



Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico Orientale
Porti di Trieste e Monfalcone

PROGETTO AdSP n. 1951

Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste

CUP: C94E21000/ 60001

Progetto di Fattibilità Tecnico Economica Fascicolo A- intervento PNC da autorizzare

GRUPPO DI PROGETTAZIONE:		
arch. Gerardo Nappa	AdSP MAO	Responsabile dell'integrazione e Coordinatore per la Sicurezza in fase di Progettazione
arch. Sofia Dal Piva	AdSP MAO	Progettazione generale
arch. Stefano Semenic	AdSP MAO	Progettazione generale
ing. Roberto Leoni	BITECNO S.r.l.	Sistema di trazione elettrica ferroviaria
ing. Saturno Minnucci	MINNUCCI ASSOCIATI S.r.l.	Impianti speciali e segnalamenti ferroviari
ing. Dario Fedrigo	ALPE ENGINEERING S.r.l.	Progettazione strutturale oo.cc. ferrovia e strade
ing. Andrea Guidolin p.i. Furio Benci	SQS S.r.l.	Progettazione della sicurezza
ing. Sara Agnoletto	HMR Ambiente S.r.l.	Progettazione MISP e cassa di colmata
p.i. Trivellato, dott. G. Malvasi, dott. S. Bartolomei	p.i. Antonio Trivellato d.i.	Modellazione rumore, atmosfera, vibrazioni
dott. Gabriele Cailotto ing. Anca Tamasan	NEXTECO S.r.l.	Studio di impatto ambientale e piano di monitoraggio ambientale
ing. Sebastiano Cristoforetti	CRISCON S.r.l.s.	Relazione di sostenibilità
ing. Tommaso Tassi	F&M Ingegneria S.p.A.	Progettazione degli edifici pubblici nel contesto dell'ex area "a caldo"
ing. Michele Titton	ITS s.r.l.	Connessione stradale alla GVT
RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: ing. Paolo Crescenzi		

NOME FILE: <i>IGNR_P_R_M-MAR_3AM_001_04_00.docx</i>	SCALA: ---
TITOLO ELABORATO: STUDIO METEOMARINO parte 1 di 3	ELABORATO: <i>IGNR_P_R_M-MAR_3AM_001_04_00</i>

Rev.	Data	Descrizione	Redatto	Verificato	Approvato
00	01/02/2023	Definitivo	DHI	S.Dal Piva	G.Nappa

	Estensione delle infrastrutture comuni per lo sviluppo del Punto Franco Nuovo nel porto di Trieste - CUP: C94E21000460001	
---	---	--

NOTA INTRODUTTIVA

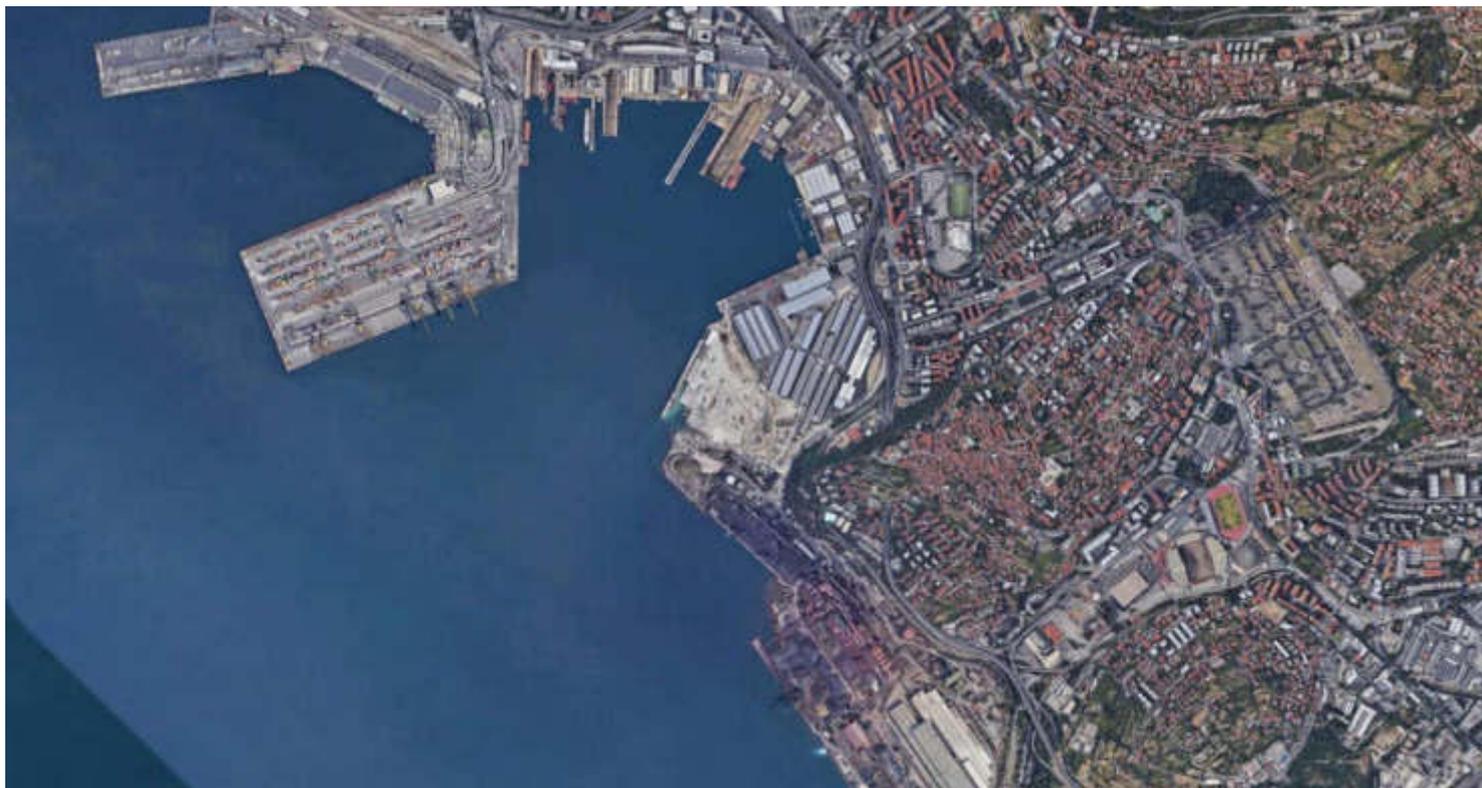
Il presente PFTE oggetto di autorizzazione, secondo procedura speciale ex art. 44 D.Lgs. 77.2021, relativo ai seguenti ambiti inseriti nel fascicolo A:

1. MISP;
2. Stazione ferroviaria commerciale Nuova Servola, Connessione alla GVT e altre opere viarie;
3. Edifici pubblici funzionali al Porto di Trieste.

è parte di un più ampio contesto che prevede opere progettuali anche per i seguenti ulteriori ambiti non oggetto di autorizzazione inseriti nel fascicolo B:

1. Cassa di Colmata,
2. Molo VIII,
3. Rampa Arvedi,
4. Opere ferroviarie su asset RFI.

Nel presente elaborato sono trattate anche queste ultime per contestualizzare le opere PNC nello sviluppo complessivo ed unitario del Punto Franco Nuovo all'interno del Sistema Portuale.



PROGETTO INTEGRATO DI MESSA IN SICUREZZA, RICONVERSIONE INDUSTRIALE E SVILUPPO ECONOMICO PRODUTTIVO NELL'AREA DELLA FERRIERA DI SERVOLA

ATTIVITÀ SPECIALISTICA DI SUPPORTO ALLA REDAZIONE DELLO STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

ELABORATO

RELAZIONE TECNICA

COMMESSA

COD. ELABORATO

SCALA

X.00

PROGETTISTA:

DATA	REV	DESCRIZIONE	RED.	VER.	APPR.
XX.XX.XX	00	Emissione			

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 1 di 157
--	--	---------------

Sommario

1	PREMESSA	12
2	SINTESI DELLO STUDIO E ILLUSTRAZIONE DELL'APPROCCIO METODOLOGICO	13
3	CARATTERIZZAZIONE DEL SITO	16
3.1	HABITAT MARINI	16
3.2	DATI BATIMETRICI	17
3.3	DATI GRANULOMETRICI	22
3.4	DATI DI CIRCOLAZIONE GENERALE	26
3.4.1	<i>Campagne di misura di temperatura e salinità</i>	28
3.5	DATI DI MAREA	32
3.6	DATI ATMOSFERICI	33
3.7	CORSI D'ACQUA	37
3.8	DATI DI MOTO ONDOSI	38
3.8.1	<i>Analisi del moto ondoso nel Golfo di Trieste</i>	41
3.8.2	<i>Correlazione tra altezza e periodo dell'onda</i>	44
3.8.3	<i>Statistica delle onde estreme</i>	45
4	BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E RISOLUZIONE	49
5	VERIFICA DELL'INFLUENZA DEL MOTO ONDOSI SULLA CIRCOLAZIONE INTERNA ALLA BAIJA DI MUGGIA	53
5.1	PROPAGAZIONE DELLE ONDE DAL LARGO A COSTA	53
5.1.1	<i>Scelta delle onde caratteristiche del sito</i>	54
5.1.2	<i>Risultati del modello di propagazione del moto ondoso</i>	55
5.2	IDRODINAMICA GENERATA DAL MOTO ONDOSI	70
5.2.1	<i>Risultati del modello idrodinamico</i>	71
6	MODELLO DI CIRCOLAZIONE GENERALE AD ALTA RISOLUZIONE	73

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola	Pag. 2 di 157
	Relazione Tecnica	

6.1	ANNIDAMENTO IDRODINAMICO: CONDIZIONI INIZIALI, DI CONTORNO APERTO E FORZANTI	74
6.2	RISULTATI DEL MODELLO IDRODINAMICO	76
6.3	VALIDAZIONE DEL MODELLO IDRODINAMICO	85

7 ATTIVITÀ MODELLISTICHE A SUPPORTO DELLA QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'OPERA IN FASE DI ESERCIZIO 90

7.1	CONFIGURAZIONE PROGETTUALE DI RIFERIMENTO	90
7.2	SELEZIONE DELLO SCENARIO DI SIMULAZIONE	92
7.3	MODELLO IDRODINAMICO	93
7.4	MODELLO DI AVVEZIONE-DISPERSIONE PER LA QUANTIFICAZIONE DEL RICAMBIO IDRICO	103
7.5	RISULTATI DEL MODELLO DI AVVEZIONE-DISPERSIONE PER LA QUANTIFICAZIONE DEL RICAMBIO IDRICO	105

8 ATTIVITÀ MODELLISTICHE A SUPPORTO DELLA QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'OPERA IN FASE DI CANTIERE 109

8.1	MODELLO IDRODINAMICO	109
8.2	MODELLO DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI IN COLONNA D'ACQUA E DELLA DEPOSIZIONE AL FONDO	109
8.3	ATTIVITÀ MODELLISTICHE PER LE FASI DI COSTRUZIONE DEI PALI	113
8.3.1	<i>Schematizzazione modellistica</i>	113
8.3.2	<i>Risultati del modello in riferimento alla fase di costruzione dei pali</i>	116
8.4	ATTIVITÀ MODELLISTICHE PER LA FASE DI ESCAVO DEI FONDALI	125
8.4.1	<i>Schematizzazione modellistica</i>	125
8.4.2	<i>Risultati relativi alle operazioni di escavo</i>	127

9 TENDENZE EVOLUTIVE DEL FONDALE. LA SEDIMENTAZIONE NEL PORTO DI TRIESTE 144

9.1	ANALISI DELLE TENSIONI TANGENZIALI AL FONDO	144
9.2	ESTRATTO DAL PIANO REGOLATORE PORTUALE VIGENTE	146
9.3	ANALISI DELL'EVOLUZIONE DEL FONDALE IN CORRISPONDENZA DI AREE OGGETTO DI OPERAZIONI DI ESCAVO DEI FONDALI	146

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 3 di 157
--	--	---------------

9.4	CONSIDERAZIONI FINALI SULLA SEDIMENTAZIONE NEL BACINO PORTUALE	149
10	CONCLUSIONI	150
11	RIFERIMENTI	154

Sommario figure

Figura 3-1	Habitat marini presenti nell'area in studio	17
Figura 3-2	Mappa batimetrica del bacino di evoluzione del Molo VII	18
Figura 3-3	Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m – Settore 3	19
Figura 3-4	Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m – Settore 4	20
Figura 3-5	Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m – Settore 5	20
Figura 3-6	Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [5] di C-MAP [6] per la zona di interesse	21
Figura 3-7	Dati estratti dalla cartografia nautica digitale disponibili per la zona in studio	22
Figura 3-8	Planimetria dei sondaggi a mare eseguiti nell'Ottobre 2021 da L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l.	23
Figura 3-9	Dominio del modello del Mediterraneo in CMEMS ed esempio di distribuzione delle temperature in tutto il bacino	26
Figura 3-10	Planimetria dei punti di campionamento (in rosso) di temperatura e salinità (campagne OGS nel periodo Settembre 2014-Marzo 2015).....	28
Figura 3-11	Profili di temperatura misurati durante il campionamento del 23 Settembre 2014 eseguito da OGS	29
Figura 3-12	Profili di temperatura misurati durante il campionamento del 27 Gennaio 2015 eseguito da OGS	29
Figura 3-13	Profili di temperatura misurati durante il campionamento del 20 Marzo 2015 eseguito da OGS	30
Figura 3-14	Profili di salinità misurati durante il campionamento del 23 Settembre 2014 eseguito da OGS	31
Figura 3-15	Profili di salinità misurati durante il campionamento del 27 Gennaio 2015 eseguito da OGS	31
Figura 3-16	Profili di salinità misurati durante il campionamento del 20 Marzo 2015 eseguito da OGS	32
Figura 3-17	Esempio di campo della componente mareale O1 dal modello globale DTU10	33

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 4 di 157
--	--	---------------

Figura 3-18 Localizzazione di alcune stazioni meteo gestite da ARPA FVG nella zona di Trieste. In rosso la stazione "Trieste molo Fratelli Bandiera" presa a riferimento nel presente studio
34

Figura 3-19 Rosa del vento relativa al periodo Settembre 2014-Settembre 2015. La calma è qui rappresentata per velocità inferiori a 1 m/s. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG..... 35

Figura 3-20 Andamento delle velocità (in rosso) e direzioni (in blu) del vento durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG 35

Figura 3-21 Andamento della temperatura dell'aria (°C) durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG ... 36

Figura 3-22 Andamento dell'umidità relativa (%) durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG..... 36

Figura 3-23 Andamento delle precipitazioni (mm) durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG..... 37

Figura 3-24 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM..... 39

Figura 3-25 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sull'Alto Adriatico 39

Figura 3-26 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 13.631653°E, LAT 45.630490°N) i cui dati dal 1979 al 2020 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo 41

Figura 3-27 Rosa annuale delle onde per il periodo 1979-2020 nel punto di estrazione dei dati MWM (Tabella 3-3) 43

Figura 3-28 Diagramma polare delle mareggiate con H_{m0} maggiore di 1 m, occorse nel periodo dal 1979 al 2020 44

Figura 3-29 Grafico delle altezze d'onda H_{m0} in funzione del periodo di picco T_p e relative curve di correlazione per i due principali settori direzionali di provenienza del moto ondoso (I e III Quadrante) 45

Figura 3-30 Grafico delle onde estreme calcolate per il settore di traversia da 180 a 225°N 48

Figura 3-31 Grafico delle onde estreme calcolate per il settore di traversia da 180 a 225°N 48

Figura 4-1 Estensione e risoluzione spaziale della mesh di calcolo 50

Figura 4-2 Dettaglio della risoluzione spaziale della mesh di calcolo nella baia di Muggia 50

Figura 4-3 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati disponibili sulla griglia di calcolo 51

Figura 4-4 Dettaglio della batimetria ottenuta dal processamento dei dati disponibili sulla griglia di calcolo 51

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 5 di 157
--	--	---------------

Figura 4-5	Esempio di discretizzazione verticale adottata nel modello	52
Figura 5-1 MWD=249°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 1 (Hm0=1.69 m, Tp=5.6 s e 56	
Figura 5-2	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 1 (Hm0=1.69 m, Tp=5.6 s e MWD=249°N)	57
Figura 5-3 MWD=275°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 2 (Hm0=1.26 m, Tp=4.8 s e 58	
Figura 5-4	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 2 (Hm0=1.26 m, Tp=4.8 s e MWD=275°N)	59
Figura 5-5 MWD=298°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 3 (Hm0=0.90 m, Tp=3.4 s e 60	
Figura 5-6	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 3 (Hm0=0.90 m, Tp=3.4 s e MWD=298°N)	61
Figura 5-7 MWD=230°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 4 (Hm0=1.64 m, Tp=6.6 s e 62	
Figura 5-8	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 4 (Hm0=1.64 m, Tp=6.6 s e MWD=230°N)	63
Figura 5-9 MWD=271°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 5 (Hm0=1.04 m, Tp=5.7 s e 64	
Figura 5-10	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 5 (Hm0=1.04 m, Tp=5.7 s e MWD=271°N)	65
Figura 5-11 MWD=324°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 6 (Hm0=0.90 m, Tp=3.3 s e 66	
Figura 5-12	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 6 (Hm0=0.90 m, Tp=3.3 s e MWD=324°N)	67
Figura 5-13 MWD=224°N)	Campo di moto ondoso generato dall'onda 7 (Hm0=1.71 m, Tp=6.3 s e 68	
Figura 5-14	Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 7 (Hm0=1.71 m, Tp=6.3 s e MWD=224°N)	69
Figura 5-15	Campo delle velocità della corrente generate dall'onda 1 (Hm0=1.69 m, Tp=5.6 s e MWD=249°N)	72
Figura 5-16 -	Campo delle velocità della corrente generate dall'onda 3 (Hm0=0.90 m, Tp=3.4 s e MWD=298°N)	72
Figura 6-1	Esempi di griglia di calcolo di MIKE 3 FM	73
Figura 6-2	Andamento delle velocità di corrente in un punto posto in corrispondenza del limite a mare della infrastruttura in progetto, rispettivamente in superficie (in rosso), ad una profondità intermedia (in blu) e al fondo	76

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 6 di 157
--	--	---------------

Figura 6-3	Rosa della corrente per il periodo Settembre 2014-Settembre 2015 in un punto posto in corrispondenza del limite a mare (lato sud-ovest) della infrastruttura in progetto, in superficie (direzione "verso").....	77
Figura 6-4	Rosa della corrente per il periodo Settembre 2014-Settembre 2015 in un punto posto in corrispondenza del limite a mare (lato sud-ovest) della infrastruttura in progetto, a profondità intermedia (direzione "verso").....	78
Figura 6-5	Rosa della corrente per il periodo Settembre 2014-Settembre 2015 in un punto posto in corrispondenza del limite a mare (lato sud-ovest) della infrastruttura in progetto, al fondo (direzione "verso")	78
Figura 6-6	Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Est)	79
Figura 6-7	Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Est)	80
Figura 6-8	Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Est).....	80
Figura 6-9	Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)	81
Figura 6-10	Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)	81
Figura 6-11	Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)	82
Figura 6-12	Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)	82
Figura 6-13	Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest) ..	83
Figura 6-14	Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)	83
Figura 6-15	Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)	84
Figura 6-16	Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest) .	84
Figura 6-17	Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)	85
Figura 6-18	Confronto dei profili di temperatura misurati in 10 stazioni (Figura 3-10) ed ottenuti tramite l'applicazione del modello MIKE 3 HD per i giorni 27 Gennaio e 20 Marzo 2015	87
Figura 6-19	Confronto dei profili di salinità misurati in 10 stazioni (Figura 3-10) ed ottenuti tramite l'applicazione del modello MIKE 3 HD per i giorni 27 Gennaio e 20 Marzo 2015	89

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 7 di 157
--	--	---------------

Figura 7-1 Configurazione progettuale del Molo VIII considerata per il presente studio, derivata dall'inviluppo di vari layout ad oggi individuati 91

Figura 7-2 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest) 94

Figura 7-3 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest) 94

Figura 7-4 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est) 95

Figura 7-5 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est) 95

Figura 7-6 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest) 96

Figura 7-7 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest) 96

Figura 7-8 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest) 97

Figura 7-9 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest) 97

Figura 7-10 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est) 98

Figura 7-11 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est) 98

Figura 7-12 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest) 99

Figura 7-13 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest) 99

Figura 7-14 Indicazione dei due punti di estrazione delle condizioni di corrente per la rappresentazione delle rose in presenza ed in assenza dei pali del Molo VIII100

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 8 di 157
--	--	---------------

Figura 7-15	Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Nord dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Febbraio, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")	101
Figura 7-16	Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Nord dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Agosto, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")	101
Figura 7-17	Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Sud dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Febbraio, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")	102
Figura 7-18	Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Sud dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Agosto, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")	102
Figura 7-19	Condizione iniziale del modello di avvezione-dispersione: in arancione sono evidenziati i volumi di controllo posti a concentrazione iniziale pari a 100 (intero bacino di Muggia a sinistra e bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami a destra)	104
Figura 7-20	Esempio di mappa di distribuzione della percentuale di concentrazione di un ipotetico tracciante	105
Figura 7-21	Curva del ricambio idrico per l'intera Baia di Muggia nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo estivo (Agosto 2015)	107
Figura 7-22	Curva del ricambio idrico per la Darsena a Nord del Molo VIII nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo estivo (Agosto 2015)	107
Figura 7-23	Curva del ricambio idrico per l'intera Baia di Muggia nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo invernale (Febbraio 2015)	108
Figura 7-24	Curva del ricambio idrico per la Darsena a Nord del Molo VIII nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo invernale (Febbraio 2015)	108
Figura 8-1	Rappresentazione schematica dei processi simulati in MIKE 3 MT	110
Figura 8-2	Individuazione delle aree di riferimento per le operazioni, oggetto di modellazione	116
Figura 8-3	Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	118
Figura 8-4	Massimi di concentrazione a metà colonna a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	118
Figura 8-5	Massimi di concentrazione al fondo a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	119
Figura 8-6	Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi estivi	120
Figura 8-7	Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi primaverili	120

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 9 di 157
--	--	---------------

Figura 8-8	Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi invernali	121
Figura 8-9	Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi autunnali	121
Figura 8-10	Tempo di persistenza (in giorni) di concentrazione superiore a 2 mg/l in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	122
Figura 8-11	Tempo di persistenza (in giorni) di concentrazione superiore a 2 mg/l a metà colonna a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	123
Figura 8-12	Tempo di persistenza (in giorni) di concentrazione superiore a 2 mg/l al fondo a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	123
Figura 8-13	Accumulo massimo del sedimento depositato [mm] a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	124
Figura 8-14	Individuazione dell'area soggetta a dragaggio e degli spessori da dragare. I pallini in rosso indicano la zona presa a riferimento nello studio modellistico	126
Figura 8-15	Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	128
Figura 8-16	Massimi di concentrazione a metà colonna a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale).....	129
Figura 8-17	Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)	129
Figura 8-18	Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi estivi	130
Figura 8-19	Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi primaverili	131
Figura 8-20	Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi invernali.....	131
Figura 8-21	Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi autunnali.....	132
Figura 8-22	Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi estivi	132
Figura 8-23	Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi primaverili.....	133
Figura 8-24	Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi invernali.....	133

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 10 di 157
--	--	-------------------

Figura 8-25 Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi autunnali.....134

Figura 8-26 Tempo di persistenza in giorni di concentrazione superiore a 2 mg/l in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)135

Figura 8-27 Tempo di persistenza in giorni di concentrazione superiore a 2 mg/l a metà colonna a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)135

Figura 8-28 Tempo di persistenza in giorni di concentrazione superiore a 2 mg/l al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale) 136

Figura 8-29 Accumulo massimo del sedimento depositato [mm] a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)...137

Figura 8-30 Esempio di pennacchio di torbida in superficie in concomitanza con l'inizio delle operazioni di dragaggio e a 10 ore dalla fine delle operazioni del giorno precedente.....138

Figura 8-31 Esempio di pennacchio di torbida in superficie dopo 10 ore dall'inizio delle operazioni 139

Figura 8-32 Esempio di pennacchio di torbida in superficie dopo 14 ore, alla fine delle operazioni 139

Figura 8-33 Esempio di pennacchio di torbida in superficie dopo 11 ore dalla fine delle operazioni e nuovo ciclo di lavoro iniziato da 1 ora.....140

Figura 8-34 Concentrazione di sedimento in superficie a seguito di un giorno di operazioni di dragaggio in condizioni idrodinamiche generate da un vento di Bora costante per 24 h con velocità pari a 24.2 m/s141

Figura 8-35 Variabilità delle concentrazioni di sedimento in sospensione durante le operazioni di dragaggio (intero periodo simulato, da Ottobre 2014 a Settembre 215) in alcuni punti in corrispondenza degli habitat marini di interesse.....142

Figura 8-36 Concentrazioni di sedimento in sospensione durante le operazioni di dragaggio (intero periodo simulato, da Ottobre 2014 a Settembre 215) nella zona ove è presente la pinna nobilis (in blu) e velocità del vento (in rosso).....143

Figura 8-37 Concentrazioni di sedimento in sospensione durante le operazioni di dragaggio (intero periodo simulato, da Ottobre 2014 a Settembre 215) in alcuni punti in corrispondenza degli habitat marini di interesse e velocità del vento (in rosso).....143

Figura 9-1 Mappa dei tempi di superamento del valore di tensione critica al fondo (qui ipotizzata pari a 0.03 N/m²).....145

Figura 9-2 Valori di tensione tangenziale al fondo per il periodo Ottobre 2014-Settembre 2015 in alcuni punti all'interno dell'area in cui è previsto il dragaggio.....146

Figura 9-3 Carta batimorfologica dell'Adriatico Settentrionale, ottenuta dalle attività di studio del Progetto Bandiera RITMARE147

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 11 di 157
--	--	-------------------

Figura 9-4 Mappa batimetrica del bacino di evoluzione del Molo VII redatta da OGS per l'AdSP Mar Adriatico Orientale nel 2019148

Figura 9-5 Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.5 m redatta da Subsea Fenix per conto di Prisma Srl, all'interno del "Rilievo e monitoraggio dello stato di conservazione delle banchine dell'area marina e costiera di competenza dell'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Orientale" nel Marzo 2021148

Sommario tabelle

Tabella 3-1 Dati sedimentologici in termini di percentuale di passante relativo alla classe granulometrica (ciottolo, ghiaia, sabbia, limo e argilla), peso specifico e contenuto d'acqua. Fonte: Prove su terre eseguite da L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l. ad Ottobre 2021 24

Tabella 3-2 Principali caratteristiche del modello a scala di bacino del Mar Mediterraneo, disponibile nell'ambito del servizio CMEMS (Rianalisi del Mediterranean Forecasting System) .. 27

Tabella 3-3 Coordinate del punto selezionato dal dataset MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito 40

Tabella 3-4 Tabella delle frequenze di altezza d'onda significativa H_{m0} e direzione media MWD, relativa al periodo di 42 anni (1979-2020) nel punto di estrazione dei dati MWM (Tabella 3-3) 42

Tabella 3-5 Parametri α e β per il calcolo del periodo di picco, distinti per settore direzione di provenienza delle onde 44

Tabella 3-6 Valori massimi annuali dell'altezza d'onda significativa suddivisi per settori di provenienza 46

Tabella 3-7 Statistica degli eventi estremi per i settori 180 – 225°N e 225 – 270°N 47

Tabella 5-1 - Caratteristiche delle onde scelte per le simulazioni di propagazione da largo verso riva 55

Tabella 6-1 Principali caratteristiche del modello di circolazione ad alta risoluzione 75

Tabella 7-1 Valori di velocità media del vento su base mensile per l'anno 2014-2015 derivati dalla stazione meteo di ARPA FVG 92

Tabella 8-1 Principali caratteristiche del modello di trasporto di sedimenti e dei dati in input utilizzati 112

Tabella 8-2 Dati ed assunzioni relativi alle operazioni per lo scavo dei pali e l'iniezione di calcestruzzo 114

Tabella 8-3 Dati ed ipotesi di lavoro relativi alla realizzazione dei pali.....115

Tabella 8-4 Dati ed ipotesi relativi alle operazioni di dragaggio127

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 12 di 157
--	--	-------------------

1 PREMESSA

Il presente documento descrive le attività specialistiche di modellazione numerica (in relazione alle componenti idrodinamica e qualità delle acque costiere), sviluppate ai fini della redazione dello Studio di Impatto Ambientale della Progettazione delle opere ferroviarie, stradali e portuali previste dall'art.6 dell'Accordo di Programma per l'attuazione del "Progetto Integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola", a Trieste.

Nell'ambito del Piano Regolatore del Porto di Trieste è prevista un'espansione verso Sud della zona del porto franco, con una nuova infrastruttura (denominata Molo VIII) dedicata alla movimentazione di navi Ro-Ro e container. L'obiettivo di tale intervento è riconvertire l'attività produttiva siderurgica alla funzione portuale e di potenziare il polo logistico a servizio dell'economia del territorio.

Un team di progettazione multidisciplinare ha sviluppato il progetto integrato relativo alla nuova opera marittima e alle annesse infrastrutture stradali e ferroviarie, secondo una pianificazione che si sviluppa su più fasi successive.

Nell'ambito di questo ampio progetto è inserito lo Studio di Impatto Ambientale che deve comprendere, tra i vari studi specialistici, l'analisi degli effetti, sia in fase di cantiere che di esercizio, della realizzazione della nuova opera sull'idrodinamica e la qualità delle acque nella baia di Muggia; le attività sono state sviluppate mediante l'applicazione di opportuna modellistica numerica.

Nello specifico, il presente studio descrive le attività modellistiche volte a valutare come la presenza della nuova infrastruttura, che verrà realizzata tramite un impalcato su pali, possa determinare effetti sull'idrodinamica locale e, di conseguenza, sul ricambio idrico della baia di Muggia (fase di esercizio). Inoltre, attraverso l'applicazione di modelli numerici allo stato dell'arte, sono stati simulati e quantificati gli effetti (incremento di torbidità e deposizione al fondo) della movimentazione dei sedimenti in fase di cantiere, connessi alla realizzazione dei pali e all'escavo del fondale in corrispondenza della nuova banchina prevista sul fronte Nord Ovest del nuovo Molo VIII.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 13 di 157
--	--	-------------------

2 SINTESI DELLO STUDIO E ILLUSTRAZIONE DELL'APPROCCIO METODOLOGICO

All'interno del porto di Trieste, in corrispondenza della Piattaforma Logistica PLT, è prevista l'espansione verso mare delle infrastrutture a servizio del porto mediante la realizzazione di un molo fondato su pali, ai quali sarà affidata la funzione di sostenere l'impalcato del nuovo Terminal, comprensivo del nuovo fronte banchinato a Nord Ovest, lungo il quale è previsto l'ormeggio di navi di più grandi dimensioni, tali da richiedere l'escavo dei fondali.

L'obiettivo del presente lavoro è quantificare i potenziali impatti della costruzione della nuova infrastruttura (che costituisce un primo stralcio della realizzazione del Molo VIII secondo le previsioni del Piano Regolatore Portuale), sia in riferimento ai campi idrodinamici locali e al conseguente ricambio idrico dell'intera baia e di specifici settori (fase di esercizio), sia in riferimento ai processi connessi alla movimentazione dei sedimenti (trasporto e deposizione) durante la realizzazione dell'opera stessa (fase di cantiere).

In particolare, per quanto riguarda la fase di cantiere, sono stati investigati gli effetti delle varie operazioni che prevedono la movimentazione dei sedimenti: per la fase di realizzazione dei pali sono stati simulati sia gli effetti dell'escavo all'interno delle "camicie" che ospiteranno i getti di calcestruzzo, sia gli effetti del getto stesso; infine sono stati simulati gli effetti dell'escavo della porzione di fondale, in corrispondenza del nuovo fronte banchinato a Nord Ovest, dove ormeggeranno le navi di più grandi dimensioni.

Lo studio è stato effettuato attraverso l'implementazione e l'accoppiamento di modelli tridimensionali allo stato dell'arte in ambito di circolazione marina e trasporto di soluti e sedimenti; tali attività hanno previsto una preventiva e dettagliata caratterizzazione delle condizioni meteomarine e della circolazione a larga scala del Golfo di Trieste, basata su affidabili database allo stato dell'arte (CMEMS – Copernicus Marine Environment Monitoring Service).

La corretta riproduzione dell'idrodinamica marina costiera a scala ingegneristica non può infatti prescindere dalla conoscenza delle condizioni marine di più larga scala e delle relative interazioni con l'ambiente costiero stesso. La metodologia proposta nel presente studio consente di risolvere l'idrodinamica locale partendo dal largo, attraverso l'annidamento di un modello di circolazione di dettaglio all'interno di un modello a scala di bacino del Mar Mediterraneo. Il modello ad alta risoluzione implementato nel presente studio acquisisce pertanto le condizioni iniziali e le condizioni al contorno necessarie per risolvere in forma numerica le equazioni che governano l'evoluzione di correnti, temperatura e salinità nel tempo e nello spazio, dal suddetto modello di larga scala. L'annidamento realistico tridimensionale è stato implementato attraverso una combinazione di griglie quadrangolari e triangolari a risoluzione variabile, massima in un intorno della zona oggetto della realizzazione della nuova infrastruttura.

Le simulazioni idrodinamiche predisposte con il modello tridimensionale di dettaglio fanno riferimento ad un intero anno (Settembre 2014 - Settembre 2015). Il periodo di simulazione è stato selezionato in funzione della disponibilità di campagne di misura di temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua, disponibili per alcuni punti all'interno del bacino di Muggia e messi a disposizione da parte di OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 14 di 157
--	--	-------------------

(campagne di Settembre 2014, Gennaio e Marzo 2015). I dati di queste campagne sono stati utilizzati sia per inizializzare la simulazione idrodinamica (23 Settembre 2015), sia per calibrare e validare il modello, con particolare riferimento alla capacità dello stesso di rappresentare correttamente la stratificazione termalina (dati di Gennaio e Marzo 2015). Purtroppo, non è stato possibile acquisire dati di intensità e direzione della corrente all'interno della Baia, vista l'indisponibilità degli stessi.

Si evidenzia che per la ricostruzione della circolazione all'interno del porto di Trieste si è ritenuto trascurabile il contributo dato dalle onde sull'idrodinamica costiera. Questa assunzione è stata opportunamente verificata mediante un preliminare studio di propagazione delle onde da largo verso l'interno della baia e da una successiva analisi delle condizioni idrodinamiche generate da eventi rappresentativi per il sito in studio.

Una volta ricostruita la circolazione locale nella baia di Muggia, il modello idrodinamico è stato dinamicamente accoppiato, per la simulazione degli effetti della fase di esercizio, ad un modello numerico tridimensionale di avvezione-dispersione. Per quantificare il possibile impatto della presenza della nuova infrastruttura sull'idrodinamica della baia sono stati stimati i tempi di abbattimento di un ipotetico tracciante immesso inizialmente nel bacino portuale di Muggia, sia nella configurazione attuale (assenza dei pali di fondazione della nuova infrastruttura), sia in quella di progetto (presenza dei suddetti pali). I risultati sono stati rappresentati in termini di "curve di ricambio" relative all'intera baia di Muggia e al solo bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami, posto a Nord del futuro Molo VIII, bacino la cui idrodinamica sarà maggiormente interessata dalla presenza della nuova infrastruttura. Il confronto di tali curve, ottenute in presenza ed in assenza dei pali, ha permesso di evidenziare come l'entità dell'impatto dell'opera sulla circolazione ed il ricambio idrico sia assai modesta.

Per la simulazione dei potenziali impatti determinati dalle operazioni che prevedono la movimentazione dei sedimenti in fase di cantiere (brevemente descritte in precedenza), il modello idrodinamico è stato dinamicamente accoppiato ad un modello numerico tridimensionale di trasporto di sedimenti fini. In virtù della prevista durata complessiva delle lavorazioni, il modello è stato implementato per un periodo più breve, rappresentativo (secondo un approccio conservativo) di una fase delle lavorazioni durante la quale la movimentazione dei sedimenti avverrà nella zona più prossima ai target ambientali (habitat marini) e laddove l'idrodinamismo (e quindi la possibilità di maggiore dispersione del sedimento movimentato) è maggiore. I risultati del modello, distinti per le diverse operazioni che prevedono la movimentazione dei sedimenti, sono stati ricavati in termini di mappe delle massime concentrazioni di sedimento sospeso in colonna d'acqua, mappe dei tempi di superamento di una determinata soglia di concentrazione, e mappe di accumulo di sedimento sul fondo.

Come anticipato, la simulazione dell'idrodinamica della baia è stata condotta per un periodo di un anno, e questo ha permesso di cogliere l'intera variabilità naturale del sito e di adottare un approccio a "finestre mobili" per quanto riguarda le simulazioni di ricambio idrico e di dispersione e trasporto dei sedimenti. Tale approccio consiste nell'implementare un alto numero di simulazioni ipotizzando che i lavori avvengano durante diversi momenti del periodo simulato con il modello idrodinamico (es. due al mese per il modello di dispersione dei sedimenti), potendo quindi cogliere l'effetto della stagionalità e della variabilità spazio-temporale tipica del Mar Mediterraneo, e fornendo tra l'altro una base di dati altamente significativa per un'analisi di carattere statistico dei

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 15 di 157
--	--	-------------------

risultati. A differenza di un classico approccio a scenari più probabili, infatti, tale metodologia consente di operare un'analisi dei risultati di maggiore rilevanza statistica, determinando per esempio la più probabile estensione delle aree interessate dal pennacchio di sedimenti sospesi, ricavandone la persistenza nelle diverse zone del dominio e la distribuzione spaziale e temporale delle relative concentrazioni, o ancora permettendo di individuare le aree maggiormente soggette alla deposizione dei sedimenti, ma sempre all'interno di una variabilità naturale del sistema, che non potrebbe altrimenti essere considerata e rappresentata. Tutte le analisi sono state condotte sia su base di aggregazione annuale dei dati, che su base stagionale. Si evidenzia che tale approccio è in piena conformità alle indicazioni riportate nelle linee guida ISPRA di settore [1].

A completamento dell'analisi è stato predisposto un approfondimento in relazione alle tendenze evolutive dei fondali del porto di Trieste, con particolare attenzione alla zona per la quale è previsto l'escavo dei fondali, funzionale alla piena operatività del nuovo Terminal. L'analisi ha evidenziato come la movimentazione di sedimento all'interno della baia di Muggia risulti ridotta e in generale associata a pochi eventi all'anno; il rischio di sedimentazione nell'area che verrà interessata dal dragaggio risulta pertanto trascurabile.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 16 di 157
--	--	-------------------

3 CARATTERIZZAZIONE DEL SITO

In questa sezione viene presentata una caratterizzazione generale del sito, di inquadramento per le successive fasi di studio mediante modello numerico.

Il sito oggetto del presente studio si trova nel Porto di Trieste, il più a Nord del Mar Adriatico e pertanto il punto di interscambio terra-mare più diretto per tutti i paesi del Centro-Est Europa.

Il bacino portuale, inserito nella baia di Muggia, è chiuso verso il mare aperto dalla presenza di 3 dighe foranee delle quali la principale è la Diga Luigi Rizzo, lunga quasi 1'500 m, che definisce il limite del canale di accesso Sud.

Nel Piano Regolatore Portuale del Porto di Trieste [2], la zona di intervento fa parte del "Settore territoriale n° 4: Arsenale San Marco, Scalo Legnami, Piattaforma Logistica e Molo VIII". Il settore si colloca in un'area in posizione defilata rispetto al bacino acqueo portuale, compreso tra due settori in cui sono concentrate la maggior parte delle attività commerciali ed industriali del porto.

Il nuovo sporgente Molo VIII, oggetto del presente studio, rappresenta il punto di massima espansione lato mare in corrispondenza della Piattaforma Logistica (PLT) ed è destinato a traffico navi portacontainer, portarinfuse e RoRo.

L'area oggetto degli approfondimenti specialistici su modello numerico presenta tuttavia un'estensione ben più ampia rispetto alla sola baia di Muggia, in virtù della presenza di aree ambientalmente sensibili sia all'interno che all'esterno della baia stessa. Tali aree sono brevemente descritte nella sezione 3.1 a seguire.

3.1 Habitat marini

Le aree che risultano particolarmente sensibili sono quelle ad alta vocazione turistica presenti lungo il litorale dei comuni di Trieste e Muggia ed in particolare:

- l'Area Marina Protetta Nazionale di Miramare ed il Monumento naturale di Punta Grossa in Slovenia (in blu in Figura 3-1);
- l'area caratterizzata dalla presenza di *Pinna nobilis* lungo la costa Sud della baia di Muggia, in prossimità della bocca di entrata (in grigio in Figura 3-1);
- l'area caratterizzata dalla presenza di fanerogame marine lungo la costa che si sviluppa verso Sud-Ovest in corrispondenza della bocca Sud della baia di Muggia e lungo la costa a Nord della baia (in magenta in Figura 3-1);
- gli impianti di mitilicoltura nell'area a Sud e a Nord della baia di Muggia (in verde in Figura 3-1);
- le aree di avvistamento di mammiferi marini al largo delle coste di Trieste (pallini neri in Figura 3-1).

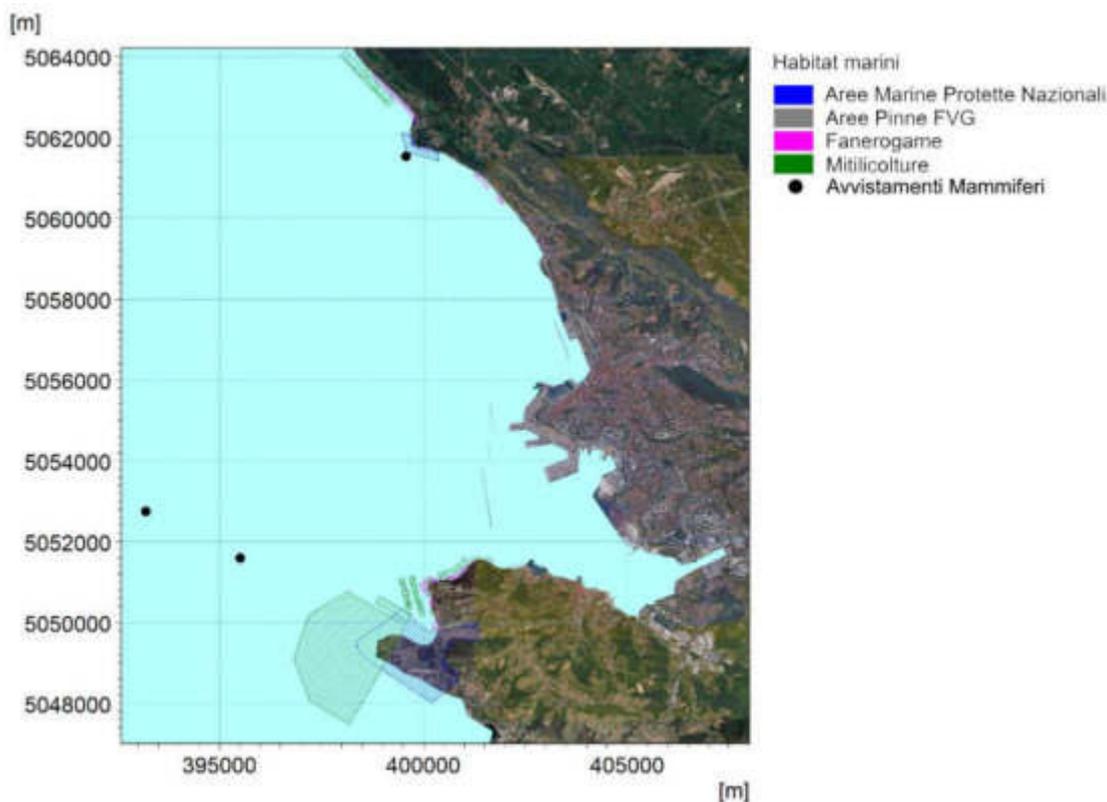


Figura 3-1 Habitat marini presenti nell'area in studio

L'impatto delle operazioni previste, con particolare riferimento all'eccesso di torbidità in colonna d'acqua e di deposizione al fondo in corso d'opera, è in questa sede valutato con particolare riferimento a tali habitat.

Si evidenzia che, per quanto riguarda la *pinna nobilis*, i monitoraggi effettuati più recentemente non ne hanno riscontrato la presenza nella baia di Muggia, a causa dell'epidemia del parassita *Haplosporidium pinnae* che, a partire dal 2016 in Spagna, sta sterminando questo mollusco bivalve ormai in tutto il Mar Mediterraneo. Tale informazione non è stata tuttavia ancora recepita dalle mappature ufficiali; pertanto, le mappe dei risultati modellistici ed i relativi commenti esposti nel seguito hanno tenuto comunque conto della presenza di questo habitat sensibile.

3.2 Dati batimetrici

Per la caratterizzazione batimetrica dell'area si è fatto riferimento ai seguenti rilievi di dettaglio relativi alla zona in studio, messi a disposizione dal Committente:

"Porto di Trieste – Mappa batimetrica del bacino di evoluzione del Molo VII" [3] (Figura 3-2).

Si tratta di un rilievo di dettaglio effettuato nel Dicembre 2019 con ecoscandaglio multifascio (MBES - Multibeam Echosounder) da OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale per l'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Orientale. Il rilievo è stato

opportunamente elaborato e restituito con un DTM con cella quadrata di 2 m, che copre l'area comprensiva dell'intero bacino di evoluzione del MOLO VII.

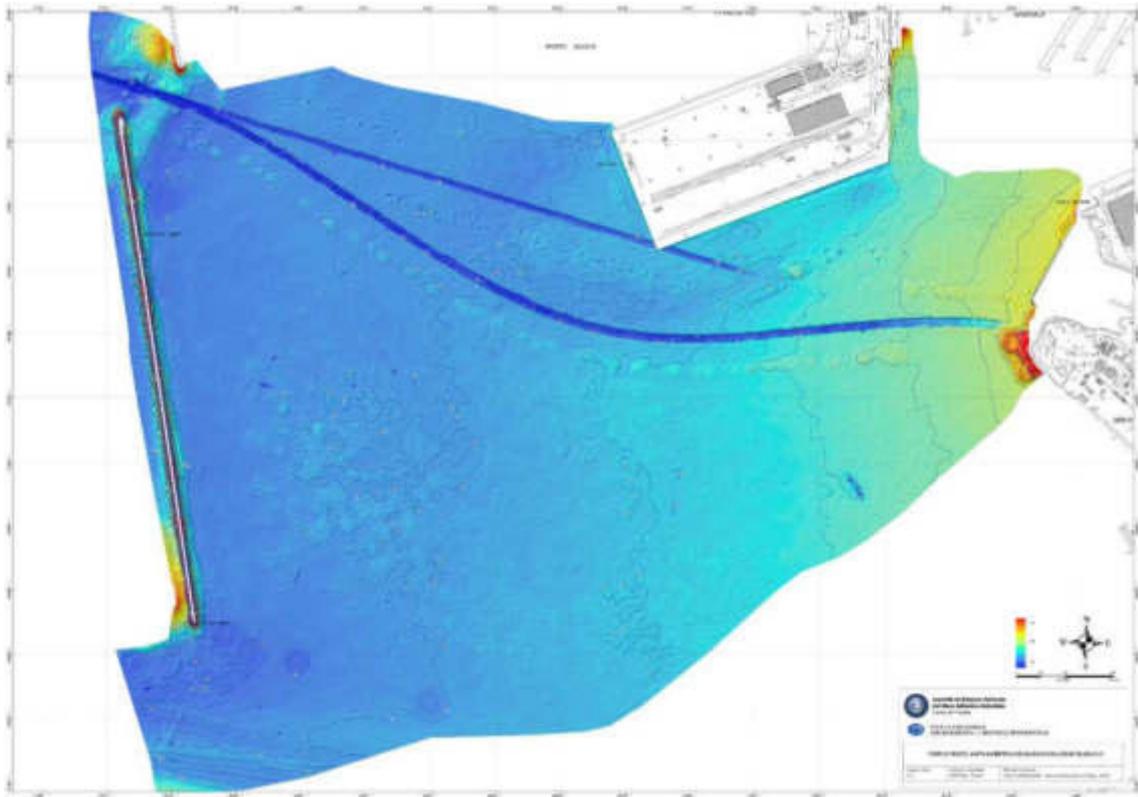


Figura 3-2 Mappa batimetrica del bacino di evoluzione del Molo VII

"Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m" [4] (Settore 3 Figura 3-3, Settore 4 Figura 3-4 e Settore 5 Figura 3-5).

Rilievo batimetrico eseguito da Subsea Fenix S.r.l. per conto di Prisma S.r.l. all'interno del "Rilievo e monitoraggio dello stato di conservazione delle banchine dell'area marina e costiera di competenza dell'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Orientale". Questi rilievi sono stati eseguiti per settori (Settore 3, 4 e 5), mostrati nelle immagini a seguire, nel periodo compreso tra Marzo e Maggio 2021. I dati sono stati forniti come isobate ogni 0.25 m.

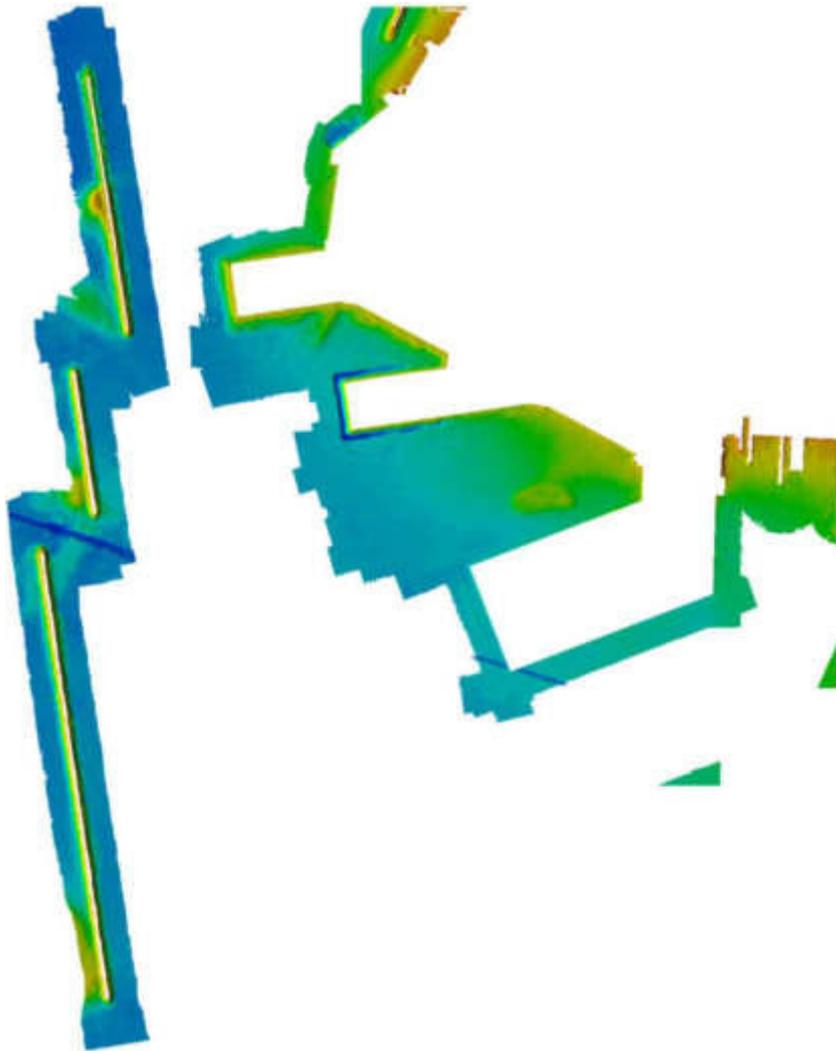


Figura 3-3 Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m – Settore 3

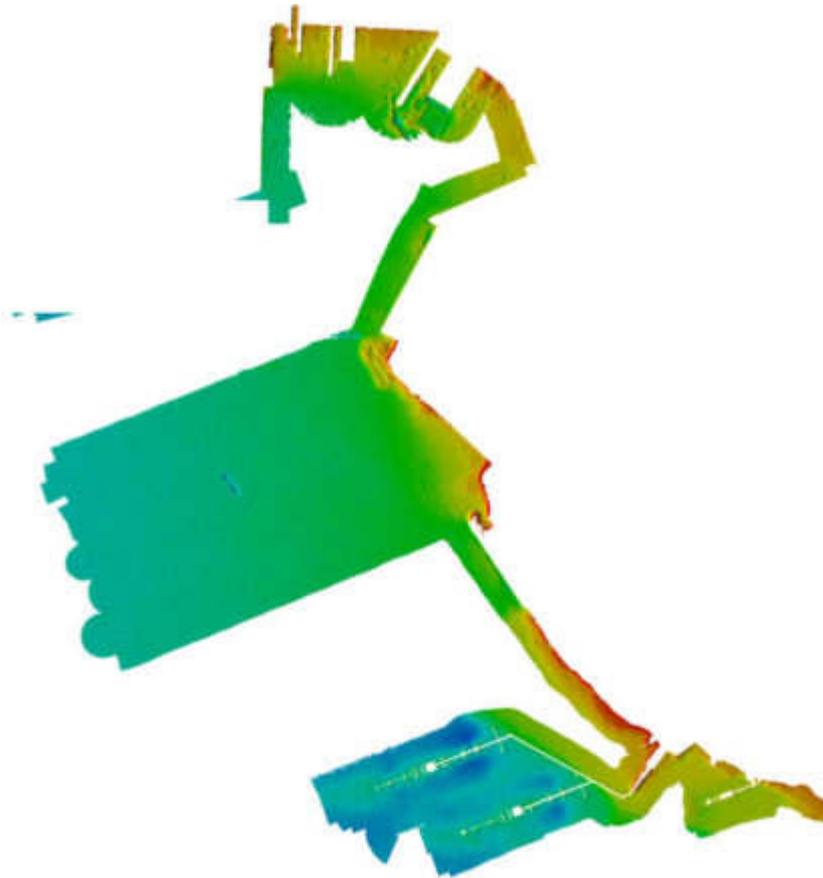


Figura 3-4 Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m – Settore 4

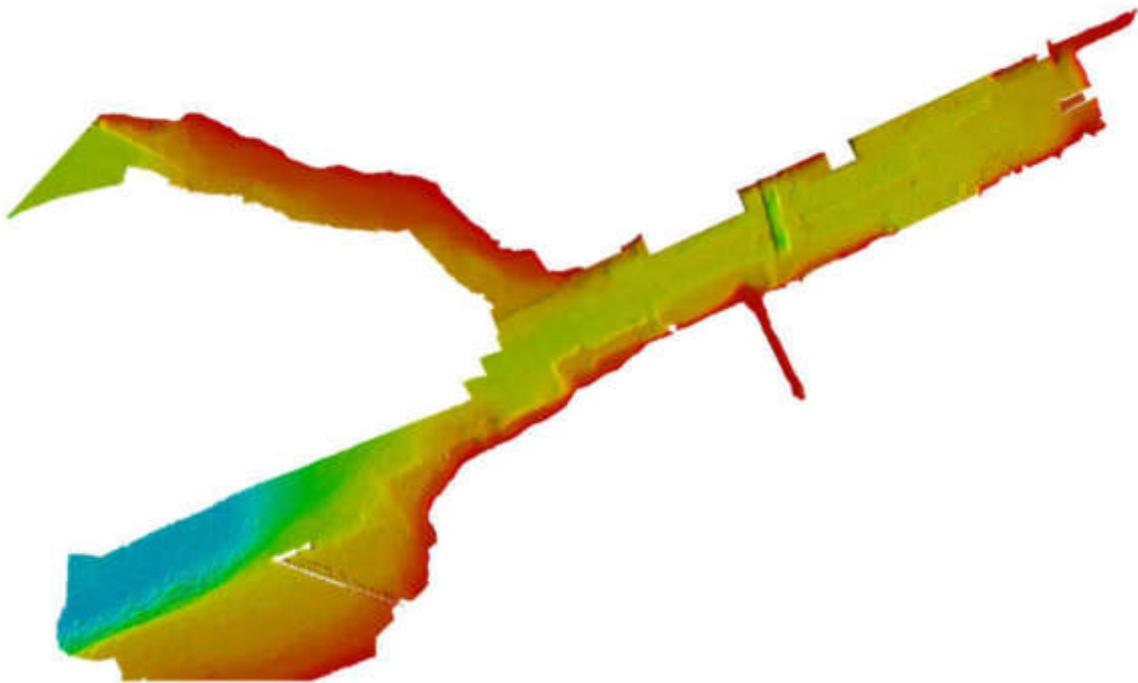


Figura 3-5 Planimetria stato dei luoghi con isobate passo 0.25 m – Settore 5

I dati provenienti dai rilievi di dettaglio sono stati opportunamente integrati, per le aree al largo, con il database di cartografia nautica digitale CM-93 [5], creato e continuamente aggiornato da Jeppesen (Figura 3-6). Tramite il tool MIKE C-MAP [6] di DHI, i dati possono essere direttamente importati nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo MIKE, consentendo quindi un'adeguata caratterizzazione batimetrica dell'area (Figura 3-7).

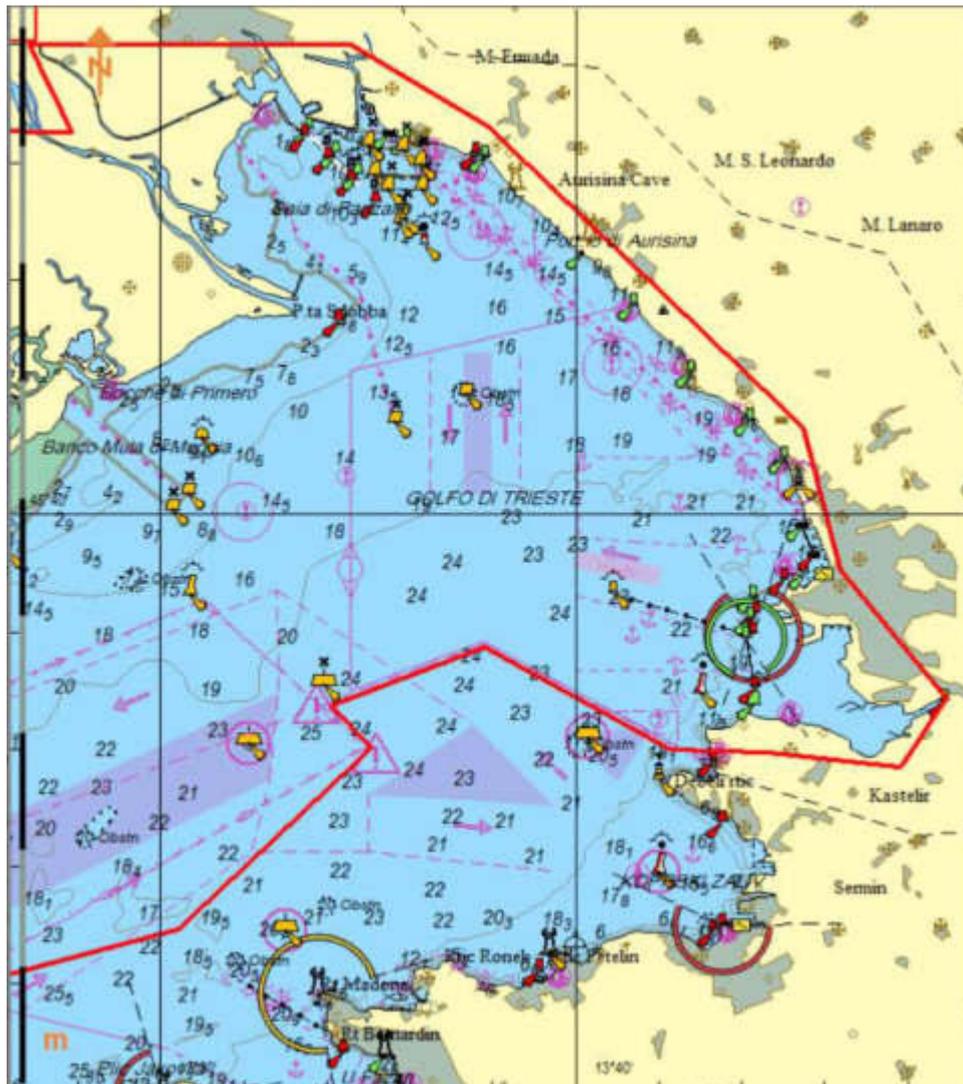


Figura 3-6 Rappresentazione della cartografia nautica CM-93 [5] di C-MAP [6] per la zona di interesse

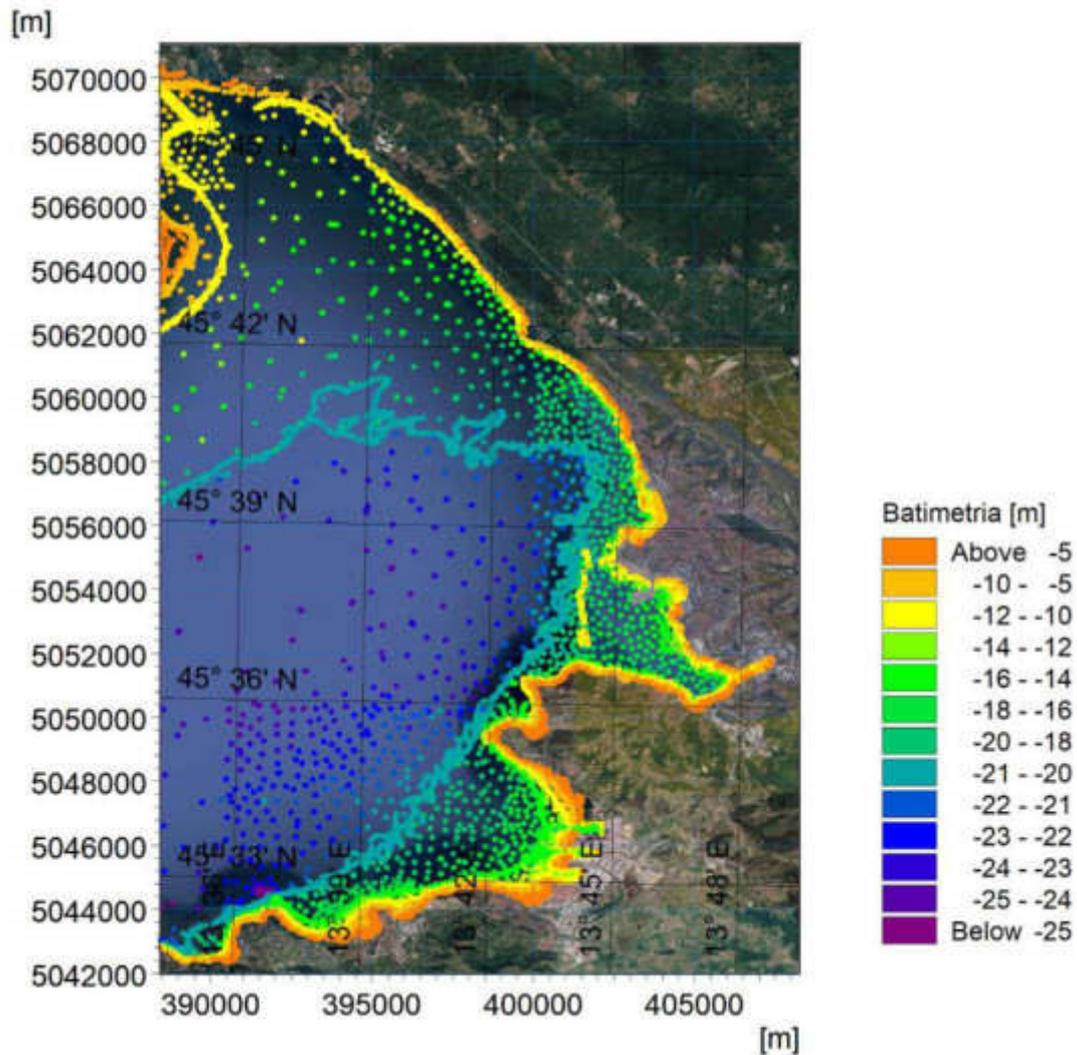


Figura 3-7 Dati estratti dalla cartografia nautica digitale disponibili per la zona in studio

3.3 Dati granulometrici

Nel mese di Ottobre 2021 sono stati effettuati da parte di L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l. alcuni carotaggi nella zona dove verrà realizzato il Molo VIII [7]. La Figura 3-8 mostra la posizione dei 22 campioni resi disponibili (punti rossi); ciascun campione è relativo a quattro diverse quote: -50 cm, -100 cm, -150 cm e -200 cm.

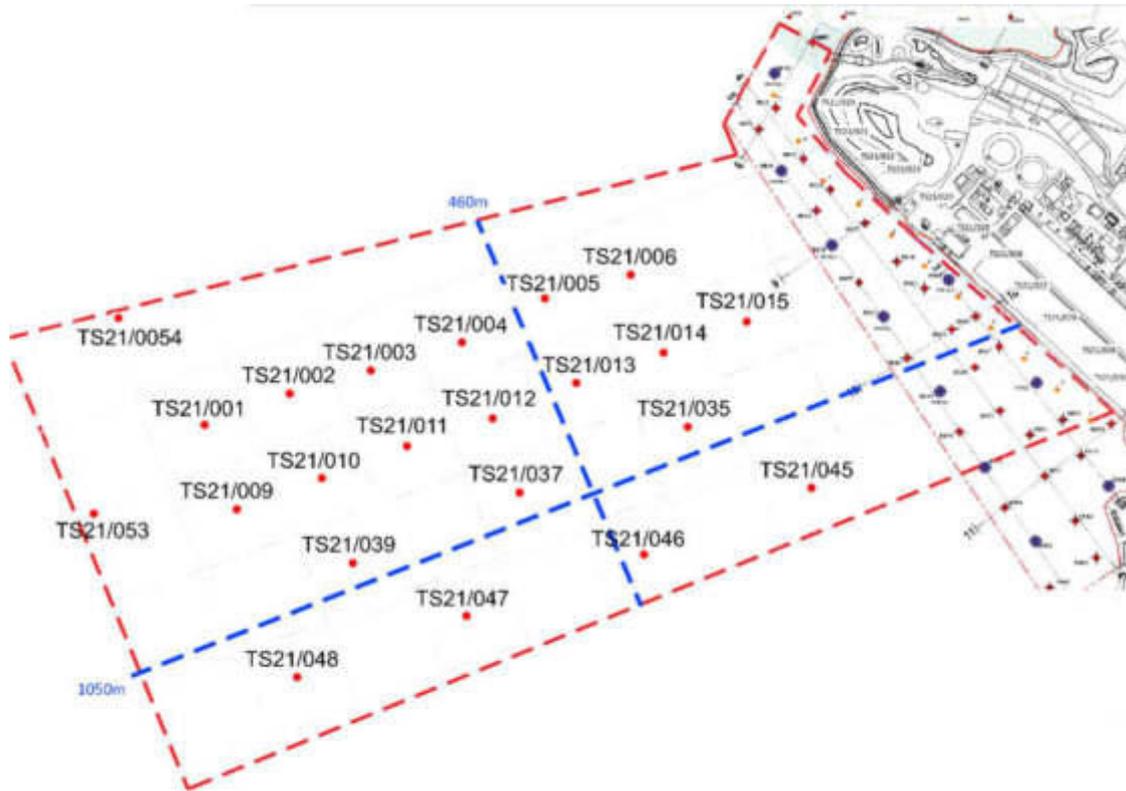


Figura 3-8 Planimetria dei sondaggi a mare eseguiti nell'Ottobre 2021 da L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l.

I risultati del campionamento sono sintetizzati in Tabella 3-1, dove sono riportati per ogni campione le caratteristiche sedimentologiche di interesse, ossia: percentuale di passante relativo ad ogni classe granulometrica, peso specifico dei grani e contenuto d'acqua.

La classificazione granulometrica prescinde dalla natura chimica o chimico-mineralogica delle particelle e prende in considerazione esclusivamente la loro dimensione, in termini di diametro medio d_{50} . In generale, le classi granulometriche principali sono 4 ossia, in ordine di dimensione decrescente: ciottolo (d_{50} superiori a 63 mm), ghiaia (d_{50} compreso tra 2 mm e 63 mm), sabbia (d_{50} compreso tra 0.063 mm e 2 mm), limo (d_{50} compreso tra 0.002 mm e 0.063 mm) ed argilla (d_{50} inferiore a 0.002 mm).

