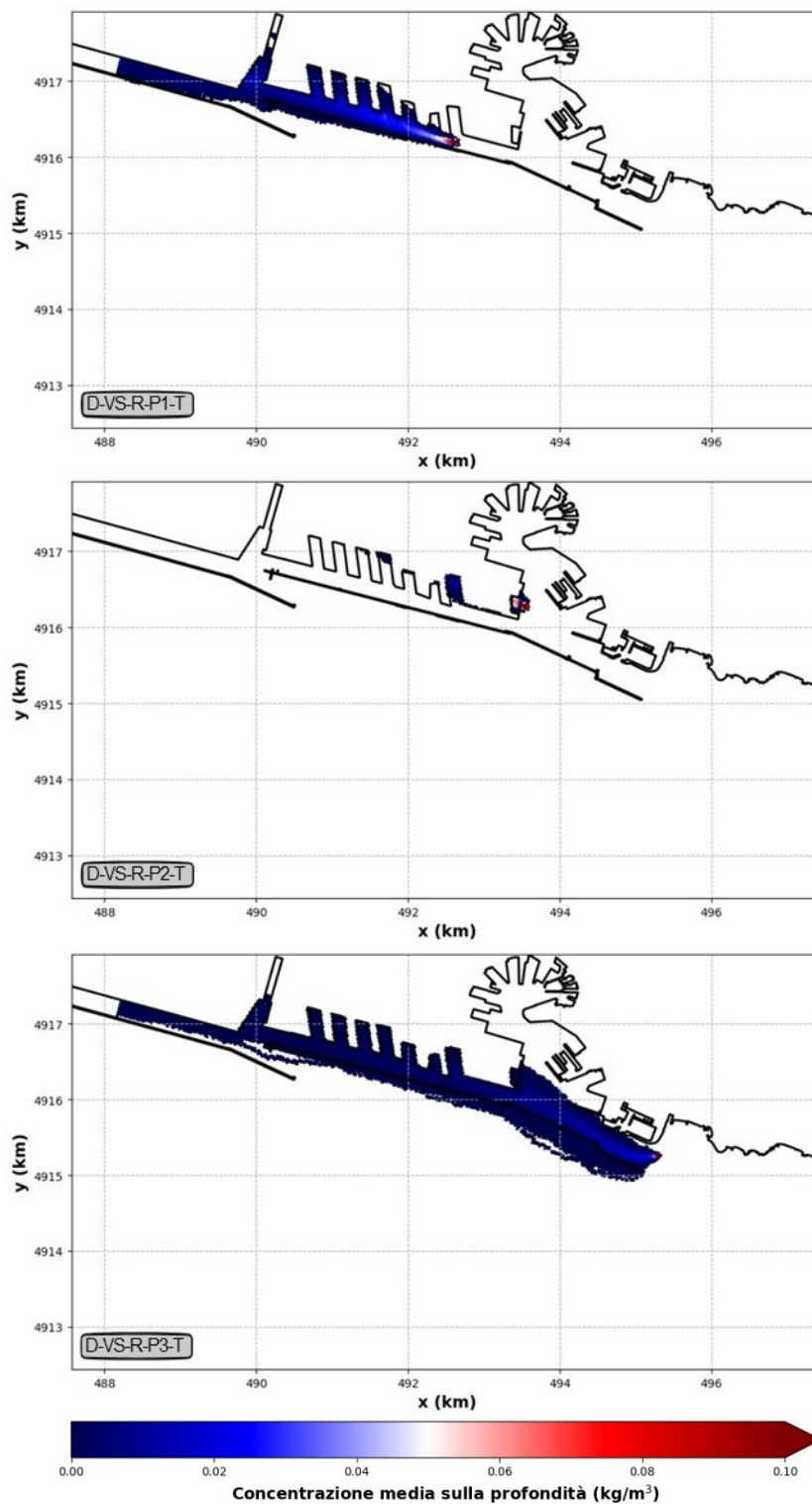


FIGURA 7-11 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

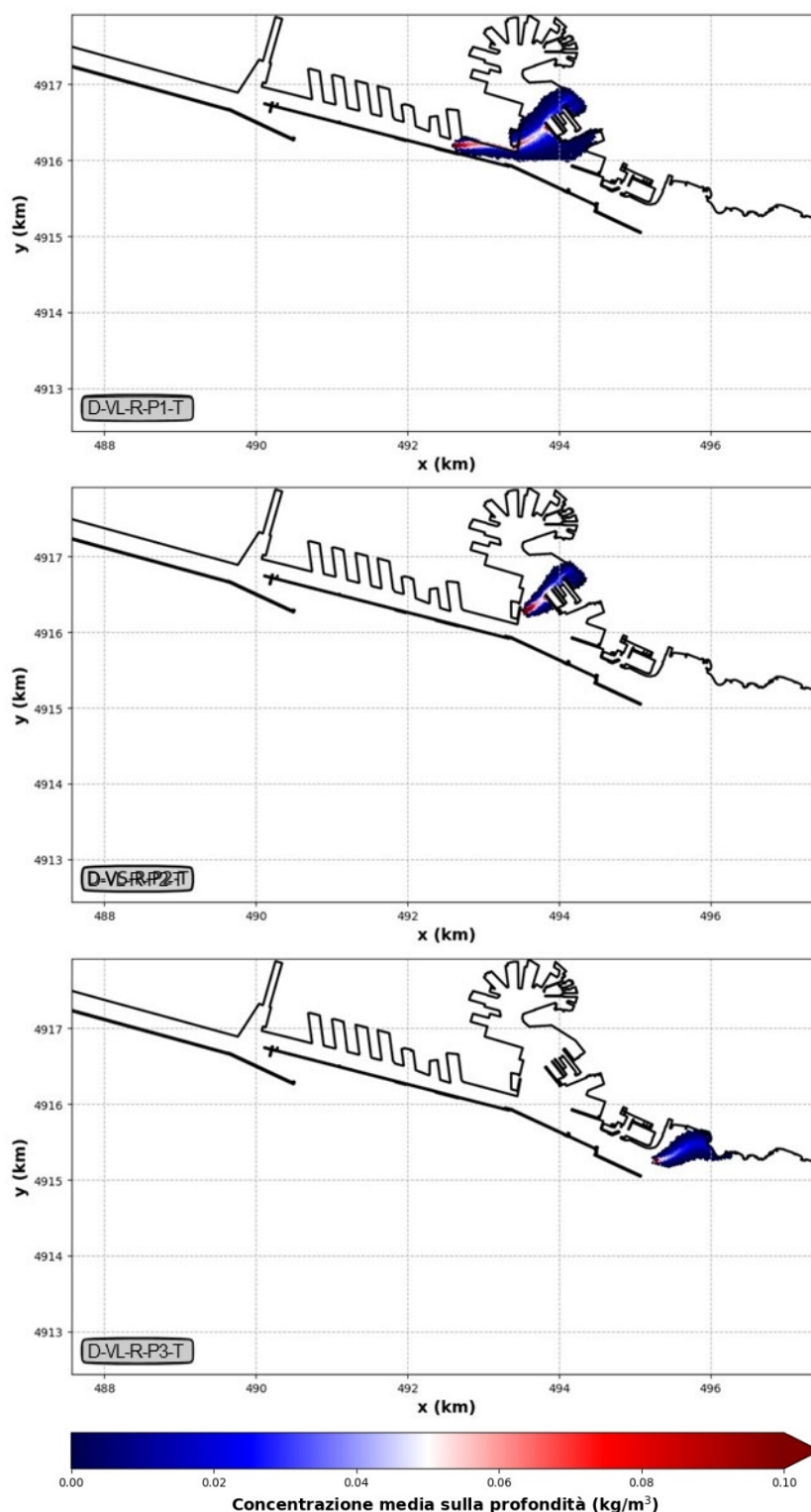


FIGURA 7-12 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ ( $\text{KG/M}^3$ ).

