

Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale

PORTI DI LA SPEZIA E MARINA DI CARRARA

Legge 84/94 e successive modifiche

Asp Sede: Via del Molo, 1/19126 LA SPEZIA (SP) Tel. +390187546320
AdSP Ufficio Territoriale: Viale Colombo, 6/ 54033 MARINA DI CARRARA (MS)
Tel. +390585782501 P.IVA: 01447450113 C.F.: 91091240118

DRAGAGGIO DEL 3° BACINO PORTUALE E DEL CANALE NAVIGABILE - 1° LOTTO FUNZIONALE

STAZIONE APPALTANTE

Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale

GRUPPO DI PROGETTAZIONE INTERNO

Ing. Davide Vetrà, RUP e Responsabile Settore Safety, Viabilità e Dragaggi

Ing. Mirko Leonardi, Dirigente Ufficio Energia ed Ambiente

SUPPORTO

Ing. Valeria Fanelli, Geom. Riccardo Guastini, Geom. Simone Moracchioli, P.I. Gian Luca D'Imporzano

Progetto di Fattibilità Tecnico Economica:

R.T.P. HYDROGEO INGEGNERIA Srl - HERA Srl - BIOSCIENCE RESEACH CENTER Srl

PROGETTO DI FATTIBILITÀ TECNICO ECONOMICA

A - ELABORATI GENERALI

A.02

RELAZIONE MODELLISTICA SULLA DINAMICA SEDIMENTARIA

REV.	DATA/DATE	DESCRIZIONE / DESCRIPTION				SCALA / SCALE
00	OTT. 2025	PRIMA EMISSIONE				---
						DATA / DATE
Redatto da:		VERIFICATO / VERIFIED		AUTORIZZATO / AUTHORIZED		
Ing. Andrea Benvenuti - Hydrogeo						
COD. LAV. / WORK'S CODE	FASE/PH. CODE	TIPO/TYP.	DOC. NUM.	DETAIL COD.	REV.	

INDICE

1. PREMESSA	7
2. INQUADRAMENTO DEL SITO DI INTERESSE	9
3. RACCOLTA E ANALISI DEI DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO.....	11
3.1 DATI TOPO-BATIMETRICI	11
3.2 DATI ATMOSFERICI.....	13
3.2.1 Rete Mareografica Nazionale.....	13
3.2.2 Portale MetOcean Data.....	16
3.3 DATI METEOCLIMATICI.....	17
3.3.1 Dati Portale Copernicus	17
3.3.2 Dati di marea	18
4. APPROCCIO METODOLOGICO	20
5. DEFINIZIONE DEI PERIODI DI RIFERIMENTO DEL CLIMA METEOMARINO.....	21
6. MODELLO IDRODINAMICO (HD) DI DOWNSCALING	26
6.1 MODELLAZIONE IDRODINAMICA HD	26
6.2 BATIMETRIA E DOMINIO DI CALCOLO	27
6.3 DISCRETIZZAZIONE VERTICALE	30
6.4 CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO.....	31
6.5 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE	32
6.5.1 Risultati della modellazione HD del periodo invernale	32
6.5.2 Risultati della modellazione HD del periodo estivo	38
7. MODELLO DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI (MT).....	45
7.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI	45
7.1.1 Batimetria e dominio di calcolo.....	45
7.1.2 Caratterizzazione del modello	46
7.1.3 Risultati della modellistica	50
7.1.4 Risultati della modellazione MT - LAVORI PRINCIPALI	52
7.1.5 Risultati della modellazione MT - LAVORI OPZIONALI	68
8. CONCLUSIONI	84
APPENDICI.....	85
APPENDICE A – COPERNICUS – EUROPE'S EYES ON EARTH	85
DATI SPAZIALI	85
COPERTURA DEI DATI	86
ATTORI DI COPERNICUS	86
COPERNICUS MARINE SERVICE (CMEMS).....	87
MERCATOR OCEAN INTERNATIONAL (MOI)	88
APPENDICE B – MODELLO HD	89
MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM - Hydrodynamic Module.....	89
Caratteristiche computazionali	91
Equazioni della modellistica	91
Tecniche risolutive	93
APPENDICE C – MODULO MIKE 21 - MUD TRANSPORT (MT)	94
MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Mud Transport Module	94

<i>Caratteristiche computazionali</i>	<i>95</i>
<i>Equazioni della modellistica</i>	<i>96</i>
<i>Deposizione</i>	<i>97</i>
<i>Erosione</i>	<i>97</i>
<i>Tecniche risolutive</i>	<i>98</i>