I risultati mostrati in tabella evidenziano una certa omogeneità dei sedimenti sia spazialmente, sia verticalmente: per ogni campione, le percentuali di passante, così come il contenuto d'acqua ed il peso specifico, si discostano poco dal rispettivo valore medio (mostrato in Tabella 3-1, riga in giallo).

Si osserva che il contenuto d'acqua, nel caso di fondale marino, rappresenta la porosità n del sedimento in situ; pertanto, nota la densità dell'acqua di mare ($\rho_w=1025 \text{ kg/m}^3$) e la densità del sedimento (valore medio $\rho_s=2745 \text{ kg/m}^3$) è possibile ricavare la densità naturale in situ, che nel presente caso risulta essere mediamente pari a 1438 kg/m^3 :

$$\rho_n = \rho_w * n + \rho_s * (1 - n)$$

Tabella 3-1 *Dati sedimentologici in termini di percentuale di passante relativo alla classe granulometrica (ciottolo, ghiaia, sabbia, limo e argilla), peso specifico e contenuto d'acqua. Fonte: Prove su terre eseguite da L.G.T. Laboratorio Geotecnico S.r.l. ad Ottobre 2021*

Campione	Ciottolo (>63mm)	Ghiaia (2-63mm)	Sabbia (0.063-2mm)	Limo (0.002-0.063mm)	Argilla (<0.002 m)	Peso specifico grani	Contenuto d'acqua
MEDIA	0.0	1.1	4.7	63.9	30.3	2745	76.4
TS21/001/SC000-050	0	0	5.5	66.3	28.2	2.78	83.6
TS21/001/SC050-100	0	0	2	62.3	35.7	2.77	81.9
TS21/001/SC100-150	0	0	2.8	56.8	40.4	2.7	75.2
TS21/001/SC150-200	0	0	3	61.1	35.9	2.74	68.9
TS21/002/SC000-050	0	0	7.7	63.6	27.7	2.78	80.6
TS21/002/SC050-100	0	0	2.2	64.2	33.6	2.75	84.5
TS21/002/SC100-150	0	0	3.4	61.2	35.4	2.74	72.5
TS21/002/SC150-200	0	0	3.7	65.5	30.8	2.7	68
TS21/003/SC000-050	0	0	5.2	67.7	27.1	2.77	67.3
TS21/003/SC050-100	0	0	7.1	58	34.9	2.71	71.8
TS21/003/SC100-150	0	0	5.3	70.6	24.1	2.75	69.9
TS21/003/SC150-200	0	0	5.1	65.4	29.5	2.72	64
TS21/004/SC000-050	0	3.7	4.9	62.9	28.5	2.71	66.1
TS21/004/SC050-100	0	0	2.9	64.4	32.7	2.76	77.1
TS21/004/SC100-150	0	0	4.2	71.1	24.7	2.75	72.8
TS21/004/SC150-200	0	0	5.1	66.2	28.7	2.72	73.4
TS21/005/SC000-050	0	0	7.3	69.6	23.1	2.72	99.3
TS21/005/SC050-100	0	0	1.7	60.6	37.7	2.78	84.3
TS21/005/SC100-150	0	0	4.8	63.1	32.1	2.76	77.7
TS21/005/SC150-200	0	0	5.2	65.4	29.4	2.78	72.4
TS21/006/SC000-050	0	0.3	7.3	58.8	33.6	2.73	114.5
TS21/006/SC050-100	0	0	5.2	71.5	23.3	2.78	70.7
TS21/006/SC100-150	0	0	2.4	66.6	31	2.79	69.3
TS21/006/SC150-200	0	0	3.1	72.3	24.6	2.79	76.4
TS21/009/SC000-050	0	0	6.5	58.8	34.7	2.73	89.7
TS21/009/SC050-100	0	0	3.7	61.2	35.1	2.74	76.6
TS21/009/SC100-150	0	0	4.5	63	32.5	2.72	70.9
TS21/009/SC150-200	0	4.3	3.2	58.1	34.4	2.72	70.7
TS21/010/SC000-050	0	5.5	8.1	60.9	25.5	2.75	75.8
TS21/010/SC050-100	0	0	5.3	61.7	33	2.71	70.7
TS21/010/SC100-150	0	0	3.4	68.9	27.7	2.7	67.5
TS21/010/SC150-200	0	0	5.5	65.5	29	2.72	66.2
TS21/011/SC000-050	0	15.3	10.3	49.7	24.7	2.8	64.2
TS21/011/SC050-100	0	0	2.1	64.6	33.3	2.75	63.9
TS21/011/SC100-150	0	0	2.3	64	33.7	2.7	58.3
TS21/011/SC150-200	0	0	2.4	64.9	32.7	2.78	69.3
TS21/012/SC000-050	0	4.9	4.4	61.9	28.8	2.76	79.4
TS21/012/SC050-100	0	0	2.2	66.2	31.6	2.75	61.8
TS21/012/SC100-150	0	0	2.9	65.3	31.8	2.74	75.2
TS21/012/SC150-200	0	0	3.4	67.1	29.5	2.75	72.4
TS21/013/SC000-050	0	0	5.1	61.3	33.6	2.77	100.1
TS21/013/SC050-100	0	0	2.3	62.8	34.9	2.73	85.7
TS21/013/SC100-150	0	0	3.5	65.6	30.9	2.72	77.4
TS21/013/SC150-200	0	0	3.7	64.7	31.6	2.77	67.1
TS21/014/SC000-050	0	0	3.5	69.4	27.1	2.74	114.9
TS21/014/SC050-100	0	0	2.1	69.8	28.1	2.8	75.9
TS21/014/SC100-150	0	0	2.5	69.2	28.3	2.71	73.2
TS21/014/SC150-200	0	0	3.4	59.3	37.3	2.73	72.3
TS21/015/SC000-050	0	0	1.7	73.6	24.7	2.69	107.8
TS21/015/SC050-100	0	0	1.6	69.4	29	2.8	77.6
TS21/015/SC100-150	0	0	1.5	60	38.5	2.75	73.5
TS21/015/SC150-200	0	0	1.7	68.4	29.9	2.71	74

Relazione Tecnica

Campione	Ciottolo (>63mm)	Ghiaia (2-63mm)	Sabbia (0.063-2mm)	Limo (0.002-0.063mm)	Argilla (<0.002 m)	Peso specifico grani	Contenuto d'acqua
TS21/035/SC000-050	0	0	4.6	61.5	33.9	2.78	100
TS21/035/SC050-100	0	0	2	73.2	24.8	2.76	80.7
TS21/035/SC100-150	0	0	3.7	65.6	30.7	2.72	74.9
TS21/035/SC150-200	0	0	9.7	68	22.3	2.7	68.2
TS21/037/SC000-050	0	4.7	4.3	66.1	24.9	2.77	84.6
TS21/037/SC050-100	0	0	4	63.7	32.3	2.72	77.8
TS21/037/SC100-150	0	0	3.1	58.3	38.6	2.75	72.7
TS21/037/SC150-200	0	0	4.1	63.1	32.8	2.78	77.8
TS21/039/SC000-050	0	0.9	23.5	54.5	21.1	2.77	80.7
TS21/039/SC050-100	0	0.4	7.9	60.1	31.6	2.72	73.7
TS21/039/SC100-150	0	0	3.6	59.3	37.1	2.7	72.2
TS21/039/SC150-200	0	0	5.6	59.2	35.2	2.73	71
TS21/045/SC000-050	0	0	6.9	64.6	28.5	2.7	99.8
TS21/045/SC050-100	0	0	3.5	67.8	28.7	2.76	73.6
TS21/045/SC100-150	0	0	3.6	65.4	31	2.78	78
TS21/045/SC150-200	0	0	2.3	64.3	33.4	2.76	73.3
TS21/046/SC000-050	0	0	7.9	69.9	22.2	2.75	96.4
TS21/046/SC050-100	0	0	4.2	64.5	31.3	2.79	82.2
TS21/046/SC100-150	0	0	4.1	65	30.9	2.78	75.8
TS21/046/SC150-200	0	0	5.5	64.6	29.9	2.75	73.4
TS21/047/SC000-050	0	0.3	11.9	60.2	27.6	2.7	63.9
TS21/047/SC050-100	0	0	2.4	68.4	29.2	2.76	62.6
TS21/047/SC100-150	0	0	2.3	68.7	29	2.78	60.1
TS21/047/SC150-200	0	0	2.3	69.9	27.8	2.78	54.1
TS21/048/SC000-050	0	1.7	11.1	58.6	28.6	2.73	72.9
TS21/048/SC050-100	0	0.8	10.6	60.5	28.1	2.76	75.6
TS21/048/SC100-150	0	0	3.5	63.8	32.7	2.77	75.9
TS21/048/SC150-200	0	0	4.8	65.9	29.3	2.73	73.4
TS21/053/SC000-050	0	19.8	7	50	23.2	2.76	84.9
TS21/053/SC050-100	0	29.3	6.5	43.4	20.8	2.77	78.6
TS21/053/SC100-150	0	0	4	61.9	34.1	2.72	77.2
TS21/053/SC150-200	0	0	2.9	66.1	31	2.72	74.8
TS21/054/SC000-050	0	0.3	7.8	64.3	27.6	2.71	82.5
TS21/054/SC050-100	0	1.6	6.4	57.8	34.2	2.73	83.7
TS21/054/SC100-150	0	0.7	4.6	64	30.7	2.72	74.6
TS21/054/SC150-200	0	0	3.1	66.7	30.2	2.74	69.2

3.4 Dati di circolazione generale

La corretta riproduzione dell'idrodinamica marina costiera a scala ingegneristica non può prescindere dalla conoscenza delle condizioni marine di più larga scala e della loro interazione con l'ambiente costiero stesso.

Nel presente studio, per i dati di larga scala si è fatto riferimento al modello di circolazione per il Mar Mediterraneo disponibile nell'ambito del Servizio Europeo CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) [8].

Lo specifico prodotto Mediterranean Sea Physics Reanalysis [9] è un modello tridimensionale di circolazione, che fornisce le "rianalisi" delle principali variabili oceanografiche, quali temperatura, salinità, elevazione della superficie libera del mare e campi di corrente, lungo la colonna d'acqua sull'intero dominio del bacino del Mediterraneo, alla risoluzione orizzontale di 1/24° (circa 4.5 km) su 141 livelli verticali "z" posti a distanze variabili lungo la verticale.

In Figura 3-9 è rappresentato il dominio del modello di circolazione del Mediterraneo attraverso un esempio della distribuzione della temperatura superficiale sull'intero bacino.

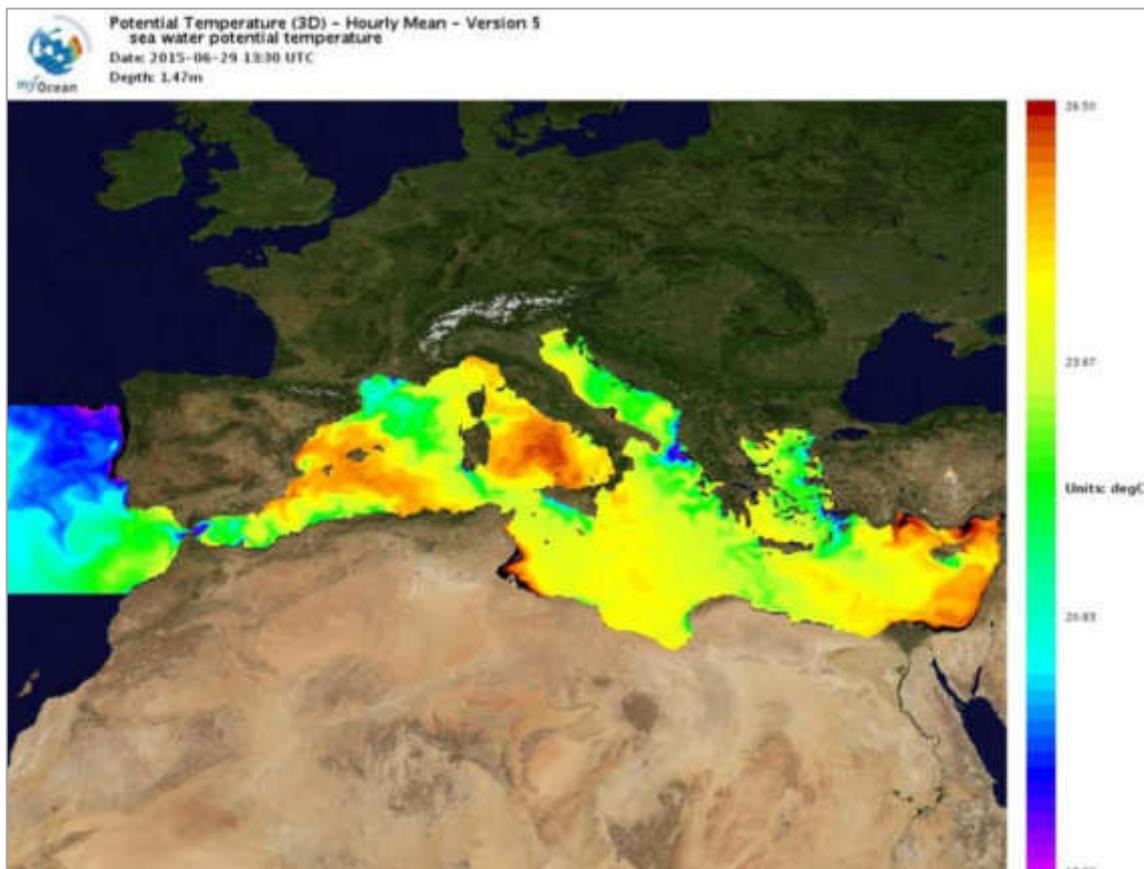


Figura 3-9

Dominio del modello del Mediterraneo in CMEMS ed esempio di distribuzione delle temperature in tutto il bacino

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 27 di 157
--	--	-------------------

Il prodotto Copernicus è basato sul modello baroclinico di circolazione marina NEMO (Nucleus for European Modelling of the Ocean) [10], ossia un modello allo stato dell'arte, che risolve in forma numerica le equazioni di Navier-Stokes, le equazioni del trasporto di salinità e di temperatura e l'equazione di stato del fluido marino, in approssimazione idrostatica.

Il modello include un modulo di assimilazione dei dati osservati basato sullo schema OceanVAR, che assimila dati di altimetria provenienti da osservazioni satellitari, e di temperatura e salinità provenienti da boe ARGO e da sonde XBT e CTD. Esso è forzato dai campi di analisi operativa del Centro Europeo ECMWF (European Centre for Medium range Weather Forecast), ed opera correzioni sui flussi all'interfaccia aria-mare (calcolati attraverso formule parametriche) tramite rilassamento ai dati di temperatura superficiale del mare (SST) osservati da satellite.

Le principali caratteristiche del modello a larga scala sono riassunte in Tabella 3-2.

La qualità dei dati di rianalisi del sistema CMEMS [9] è certificata attraverso un approfondito sistema di controllo di qualità, i cui risultati sono presentati nel CMEMS Quality Identification Document (QUID) per il Mar Mediterraneo [11].

Tabella 3-2 Principali caratteristiche del modello a scala di bacino del Mar Mediterraneo, disponibile nell'ambito del servizio CMEMS (Rianalisi del Mediterranean Forecasting System)

Modello numerico	NEMO
Risoluzione orizzontale	0.042° (circa 4-5 km)
Risoluzione verticale	141 livelli z non equi-distanziati
Disponibilità temporale	Dal 01.01.1987 ad oggi
Risoluzione temporale dei dati	Medie orarie, medie giornaliere e medie mensili
Forzante atmosferico	Analisi operative di ECMWF: – Risoluzione orizzontale: 0.125° – Frequenza temporale: 6 ore
Condizioni al contorno aperto	Modello globale operativo di Mercator Ocean alla risoluzione orizzontale di 1/12°
Assimilazione dati	3D-VAR per – T (XBT, MBT, ARGO, CTD) – S (ARGO, CTD) – SLA (satellite)
Correzione su temperatura superficiale	Rilassamento a dati di SST osservati da satellite
Marea	no

3.4.1 Campagne di misura di temperatura e salinità

All'interno della baia di Muggia, OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale ha eseguito negli anni passati diverse campagne di misura di temperatura e salinità della colonna d'acqua.

Le campagne utilizzate ai fini del presente studio sono state condotte in data 23 Settembre 2014, 27 Gennaio 2015 e 20 Marzo 2015 ed hanno riguardato la caratterizzazione termoalina lungo la colonna d'acqua in 10 punti, rappresentati in rosso in Figura 3-10.

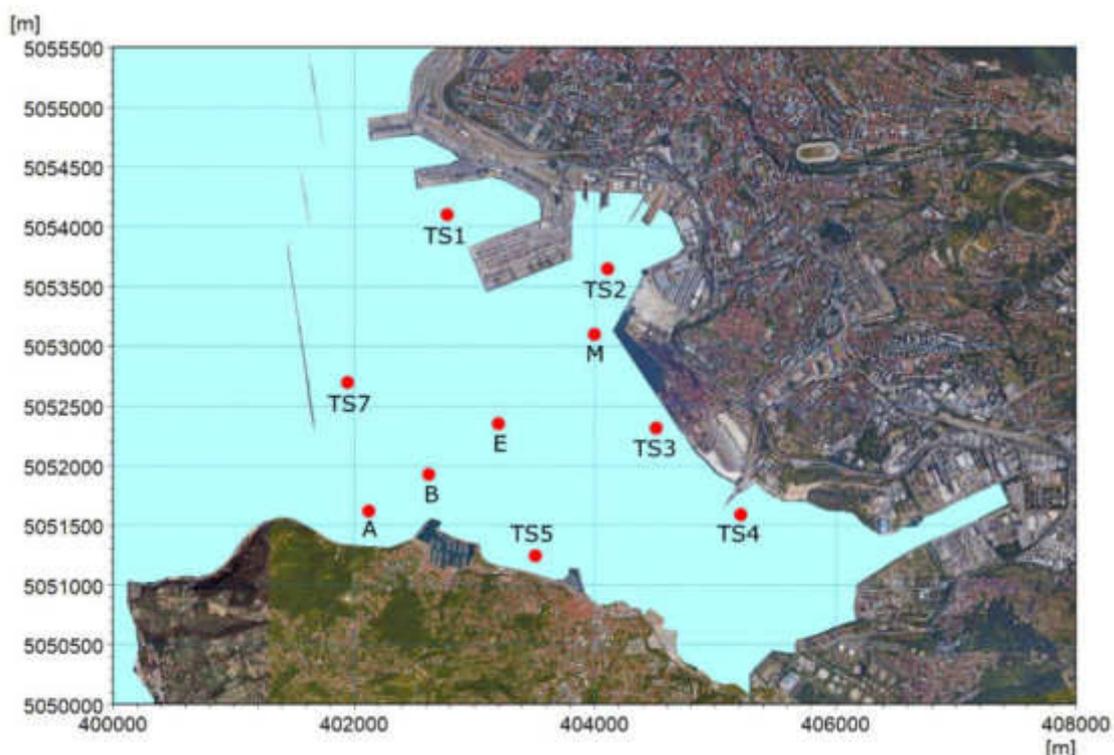


Figura 3-10 Planimetria dei punti di campionamento (in rosso) di temperatura e salinità (campagne OGS nel periodo Settembre 2014-Marzo 2015)

Nelle immagini a seguire sono riportati i profili di temperatura (Figura 3-11, Figura 3-12, Figura 3-13) e salinità (Figura 3-14, Figura 3-15, Figura 3-16) derivati dalle suddette campagne di misura.

Dal punto di vista della temperatura, si osserva che nel periodo invernale (Gennaio - Figura 3-12) la colonna d'acqua è completamente mescolata: in tutti punti del campionamento la differenza termica tra la superficie ed il fondo (circa -20 m) è pressoché nulla (inferiore a 0.1°C) e le temperature sono dell'ordine di 9.5°C. In primavera (fine Marzo - Figura 3-13) inizia a crearsi una buona stratificazione termica lungo la colonna d'acqua, con differenze di quasi 1°C: in superficie si verificano temperature pari a poco più di 10°C, mentre al fondo le temperature sono ancora di poco inferiori a 9.5°C. Alla fine del periodo estivo (fine Settembre - Figura 3-11) si hanno temperature ben più elevate, mediamente pari a 21.5°C, ed una stratificazione termica

ridotta (sotto 0.5°C) e in alcuni punti inversa, cioè con temperature più elevate al fondo che in superficie.

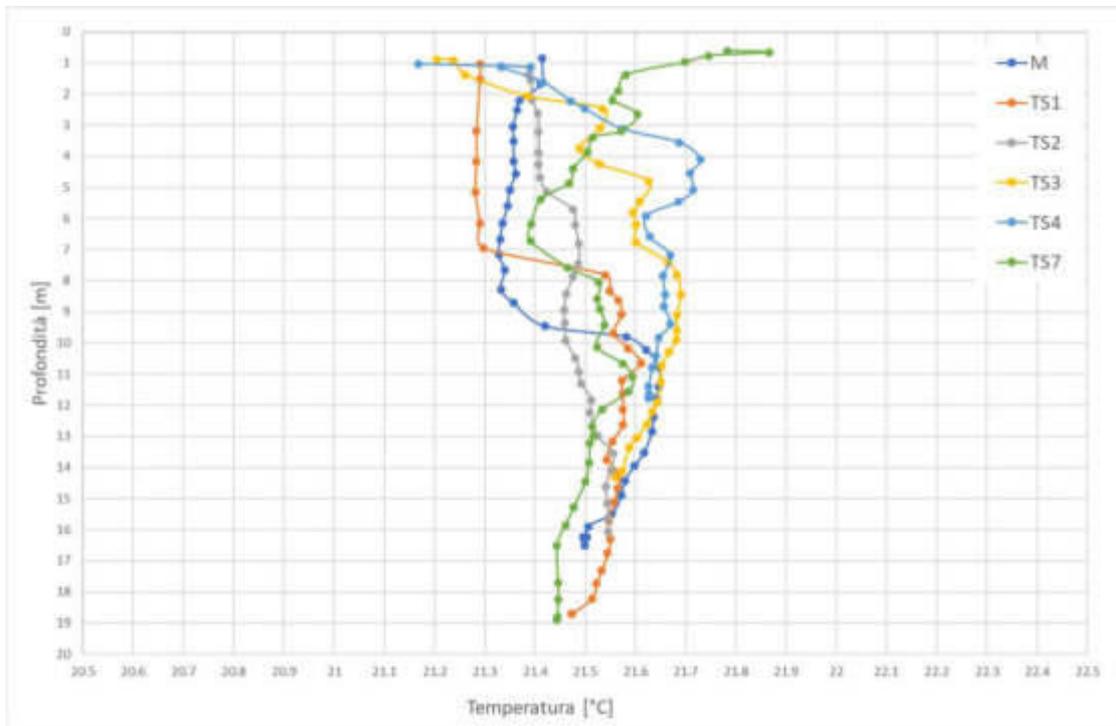


Figura 3-11 Profili di temperatura misurati durante il campionamento del 23 Settembre 2014 eseguito da OGS

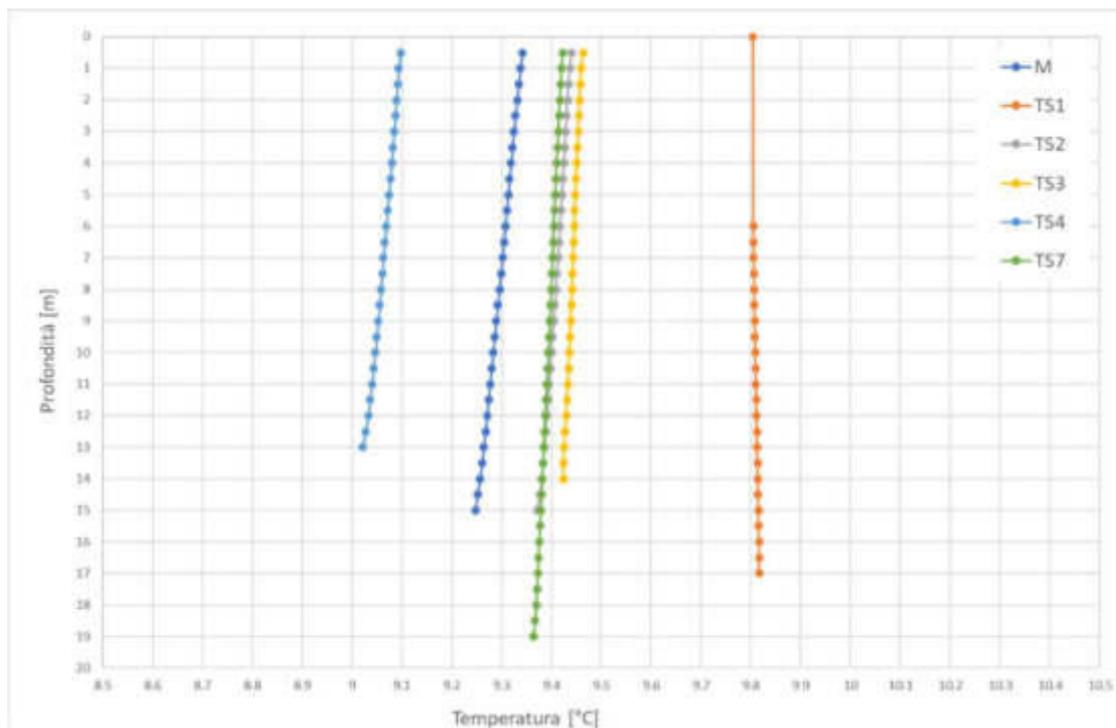


Figura 3-12 Profili di temperatura misurati durante il campionamento del 27 Gennaio 2015 eseguito da OGS

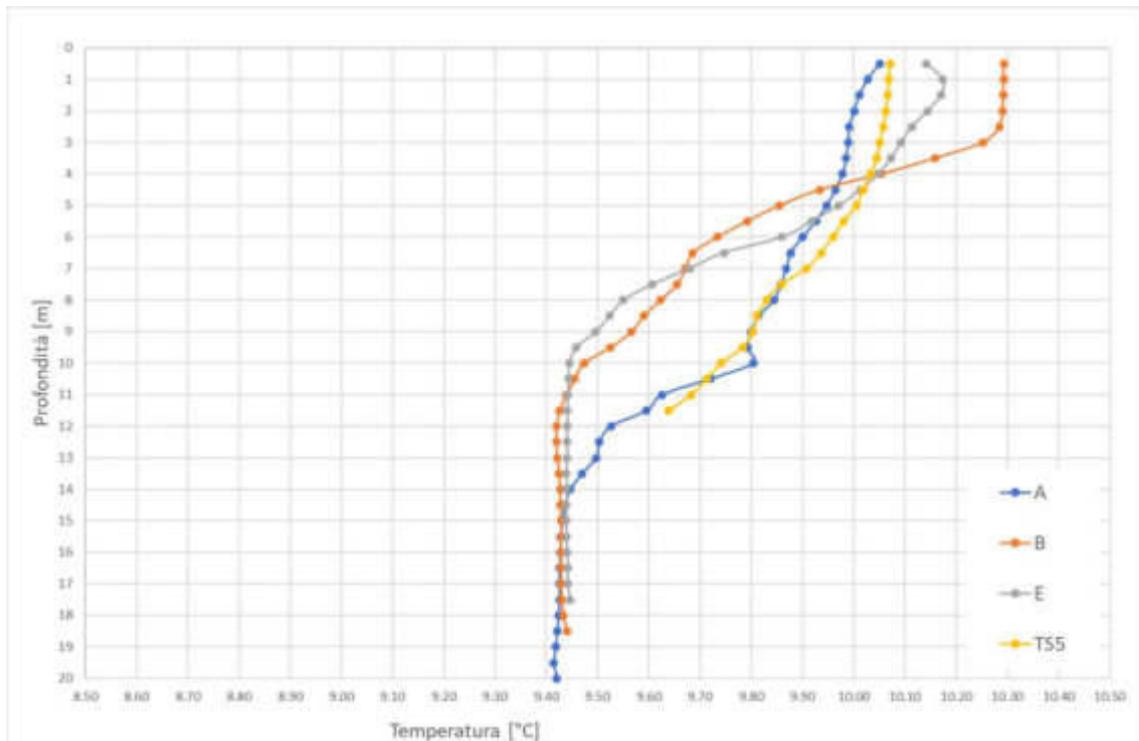


Figura 3-13 Profili di temperatura misurati durante il campionamento del 20 Marzo 2015 eseguito da OGS

Dal punto di vista della salinità, nel mese di Settembre (Figura 3-14) si ha una stratificazione, seppur modesta, con valori più bassi in superficie (36.5-37 PSU) e più alti al fondo (37.3-37.5 PSU). Negli altri due mesi di campagne (Gennaio - Figura 3-15 e Marzo - Figura 3-16) la salinità è la medesima lungo la colonna d'acqua, con valori poco più alti di 37 PSU in Gennaio e poco più alti di 37.5 in Marzo.

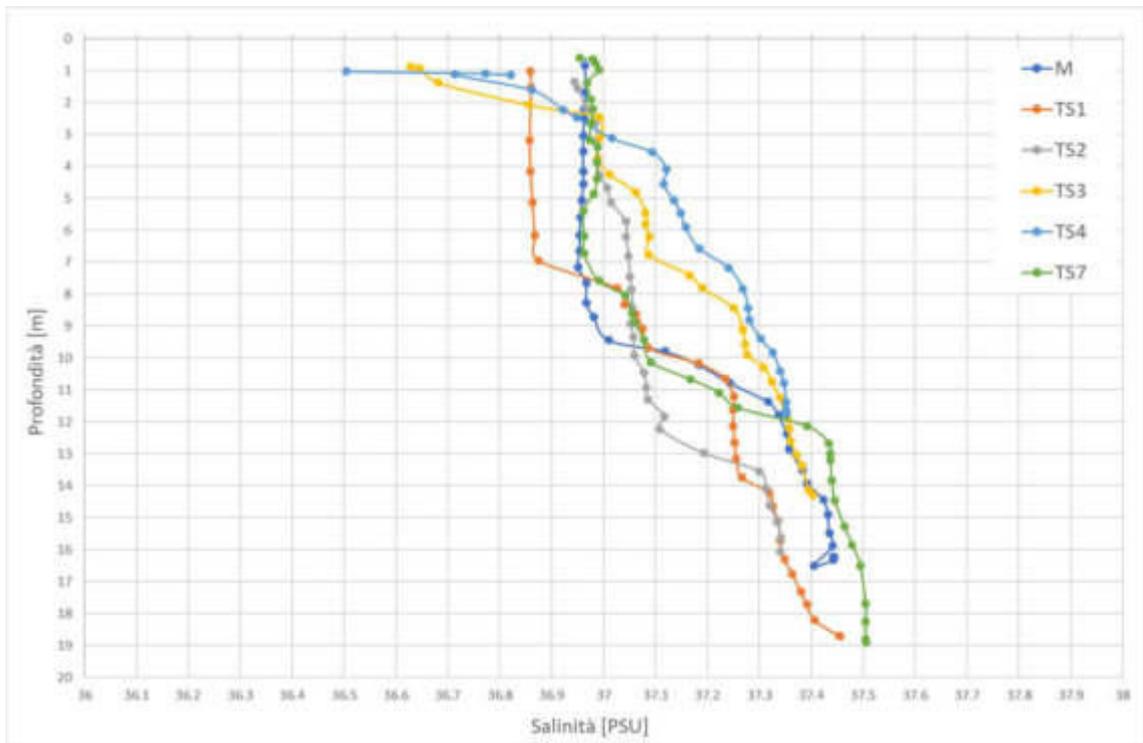


Figura 3-14 Profili di salinità misurati durante il campionamento del 23 Settembre 2014 eseguito da OGS

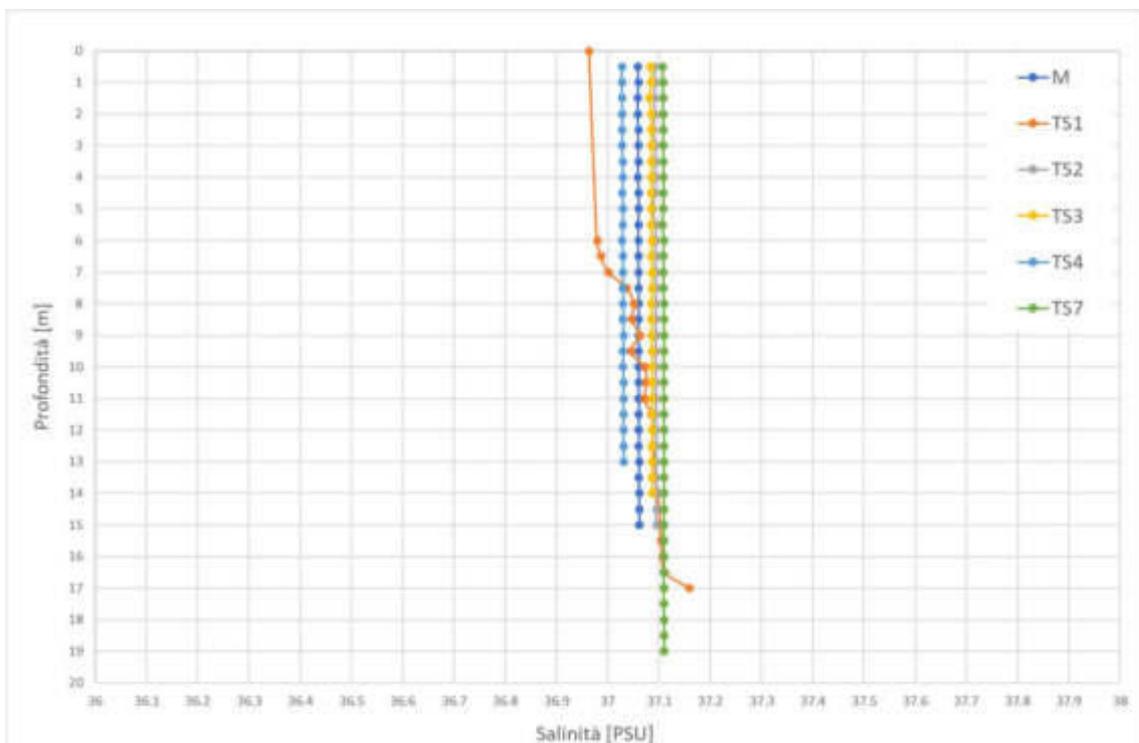


Figura 3-15 Profili di salinità misurati durante il campionamento del 27 Gennaio 2015 eseguito da OGS

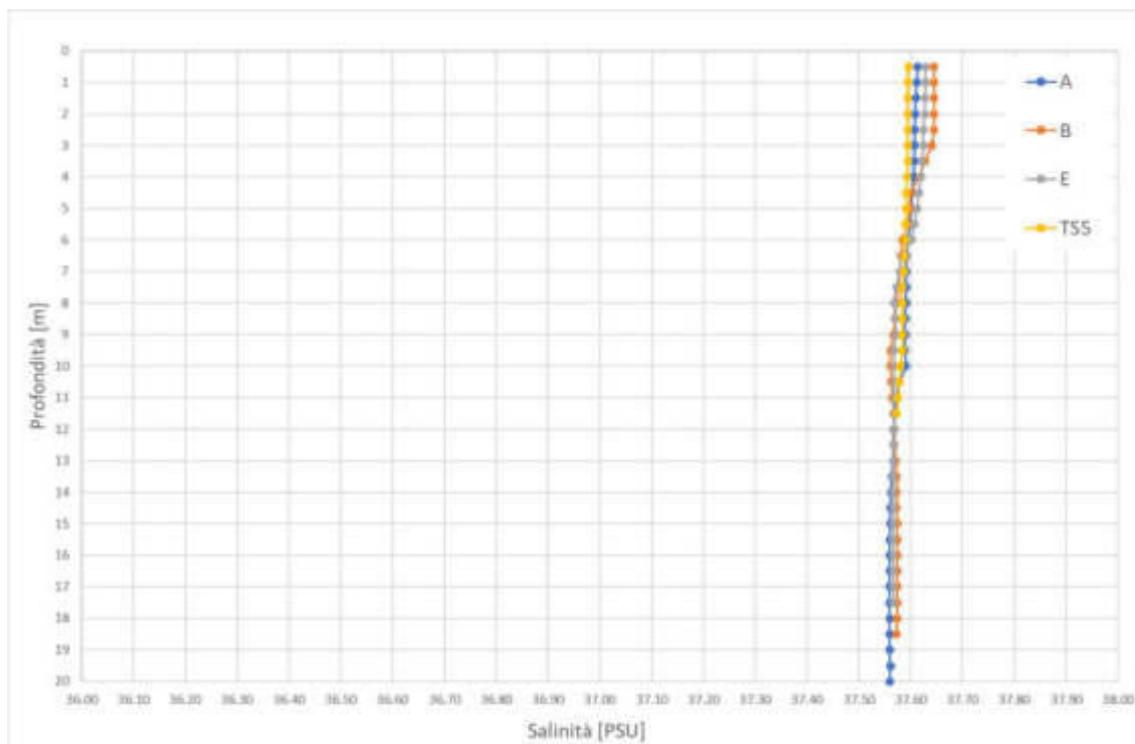


Figura 3-16 Profili di salinità misurati durante il campionamento del 20 Marzo 2015 eseguito da OGS

3.5 Dati di marea

Le maree, ossia le oscillazioni periodiche a cui il mare è sottoposto a causa delle forze di attrazione della Luna, del Sole e dei pianeti, danno origine alle correnti di marea, cioè a scorrimenti orizzontali dell'acqua che accompagnano la salita (flusso) e la discesa (riflusso) della marea. Tali innalzamenti ed abbassamenti dei livelli sono minimi in mare aperto e, più in generale, nel Mar Mediterraneo [12], con alcune eccezioni di bacini semichiusi caratterizzati da basso fondale (es. Nord Adriatico).

Nel presente studio per le oscillazioni di marea (che non sono riprodotte nel modello di rianalisi di circolazione CMEMS) si è fatto riferimento al modello globale di marea oceanica DTU10 (Technical University of Denmark) [13]. I coefficienti armonici del modello sono stati sviluppati utilizzando le misurazioni altimetriche multi-missione effettuate negli ultimi 17 anni (da settembre 1992 a dicembre 2009) dai satelliti TOPEX/POSEIDON, Jason1 e Jason-2 per l'analisi dei residui di livello del mare.

DTU10 è un aggiornamento del modello globale di marea oceanica AG95 ed è validato su misurazioni costiere relative alla regione Nord-Occidentale dell'Europa e al Mar Cinese Orientale.

La risoluzione spaziale è di $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ ed include le 12 principali costituenti mareali.

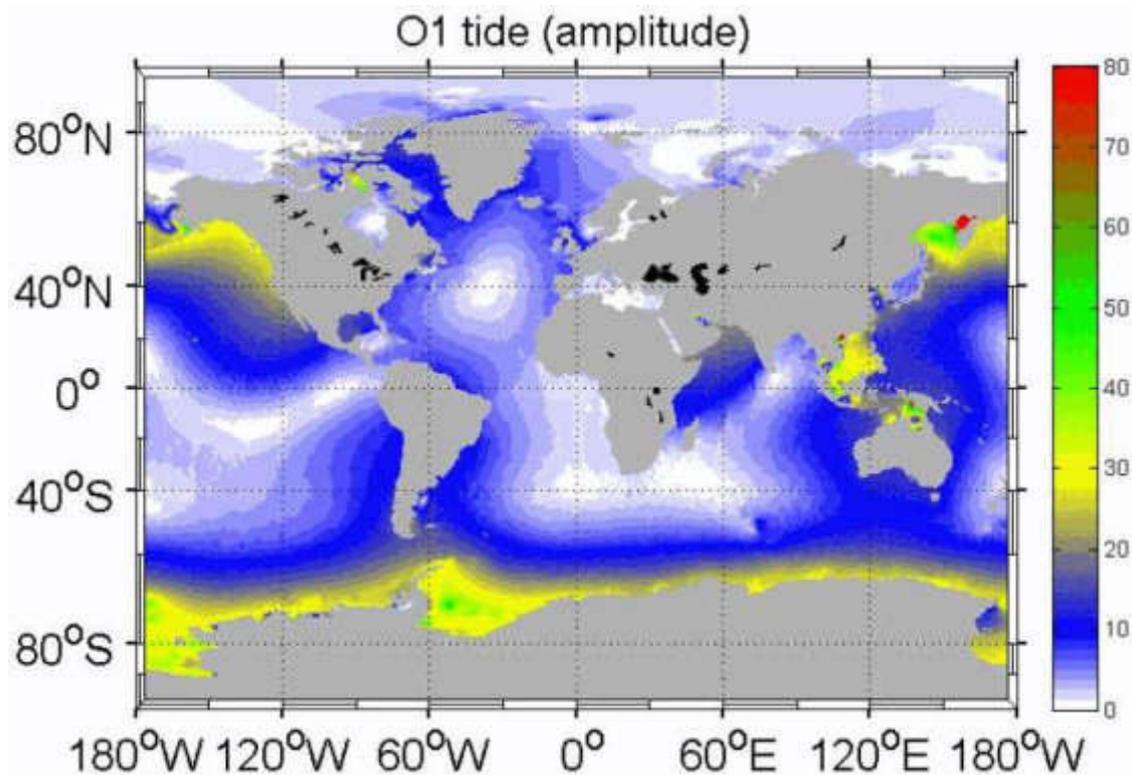


Figura 3-17 Esempio di campo della componente mareale O1 dal modello globale DTU10

3.6 Dati atmosferici

I dati atmosferici utilizzati per il presente studio derivano dalla stazione meteo "Trieste - Molo Fratelli Bandiera" gestita da ARPA FVG (Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia) che mette a disposizione, tramite web, informazioni meteorologiche di varia natura mediante la propria struttura OSMER e GRN - Osservatorio Meteorologico Regionale e Gestione Rischi Naturali [14].

Questa stazione è localizzata immediatamente all'esterno della baia di Muggia, nel punto di coordinate geografiche latitudine 45.649996 e longitudine 13.752242 (Figura 3-18). La stazione "Molo Fratelli Bandiera" presenta una serie di dati più lunga e ricca rispetto alle stazioni limitrofe, ed è stata pertanto adottata quale stazione di riferimento per lo studio in relazione ai parametri atmosferici.

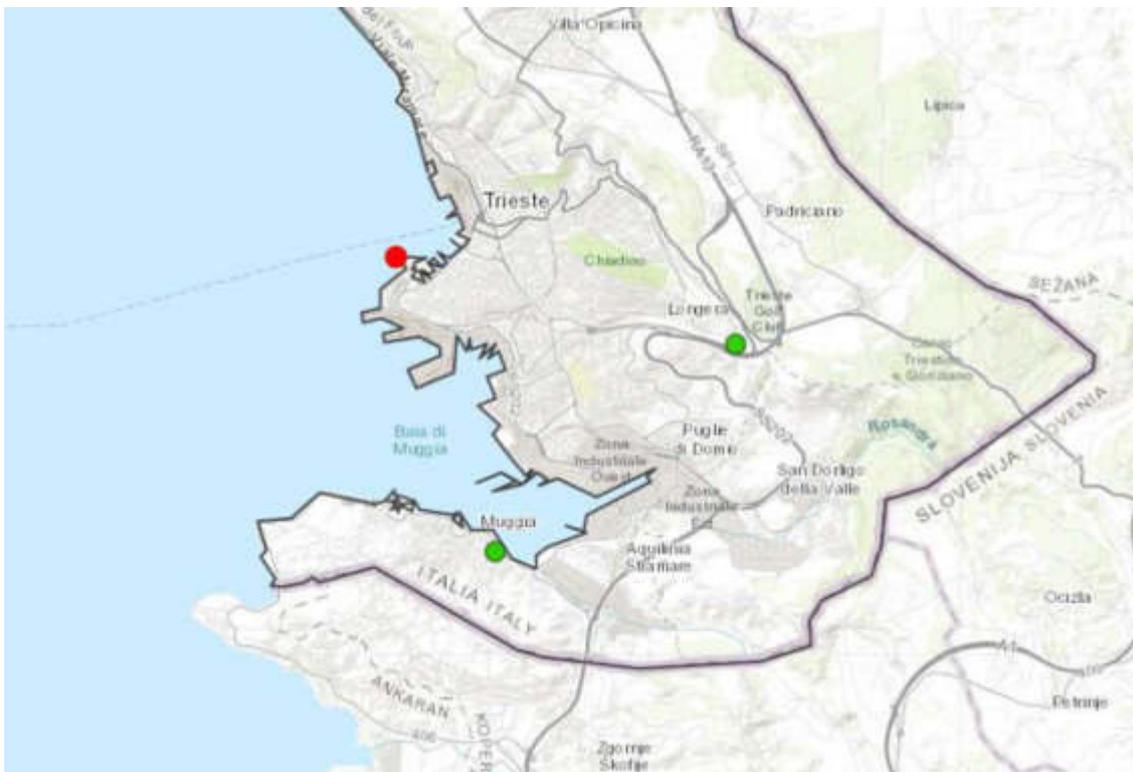


Figura 3-18 Localizzazione di alcune stazioni meteo gestite da ARPA FVG nella zona di Trieste. In rosso la stazione "Trieste molo Fratelli Bandiera" presa a riferimento nel presente studio

Da tale stazione sono stati estratti i dati di velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria, umidità relativa e precipitazioni per il periodo temporale preso a riferimento per il presente studio (Settembre 2014-Settembre 2015). Gli andamenti di queste forzanti per l'anno selezionato sono riportati nelle immagini a seguire.

Si osserva che il vento presenta velocità massime dell'ordine di 20 m/s, con un picco (a Febbraio 2015) di 28 m/s (Figura 3-20); le velocità medie sono dell'ordine di 5 m/s. Il settore prevalente, ossia quello che presenta le maggiori intensità e frequenze di accadimento, è quello compreso tra 45°N e 105°N (Bora). La calma (Figura 3-19), qui rappresentata per velocità inferiori ad 1 m/s, ha una frequenza del 6.32%, corrispondente a circa 23 giorni nell'anno considerato.

Le temperature dell'aria (Figura 3-21) oscillano tra 0°C (a fine Dicembre 2014) e 35°C (ad Agosto 2015); i mesi più freddi sono quelli invernali di Dicembre, Gennaio e Febbraio, con temperature tra 0°C e 15°C, mentre i più caldi sono quelli estivi di Giugno, Luglio ed Agosto, con temperature tra 15°C e 35°C.

L'umidità relativa (Figura 3-22) ha valori compresi tra il 20% ed il 95%. L'andamento è analogo durante tutto l'anno, con valori medi maggiori nei mesi di Ottobre, Novembre e Dicembre rispetto al resto dell'anno.

Le precipitazioni (Figura 3-23) sono state anch'esse inserite nel modello idrodinamico ma la loro influenza sulla circolazione è pressoché trascurabile.

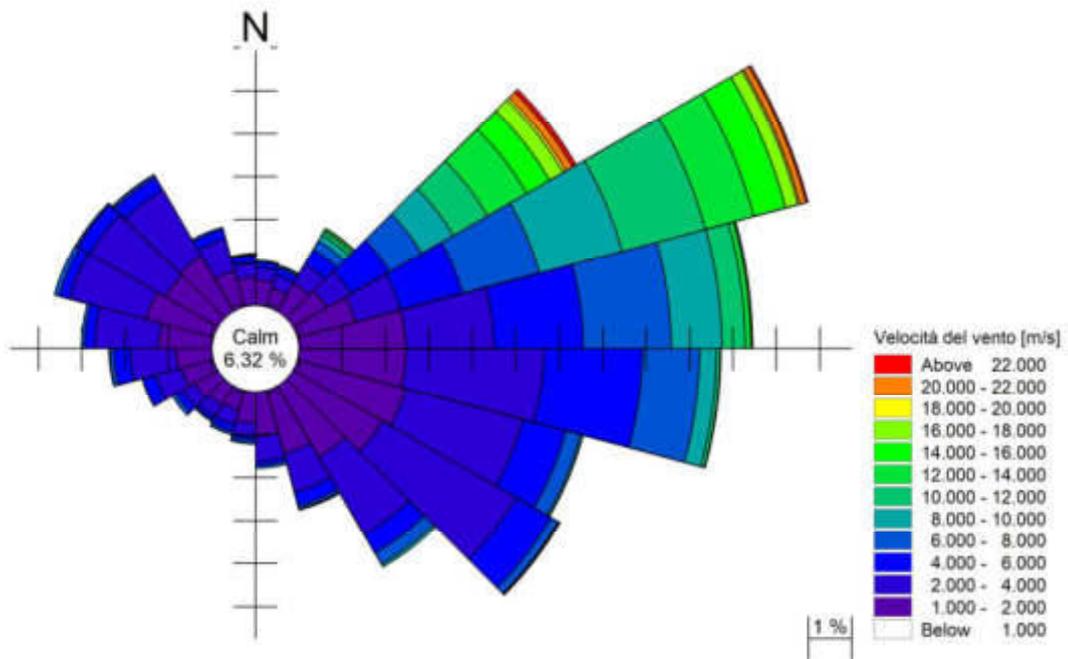


Figura 3-19 Rosa del vento relativa al periodo Settembre 2014-Settembre 2015. La calma è qui rappresentata per velocità inferiori a 1 m/s. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG

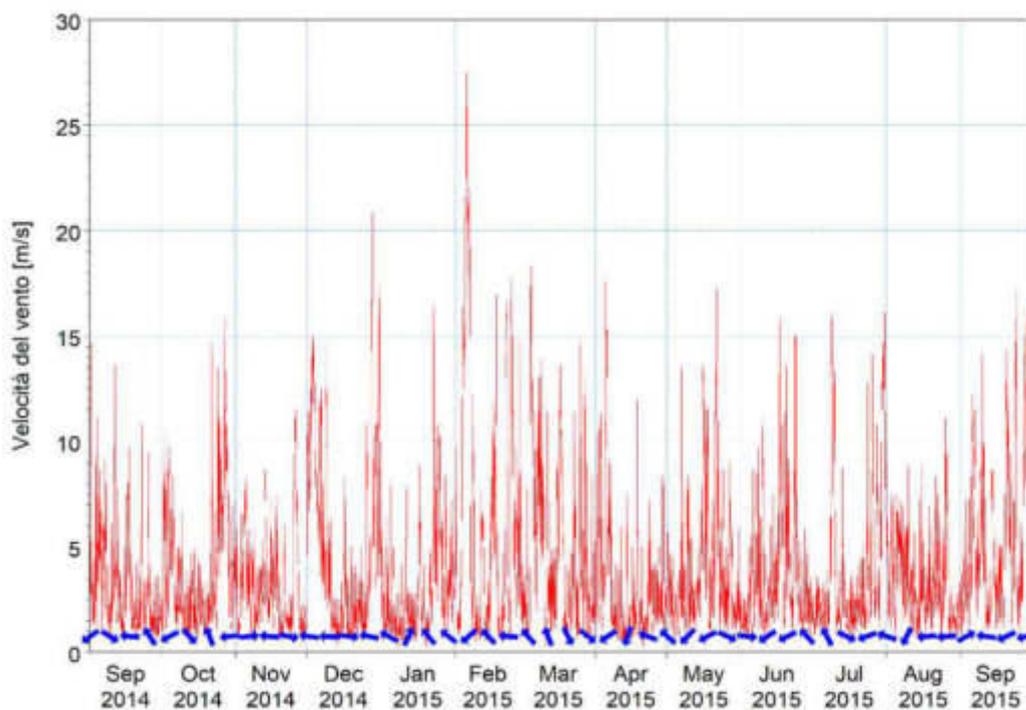


Figura 3-20 Andamento delle velocità (in rosso) e direzioni (in blu) del vento durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG

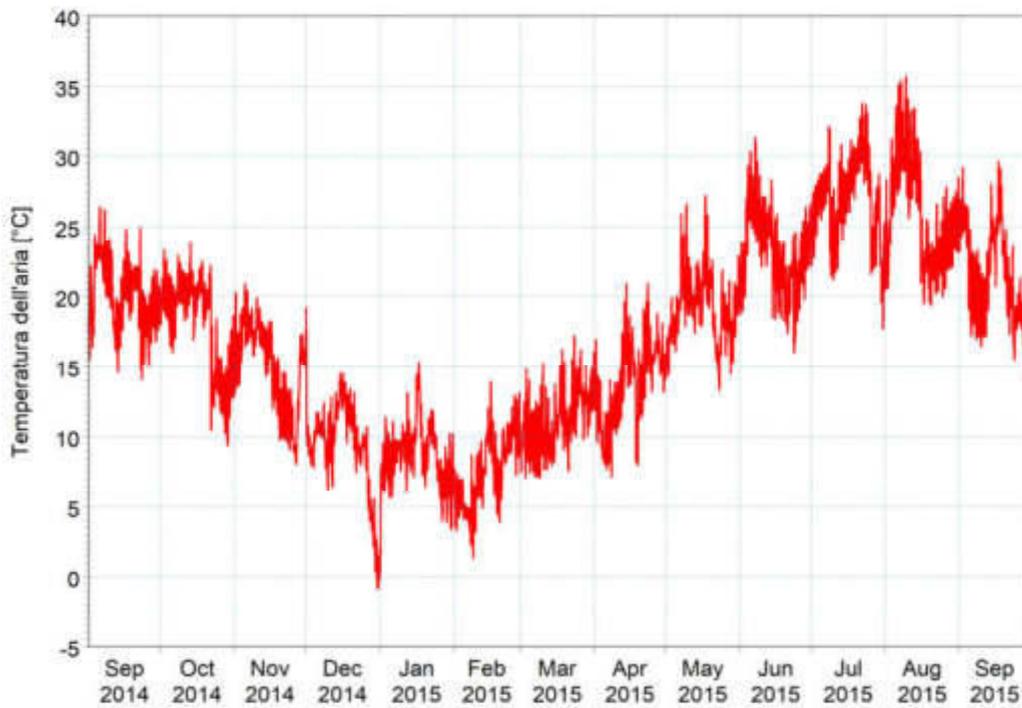


Figura 3-21 Andamento della temperatura dell'aria (°C) durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG

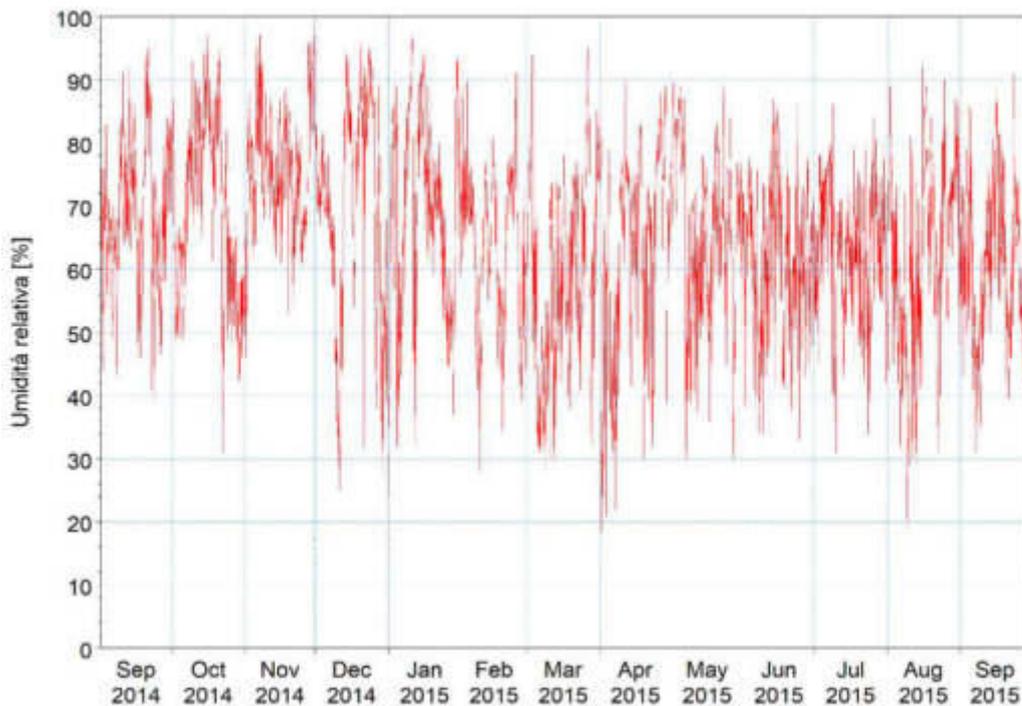


Figura 3-22 Andamento dell'umidità relativa (%) durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015. Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG

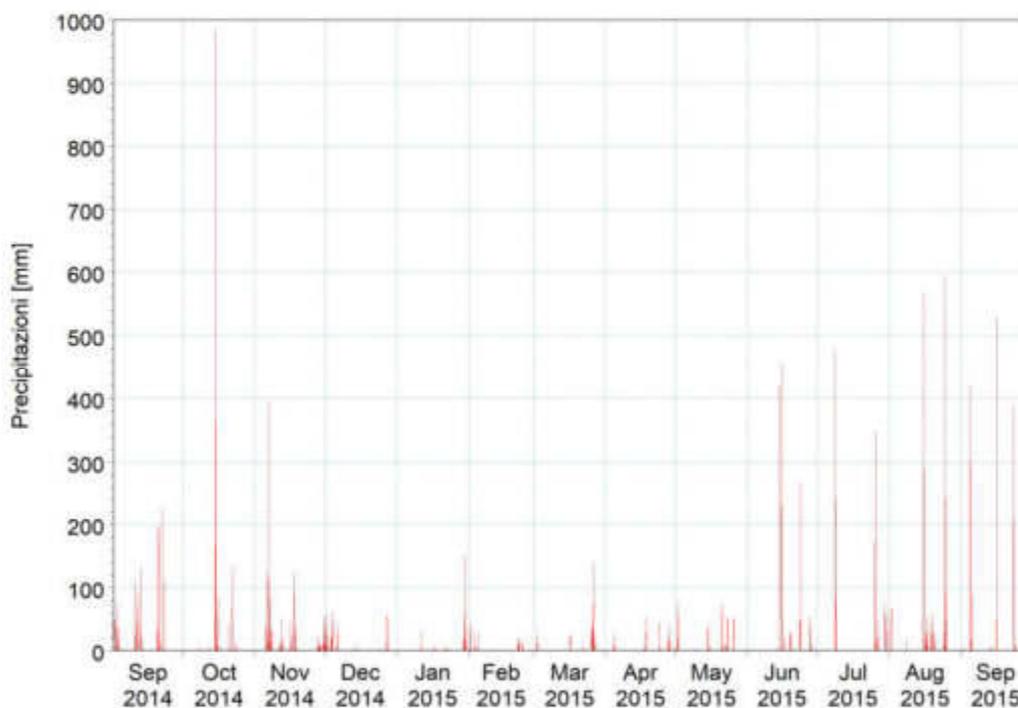


Figura 3-23 Andamento delle precipitazioni (mm) durante il periodo Settembre 2014-Settembre 2015.
Fonte: stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" di ARPA FVG

Oltre ai dati sopra esposti, per impostare il modello idrodinamico è necessario conoscere anche la copertura nuvolosa, che influenza lo scambio termico acqua-aria. Questo dato, non essendo misurato dalla suddetta stazione, è stato derivato dalle analisi operative del sistema Climate Forecast System (CFS) [15], un modello ad alta risoluzione implementato a scala globale per la rappresentazione del sistema accoppiato atmosfera-oceano-terra-mare, prodotto e distribuito dal National Centre for Environmental Prediction (NCEP) [16].

In particolare, si è fatto riferimento modello CFSv2, operativo dal 2011, che presenta una risoluzione spaziale della copertura nuvolosa pari a 0.2°, corrispondente a circa 18 km.

3.7 Corsi d'acqua

La zona oggetto del presente studio ricade nel bacino idrografico delle Alpi Orientali – Bacino del Levante. Questo bacino ha un'estensione complessiva di circa 1.275 km², dei quali circa 940 km² ricadenti in territorio sloveno, ed è formato da due zone geomorfologicamente molto diverse: l'estremo lembo orientale della pianura friulana ad Est dell'Isonzo, dove scorrono una serie di canali artificiali, e la zona del Carso. La zona del Carso è attraversata da tre corsi d'acqua principali: il fiume Timavo, il rio Osopo ed il torrente Rosandra-Glinščica [17]. Quest'ultimi due corsi d'acqua sfociano all'interno del bacino di Muggia.

Il torrente Rosandra-Glinščica nasce nei pressi dell'abitato di Bottazzo-Botač dall'unione di due modesti corsi d'acqua che si originano in territorio sloveno. Nel primissimo tratto il torrente

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 38 di 157
--	--	-------------------

attraversa un'area con bassa pendenza ed il suo corso risulta regolare e tranquillo. Dopo pochissimi metri il torrente si getta in una cascata con un salto di oltre 30 m, dopodiché il suo corso acquisisce un andamento più torrentizio ed irregolare a causa della conformazione e costituzione dell'ambiente che attraversa. A Bagnoli della Rosandra-Boljunec il torrente esce dalla forra e da qui si diparte il suo tratto inferiore, quasi totalmente canalizzato, che termina nel canale navigabile che serve la zona industriale di Trieste. Durante il suo corso la Rosandra-Glinščica riceve le acque provenienti dalle numerose sorgenti carsiche e dal bacino idrografico a monte della cascata. Questo apporto d'acqua si intensifica principalmente durante i periodi piovosi e ciò comporta un cambiamento notevole dell'entità di portata del torrente nell'arco dell'anno. Pochi sono i riferimenti bibliografici che riportano la stima della portata media di questo Torrente, ma si può affermare che essa in generale è molto bassa, inferiore a 0.5-1 m³/s [17] [18].

Il Rio Ospo nasce in territorio sloveno e lo percorre per circa 3 km raccogliendo sia acque carsiche provenienti per la maggior parte dalla sorgente della grotta nei pressi della località di Ospo, a 91 m s.l.m., sia acque di ruscellamento che nascono da sorgenti disposte a quote inferiori su territori flyscioidi. In territorio italiano percorre la provincia di Trieste da Est a Ovest, scorrendo per 4 km nell'ampia Valle delle Noghère, a circa 4 m s.l.m., fino alla baia di Muggia dove sfocia. Complessivamente il bacino che alimenta il Rio Ospo drena un'area di circa 33 km². Questo corso d'acqua ha per tutto l'anno una presenza costante di acqua in quasi tutto l'alveo anche se con variazioni notevoli, soprattutto stagionali; d'estate si ha una tendenza ad avere un'esigua portata d'acqua [19]. La portata media annua è stimata attorno a valori di 0.5 -1 m³/s, con picchi di 5 m³/sec nei periodi di piena [20].

3.8 Dati di moto ondoso

Per quanto riguarda la disponibilità di registrazioni di moto ondoso, la principale fonte di riferimento nel nostro paese è la Rete Ondametrica Nazionale (RON) gestita dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). I dati di boa possono essere utilizzati come riferimento anche ad una certa distanza dal sito di interesse, qualora l'esposizione alle mareggiate per i diversi settori direzionali possa essere considerata simile tra il sito in esame ed il sito che ospita la boa ondametrica. Frequentemente, tuttavia, per la caratterizzazione meteomarina di un sito non è possibile fare affidamento alle misure. Questo avviene o perché i dati sono troppo frammentati a causa di malfunzionamenti dello strumento o periodi di manutenzione dello stesso, o perché le serie temporali disponibili coprono solo pochi anni (5÷10) oppure ancora perché per il paraggio in esame la boa non è disponibile o non è sufficientemente rappresentativa.

Sempre più spesso, pertanto, si fa ricorso ad una ricostruzione storica delle condizioni meteomarine attraverso modellistica numerica. Tale approccio, comunemente definito come "wave hindcast" permette di disporre di serie temporali, tra l'altro, di altezza d'onda, periodo e direzione, nel punto desiderato.

Se da un lato la possibilità di disporre di ricostruzioni di condizioni meteomarine pregresse attraverso un approccio modellistico rappresenta oggi un formidabile supporto nell'ingegneria costiera ed offshore, dall'altro va sottolineata l'importanza di disporre di ricostruzioni modellistiche robuste, accurate e validate.

Tra i database disponibili, un esempio di ricostruzione storica di vento e moto ondoso per l'intero bacino del Mediterraneo è costituito dal database Mediterranean Wind Wave Model (MWM) [21], prodotto da DHI in collaborazione con HyMOLab (Hydrodynamics and Met-Ocean Laboratory), struttura del Dipartimento di Ingegneria e Architettura dell'Università di Trieste. Il database MWM deriva dall'implementazione di una catena modellistica che beneficia di due modelli che rappresentano lo stato dell'arte rispettivamente nell'ambito della modellazione atmosferica (WRF-ARW) e della modellazione del moto ondoso (MIKE 21 SW di DHI [22]).

In Figura 3-24 e Figura 3-25 sono riportate rispettivamente la batimetria di riferimento per la componente modellistica di moto ondoso ed un dettaglio sull'Alto Adriatico della *mesh* di calcolo adottata. La risoluzione del modello d'onda è variabile da circa 10 km al largo fino a circa 3 km sottocosta. I dati sono stati estensivamente validati con confronti con anemometri, boe, nonché con le stime di intensità del vento e altezza d'onda da satellite.

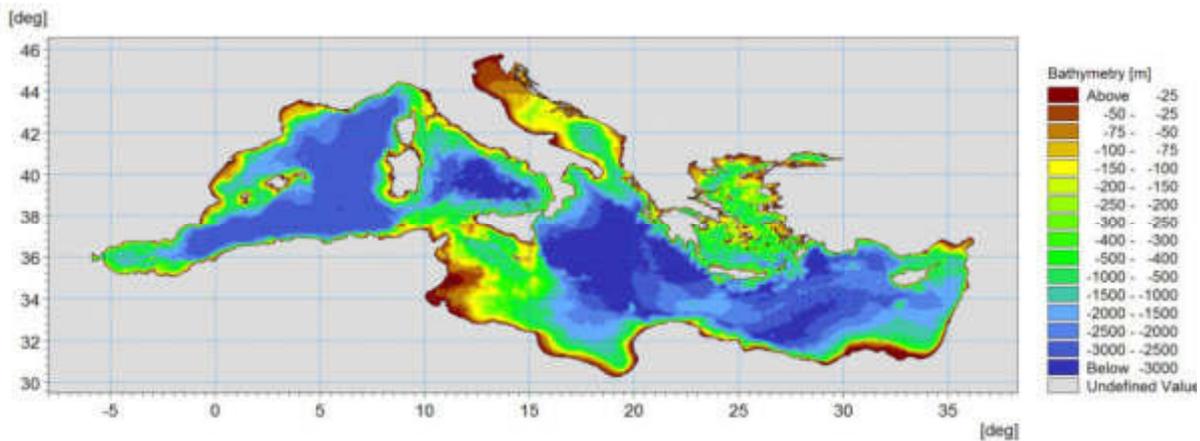


Figura 3-24 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM

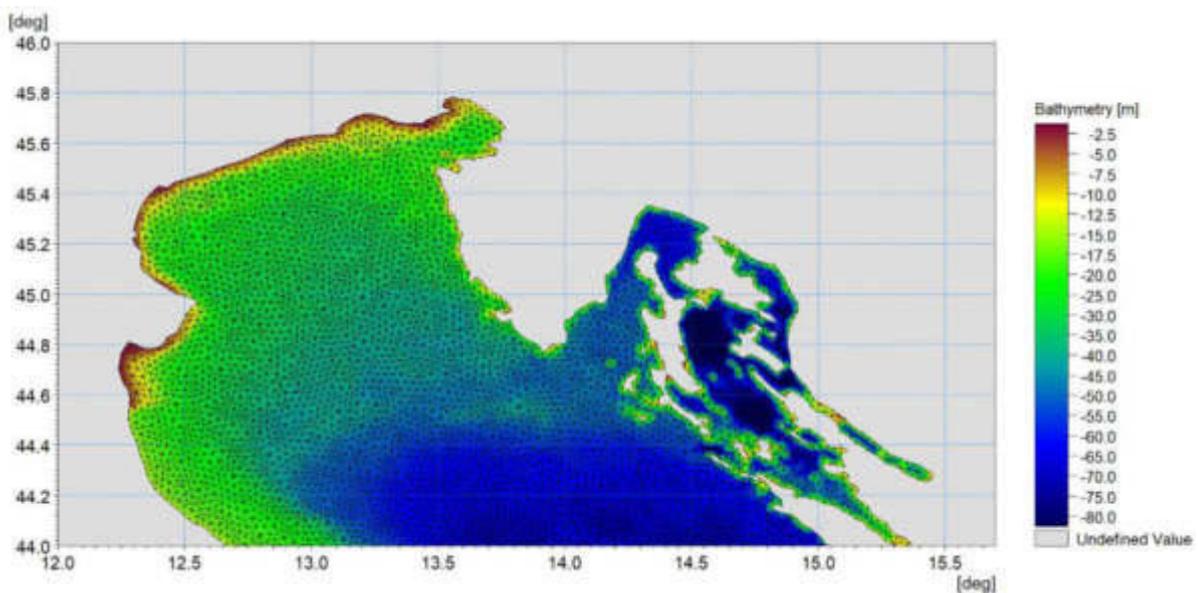


Figura 3-25 Batimetria di riferimento per la componente "onda" del database MWM – dettaglio sull'Alto Adriatico

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 40 di 157
--	--	-------------------

Il database Mediterranean Wind Wave Model (MWM), descritto diffusamente in Allegato A al presente documento, è stato pertanto preso a riferimento per la caratterizzazione meteomarina al largo del sito oggetto di studio.