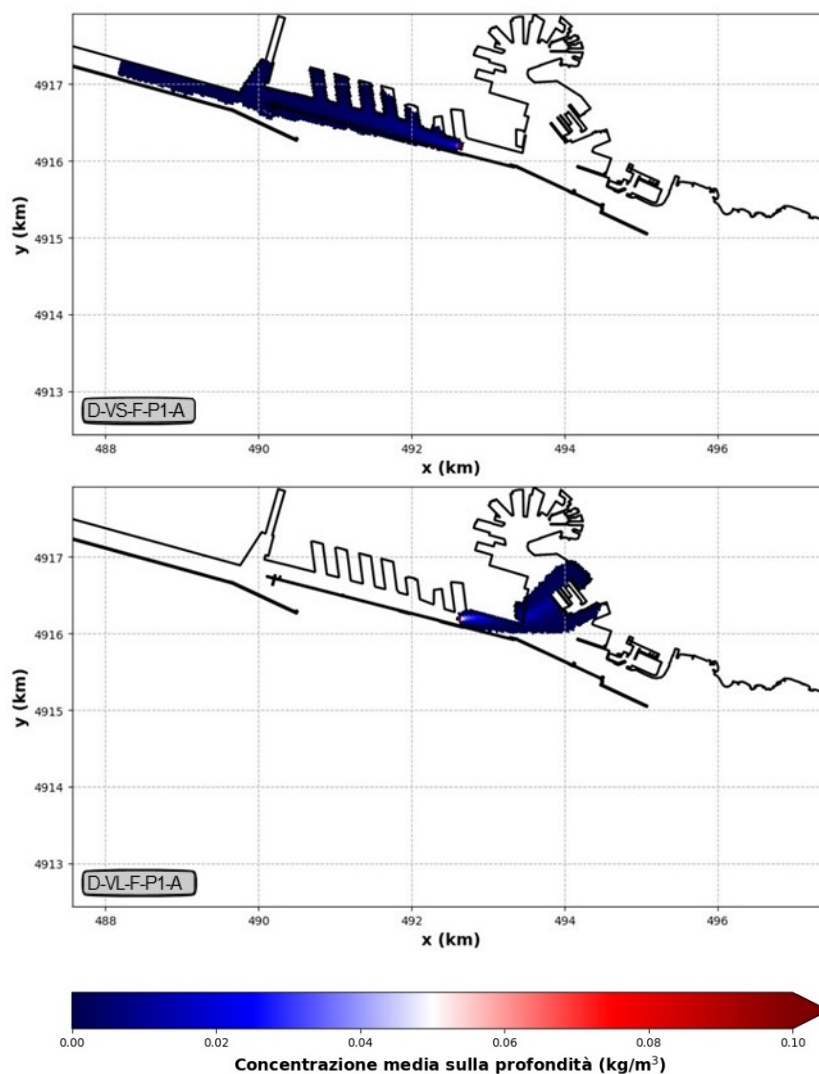


FIGURA 7-13 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA AMBIENTALE (A). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS) E DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

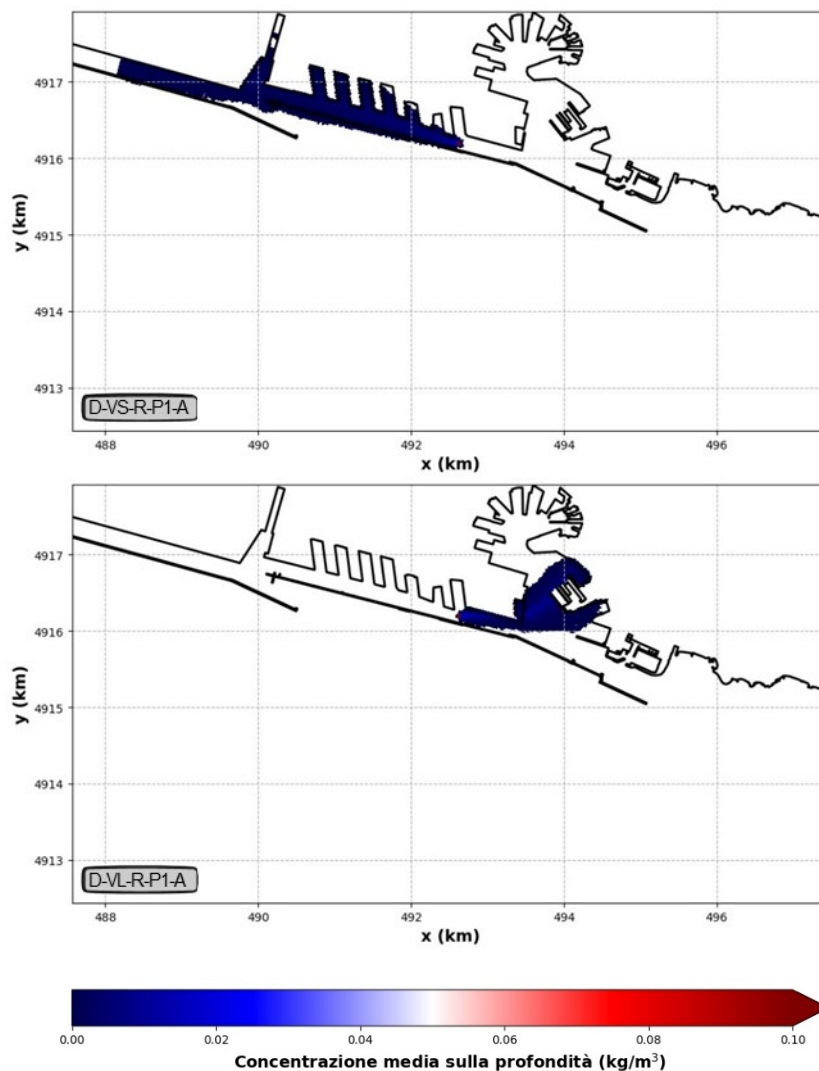


FIGURA 7-14 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA AMBIENTALE (A). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS) E DI LIBECCIO (VL). RISULTATI NUMERICI IN TERMINI DI CONCENTRAZIONE MEDIA SULLA PROFONDITÀ (KG/M<sup>3</sup>).