Indice delle figure

Figura 3.1 – Inquadramento geografico	9
Figura 3.2 – Areale oggetto delle operazioni di dragaggio	10
Figura 4.1 – Estensione del rilievo batimetrico multibeam di Co.I.mar.	11
Figura 4.2 – Estratto delle carte nautiche a disposizione	12
Figura 4.3 – Distribuzione spaziale dei dati all'interno del dominio di calcolo	12
Figura 4.4 – Stralcio Rada della distribuzione spaziale dei dati all'interno del dominio di calcolo	13
Figura 4.5 – Copertura della Rete Mareografica Nazionale (RAN) a sinistra, copertura della Rete Ondametrica Nazionale (RON) a destra	14
Figura 4.6 – Posizionamento della stazione ISPRA all'interno della rada del porto della Spezia	14
Figura 4.7 – Strumentazione a supporto della stazione di La Spezia. Da destra si riportano la stazione, l'asta idrometrica, l'idrometro galleggiante, il trasduttore di temperatura e l'anemometro ultrasonico	15
Figura 4.8 – Estensione dei due database: ERA5 a sinistra e CFSR a destra	16
Figura 4.9 – Estratto del portale MetOcean nella zona di interesse	17
Figura 4.10 – Estratto del Mediterranean Sea Physics Reanalysis	18
Figura 4.11 – Esempio della Componente M2	18
Figura 4.12 – Sistema di misurazione del satellite TOPEX/Poseidon	19
Figura 6.1 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2011	22
Figura 6.2 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2012	22
Figura 6.3 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2014	22
Figura 6.4 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2020	22
Figura 6.5 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2021	23
Figura 6.6 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2022	23
Figura 6.7 – Rosa dei venti per l'intera serie di riferimento (2010-2022)	23
Figura 6.8 – Rosa dei venti per le serie relative, rispettivamente, agli anni 2011, 2012, 2014, 2020, 2021 e 2022	24
Figura 6.9 – Rosa dei venti febbraio 2020	25
Figura 6.10 – Rosa dei venti agosto 2020	25
Figura 7.1 – Esempio di Flexible Mesh	28
Figura 7.2 – Distribuzione della risoluzione della mesh di calcolo del modello	28
Figura 7.3 – Suddivisione dominio di calcolo in sottodomini	28
Figura 7.4 – Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione	29
Figura 7.5 – Stralcio all'interno della Rada di La Spezia della batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione	30
Figura 7.6 – Principio di funzionamento della mesh tridimensionale	30
Figura 7.7 – Esempi di sigma layer	31
Figura 7.8 – Distribuzione delle condizioni al contorno nel dominio di calcolo	31
Figura 7.9 – Campo di velocità di corrente in superficie nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	32
Figura 7.10 – Campo di velocità di corrente a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	33
Figura 7.11 – Campo di velocità di corrente al fondo nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	33
Figura 7.12 – Campo di velocità di corrente in sezione verticale il giorno 11/02/2020	34
Figura 7.13 – Gradienti di temperatura in superficie nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	34
Figura 7.14 – Gradienti di temperatura a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	35
Figura 7.15 – Gradienti di temperatura al fondo nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	35
Figura 7.16 – Gradienti di temperatura in sezione verticale il giorno 11/02/2020	36
Figura 7.17 – Gradienti di salinità in superficie nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	36
Figura 7.18 – Gradienti di salinità a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	37
Figura 7.19 – Gradienti di salinità al fondo nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020	37
Figura 7.20 – Gradienti di salinità in sezione verticale il giorno 11/02/2020	38
Figura 7.21 – Campo di velocità di corrente in superficie nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	38
Figura 7.22 – Campo di velocità di corrente a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	39
Figura 7.23 – Campo di velocità di corrente al fondo nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	39
Figura 7.24 – Campo di velocità di corrente in sezione verticale il giorno 13/08/2020	40
Figura 7.25 – Gradienti di temperatura in superficie nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	40
Figura 7.26 – Gradienti di temperatura a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	41
Figura 7.27 – Gradienti di temperatura al fondo nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	41
Figura 7.28 – Gradienti di temperatura in sezione verticale il giorno 13/08/2020	42
Figura 7.29 – Gradienti di salinità in superficie nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	42
Figura 7.30 – Gradienti di salinità a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	43