La selezione della cella del database MWM più adeguata a rappresentare il clima meteomarino al largo di Trieste è stata effettuata tenendo in considerazione diversi aspetti:

- il punto deve essere ben rappresentativo dell'esposizione del sito alle onde;
- in virtù della risoluzione del database MWM (circa 4 km), il punto deve essere collocato ad una profondità alla quale possa essere ritenuta trascurabile l'interazione dell'onda con il fondale, che viene pertanto demandata al modello di propagazione largo-costa descritto in seguito;
- la localizzazione del punto non deve essere troppo lontana dalla costa, in modo che il modello di propagazione largo-costa non presenti un dominio troppo ampio, con tempi di calcolo troppo onerosi.

Sulla base di tali prescrizioni e della risoluzione spaziale del database MWM è stato selezionato un punto per la caratterizzazione dei parametri d'onda relativamente ai 42 anni (1979-2020) di ricostruzione storica (modalità *hindcast*) delle serie orarie.

A seguire si riportano le coordinate e l'ubicazione grafica del punto selezionato, localizzato a circa 9 km dal litorale in esame.

Tabella 3-3 Coordinate del punto selezionato dal dataset MWM per la caratterizzazione meteomarina del sito

Punto	Lon [°E]	Lat [°N]	Prof. [m]
MWM	13.631653	45.63049	23



Figura 3-26 Ubicazione del punto di estrazione da MWM (LON 13.631653°E, LAT 45.630490°N) i cui dati dal 1979 al 2020 sono stati utilizzati per la caratterizzazione del moto ondoso al largo

Nella analisi specifica verranno trascurati i dati di vento ed analizzati solamente i dati di moto ondoso al fine di individuare gli eventi di maggior interesse per verificare se e in quale misura il moto ondoso possa effettivamente innescare una circolazione idrodinamica in corrispondenza delle opere oggetto del presente studio.

3.8.1 Analisi del moto ondoso nel Golfo di Trieste

Dalla serie storica dei dati MWM è stata elaborata la seguente tabella bivariata dell'altezza d'onda significativa H_{m0} in funzione della direzione media di propagazione MWD. La tabella è costituita da settori di direzione di 15° e da classi di altezza d'onda di 0.5 m.

Dall'osservazione della tabella si evince che le maggiori altezze d'onda, che raggiungono al massimo i 2.25 m, hanno direzione media di provenienza dal I Quadrante (che è rappresentato

dal Grecale, ovvero localmente Bora). La seconda direzione più importante dal punto di vista dell'intensità e frequenza del moto ondoso è il settore compreso tra il II ed il II Quadrante con altezze d'onda leggermente inferiori ma con frequenze di apparizione maggiori.

Tabella 3-4 Tabella delle frequenze di altezza d'onda significativa H_{m0} e direzione media MWD, relativa al periodo di 42 anni (1979-2020) nel punto di estrazione dei dati MWM (Tabella 3-3)

MWD (°N)	Hm0 (m)									Totale
	calme	0.25-0.5	0.5-0.75	0.75-1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-1.75	1.75-2	2-2.25	
n.p.	11.206									-
0-15	0.187	0.081	0.009							0.09
15-30	0.415	0.170	0.031	0.003						0.20
30-45	1.030	0.612	0.188	0.044	0.005		0.001			0.85
45-60	3.683	2.994	1.544	0.596	0.251	0.117	0.032	0.020	0.001	5.55
60-75	3.659	6.516	4.265	1.996	0.852	0.370	0.119	0.026	0.009	14.15
75-90	1.868	1.164	0.145	0.033	0.003	0.000				1.35
90-105	0.607	0.196	0.037	0.004	0.001					0.24
105-120	0.284	0.115	0.020	0.003	0.000					0.14
120-135	0.213	0.113	0.015	0.003						0.13
135-150	0.294	0.230	0.061	0.005	0.000					0.30
150-165	0.428	0.604	0.306	0.083	0.015	0.001	0.001			1.01
165-180	0.439	0.728	0.310	0.087	0.012	0.001				1.14
180-195	0.513	0.717	0.271	0.078	0.014	0.002	0.001			1.08
195-210	0.905	0.817	0.362	0.135	0.035	0.007				1.36
210-225	16.727	1.861	0.648	0.211	0.073	0.027	0.002			2.82
225-240	15.810	2.449	0.551	0.201	0.095	0.032	0.005			3.33
240-255	4.788	0.488	0.092	0.028	0.010	0.002	0.002			0.62
255-270	1.451	0.097	0.012	0.005	0.002					0.12
270-285	0.312	0.032	0.005	0.002	0.001	0.0003				0.04
285-300	0.095	0.026	0.004	0.001						0.03
300-315	0.076	0.026	0.002							0.03
315-330	0.068	0.036	0.005	0.001						0.04
330-345	0.087	0.040	0.002							0.04
345-360	0.126	0.055	0.008							0.06
totali	65.272	20.167	8.895	3.518	1.370	0.561	0.161	0.046	0.010	34.73
									calme	65.27
									Totale	100.0

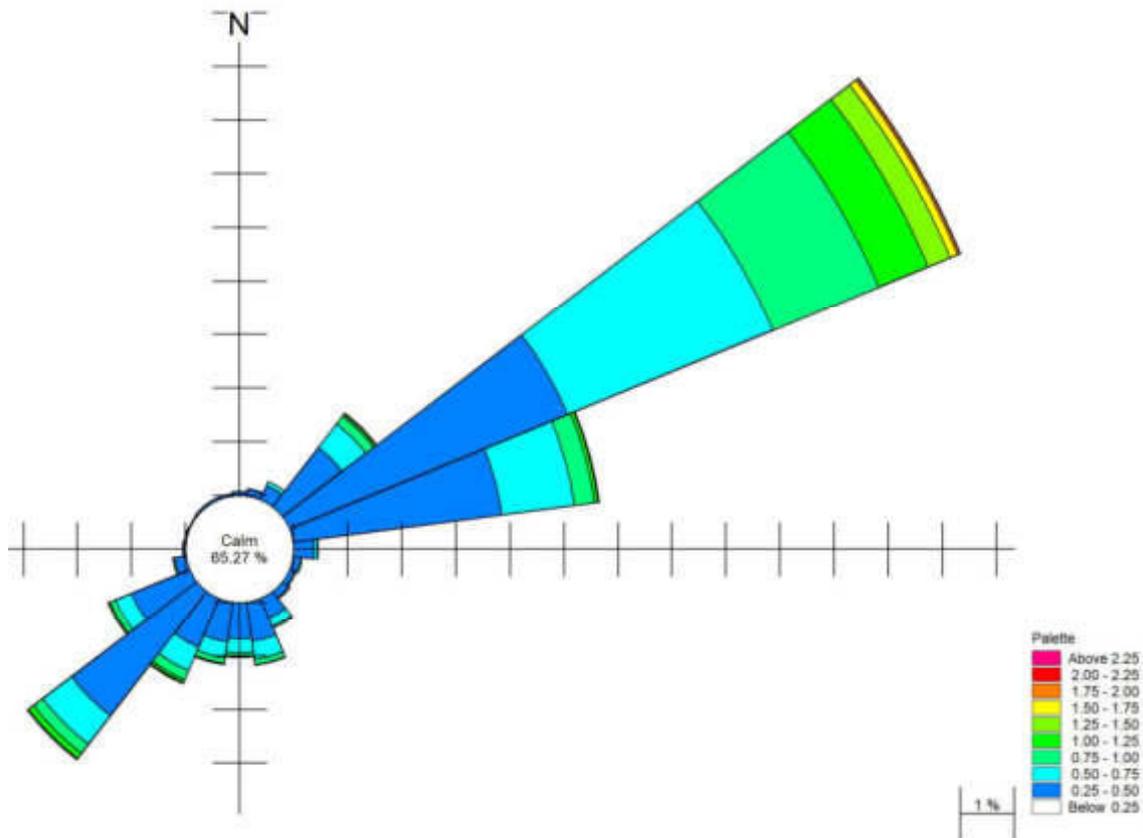


Figura 3-27 Rosa annuale delle onde per il periodo 1979-2020 nel punto di estrazione dei dati MWM (Tabella 3-3)

Nella grafica della rosa delle onde è possibile verificare quanto evinto dalla tabella numerica. La calma, rappresentata per valori di altezza d'onda inferiori a 0.25 m, è pari a 65.27%; si noti che la differente valutazione delle calme tra la tabella e la rosa è dovuta al fatto che nel grafico della rosa sono incluse nelle calme anche i valori "n.p."

Si osserva che le onde più alte sono assai limitate e che sostanzialmente raggiungono il porto di Trieste dal III Quadrante.

Al fine di meglio visualizzare tale aspetto è possibile osservare il grafico polare in Figura 3-28 che riporta per ogni singola mareggiata, individuata per altezze d'onda superiori a 1.0 m, un punto la cui distanza dal centro del grafico è proporzionale alla sua altezza e la direzione è quella media di propagazione dell'evento.

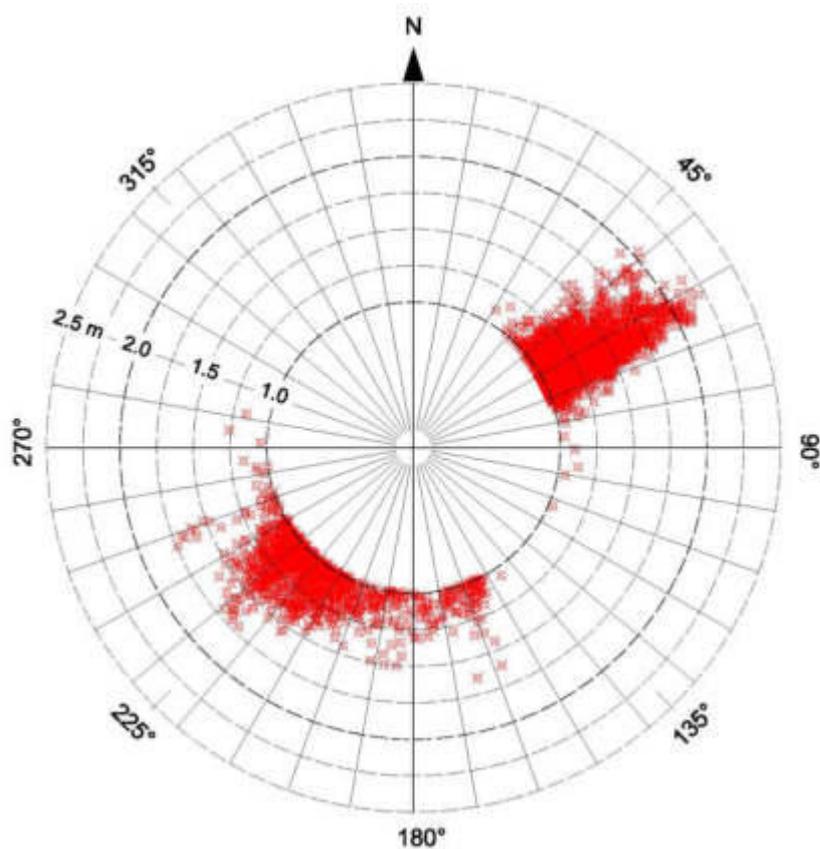


Figura 3-28 Diagramma polare delle mareggiate con H_{m0} maggiore di 1 m, occorse nel periodo dal 1979 al 2020

3.8.2 Correlazione tra altezza e periodo dell'onda

La correlazione tra altezza d'onda significativa spettrale H_{m0} e periodo di picco T_p è stata dedotta ricorrendo ad una rappresentazione esponenziale del tipo:

$$H_{m0} = \alpha T_p^\beta$$

La ricerca dei parametri α e β ha dovuto tenere conto della diversità del tipo di *fetch* che caratterizza il punto di ricostruzione del modello MWM. I *fetch*, infatti, hanno una zona molto ampia verso il III Quadrante ed una zona molto limitata nel versante del I Quadrante. Pertanto, la valutazione di entrambi i parametri è stata effettuata sulla base della direzione di provenienza delle onde; i valori ottenuti sono riportati in Tabella 3-5.

Tabella 3-5 Parametri α e β per il calcolo del periodo di picco, distinti per settore direzione di provenienza delle onde

Parametri	I Quadrante	III Quadrante
α	3.7	5
β	0.32	0.4

Con le due coppie di parametri si è ottenuta un'ottima approssimazione della relazione tra altezza d'onda-periodo per le due direzioni principali.

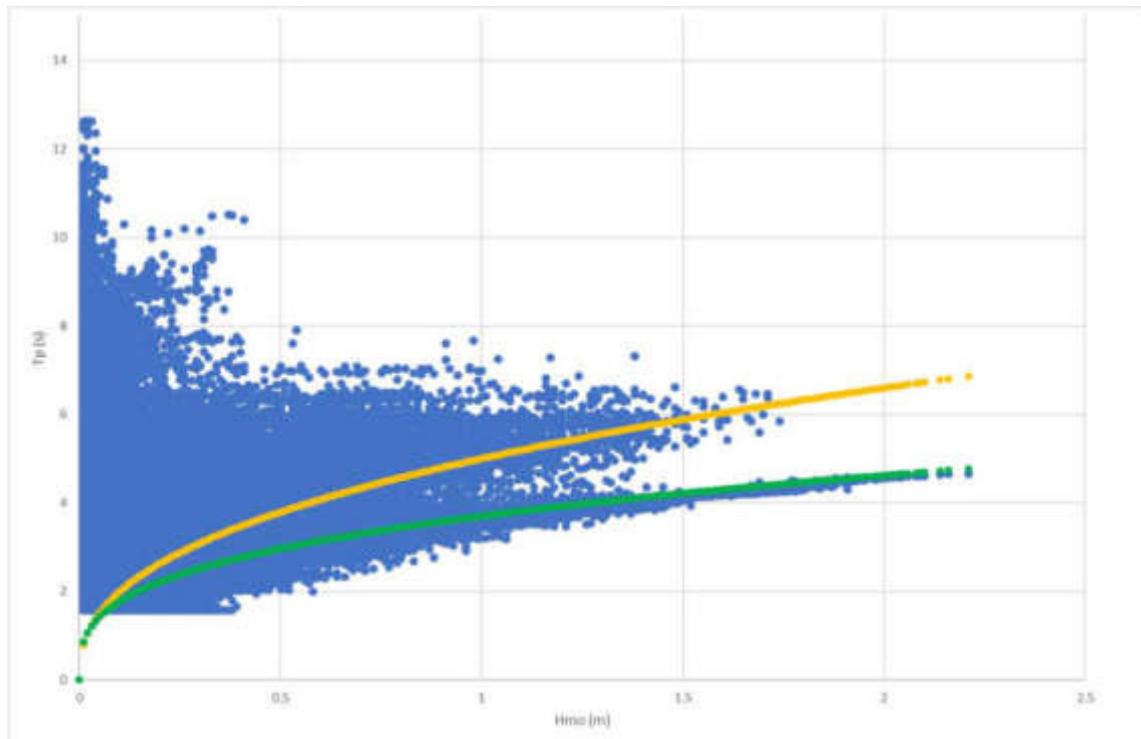


Figura 3-29 Grafico delle altezze d'onda H_{m0} in funzione del periodo di picco T_p e relative curve di correlazione per i due principali settori direzionali di provenienza del moto ondoso (I e III Quadrante)

3.8.3 Statistica delle onde estreme

Sebbene lo scopo del presente lavoro prescindia dalla valutazione delle forzanti dimensionanti, per completezza di analisi del moto ondoso per il paraggio in questione, sono anche state definite le onde estreme, secondo un approccio probabilistico in funzione di un certo tempo di ritorno.

L'analisi è stata condotta considerando i valori massimi di altezza d'onda significativa H_{m0} per ognuno dei 42 anni di dati disponibili, distinti per tre settori direzionali caratteristici:

- da 180 a 225°N
- da 225 a 270°N
- da 270 a 315°N

Per ovvi motivi di carattere geografico non sono stati presi in considerazione gli altri settori, in particolare il settore appartenente al I Quadrante (Bora).

Tabella 3-6 Valori massimi annuali dell'altezza d'onda significativa suddivisi per settori di provenienza

anno	Omnidirezionale	180-225°N	225-270°N	270-315°N
1979	1.55	1.48	1.46	0.44
1980	1.65	1.42	1.14	0.44
1981	1.59	1.26	1.59	0.81
1982	1.81	1.55	1.5	0.87
1983	2.06	1.16	1.07	0.34
1984	1.61	1.42	1.61	0.46
1985	1.65	1.25	1.17	0.42
1986	1.74	1.05	1.74	0.6
1987	1.73	1.39	1.36	0.22
1988	1.31	1.31	1.18	0.27
1989	1.51	1.34	1.51	0.36
1990	1.53	1.28	1.28	0.91
1991	2.08	1.28	1.27	0.47
1992	1.77	1.27	1.55	0.55
1993	2.04	1.4	1.27	0.44
1994	1.84	1.27	1.42	1.26
1995	2.08	1.38	1.25	0.54
1996	1.8	1.46	1.29	0.39
1997	1.48	1.11	1.08	0.47
1998	1.64	1.32	1.35	0.9
1999	1.67	1.46	1.2	0.48
2000	1.5	1.5	1.31	0.47
2001	1.5	1.14	0.83	0.64
2002	1.45	1.15	1.45	0.34
2003	1.73	1.55	1.7	0.48
2004	1.97	1.06	0.84	0.59
2005	2	1.24	0.96	0.5
2006	1.55	1.24	1.01	0.25
2007	1.55	1.3	1.33	0.47
2008	1.66	1.23	1.46	0.6
2009	1.51	1.26	1.31	0.3
2010	1.99	1.02	1.36	0.33
2011	1.77	1.45	1.32	1.04
2012	2.21	1.36	1.42	0.45
2013	2.04	1.09	1.35	0.29
2014	1.49	1.38	1.36	0.53
2015	2.16	1	0.95	0.35
2016	1.65	1.4	1.32	0.52
2017	1.92	1.71	1.71	0.38
2018	1.64	1.5	1.1	0.31
2019	1.42	1.21	1.08	0.87
2020	1.44	1.44	1.16	0.7
massimo	2.21	1.71	1.74	1.26
medie	1.72	1.31	1.3	0.53

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 47 di 157
--	--	-------------------

Nella tabella sono stati individuati anche i massimi annuali a prescindere dalla direzione di provenienza dell'evento (omnidirezionale). Come è possibile osservare solo raramente il massimo annuale omnidirezionale è pareggiato dal massimo dei primi due settori e questo è dovuto al fatto che i maggiori massimi sono relativi al settore che non è stato preso in considerazione per i motivi descritti sopra.

Per la caratterizzazione degli eventi estremi anche il settore appartenente al IV Quadrante (ossia tra da 270 a 315°N), data l'esiguità dei valori massimi, è stato escluso dalla analisi statistica.

La statistica degli eventi estremi dei settori 180-225°N e 225-270°N è stata effettuata utilizzando le distribuzioni di Weibull e di Gumbel. I risultati ottenuti da questa analisi sono riportati in Tabella 3-7 ed in Figura 3-30 (settore 180-225°N) e Figura 3-31 (settore 225-270°N).

Tabella 3-7 Statistica degli eventi estremi per i settori 180 - 225°N e 225 - 270°N

Tr	Settore 180-225°N		Settore 225-270°N	
	Weibull	Gumbel	Weibull	Gumbel
1	0.80	-	0.50	-
2	1.31	1.29	1.31	1.26
5	1.45	1.43	1.49	1.46
10	1.52	1.52	1.58	1.59
15	1.55	1.57	1.63	1.66
20	1.57	1.61	1.66	1.71
25	1.59	1.64	1.68	1.75
50	1.63	1.72	1.73	1.87
100	1.67	1.81	1.78	1.99

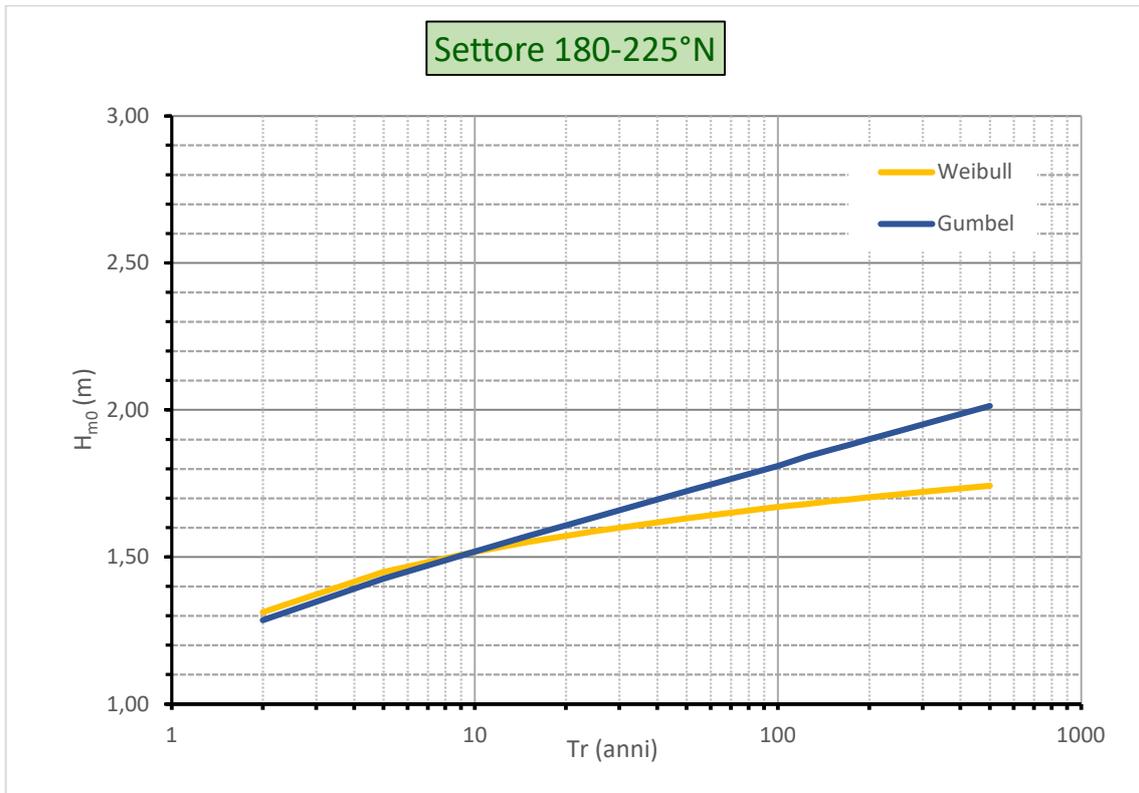


Figura 3-30 Grafico delle onde estreme calcolate per il settore di traversia da 180 a 225°N

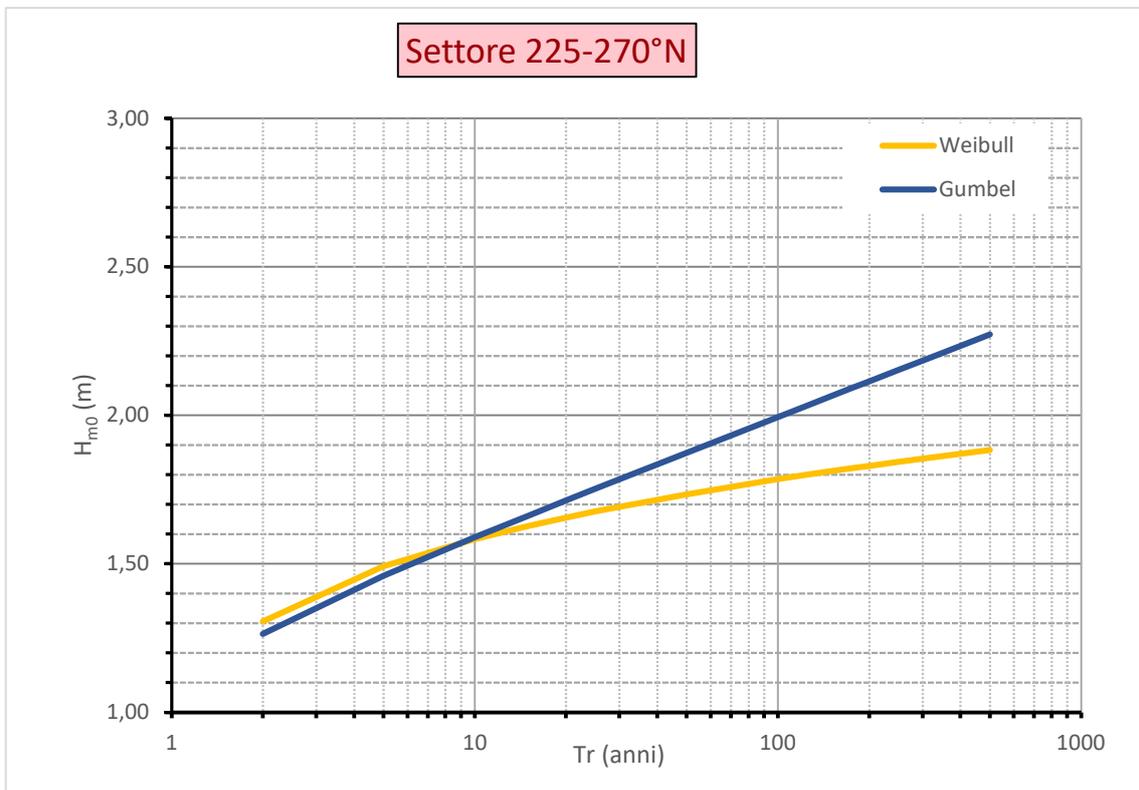


Figura 3-31 Grafico delle onde estreme calcolate per il settore di traversia da 180 a 225°N

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 49 di 157
--	--	-------------------

4 BATIMETRIA, DOMINIO DI CALCOLO E RISOLUZIONE

Per l'applicazione di modellistica numerica riveste un ruolo molto importante la creazione del dominio di calcolo, che deve avere un'estensione ed una risoluzione spaziale ottimali per rappresentare al meglio i fenomeni fisici studiati.

Come già anticipato, e come dettagliato nelle sezioni a seguire, nel presente studio sono state applicate diverse tipologie di modelli numerici, volti a studiare la propagazione delle onde (sezione 5.1), l'idrodinamica generata dal moto ondoso (sezione 5.2) e quella correlata alla circolazione generale delle grandi masse d'acqua (sezione 6), i fenomeni di avvezione-dispersione di un ipotetico tracciante (sezione 7.4), nonché il trasporto e sedimentazione dei sedimenti fini (sezione 8.2). Per tutti questi modelli è stato utilizzato un unico dominio di calcolo, le cui caratteristiche sono di seguito esposte.

L'estensione e l'orientazione del dominio di calcolo devono essere tali da comprendere un'area più ampia rispetto a quella di interesse, al fine di rappresentare correttamente i flussi legati alla circolazione, inibendo o minimizzando l'effetto delle condizioni al contorno. Per tali motivi, il contorno di largo è stato localizzato a circa 12 km dall'area di interesse; esso si estende per circa 25 km, pressoché parallelamente alle dighe foranee che delimitano il bacino portuale; lungo questo contorno le profondità massime raggiunte sono dell'ordine di 25 m.

Dal punto di vista della risoluzione spaziale, legata alla lunghezza media dei triangoli costituenti la *mesh* a maglia non strutturata, essa è stata imposta pari a circa 400 m lungo il contorno di largo del dominio (Figura 4-1). All'interno del dominio la risoluzione diventa gradualmente più fine: il bacino portuale (Figura 4-2) è discretizzato con una risoluzione di 100 m nelle zone più lontane dall'area in studio e 70 m nella restante parte. Nella zona dove è prevista la realizzazione dell'infrastruttura in progetto è stata utilizzata una *mesh* quadrangolare con lato 50 m.

La batimetria è stata quindi costruita processando i dati descritti alla sezione 3.2 ed applicandoli al dominio di calcolo appena descritto. In Figura 4-3 è mostrato il risultato finale del processo di creazione della batimetria di calcolo, incluse le isobate e le indicazioni di profondità, mentre in Figura 4-4 è rappresentato un dettaglio centrato sull'area di interesse.

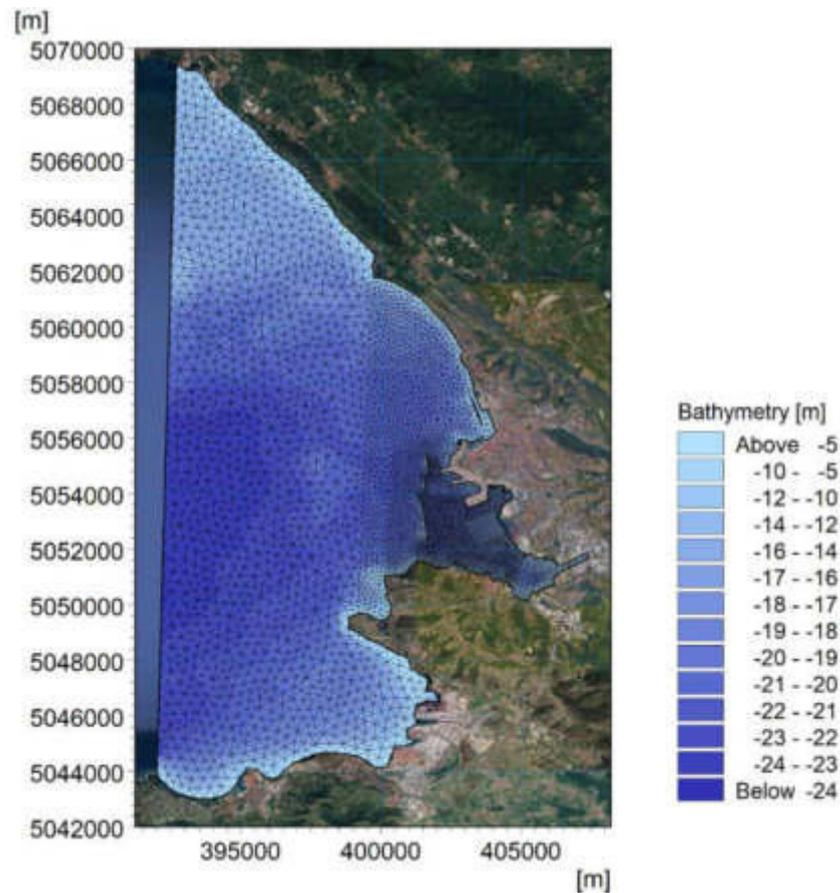


Figura 4-1 Estensione e risoluzione spaziale della mesh di calcolo

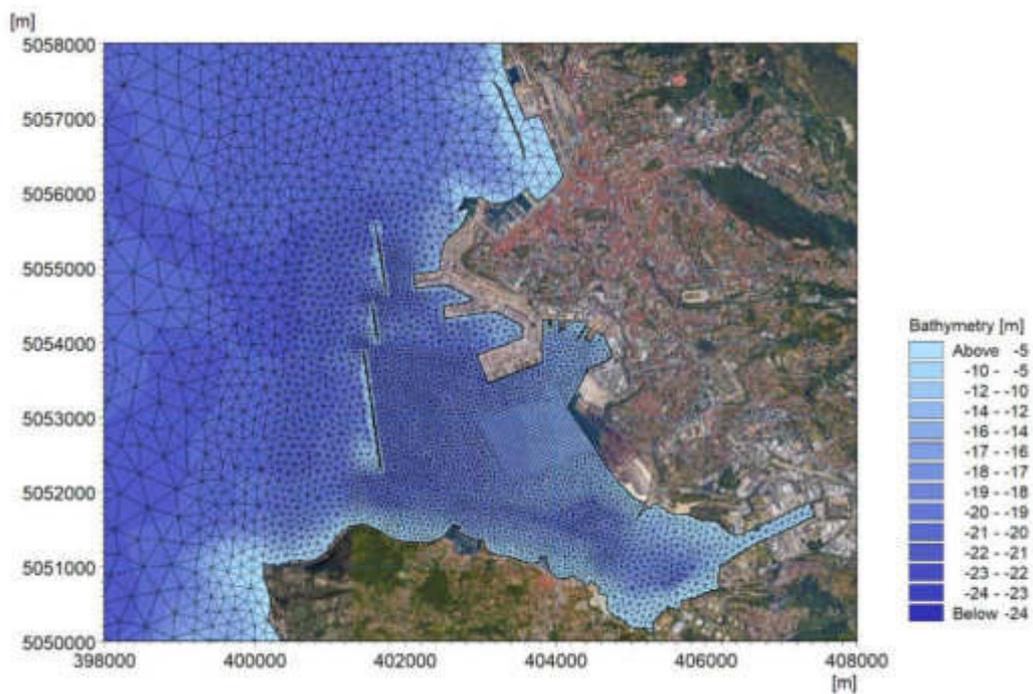


Figura 4-2 Dettaglio della risoluzione spaziale della mesh di calcolo nella baia di Muggia

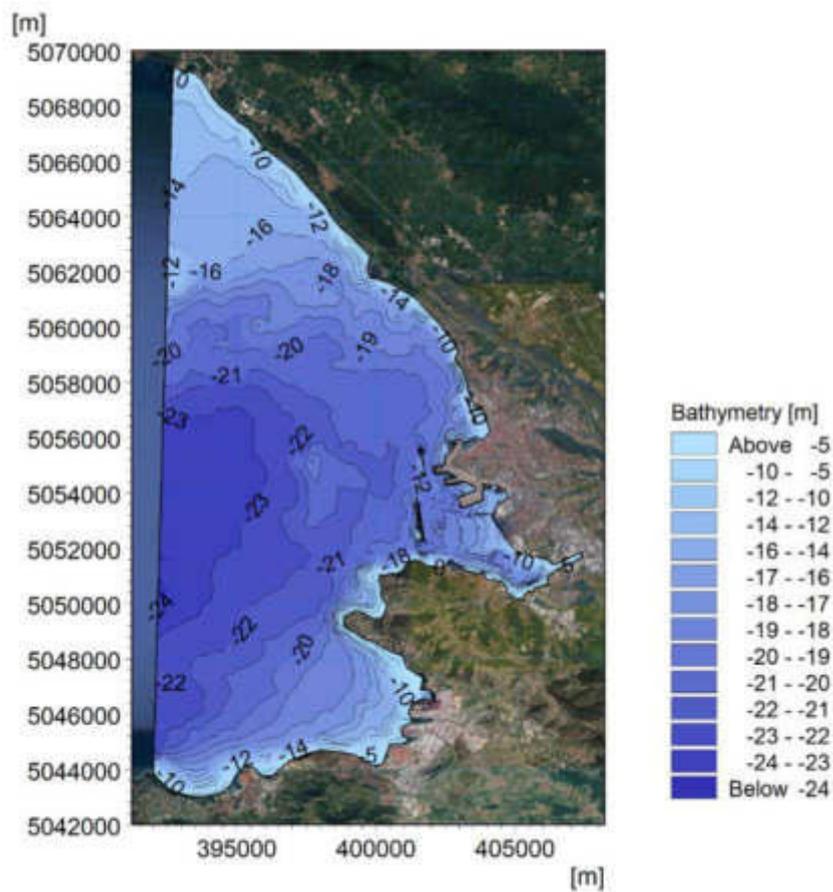


Figura 4-3 Batimetria ottenuta dal processamento dei dati disponibili sulla griglia di calcolo

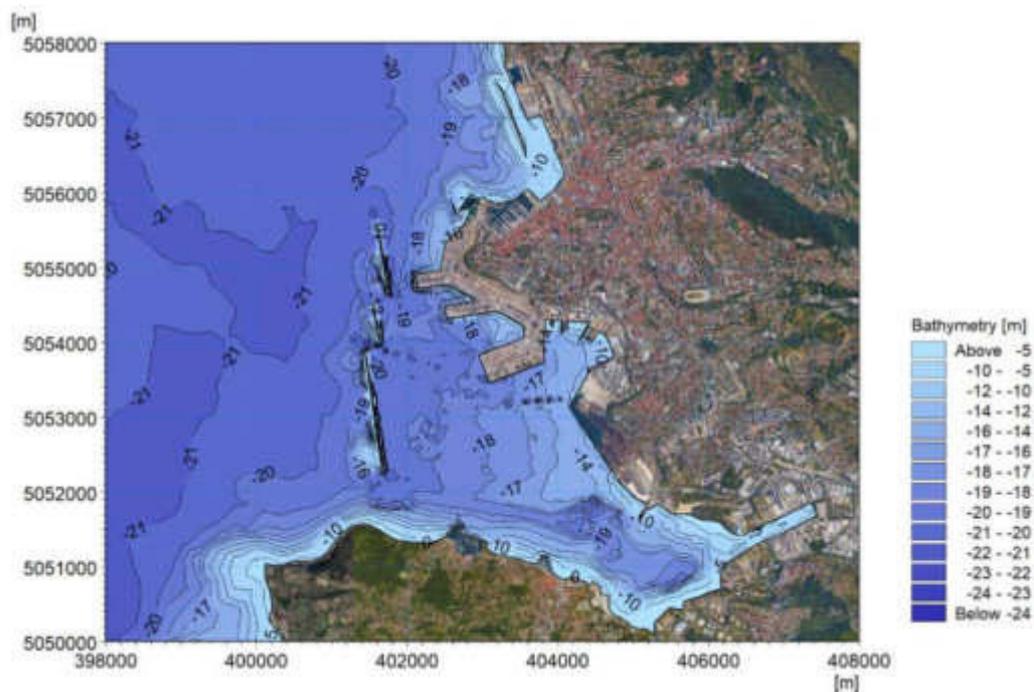


Figura 4-4 Dettaglio della batimetria ottenuta dal processamento dei dati disponibili sulla griglia di calcolo

I modelli di propagazione del moto ondoso e di corrente da esso generata sono bidimensionali e pertanto non è richiesto dal modello la discretizzazione verticale della colonna d'acqua.

Per tutti gli altri modelli, tridimensionali, la dimensione verticale è stata rappresentata nel modello con una discretizzazione di soli livelli sigma (ossia di spessore variabile con le quote di fondo), per un totale di 11 livelli (Figura 4-5), con spessore variabile per avere maggior risoluzione in corrispondenza del fondo ed in superficie.

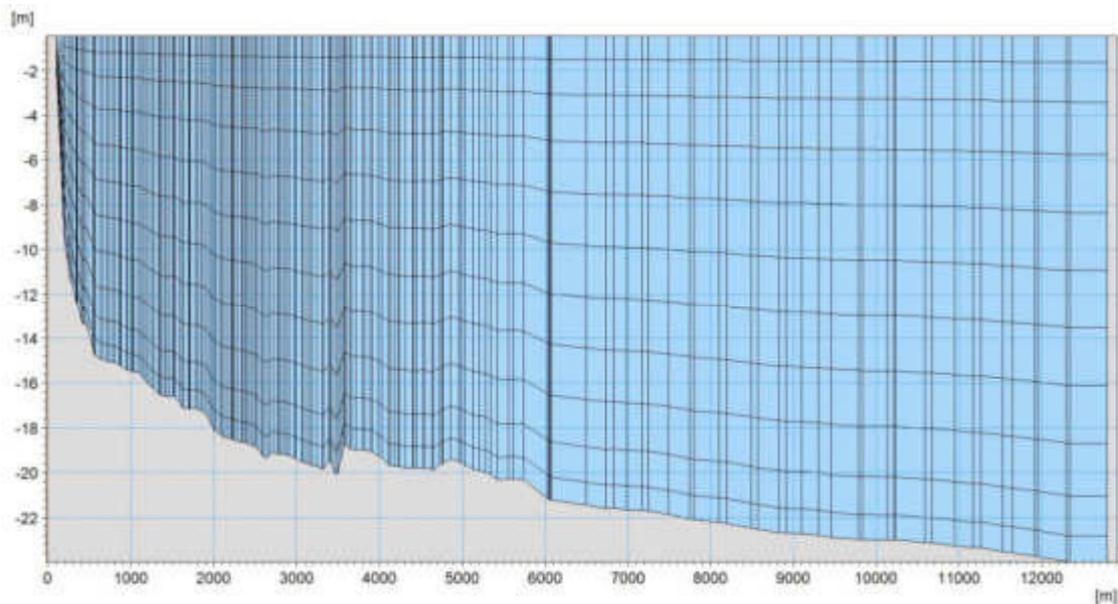


Figura 4-5

Esempio di discretizzazione verticale adottata nel modello

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 53 di 157
--	--	-------------------

5 VERIFICA DELL'INFLUENZA DEL MOTO ONDOSO SULLA CIRCOLAZIONE INTERNA ALLA BAI A DI MUGGIA

L'analisi svolta sui dati di onda disponibili per il sito in studio, riportata nella sezione 3.8, ha permesso di individuare alcune onde, caratteristiche per il sito, che sono state propagate da largo fino all'area di interesse, con lo scopo di verificare se fossero in grado di generare una circolazione significativa ai fini dell'idrodinamica complessiva della baia di Muggia.

La propagazione delle onde da largo a costa ed il successivo studio dell'idrodinamica da esse generata sono stati effettuati mediante l'applicazione di opportuna modellistica numerica, ed in particolare del modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves [22] e del modulo MIKE 21 HD - Hydrodynamics [23] di DHI.

5.1 Propagazione delle onde dal largo a costa

Al fine di propagare alcuni eventi d'onda selezionati sino alla Baia di Muggia è stato implementato il modulo MIKE 21 SW - Spectral Waves [22] di DHI, un modello spettrale per vento ed onde di terza generazione, basato su una griglia non strutturata in grado di simulare la trasformazione di onde generate dal vento ed onde di swell sia offshore, sia in aree costiere.

Tale modello, a maglia triangolare "flessibile", permette di utilizzare una risoluzione spaziale variabile, consentendo di impiegare una risoluzione elevata nelle aree per le quali si richiede un maggior dettaglio, laddove rifrazione, shoaling, attrito con il fondo e frangimento determinano una forte trasformazione delle caratteristiche dell'onda incidente su distanze relativamente limitate.

I fenomeni fisici che sono modellati con MIKE 21 SW sono i seguenti:

- generazione dell'onda ad opera del vento;
- interazione non lineare onda-onda;
- dissipazione dovuta al cosiddetto "white capping";
- dissipazione dovuta all'attrito con il fondo;
- dissipazione dovuta al frangimento;
- rifrazione e shoaling dovuti alle variazioni del fondale;
- interazione onde-correnti;
- diffrazione;
- riflessione.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 54 di 157
--	--	-------------------

I dati di ingresso da inserire nel modello possono essere raggruppati in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- tipo di formulazione, discretizzazione nel dominio delle frequenze e delle direzioni, tecniche di soluzione;
- forzanti (livelli, vento, correnti);
- parametri di dissipazione (frangimento, white-capping, attrito al fondo);
- condizioni iniziali (stato di mare iniziale);
- condizioni al contorno (onde al largo o alternativamente contorno chiuso).

I risultati ottenuti, per ognuno degli elementi della mesh, sono costituiti essenzialmente dai parametri caratteristici dell'onda: altezza d'onda significativa, periodo, direzione media, radiation stress.

Un'accurata descrizione del modulo MIKE 21 SW è riportata nell'Allegato B al presente elaborato.

5.1.1 Scelta delle onde caratteristiche del sito

Da un'attenta analisi ed osservazione dei dati, tenendo conto di un criterio di frequenza di accadimento e di direzione di provenienza del moto ondoso, sono stati individuati sette eventi, considerati come tipici e rappresentativi per il sito in studio. Ognuno di essi è stato propagato da largo verso costa mediante l'applicazione del modello MIKE 21 SW, al fine di capire se le onde così trasformate dagli stessi fenomeni di propagazione sotto costa possano indurre correnti non trascurabili nella circolazione complessiva della Baia di Muggia.

Come si può evincere dall'osservazione di Tabella 5-1, gli eventi scelti per questa analisi sono onde reali che hanno una frequenza di accadimento da poche ore all'anno a due giorni all'anno, quindi relativamente alte rispetto agli eventi del clima ondoso medio annuo. Usando le maggiori onde sarà infatti possibile mettere maggiormente in evidenza gli effetti del moto ondoso sulla circolazione idraulica, rapportarle poi alle percentuali di occorrenza su base annua.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 55 di 157
--	--	-------------------

Tabella 5-1 - Caratteristiche delle onde scelte per le simulazioni di propagazione da largo verso riva

n. Onda	data	Hm0 [m]	Tp [s]	MMWD [°N] (direzione da)
1	19/12/1986 23:00	1.69	5.6	249
2	10/04/1994 05:00	1.26	4.8	275
3	14/09/1998 06:00	0.90	3.4	298
4	05/10/2003 17:00	1.64	6.6	230
5	17/12/2011 00:00	1.04	5.7	272
6	17/12/2011 01:00	0.90	3.3	325
7	12/12/2017 04:00	1.71	6.4	224

5.1.2 Risultati del modello di propagazione del moto ondoso

L'applicazione del modello MIKE 21 SW ha permesso di ottenere, per ciascun evento preso a riferimento (Tabella 5-1) il campo di moto ondoso all'interno della Baia di Muggia. I risultati grafici sono riportati di seguito; in queste mappe la scala cromatica e la lunghezza dei vettori, proporzionale in ogni punto all'altezza d'onda e con direzione coincidente con la direzione media di propagazione, mostrano in maniera efficace le trasformazioni che l'onda subisce nella sua propagazione da largo verso costa.

Nel caso dell'onda 1 ($Hm0=1.69$ m, $Tp=5.6$ s e $MWD=249^\circ N$ - Figura 5-1 e Figura 5-2), nonostante si sia esaltato il risultato con la scala cromatica, si nota che all'interno dell'area di interesse i valori dell'altezza d'onda non superano mai i 0.40 m.

Anche con l'onda 2 ($Hm0=1.26$ m, $Tp=4.8$ s e $MWD=275^\circ N$ - Figura 5-3 e Figura 5-4), che risulta essere di entità inferiore rispetto alla precedente, con una inclinazione più diretta (quasi da Ovest) i valori dell'altezza d'onda significativa sono nell'intorno dei 0.40 m.

Analogamente, per l'onda 3 ($Hm0=0.90$ m, $Tp=3.4$ s e $MWD=298^\circ N$ - Figura 5-5 e Figura 5-6) i valori di altezza d'onda significativa si attestano sull'ordine dei 0.40 m.

I risultati dell'onda 4 ($Hm0=1.64$ m, $Tp=6.6$ s e $MWD=230^\circ N$ - Figura 5-7 e Figura 5-8), nonostante l'input sia di entità maggiore, mostrano un'altezza d'onda significativa dell'ordine dei 0.30 m, grazie alla direzione di provenienza meno diretta verso il porto.

Risultati del tutto analoghi si riscontrano per le onde 5, 6 e 7.

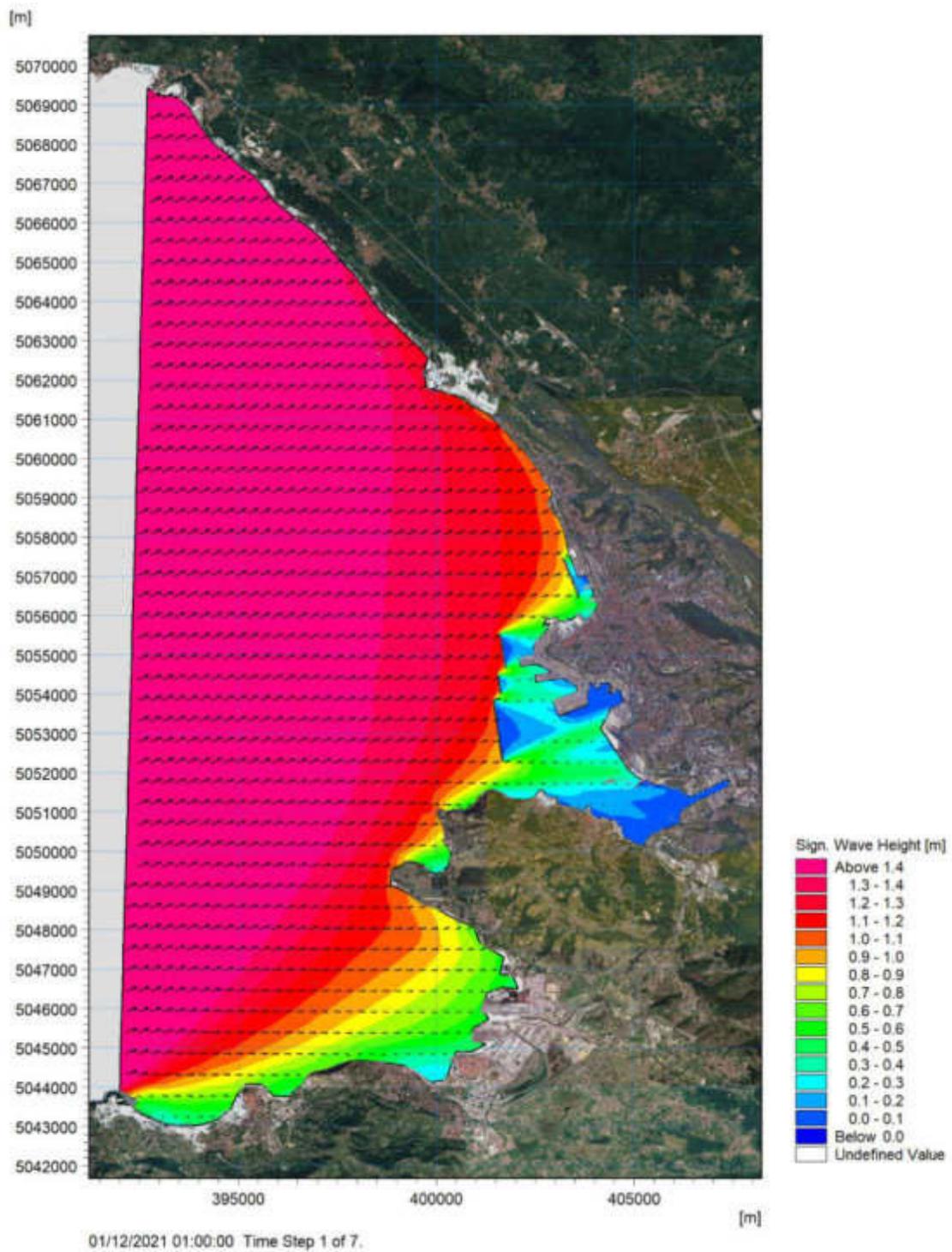


Figura 5-1 Campo di moto ondoso generato dall'onda 1 ($Hm0=1.69$ m, $Tp=5.6$ s e $MWD=249^\circ N$)

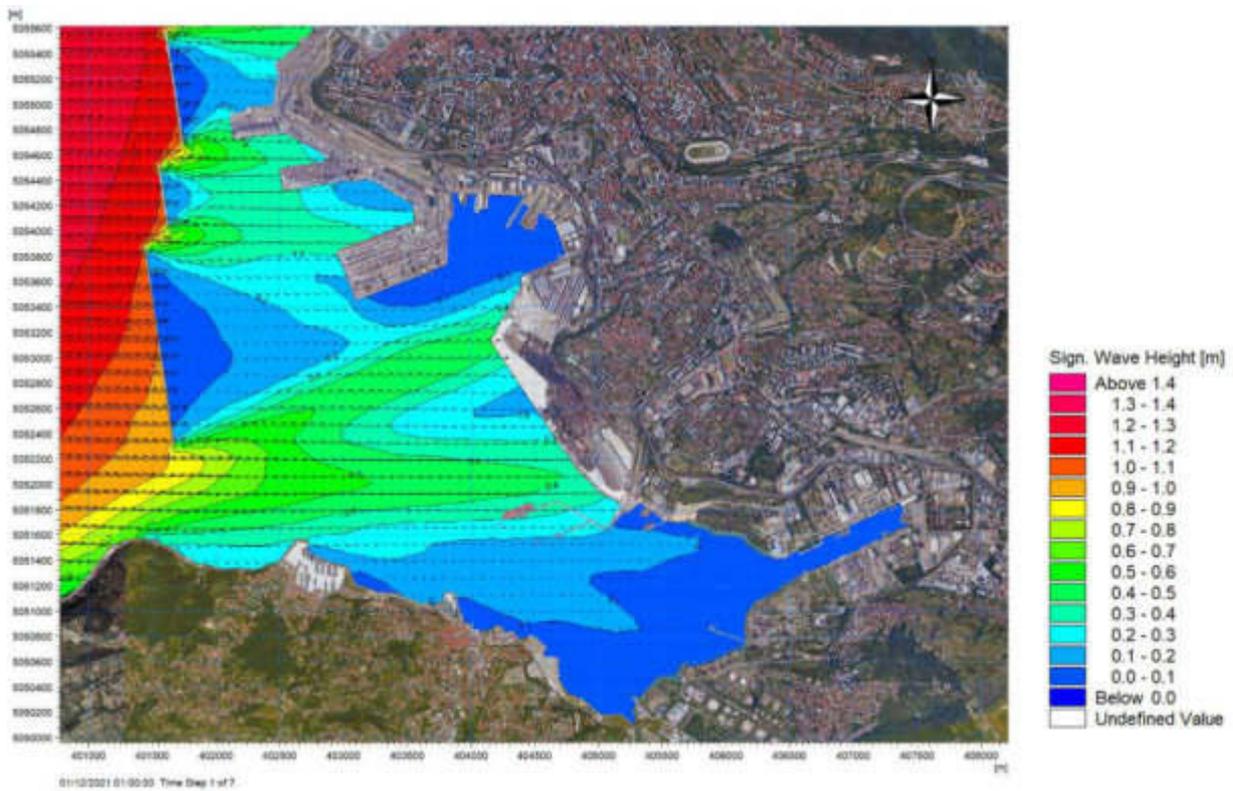


Figura 5-2 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 1 ($H_{m0}=1.69$ m, $T_p=5.6$ s e $MWD=249^\circ N$)

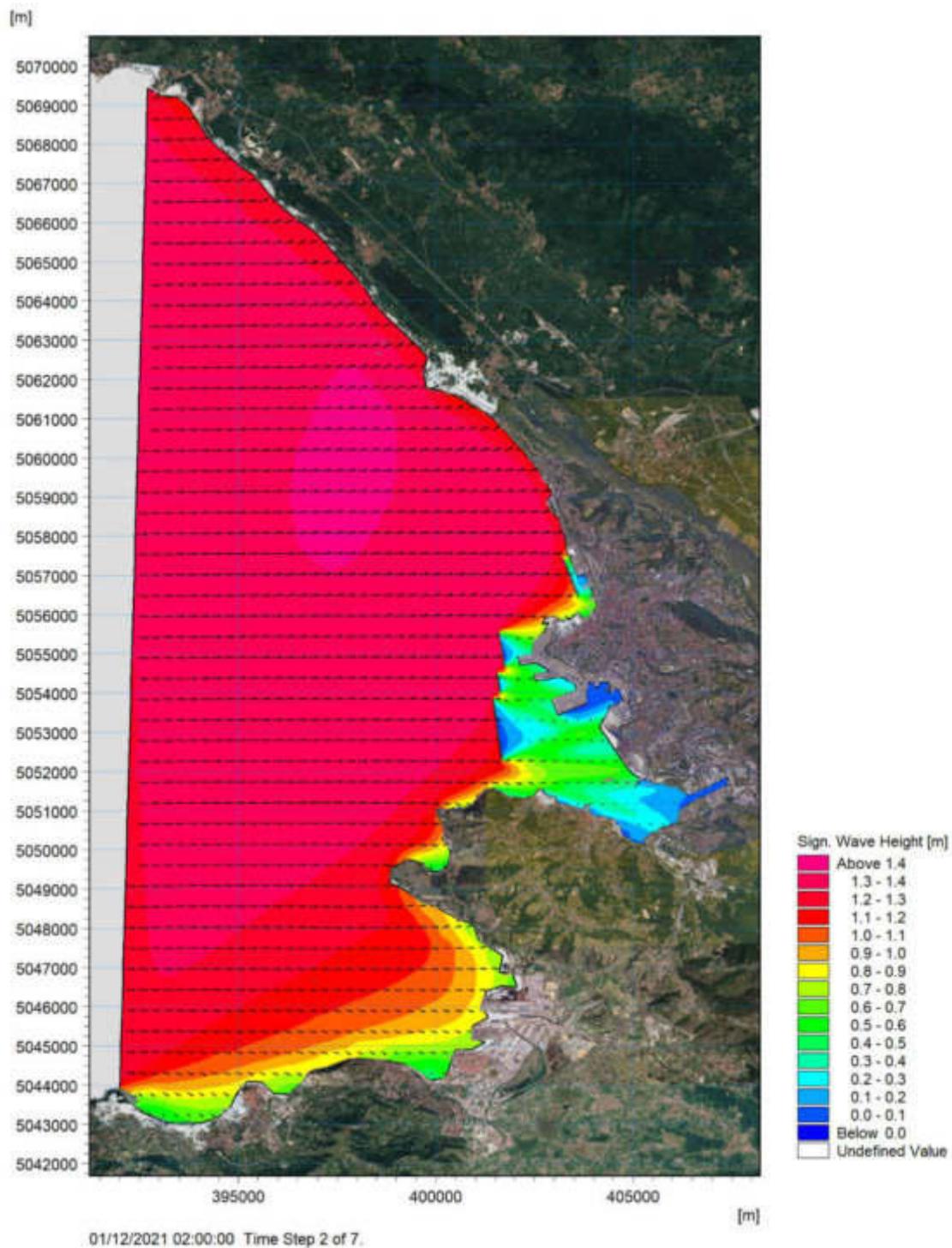


Figura 5-3 Campo di moto ondoso generato dall'onda 2 ($H_{m0}=1.26$ m, $T_p=4.8$ s e $MWD=275^\circ N$)

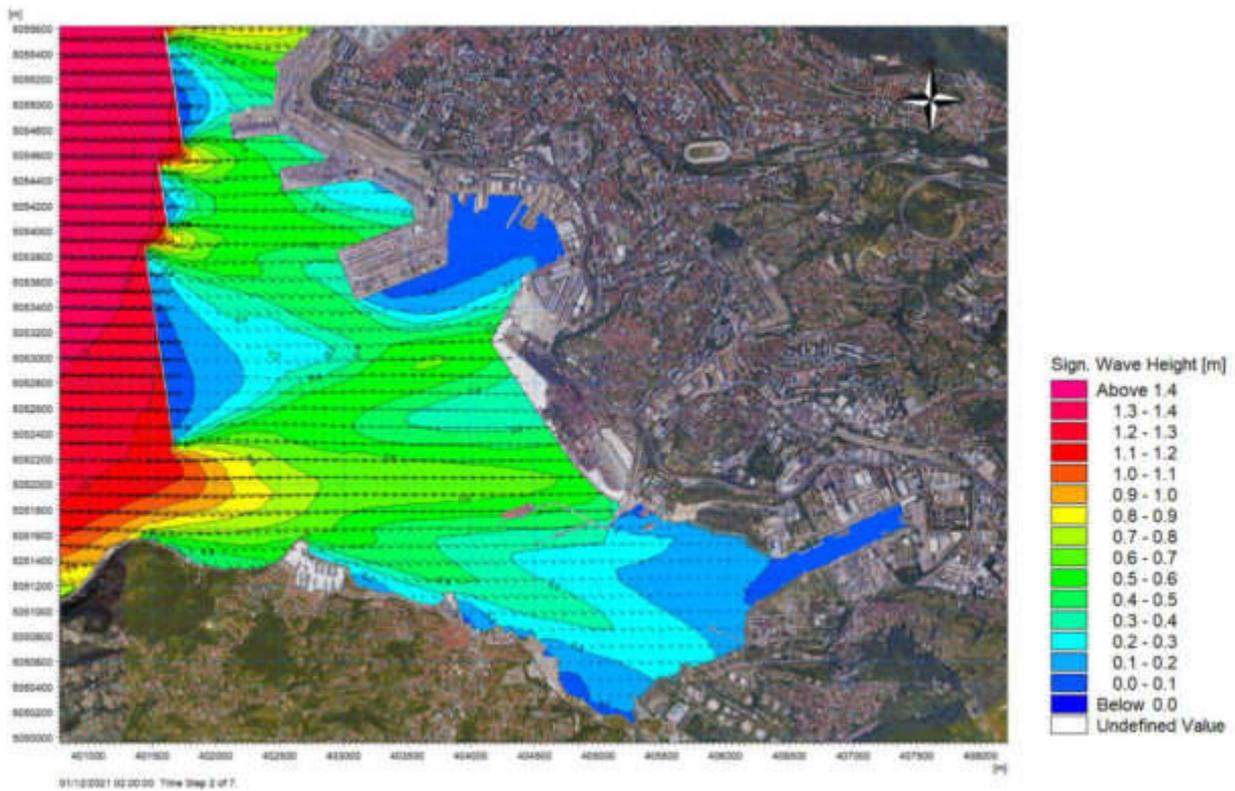


Figura 5-4 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 2 ($Hm0=1.26$ m, $Tp=4.8$ s e $MWD=275^\circ N$)

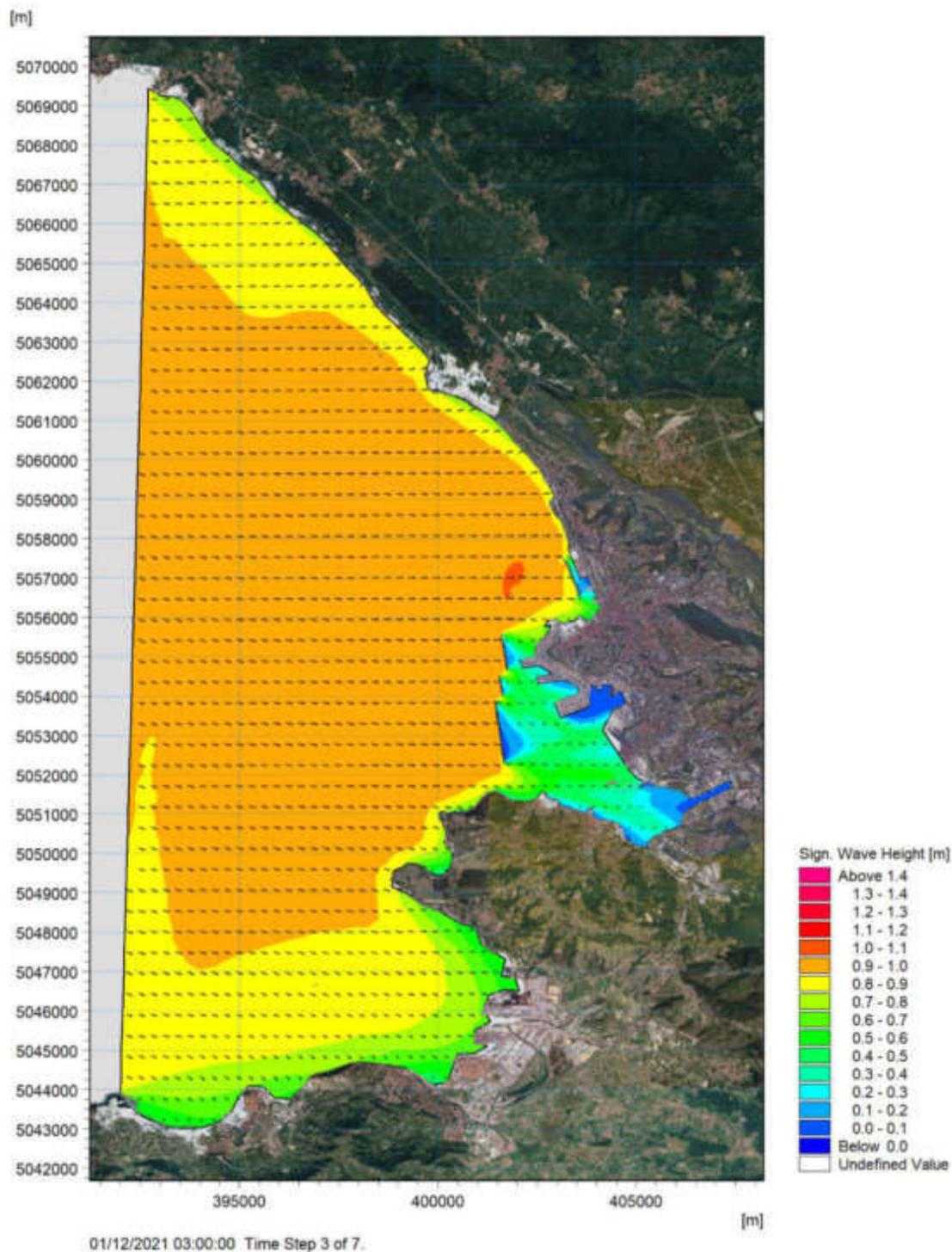


Figura 5-5 Campo di moto ondoso generato dall'onda 3 ($Hm0=0.90$ m, $Tp=3.4$ s e $MWD=298^\circ N$)

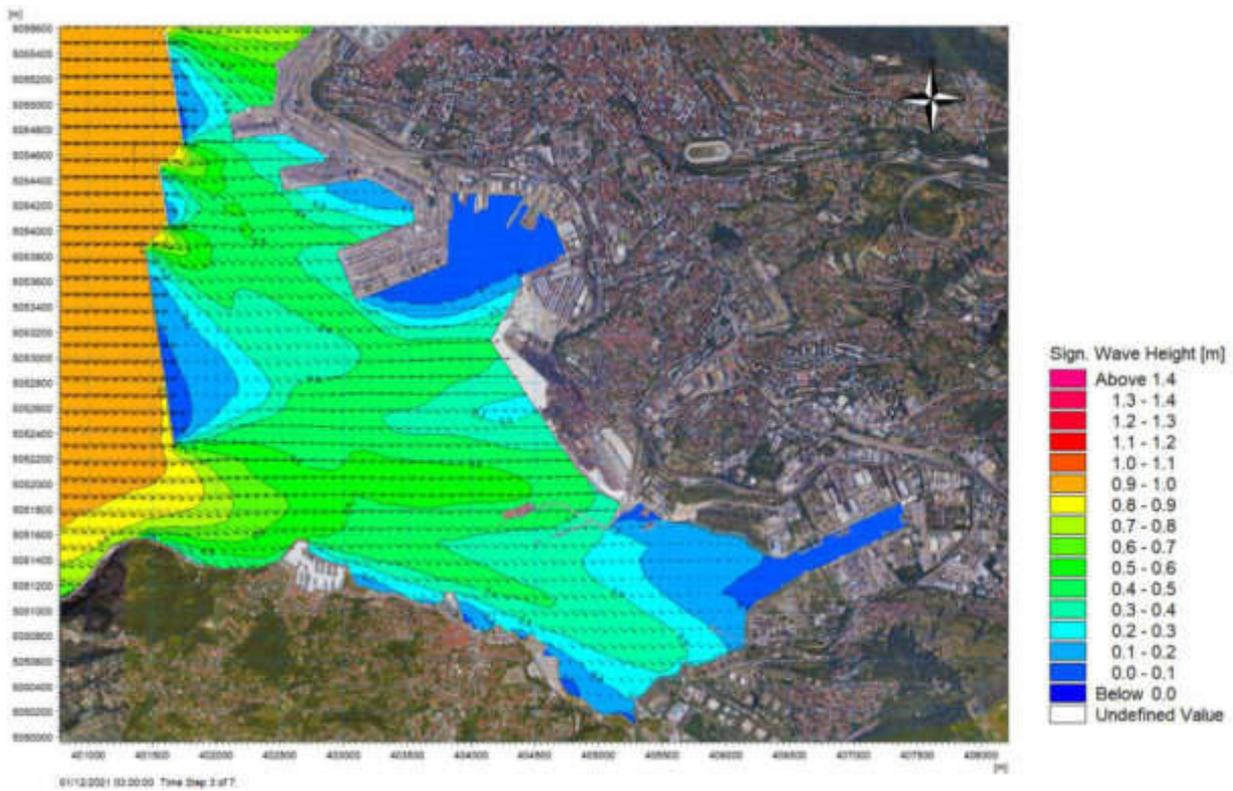


Figura 5-6 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 3 ($H_{m0}=0.90$ m, $T_p=3.4$ s e $MWD=298^\circ N$)