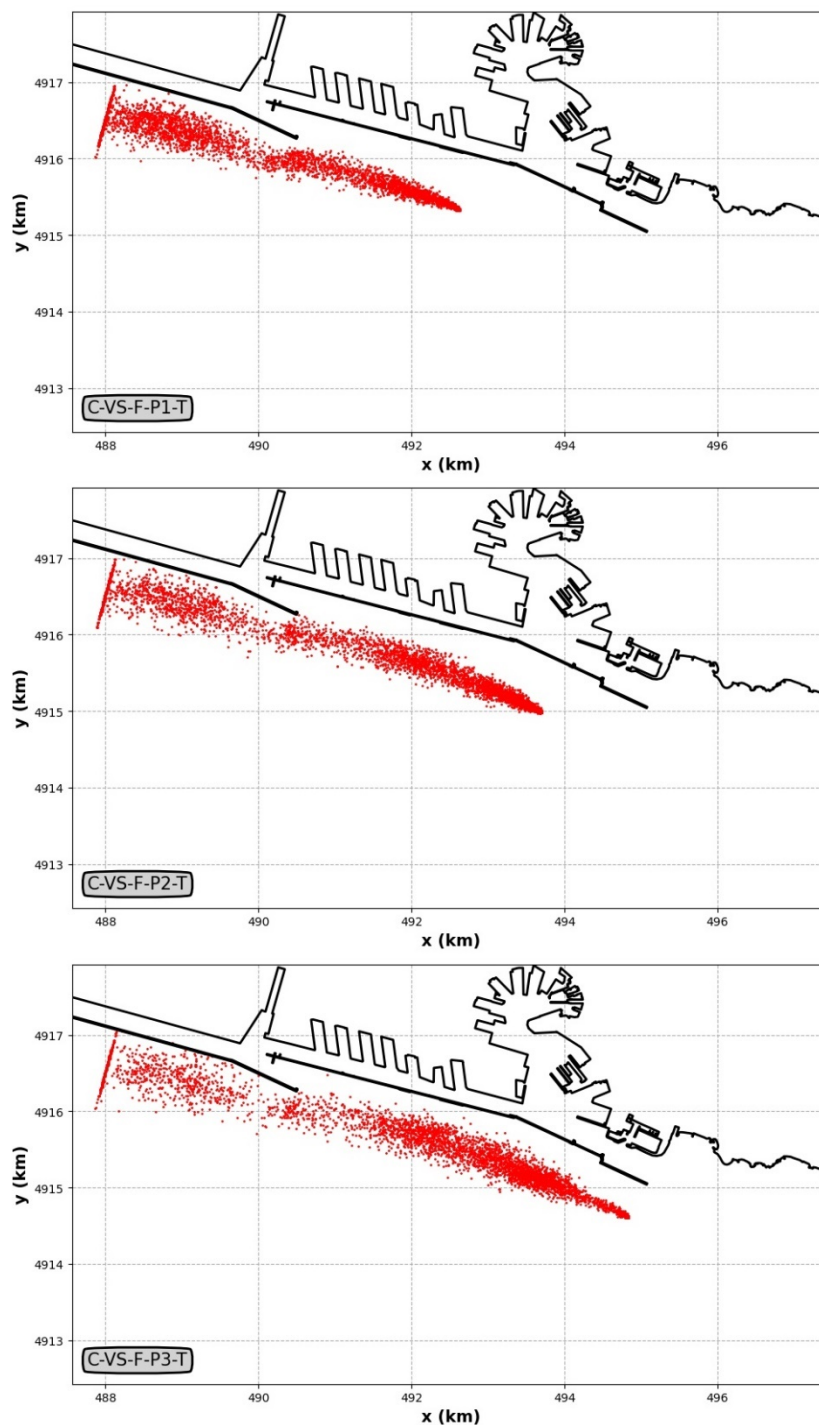


FIGURA 7-15 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO.



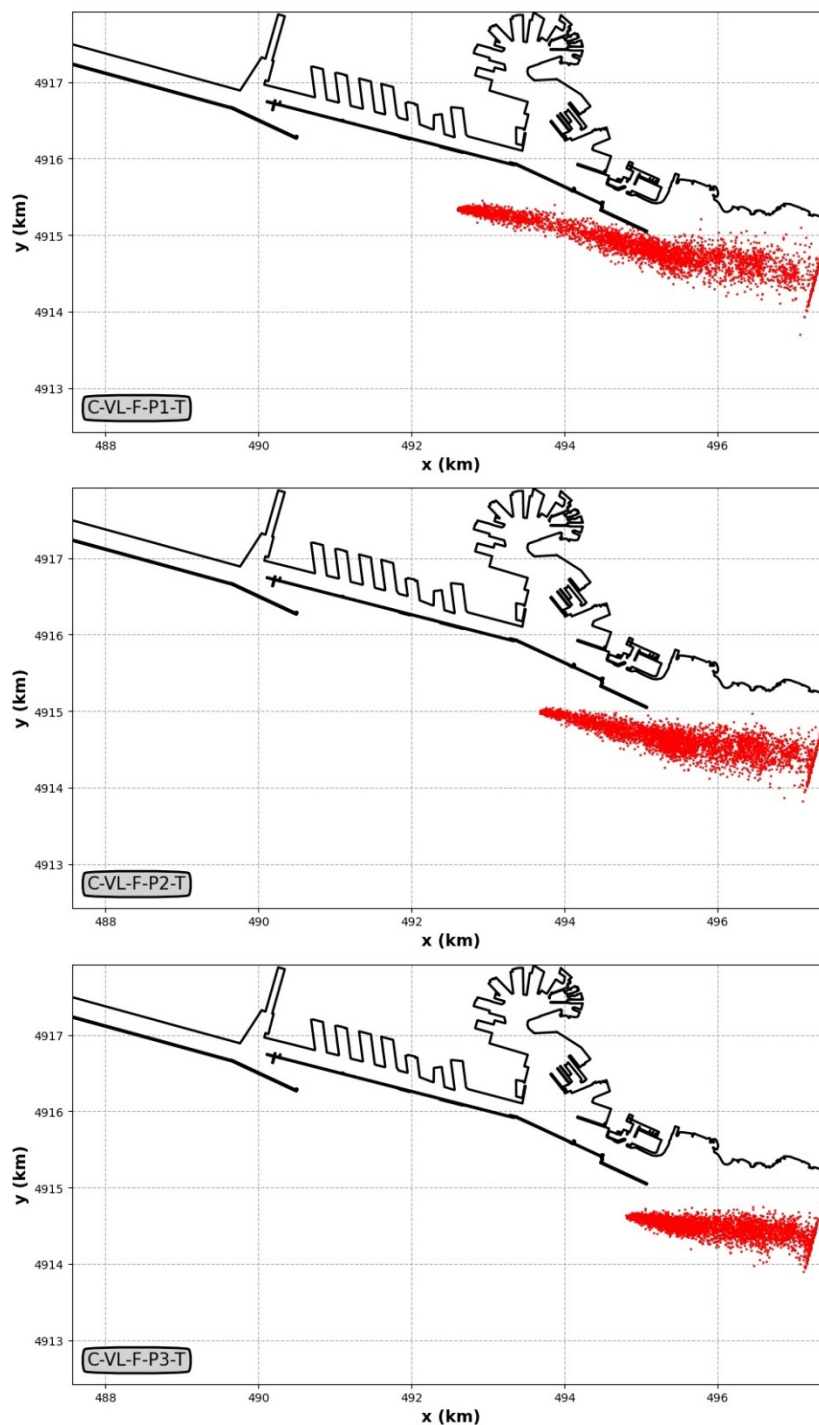


FIGURA 7-16 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO.