Figura 7.31 – Gradienti di salinità al fondo nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020	43
Figura 7.32 – Gradienti di salinità in sezione verticale il giorno 13/08/2020	44
Figura 8.1 – Rappresentazione schematica dei processi simulati nel Modulo Mud Transport (MT) in MIKE 3.....	45
Figura 8.2 – Suddivisione dell'intervento in aree operative ed individuazione delle unità operative di riferimento (in rosso per i lavori principali, in verde per i lavori opzionali)	47
Figura 8.3 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale	52
Figura 8.4 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua	52
Figura 8.5 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo.....	53
Figura 8.6 – Unità operativa T11– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale	53
Figura 8.7 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo	54
Figura 8.8 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale	54
Figura 8.9 Unità operativa T11 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo	55
Figura 8.10 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale	56
Figura 8.11 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua	56
Figura 8.12 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo	57
Figura 8.13 – Unità operativa T11– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo	57
Figura 8.14 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo.....	58
Figura 8.15 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo	58
Figura 8.16 Unità operativa T11 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo	59
Figura 8.17 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale	60
Figura 8.18 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua	60
Figura 8.19 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo.....	61
Figura 8.20 – Unità operativa T11– Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale	61
Figura 8.21 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo	62
Figura 8.22 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale.....	62
Figura 8.23 Unità operativa T11 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo	63
Figura 8.24 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale	64
Figura 8.25 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua	64
Figura 8.26 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo.....	65
Figura 8.27 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo	65
Figura 8.28 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo.....	66
Figura 8.29 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo	66
Figura 8.30 Unità operativa T11 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo	67
Figura 8.31 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale	68
Figura 8.32 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua	68
Figura 8.33 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo.....	69
Figura 8.34 – Unità operativa T31– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale	69
Figura 8.35 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo	70
Figura 8.36 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale.....	70
Figura 8.37 Unità operativa T31 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo	71
Figura 8.38 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale	72
Figura 8.39 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua	72
Figura 8.40 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo.....	73

Figura 8.41 – Unità operativa T31– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo	73
Figura 8.42 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo.....	74
Figura 8.43 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo	74
Figura 8.44 Unità operativa T31 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo	75
Figura 8.45 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale	76
Figura 8.46 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua	76
Figura 8.47 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo.....	77
Figura 8.48 – Unità operativa T31– Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale	77
Figura 8.49 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo	78
Figura 8.50 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale.....	78
Figura 8.51 Unità operativa T31 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo	79
Figura 8.52 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale	80
Figura 8.53 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua	80
Figura 8.54 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo.....	81
Figura 8.55 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo	81
Figura 8.56 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo.....	82
Figura 8.57 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo	82
Figura 8.58 Unità operativa T31 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo	83
Figura A.1 – Attori di COPERNICUS	87
Figura A.2 – A sinistra: Esempio di flusso nella baia di Tampa (Florida), a destra: esempio di studio di circolazione termica	90
Figura A.3 –Esempio di diffusione di una singola componente nel mar Adriatico	90
Figura A.4 –A sinistra: Esempio di modello batimetrico di Taravao Bay (Tahiti), A destra: Applicazione dell'accoppiamento dei moduli HD,SW,ST nel porto di Torsminde (Danimarca)	91
Figura A.5 – Esempio di mesh non strutturate	92
Figura A.6 – Principio della mesh tridimensionale.....	93
Figura A.7 – Esempio di modellazione dei processi fisici	96
Figura A.8 – Il modulo MT è uno strumento per la gestione dei sedimenti in estuari complessi come la baia di San Francisco, California, USA.....	98
Figura A.9 – Principio della mesh tridimensionale.....	99

Indice delle tabelle

Tabella 4.1 – Monografia della Stazione ISPRA di La Spezia	14
Tabella 4.2 – Coordinate Geografiche della Stazione	15
Tabella 4.3 – Dotazioni della Stazione di La Spezia della Rete (RAN)	15
Tabella 4.4 – Serie di dati estratte dal Mediterranean Sea Physics Reanalysis.....	18
Tabella 6.1 – Serie di dati disponibili per Stazione ISPRA La Spezia	21
Tabella 6.2 – Analisi della serie di dati ISPRA La Spezia.....	21
Tabella 7.1 – Principali input del codice di calcolo di Mike 3D HD	27
Tabella 7.2 – Principali input del codice di calcolo	29
Tabella 8.1 – Dati sedimentologici in input al modello MT	46
Tabella 8.2 – Stralcio della Tabella SE.4 delle Linee Guida ISPRA: Parametri considerati per l'implementazione del termine sorgente associato a draga di tipo meccanico ed idraulico (Feola et al., 2016) e comparazione con i termini analoghi utilizzati da Becker et al., 2015 relativi a draga meccanica del tipo BHD e idraulica del tipo TSHD.....	48