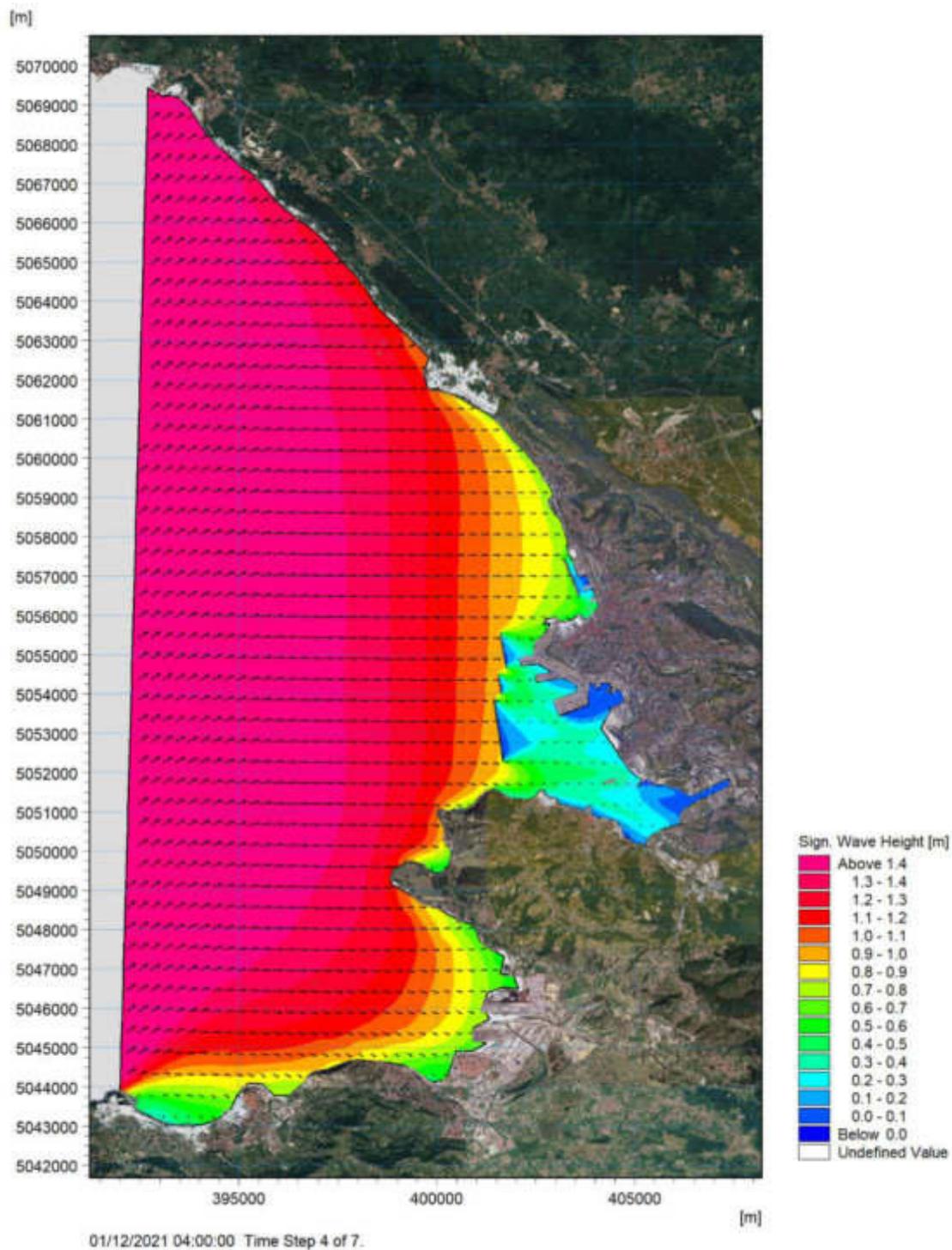


Figura 5-7 Campo di moto ondoso generato dall'onda 4 ($H_{m0}=1.64$ m, $T_p=6.6$ s e $MWD=230^\circ N$)

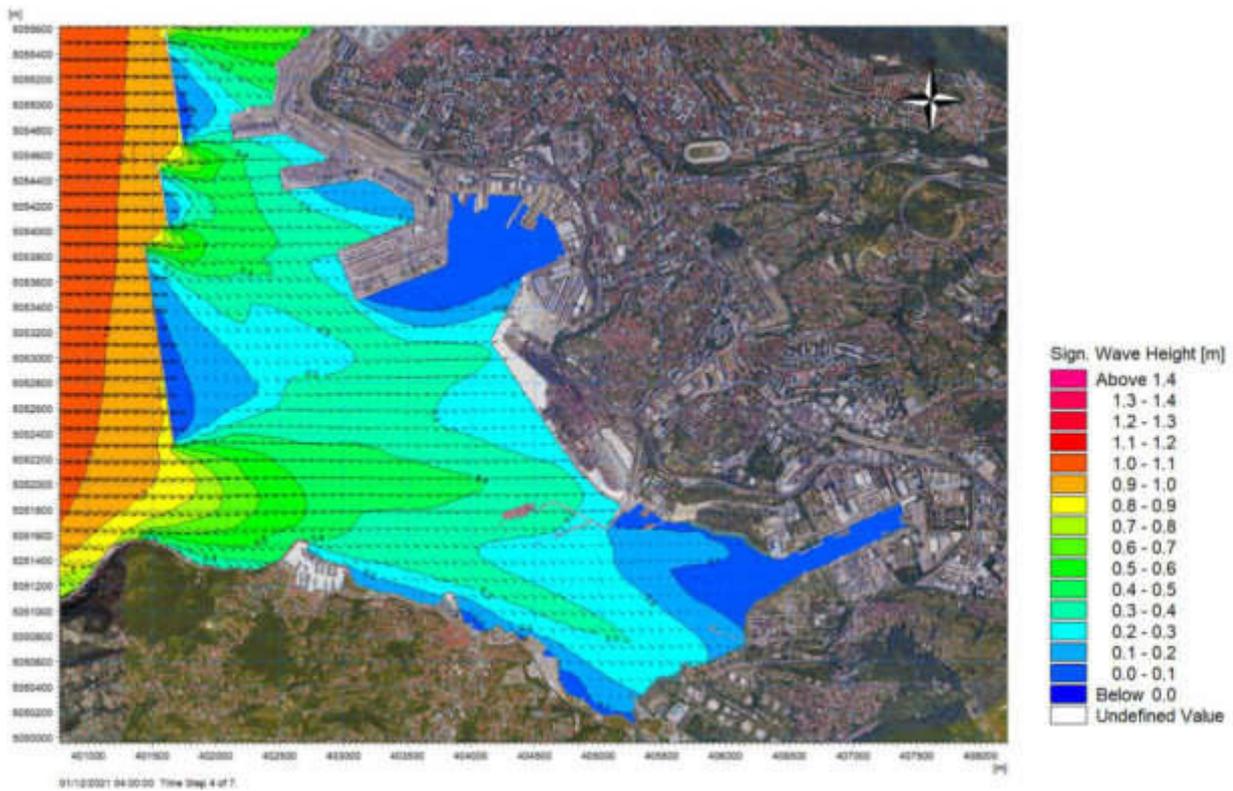


Figura 5-8 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 4 ($H_{m0}=1.64$ m, $T_p=6.6$ s e $MWD=230^\circ N$)

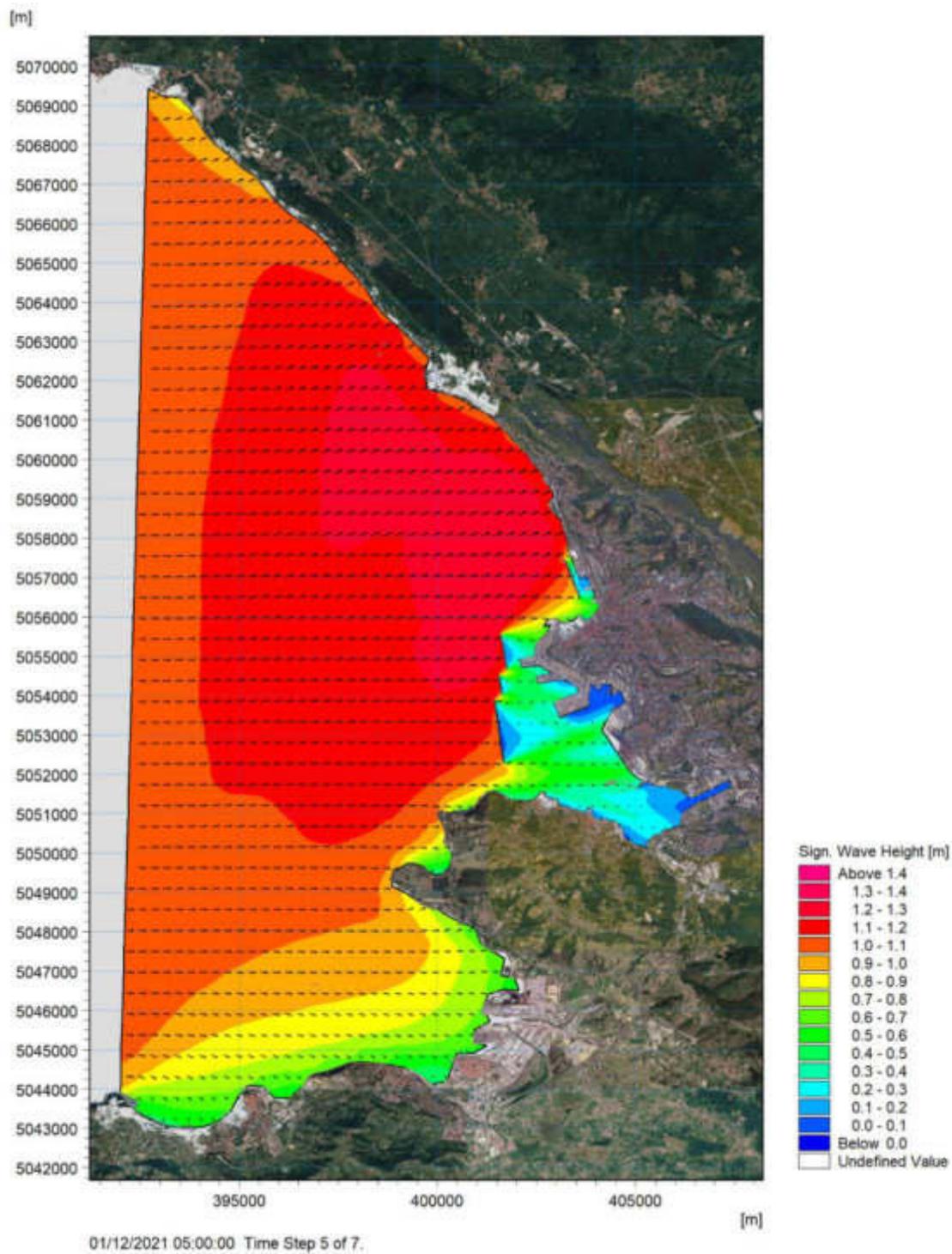


Figura 5-9 Campo di moto ondoso generato dall'onda 5 ($H_{m0}=1.04$ m, $T_p=5.7$ s e $MWD=271^\circ N$)

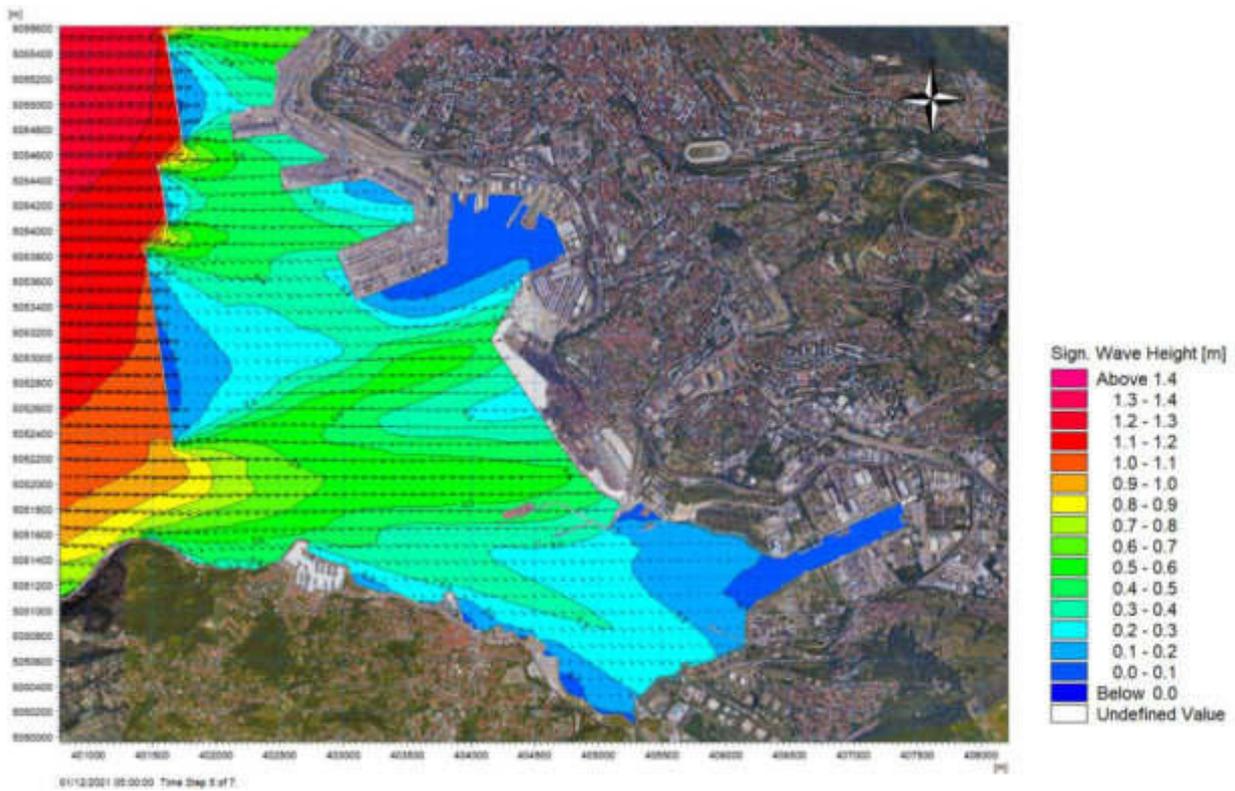


Figura 5-10 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 5 ($H_{m0}=1.04$ m, $T_p=5.7$ s e $MWD=271^\circ N$)

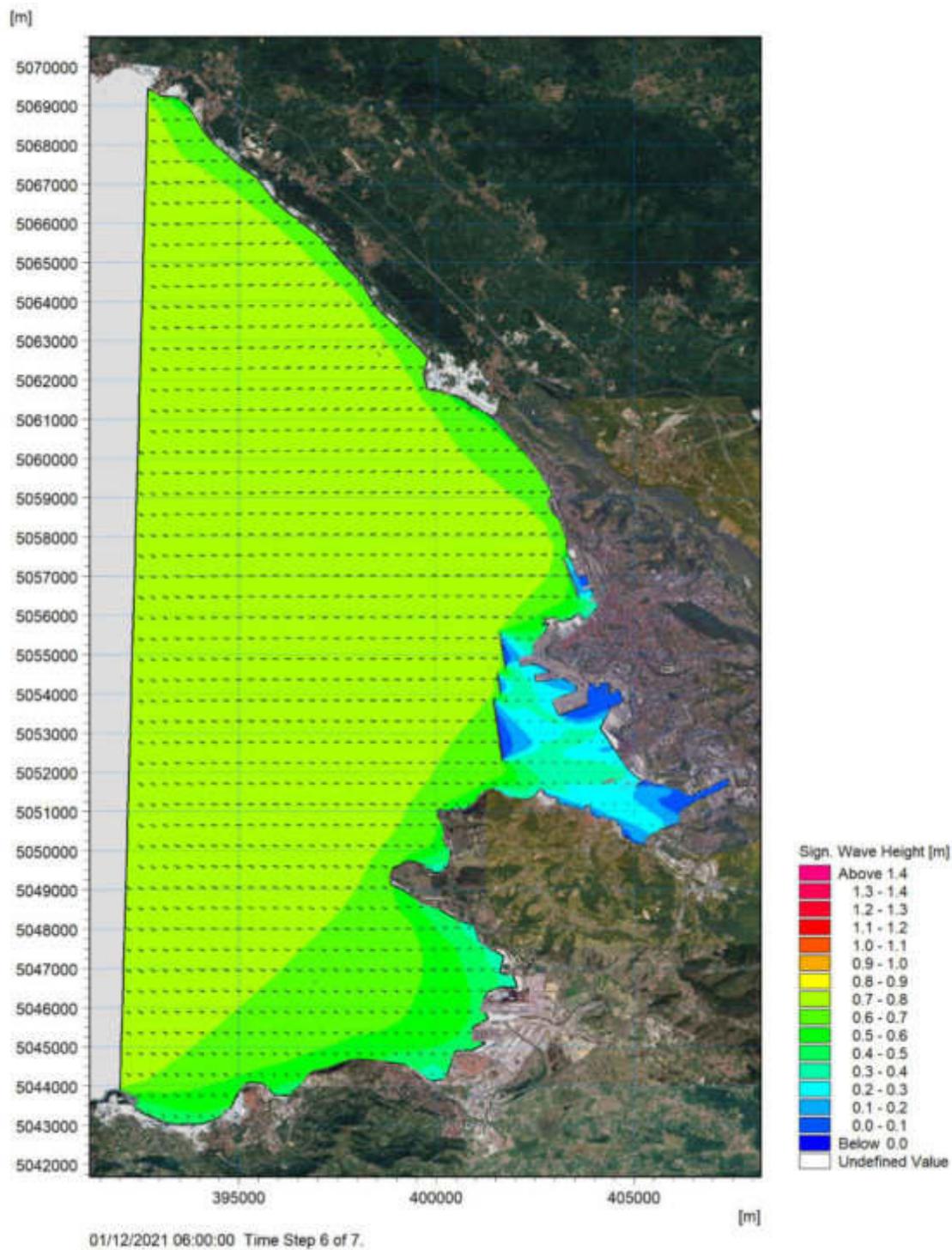


Figura 5-11 Campo di moto ondoso generato dall'onda 6 ($H_{m0}=0.90$ m, $T_p=3.3$ s e $MWD=324^\circ N$)

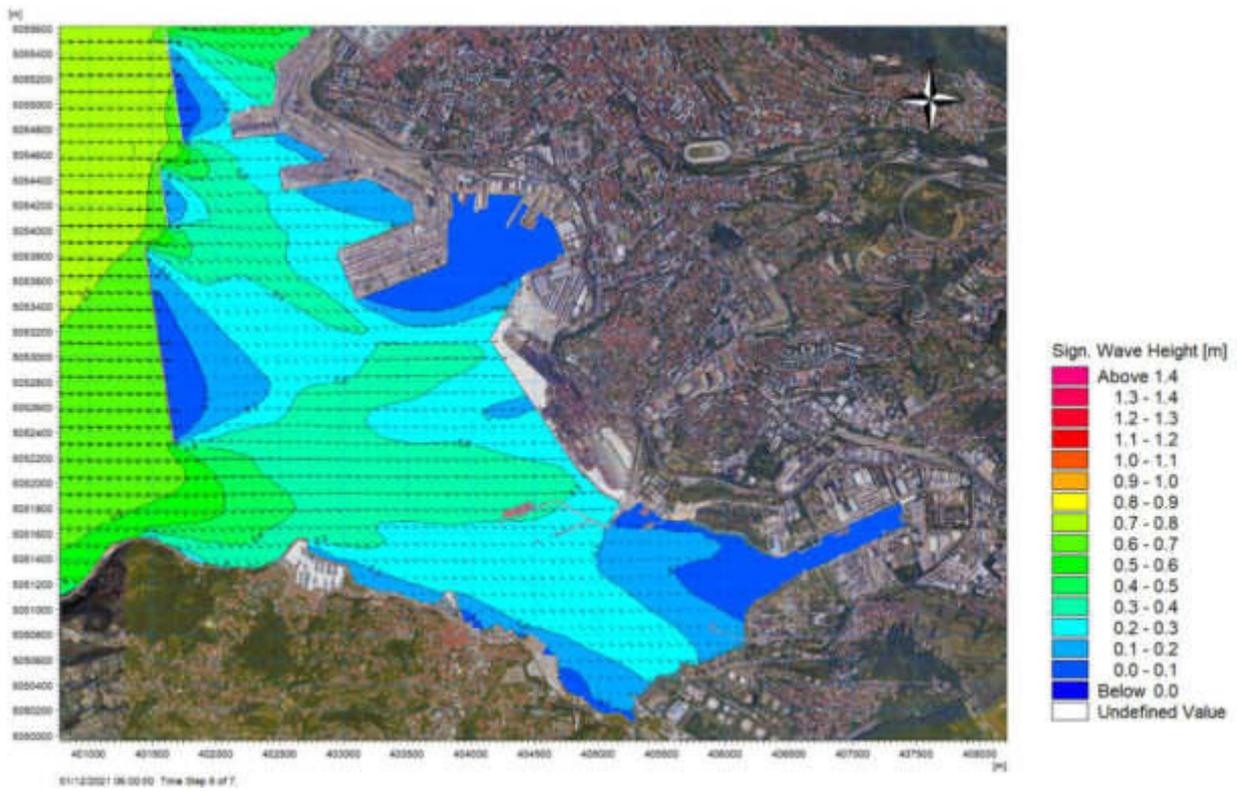


Figura 5-12 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 6 ($H_{m0}=0.90$ m, $T_p=3.3$ s e $MWD=324^\circ N$)

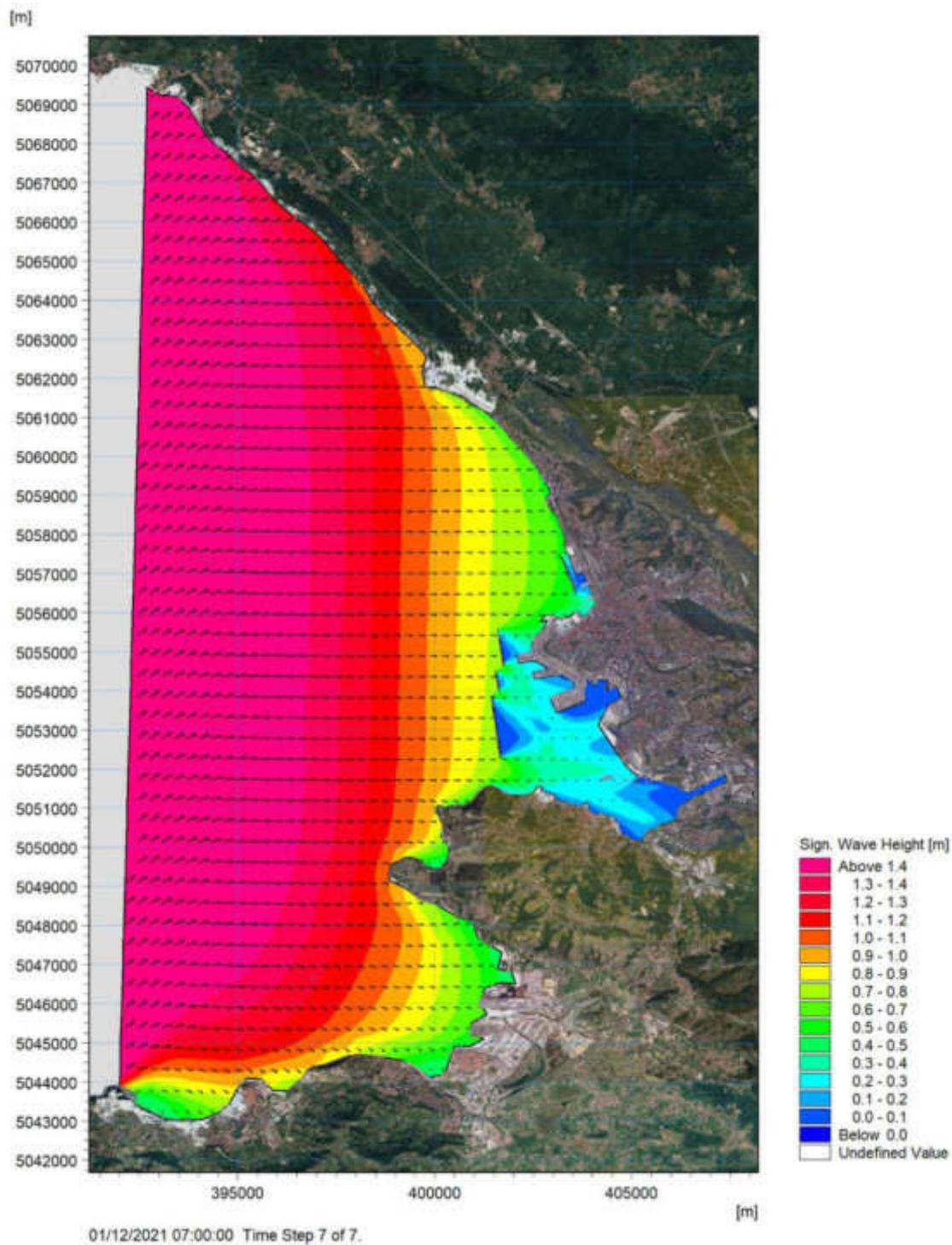


Figura 5-13 Campo di moto ondoso generato dall'onda 7 ($H_{m0}=1.71$ m, $T_p=6.3$ s e $MWD=224^\circ N$)

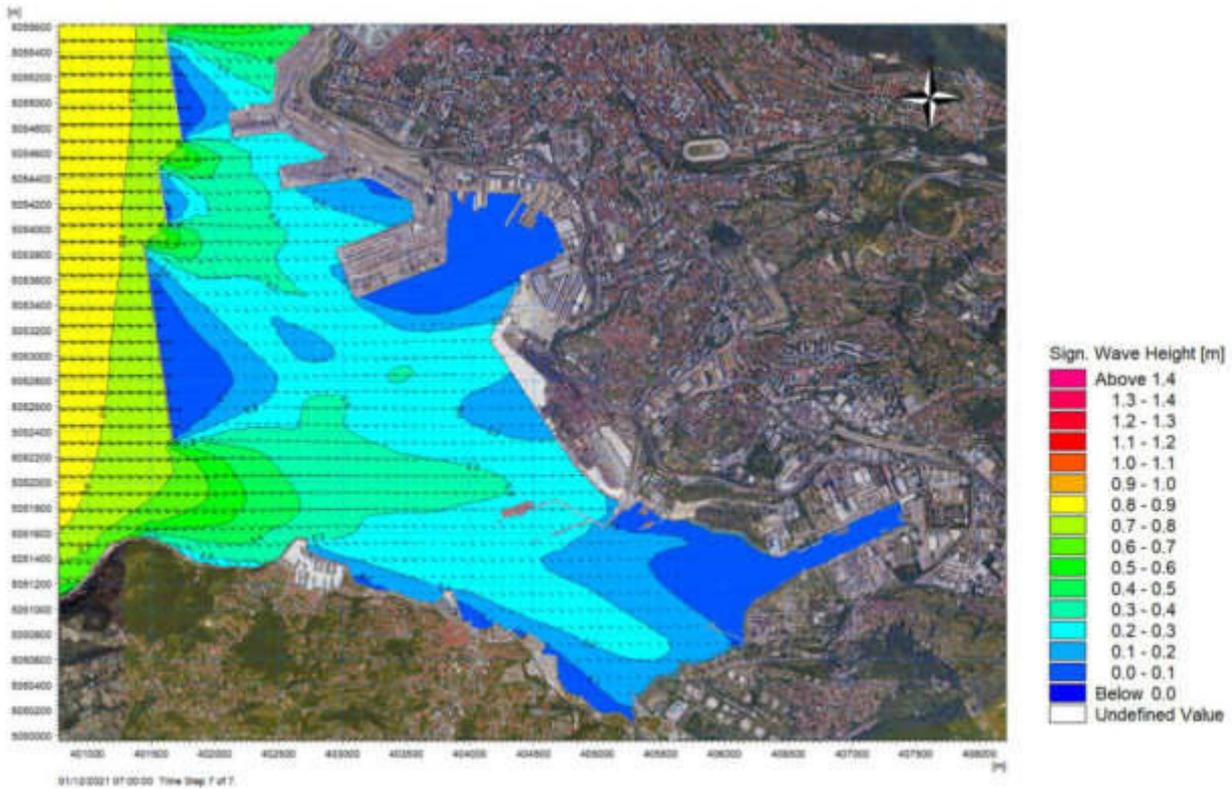


Figura 5-14 Dettaglio della Baia di Muggia per il campo di moto ondoso generato dall'onda 7 ($H_{m0}=1.71\text{ m}$, $T_p=6.3\text{ s}$ e $MWD=224^\circ N$)

In definitiva, a valle dell'analisi dei vari risultati ottenuti, si può confermare che le onde all'interno del bacino portuale sono di entità molto contenuta e si attestano al massimo su valori di H_{m0} nell'intorno dei 0.40 m. Tale valore, che potrebbe anche non essere così trascurabile in termini assoluti, deve essere considerato anche nel rapporto tra il periodo e la profondità nella zona di studio che si attesta su valori non inferiori ai 15 m.

Su tale profondità (15 m) le onde con periodi di picco inferiori ai 4.38 s si comportano come onde in acque profonde in quanto:

$$L_0 = \frac{g}{2\pi} T_p^2 = 30\text{m}$$

che risulta essere pari al limite inferiore per la definizione di acque profonde: $\frac{d}{L} > 2$.

Per quanto riguarda i periodi maggiori di tale limite, questi sono riferiti a onde che hanno una direzione di attacco ondoso tale da propagare all'interno del bacino onde di altezza molto ridotta.

In ogni caso, al fine verificare ulteriormente quanto sopra, sono state effettuate le simulazioni idrodinamiche in riferimento a solo due eventi tra i sette individuati. I due eventi selezionati sono quelli provenienti dalle due direzioni quasi simmetriche rispetto alla direzione della normale al sito: $250^\circ N$ (onda 1) e $300^\circ N$ (onda 3).

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 70 di 157
--	--	-------------------

5.2 Idrodinamica generata dal moto ondosso

Al fine di identificare l'idrodinamica che si instaura all'intero della Baia di Muggia per il solo effetto del moto ondosso, il modello d'onda MIKE 21 SW è stato integrato con il modulo idrodinamico MIKE 21 HD – Hydrodynamics [24].

Il modulo MIKE 21 HD, cuore del codice bidimensionale MIKE 21, simula le variazioni di livello e di corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate. Il sistema modellistico si basa sulla soluzione numerica delle equazioni dei Navier-Stokes mediate (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations) sotto le ipotesi di Boussinesq e in condizioni di pressione idrostatica. Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, trasporto di temperatura, salinità e l'equazione di stato. La densità non dipende dalla pressione, ma esclusivamente da temperatura e salinità dell'acqua. La versione Flexible Mesh utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il dominio spaziale, al pari del modello d'onda, è discretizzato attraverso una maglia non strutturata costituita da triangoli. Il modulo necessita di una serie di dati di input, che si possono raggruppare in differenti categorie, ovvero:

- parametri di base (es. mesh di calcolo, durata della simulazione);
- fattori di calibrazione (es. scabrezza, viscosità turbolenta);
- condizioni iniziali (es. livelli e campi di corrente);
- condizioni al contorno (es. oscillazioni di marea, portate);
- altre forzanti (es. campi di vento, radiation stress, apporti puntuali di portata).

L'utilizzo di un approccio di tipo bidimensionale permette di indagare non solo l'intensità del fenomeno, ma anche la direzione ed il verso del vettore velocità in ogni cella della matrice. Per ciascun elemento di calcolo, è possibile ottenere le variazioni temporali delle seguenti variabili:

- profondità e livelli idrici;
- velocità di corrente e direzione;
- densità, temperatura e salinità (non rilevanti nella presente analisi).

MIKE 21 HD può essere utilizzato in modalità *stand-alone* o accoppiato ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni richiedono la risoluzione contestuale delle variabili idrodinamiche (in primis le velocità di corrente).

Una descrizione di dettaglio del modulo idrodinamico HD del codice di calcolo MIKE 21 è disponibile in Allegato C.

Il modello idrodinamico è pertanto stato applicato utilizzando come uniche forzanti i campi di *radiation stress* relativi alle onde 1 e 3 (Tabella 5-1) prese a riferimento per la presente analisi.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 71 di 157
--	--	-------------------

Le correnti litoranee sono infatti generate per effetto dei gradienti dei *radiation stress*, ossia delle tensioni tangenziali indotte sul fondo dalle onde, che sono massime in corrispondenza del frangimento e laddove il fronte d'onda si presenta più obliquo rispetto alle isobate. Le diverse condizioni di moto ondoso, a seconda della loro intensità e direzione (e quindi della localizzazione della fascia di frangenti, più o meno spostata verso largo), sono in grado di generare correnti in una zona più o meno prossima alla costa. La direzione prevalente della corrente risulta invece influenzata dall'angolo formato tra il fronte d'onda e le isobate.

Si evidenzia che gli eventi considerati per lo studio dell'idrodinamica litoranea sono tipici per il sito in studio, ma di intensità medio alta: la condizione d'onda 2 ha una frequenza (dal punto di vista di altezza e direzione media) di circa 17 ore/anno, mentre l'onda 4 di circa 13.4 ore/anno. Le condizioni idrodinamiche da esse generate si verificano quindi mediamente per una durata inferiore ad un giorno all'anno.

5.2.1 Risultati del modello idrodinamico

A seguire si riportano le mappe di velocità e direzione di corrente per le due condizioni d'onda selezionate, che forniscono una buona rappresentazione della circolazione locale.

Queste immagini, a cui è stata applicata una scala cromatica con valori massimi molto piccoli per poter percepire meglio i pattern di circolazione, mettono in evidenza come le maggiori correnti si generino, sotto effetto del moto ondoso incidente, solamente laddove le profondità sono molto piccole o a ridosso dei contorni di interfaccia tra terra e mare (ad es. lungo le dighe antemurali, nella costa Nord).

In ogni caso si tratta di intensità della corrente molto limitate con valori massimi al di sotto di 0.10 m/s, mentre nella zona di maggiore interesse le velocità della corrente raggiungono i pochi centimetri al secondo. Tali intensità di corrente, soprattutto in considerazione della loro ridotta frequenza, rendono di fatto trascurabile il contributo del moto ondoso alla circolazione della Baia di Muggia, come si evince dall'analisi delle intensità di corrente indotte da vento, marea e circolazione del Golfo di Trieste (capitolo 6 ed in particolare Figura 6-2).

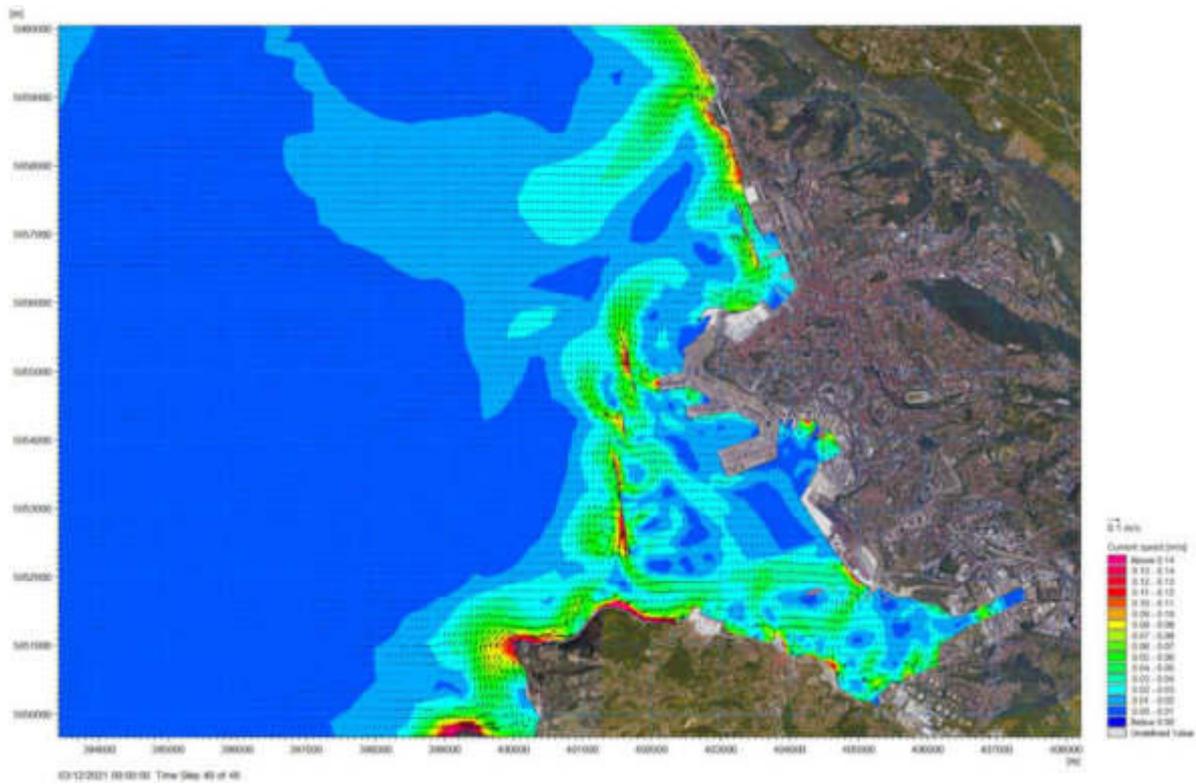


Figura 5-15 Campo delle velocità della corrente generate dall'onda 1 ($H_m0=1.69$ m, $T_p=5.6$ s e $MWD=249^\circ N$)

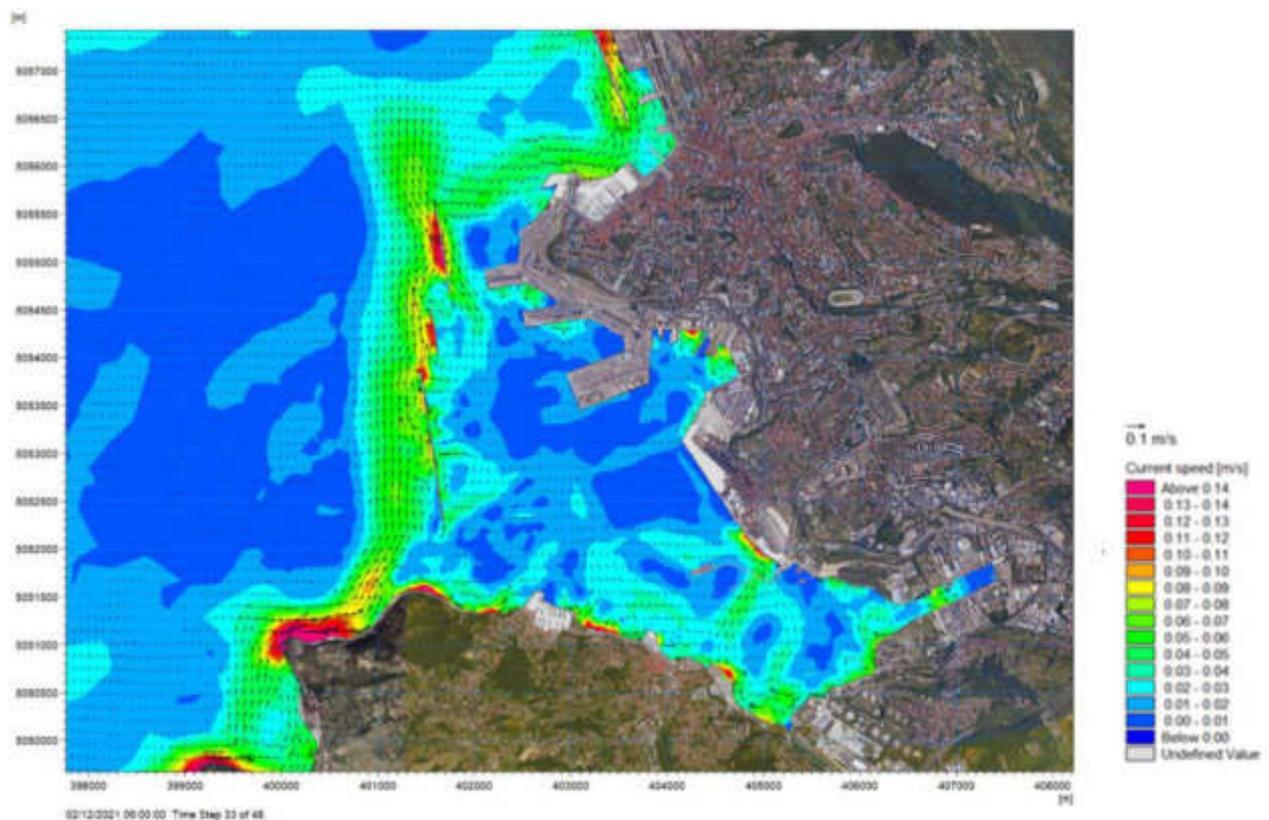


Figura 5-16 - Campo delle velocità della corrente generate dall'onda 3 ($H_m0=0.90$ m, $T_p=3.4$ s e $MWD=298^\circ N$)

6 MODELLO DI CIRCOLAZIONE GENERALE AD ALTA RISOLUZIONE

Al fine di rappresentare in dettaglio il regime idrodinamico per la zona di interesse, è stato implementato il modello numerico tridimensionale il MIKE 3 HD – Hydrodynamics di DHI [23], che si basa su un approccio a maglia flessibile (in Figura 6-1 viene presentato un esempio) ed è stato sviluppato per applicazioni in mare aperto, sottocosta ed in estuari.

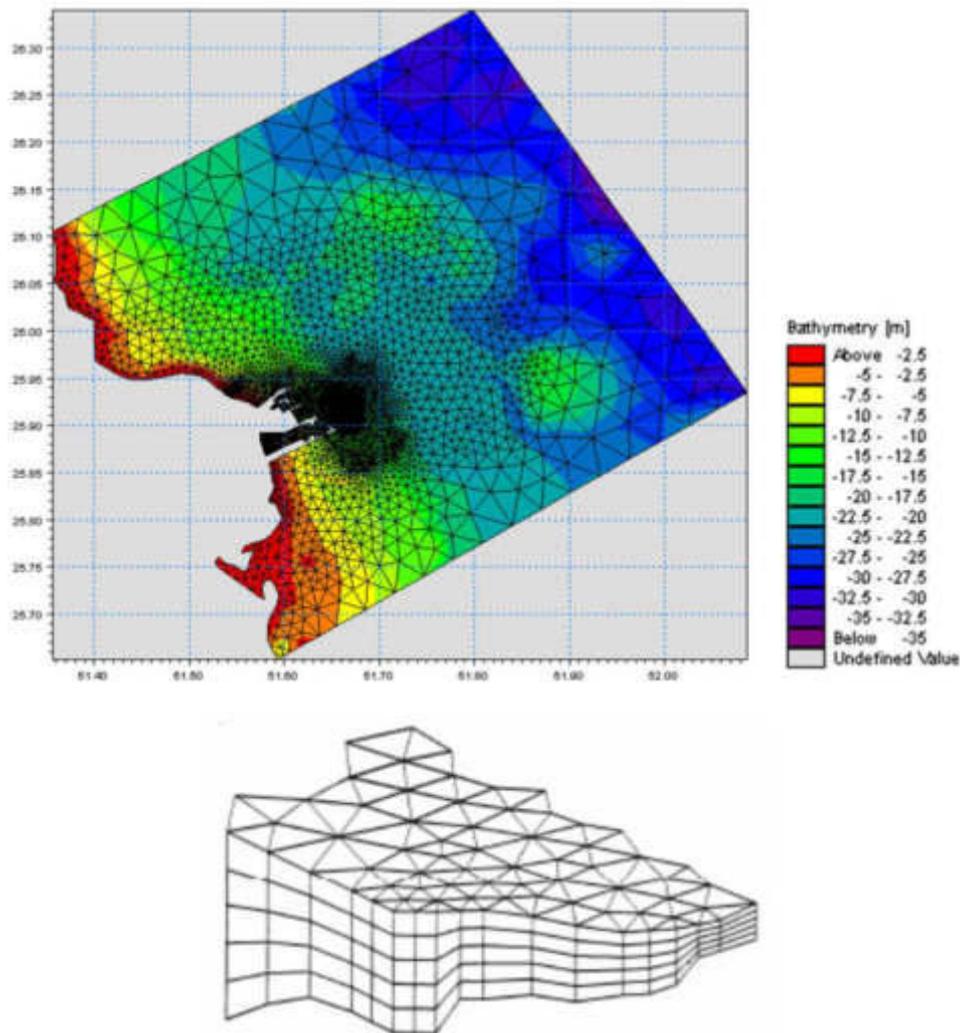


Figura 6-1 Esempi di griglia di calcolo di MIKE 3 FM

A differenza del modulo MIKE 21 HD, descritto alla sezione 5.2, il modulo MIKE 3 HD, consente anche la simulazione della variazione di densità nelle 3 direzioni e la rappresentazione delle correnti indotte dai gradienti dovuti a salinità e temperatura. Il codice permette infatti di tenere in considerazione tutti i fenomeni principali che hanno influenza sull'idrodinamica degli ambienti oceanici e/o costieri: gradienti di densità (temperatura/salinità), effetto delle maree,

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 74 di 157
--	--	-------------------

effetto del vento, scambio termico con l'atmosfera, forza di Coriolis, moto ondoso ed apporti fluviali.

Essendo un modello tridimensionale, a differenza del modulo MIKE 21 HD, presenta anche la dimensione verticale che segue l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua sia sui cosiddetti livelli σ (strati di spessore variabile in funzione della profondità locale), sia su livelli orizzontali "z" sia, infine, su livelli combinati sigma-zeta.

Una descrizione completa del modulo idrodinamico è riportata in Allegato C.

6.1 Annidamento idrodinamico: condizioni iniziali, di contorno aperto e forzanti

Il modello idrodinamico ad alta risoluzione è stato inizializzato con i dati del modello *Mediterranean Sea Physics Reanalysis* per quanto riguarda le componenti zonale e meridionale della corrente e l'elevazione della superficie libera, e con i dati del campionamento effettuato il 23 Settembre 2014, descritti alla sezione 3.4.1, relativamente a temperatura e salinità.

Come già accennato, il periodo di riferimento per la simulazione con il modello idrodinamico è stato selezionato sulla base della disponibilità dei campionamenti effettuati da OGS. In particolare, i dati di Settembre 2014 sono stati utilizzati per l'inizializzazione del modello, quelli di Gennaio e Marzo 2015 per la sua validazione, come descritto alla sezione 6.3. Complessivamente il modello idrodinamico ha coperto una finestra temporale di circa 1 anno, dal 23 Settembre 2014 all'01 Ottobre 2015.

Le condizioni al contorno, relativamente a componenti di velocità di corrente, livelli, temperatura e salinità, provengono dal modello *Mediterranean Sea Physics Reanalysis* (sezione 3.4) e sono imposte al modello ad alta risoluzione su base oraria. Si evidenzia che questo modello non tiene conto della componente mareale, per la quale si è fatto riferimento ai dati del modello DTU10 (sezione 3.5).

Per quanto riguarda la componente atmosferica, il modello viene forzato per quel che concerne i campi di vento, la temperatura e l'umidità relativa dell'aria e le precipitazioni, dai dati registrati dalla stazione meteo "Trieste molo Fratelli Bandiera" gestita da ARPA FVG. Relativamente alla copertura nuvolosa, dato non disponibile tra quelli registrati alla stazione meteo ma utilizzato dal modello per il calcolo degli scambi di calore tra atmosfera e superficie del mare, si è fatto riferimento alle analisi operative del sistema *Climate Forecast System* (CFS). Entrambe le fonti di dati sono descritte alla sezione 3.6.

In riferimento ai corsi d'acqua, in considerazione dell'esigua portata (sezione 3.7), si è ritenuto trascurabile il loro contributo alla circolazione della Baia di Muggia e non sono pertanto stati inseriti nel modello idrodinamico.

In Tabella 6-1 vengono riportate le caratteristiche principali dell'implementazione di MIKE 3 HD FM utilizzata per il presente studio.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 75 di 157
--	--	-------------------

Tabella 6-1 Principali caratteristiche del modello di circolazione ad alta risoluzione

Caratteristiche del modello MIKE 3 HD FM	
Modello Numerico	<i>MIKE 3 HD FM</i>
Risoluzione orizzontale (min/max)	<i>400m / 50m</i>
Tipologia della griglia di calcolo	<i>Volumi finiti/maglia non strutturata</i>
Risoluzione verticale	<i>11 livelli σ</i>
Periodo di simulazione	<i>23 Settembre 2014 - 01 Ottobre 2015</i>
Frequenza dei risultati	<i>Oraria (istantanea)</i>
Forzante atmosferico	<i>Stazione meteo ARPA FVG: velocità vento, temperatura aria, umidità relativa, precipitazioni</i> <i>CFS: copertura nuvolosa</i>
Condizioni iniziali	<i>Mediterranean Sea Physics Reanalysis: componenti di velocità di corrente, livelli del mare</i> <i>DTU10: livelli di marea</i> <i>Campionamenti OGS: temperatura e salinità</i>
Dati ai contorni aperti	<i>Mediterranean Sea Physics Reanalysis: componenti di velocità di corrente, livelli del mare, temperatura e salinità</i> <i>DTU10: livelli di marea</i>
Condizioni al contorno aperto	<i>Flather [25]</i>
Corsi d'acqua	<i>No</i>
Flussi all'interfaccia aria-mare	<i>Momento: sì</i> <i>Calore: sì</i> <i>Massa: sì</i>

6.2 Risultati del modello idrodinamico

Il modello idrodinamico ha permesso di ricavare le caratteristiche di circolazione, in termini di velocità e direzione di corrente, temperatura e salinità lungo la colonna d'acqua ed in tutti i punti del dominio di calcolo descritto alla sezione 4.

Ovviamente le condizioni idrodinamiche variano notevolmente non solo all'interno della Baia di Muggia ma, soprattutto, nella zona al largo, all'esterno delle dighe. Data la finalità del presente studio, ossia di valutare l'impatto della realizzazione della nuova infrastruttura sia in fase di esercizio, sia in fase di cantiere, le analisi dei risultati ottenuti dal modello idrodinamico sono di seguito esposte prevalentemente in riferimento alla corrente che si instaura in tale area.

In particolare, sono state estratte le condizioni di corrente in un punto posto in corrispondenza del limite a mare del piazzale in progetto (lato sud-ovest) ed a tre diverse profondità: in superficie, ad una profondità intermedia della colonna d'acqua ed al fondo.

Si osserva che, come sempre accade, le velocità maggiori si riscontrano in superficie, in quanto maggiormente influenzata dall'azione del vento e dallo scambio termico aria-acqua. In particolare, come mostrato in Figura 6-2, in superficie si raggiungono valori massimi di circa 0.35 m/s e valori medi di circa 0.05 m/s, mentre al fondo la velocità massima raggiunta è di 0.18 m/s e mediamente le correnti hanno intensità di 0.02 m/s.

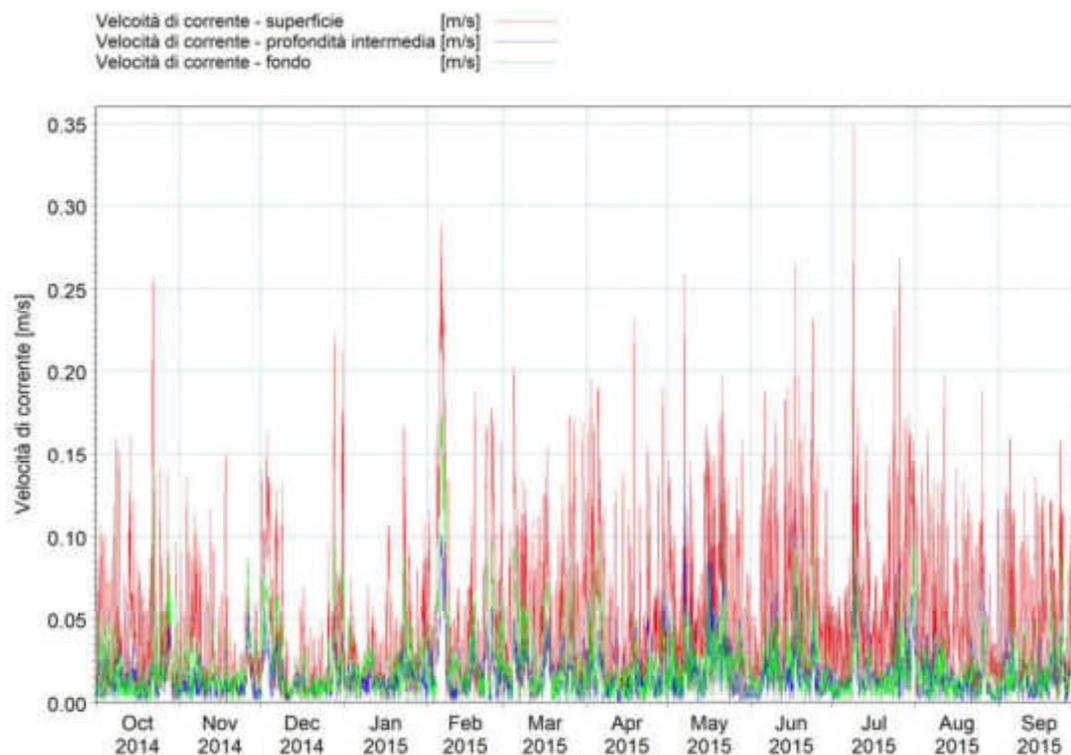


Figura 6-2 Andamento delle velocità di corrente in un punto posto in corrispondenza del limite a mare della infrastruttura in progetto, rispettivamente in superficie (in rosso), ad una profondità intermedia (in blu) e al fondo

Per comprendere la variabilità della circolazione anche da un punto di vista direzionale sono state rappresentate, agli stessi livelli, anche le rose di corrente per l'intero periodo simulato (23 Settembre 2014-1 Ottobre 2015). Nelle rose (Figura 6-3, Figura 6-4 e Figura 6-5) è indicata anche l'orientazione della costa in corrispondenza del futuro molo.

Queste rose mostrano che, in superficie (Figura 6-3), le correnti più intense e più frequenti sono dirette verso Sud-Ovest, con particolare riferimento al settore compreso tra 225°N e 270°N, mentre al fondo (Figura 6-5) hanno prevalentemente una direzione opposta, verso Nord-Est, con particolare riferimento al settore compreso tra 60°N e 105°N.

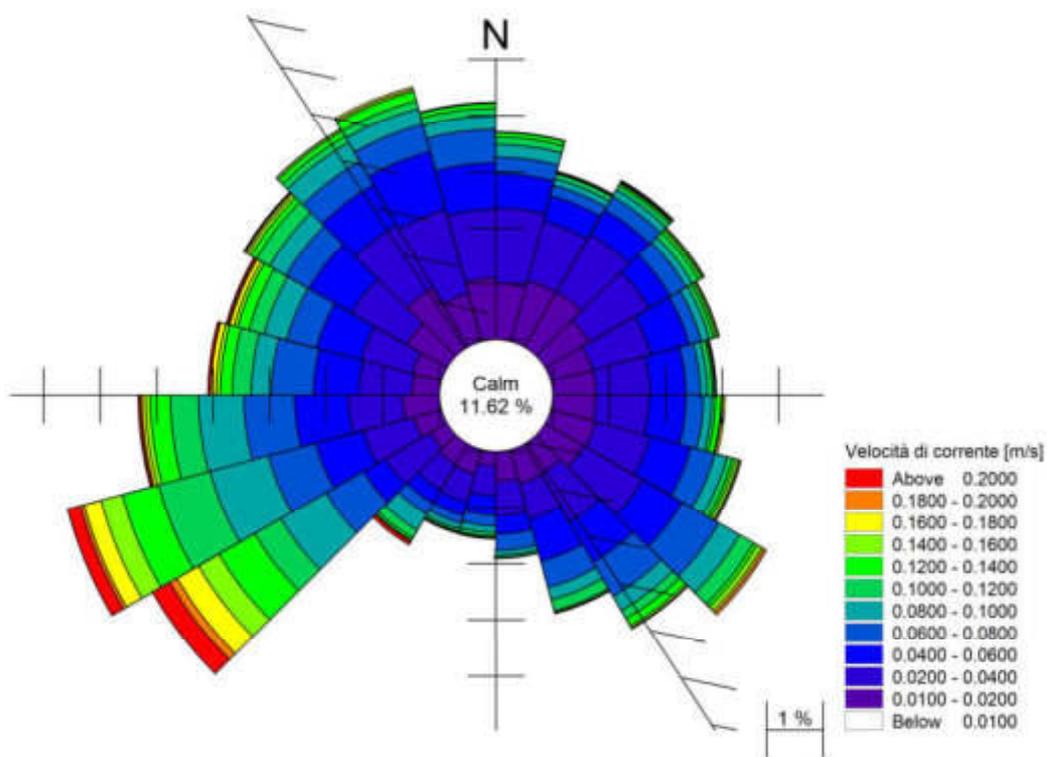


Figura 6-3 Rosa della corrente per il periodo Settembre 2014-Settembre 2015 in un punto posto in corrispondenza del limite a mare (lato sud-ovest) della infrastruttura in progetto, in superficie (direzione "verso")

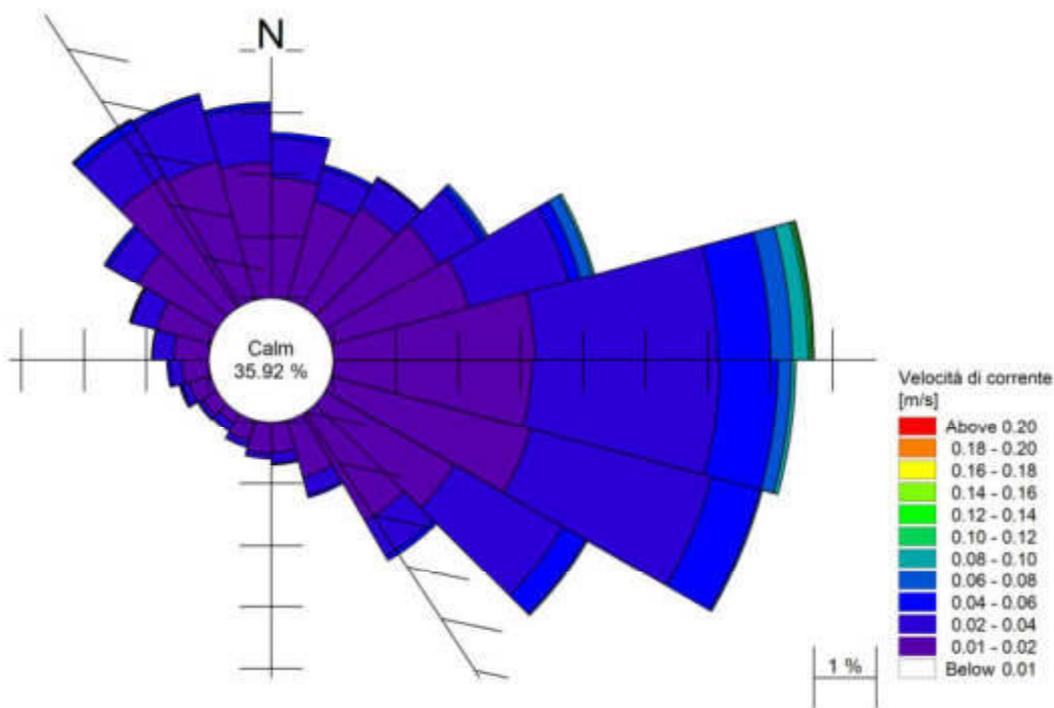


Figura 6-4 Rosa della corrente per il periodo Settembre 2014-Settembre 2015 in un punto posto in corrispondenza del limite a mare (lato sud-ovest) della infrastruttura in progetto, a profondità intermedia (direzione "verso")

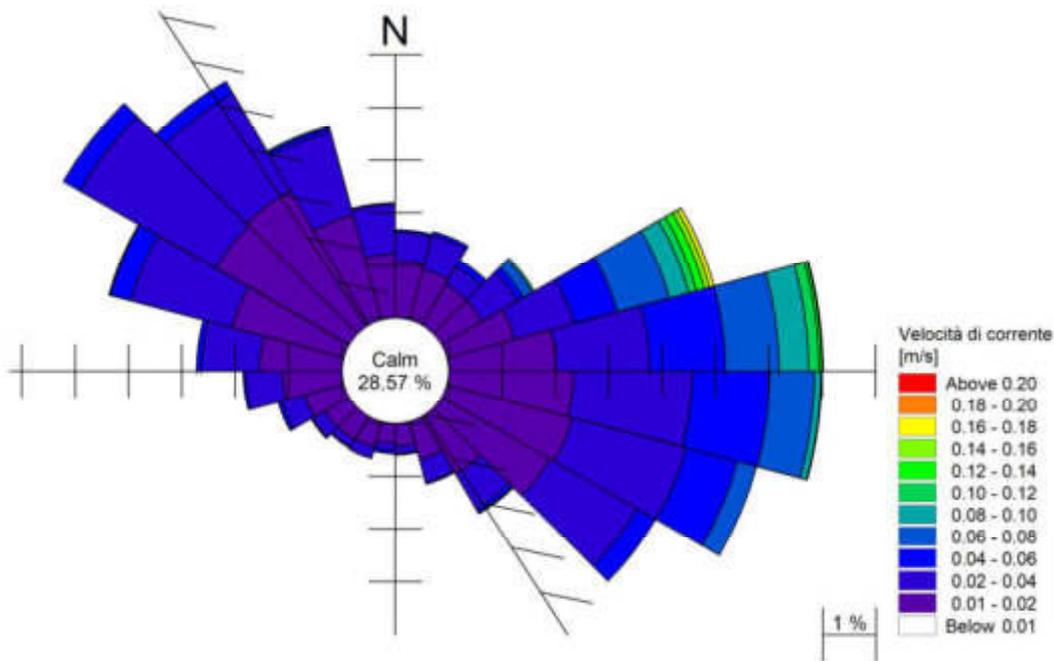


Figura 6-5 Rosa della corrente per il periodo Settembre 2014-Settembre 2015 in un punto posto in corrispondenza del limite a mare (lato sud-ovest) della infrastruttura in progetto, al fondo (direzione "verso")

Nelle mappe a seguire sono riportati i risultati in termini di campi di velocità per alcuni istanti temporali e per tre livelli lungo la colonna d'acqua (superficie, profondità intermedia e fondo); si evidenzia che queste mappe rappresentano, per una più agevole analisi, solo una zona poco più estesa rispetto alla Baia di Muggia e non l'intero dominio di calcolo. Inoltre, queste mappe fanno riferimento ad alcuni specifici istanti temporali che sono stati selezionati in modo da illustrare, per la zona interessata dalla futura costruzione di questo stralcio di Molo VIII, esempi di campi di corrente superficiali al variare della direzione: corrente verso Nord-Est (I Quadrante, Figura 6-6, Figura 6-7, Figura 6-8), corrente verso Sud-Est (II Quadrante, Figura 6-9, Figura 6-10, Figura 6-11), corrente verso Sud-Ovest (III Quadrante, Figura 6-12, Figura 6-13, Figura 6-14) e corrente verso Nord-Ovest (IV Quadrante, Figura 6-15, Figura 6-16, Figura 6-17).

Le mappe confermano il comportamento descritto dall'analisi delle rose di corrente. Si osserva infatti che, nella zona di interesse per la presente analisi, la direzione di corrente si modifica gradualmente lungo la verticale: al fondo la corrente risulta avere una direzione opposta rispetto a quella in superficie, mentre a metà colonna la direzione non è ben definita proprio perché si ricade in una condizione di transizione tra la direzione superficiale e quella profonda. Questa rotazione della corrente fa sì che, negli strati intermedi che rappresentano la zona di "transizione", le velocità si attestano mediamente su valori più bassi (pari a circa 0.02 m/s), anche rispetto al fondo. Infatti, le calme, che nelle rose sono rappresentate per velocità di corrente inferiori a 0.01 m/s, sono pari all'11.62% (corrispondente a circa 42 giorni/anno) in superficie, a 35.92% (corrispondente a circa 131 giorni/anno) alla profondità intermedia e a 28.57% (corrispondente a circa 104 giorni/anno) al fondo.