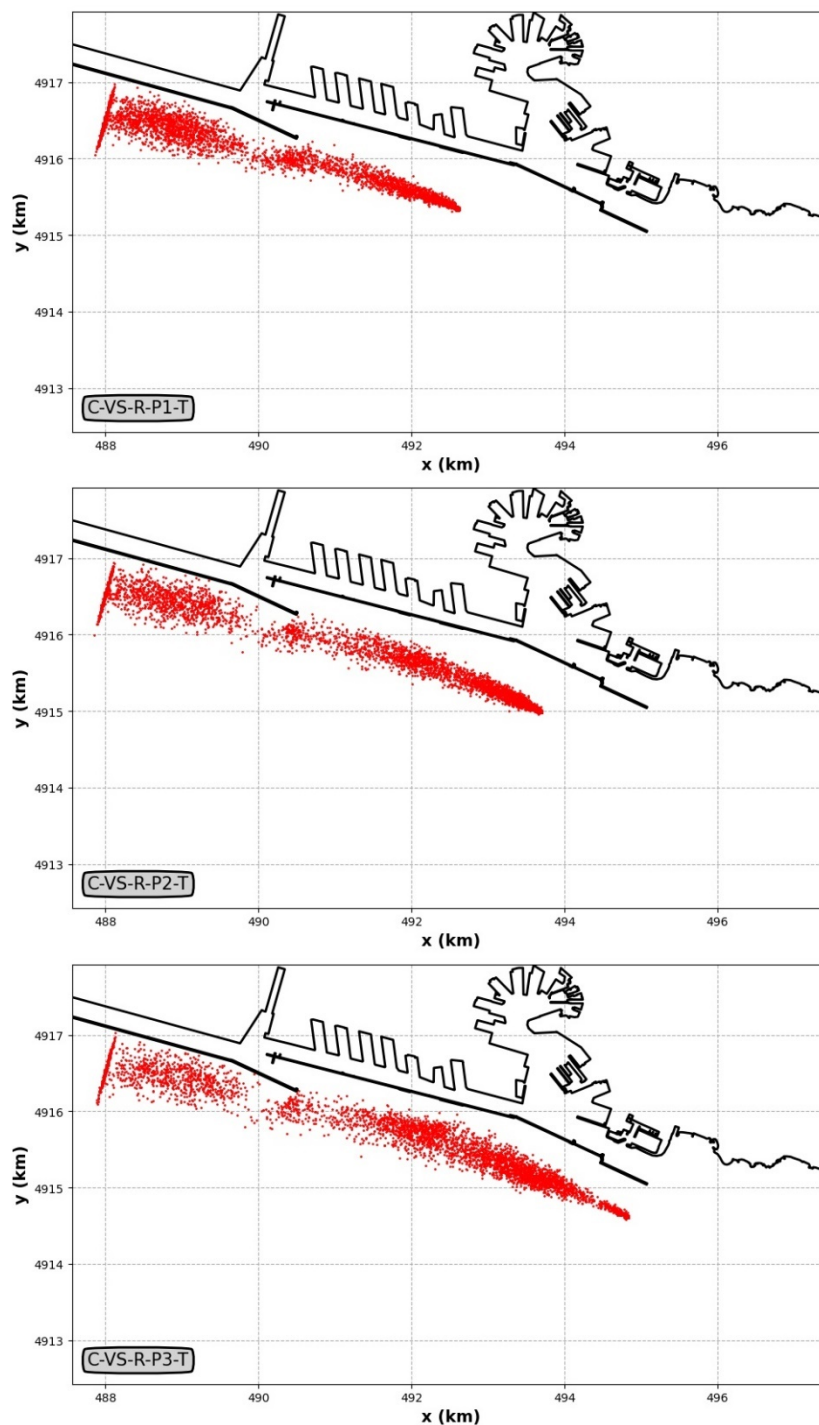


FIGURA 7-17 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

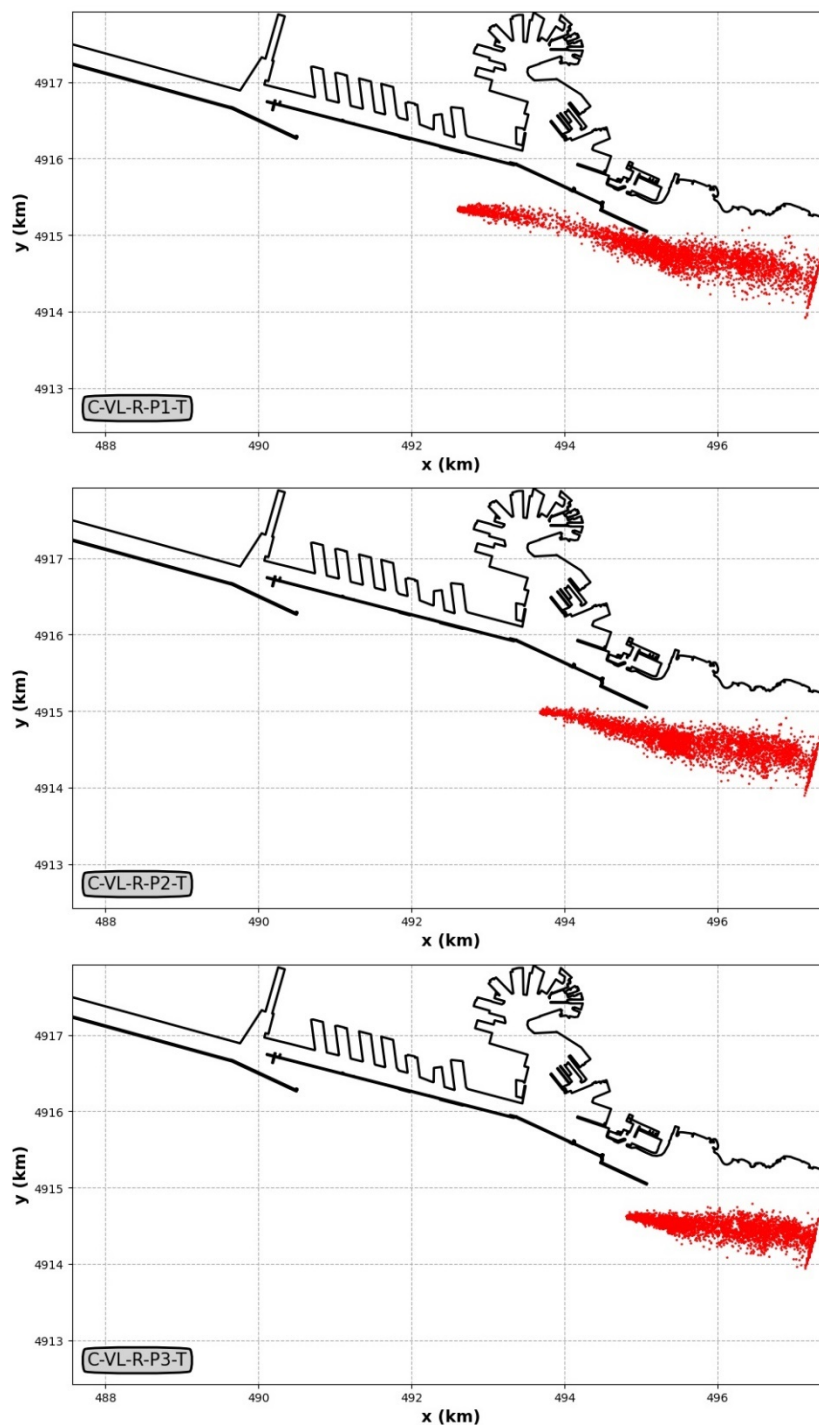


FIGURA 7-18 – CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE (C). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