1. PREMESSA

La presente relazione, redatta a supporto al progetto di fattibilità tecnico-economica (PFTE) degli “*Interventi di dragaggio nel Porto Mercantile della Spezia - Lotto funzionale n.1 - Terzo Bacino Portuale e Canale di ingresso*”, si pone lo scopo di illustrare i dati e le modellistiche implementate al fine di indagare la dispersione dei sedimenti messi in sospensione in occasione degli interventi di dragaggio dei fondali all'interno del porto mercantile della Spezia.

Il progetto riguarda il primo lotto funzionale degli interventi di manutenzione ed approfondimento del porto della Spezia, che interessa i fondali del Terzo Bacino portuale e del Canale di accesso nel porto, e risponde alle esigenze da parte dell'Autorità di Sistema Portuale del Mar Ligure Orientale di eseguire operazioni di dragaggio ed il conseguente adeguamento del fondale per garantire navigabilità e approdo delle navi in transito.

L'obiettivo finale da trapiantare prevede un livellamento dei fondali alla quota massima di -15,00 [m dal l.m.m.] nelle aree interne al Terzo Bacino portuale e lungo il Canale che, a partire dalla diga foranea del Golfo, consente l'accesso delle navi a tutti i bacini portuali.

Per l'esecuzione di tale intervento, da attuarsi per stralci successivi, si prevede un sistema di dragaggio dei fondali marini in grado di movimentare il materiale in esubero dalle aree di intervento ai siti di destinazione, ottenendo le quote batimetriche richieste, attraverso il caricamento del materiale di escavo a bordo di mezzi marittimi. L'intervento complessivo riguarda la movimentazione di circa 860'000 mc.

Le opzioni di gestione dei sedimenti, individuate sulla base dei risultati delle indagini chimico-ambientali eseguite ai sensi del D.M. 173/2016, risultano le seguenti:

- conferimento a mare (sedimenti classe A);
- conferimento alla Nuova Diga Foranea del Porto di Genova (sedimenti classe A -B-C- -D);
- conferimento a impianto di recupero/smaltimento via mare e/o via terra utilizzando, ove necessario, vasche di deposito temporaneo (sedimenti classe E e classe E riclassificabili in classe D).

Per una più agevole attuazione degli interventi, il progetto generale è stato suddiviso in:

- LAVORI PRINCIPALI, immediatamente realizzabili sulla base delle risorse finanziarie attualmente disponibili, che prevede il dragaggio per complessivi 300'000 mc circa;
- LAVORI OPZIONALI, di completamento al progetto, per il dragaggio di ulteriori 560'000 mc.

I LAVORI PRINCIPALI prevedono una gestione dei sedimenti con destinazione prevalente la Nuova Diga di Genova (circa 281'000 mc) e in via residuale il conferimento a impianto di recupero/smaltimento (circa 21'000 mc). Nei LAVORI OPZIONALI i siti di destinazione del materiale proveniente dalle operazioni di escavo sono la Nuova Diga di Genova (circa 192'000 mc), impianto di recupero/smaltimento (circa 103'000 mc) ed il conferimento a mare (circa 263'000 mc).

Per una dettagliata descrizione degli interventi e dei mezzi di cui è previsto l'utilizzo si rimanda all'elaborato A.01 – *Relazione Illustrativa*.

Scopo della presente relazione è:

- indagare le dinamiche di dispersione e l'evoluzione del pennacchio di torbida (plume) indotto dalle lavorazioni;
- indirizzare e validare il processo di cantierizzazione;
- dare un indirizzo al piano di monitoraggio per il controllo delle attività di dragaggio.

A tal fine, le attività svolte riportate nel presente elaborato riguardano:

- raccolta e analisi dei dati meteorologici, atmosferici e batimetrici disponibili per l'area di interesse;
- individuazione delle condizioni meteomarine e di circolazione rappresentative, ai fini delle dinamiche di dispersione dei sedimenti;
- studio della circolazione mediante l'applicazione del modello tridimensionale *MIKE 3 HD – Hydrodynamics* di DHI;
- studio della dispersione attesa di sedimenti messi in sospensione durante le operazioni di dragaggio del fondale tramite l'applicazione del modello tridimensionale *MIKE 3 MT – Mud Transport* di DHI;
- analisi dei risultati e conclusioni.