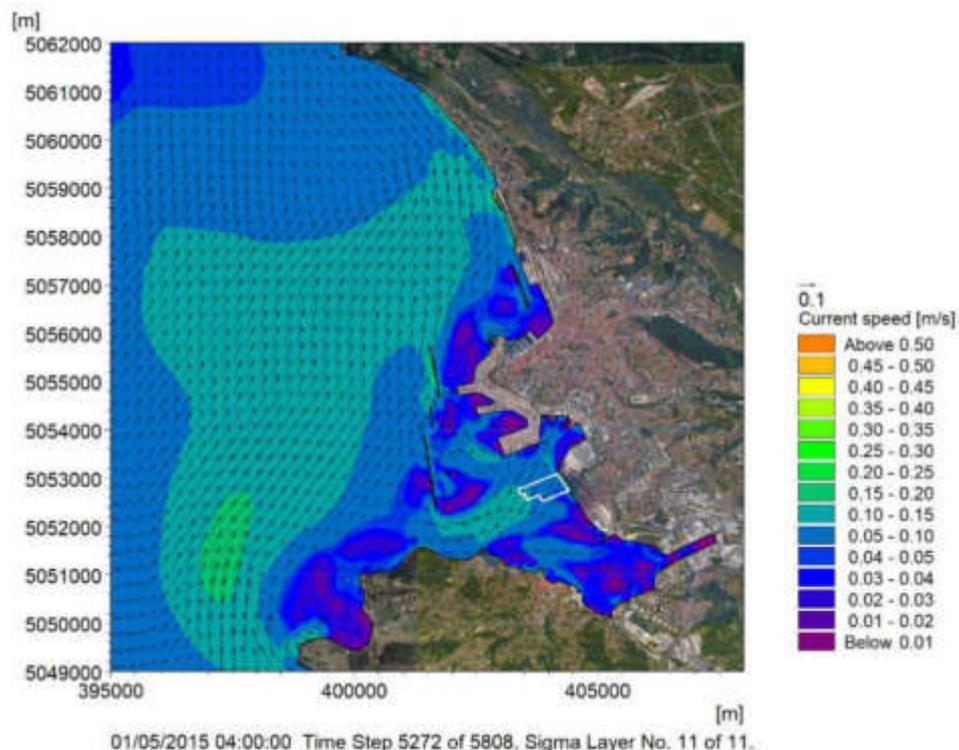


Figura 6-6

Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Est)

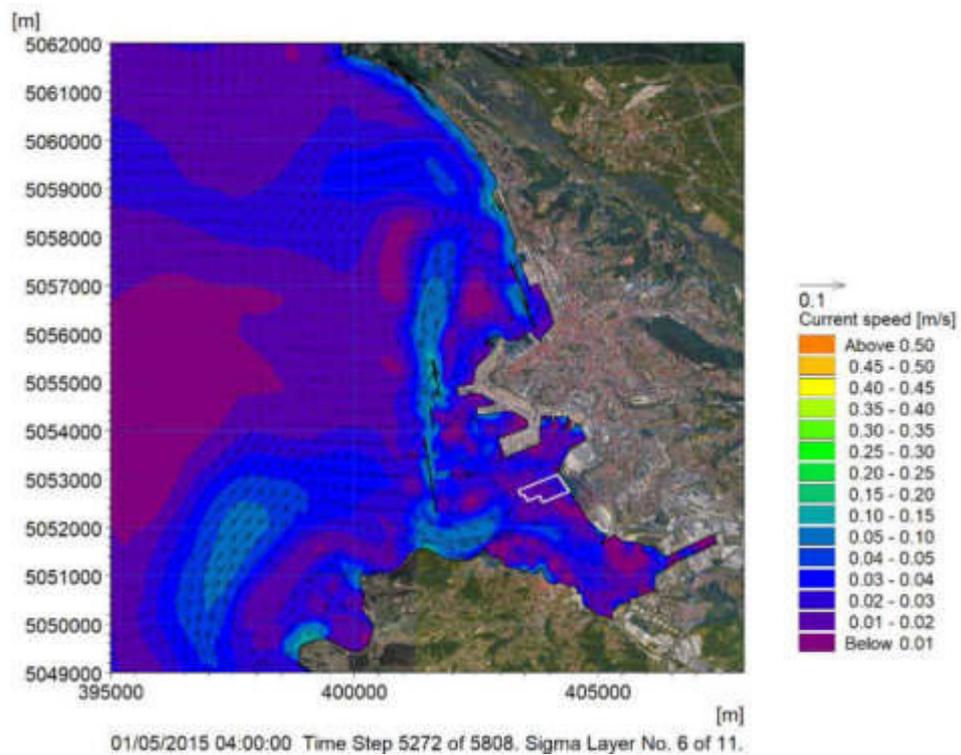


Figura 6-7

Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Est)

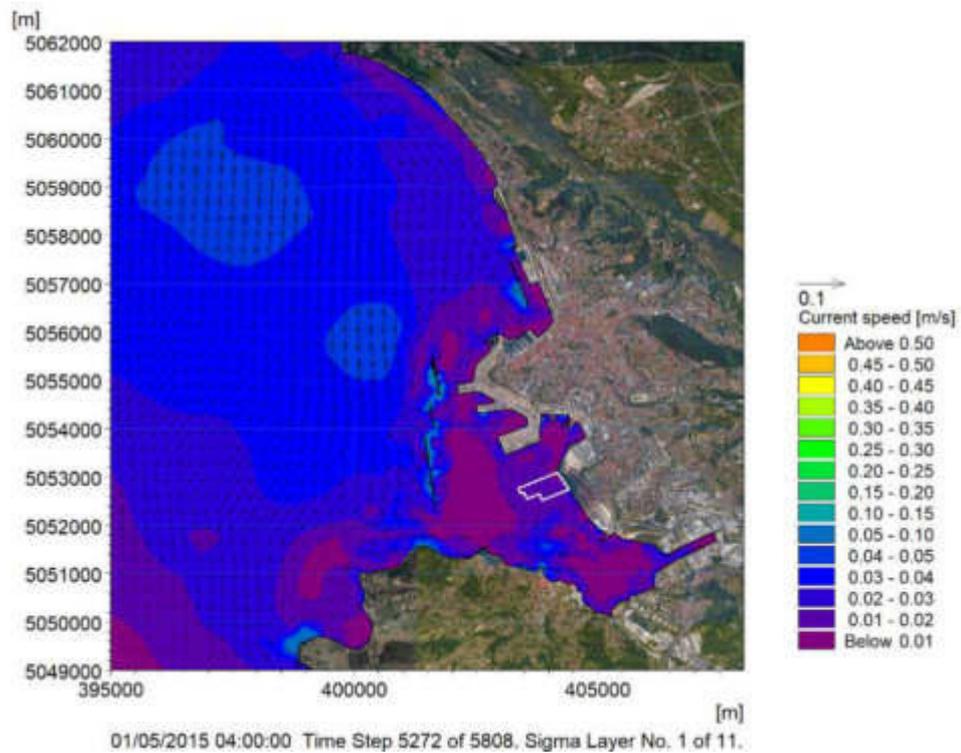


Figura 6-8

Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Est)

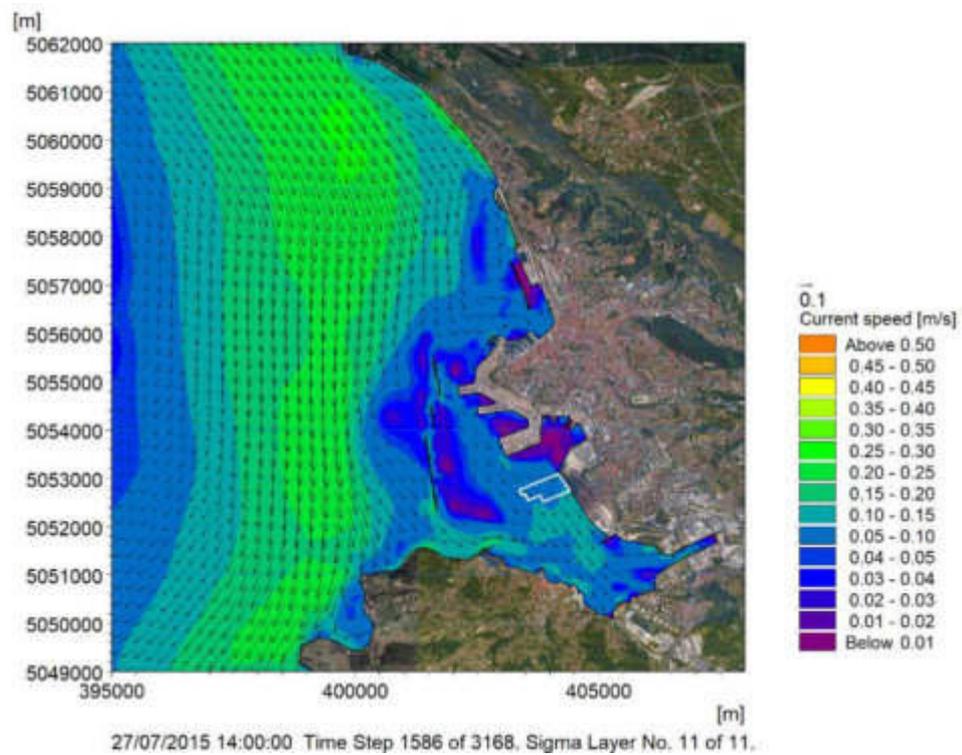


Figura 6-9 Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

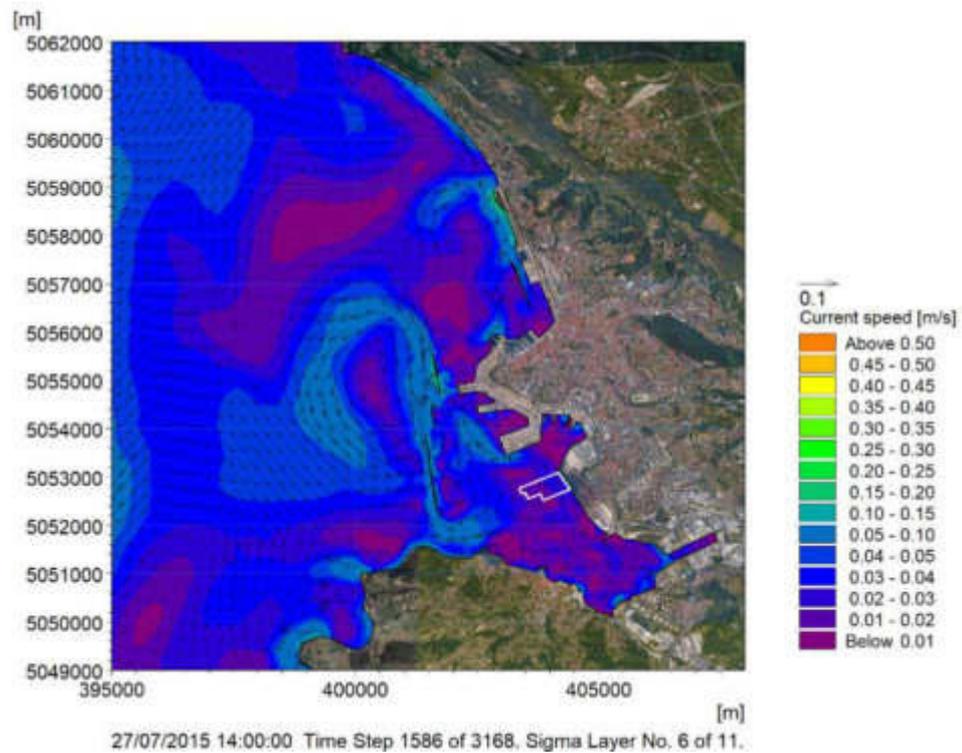


Figura 6-10 Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

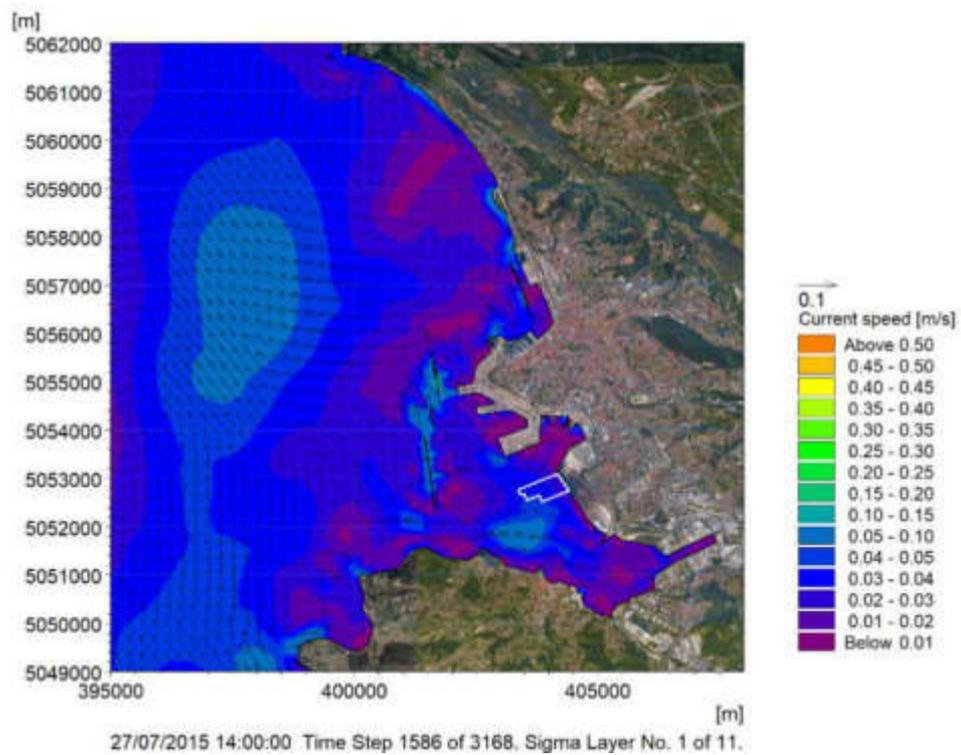


Figura 6-11 Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

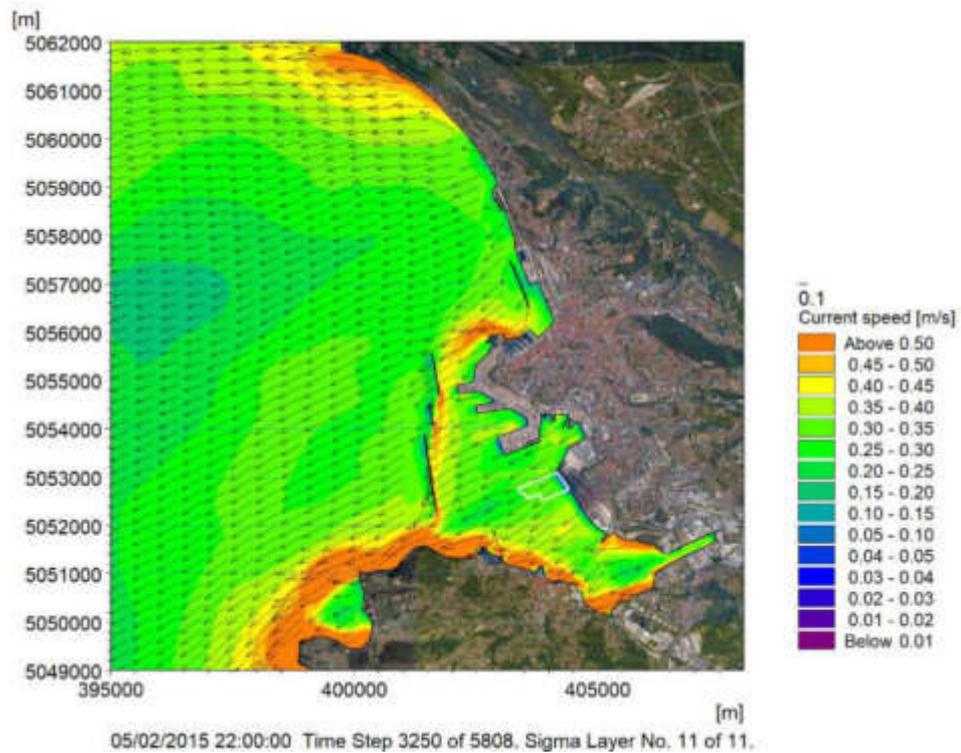


Figura 6-12 Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

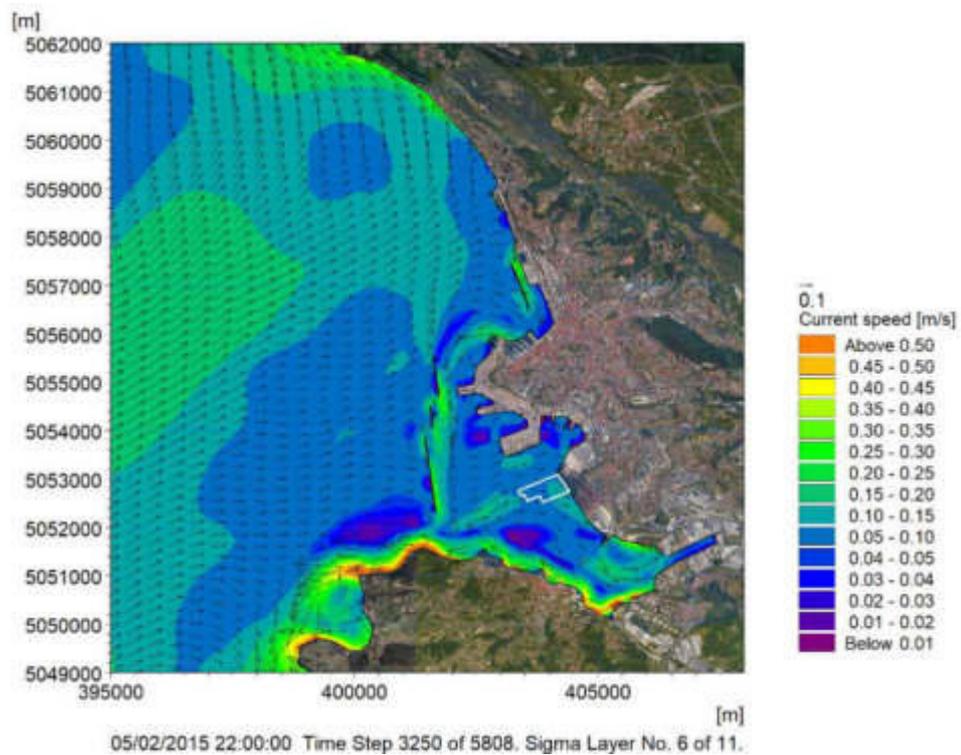


Figura 6-13 Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

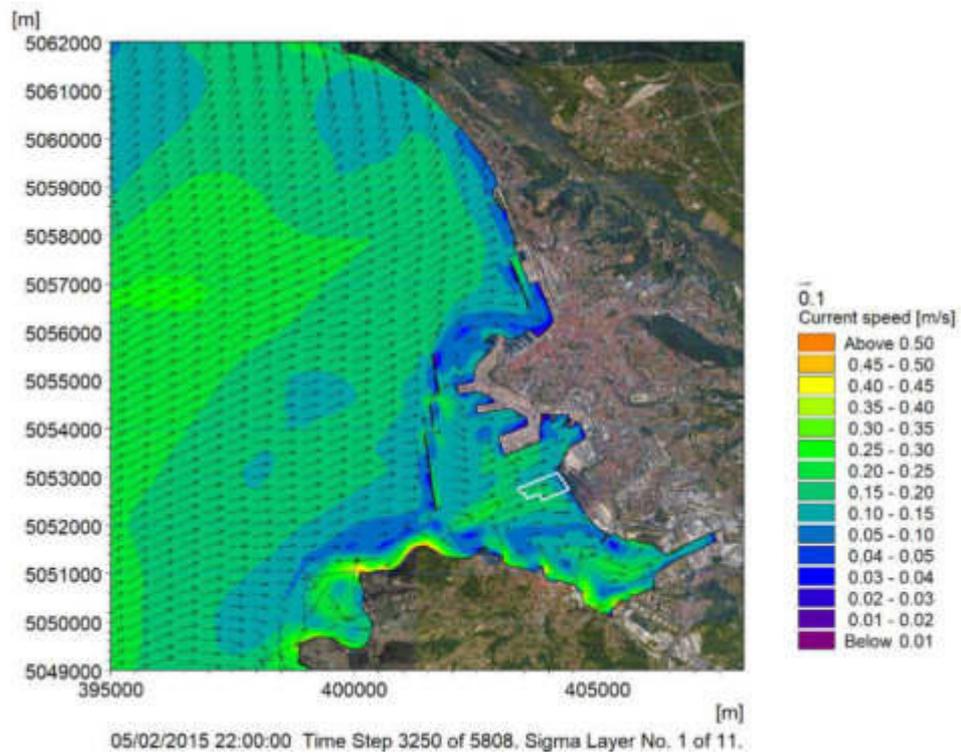


Figura 6-14 Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

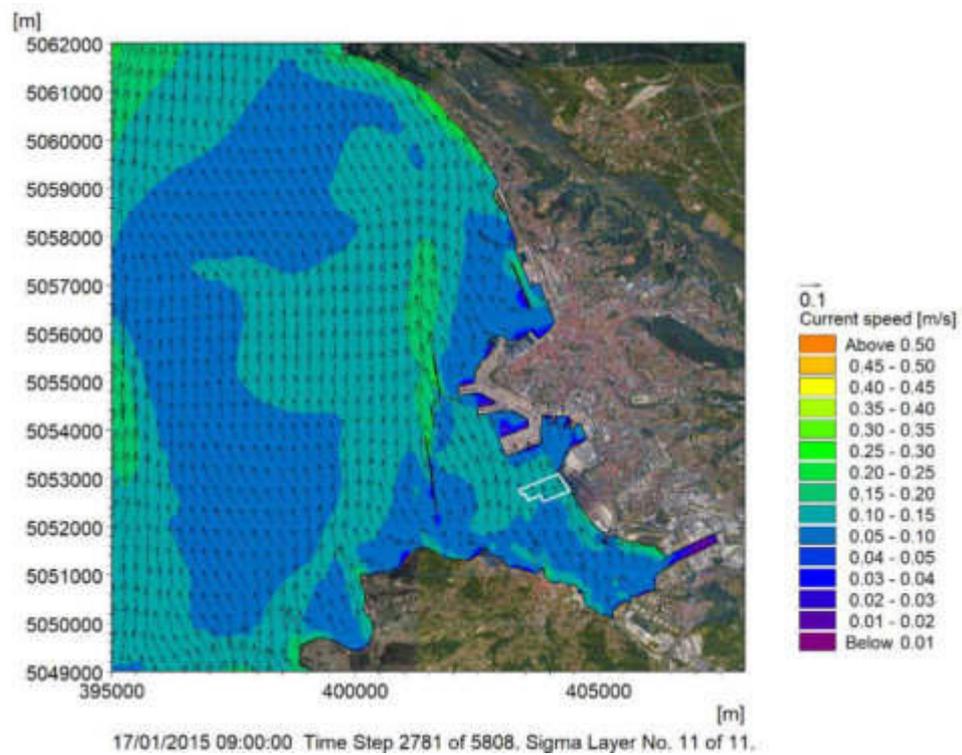


Figura 6-15 Campo idrodinamico in superficie (istante temporale in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

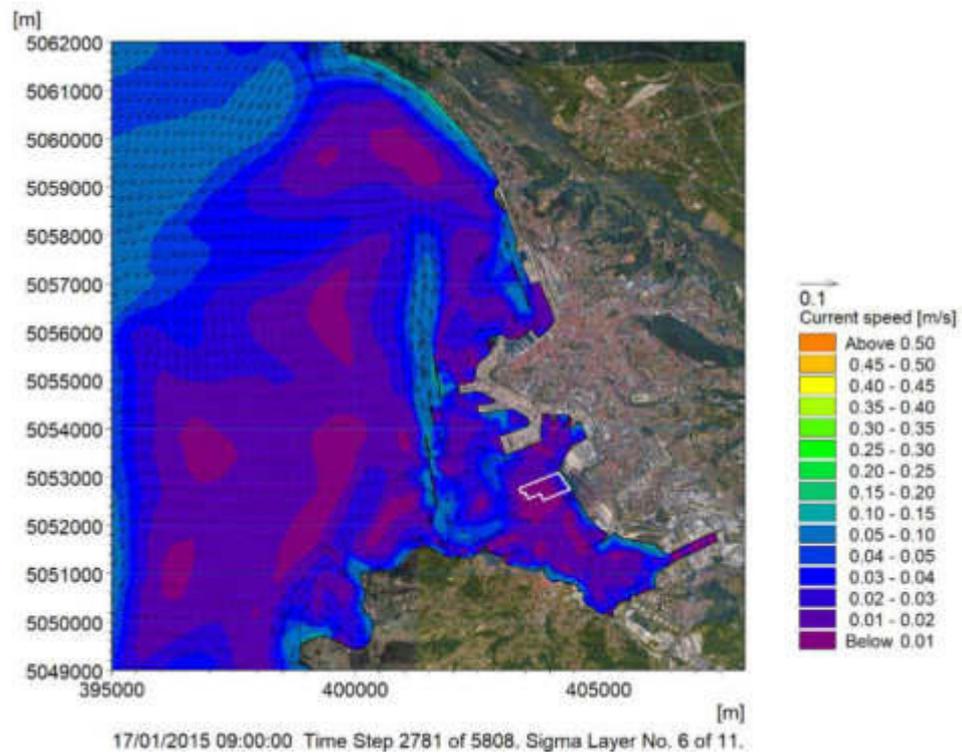


Figura 6-16 Campo idrodinamico a profondità intermedia (istante temporale in cui la corrente a profondità intermedia in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

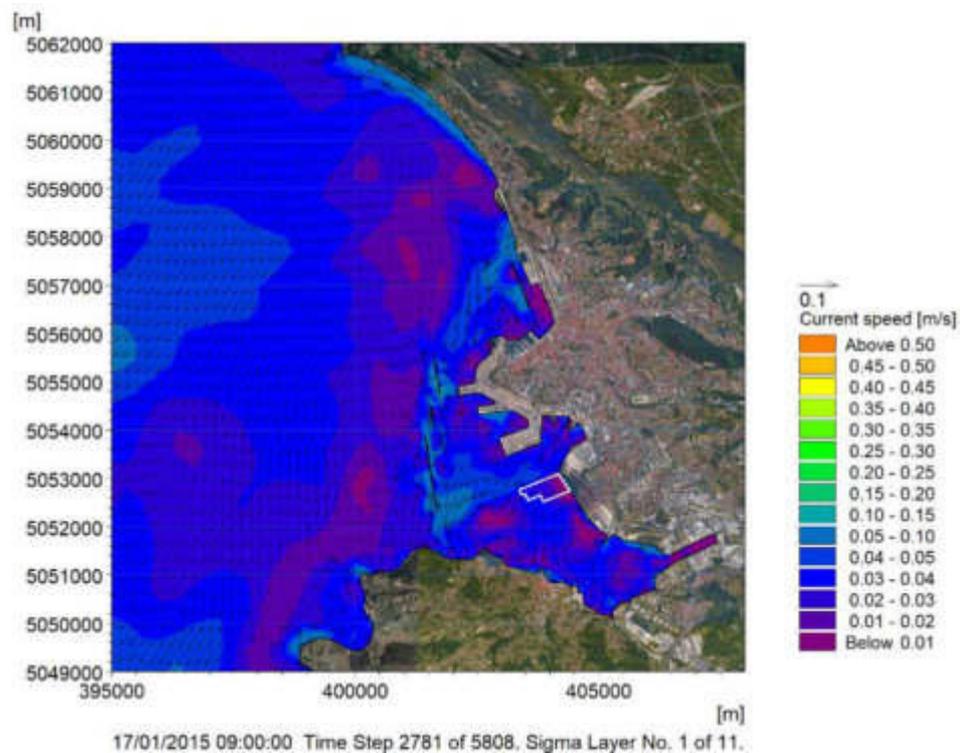


Figura 6-17 Campo idrodinamico al fondo (istante temporale in cui la corrente al fondo in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

6.3 Validazione del modello idrodinamico

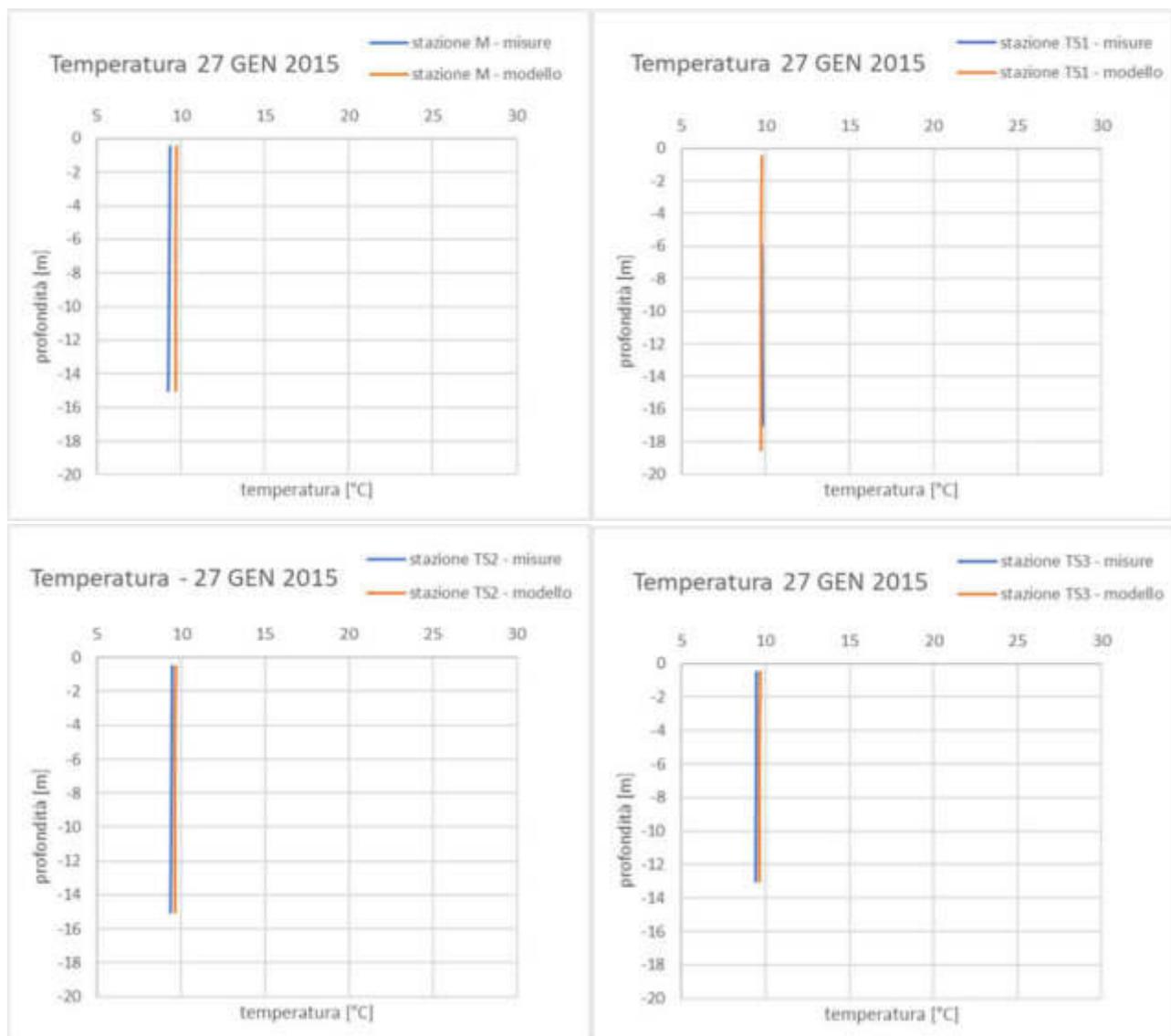
Come precedentemente indicato, il modello ad alta risoluzione ha coperto un periodo di circa 12 mesi ed è stato validato con le misurazioni di temperatura e salinità rese disponibili da OGS (sezione 3.4.1). I dati di validazione utilizzati si riferiscono alle 10 stazioni distribuite all'interno del bacino di Muggia (Figura 3-10).

Nelle immagini a seguire si riportano i confronti fra i profili di temperatura (Figura 6-18) e salinità (Figura 6-19) osservati e quelli simulati con l'applicazione del modello MIKE 3 HD per i giorni 27 Gennaio e 20 Marzo 2015. Si precisa che i dati del monitoraggio del 23 Settembre 2014 sono stati utilizzati per inizializzare il modello in riferimento alla temperatura e alla salinità della colonna d'acqua.

Relativamente alla temperatura, la cui variabilità stagionale e lungo la colonna d'acqua è più significativa rispetto alla salinità, si osserva una generale buona corrispondenza per tutti i punti ed in entrambi i giorni. I grafici relativi al periodo invernale (27 Gennaio 2015) mostrano una colonna d'acqua ben mescolata, con profili termici, sia misurati che modellati, pressoché verticali. In generale, le temperature modellate sono lievemente superiori a quelle misurate, ma le differenze sono assai modeste, dell'ordine di 0.3°C. Per la stazione TS1 i valori misurati-modellati sono pressoché i medesimi con differenze massime di 0.1°C (più alti i valori misurati). Durante il periodo primaverile (20 Marzo 2015) si osserva una stratificazione nei primi metri dalla superficie, con la generazione di un termoclino, andamento ben rappresentato anche dal modello

idrodinamico. Anche in questo caso, i risultati della modellazione mostrano valori di temperatura un poco più elevati rispetto a quelli misurati, con differenze comunque sempre inferiori a 1°C.

La validazione in riferimento alla salinità è meno significativa, ma i grafici mostrano una buona corrispondenza tra valori misurati e modellati: le differenze sono in generale al di sotto di 0.1 PSU.



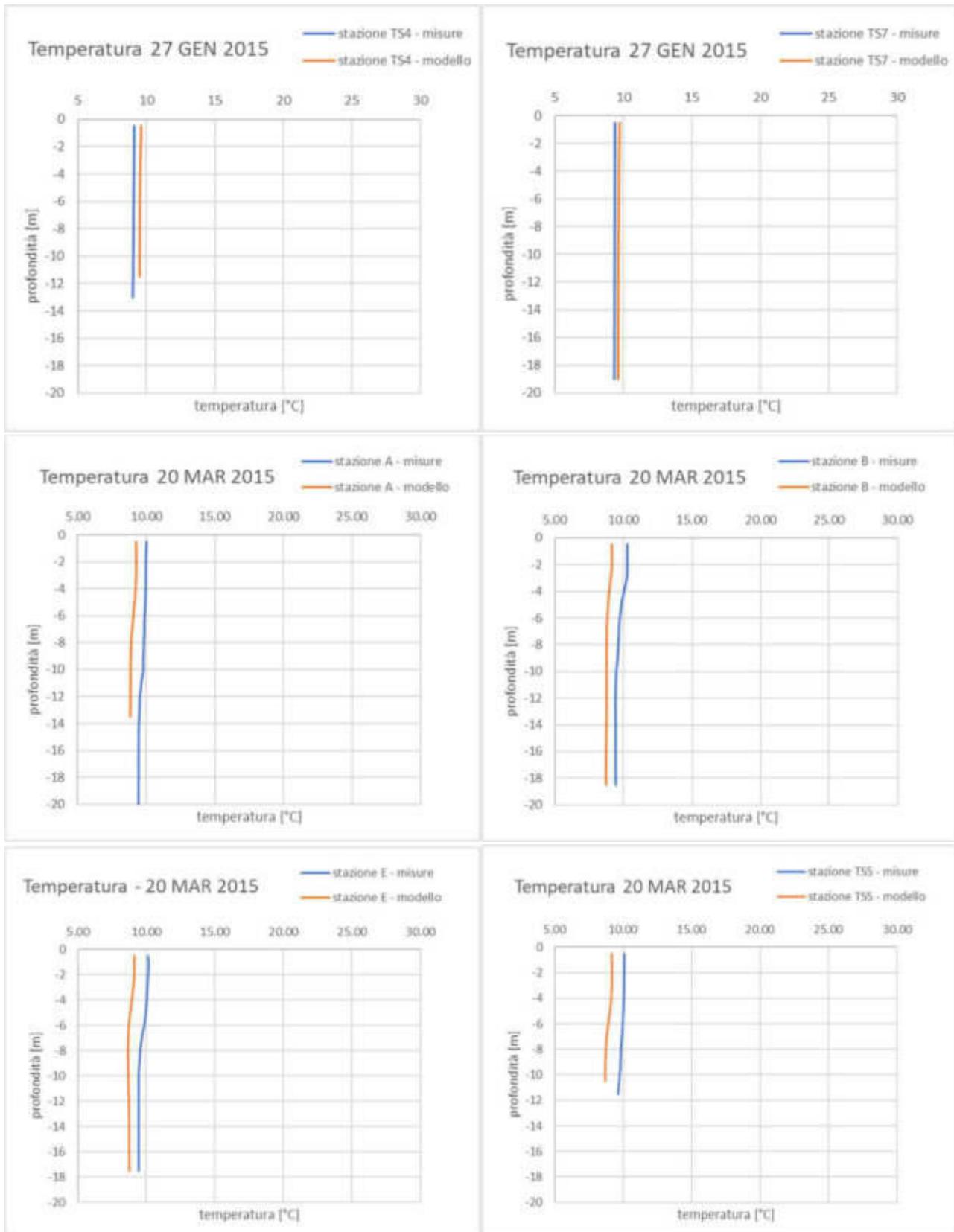


Figura 6-18 Confronto dei profili di temperatura misurati in 10 stazioni (Figura 3-10) ed ottenuti tramite l'applicazione del modello MIKE 3 HD per i giorni 27 Gennaio e 20 Marzo 2015

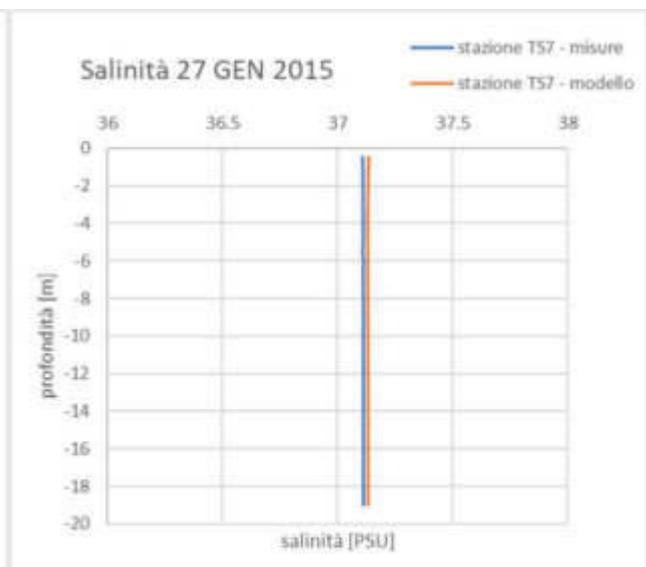
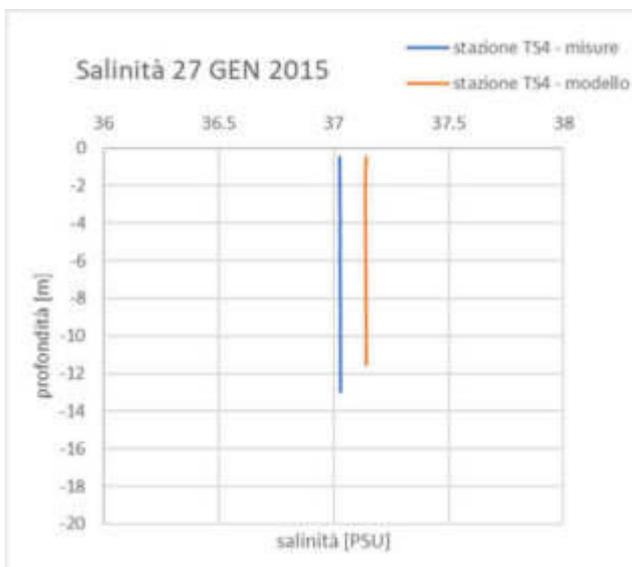
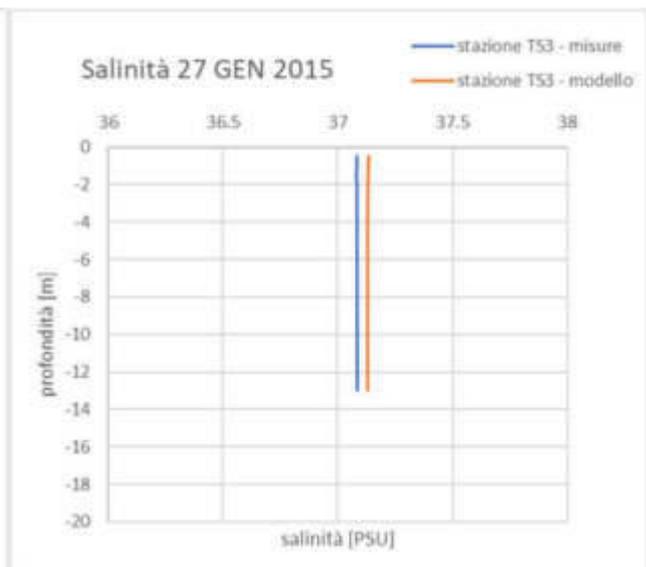
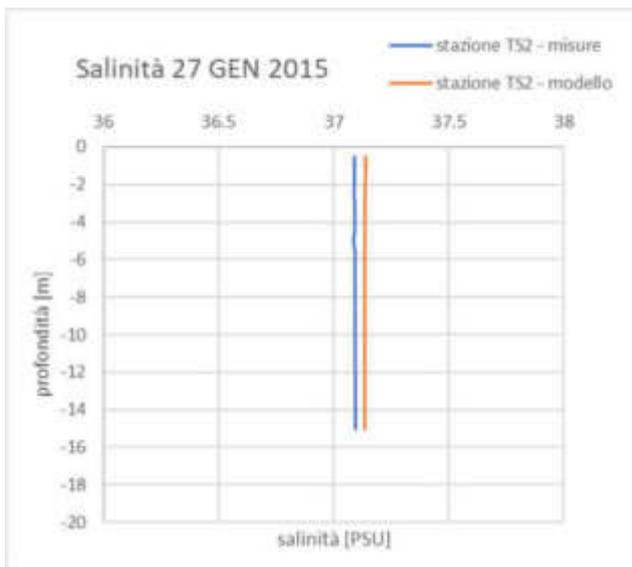
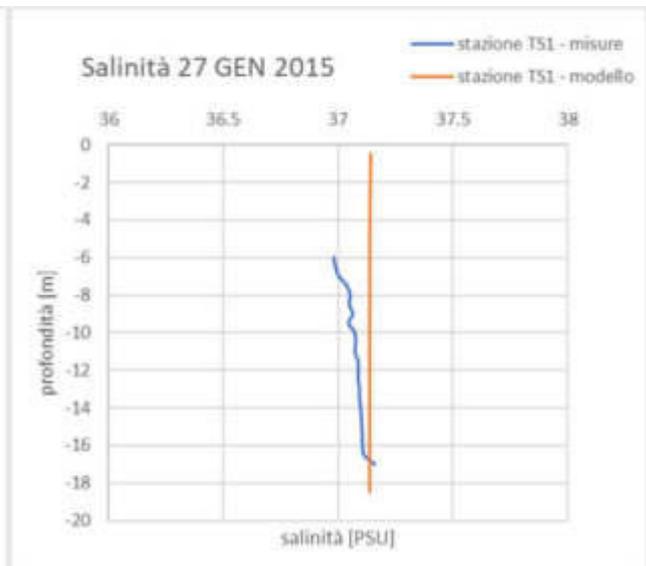




Figura 6-19 Confronto dei profili di salinità misurati in 10 stazioni (Figura 3-10) ed ottenuti tramite l'applicazione del modello MIKE 3 HD per i giorni 27 Gennaio e 20 Marzo 2015

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 90 di 157
--	--	-------------------

7 ATTIVITÀ MODELLISTICHE A SUPPORTO DELLA QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'OPERA IN FASE DI ESERCIZIO

L'obiettivo delle attività modellistiche descritte in questa sezione è la quantificazione degli effetti della nuova infrastruttura sull'idrodinamica che si istaura all'interno del bacino di Muggia e, quindi, indirettamente, sulla qualità delle acque. La qualità delle acque interne ai bacini naturali o portuali è infatti strettamente collegata alla circolazione idrica interna: una buona circolazione, indotta dalla marea o da particolari condizioni meteomarine, favorisce il ricambio idrico delle acque, disperdendo rapidamente eventuali inquinanti presenti all'interno del bacino.

In generale, gli studi di circolazione sono fortemente influenzati dalla scelta delle forzanti che contribuiscono alla definizione dell'idrodinamica locale. Quelle che svolgono un ruolo rilevante nelle dinamiche di circolazione idrica sono essenzialmente quattro: vento, circolazione generale a più ampia scala, marea e moto ondoso. Nel caso specifico si è assunto di non considerare il moto ondoso in quanto il bacino di Muggia, parzialmente chiuso dalla tre dighe, risulta ben protetto dalle onde incidenti e l'idrodinamica da essa indotta risulta generalmente trascurabile, come illustrato nella sezione 5. D'altra parte, tale scelta si pone a vantaggio di sicurezza in considerazione del fatto che le onde, nella fascia dei frangenti, generano correnti litoranee in grado di disperdere più rapidamente le sostanze eventualmente presenti in mare.

Come verrà meglio dettagliato nella sezione 7.2, nel presente studio il modello numerico viene applicato per simulare due periodi reali, caratterizzati da condizioni dinamiche tempo-varianti rappresentative delle configurazioni tipiche della circolazione nel tratto di mare considerato.

Per poter quantificare l'influenza della nuova infrastruttura portuale sulla circolazione interna alla baia di Muggia, attraverso la predisposizione di un modello numerico tridimensionale di avvezione-dispersione sono stati stimati i tempi di abbattimento di un ipotetico tracciante immesso inizialmente in un volume d'acqua all'interno del bacino portuale. Come descritto nella sezione 7.4, il modello di avvezione-dispersione è stato dinamicamente accoppiato al modello idrodinamico secondo un approccio a "finestre mobili", con simulazioni della durata di 15 giorni, ma sfasate tra loro di 24 ore, al fine di coprire l'intero mese preso a riferimento.

7.1 Configurazione progettuale di riferimento

Al fine di individuare gli effetti dell'infrastruttura (in particolare dei pali di fondazione, gli unici elementi in grado di interagire con l'idrodinamica locale), le simulazioni sono state eseguite sia nella configurazione attuale, sia in quella di progetto (presenza dei pali). Per la configurazione progettuale si è fatto riferimento, su indicazione della Committenza, ad un layout "cautelativo", che prevede un numero di pali riferito all'inviluppo di più layout progettuali ad oggi individuati. In Figura 7-1 è mostrato l'ingombro del Molo VIII e la relativa disposizione dei pali, come considerati nel presente studio.

Il numero complessivo di pali considerati è pari a oltre 4'000 ed il loro ingombro è stato modellato mediante la specifica funzione "Structures - Piers" di MIKE 3, che prevede la possibilità di considerare la presenza dell'opera, attraverso opportune parametrizzazioni, anche quando

(come nel caso in esame) la sua sezione risulta significativamente inferiore all'area della singola cella di calcolo.

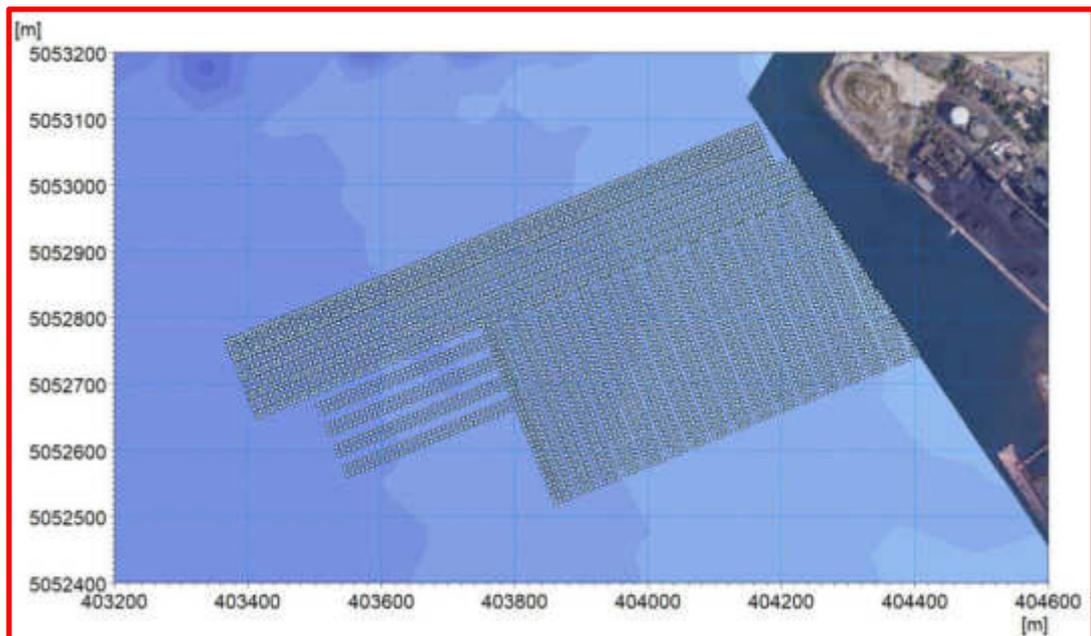


Figura 7-1 Configurazione progettuale del Molo VIII considerata per il presente studio, derivata dall'involuppo di vari layout ad oggi individuati

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 92 di 157
--	--	-------------------

7.2 Selezione dello scenario di simulazione

Le simulazioni effettuate fanno riferimento a due periodi reali, caratterizzati da condizioni dinamiche tempo-varianti, rappresentative della circolazione tipica per il tratto di mare considerato. Ciascuna finestra temporale fa riferimento ad un periodo reale medio-lungo, pari a 30 giorni, con lo scopo di riprodurre in dettaglio la variabilità infra e intra-giornaliera in due distinti periodi dell'anno:

- invernale, caratterizzato da un elevato idrodinamismo (combinazione dell'effetto di circolazione generale, marea e vento), che favorisce il ricambio idrico, e da una colonna d'acqua completamente rimescolata;
- estivo, caratterizzato da uno scarso idrodinamismo (combinazione dell'effetto di circolazione generale, marea e vento) e da una significativa stratificazione termica della colonna d'acqua.

Per la selezione dei due mesi da simulare (a partire dalla simulazione idrodinamica dell'intero anno illustrata nella sezione 6), in considerazione del ruolo preponderante che in una baia così chiusa come quella di Muggia la forzante "vento" esercita sull'idrodinamica locale, è stata effettuata un'analisi dei dati anemometrici della stazione meteo di ARPA FVG "Molo Fratelli Bandiera" (sezione 3.6).

La selezione dei mesi di riferimento per la modellazione è stata effettuata analizzando preventivamente i valori medi delle intensità del vento su base mensile (Tabella 7-1). Da questa analisi è stato possibile identificare due mesi rappresentativi: il mese di Febbraio 2015, caratterizzato dal valore medio di intensità del vento più alto, ed il mese di Agosto 2015 caratterizzato dal valore medio di intensità del vento più basso. Inoltre, tali mesi sono ben rappresentativi per la stagione invernale (Febbraio 2015, assenza di stratificazione della colonna d'acqua) e per quella estiva (Agosto 2015, significativa stratificazione della colonna).

Tabella 7-1 Valori di velocità media del vento su base mensile per l'anno 2014-2015 derivati dalla stazione meteo di ARPA FVG

Mesi	Velocità media del vento [m/s]
GENNAIO	3.0
FEBBRAIO	6.4
MARZO	4.6
APRILE	3.8
MAGGIO	4.0
GIUGNO	3.8
LUGLIO	3.9
AGOSTO	3.3
SETTEMBRE	4.0
OTTOBRE	4.0
NOVEMBRE	4.1
DICEMBRE	5.2

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 93 di 157
--	--	-------------------

7.3 Modello idrodinamico

Come riportato nella precedente sezione 7.2, le simulazioni funzionali alla quantificazione degli effetti dei pali di fondazione della nuova infrastruttura sull'idrodinamica ed il ricambio idrico della baia di Muggia fanno riferimento ai mesi di Febbraio 2015 ed Agosto 2015.

Per quanto riguarda la configurazione attuale, i campi idrodinamici sono stati desunti direttamente dal modello di lungo periodo descritto alla sezione 6. Relativamente alla configurazione di progetto, che vede l'inserimento dei pali, il modello idrodinamico è stato implementato in riferimento ai due mesi di Febbraio e Agosto 2015. In questo caso le condizioni iniziali sono state estratte dal modello di lungo periodo, mentre sono rimasti invariati il dominio di calcolo (descritto in sezione 4), le condizioni al contorno e le forzanti (descritte in sezione 6.1).

I risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello idrodinamico in presenza ed in assenza dei pali mostrano una completa analogia della circolazione nelle due configurazioni, con variazioni in termini di velocità esclusivamente in corrispondenza dell'infrastruttura.

Nelle immagini a seguire si riportano alcune mappe che mostrano i campi idrodinamici in una serie di istanti temporali rappresentativi, durante il mese invernale e quello estivo, selezionati in modo da comprendere sia casi in cui la corrente nella zona dell'infrastruttura sia diretta verso Nord-Ovest (Figura 7-2 e Figura 7-3 per Febbraio, Figura 7-8 e Figura 7-9 per Agosto), sia verso Sud-Est (Figura 7-4 e Figura 7-5 per Febbraio, Figura 7-10 e Figura 7-11 per Agosto) e verso Sud-Ovest (Figura 7-6 e Figura 7-7 per Febbraio, Figura 7-12 e Figura 7-13 per Agosto).

Le mappe, rappresentate per il solo strato superficiale, nel quale le correnti sono più intense e, pertanto, l'effetto della presenza dei pali si può apprezzare maggiormente, mostrano che la corrente subisce un localizzato rallentamento dovuto alla presenza dei pali. In corrispondenza dell'infrastruttura si riscontrano pertanto diminuzioni delle intensità che, in caso di corrente diretta verso Sud-Ovest, sono del tutto trascurabili. In questo caso, infatti, la corrente si è appena formata e l'impatto della struttura è minimo.

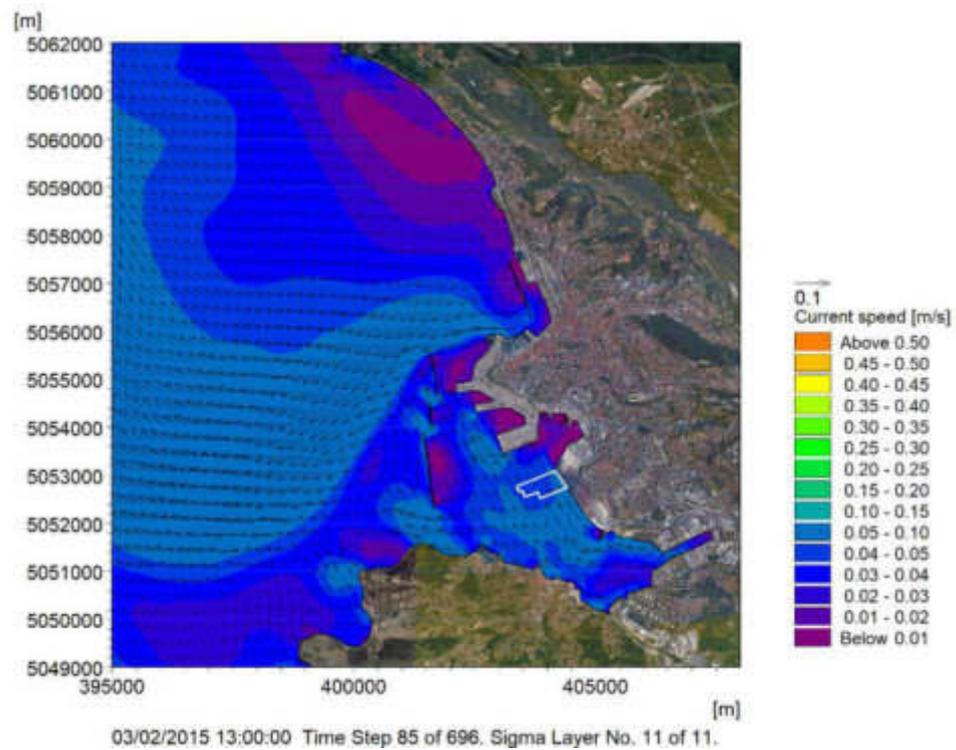


Figura 7-2 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

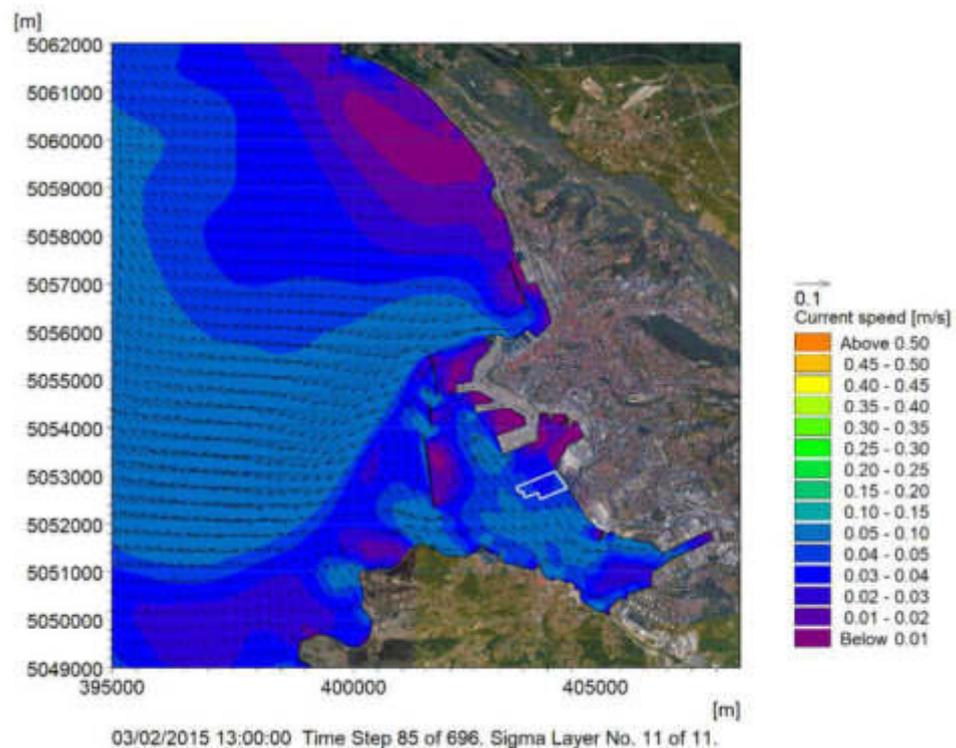


Figura 7-3 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

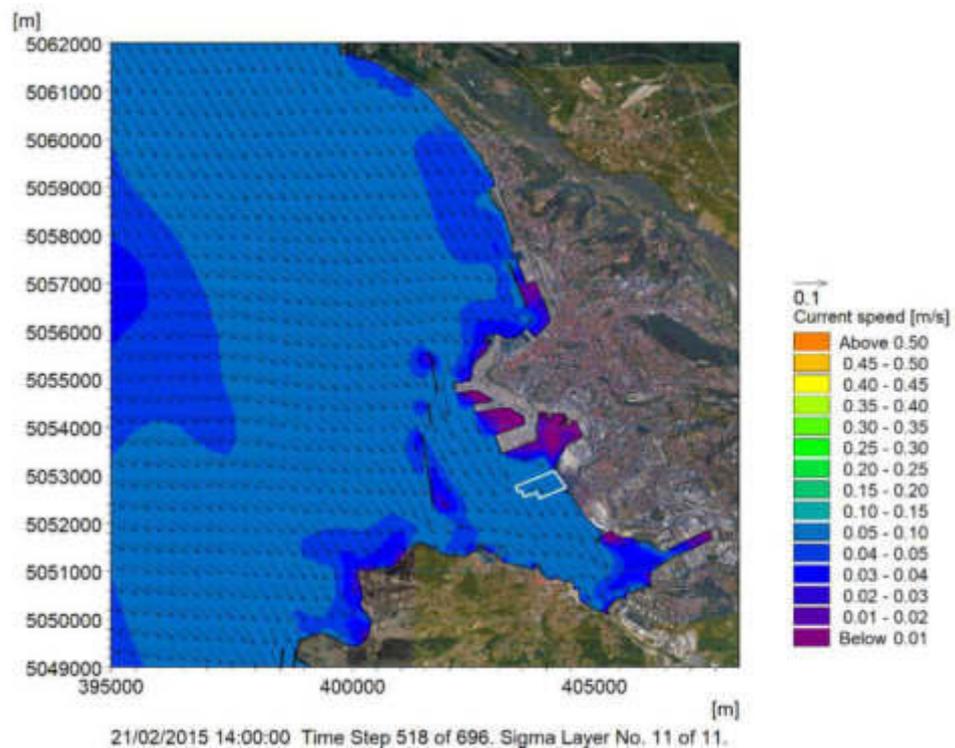


Figura 7-4 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

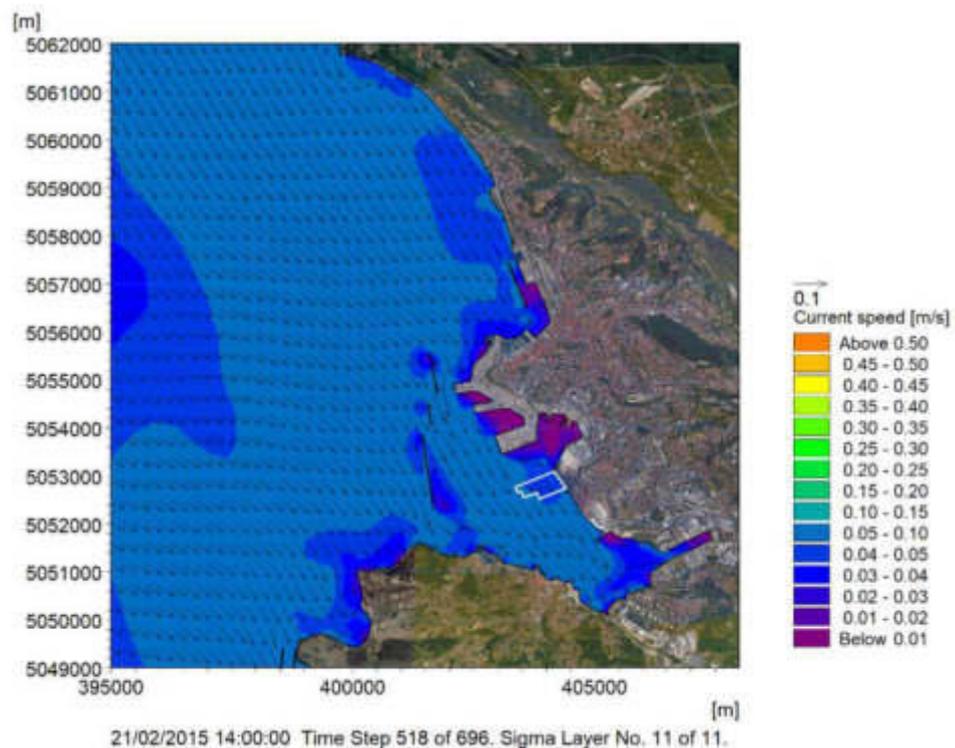


Figura 7-5 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

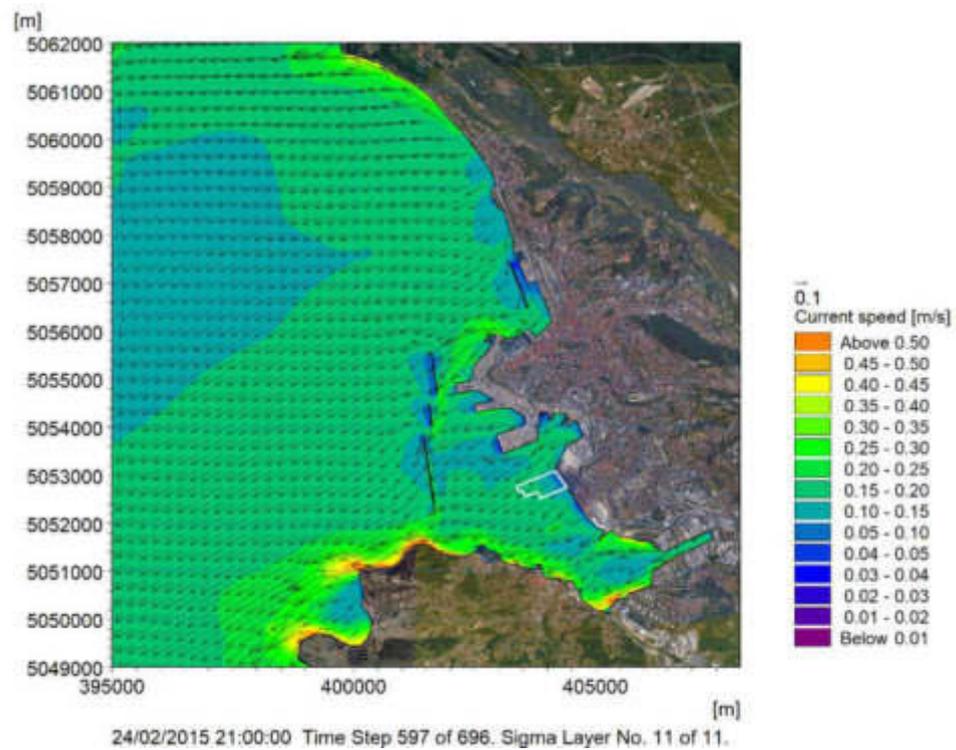


Figura 7-6 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

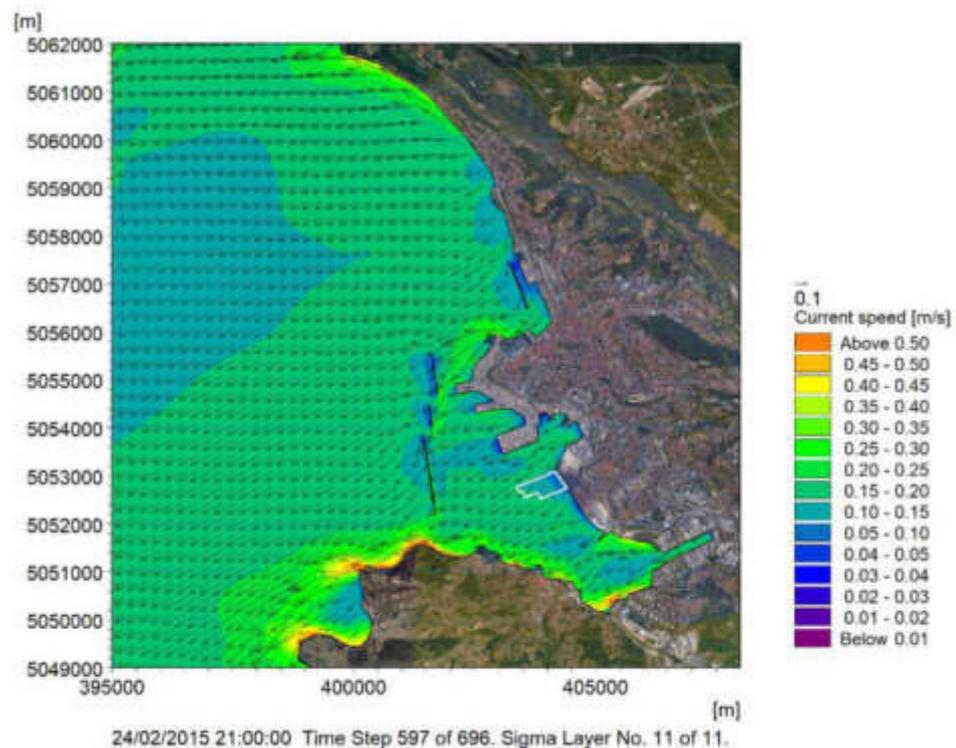


Figura 7-7 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Febbraio in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

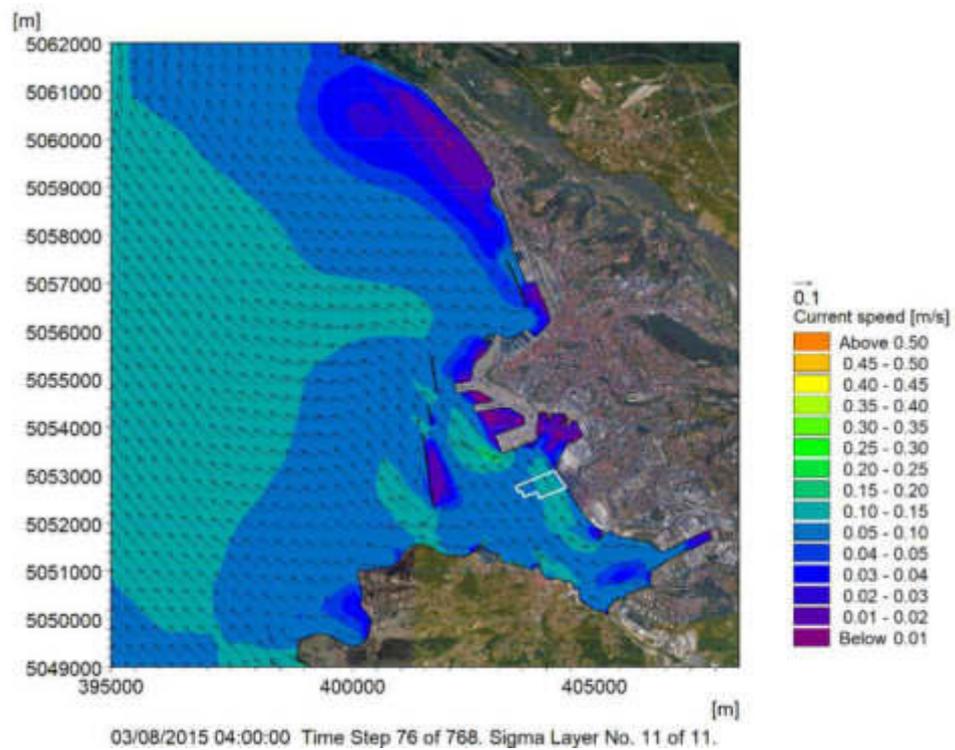


Figura 7-8 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

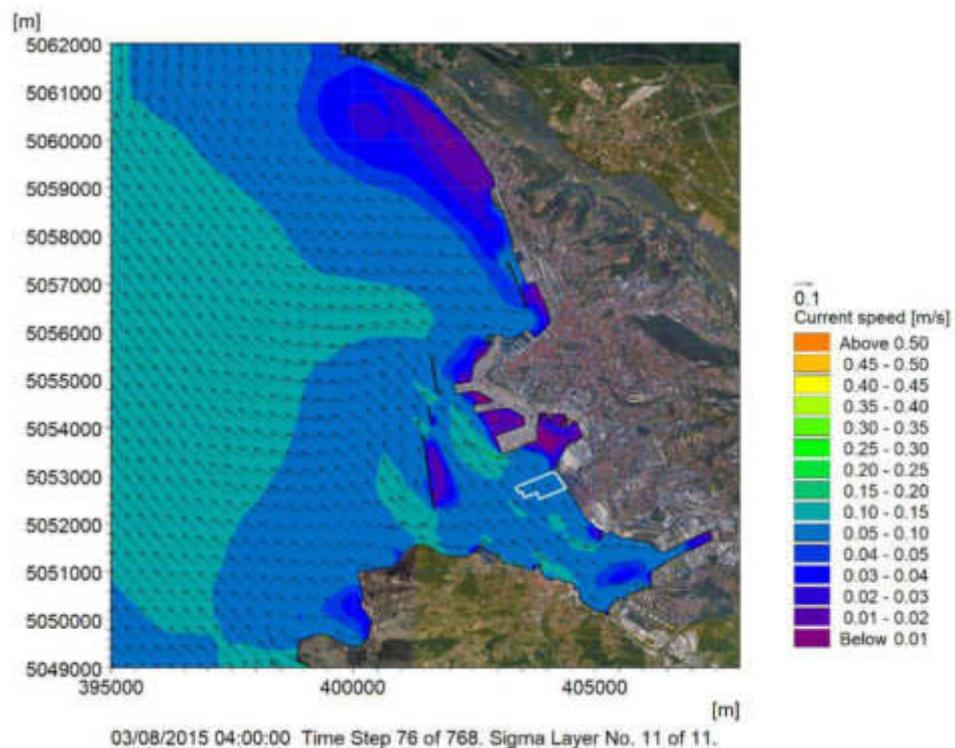


Figura 7-9 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Nord-Ovest)