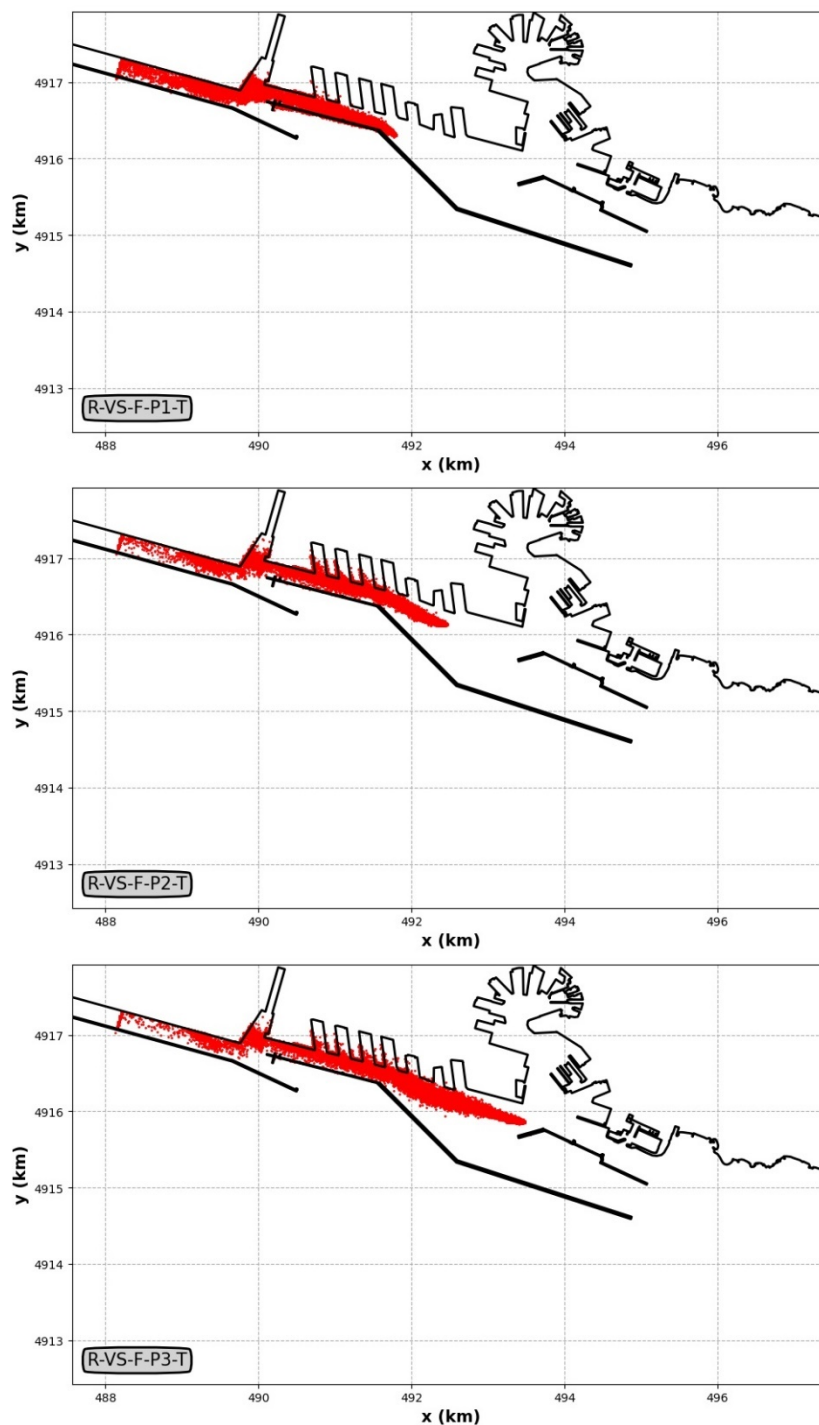


FIGURA 7-19 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

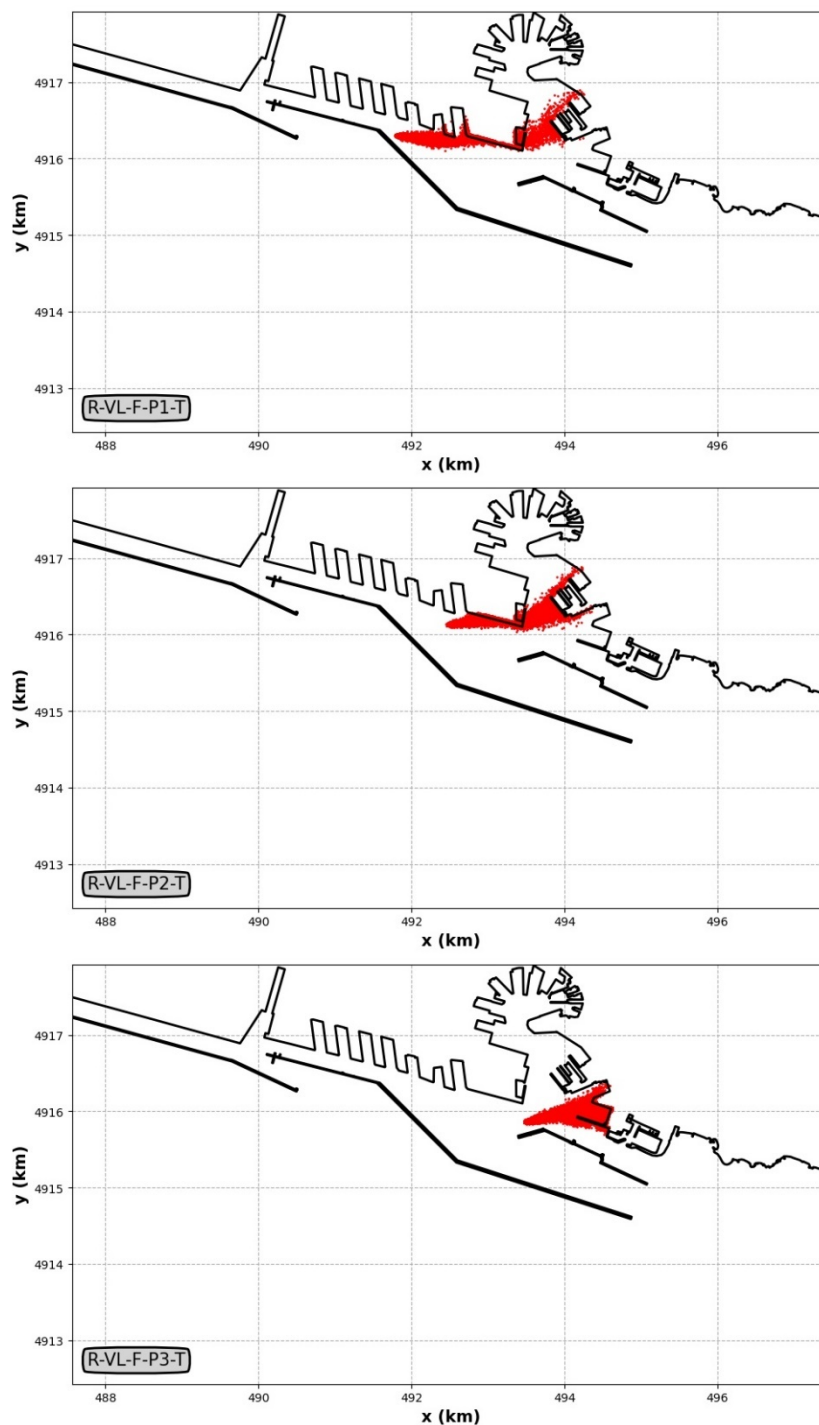


FIGURA 7-20 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