2. INQUADRAMENTO DEL SITO DI INTERESSE

La porzione di territorio oggetto di interesse è relativa al Porto della Spezia, situata all'estremità orientale del Mar Ligure Orientale, al confine tra la Regione Liguria e la Regione Toscana (Figura 2.1).

Il porto mercantile della Spezia riveste un ruolo di primaria importanza nel panorama nazionale del traffico delle merci: porto di 1° categoria e 1° classe, lo scalo spezzino si estende oggi da molo Enel, a levante, al molo Italia a ponente, lungo un tratto di costa di circa 3,0 Km a nord del Golfo della Spezia e occupa un'area di circa 550 mila metri quadrati. Il primo bacino portuale, compreso tra Calata Paita e Molo Garibaldi, serve banchine principalmente destinate a terminal multipurpose con conseguenti traffici di merci varie, in parte alla rinfusa ed in parte containerizzate, nonché, da marzo del 2013, di passeggeri provenienti da attività crocieristica. Il secondo ed il terzo bacino portuale sono invece asserviti a piazzali e banchine destinati quasi esclusivamente a terminal container (LSCT e Terminal del Golfo). Solamente la parte finale del porto mercantile, a levante, risulta destinata a terminal energetico, principalmente asservito al funzionamento della centrale Enel "Eugenio Montale" della Spezia. Gli accosti utili sono 20, distribuiti lungo oltre 4,5 km complessivi di banchina. I fondali che interessano detti accosti sono attualmente caratterizzati da profondità variabili da -10.00 [m] (zona crociere) a -15.00 [m] nel bacino di evoluzione e lungo gli accosti del molo Fornelli.

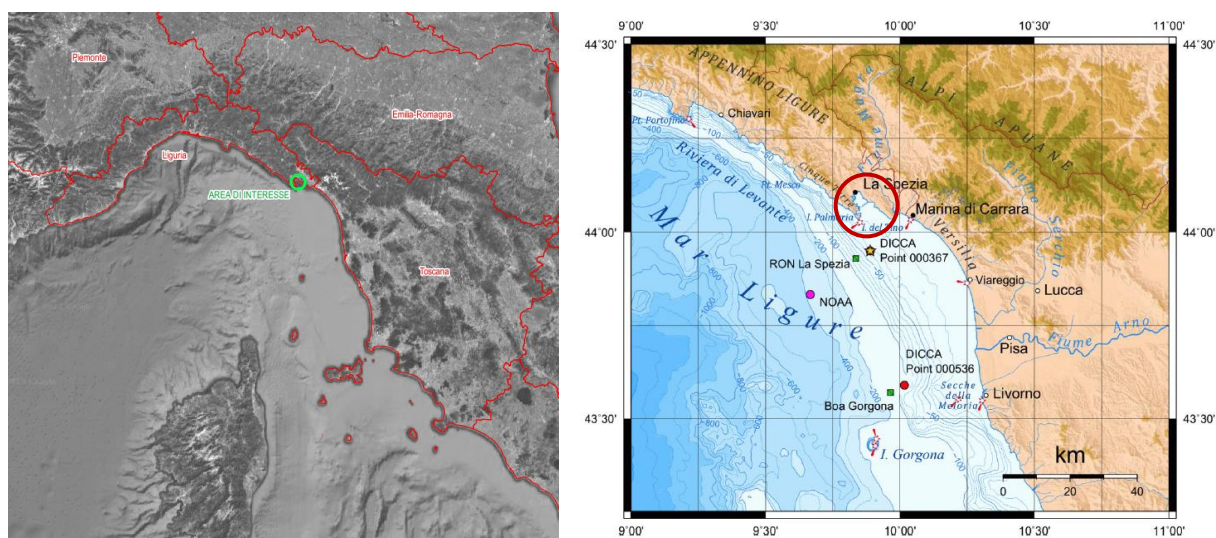


Figura 2.1 – Inquadramento geografico

All'interno della rada del porto della Spezia sono da effettuarsi operazioni di dragaggio del fondale al fine di garantire la navigabilità (Figura 2.2), così come descritto nell'elaborato A.01 – *Relazione Illustrativa*. A supporto di tali operazioni è stata implementata la modellistica, descritta nei prossimi capitoli, allo scopo di indagare la propagazione del pennacchio di torbida che le operazioni comportano.