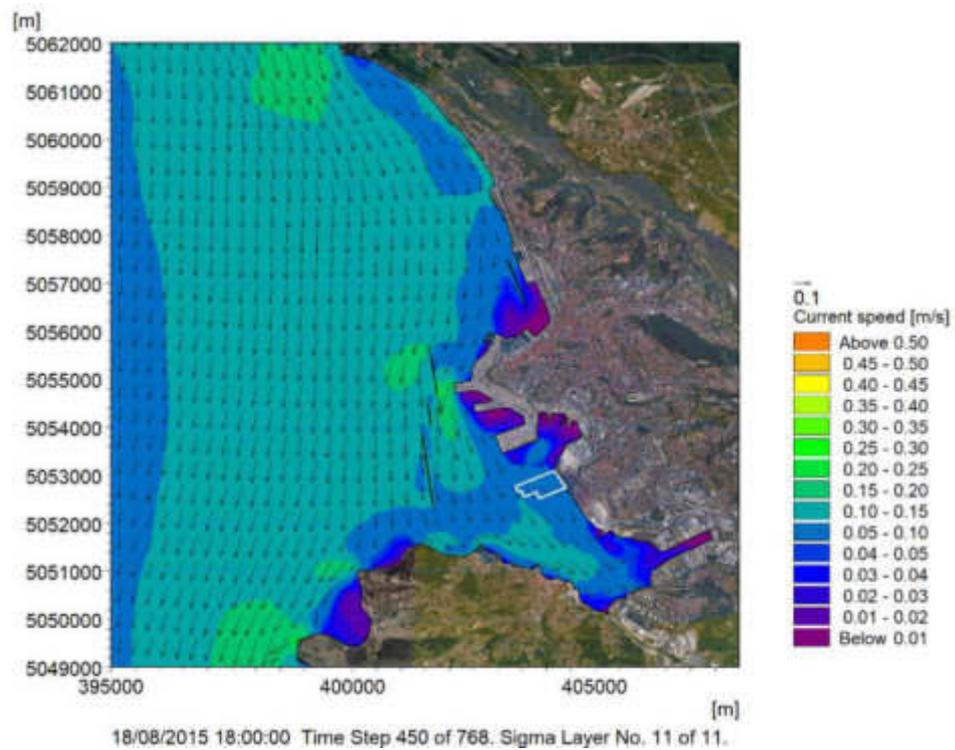


Figura 7-10 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

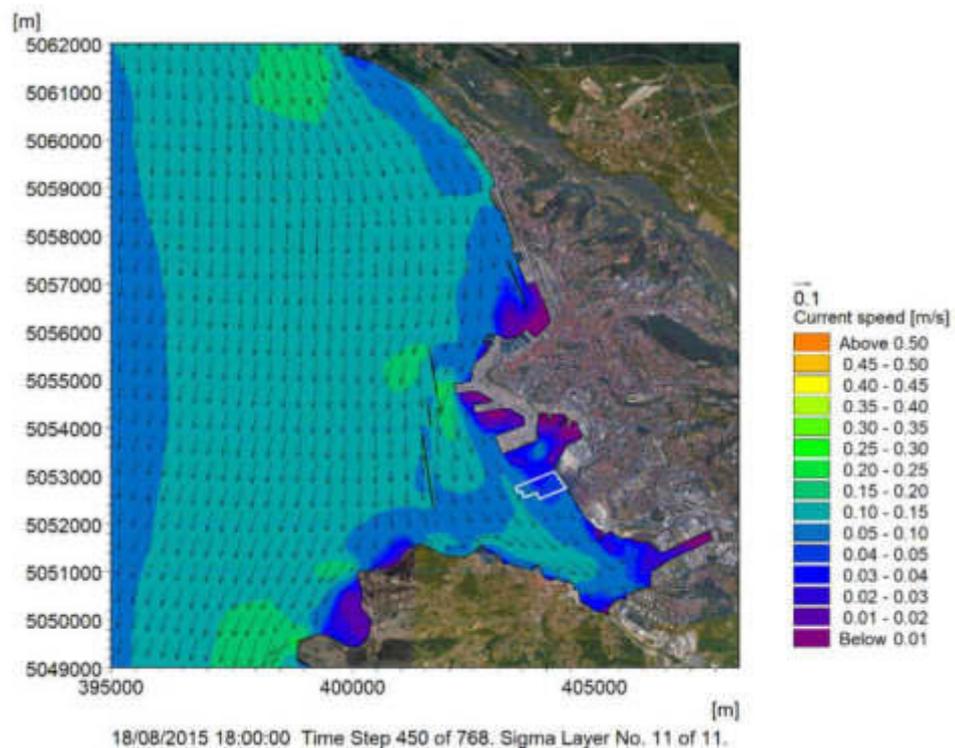


Figura 7-11 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Est)

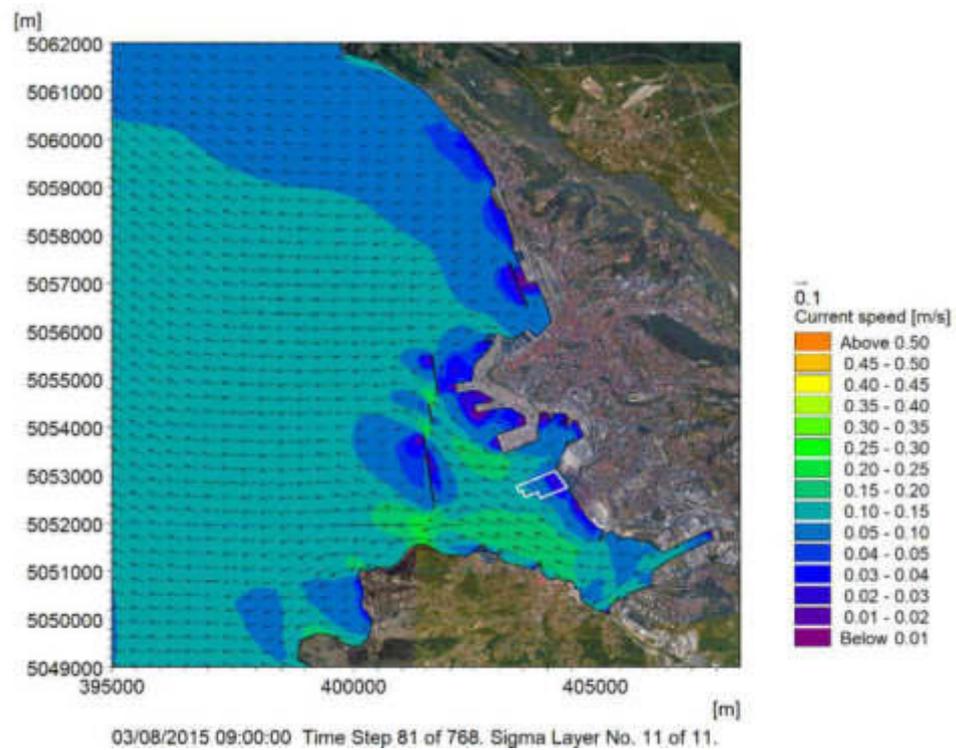


Figura 7-12 Campo idrodinamico in superficie in assenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

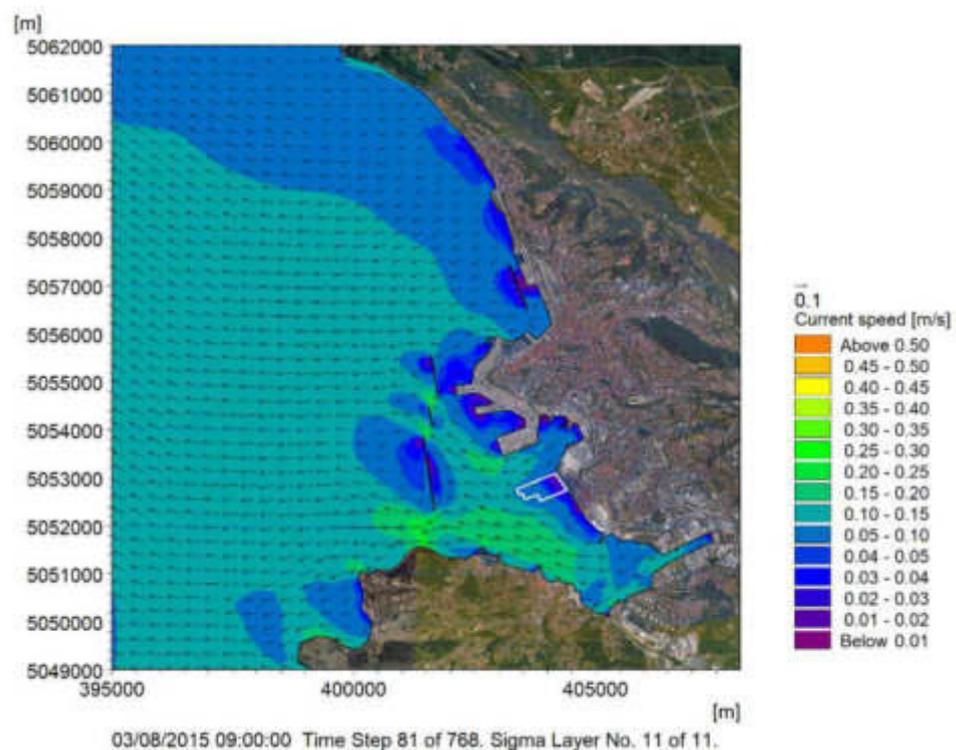


Figura 7-13 Campo idrodinamico in superficie in presenza dei pali (istante temporale durante il mese di Agosto in cui la corrente in superficie in corrispondenza del Molo VIII è diretta verso Sud-Ovest)

Per comprendere meglio l'impatto della struttura sulla circolazione sono state rappresentate le rose di corrente in superficie per i due periodi simulati (Febbraio 2015 ed Agosto 2015), in presenza ed in assenza dei pali. Queste rose sono state rappresentate in due punti posti in prossimità dell'infrastruttura, a circa 200 m a Nord ed a Sud di essa, come mostrato in Figura 7-14.

Le rose (da Figura 7-15 a Figura 7-18) mostrano variazioni modeste della corrente, in termini sia di direzione che di intensità, in presenza ed in assenza dei pali: nella configurazione in presenza dei pali, la condizione di calma, qui rappresentata per velocità inferiori a 1 cm/s, ha una frequenza maggiore (di circa l'1-2%) e, analogamente, le correnti caratterizzate dalle maggiori velocità hanno una frequenza minore. Da questi risultati si evince che le correnti tendono a rallentare e a ruotare di qualche grado quando incontrano l'infrastruttura, ma tali variazioni sono assai localizzate.

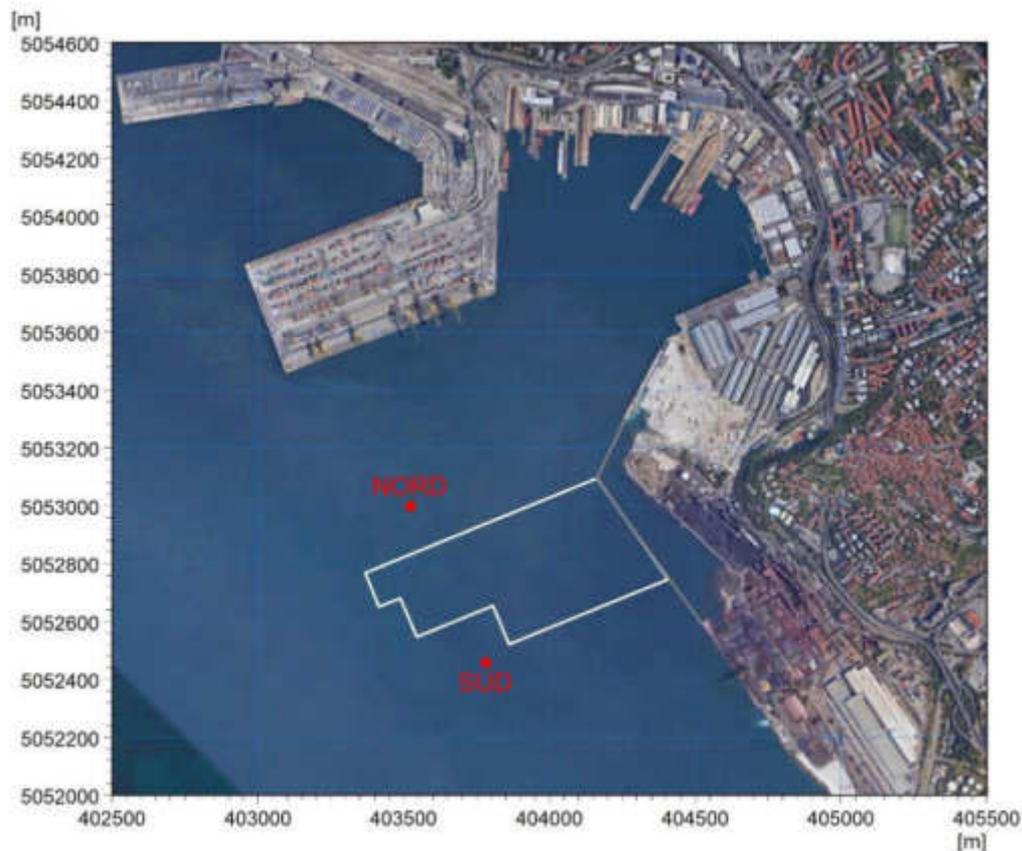


Figura 7-14 Indicazione dei due punti di estrazione delle condizioni di corrente per la rappresentazione delle rose in presenza ed in assenza dei pali del Molo VIII

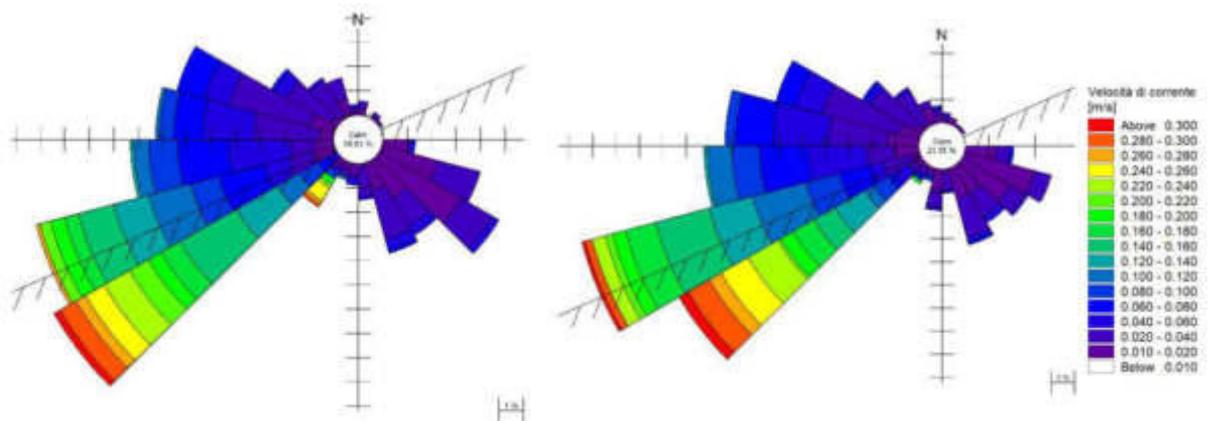


Figura 7-15 Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Nord dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Febbraio, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")

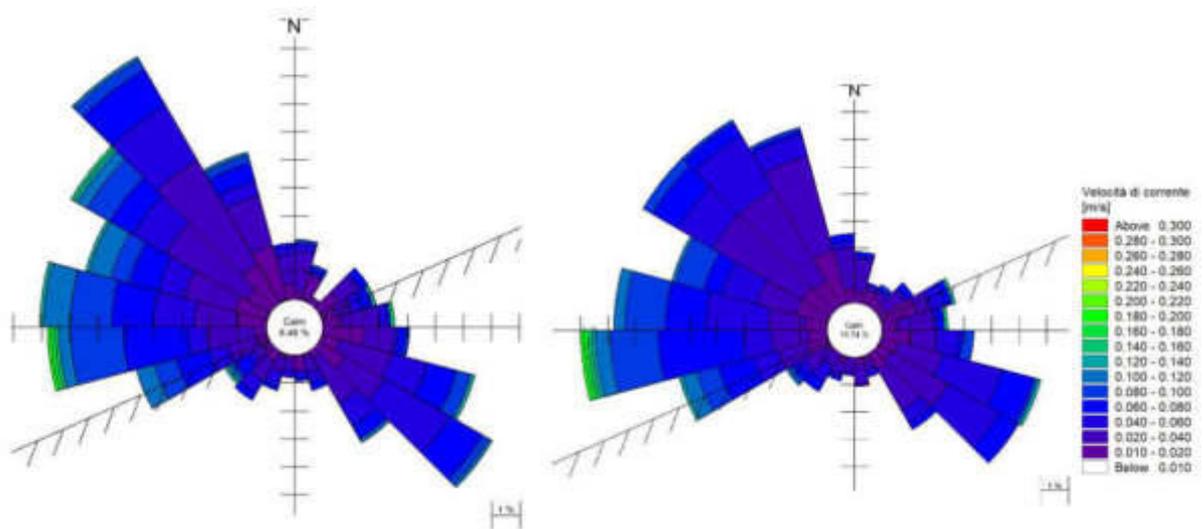


Figura 7-16 Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Nord dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Agosto, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")

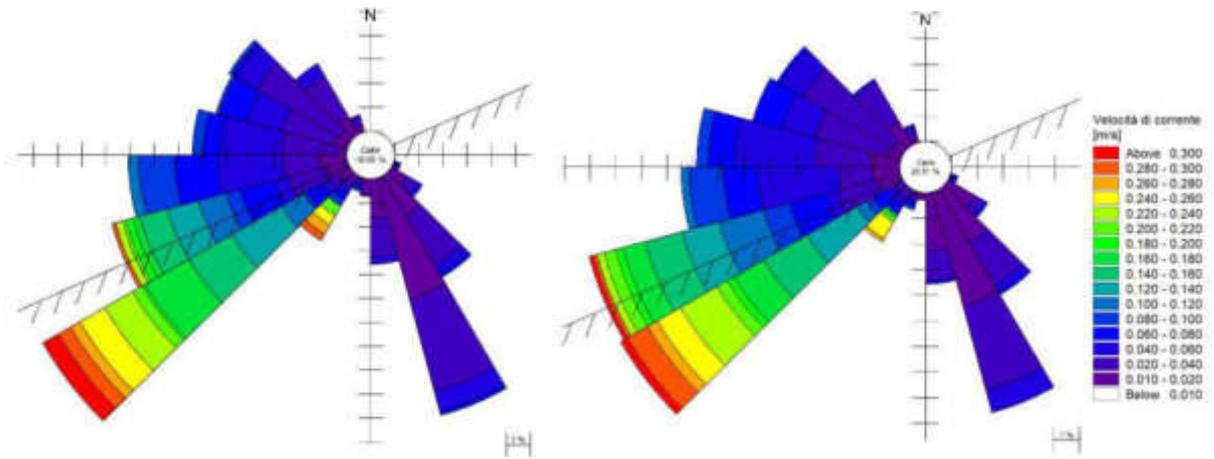


Figura 7-17 Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Sud dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Febbraio, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")

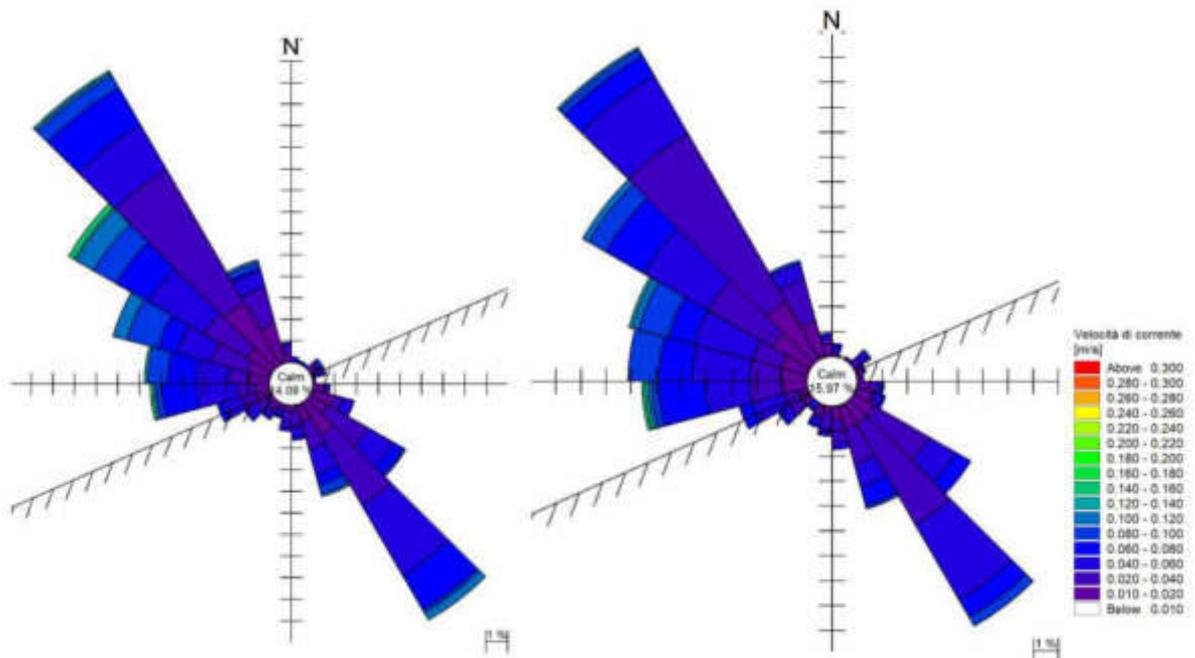


Figura 7-18 Rose di corrente in superficie relative al punto localizzato a Sud dell'infrastruttura (Figura 7-14) per il mese di Agosto, in assenza (a sinistra) ed in presenza (a destra) dei pali (direzione "verso")

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 103 di 157
--	--	--------------------

7.4 Modello di avvezione-dispersione per la quantificazione del ricambio idrico

Le simulazioni del ricambio idrico della baia di Muggia nelle due configurazioni (presenza ed assenza dei pali) sono state predisposte avvalendosi di un modello di avvezione-dispersione, ipotizzando l'iniziale presenza nel dominio di una predefinita concentrazione di un tracciante per la porzione di bacino per la quale si vuole quantificare i tempi di ricambio. Il modello utilizzato è il MIKE 3 AD – *Advection-Dispersion* [26] accoppiato dinamicamente al modello idrodinamico MIKE 3 HD [24].

Il modulo MIKE 3 AD simula il comportamento di sostanze in sospensione o disciolte in acqua per effetto del flusso idrodinamico (avvezione) e dei processi di dispersione (inibiti nel caso specifico). Le sostanze simulate sono essenzialmente conservative, ma può essere applicato anche un decadimento di primo ordine. Il modulo di avvezione/dispersione può essere applicato ad un'ampia gamma di fenomeni idraulici. Le aree di applicazione sono generalmente legate all'idrodinamica ed al trasporto di sostanze disciolte, simulazioni di traccianti, studi di ricircolo di bacini portuali e studi di qualità delle acque in generale. Il sistema modellistico del modulo AD è basato sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes valide per fluidi incomprimibili e soggette all'assunzione di Boussinesq ed alla pressione idrostatica.

La descrizione dettagliata del modello MIKE 3 AD è riportata nell'Allegato D al presente documento.

Come precedentemente accennato, la stima dei tempi di ricambio idrico viene effettuata al fine di quantificare l'influenza della nuova struttura (in particolare dei pali di fondazione) sulla circolazione locale. In particolare, viene analizzata la dispersione di un tracciante posto inizialmente ad una concentrazione pari a 100 all'interno della zona di interesse: il ricambio di tale volume d'acqua è totale quando la concentrazione del tracciante è ovunque nulla. Il valore di concentrazione del tracciante viene posto pari a 100 al fine di ricavare in maniera immediata la percentuale di ricambio idrico nel tempo: al primo istante temporale, quando la concentrazione è pari a 100, lo 0% del volume d'acqua è stato ricambiato. Al passare del tempo il tracciante viene gradualmente trasportato verso l'esterno del bacino, la concentrazione all'interno del volume di controllo diminuisce nel tempo e, di conseguenza, il ricambio aumenta gradualmente fino ad essere totale (pari al 100%), ossia fino alla completa scomparsa del tracciante (concentrazione nulla).

Il modello di ricambio è stato applicato sia in riferimento all'intera baia di Muggia, sia al solo bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami, posto a Nord del futuro Molo VIII, bacino la cui idrodinamica sarà maggiormente interessata dalla presenza della nuova infrastruttura. La condizione iniziale applicata ai due volumi di controllo è mostrata in Figura 7-19: in arancione è rappresentata una concentrazione iniziale di tracciante pari a 100, mentre nelle aree in bianco la concentrazione iniziale di tracciante è nulla.

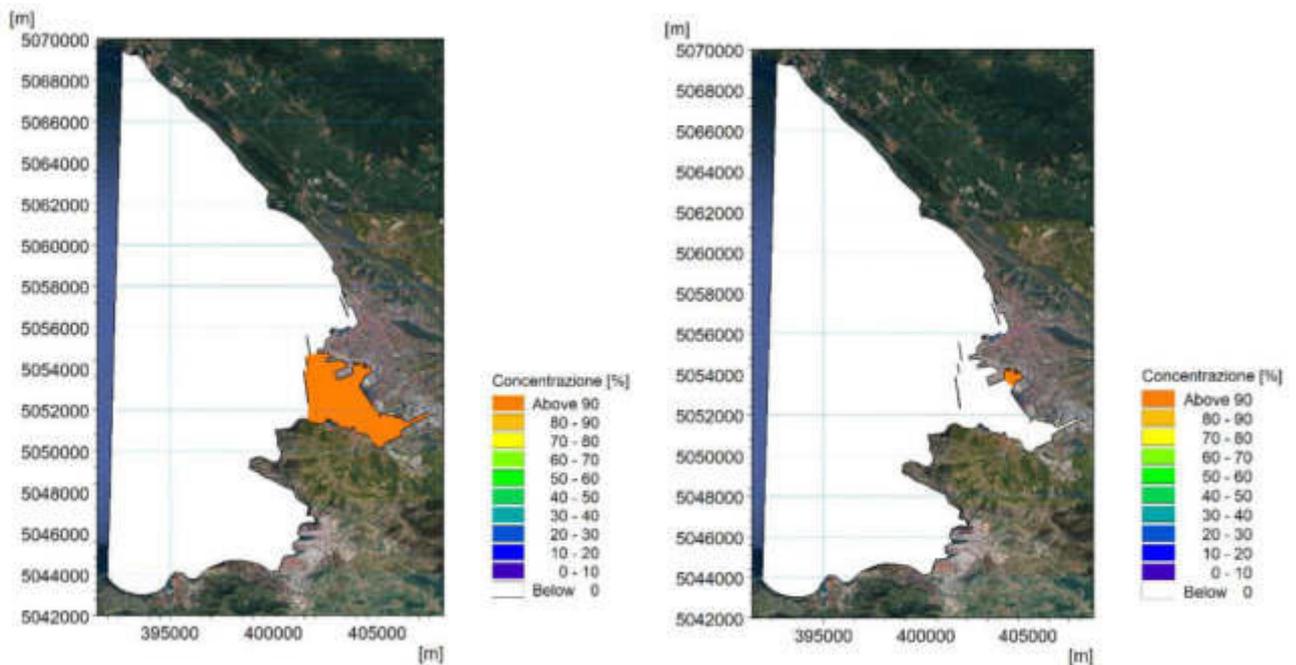


Figura 7-19 Condizione iniziale del modello di avvezione-dispersione: in arancione sono evidenziati i volumi di controllo posti a concentrazione iniziale pari a 100 (intero bacino di Muggia a sinistra e bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami a destra)

Al fine di svincolare il più possibile il risultato del tempo di ricambio dalla reale variabilità e successione delle condizioni idrodinamiche, le simulazioni del modello di avvezione-dispersione hanno seguito un approccio "a finestra mobile": sono state infatti predisposte un totale di 30 simulazioni (15 per il mese estivo e 15 per quello invernale) combinate idrodinamica-trasporto, ognuna della durata di 15 giorni e sfasate tra loro di 24 ore, al fine di coprire l'intero mese preso a riferimento. Ognuna delle 30 simulazioni è caratterizzata da una concentrazione iniziale di tracciante pari a 100 nei due volumi di controllo.

Il confronto delle curve di ricambio (ottenute dall'andamento temporale della concentrazione del tracciante nei volumi di controllo in presenza ed in assenza dei pali) ha permesso di valutare l'entità dell'impatto dell'opera sulla circolazione ed il ricambio idrico.

7.5 Risultati del modello di avvezione-dispersione per la quantificazione del ricambio idrico

Il modello di avvezione e dispersione fornisce come risultati mappe tridimensionali tempo-varianti che restituiscono, in ogni punto del dominio di calcolo, la concentrazione dell'ipotetico tracciante. Poiché all'istante iniziale la concentrazione del tracciante è stata posta pari a 100, i risultati possono anche essere interpretati direttamente come percentuale di concentrazione rispetto a quella iniziale o, all'inverso, come percentuale di diluizione. Vista la metodologia di lavoro seguita, si è ottenuto un numero elevato di mappe: 15 per ciascuno scenario idrodinamico, ognuna della durata di 15 giorni (con time step orario), ognuna riferita ad 11 strati (layers) lungo la colonna d'acqua. In Figura 7-20 è rappresentato un esempio di risultato, in superficie, ad un generico istante di simulazione.

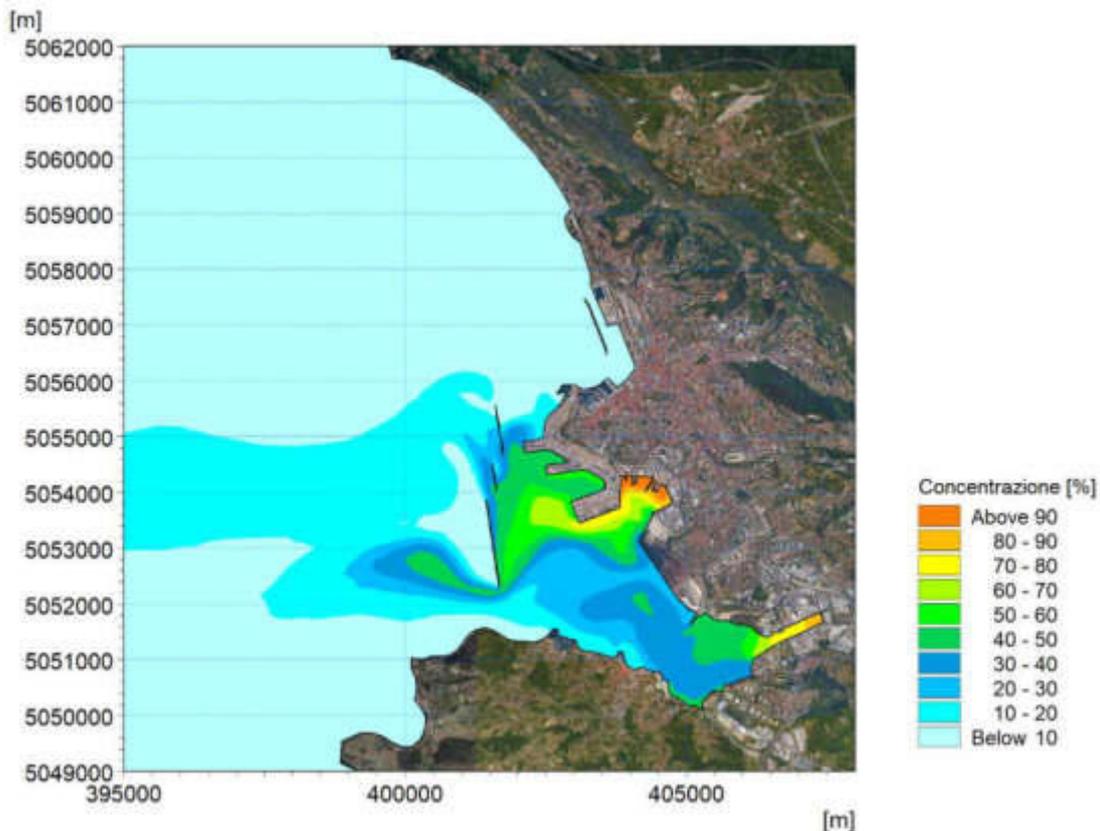


Figura 7-20 Esempio di mappa di distribuzione della percentuale di concentrazione di un ipotetico tracciante

Al fine di quantificare in modo più semplice ed immediato l'effetto della presenza dei pali sulla circolazione nella baia è stata ricavata la curva di ricambio idrico in riferimento ai due volumi di controllo (intera Baia di Muggia, zona arancione in Figura 7-19, a sinistra, bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami, zona arancione in Figura 7-19, a destra).

Nello specifico, sono state calcolate un totale di 120 curve (15 curve mensili x 8 condizioni: assenza e presenza dei pali di fondazione della nuova infrastruttura; due volumi di controllo; mese

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 106 di 157
--	--	--------------------

invernale e mese estivo). I valori relativi alle 15 curve rappresentative di una stessa condizione sono stati tra loro mediati ottenendo pertanto 8 curve, rappresentate nelle immagini a seguire.

Le curve, che mostrano come la percentuale di ricambio idrico aumenta al passare del tempo, mettono in evidenza che:

- alla fine dei 15 giorni di simulazione la percentuale di ricambio del bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami è maggiore rispetto al ricambio dell'intera Baia. Questo è dovuto al fatto che il volume della darsena è molto inferiore a quello della baia e pertanto il suo ricambio è comunque più rapido;
- alla fine dei 15 giorni di simulazione, il ricambio durante il mese di Febbraio è maggiore rispetto al mese di Agosto. Questo perché, in generale, i mesi invernali sono caratterizzati da un maggior idrodinamismo rispetto al periodo estivo;
- alla fine dei 15 giorni di simulazione, durante il periodo estivo, si ha un ricambio di circa l'80% dell'intera baia di Muggia e di quasi il 90% del bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami. Durante il periodo invernale il ricambio è dell'85-90% per la Baia di Muggia e superiore al 95% per la darsena;
- le differenze tra lo stato attuale e quello di progetto sono assai modeste: esse risultano del tutto trascurabili se si fa riferimento al ricambio idrico dell'intera baia per il mese estivo preso a riferimento. Le differenze risultano lievemente superiori, ma comunque molto piccole, sempre inferiori al 3%, se si fa riferimento al bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami (estate e inverno) o al ricambio idrico dell'intera baia per il mese invernale considerato.

I risultati dimostrano pertanto che la presenza dei pali di fondazione dell'impalcato della nuova infrastruttura (stralcio del Molo VIII previsto dal Piano Regolatore Portuale) comporta un impatto trascurabile sulla circolazione generale e, di conseguenza, sui tempi di ricambio dei bacini interessati.

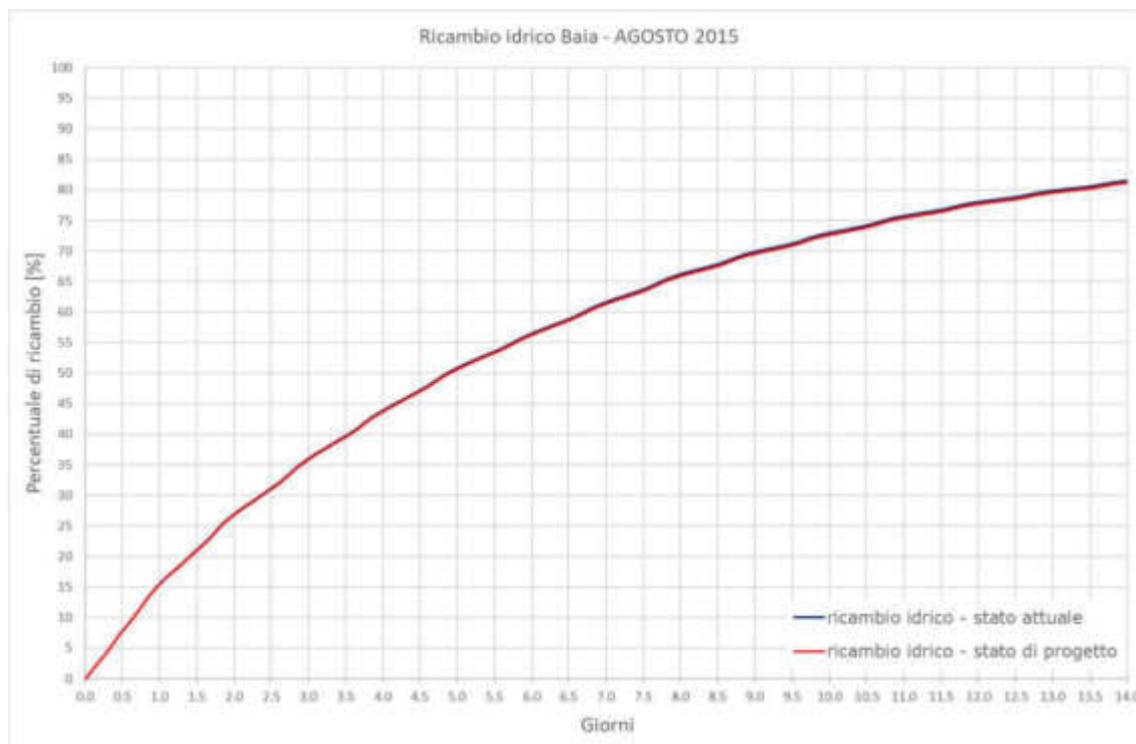


Figura 7-21 Curva del ricambio idrico per l'intera Baia di Muggia nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo estivo (Agosto 2015)

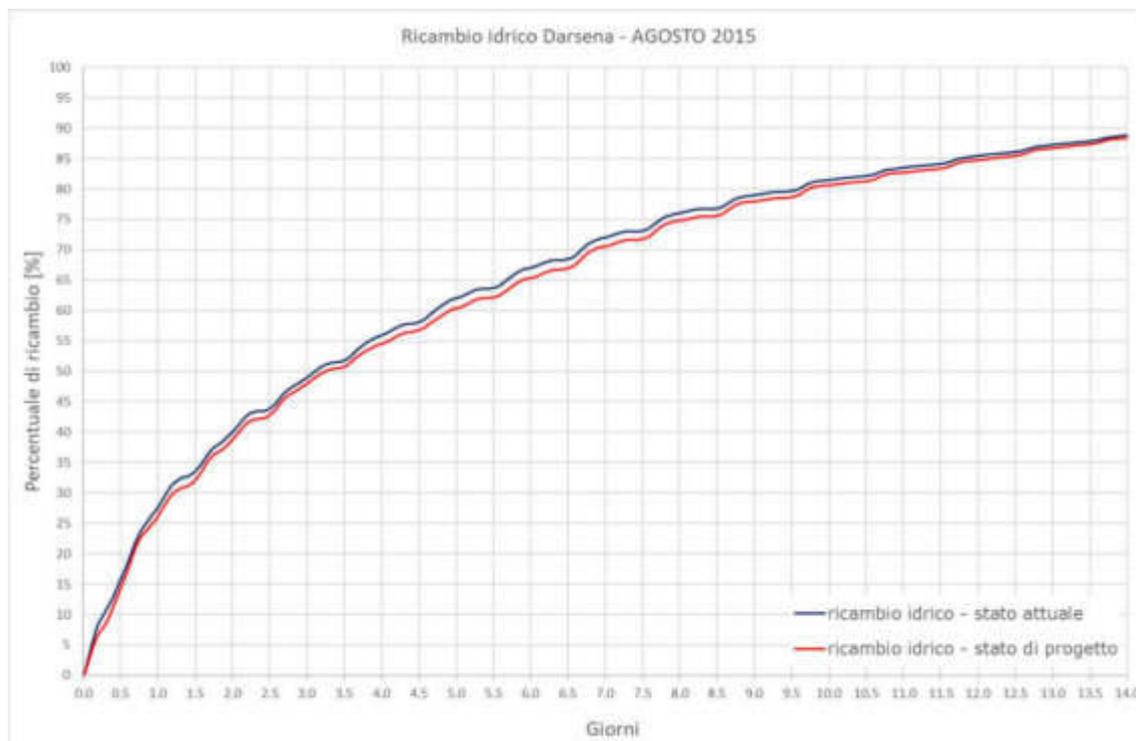


Figura 7-22 Curva del ricambio idrico per la Darsena a Nord del Molo VIII nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo estivo (Agosto 2015)

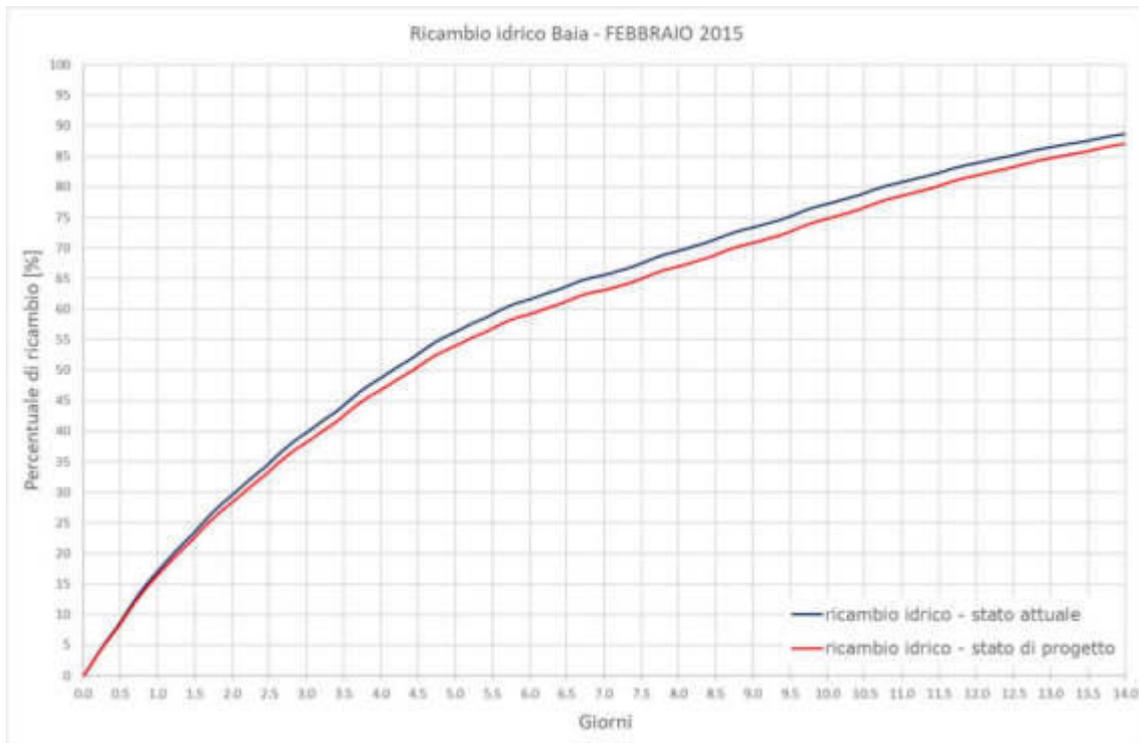


Figura 7-23 Curva del ricambio idrico per l'intera Baia di Muggia nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo invernale (Febbraio 2015)

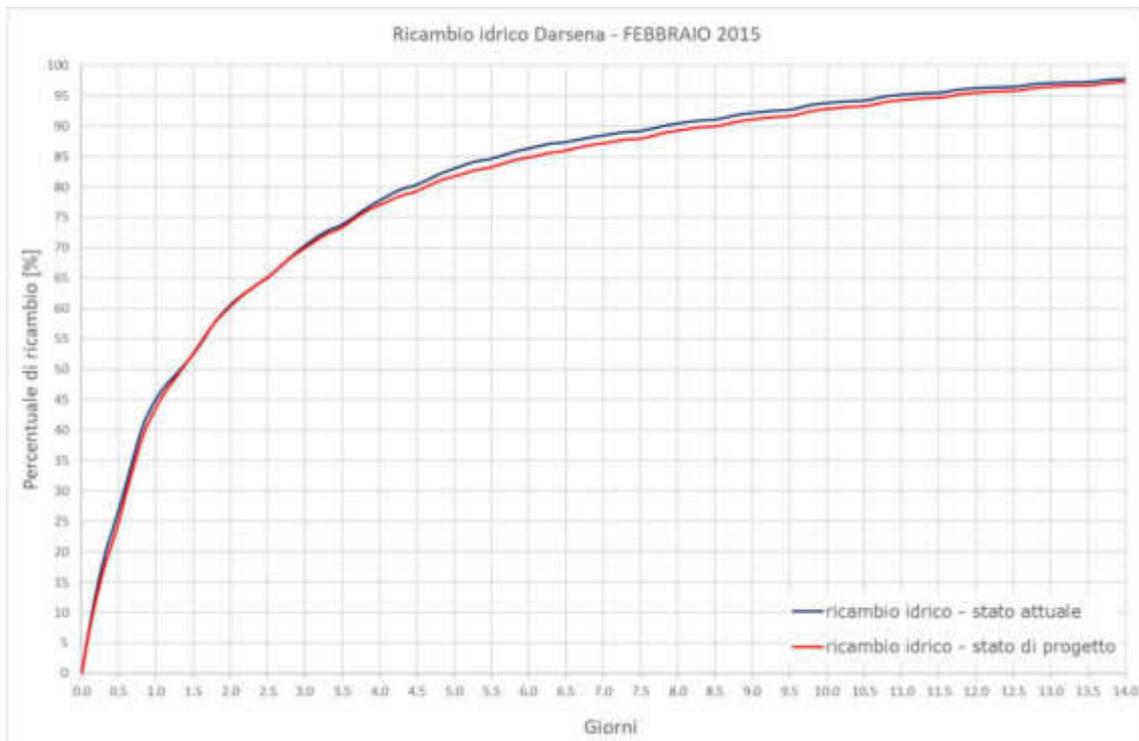


Figura 7-24 Curva del ricambio idrico per la Darsena a Nord del Molo VIII nella configurazione attuale (in blu) ed in quella di progetto (in rosso) per il periodo invernale (Febbraio 2015)

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 109 di 157
--	--	--------------------

8 ATTIVITÀ MODELLISTICHE A SUPPORTO DELLA QUANTIFICAZIONE DEGLI EFFETTI DELL'OPERA IN FASE DI CANTIERE

Per la simulazione dei potenziali impatti determinati dalle operazioni che prevedono la movimentazione dei sedimenti in fase di cantiere, connessi alla realizzazione dei pali e all'escavo del fondale in corrispondenza della nuova banchina prevista sul fronte Nord Ovest del nuovo Molo VIII, il modello idrodinamico è stato dinamicamente accoppiato ad un modello numerico tridimensionale di trasporto di sedimenti fini, finalizzato a quantificare l'incremento di torbidità delle acque marine e l'eccesso di sedimentazione in fase di lavorazione, con particolare riferimento agli effetti sugli habitat marini protetti che si trovano nella baia di Muggia ed immediatamente all'esterno della medesima, come descritto alla sezione 3.1.

In particolare, per la fase di realizzazione dei pali sono stati simulati sia gli effetti dell'escavo all'interno delle "camicie" che ospiteranno i getti di calcestruzzo, sia gli effetti del getto stesso; infine sono stati simulati gli effetti dell'escavo della porzione di fondale, in corrispondenza del nuovo fronte banchinato a Nord Ovest, dove ormeggeranno le navi di più grandi dimensioni

8.1 Modello idrodinamico

Il modello idrodinamico utilizzato per la quantificazione degli effetti della nuova opera in fase di cantiere è quello già descritto alla sezione 6.

8.2 Modello di dispersione dei sedimenti in colonna d'acqua e della deposizione al fondo

Al fine di quantificare l'incremento di torbidità delle acque marine dovuto alle operazioni di movimentazione dei sedimenti in fase di cantiere e l'eccesso di sedimentazione è stato utilizzato il modulo MIKE 3 MT di DHI [27] che, dinamicamente accoppiato al modulo idrodinamico MIKE 3 HD, descrive l'erosione, il trasporto e la deposizione di limi e misture sabbie-limi sotto l'azione di correnti e di onde.

L'applicazione del modulo MT include la simulazione di frazioni multiple di sedimenti e permette di rappresentare i seguenti fenomeni fisici:

- flocculazione, che si attiva per concentrazioni di sedimento coesivo superiori ad una determinata soglia;
- effetti di densità ad alte concentrazioni di sedimento;
- sedimentazione ostacolata (*hindered settling*);
- consolidamento del fondale;
- variazioni morfologiche del fondale;
- aggiornamento continuo della morfologia del fondale.

Nella Figura 8-1 sono illustrati schematicamente i processi simulabili con il modello MIKE 3 MT.

Una descrizione dettagliata del modello MIKE 3 MT è riportata in Allegato E al presente documento.

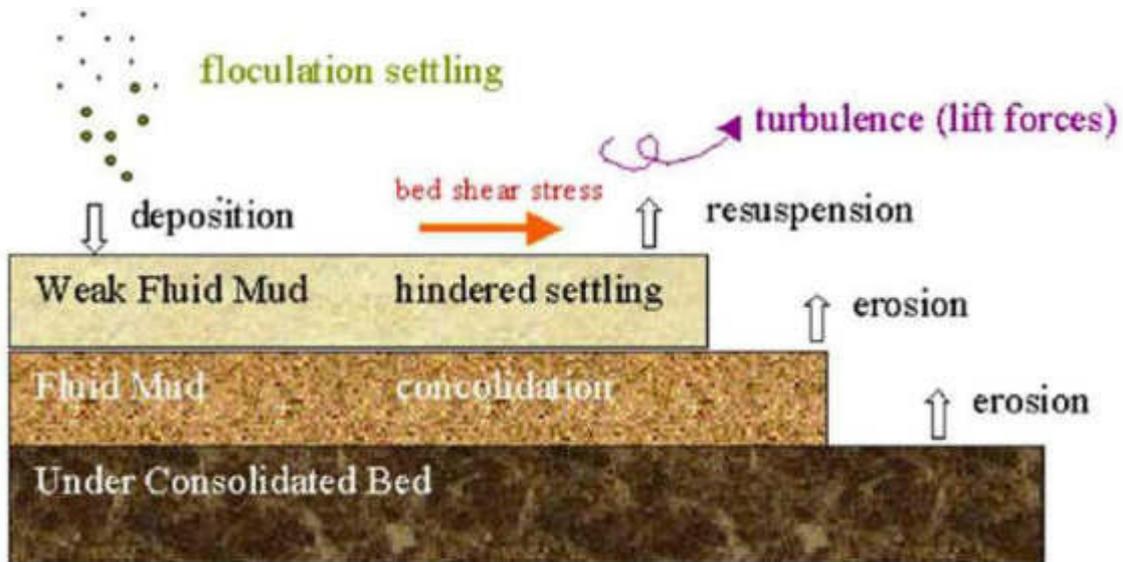


Figura 8-1 Rappresentazione schematica dei processi simulati in MIKE 3 MT

Il dominio adottato per le simulazioni con MIKE 3 MT ha le stesse caratteristiche (in termini di discretizzazione della griglia di calcolo e di quote batimetriche) di quello utilizzato per l'applicazione del modulo MIKE 3 HD (sezione 4).

Con lo scopo di simulare la dispersione e l'evoluzione del pennacchio di concentrazione di sedimento movimentato durante le operazioni di realizzazione dei pali e di escavo del fondale, nonché i processi di deposizione al fondo del sedimento stesso, si è provveduto innanzitutto alla definizione delle caratteristiche dei sedimenti costituenti il fondale. In particolare, sono stati considerati nel modello i seguenti parametri:

- componenti tessiturali e loro percentuali (così come individuate nella sezione 3.3). Dal momento che solamente i sedimenti coesivi (limo ed argilla) tendono a rimanere in sospensione nella colonna d'acqua, mentre i sedimenti non coesivi (sabbia, ghiaia e ciottoli) tendono a precipitare rapidamente sul fondo, quest'ultimi sono stati raggruppati, per semplicità, in un'unica classe. Come precedentemente indicato, si è fatto riferimento ai valori medi, ossia: 6% di sabbia, 64% di limo e 30% di argilla;
- dimensioni medie dei sedimenti costituenti ciascuna frazione granulometrica. Il diametro medio d_{50} a cui si è fatto riferimento è stato valutato in modo da considerare, per ciascuna classe granulometrica, un valore medio, ossia: 250 μm per la sabbia, 32.5 μm per il limo e 1.625 μm per l'argilla. Queste dimensioni granulometriche devono essere inserite nel modello in termini di velocità di sedimentazione, che è stata calcolata attraverso la formulazione di Stokes:

$$w_s = \frac{2R^2(d_e - d_i)g}{9\eta}$$

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 111 di 157
--	--	--------------------

dove: w_s = velocità di sedimentazione [m/s];

R = raggio delle particelle in sospensione [m];

d_i = densità dei sedimenti [kg/m³];

d_e = densità dell'acqua di mare [kg/m³];

g = accelerazione di gravità [m/s²];

η = viscosità della fase continua [m²/s]

In questo studio le velocità di sedimentazione per le tre frazioni di sedimenti sono risultate pari a: 58.6229 mm/s per la sabbia, 0.9907 mm/s per il limo e 0.0025 mm/s per l'argilla;

- densità del granulo di sedimento: 2745 kg/m³ (valore medio desunto dai campionamenti, come riportato in sezione 3.3);
- densità secca in situ ρ_d alla fine delle operazioni: 187 kg/m³. Questo valore è stato ottenuto supponendo che la porosità n_d del materiale appena depositato dopo le operazioni di scavo sia 20-25% superiore alla porosità naturale n (pari in questo a circa 76%, come esposto nella sezione 3.3), ossia pari al 90-95%. La densità secca si ottiene mediante la seguente formulazione: $\rho_d = \rho_s * (1 - n_d)$.
- limite di flocculazione: sulla base della pluridecennale esperienza del gruppo DHI in studi analoghi l'attivazione della flocculazione è stata imposta per concentrazioni di sedimento coesivo superiori a 10 mg/l. Infatti, per concentrazioni maggiori la probabilità di collisione delle singole particelle di sedimento aumenta e di conseguenza, tende ad innescarsi il fenomeno della flocculazione;
- il fondo è stato considerato non erodibile, al fine di evitare che la stima della torbidità e della deposizione durante le operazioni sia influenzata dalla eventuale risospensione naturale del sedimento.

Come condizioni al contorno del modello MIKE 3 MT sono state imposte le condizioni di Dirichlet, ossia contorni aperti con valori specificati. Nel presente studio, essendo i contorni aperti molto lontani dalla zona interessata dalle operazioni di movimentazione di materiale e non essendo la torbidità naturale oggetto della simulazione, i valori di concentrazione dei sedimenti lungo i contorni del dominio di calcolo sono stati imposti nulli.

In Tabella 8-1 sono riportate le principali caratteristiche del modello di trasporto di sedimenti e dei dati di input utilizzati per le simulazioni modellistiche.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 112 di 157
--	--	--------------------

Tabella 8-1 *Principali caratteristiche del modello di trasporto di sedimenti e dei dati in input utilizzati*

Sabbia	Composizione=6% $d_{50}=250 \mu\text{m}$ $W_s=58.6229 \text{ mm/s}$
Limo	Composizione=64% $d_{50}=32.5 \mu\text{m}$ $W_s=0.9907 \text{ mm/s}$
Argilla	Composizione=30% $d_{50}=1.625 \mu\text{m}$ $W_s=0.0025 \text{ mm/s}$
Densità del granulo di sedimento	2745 kg/m ³
Densità secca in situ alla fine delle operazioni:	187 kg/m ³
Concentrazione minima per flocculazione	10 mg/l
Stress critico di deposizione	0.07 N/m ²
Stress critico di erosione	>>0

Come già anticipato nella sezione 2, la simulazione idrodinamica realistica di lungo periodo ha permesso un approccio per le simulazioni di trasporto di sedimento a "finestre mobili" [28]: per ogni mese di simulazione idrodinamica, il modulo di trasporto di sedimento ad essa accoppiato ha previsto due simulazioni, assumendo che le operazioni abbiano inizio il giorno 1 ed il giorno 15 di ogni mese.

Tale approccio ha permesso non solo di cogliere la reale variabilità idrodinamica del sistema, altrimenti impossibile con il classico approccio a scenari, ma anche di prevedere un post processamento statistico dei risultati, ad esempio con l'individuazione su diversi livelli della colonna d'acqua dei massimi di concentrazione del sedimento raggiunti nel periodo simulato (risultati aggregati sull'intero anno e per stagioni), nonché del tempo in cui viene oltrepassata una certa soglia di concentrazione. Per il caso di studio tale soglia è stata fissata a 2 mg/l, concentrazione al di sotto della quale l'acqua è da considerarsi "limpida", offrendo quindi garanzia per la salute di qualsiasi specie naturale. Il processamento statistico dei risultati è stato inoltre applicato ai risultati delle simulazioni dell'accumulo dei sedimenti sul fondo.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 113 di 157
--	--	--------------------

8.3 Attività modellistiche per le fasi di costruzione dei pali

Le attività di costruzione dei pali prevedono l'infissione del tubo camicia in acciaio, lo scavo del terreno presente all'intero di tale tubo camicia ed il successivo getto di calcestruzzo. Nella sezione a seguire è presentata la schematizzazione modellistica adottata a supporto della quantificazione degli effetti di questa fase di cantiere; nella sezione 8.3.2 sono riportati i relativi risultati.

8.3.1 Schematizzazione modellistica

Le operazioni per la realizzazione dei pali possono essere schematizzate nelle seguenti fasi:

- infissione del tubo camicia in acciaio, avente un diametro variabile ed una lunghezza media di circa 30 m;
- scavo del terreno presente all'intero del tubo camicia mediante sonda e benna a bucket, con capacità di circa 1 m³. Lo scavo avverrà con ripetute discese e risalite della benna fino alla profondità di progetto e scarico del materiale proveniente dal fondo marino all'interno di una bettolina stagna adiacente;
- inserimento della gabbia d'armatura in acciaio all'interno del tubo camicia;
- posizionamento del tubo getto fino al fondo dello scavo e getto di calcestruzzo in risalita fino al livello del mare.

Durante la fase di scavo del palo è ragionevole assumere che la benna in fase di risalita perda parte del materiale che, prevalentemente, rimarrà in sospensione nella colonna d'acqua all'interno del tubo camicia stesso. Una quota parte di materiale uscirà invece dal tubo camicia con la benna, con conseguente rilascio di sedimento sulla superficie del mare e successiva dispersione.

Per il calcolo della percentuale di materiale fine rilasciato dalla benna in uscita dal tubo camicia si è fatto riferimento ai dati presenti in letteratura riferiti alle draghe meccaniche. Queste tipologie di mezzi garantiscono una perdita di materiale durante la fase di scavo e di attraversamento della colonna d'acqua da parte della benna normalmente quantificata in letteratura in percentuali variabili tra il 3% ed il 5% [29]. Cautelativamente, nel presente studio si è fatto riferimento ad una percentuale di sedimento perso dalla benna all'interno del tubo camicia pari al 5%.

Di questa quantità di sedimento rilasciato in colonna d'acqua (5% del volume scavato), si assume che, in ragione della dimensione del *bucket* in rapporto alla lunghezza della colonna d'acqua interessata all'interno del palo, 1/15 fuoriesca dal tubo camicia; si assume quindi che, relativamente al percorso compiuto dalla benna, solo 1/15 avvenga al di fuori della protezione del tubo. Pertanto, 1/15 del 5% del volume scavato viene rilasciato in superficie e si disperde in mare, mentre la restante parte (14/15 del 5% del volume scavato) rimane in sospensione all'interno del tubo camicia e, lentamente, tenderà a depositarsi sul fondo.

Durante la successiva fase di iniezione del calcestruzzo nel tubo camicia si assume che tutto il materiale che era stato disperso all'interno del tubo camicia nella precedente fase di scavo

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 114 di 157
--	--	--------------------

(14/15 del 5% del volume scavato) venga rimesso in sospensione nel tubo e fuoriesca in mare. Cautelativamente, si suppone che fuoriesca sia il materiale rimasto in colonna d'acqua, sia quello che si era depositato, in considerazione della bassa consolidazione del materiale e della forte pressione di fuoriuscita del calcestruzzo.

Si sottolinea che l'elevata incertezza sulle assunzioni sopra riportate in riferimento alla suddivisione 1/15 - 14/15 non incide sul volume totale di sedimento che si ipotizza essere rilasciato in mare, ma solo sulla sua attribuzione alla fase di escavo del tubo camicia o della successiva iniezione del calcestruzzo.

Per il calcolo del volume totale scavato per ogni palo, si è fatto riferimento ad una stima media: il diametro di riferimento è stato considerato pari a 1.4 m, in considerazione del fatto che i pali avranno diametri variabili pari a 1.1 m, 1.2 m, 1.5 m e 1.6 m, mentre la lunghezza è stata considerata quella media di infissione del tubo camicia fornita dai progettisti, ossia 30 m. Da questo deriva che il volume medio scavato per la realizzazione di un palo è di 43 m³.

Un altro dato utile ai fini della rappresentazione modellistica della dispersione di sedimenti è il tempo impiegato per terminare le operazioni. Queste tempistiche, fornite dai progettisti, sono di 5 ore per lo scavo di un palo e di 2.5 ore per l'iniezione del calcestruzzo.

Queste informazioni hanno permesso di calcolare il tasso di produttività (o *rate* di dragaggio) che, considerando una densità del sedimento pari a 1438 kg/m³, come indicato nella sezione 3.3, è pari a 3.44 kg/s.

Facendo riferimento alle ipotesi sopra descritte, è possibile calcolare il rateo di rilascio di sedimenti in mare durante la fase di scavo, pari a 0.011 kg/s, ed in fase di getto di calcestruzzo, pari a 0.321 kg/s.

Tenendo in considerazione le modalità di esecuzione dello scavo, che avviene all'interno di un tubo camicia, è stato imposto un rilascio del materiale, nelle quantità e modalità sopra descritte, esclusivamente in superficie.

I dati sono riportati sinteticamente in Tabella 8-2.

Tabella 8-2

Dati ed assunzioni relativi alle operazioni per lo scavo dei pali e l'iniezione di calcestruzzo

Diametro medio palo [m]	1.4
Lunghezza media infissione [m]	30
Volume medio scavato per palo [m ³]	43
Densità in situ [kg/m ³]	1438
Perdita di materiale [%]	5
Tempo per scavo 1 palo [ore]	5
Tempo per iniezione CLS 1 palo [ore]	2.5
Tasso di produttività [kg/s]	3.44
Rate in uscita durante lo scavo [kg/s]	0.011
Rate in uscita durante l'iniezione di CLS [kg/s]	0.321

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 115 di 157
--	--	--------------------

Si evidenzia che i lavori di realizzazione dei pali dovranno concludersi in 3 anni. In considerazione del numero elevato di pali (pari a circa 4000), al fine di rispettare le tempistiche richieste, dovranno essere realizzati in media 6 pali al giorno. Inoltre, tenendo presente che per la realizzazione di un palo occorrono circa 7.5 ore (5 ore per lo scavo e 2.5 ore per l'iniezione di calcestruzzo) e considerando 14 ore lavorative al giorno, con turni sovrapposti di 2 squadre, si assume che sarà necessario impiegare un totale di 4 squadre di lavoro.

Un altro limite operativo importante è che per la realizzazione di due pali in contemporanea da parte di 2 squadre di lavoro, dovrà essere garantita una distanza minima tra i pali di 40 m, per consentire la mobilità del pontone di appoggio alle operazioni.

Dal punto di vista modellistico, bisogna tenere conto che le celle di calcolo nella zona prevista per la realizzazione dei pali sono quadrangolari di lato 50 m. Pertanto, si suppone che ogni giorno le 4 squadre di lavoro operino in 4 diverse celle di calcolo tra esse adiacenti e che, mediamente, ogni squadra al giorno realizzi 1.5 pali.

Inoltre, per garantire una finestra temporale significativa di riferimento, si è deciso di simulare il periodo di tempo necessario per realizzare in ognuna delle suddette 4 celle tutti i pali in esse presenti. Per determinare tale numero, in mancanza di una configurazione progettuale definitiva dell'assetto dei pali, si è fatto riferimento alla condizione più cautelativa, ossia il numero di pali è stato assunto pari al numero massimo di pali che potrà essere realizzato in un'area di 50 m x 50 m (2'500 m²), stimato pari a 42. Ne deriva che la finestra temporale di riferimento è pari a 28 giorni, che è appunto il tempo necessario per realizzare in ciascuna delle 4 celle di calcolo 42 pali, per un totale di 168 pali in un'area di 10'000 m².

Relativamente alla posizione di tale area di riferimento per le simulazioni, si è considerata la condizione più svantaggiosa per il potenziale impatto sugli habitat marini di interesse per la zona, ossia la parte del molo posizionata più al largo, in quanto essa risulta essere più vicina agli habitat protetti, nonché soggetta a correnti più intense che, quindi, favoriscono la dispersione dei sedimenti ed il loro allontanamento dalla zona di cantiere. Anche in questo caso, in mancanza di una configurazione progettuale definitiva dell'assetto dei pali, si è fatto riferimento alla condizione più cautelativa, ossia l'ingombro del nuovo molo è stato assunto pari all'inviluppo delle varie soluzioni progettuali ad oggi individuate. Seguendo tale approccio sono state così individuate 3 differenti aree localizzate in diversi punti alle estremità del molo.

Tabella 8-3 Dati ed ipotesi di lavoro relativi alla realizzazione dei pali

Numero di squadre operative contemporaneamente	4
Numero di pali totali realizzati in un giorno	6
Area di riferimento ove opera 1 squadra [m ²]	2'500
Numero pali realizzati nell'area di riferimento da ciascuna squadra	42
Tempo per la realizzazione dei pali presenti nell'area di riferimento [giorni]	28

Lo schema di lavoro è riassunto in Tabella 8-3 e rappresentato in Figura 8-2; in particolare, la figura mostra:

- in nero la griglia di calcolo, che nella zona è stata impostata quadrangolare;
- in rosso l'ingombro massimo previsto per la nuova infrastruttura, assunto pari all'inviluppo delle varie soluzioni progettuali;
- con le lettere A, B, C e D le 4 squadre di lavoro che operano nelle diverse celle di calcolo, rispettando i criteri minimi di distanza;
- in arancione (P1), verde (P2) e azzurro (P3) le tre diverse posizioni dell'area di riferimento, oggetto delle simulazioni.