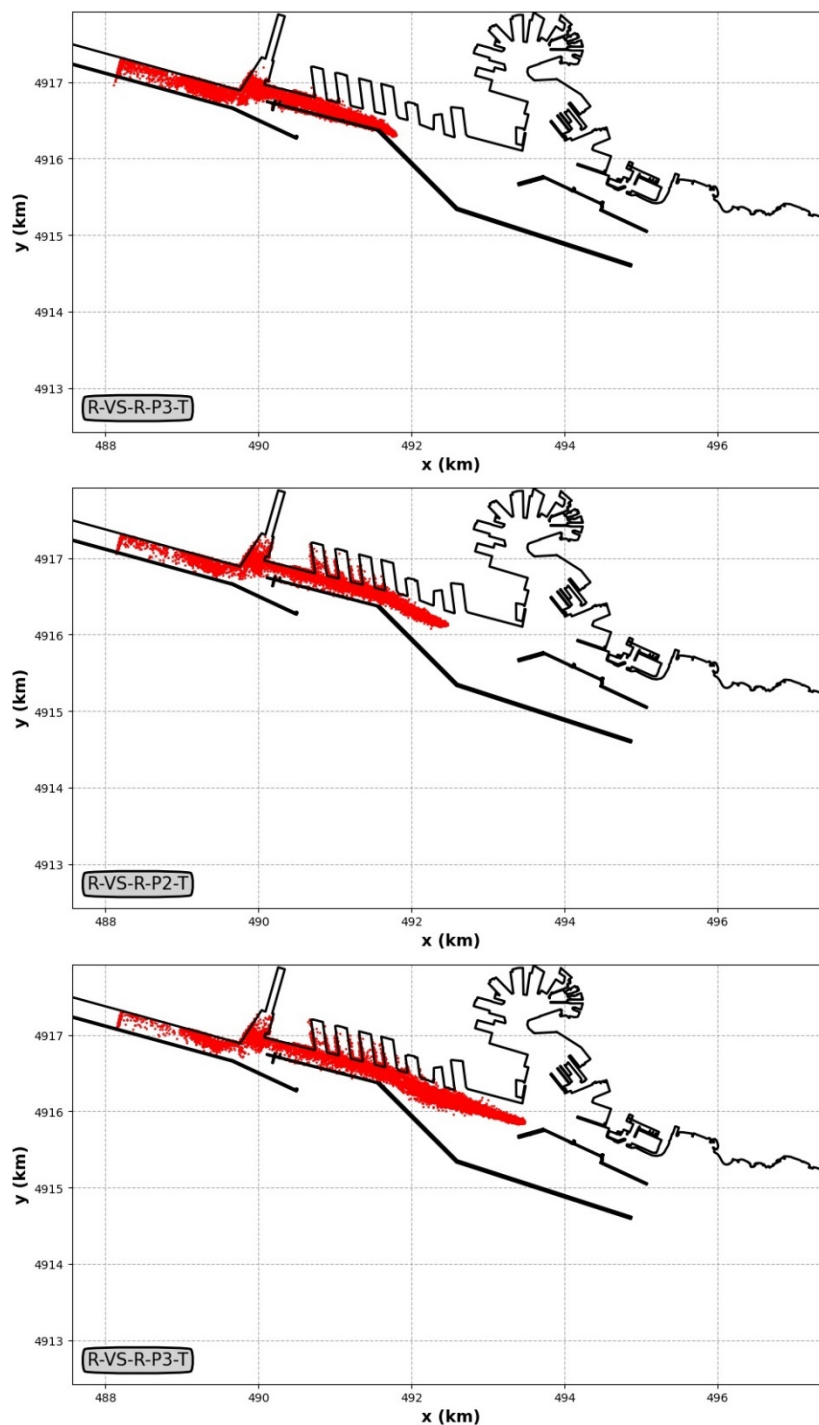


FIGURA 7-21 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

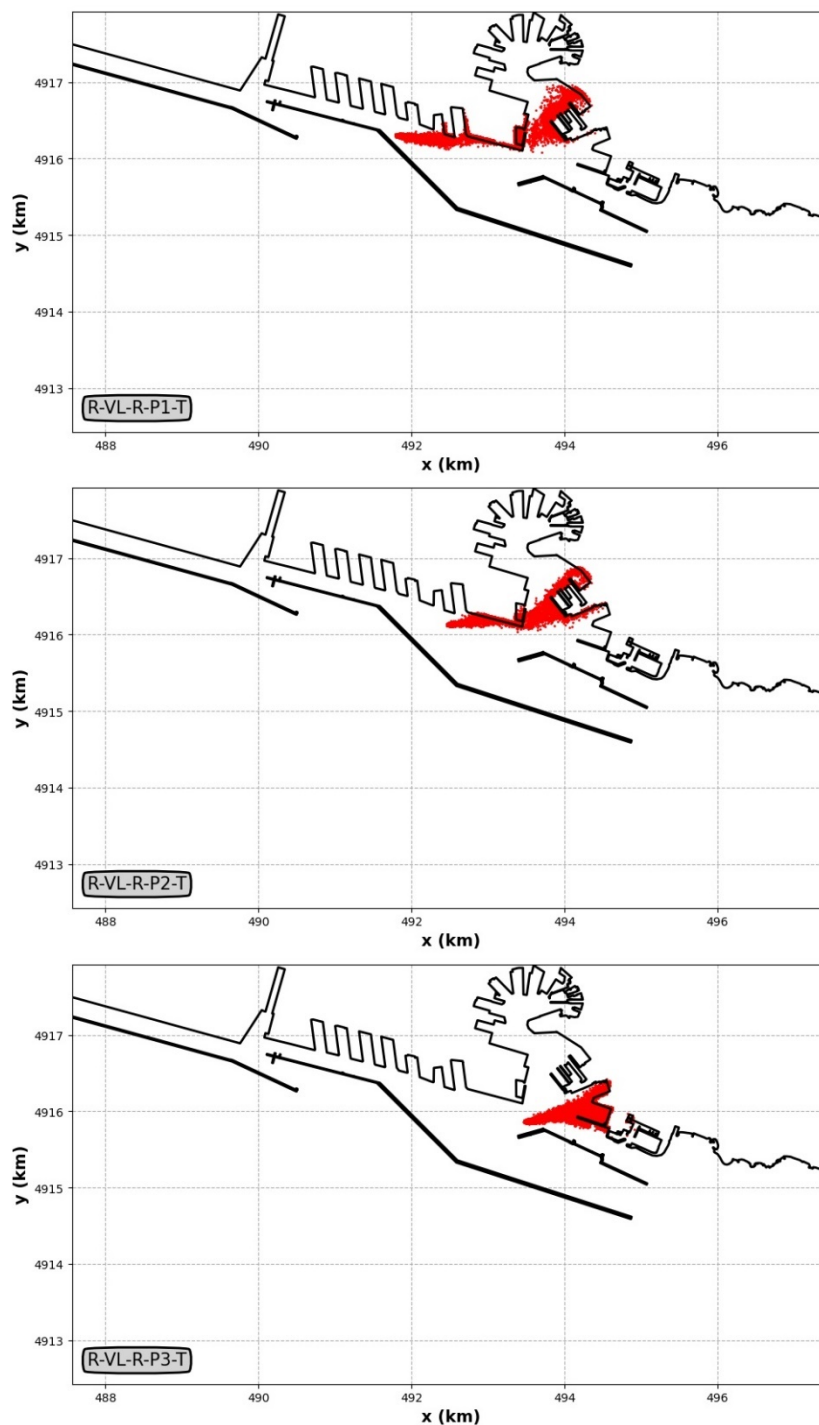


FIGURA 7-22 – RIMOZIONE DELLA DIGA ESISTENTE (R). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