Figura 2.2 – Areale oggetto delle operazioni di dragaggio

3. RACCOLTA E ANALISI DEI DATI DEL QUADRO CONOSCITIVO

Nel presente capitolo vengono descritti ed analizzati i dati che costituiscono il quadro conoscitivo delle analisi. In particolare, al fine di implementare lo studio sono stati utilizzati i seguenti dati:

- dati topo-batimetrici
- dati climatici atmosferici
- dati del clima meteomarinario

che saranno oggetto di descrizione nei paragrafi seguenti.

3.1 DATI TOPO-BATIMETRICI

A supporto della modellazioni è stato elaborato un modello digitale del fondale marino. All'interno della rada tale batimetria si è basata su un rilievo di dettaglio fornito dalla committenza derivante dal *"Rilievo Batimetrico Multibeam dei fondali interni al Golfo della Spezia, compresi tra la diga foranea e la costa"* di gennaio/febbraio 2019 redatta da Co.I.mar. S.r.l.

Tale batimetria, parzialmente consultabile nell'elaborato D.01 – *Planimetria Stato Attuale*, è stata utilizzata per definire il modello digitale del fondale della rada, riportato in stralcio in Figura 3.1.

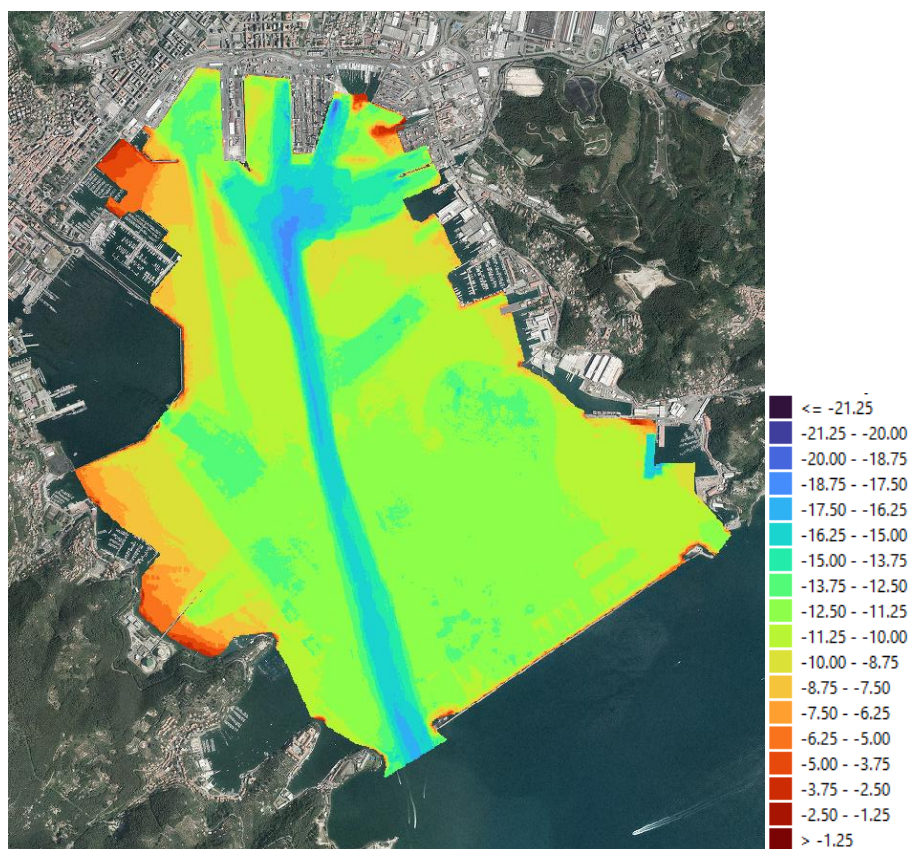


Figura 3.1 – Estensione del rilievo batimetrico multibeam di Co.I.mar.

Fuori dalla rada si è fatto riferimento ai dati estratti da cartografia nautica digitale. I dati forniti da questo database possono essere direttamente importati nell'ambiente di lavoro dei codici di calcolo MIKE, consentendo quindi un'adeguata caratterizzazione batimetrica dell'area.