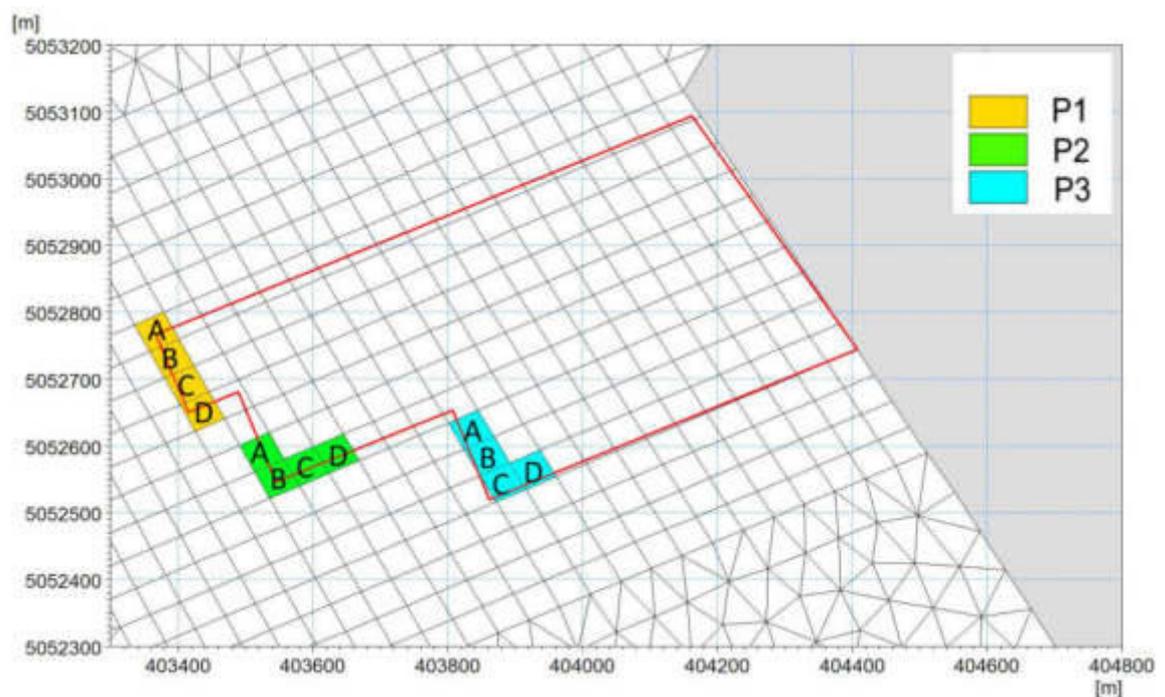


Figura 8-2 Individuazione delle aree di riferimento per le operazioni, oggetto di modellazione

Come detto, le simulazioni del modello MIKE 3 MT hanno seguito un approccio "a finestra mobile"; nello specifico sono state predisposte un totale di 23 simulazioni combinate idrodinamica-trasporto ognuna della durata di 30 giorni (28 giorni relativi al periodo operativo, maggiorati di 2 ulteriori giorni per includere la coda e l'esaurimento del pennacchio) ed inizializzate il giorno 1 ed il giorno 15 di ogni mese (tranne per il mese di settembre 2015), al fine di coprire l'intero anno preso a riferimento (23.09.2014-01.10.2015). Il medesimo approccio è stato utilizzato per tutte e tre le aree prese a riferimento, per un totale di 69 simulazioni.

8.3.2 Risultati del modello in riferimento alla fase di costruzione dei pali

Il modello MIKE 3 MT ha permesso di ricavare, per ogni simulazione, una mappa tridimensionale tempo-variante di concentrazione di sedimenti in tutto il dominio di calcolo e per ognuno degli 11 livelli in cui è stata discretizzata la colonna d'acqua. Queste mappe sono state opportunamente elaborate al fine di ottenere:

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 117 di 157
--	--	--------------------

- **mappe dei massimi di concentrazione del sedimento** a tre diverse profondità: in superficie, ad una profondità intermedia ed al fondo. I massimi sono calcolati come valore medio dei massimi valori di concentrazione riscontrati per ciascuna simulazione. Per il calcolo dei massimi annuali sono state considerate tutte le simulazioni (23), mentre nel caso di massimi stagionali sono state considerate solo le simulazioni del relativo periodo (6 simulazioni per ogni stagione).
- **mappe del tempo di persistenza di concentrazioni del sedimento superiori a 2 mg/l** a tre diverse profondità, sia su base annuale che stagionale: in superficie, ad una profondità intermedia ed al fondo. I tempi di persistenza sono calcolati come valore medio dei tempi di persistenza riscontrati per ciascuna simulazione;
- **mappe di massimo accumulo di sedimento al fondo**, sia su base annuale che stagionale. I massimi sono calcolati come valore medio dei massimi valori di accumulo riscontrati per ciascuna simulazione.

Tutte le mappe, create per le tre diverse posizioni dell'area di riferimento (P1, P2 e P3 in Figura 8-2) sono riportate nell'Allegato F al presente documento.

I risultati mostrano che le aree interessate da una concentrazione di sedimento superiore a 2 mg/l (che si ricorda essere la concentrazione diffusamente utilizzata come soglia al di sotto della quale l'acqua è da considerarsi "limpida", offrendo quindi garanzia per la salute di qualsiasi specie naturale) sono molto più estese in superficie, dove avviene il rilascio di sedimenti, rispetto agli strati più profondi della colonna d'acqua. Inoltre, è opportuno evidenziare che le mappe dei massimi di concentrazione risultano del tutto analoghe per tutte e tre le aree di riferimento via via considerate.

In generale si osserva che, in superficie (Figura 8-3), le concentrazioni superano i 2 mg/l solo all'interno del bacino portuale, senza oltrepassare le dighe foranee, e rimangono confinate nella zona centrale della Baia di Muggia, senza interessare la fascia costiera a Sud. Questo significa che, durante le operazioni di realizzazione dei pali, nelle condizioni di lavoro studiate, i sedimenti raggiungono gli habitat marini protetti (sezione 3.1) in concentrazioni del tutto trascurabili. Come atteso, le concentrazioni più elevate si riscontrano nell'intorno dell'area delle operazioni: in superficie, concentrazioni superiori a 50 mg/l rimangono confinate in un intorno di circa 400 m. Allontanandosi dalla zona delle operazioni il pennacchio di sedimenti assume una forma allungata in direzione Nord-Ovest Sud-Est, seguendo l'andamento delle correnti: concentrazioni superiori ai 10 mg/l si evidenziano in un'area circostante alla zona di cantiere ampia circa 1600 m in direzione parallela a costa e pari a circa 1000 m nella direzione trasversale.

Anche nello strato intermedio (Figura 8-4) e al fondo (Figura 8-5) le concentrazioni sono massime nell'intorno del cantiere, ma non si superano i 30-40 mg/l. In generale, facendo riferimento a una soglia di concentrazione pari a 2 mg/l, il pennacchio di torbida negli strati più profondi si esaurisce in un intorno di circa 1500 m dall'area di cantiere.

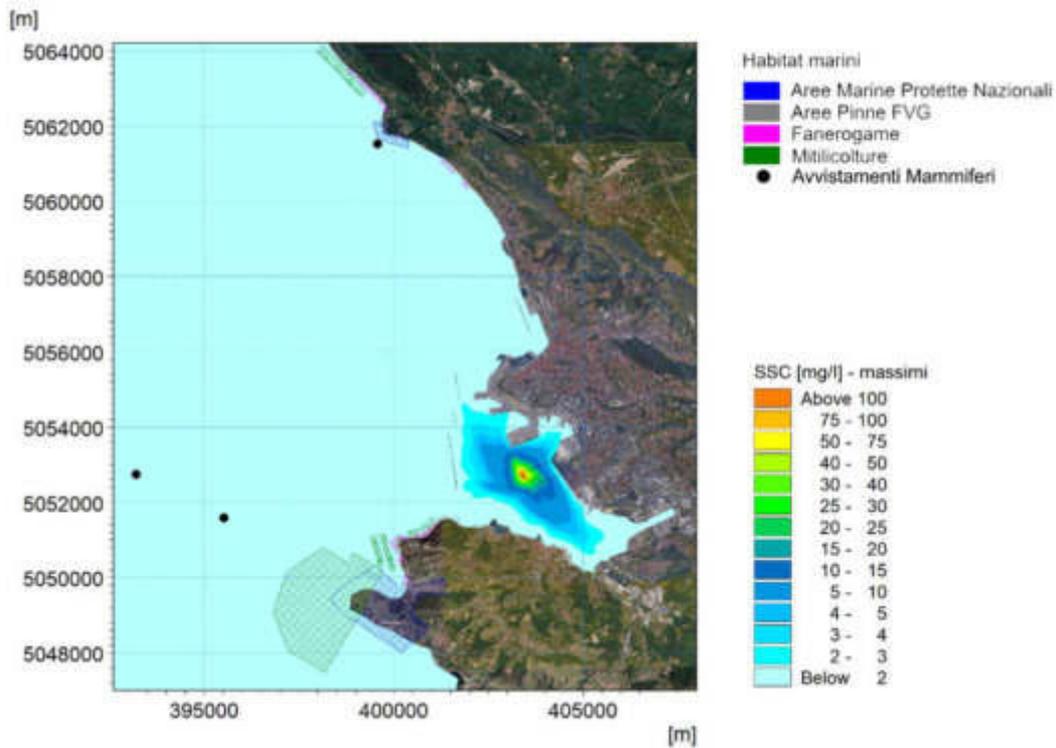


Figura 8-3 Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

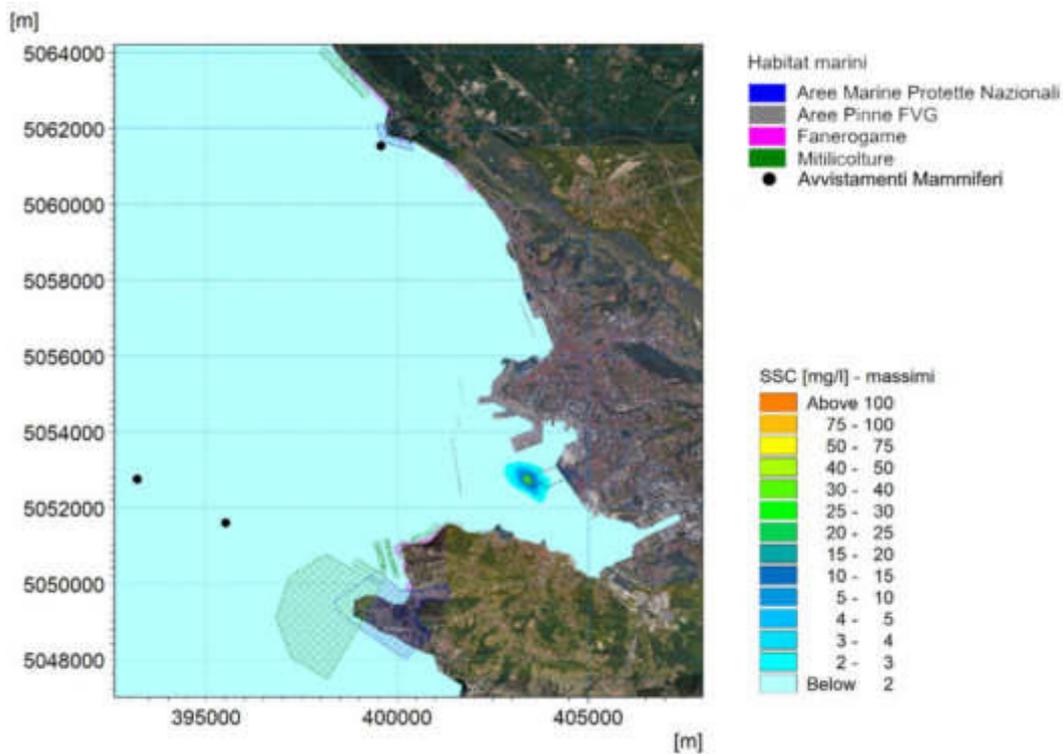


Figura 8-4 Massimi di concentrazione a metà colonna a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

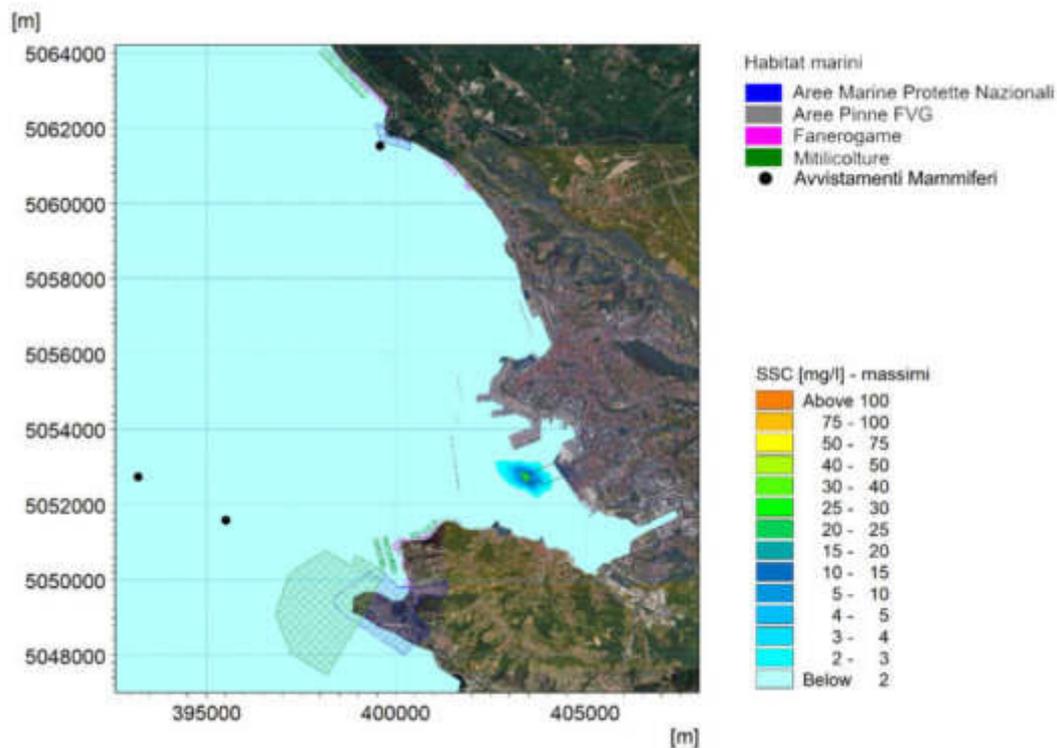


Figura 8-5 Massimi di concentrazione al fondo a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

A livello stagionale, la forma del pennacchio di torbida e la distribuzione delle concentrazioni dipendono dalle condizioni di corrente prevalente che caratterizzano le diverse stagioni. Facendo riferimento allo strato superficiale, il pennacchio risulta più allungato in direzione Nord-Ovest Sud-Est in estate (Figura 8-6) ed in primavera (Figura 8-7), mentre risulta più regolare nelle altre stagioni (Figura 8-8 e Figura 8-9).

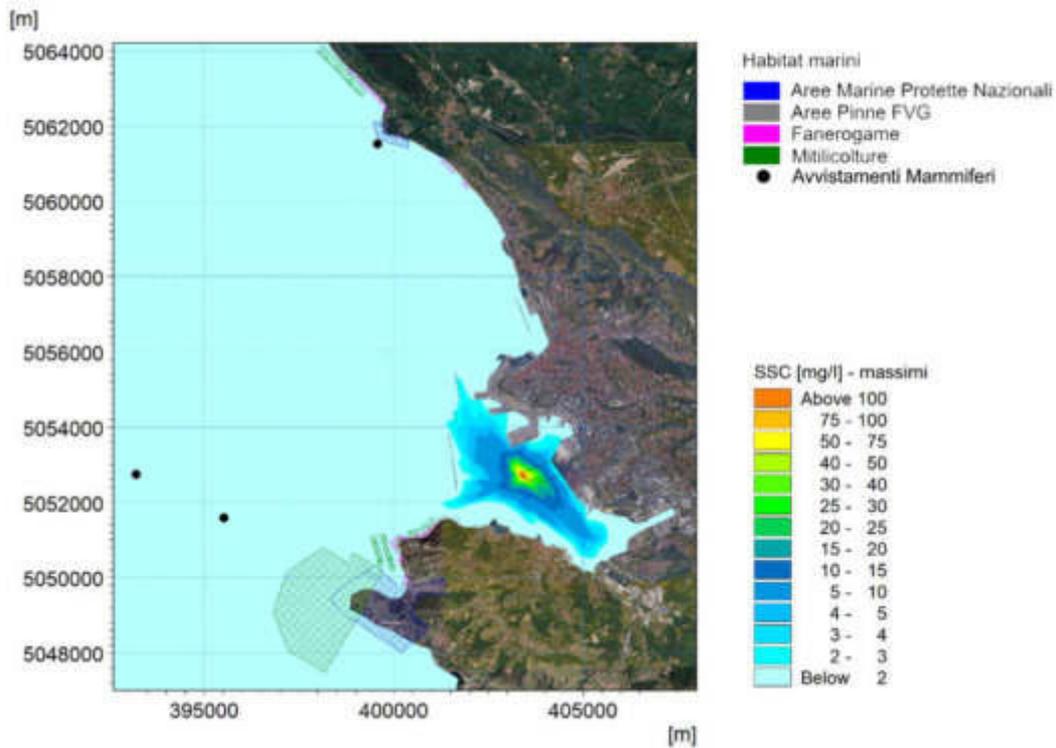


Figura 8-6 Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi estivi

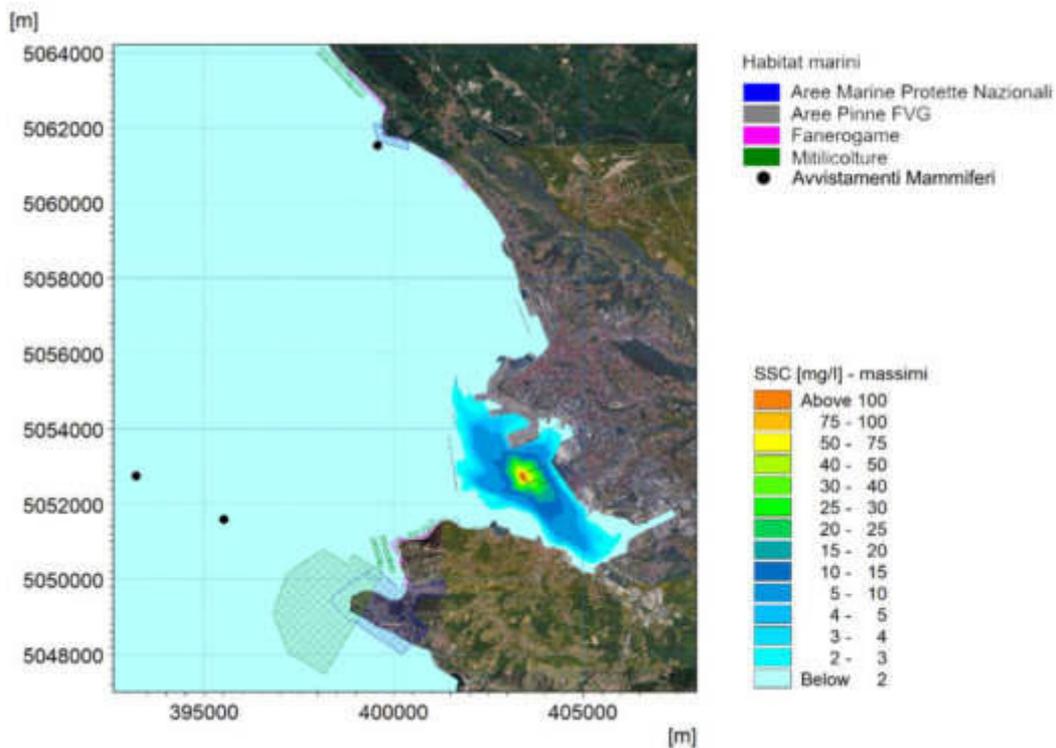


Figura 8-7 Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi primaverili

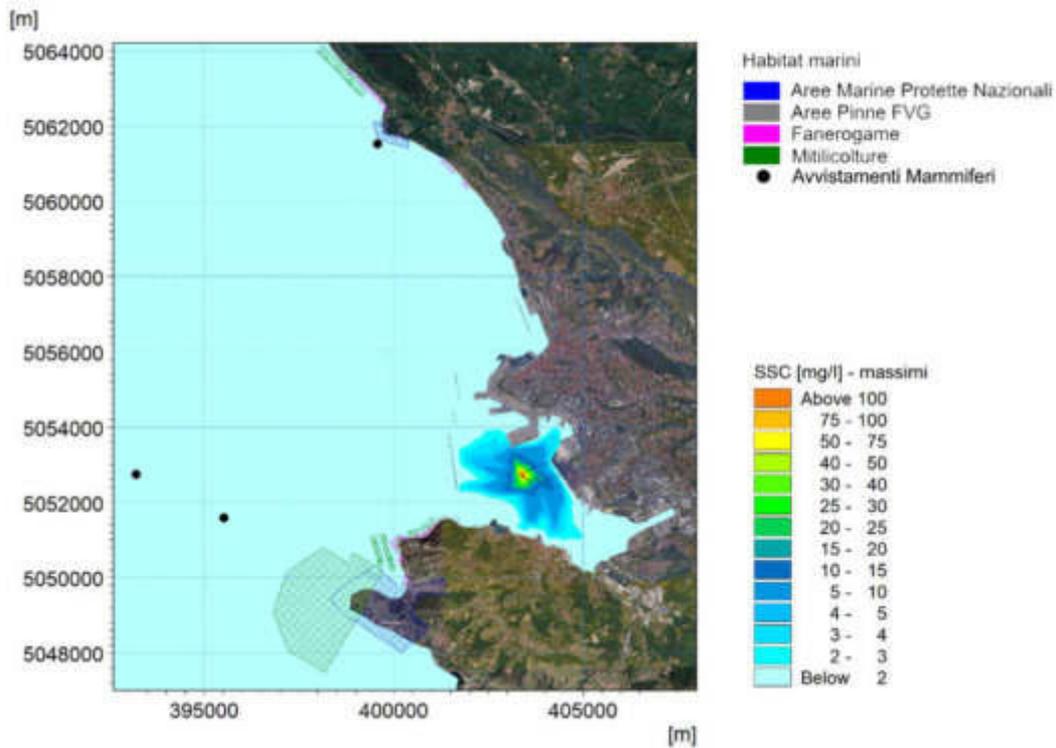


Figura 8-8 Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi invernali

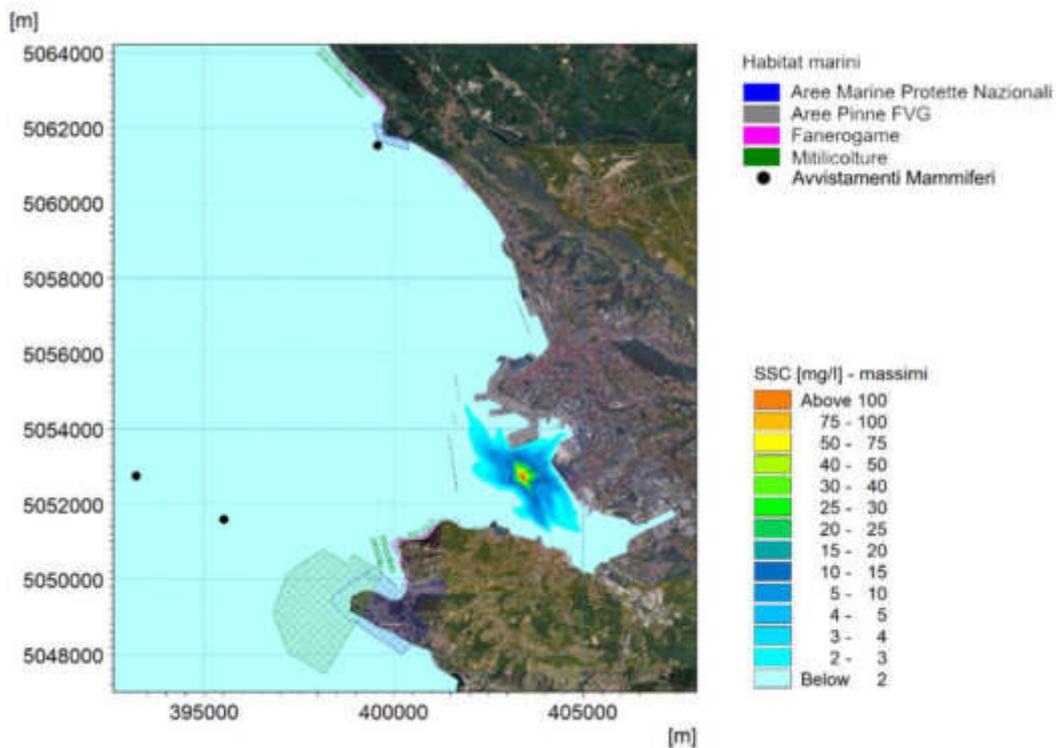


Figura 8-9 Massimi di concentrazione in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi autunnali

Un altro importante risultato che è stato possibile ottenere grazie all'applicazione di modellistica numerica per una finestra temporale di lungo periodo è la persistenza di una data concentrazione di sedimento in una specifica area. Anche in questo caso si è fatto riferimento alla soglia di concentrazione pari a 2 mg/l e sono stati calcolati, in ogni zona del dominio di calcolo, i giorni durante il periodo di lavoro (ossia su un totale di 28 giorni) per i quali le concentrazioni di sedimento hanno superato tale soglia.

Questi risultati mettono in evidenza che, nelle aree dove le mappe delle concentrazioni massime avevano mostrato valori inferiori a 10 mg/l, i tempi di persistenza di concentrazioni pari o superiori a 2 mg/l sono inferiori alle 3 ore. La correlazione di queste due mappe (massimi e persistenza) permette pertanto di chiarire se un dato valore di concentrazione si è presentato come conseguenza di specifiche condizioni estemporanee o se è effettivamente una condizione frequente per il sito in studio.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti su base annuale in superficie (Figura 8-10) si osserva che le concentrazioni sono superiori a 2 mg/l per un periodo di tempo complessivamente superiore alla mezza giornata (12 ore) in un'area circostante alla zona di cantiere ampia circa 1500 m in direzione parallela a costa e pari a circa 800 m nella direzione trasversale. Al fondo (Figura 8-12) questa zona si riduce, raggiungendo un'estensione di circa 900 m in direzione parallela a costa e pari a circa 500 m nella direzione trasversale.

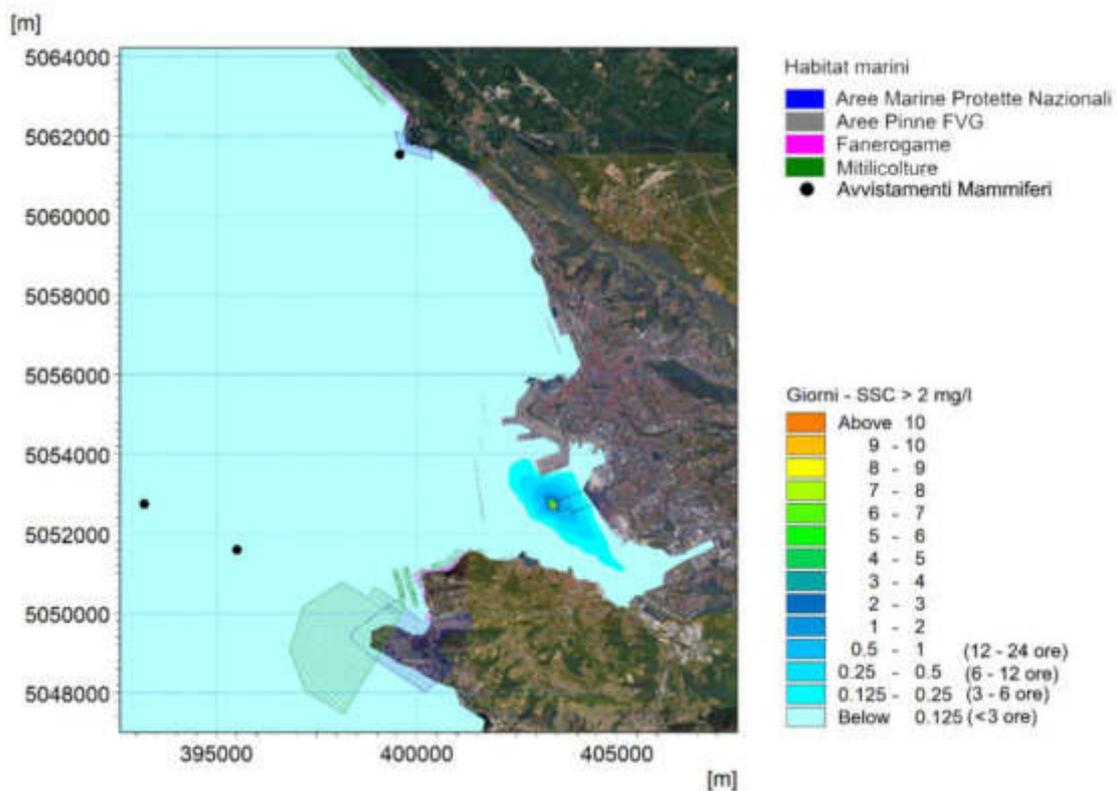


Figura 8-10 Tempo di persistenza (in giorni) di concentrazione superiore a 2 mg/l in superficie a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

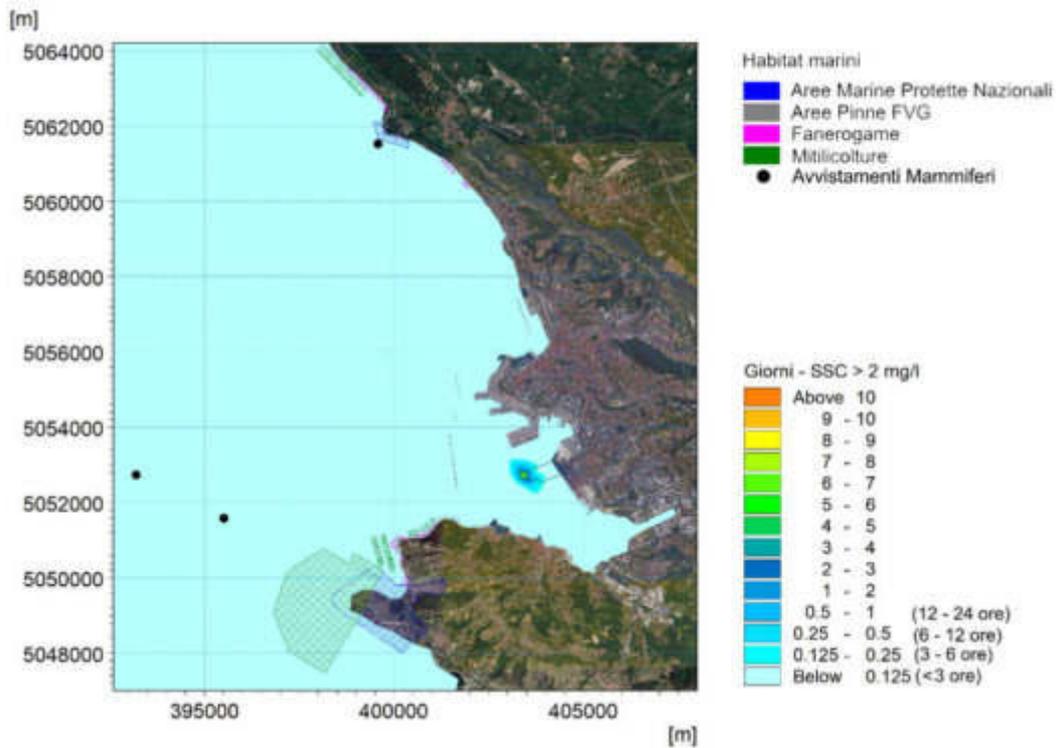


Figura 8-11 Tempo di persistenza (in giorni) di concentrazione superiore a 2 mg/l a metà colonna a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

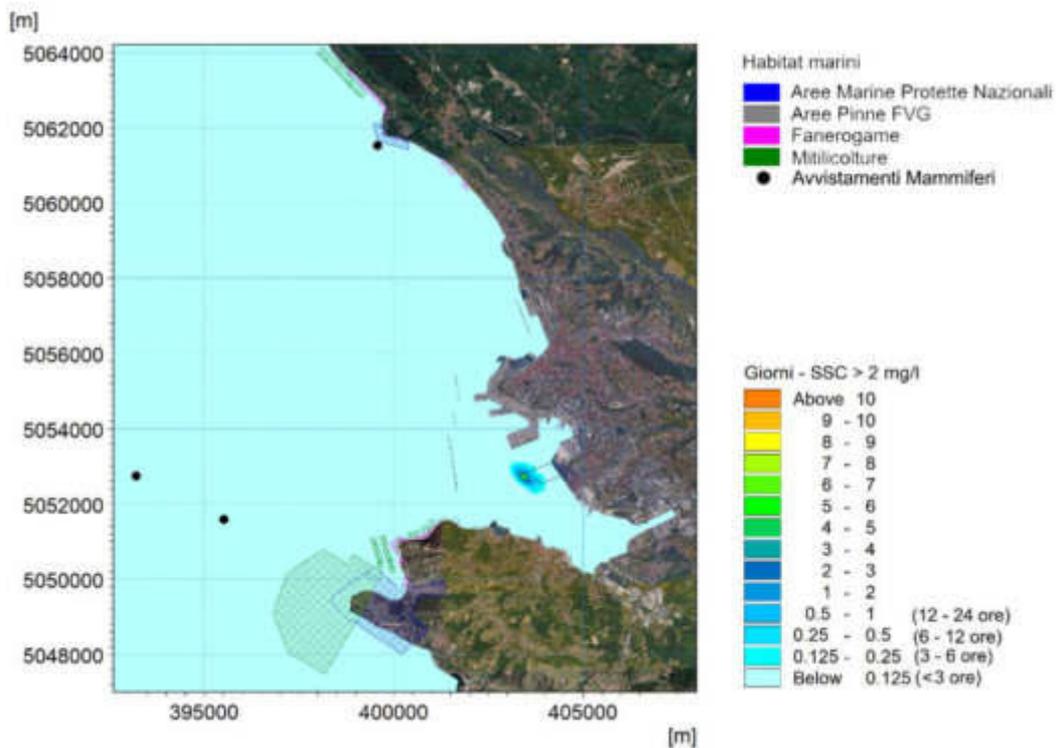


Figura 8-12 Tempo di persistenza (in giorni) di concentrazione superiore a 2 mg/l al fondo a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

I sedimenti che vengono risospesi sono per la maggior parte trasportati nella Baia, ma le frazioni più grossolane, caratterizzate da una maggiore velocità di sedimentazione, tendono a sedimentare nell'intorno della zona di cantiere. L'area interessata dalla deposizione è piuttosto modesta (Figura 8-13): un accumulo di sedimenti superiore a 0.5 mm si verifica in una zona con estensione pari a circa 1000 m in direzione parallela a costa e pari a circa 500 m nella direzione trasversale.

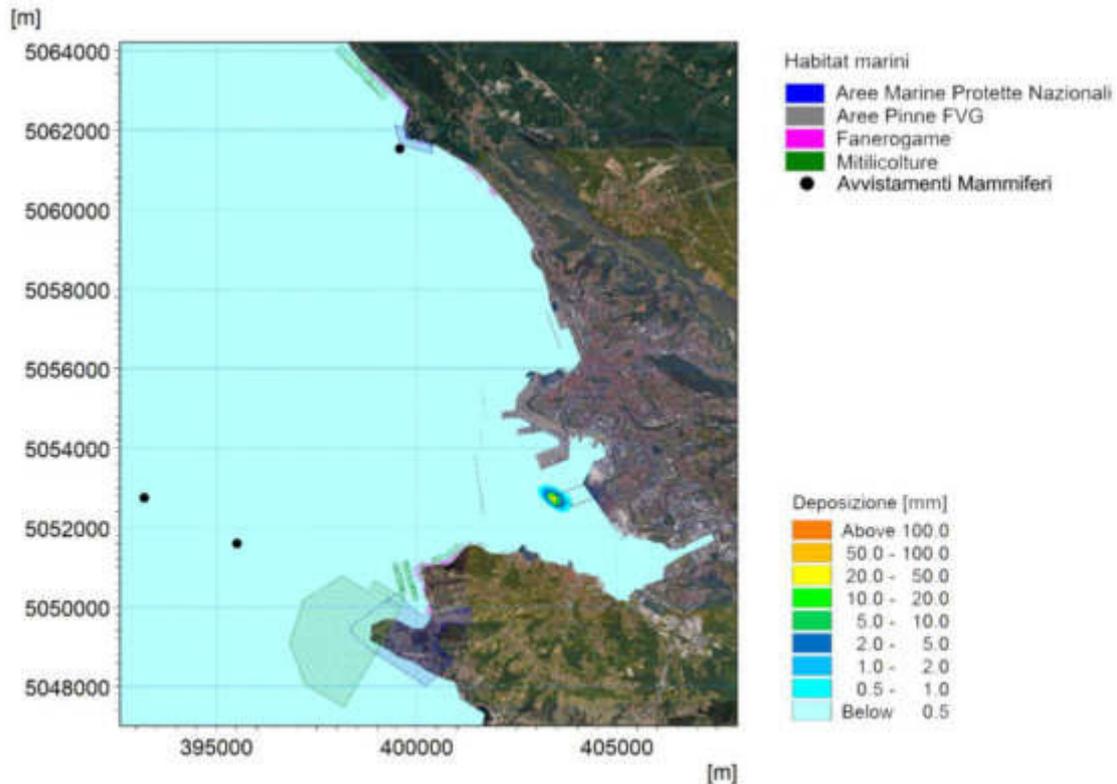


Figura 8-13 Accumulo massimo del sedimento depositato [mm] a seguito della realizzazione dei pali in area P1 - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

Si evidenzia che le operazioni per la realizzazione dei pali avranno una durata di circa 3 anni, mentre nel presente studio è stata analizzata una finestra temporale ristretta, pari a 28 giorni, considerando solamente le aree di lavoro che potrebbero essere più critiche dal punto di vista degli impatti sugli habitat marini protetti. I risultati hanno dimostrato la validità di questa assunzione: alla fine di ogni ciclo di lavoro (di durata pari a circa 14 ore) rimane in sospensione una piccola quantità di sedimento, ma le concentrazioni raggiungono valori inferiori ai 2 mg/l prima che riprendano le operazioni il giorno successivo. Può quindi essere assunta trascurabile la sovrapposizione degli effetti tra due giornate lavorative successive e, pertanto, la scelta della lunghezza della finestra temporale di riferimento non influenza i risultati.

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 125 di 157
--	--	--------------------

8.4 Attività modellistiche per la fase di escavo dei fondali

Le attività di dragaggio prevedono l'escavo del fondale nella zona antistante il banchinamento lato Nord-Ovest del nuovo Terminal, al fine di permettere l'ormeggio delle navi di progetto. Nella sezione a seguire è presentata la schematizzazione modellistica adottata a supporto della quantificazione degli effetti di questa fase di cantiere; nella sezione 8.4.2 sono riportati i relativi risultati.

8.4.1 Schematizzazione modellistica

Il dragaggio nella zona antistante il banchinamento lato Nord-Ovest del nuovo Terminal è progettato per raggiungere profondità di 18 m in una zona che si sviluppa lungo tutto il fronte Nord-Ovest (circa 900 m), per una dimensione trasversale pari a circa 250 m, come mostrato in Figura 8-14.

In considerazione delle batimetrie attuali, il volume totale da dragare è pari a circa 300'000 m³ e si prevede di completare le operazioni in circa 5 mesi (150 giorni); da questo si evince che, mediamente, il tasso giornaliero di dragaggio sarà pari a 2'000 m³. Anche per queste operazioni, si assume che le ore di lavoro al giorno siano pari a 14. Date queste premesse, e considerando una densità del sedimento in situ pari a 1438 kg/m³ (come desunto dall'analisi granulometrica esposta alla sezione 3.3), si ottiene un tasso di produttività pari a circa 57 kg/s.

Si precisa che i volumi di escavo non sono uniformi dal punto di vista spaziale: in prossimità della porzione di banchina più verso costa, dove le profondità attuali sono dell'ordine di 15 m, i volumi da dragare sono maggiori rispetto alla zona in corrispondenza della testata del pontile, dove le profondità raggiungono già quasi i 18 m. Essendo però costante il tasso di produttività oraria, si è ipotizzato per le simulazioni un tempo di avanzamento del mezzo variabile proporzionalmente ai volumi dragati stimati (ossia più lento in prossimità della costa e via via più veloce all'aumentare delle profondità).

In Figura 8-14 sono mostrati gli spessori da dragare necessari per ottenere una profondità omogenea di 18 m lungo la banchina: essi sono pari a circa 3 m sottocosta (colore blu) e a 0.5 m in corrispondenza della testata della banchina (colore giallo). L'area delimitata in nero indica l'ingombro del nuovo molo, assunto pari all'involuppo delle varie soluzioni progettuali ad oggi individuate.

Il dragaggio verrà effettuato tramite draga meccanica a benna chiusa, al fine di limitare le perdite di materiale; normalmente la perdita di materiale durante la fase di escavo, nell'operazione di attraversamento della colonna d'acqua da parte della benna in risalita, è quantificata in letteratura in percentuale del 3% [29] del volume di sedimento disponibile.

Tenendo in considerazione le modalità di esecuzione dello scavo, il rilascio del materiale, nelle quantità e modalità sopra descritte, il rilascio è stato imposto come uniformemente distribuito lungo tutta la colonna d'acqua.

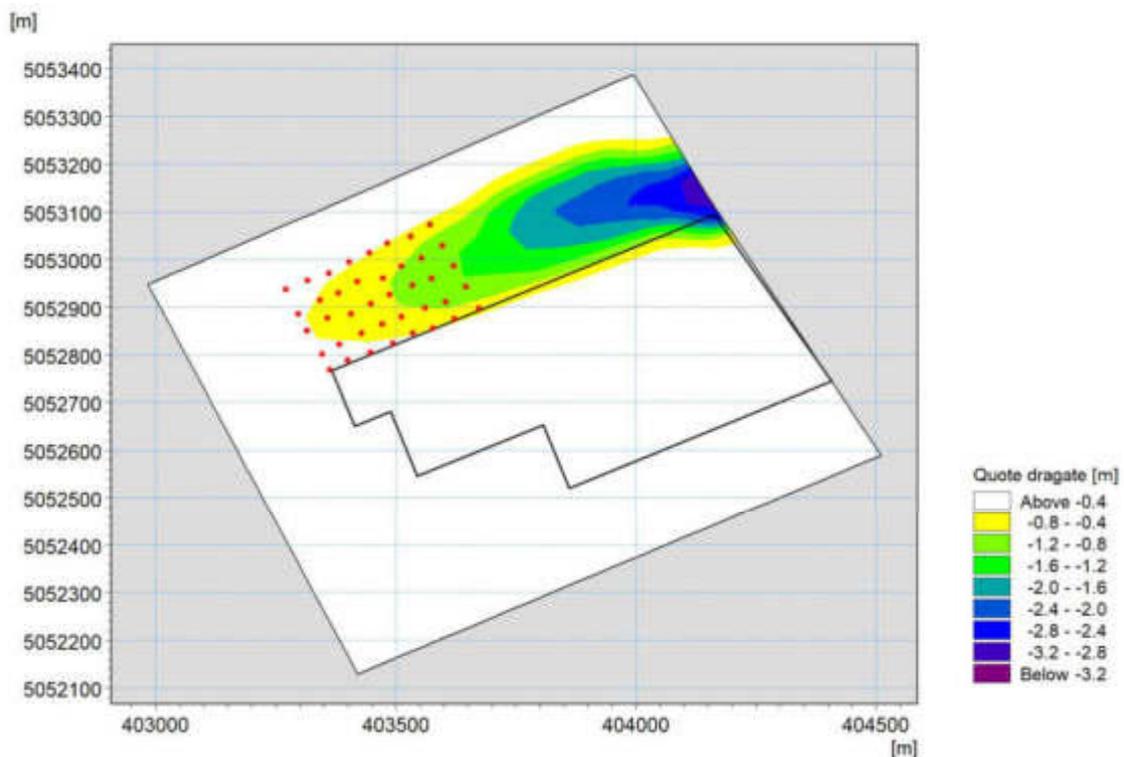


Figura 8-14 Individuazione dell'area soggetta a dragaggio e degli spessori da dragare. I pallini in rosso indicano la zona presa a riferimento nello studio modellistico

Come per la realizzazione dei pali, anche in questo caso non è possibile simulare l'avanzamento dei lavori per completare l'intero scavo; è stata pertanto considerata una specifica area di riferimento che rappresenta la condizione più svantaggiosa per gli habitat marini di interesse per la zona, ossia quella più al largo, più vicina a tali habitat, nonché soggetta a correnti più intense che, quindi, favoriscono la dispersione dei sedimenti ed il loro allontanamento dalla zona di lavoro. L'ampiezza di tale area, individuata con i puntini rossi in Figura 8-14, è stata scelta in modo che la finestra temporale di riferimento sia pari ad 1 mese (30 giorni), tale per cui il volume dragato sia complessivamente pari a 60'000 m³.

Come per lo studio in fase di realizzazione dei pali, anche in questo caso, al fine di svincolare il più possibile il risultato del pennacchio di sedimenti in sospensione dalle condizioni idrodinamiche, le simulazioni del modello MIKE 3 MT hanno seguito un approccio "a finestra mobile": sono state predisposte un totale di 23 simulazioni combinate idrodinamica-trasporto ognuna della durata di 32 giorni (30 giorni relativi al periodo operativo, maggiorati di 2 ulteriori giorni per includere l'esaurimento del pennacchio di torbida) ed inizializzate il giorno 1 ed il giorno 15 di ogni mese (tranne per il mese di settembre 2015), al fine di coprire l'intero anno preso a riferimento (23.09.2014-01.10.2015).

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 127 di 157
--	--	--------------------

Tabella 8-4 Dati ed ipotesi relativi alle operazioni di dragaggio

	Totale	Simulato
Area dragata [m ²]	275'000	100'000
Volume dragato [m ³]	300'000	60'000
Durata operazioni di dragaggio [giorni]	150	30
Densità in situ [kg/m ³]	1438	
Perdita di materiale [%]	3	
Ore di lavoro al giorno [h/d]	14	
Tasso di produttività [kg/s]	57	

8.4.2 Risultati relativi alle operazioni di escavo

Il modello MIKE 3 MT ha permesso di ricavare, per ogni simulazione, una mappa tridimensionale tempo-variante di concentrazione di sedimenti in tutto il dominio di calcolo e per ciascuno degli 11 livelli in cui è stata discretizzata la colonna d'acqua. Queste mappe sono state opportunamente elaborate al fine di ottenere:

- **mappe dei massimi di concentrazione del sedimento** a tre diverse profondità: in superficie, ad una profondità intermedia ed al fondo. I massimi sono calcolati come valore medio dei massimi valori di concentrazione riscontrati per ciascuna simulazione. Per il calcolo dei massimi annuali sono state considerate tutte le simulazioni (23), mentre nel caso di massimi stagionali sono state considerate solo le simulazioni del relativo periodo (6 simulazioni per ogni stagione);
- **mappe del tempo di persistenza di concentrazioni del sedimento superiori a 2 mg/l** a tre diverse profondità, sia su base annuale che stagionale: in superficie, ad una profondità intermedia ed al fondo. I tempi di persistenza sono calcolati come valore medio dei tempi di persistenza per ciascuna simulazione;
- **mappe di massimo accumulo di sedimento al fondo**, sia su base annuale che stagionale. I massimi sono calcolati come valore medio dei massimi valori di accumulo per ciascuna simulazione.

Tutte le mappe sono riportate nell'Allegato E al presente documento.

Si ricorda che per le operazioni di dragaggio, a differenza di quelle per la realizzazione dei pali, data la tecnica di escavo prevista, è stata ipotizzata una perdita di sedimento uniformemente distribuita lungo la colonna d'acqua. Questo fa sì che il pennacchio di sedimento in sospensione presenti, alle diverse profondità, una variabilità ridotta. Si osserva, tuttavia, che l'estensione del pennacchio e le concentrazioni sono più elevate al fondo rispetto alla superficie; questo perché negli strati più profondi, al sedimento perso dalla benna a quella specifica profondità, si aggiunge il materiale perso negli strati sovrastanti, che tende a precipitare e ad accumularsi con il primo.

In superficie (Figura 8-15), le concentrazioni superano i 2 mg/l (che si ricorda essere la concentrazione diffusamente utilizzata come soglia al di sotto della quale l'acqua è da considerarsi

“limpida”, offrendo quindi garanzia per la salute di qualsiasi specie naturale) solo all'interno del bacino portuale: il pennacchio delle concentrazioni massime lambisce le dighe foranee ad Ovest e la costa nelle altre direzioni. Al fondo, questo pennacchio si sviluppa maggiormente verso il largo; infatti, si riscontrano concentrazioni superiori ai 2 mg/l anche poco oltre le dighe foranee.

Si evidenzia che lungo la costa Sud, il pennacchio non arriva a lambire le zone ove è presente la *pinna nobilis*; questa fascia risulta infatti protetta dalla presenza delle strutture di Porto San Rocco ed inoltre, trovandosi in prossimità della bocca Sud del bacino, è soggetta a correnti più intense che pertanto disperdono più velocemente il sedimento. Anche in questo caso, quindi, durante le operazioni di dragaggio, nelle condizioni di lavoro studiate, i sedimenti raggiungono gli habitat marini protetti (sezione 3.1) in concentrazioni trascurabili.

Come atteso, le concentrazioni massime più elevate si riscontrano nell'intorno della zona delle operazioni e raggiungono valori massimi di 75 mg/l in superficie, mentre al fondo tali valori superano i 100 mg/l. Allontanandosi dalla zona di escavo, il pennacchio di sedimenti assume una forma allungata in direzione Nord-Ovest / Sud-Est, seguendo l'andamento delle correnti: concentrazioni superiori ai 10 mg/l si presentano, al fondo (Figura 8-17), in un'area circostante alla zona di scavo ampia circa 2000 m in direzione parallela a costa e pari a circa 1200 m nella direzione trasversale, mentre in superficie (Figura 8-15) tali distanze si riducono rispettivamente a 1600 m e 1000 m.

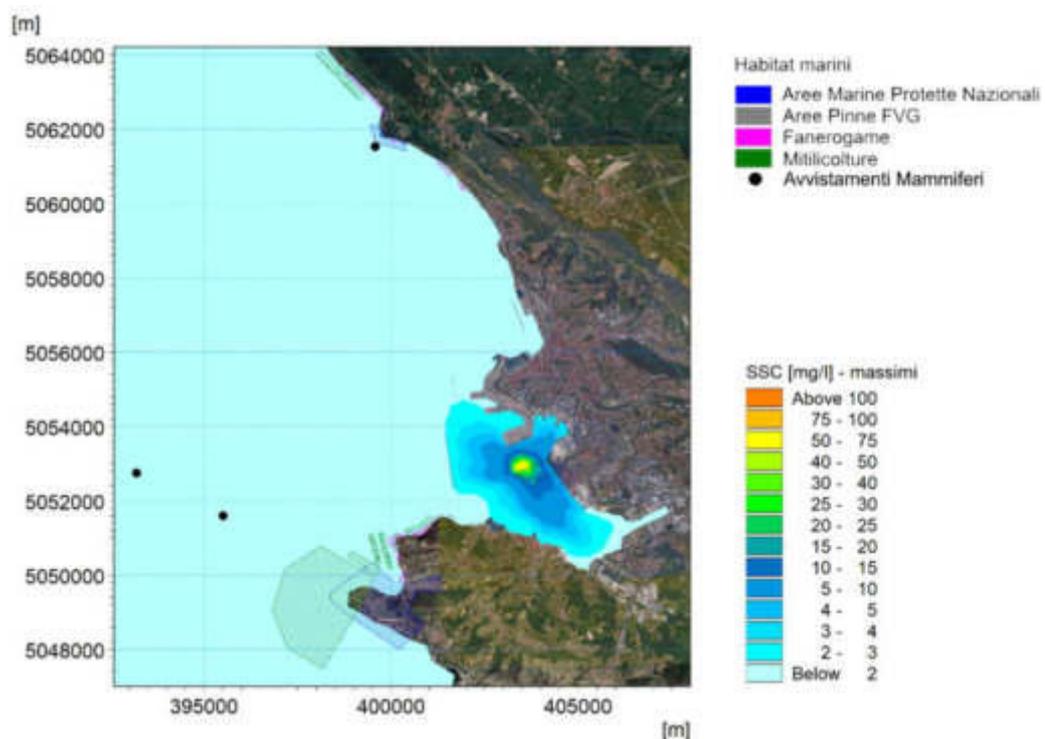


Figura 8-15 Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

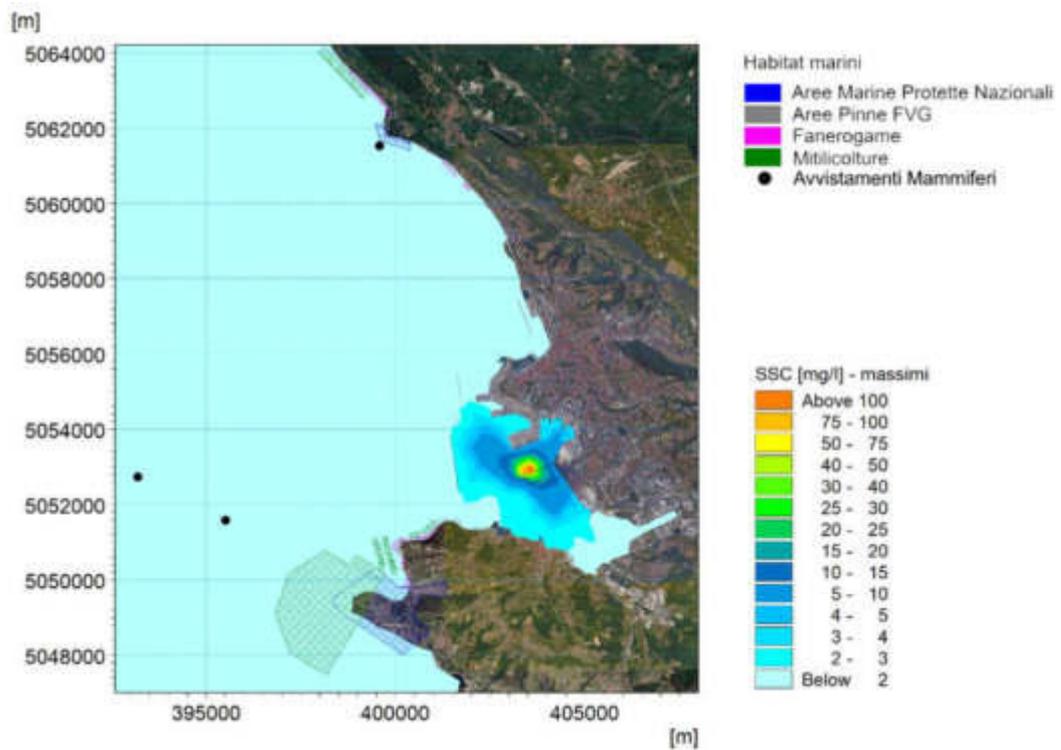


Figura 8-16 Massimi di concentrazione a metà colonna a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

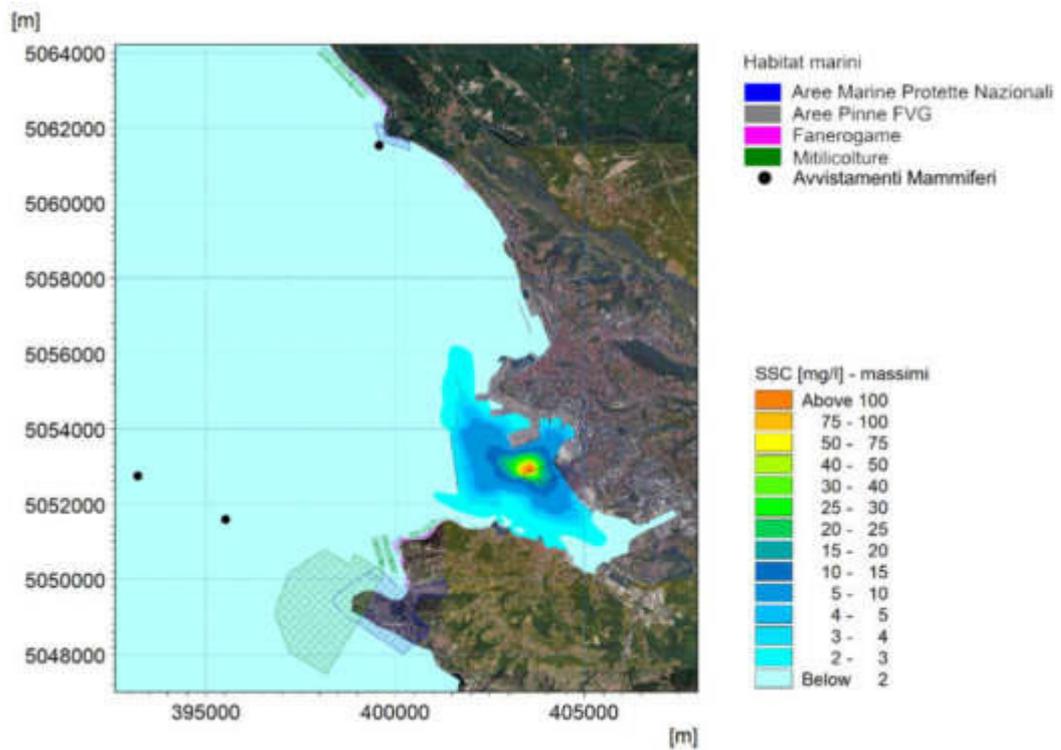


Figura 8-17 Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

A livello stagionale, la forma del pennacchio di torbida e la distribuzione delle concentrazioni dipendono dalle condizioni di corrente prevalente che caratterizzano le stagioni di volta in volta considerate. Il pennacchio risulta più allungato in direzione Nord-Ovest Sud-Est in estate (Figura 8-18) ed in primavera (Figura 8-19), mentre la sua forma è più regolare nelle altre stagioni (Figura 8-20 e Figura 8-21). Infatti, durante i periodi autunnale ed invernale il pennacchio lambisce la costa Sud, che non viene invece toccata durante i periodi estivi e primaverili; al contrario, in estate e primavera si hanno concentrazioni superiori a 2 mg/l anche in corrispondenza della diga posta più a Nord, circostanza che non si riscontra in inverno ed autunno (eccezion fatta, in quest'ultimo caso, per il livello di fondo).