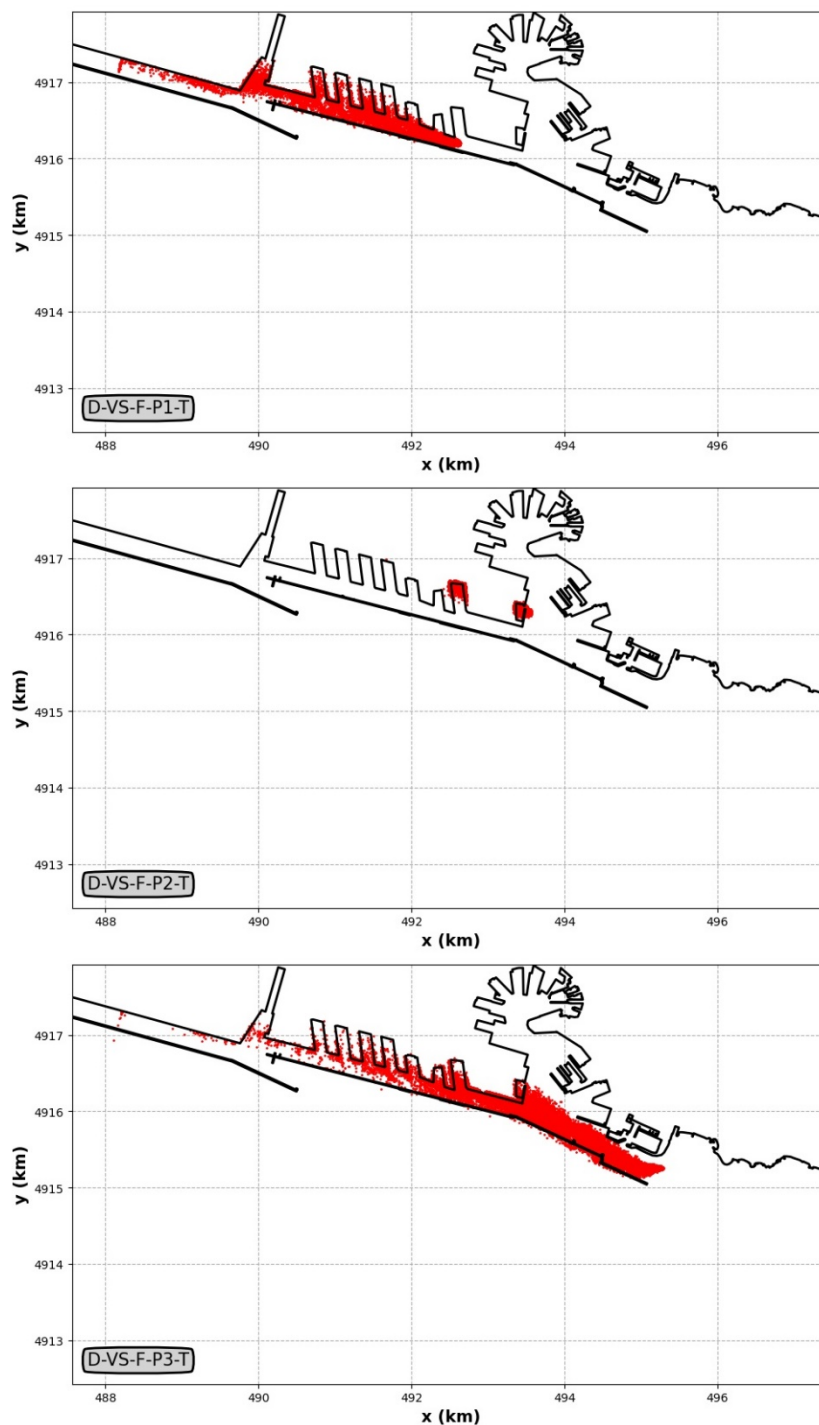


FIGURA 7-23 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO



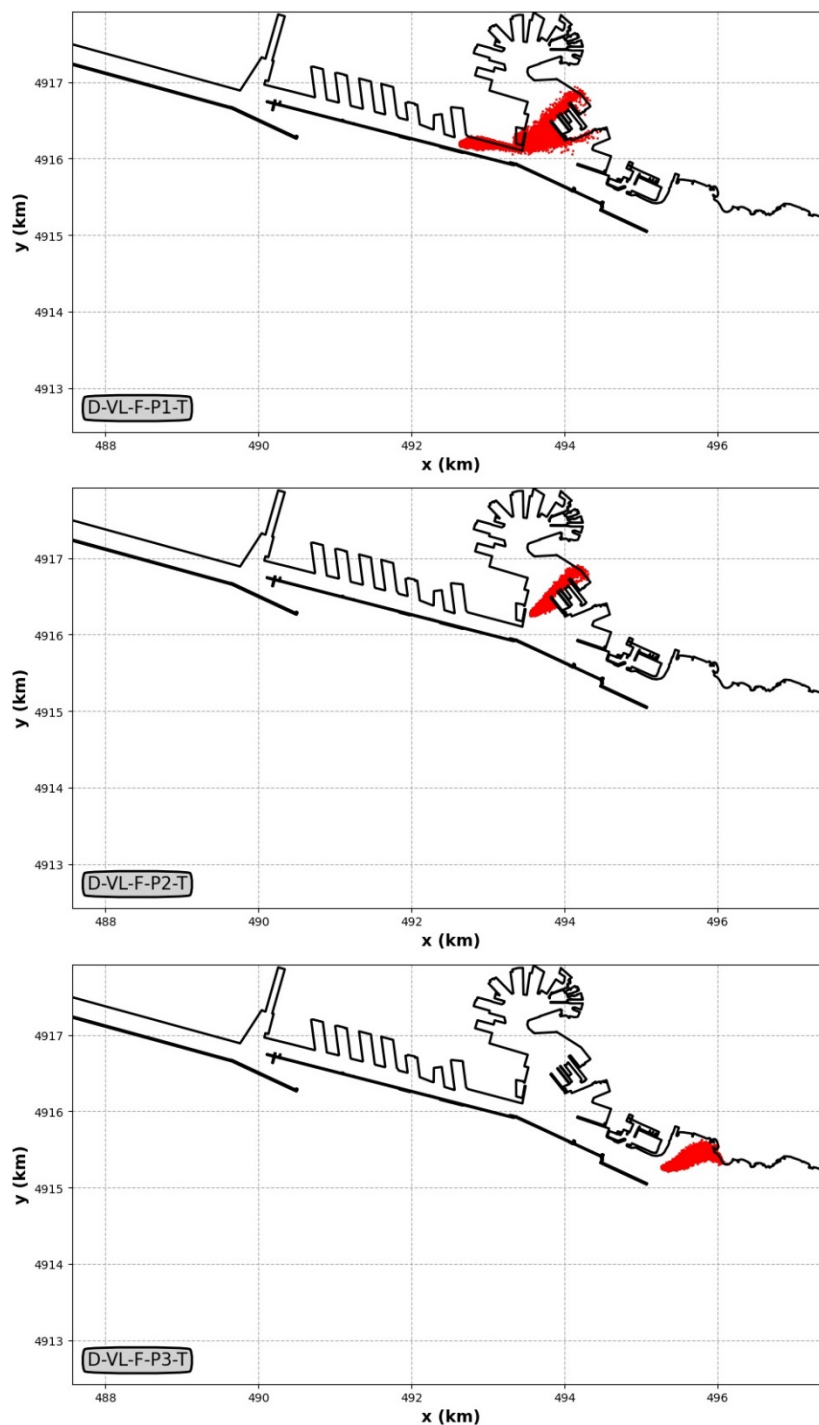


FIGURA 7-24 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO FREQUENTE (F) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