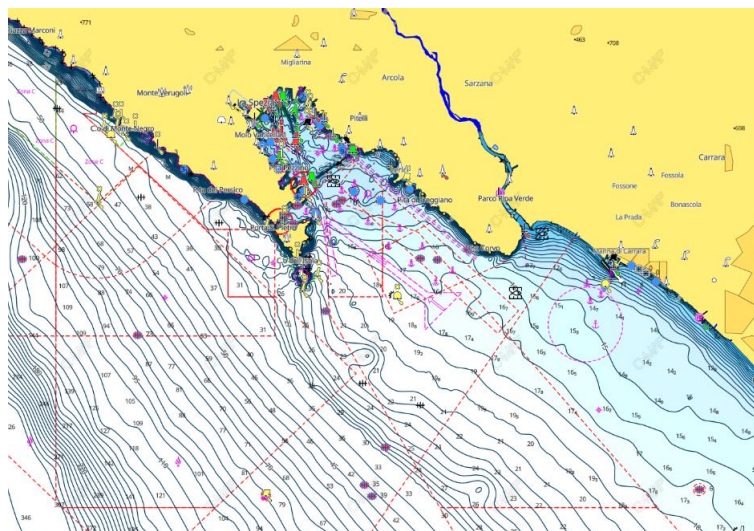


Figura 3.2 – Estratto delle carte nautiche a disposizione

Nella seguente Figura 3.3 si riporta la distribuzione spaziale dei dati disponibili, in Figura 3.4 si riporta invece uno stralcio della planimetria di distribuzione dei dati, relativo alla rada del porto della Spezia.