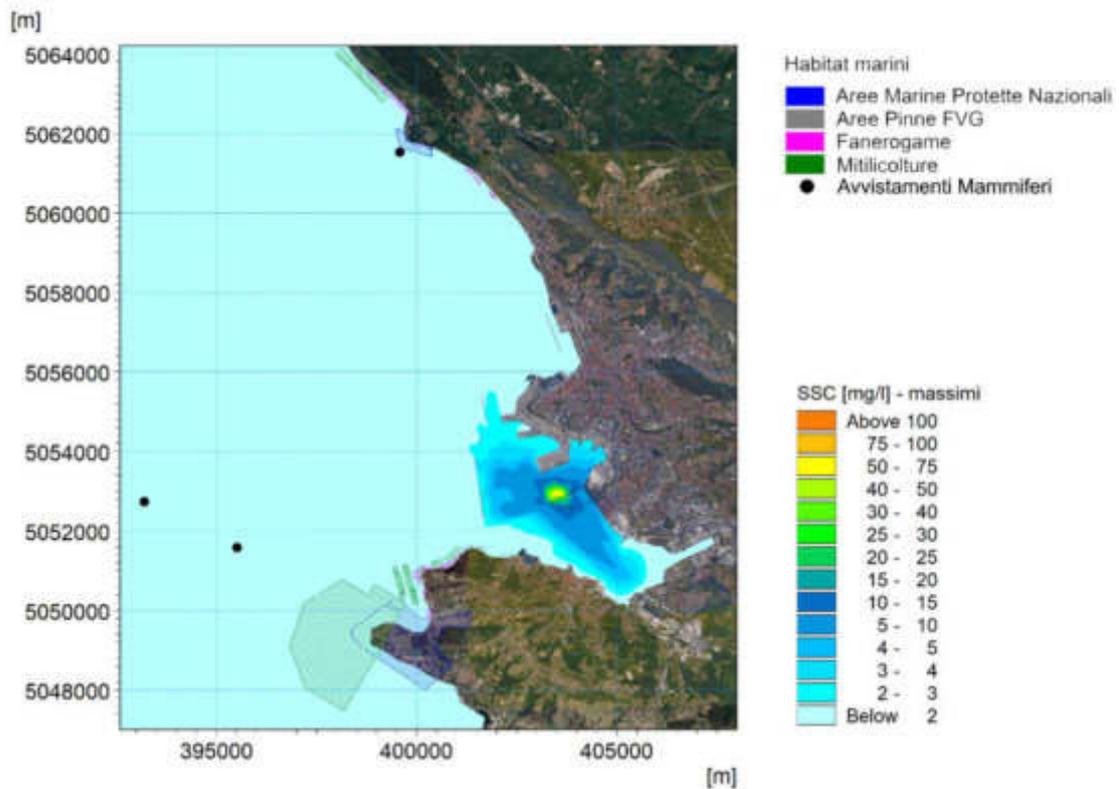


Figura 8-18 *Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi estivi*

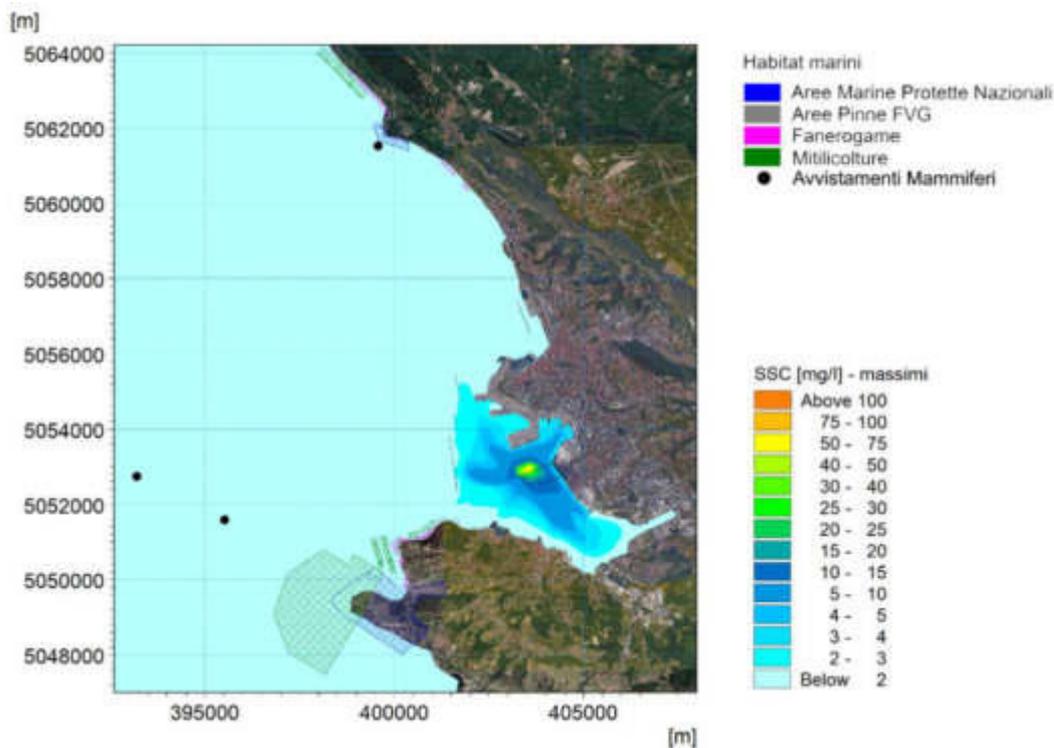


Figura 8-19 Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi primaverili

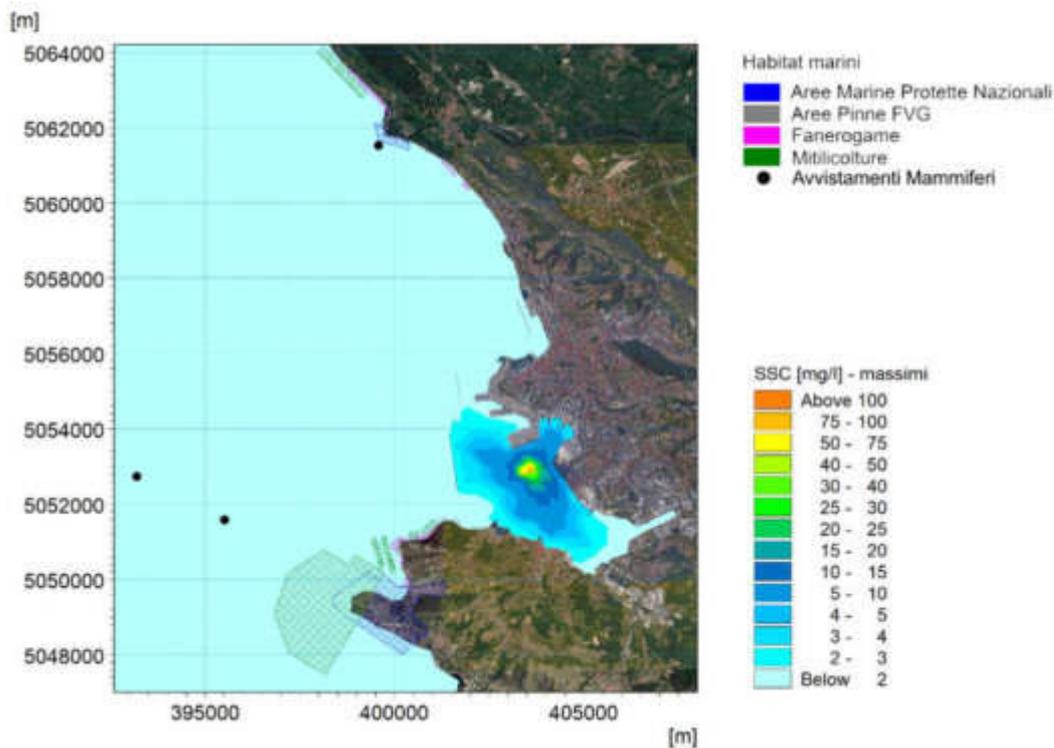


Figura 8-20 Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi invernali

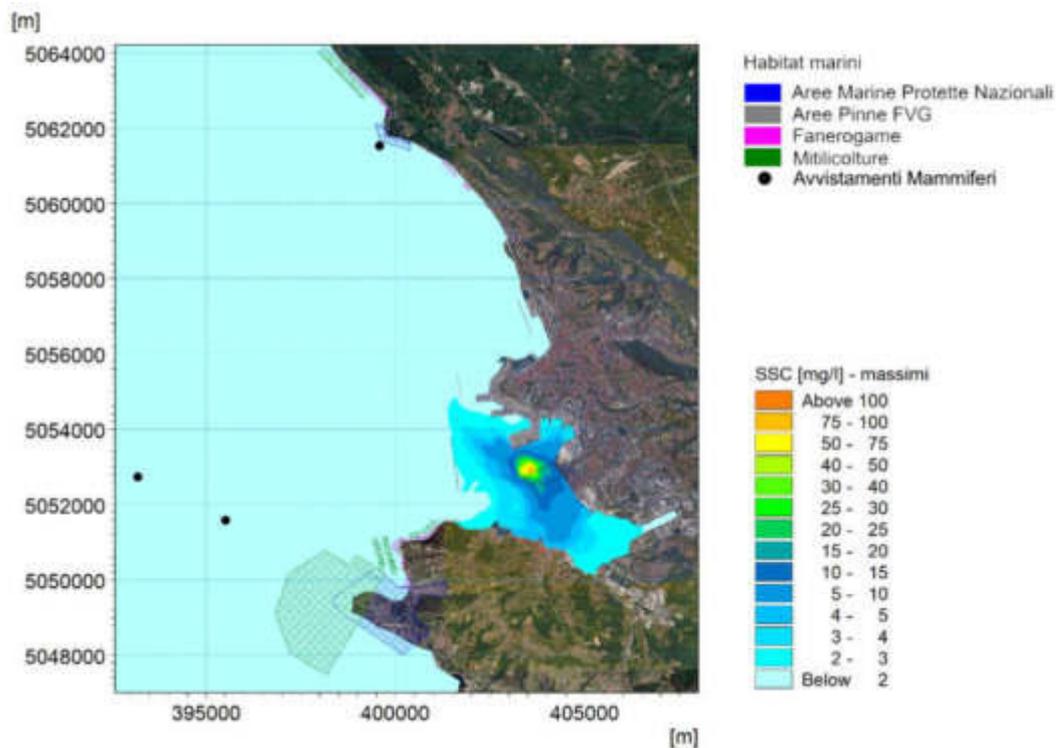


Figura 8-21 Massimi di concentrazione in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi autunnali

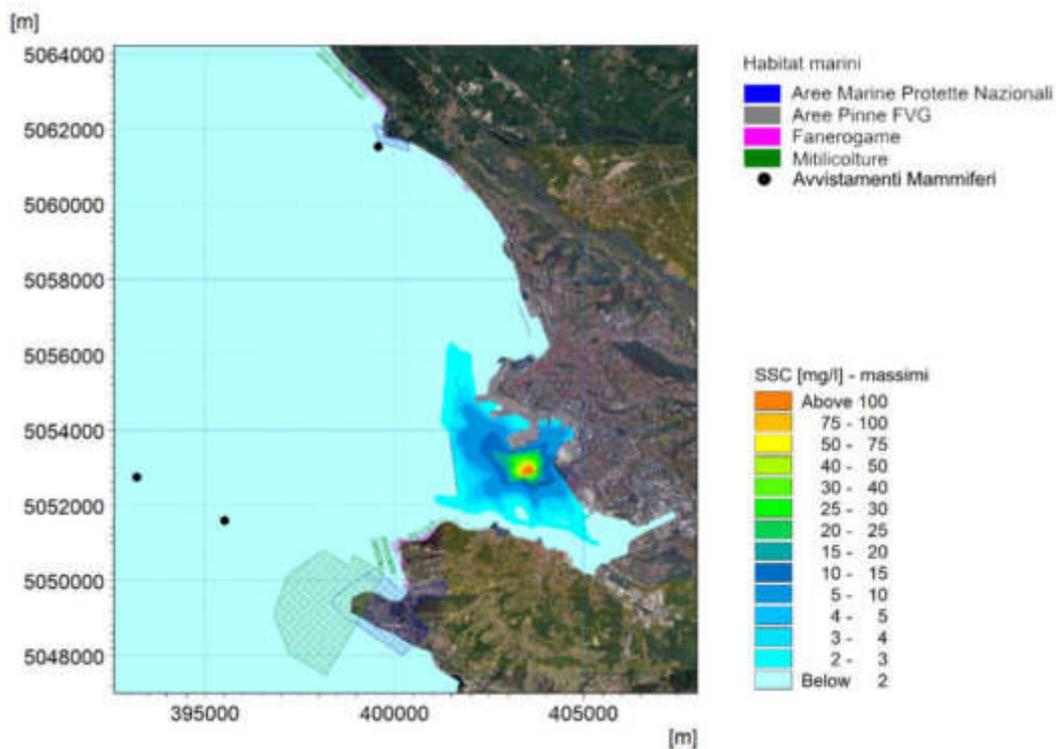


Figura 8-22 Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi estivi

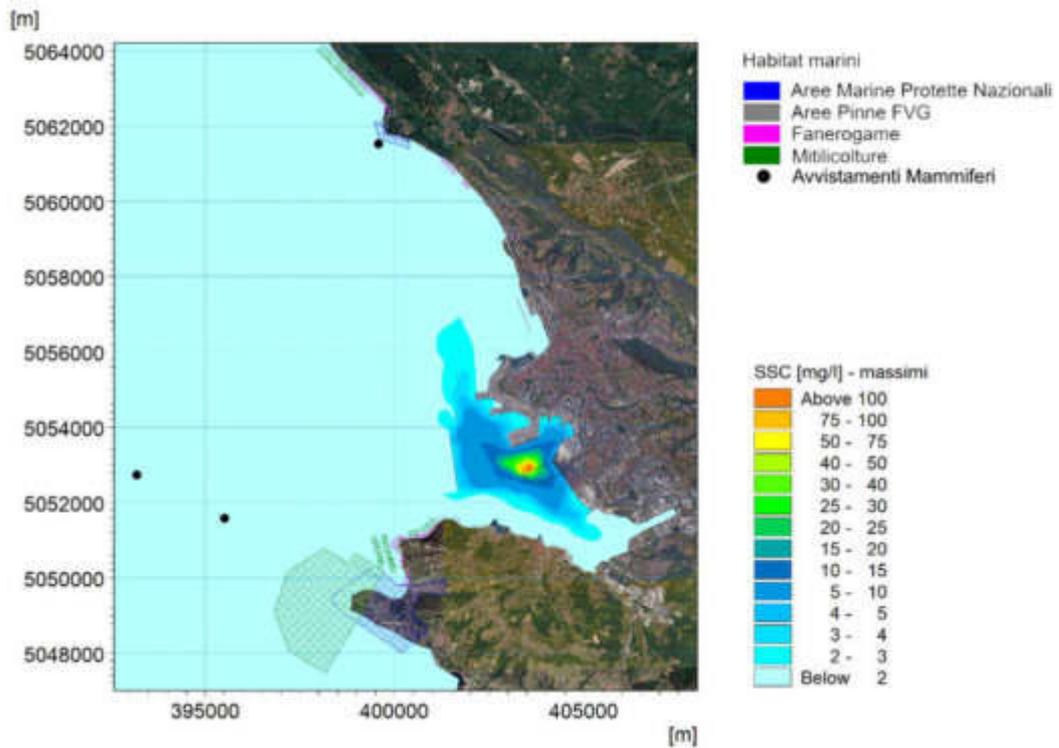


Figura 8-23 Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi primaverili

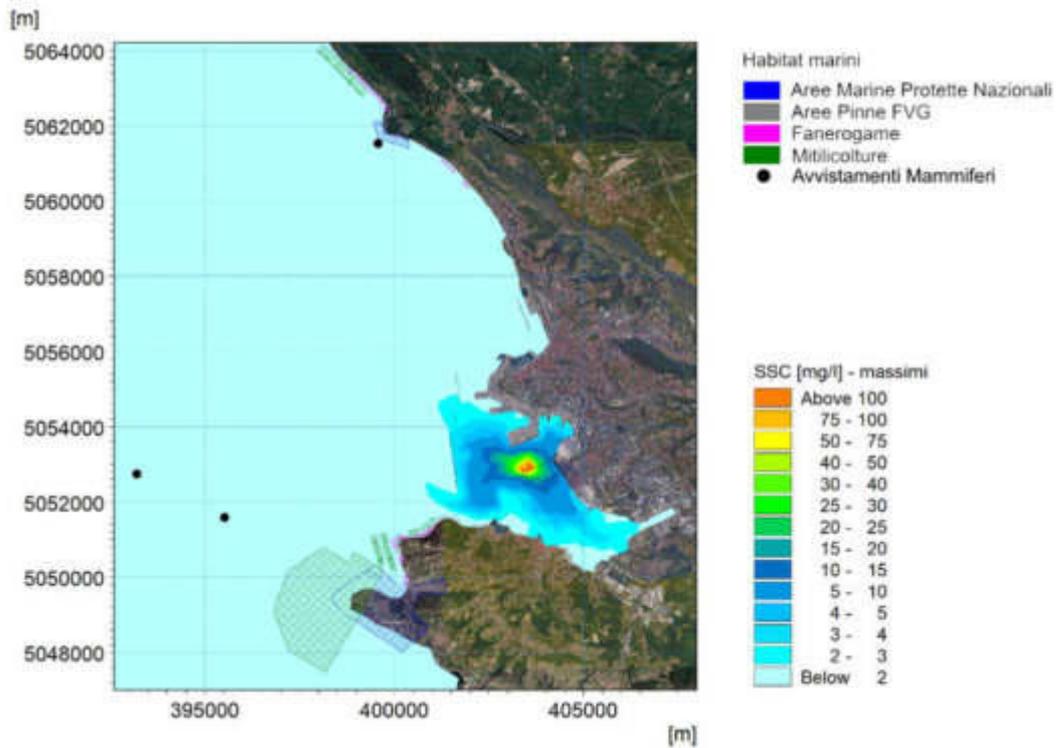


Figura 8-24 Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi invernali

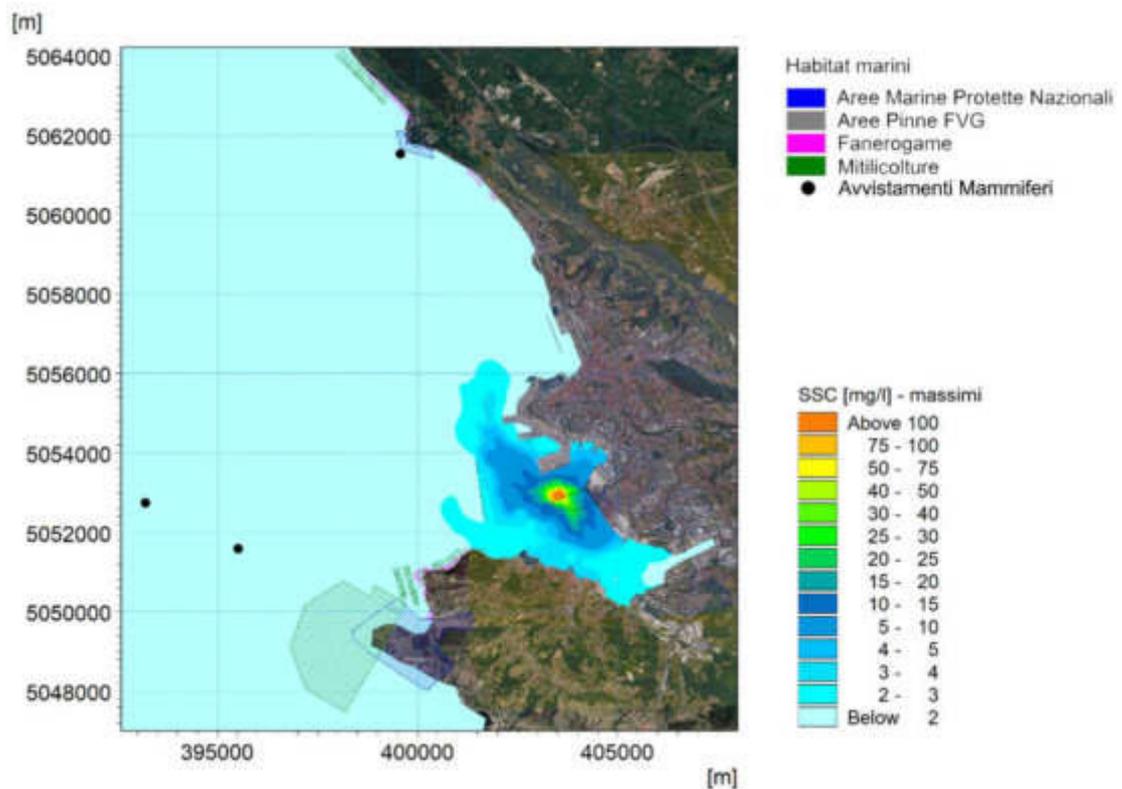


Figura 8-25 Massimi di concentrazione al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio – media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate per i mesi autunnali

Un altro importante risultato che è stato possibile ottenere grazie all'applicazione di modellistica numerica per una finestra temporale di lungo periodo è la persistenza di una data concentrazione di sedimento in una specifica area. Anche in questo caso si è fatto riferimento alla soglia di concentrazione pari a 2 mg/l e sono stati calcolati, in ogni zona del dominio di calcolo, i giorni durante il periodo di lavoro (ossia su un totale di 30 giorni) per i quali le concentrazioni di sedimento hanno superato tale soglia.

Facendo riferimento ai risultati ottenuti su base annuale in superficie (Figura 8-26) si osserva che nel bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami le concentrazioni sono maggiori di 2 mg/l per un periodo superiore a 3 giorni sui 30 giorni di durata delle operazioni. Il bacino delimitato dal Molo VII presenta invece una persistenza della concentrazione di riferimento superiore a 6 ore. La fascia costiera a Sud, fino al Porto di San Rocco, è invece caratterizzata da una persistenza variabile tra 3 ore e 24 ore. Nelle zone circostanti le dighe si verifica una concentrazione superiore a 2 mg/l per un tempo inferiore alle 3 ore.

Gli stessi risultati per il livello di fondo (Figura 8-28) mostrano una situazione analoga, ma con tempi di persistenza superiori rispetto alla superficie. Nel bacino dell'Arsenale S. Marco e dello Scalo Legnami le concentrazioni sono maggiori di 2 mg/l per un periodo di tempo compreso tra 3 e 6 giorni, mentre nel bacino delimitato dal Molo VII il tempo di persistenza è compreso tra 1 e 3 giorni. I risultati lungo la fascia costiera a Sud sono analoghi a quelli in superficie, mentre nelle zone a ridosso alle dighe si verifica una concentrazione superiore a 2 mg/l per un tempo massimo di 24 ore.

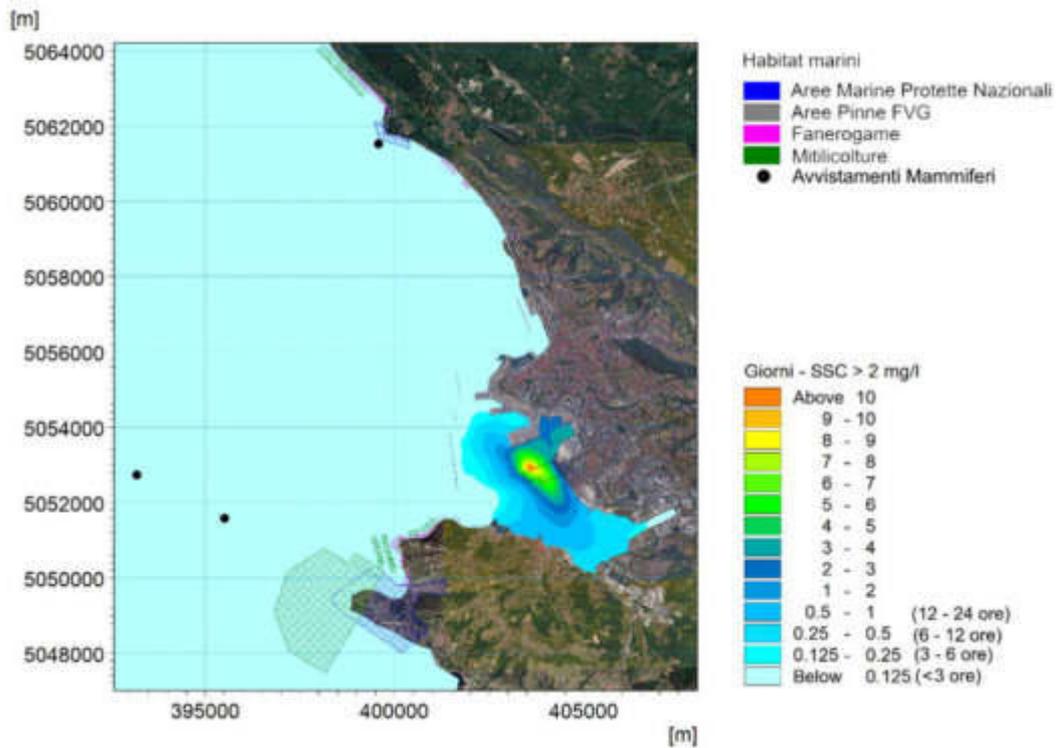


Figura 8-26 Tempo di persistenza in giorni di concentrazione superiore a 2 mg/l in superficie a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

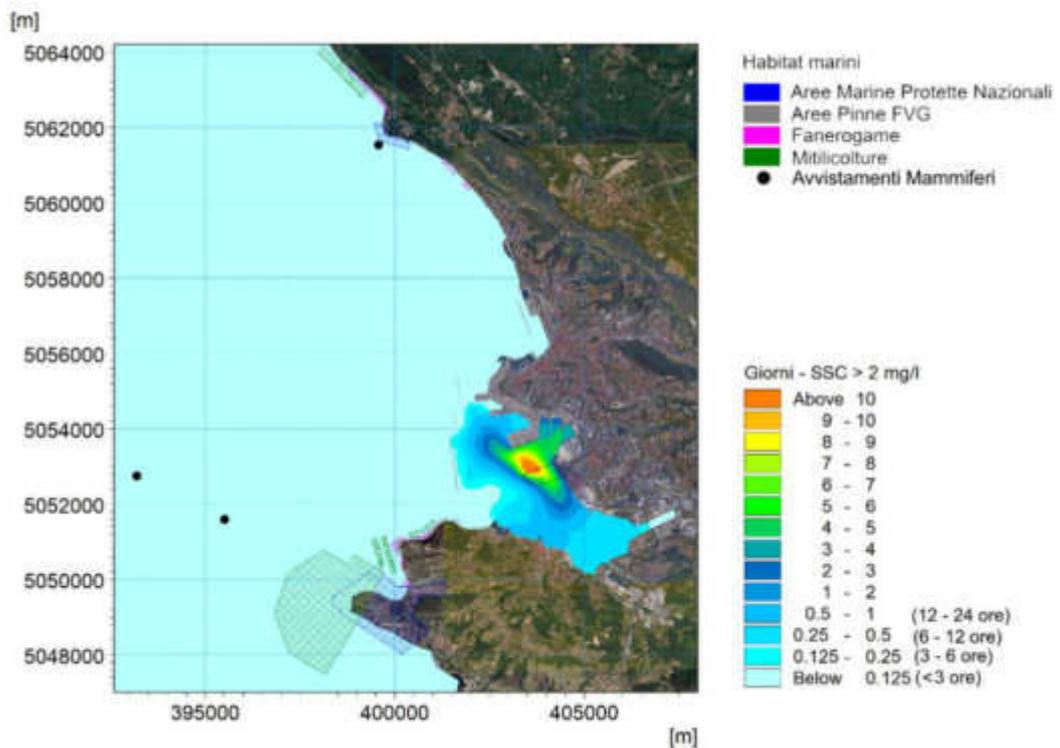


Figura 8-27 Tempo di persistenza in giorni di concentrazione superiore a 2 mg/l a metà colonna a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

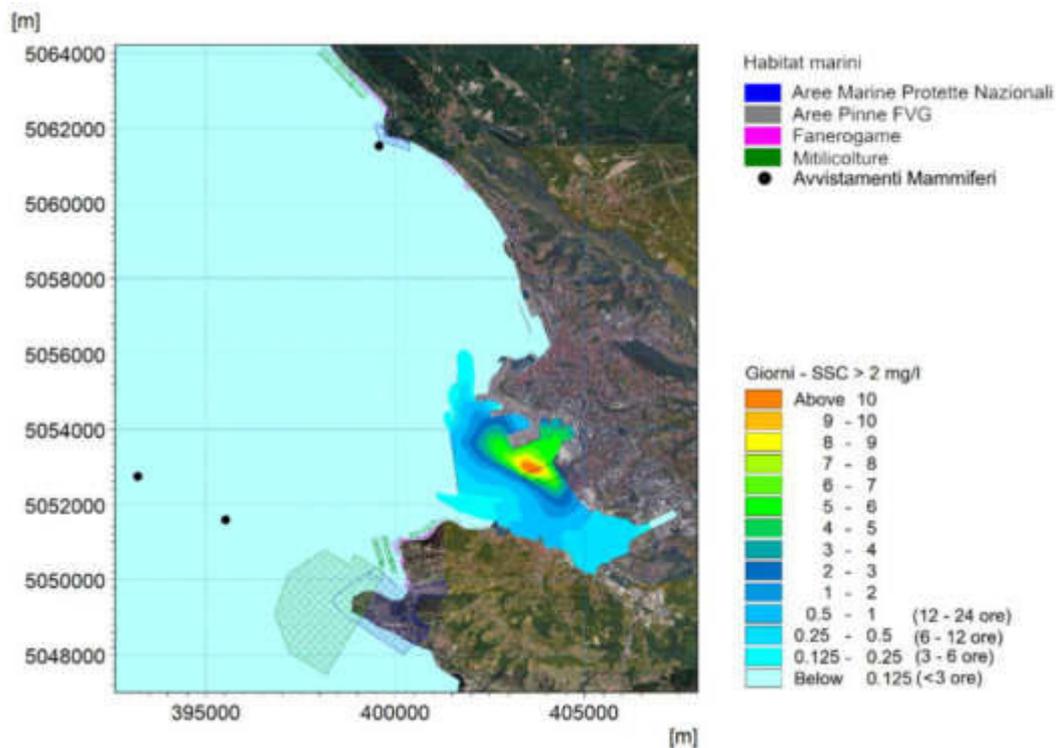


Figura 8-28 Tempo di persistenza in giorni di concentrazione superiore a 2 mg/l al fondo a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

I sedimenti che vengono risospesi sono per la maggior parte trasportati nella Baia, ma le frazioni grossolane, caratterizzate da una maggiore velocità di sedimentazione, tendono a sedimentare nell'intorno della zona di escavo. L'area interessata dalla deposizione è piuttosto modesta (Figura 8-29): un accumulo di sedimenti superiore a 0.5 mm si verifica in una zona con estensione pari a circa 1400 m in direzione parallela a costa e pari a circa 700 m nella direzione trasversale.

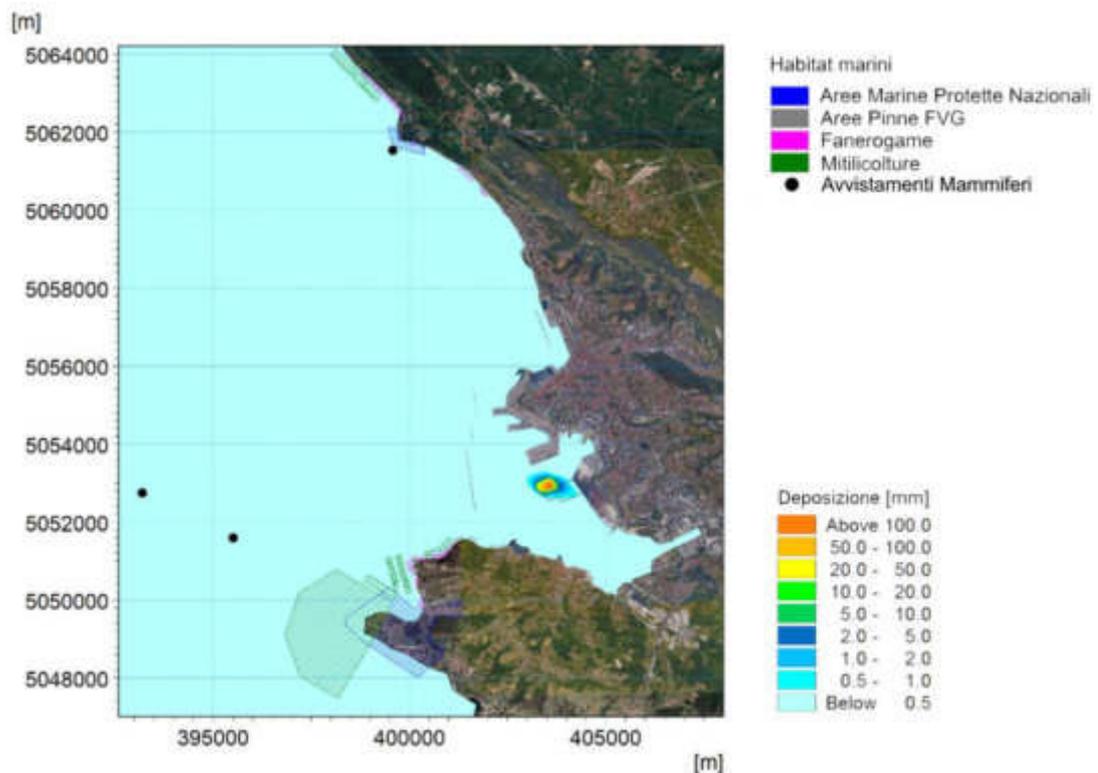


Figura 8-29 Accumulo massimo del sedimento depositato [mm] a seguito delle operazioni di dragaggio - media dei valori massimi di tutte le simulazioni effettuate (su base annuale)

La fase di dragaggio implica un volume di sedimento rilasciato in colonna d'acqua più elevato rispetto alla fase di realizzazione di pali: alla fine di ogni ciclo di lavoro rimane pertanto in sospensione una maggiore quantità di materiale tanto che, a seconda delle particolari condizioni idrodinamiche che si instaurano, la concentrazione può mantenersi superiore ai 2 mg/l anche quando riprendono le operazioni il giorno successivo. Nelle immagini che seguono è mostrato un esempio di evoluzione del pennacchio di torbida, mediante la rappresentazione di alcuni istanti temporali significativi. In particolare, in Figura 8-30 è mostrato l'istante temporale in cui le operazioni del giorno precedente sono terminate da 10 ore e stanno per iniziare quelle del giorno successivo. Si osserva che le concentrazioni di sedimento messo in sospensione durante le operazioni del giorno precedente sono in alcune zone superiori a 2 mg/l. Questa coda del pennacchio si è tuttavia allontanata dalla zona di cantiere e, pertanto, il pennacchio di torbida generato dalle nuove operazioni non è in grado di sovrapporsi a quello precedente (Figura 8-31). E' possibile pertanto affermare che al termine della giornata di dragaggio i sedimenti rimasti in sospensione siano solo quelli relativi al medesimo giorno di lavoro (Figura 8-32). Nuovamente, ad 1 ora dall'inizio del turno di lavoro del giorno successivo (Figura 8-33), il pennacchio di torbida s'è ridotto notevolmente e s'è spostato rispetto alla zona dragata, anche se permane una zona con concentrazioni superiori a 2 mg/l. Anche in questo caso i due pennacchi di concentrazione non si sovrappongono.

E' pertanto possibile affermare che, in generale, durante le operazioni di dragaggio gli effetti di sovrapposizione di cicli lavorativi successivi sono molto ridotti, non trascurabili solo in caso di condizioni di basso idrodinamismo, durante le quali parte del sedimento è in grado di permanere

più a lungo in colonna d'acqua nei pressi del cantiere. La permanenza del sedimento nei pressi dell'area di cantiere rappresenta tuttavia una condizione favorevole rispetto ai potenziali impatti ambientali sui target sensibili, tutti non prossimi all'area di lavoro.

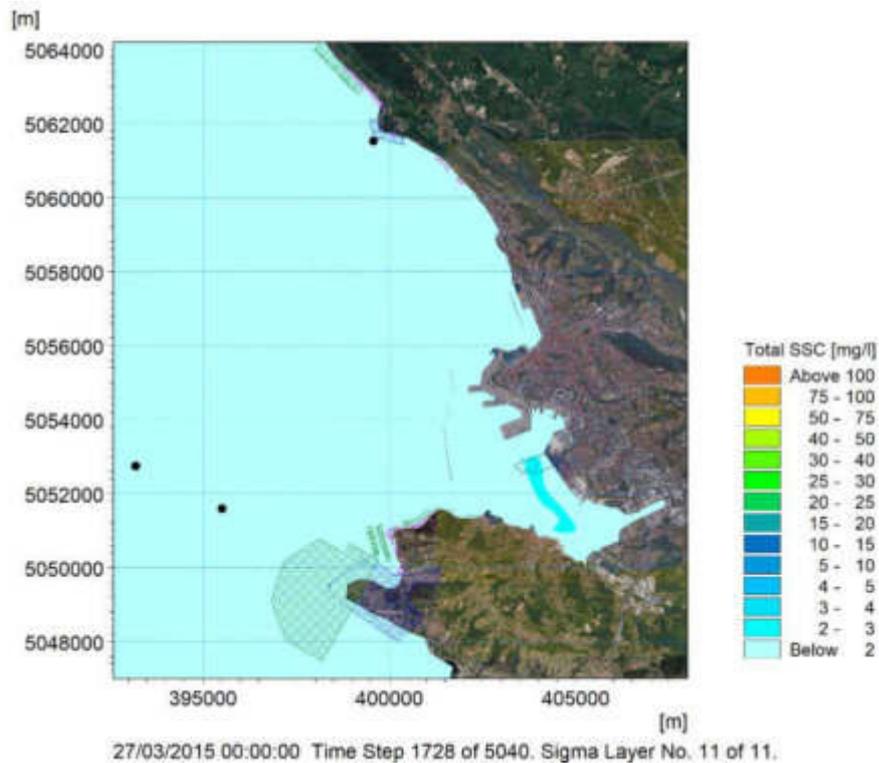


Figura 8-30 Esempio di pennacchio di torbida in superficie in concomitanza con l'inizio delle operazioni di dragaggio e a 10 ore dalla fine delle operazioni del giorno precedente

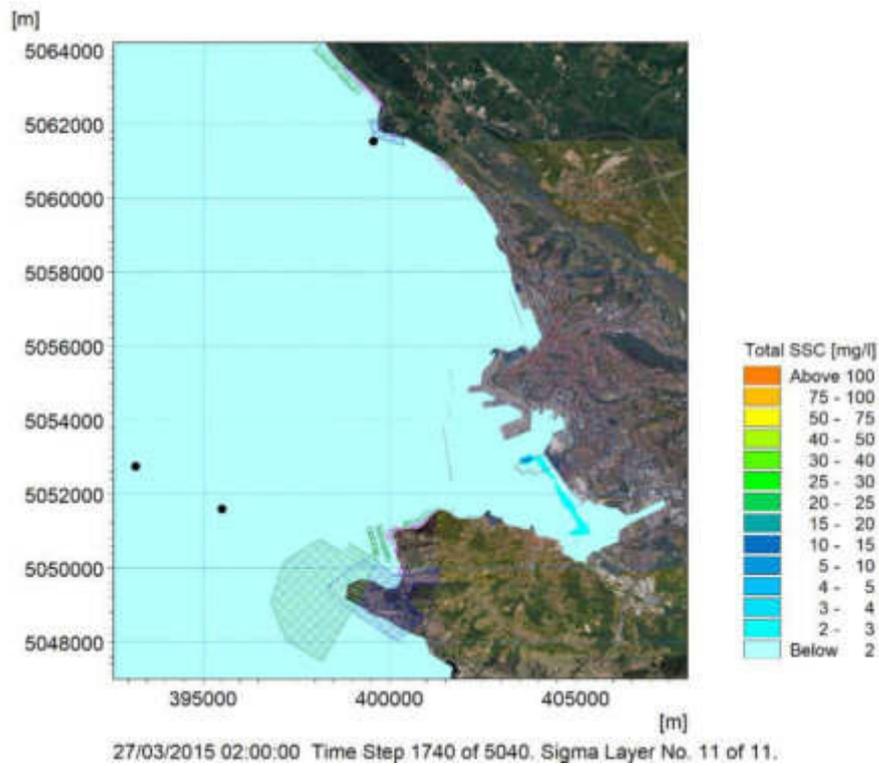


Figura 8-31 Esempio di pennacchio di torbida in superficie dopo 10 ore dall'inizio delle operazioni

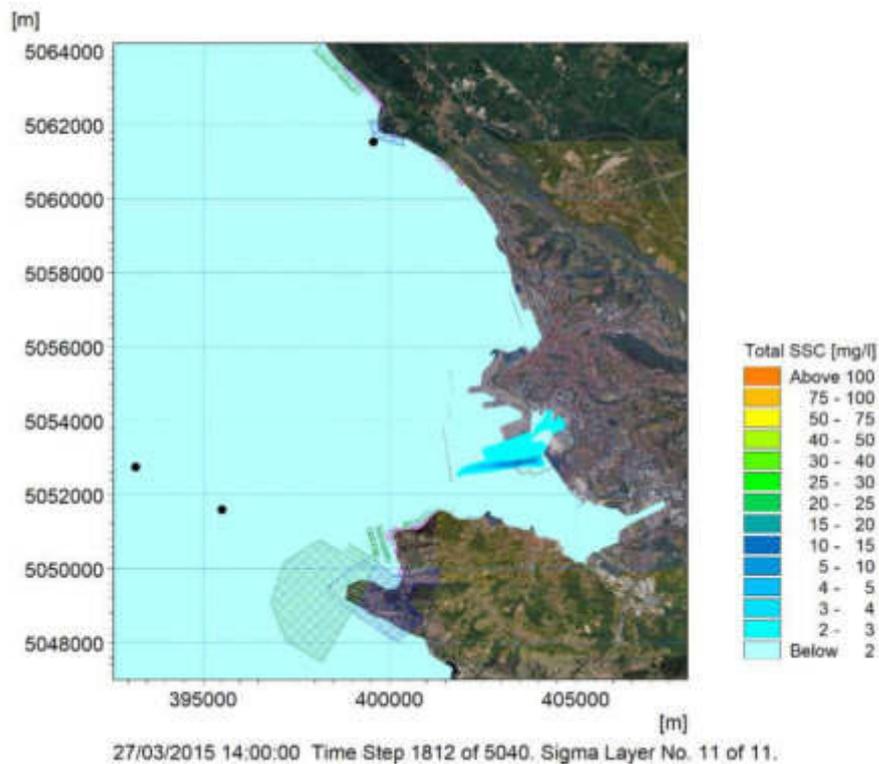


Figura 8-32 Esempio di pennacchio di torbida in superficie dopo 14 ore, alla fine delle operazioni

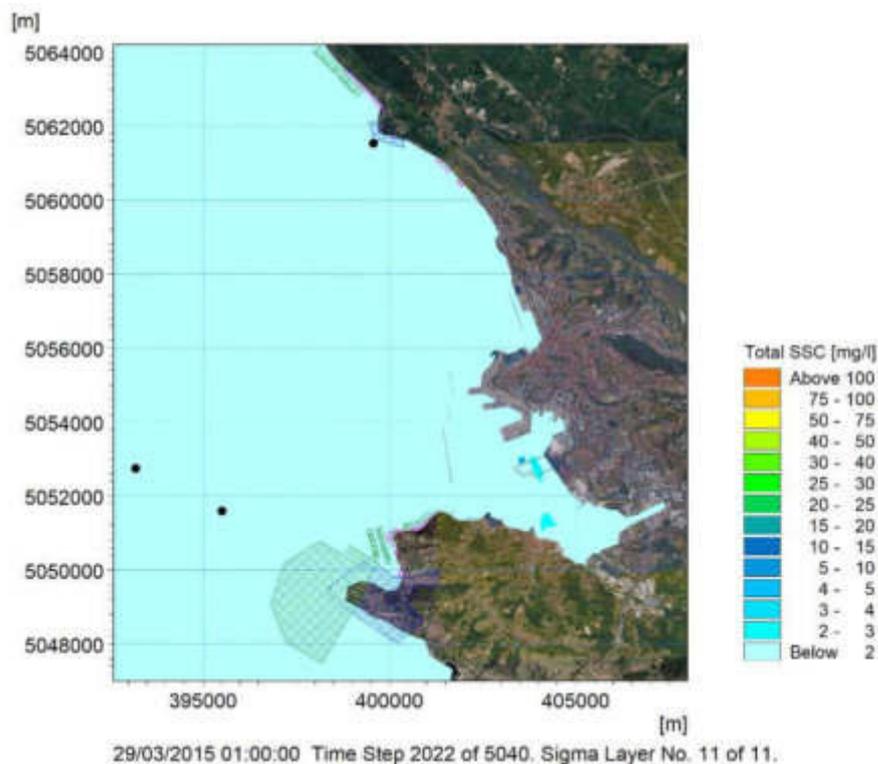


Figura 8-33 Esempio di pennacchio di torbida in superficie dopo 11 ore dalla fine delle operazioni e nuovo ciclo di lavoro iniziato da 1 ora

Di particolare interesse è inoltre la verifica di quali condizioni meteomarine risultino più svantaggiose per le operazioni, ossia quelle che potrebbero creare una circolazione tale da indurre concentrazioni non trascurabili di sedimenti nelle aree ove sono presenti gli habitat marini di interesse.

Come già riportato in precedenza, la forzante che maggiormente influenza la circolazione interna ad un bacino chiuso come quello di Muggia è il vento; pertanto, l'analisi è stata predisposta in riferimento alla variabilità di tale forzante.

In particolare, in considerazione della posizione degli habitat marini di interesse (sezione 3.1), localizzati nella zona Sud-Ovest della baia, e dell'analisi anemometrica condotta (sezione 3.6), è stata valutata come condizione di vento più svantaggiosa quella di Bora, che presenta i venti più intensi, più frequenti, nonché quelli che tendono a sospingere i sedimenti verso le aree target.

Con riferimento agli ultimi 10 anni di dati di vento (velocità e direzione) disponibili per la stazione meteo ARPA FVG "Molo Fratelli Bandiera" (periodo dal 2011 al 2021) sono stati simulati gli effetti di un vento di Bora intenso, caratterizzato da un percentile di frequenza del 99.8%, corrispondente ad un evento superato mediamente poco meno di un giorno all'anno. L'intensità del vento associata a tale frequenza è risultata pari a 24.2 m/s.

Tale evento è stato quindi simulato con un modello idrodinamico MIKE 3 HD avente quale unica forzante il vento, assunto costante per 24 ore. Successivamente, è stata simulata una

giornata di operazioni, come ipotizzate alla sezione 8.4.1, mediante l'applicazione del modello MIKE 3 MT dinamicamente accoppiato al modulo idrodinamico. Questa analisi ha pertanto permesso di individuare il pennacchio di sedimenti in condizioni di vento costante di elevata intensità e proveniente da Bora. I risultati, mostrati in Figura 8-34 per lo strato superficiale, dove l'azione del vento è massima, mostrano che in corrispondenza degli habitat marini sensibili le concentrazioni si mantengono comunque ben al di sotto della soglia di 2 mg/l.

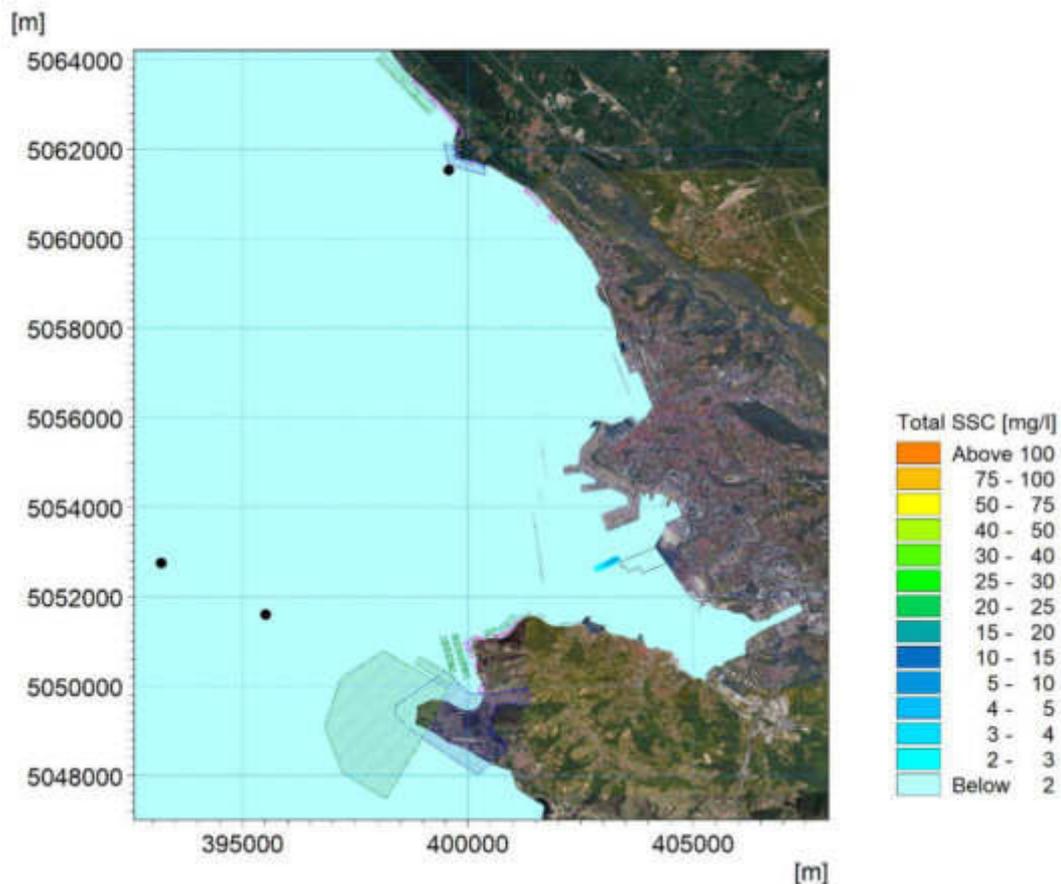


Figura 8-34 Concentrazione di sedimento in superficie a seguito di un giorno di operazioni di dragaggio in condizioni idrodinamiche generate da un vento di Bora costante per 24 h con velocità pari a 24.2 m/s

A completamento dell'analisi, per comprendere quali condizioni meteomarine siano in grado di determinare concentrazioni di sedimento elevate nelle aree target, sono state estratte da tutte le simulazioni di MIKE 3 MT, che complessivamente coprono il periodo di un anno, i valori di concentrazione di sedimento sospeso (SSC) in alcuni punti ove sono presenti gli habitat (Figura 8-35). Si evidenzia che i valori di SSC si mantengono sempre al disotto dei 3 mg/l e che sono in generale superiori in corrispondenza delle aree localizzate a Sud. Infatti, nelle zone lungo la costa a Nord-Est ove sono presenti le fanerogame e l'area protetta di Miramare, i valori di concentrazione sono sempre al di sotto di 0.5 mg/l.

La Figura 8-35 mostra inoltre che il valore massimo di concentrazione di sedimenti si verifica a fine Dicembre 2014, soprattutto laddove è presente la *pinna nobilis*, lungo la costa Sud della baia di Muggia, in prossimità della bocca di entrata.

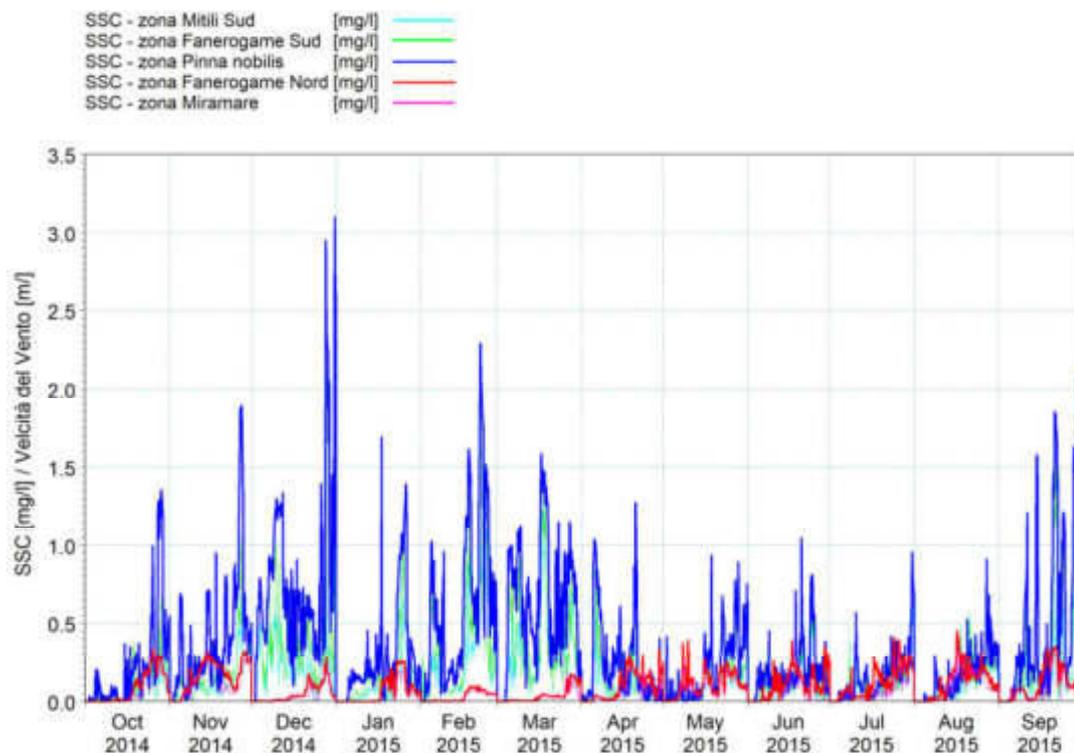


Figura 8-35 Variabilità delle concentrazioni di sedimento in sospensione durante le operazioni di dragaggio (intero periodo simulato, da Ottobre 2014 a Settembre 2015) in alcuni punti in corrispondenza degli habitat marini di interesse

Mettendo in correlazione questi andamenti di concentrazione di sedimento sospeso con le condizioni di vento (Figura 8-36), si osserva che non esiste una forte correlazione tra i picchi di concentrazione e le velocità del vento più elevate. Ad esempio, il 5 Febbraio 2015, quando si verifica il vento più intenso registrato per quell'anno, pari a 27.5 m/s proveniente da Bora, che si mantiene al disopra dei 15 m/s per circa 2 giorni e mezzo, i valori di SSC modellati nei punti target risultano al di sotto di 1 mg/l.

Se, viceversa, si osservano gli istanti in cui si verificano i valori massimi di SSC in corrispondenza degli habitat, si evince che le condizioni di vento potenzialmente più sfavorevoli si presentano quando, dopo un lungo periodo di vento poco intenso e, quindi, di basso idrodinamismo, si presenta una condizione di vento forte. Un chiaro esempio si riscontra a Dicembre 2014 (Figura 8-37): per poco più di 11 giorni si ha il perdurare di venti molto bassi, mediamente pari a 2 m/s. Questa condizione fa sì che i sedimenti che vengono messi in sospensione durante le operazioni di dragaggio permangano più a lungo all'interno della baia. Quando, il 28 Dicembre, si presenta un vento intenso (pari a circa 18-20 m/s) da Bora, che perdura per qualche ora, si crea una circolazione tale da trasportare verso la zona degli habitat non solo i sedimenti messi in sospensione in quelle ore, ma anche una certa quantità di sedimento che si era accumulata precedentemente. Questa situazione, comunque rara, porta comunque a valori massimi di concentrazione in corrispondenza degli habitat (in particolare nella zona ove è presente la *pinna nobilis*) molto bassi, pari a circa 3 mg/l e per una finestra temporale di poche ore.

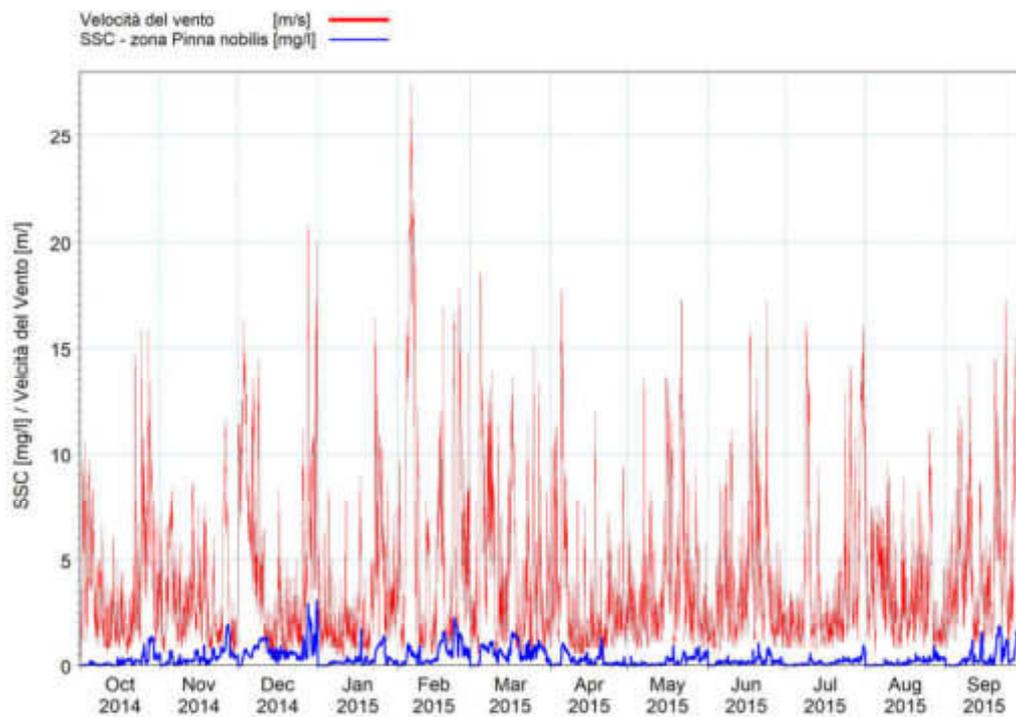


Figura 8-36 Concentrazioni di sedimento in sospensione durante le operazioni di dragaggio (intero periodo simulato, da Ottobre 2014 a Settembre 2015) nella zona ove è presente la pinna nobilis (in blu) e velocità del vento (in rosso)

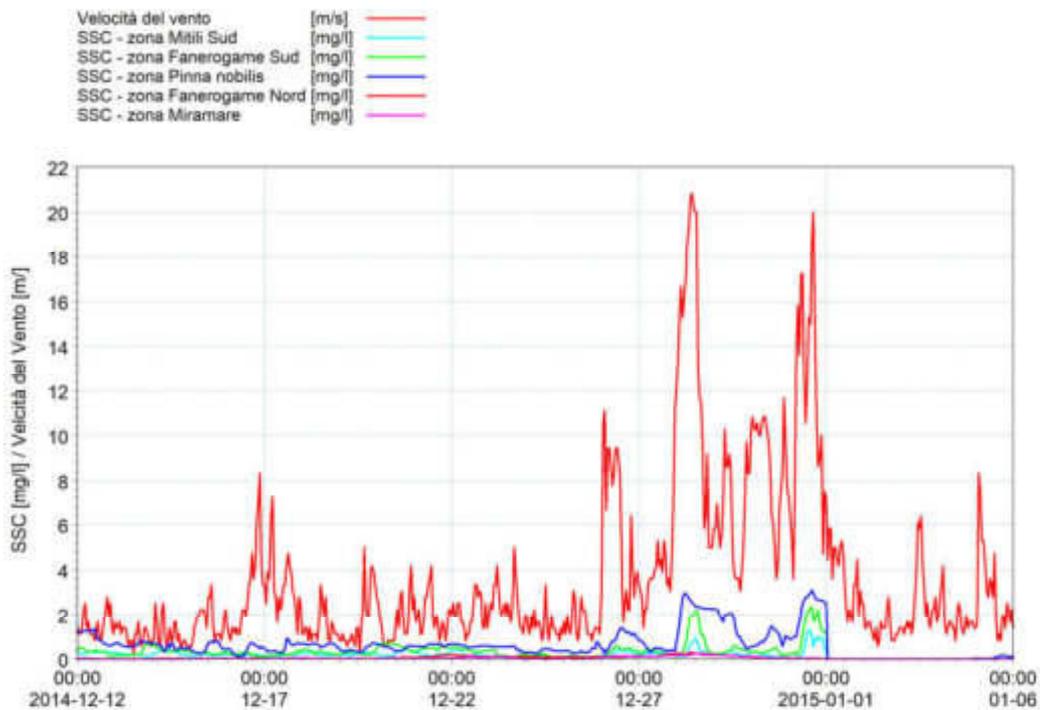


Figura 8-37 Concentrazioni di sedimento in sospensione durante le operazioni di dragaggio (intero periodo simulato, da Ottobre 2014 a Settembre 2015) in alcuni punti in corrispondenza degli habitat marini di interesse e velocità del vento (in rosso)

	Progetto integrato di messa in sicurezza, riconversione industriale e sviluppo economico produttivo nell'area della ferriera di Servola Relazione Tecnica	Pag. 144 di 157
--	--	--------------------

9 TENDENZE EVOLUTIVE DEL FONDALE. LA SEDIMENTAZIONE NEL PORTO DI TRIESTE

In questa sezione viene illustrata l'analisi delle tendenze evolutive dei fondali nella baia di Muggia, finalizzata a quantificare il rischio di progressiva sedimentazione nella porzione di fondale interessata dal dragaggio (area prospiciente il fronte Nord Ovest del nuovo piazzale in progetto).

A tale scopo, vengono di seguito riportate:

1. l'analisi delle tensioni tangenziali al fondo generate dalle correnti naturali, che determinano la messa in sospensione dei sedimenti costituenti il fondale;
2. alcune considerazioni fornite dal Piano Regolatore Portuale vigente;
3. l'analisi dell'evoluzione del fondale in corrispondenza di aree oggetto, in passato, di operazioni di escavo dei fondali.

9.1 Analisi delle tensioni tangenziali al fondo

Le correnti esercitano sul fondo delle tensioni tangenziali che sono tanto più elevate quanto maggiori sono le velocità; tali tensioni si definiscono "critiche" quando sono in grado di innescare la messa in sospensione del sedimento che compone il fondale. Il valore della tensione tangenziale critica dipende dal diametro mediano dei granuli e, nei contesti portuali, principalmente dal grado di consolidamento dei fondali: quanto meno consolidato è il fondale, tanto minore è il valore limite di tensione tangenziale per incipiente trasporto di sedimento.

La modellazione numerica applicata per lo studio dell'idrodinamica all'interno del bacino portuale di Muggia e per il trasporto dei sedimenti in seguito alle operazioni di realizzazione dei pali e di escavo del fondale ha permesso di quantificare anche le tensioni tangenziali al fondo in tutto il dominio di calcolo e per tutto il periodo studiato (Ottobre 2014 - Settembre 2015). I risultati, in termini di mappe bidimensionali tempo-varianti di tensione al fondo, sono stati opportunamente elaborati al fine di ottenere un'indicazione delle aree potenzialmente soggette a messa in sospensione del sedimento, sempre in riferimento alle forzanti naturali considerate. A tale scopo è stata ricavata una mappa dei tempi di superamento (durante l'anno studiato) di un valore soglia di tensione critica al fondo. Tale valore soglia è stato qui assunto molto basso, pari a 0.03 N/m^2 . Da indicazioni di letteratura [30] [31], tale valore rappresenta il valore minimo di tensione al fondo per il quale si può verificare l'incipiente trasporto in condizioni di fondali scarsamente consolidati, quali quelli portuali.

In Figura 9-1 è rappresentato il numero di giorni annui durante i quali la tensione al fondo generata dalle forzanti naturali supera il valore soglia di 0.03 N/m^2 e, pertanto, il periodo di tempo durante il quale la corrente è potenzialmente in grado di movimentare i sedimenti.

I risultati mostrano che le correnti al fondo hanno una limitata capacità di messa in sospensione dei sedimenti al fondo, concentrata prevalentemente nelle aree in cui si presenta un generale maggiore idrodinamismo, ossia in corrispondenza delle bocche portuali e lungo la costa meridionale della baia, laddove i fondali sono più bassi. In corrispondenza della zona dove è previsto il dragaggio, la tensione tangenziale al fondo generata dalle correnti si mantiene generalmente al di sotto del valore critico di 0.03 N/m^2 fatta eccezione per alcune ore all'anno.

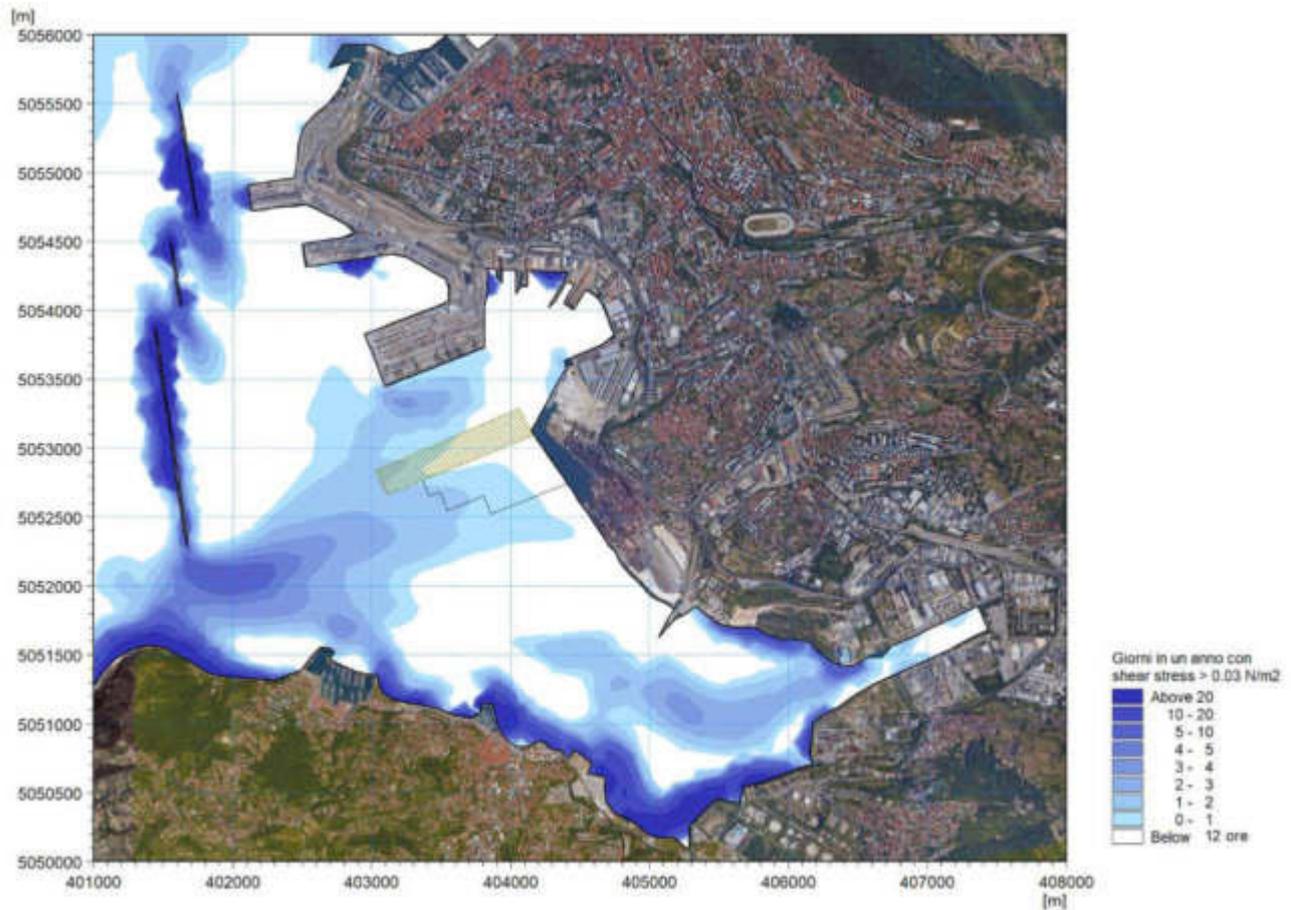


Figura 9-1 Mappa dei tempi di superamento del valore di tensione critica al fondo (qui ipotizzata pari a 0.03 N/m²)

L'estrazione dei valori di tensione tangenziale al fondo durante tutto l'anno simulato in alcuni punti all'interno dell'area in cui è previsto il dragaggio (poligono retinato in Figura 9-1) mette infatti in evidenza valori estremamente bassi, per la maggior parte del tempo inferiori a 0.02 N/m² (Figura 9-2). In particolare, solo in tre eventi (Ottobre 2014, Febbraio 2015, Giugno 2015) il valore di tensione critica risulta eccedere quello minimo per la movimentazione del sedimento.

Complessivamente, si può affermare pertanto che la circolazione nella baia di Muggia non è in grado di determinare movimentazioni significative di materiale. Il rischio di importanti accumuli di sedimenti nella zona dragata risulta pertanto trascurabile.

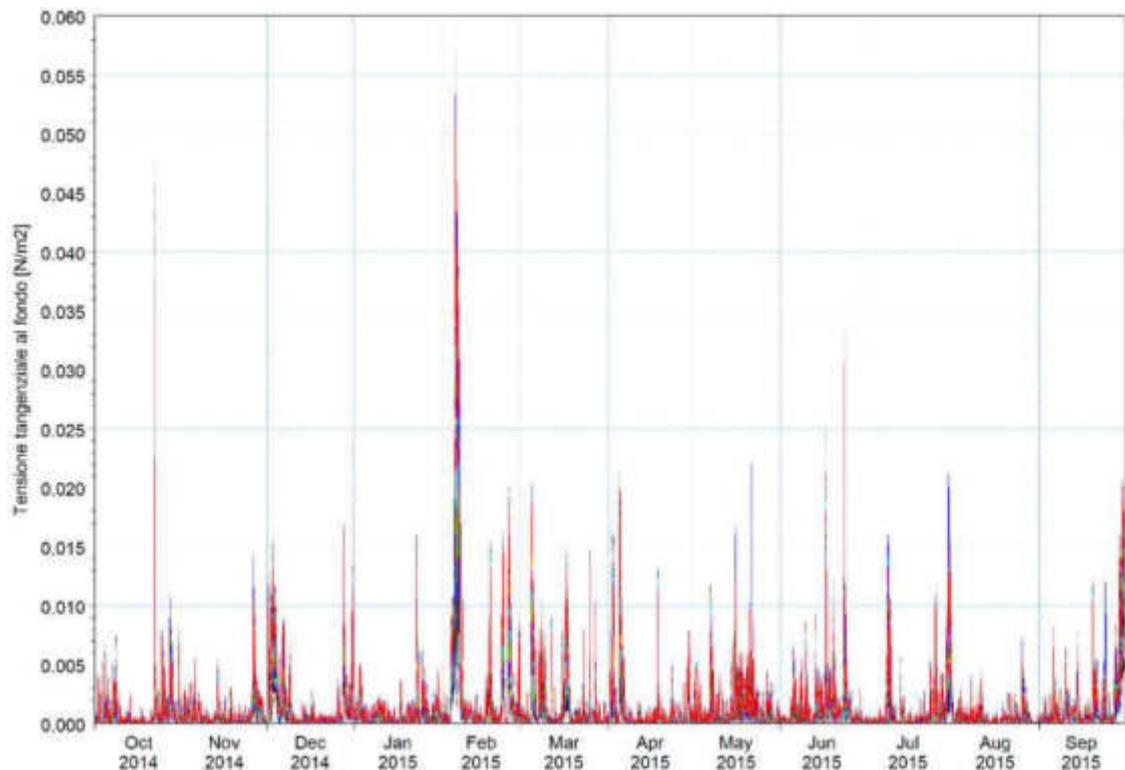


Figura 9-2 Valori di tensione tangenziale al fondo per il periodo Ottobre 2014-Settembre 2015 in alcuni punti all'interno dell'area in cui è previsto il dragaggio

9.2 Estratto dal Piano Regolatore Portuale vigente

Ad ulteriore conferma dell'analisi sopra riportata, si riporta a seguire un estratto dello "Studio Ambientale Integrato", facente parte del Piano Regolatore Portuale vigente per il Porto di Trieste [32]. Relativamente al bilancio dei materiali nell'ambito delle opere di grande infrastrutturazione, il documento di Piano riporta che *"i dragaggi prevedibili in ambito portuale sono meri dragaggi di approfondimento di zone da infrastrutturare ex novo o da potenziare, essendo il dragaggio di mantenimento praticamente inesistente in ambito portuale data la natura stabile dei fondali e l'assenza di significativi apporti da corsi d'acqua"*. Tale affermazione risulta pienamente in accordo con le risultanze dell'analisi delle tensioni tangenziali al fondo illustrata in precedenza.

9.3 Analisi dell'evoluzione del fondale in corrispondenza di aree oggetto di operazioni di escavo dei fondali

L'analisi delle variazioni batimetriche intervenute tra il 2008 (informazioni ricavate dalla Carta batimorfologica dell'Adriatico Settentrionale [33], Figura 9-3) e gli anni più recenti (2019, Figura 9-4 e 2021, Figura 9-5) mette in evidenza che gli approfondimenti del fondale si sono mantenuti nel tempo anche in assenza di interventi.

In particolare, la trincea scavata alcune decine di anni fa per accogliere condotte di grandi dimensioni (zona evidenziata in rosso in Figura 9-3) è ancora ben visibile, così come sono

osservabili i cumuli di materiale dragato accumulato a lato di tale scavo. Analoghe considerazioni possono essere fatte osservando l'evoluzione del fondale in corrispondenza dei pontili del terminale SIOT – Società Italiana Oleodotto Transalpino: l'approfondimento dei fondali, anch'esso datato ben oltre 10 anni fa e realizzato al fine di accogliere le navi ad elevato pescaggio (zona evidenziata in bianco in Figura 9-3) risulta pressochè inalterato. A tale proposito, l'Autorità di Sistema Portuale ha confermato l'assenza di interventi manutentivi almeno nell'ultimo decennio.

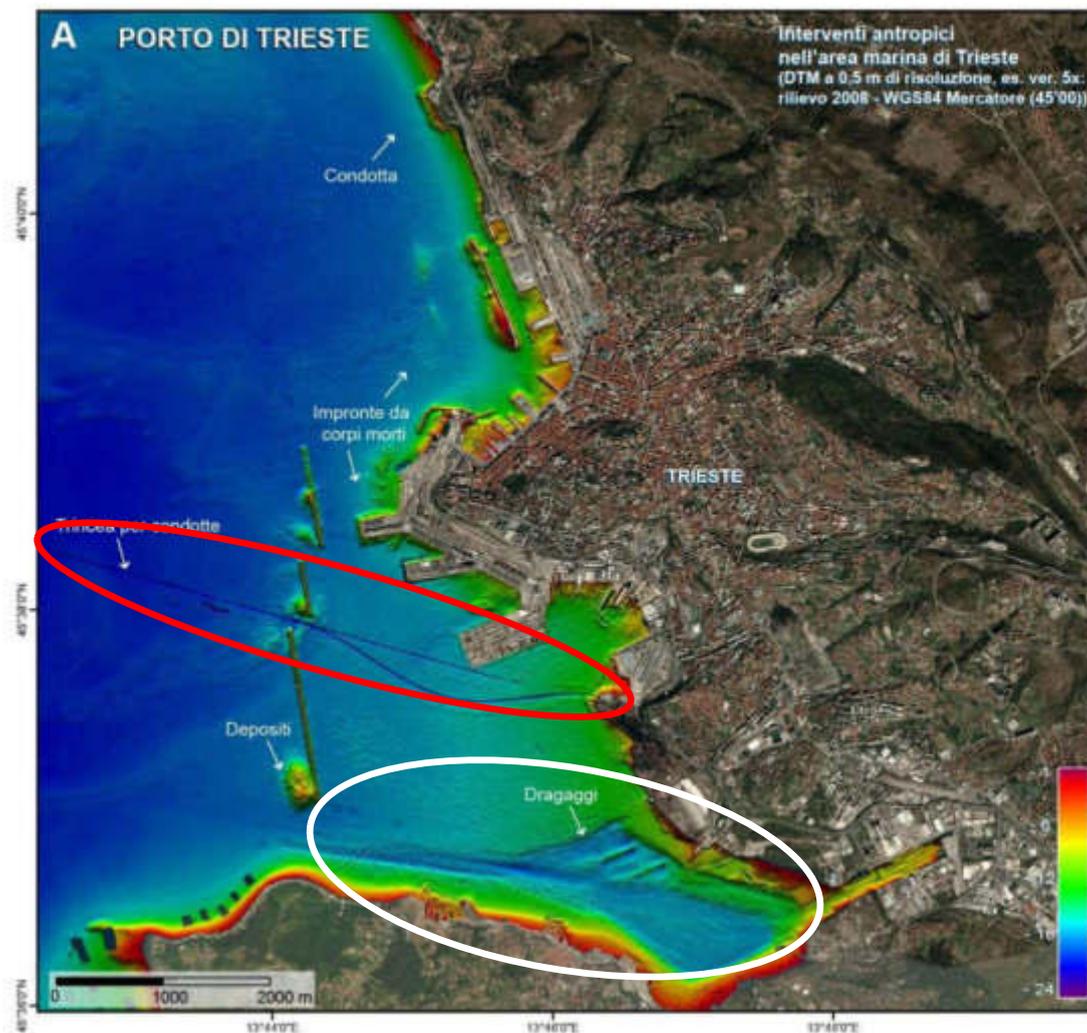


Figura 9-3 Carta batimorfologica dell'Adriatico Settentrionale, ottenuta dalle attività di studio del Progetto Bandiera RITMARE