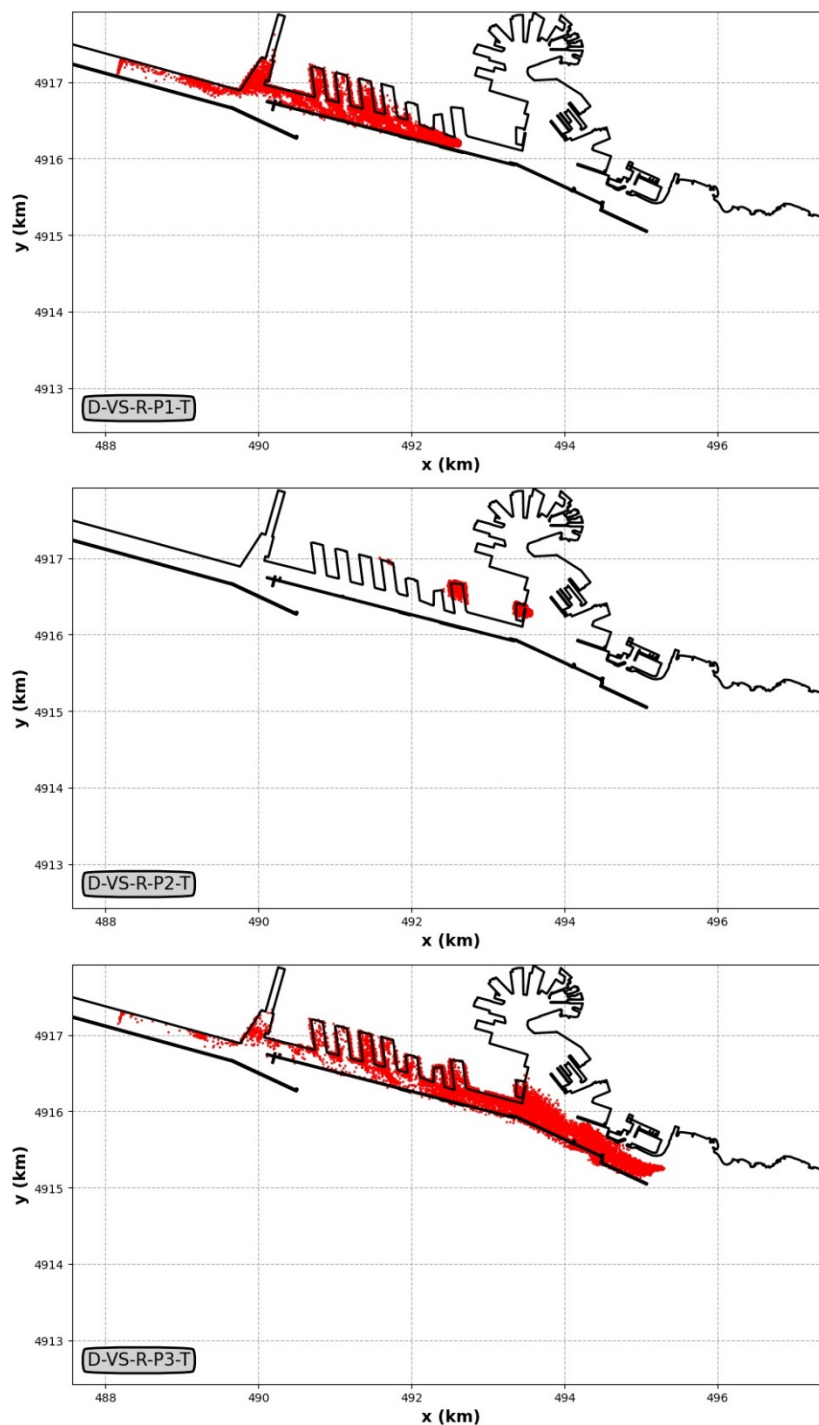


FIGURA 7-25 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI SCIROCCO (VS). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO

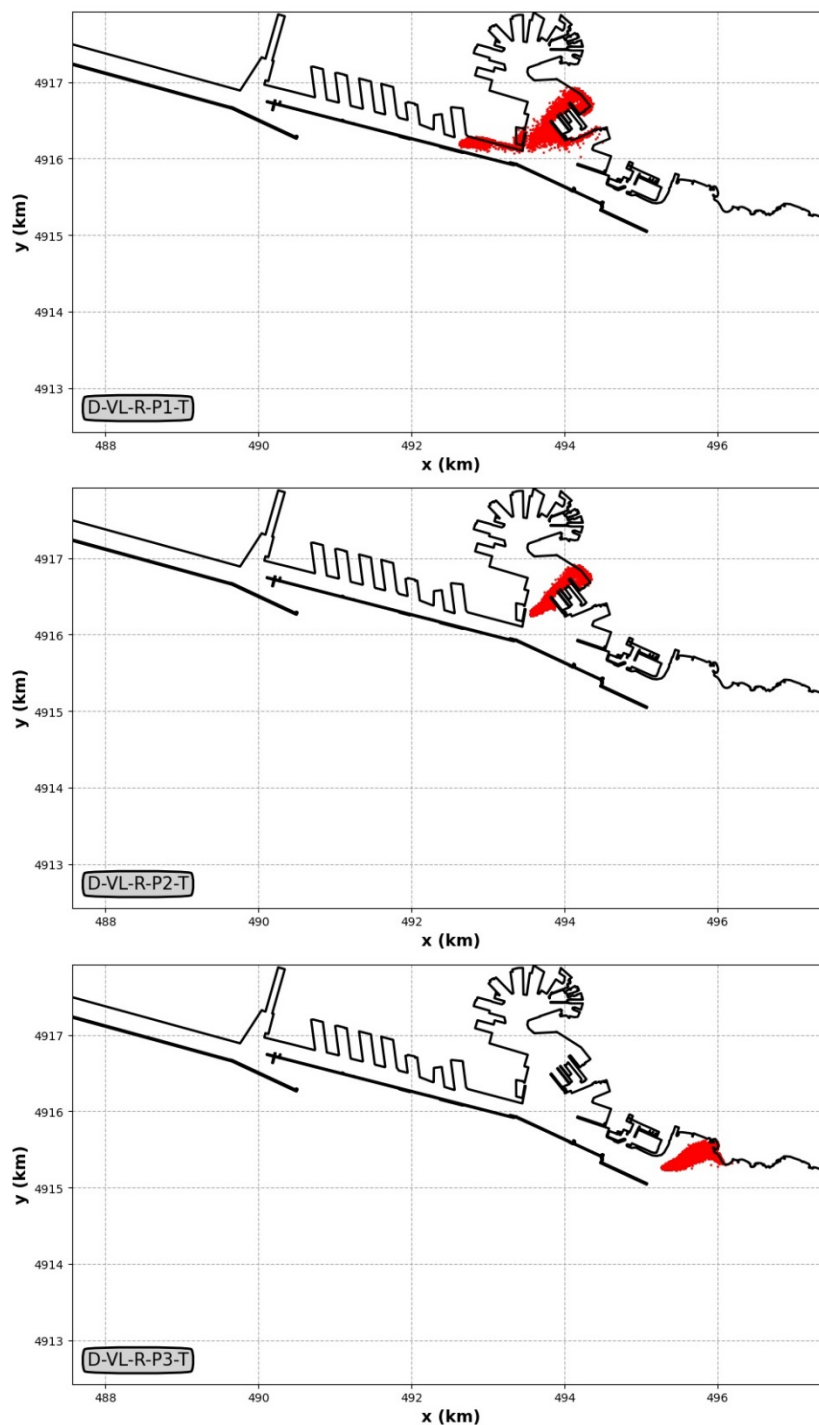


FIGURA 7-26 – DRAGAGGIO (D) EFFETTUATO CON TECNICA TRADIZIONALE (T). VENTO RARO (R) PROVENIENTE DAL SETTORE DI LIBECCIO (VL). TRACCIANTI PASSIVI DEPOSITATI SUL FONDO