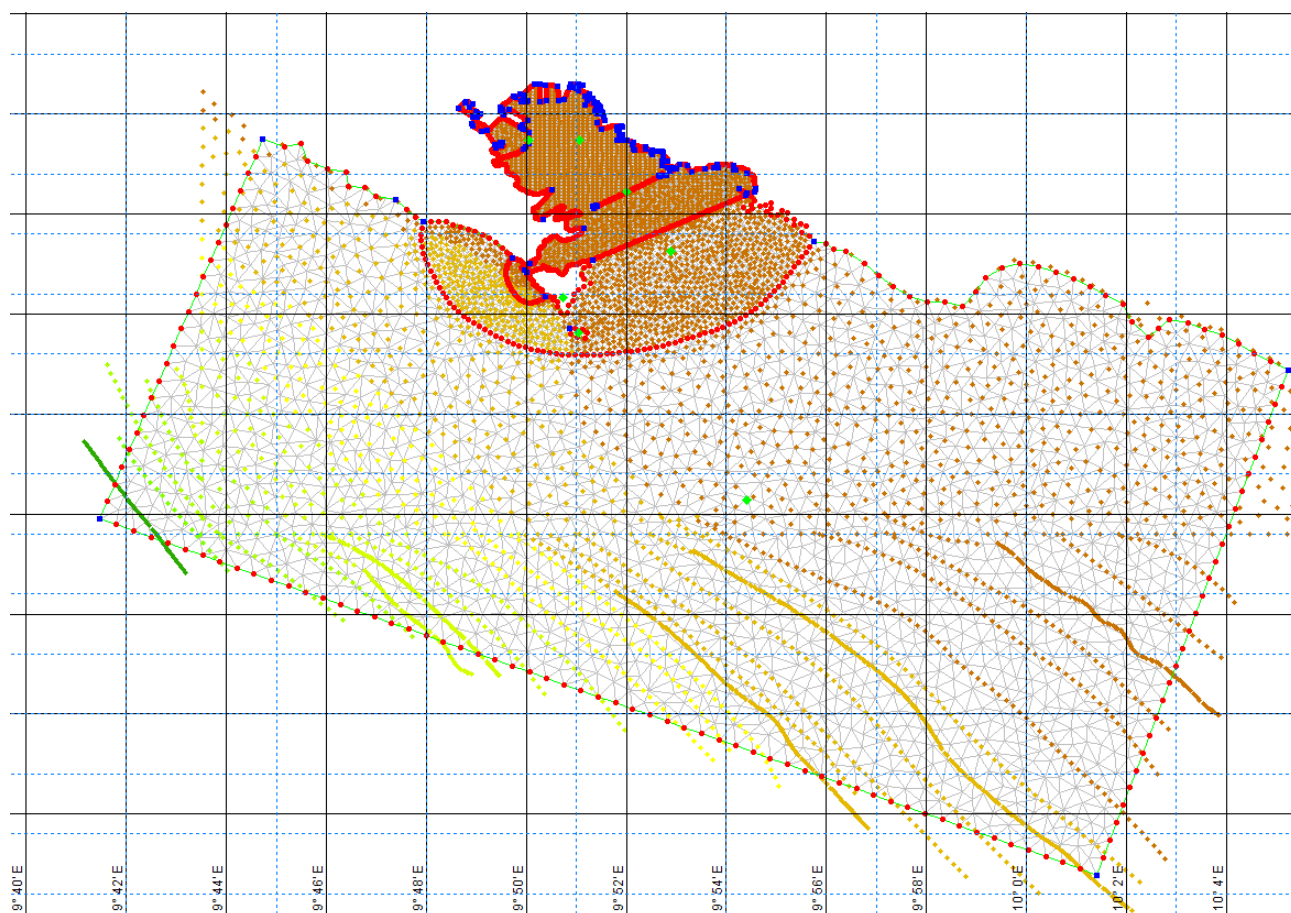


Figura 3.3 – Distribuzione spaziale dei dati all'interno del dominio di calcolo

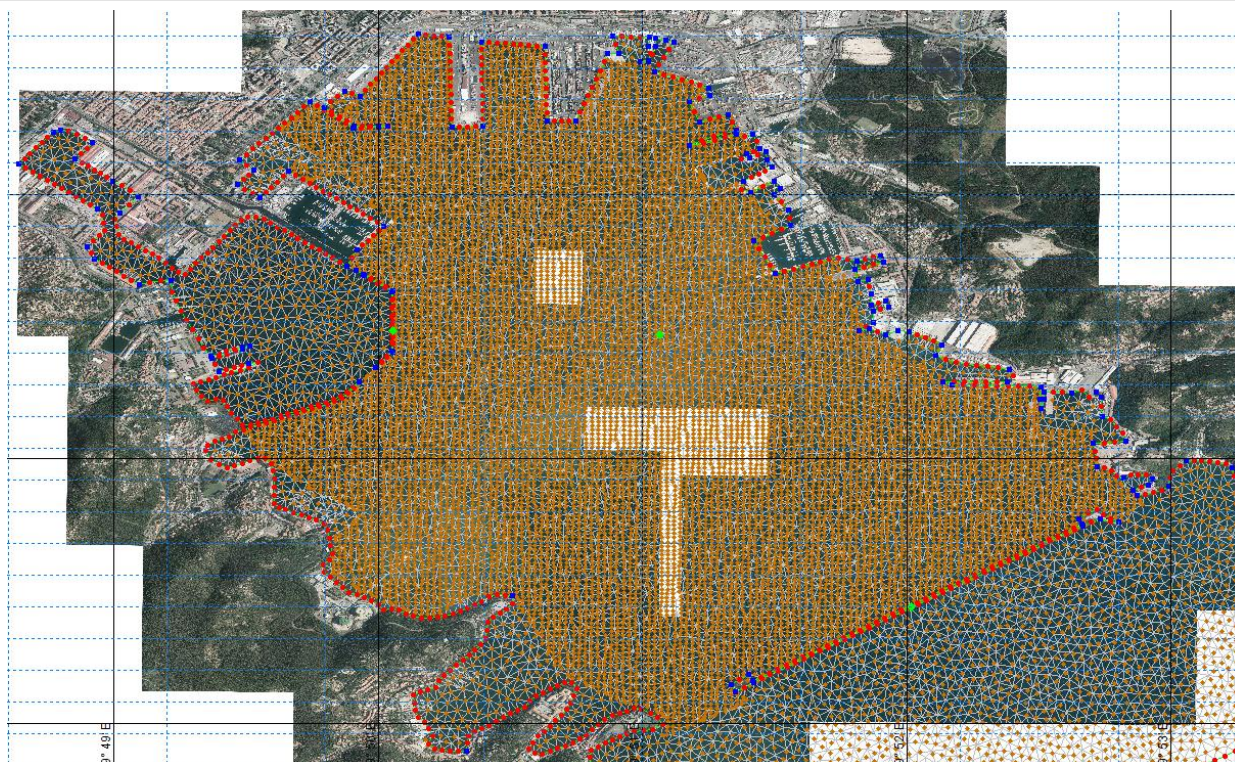


Figura 3.4 – Stralcio Rada della distribuzione spaziale dei dati all'interno del dominio di calcolo

3.2 DATI ATMOSFERICI

3.2.1 RETE MAREOGRAFICA NAZIONALE

Al fine di individuare i periodi rappresentativi delle condizioni tipiche del paraggio oggetto di indagine e, al contempo, determinare le forzanti di natura atmosferica necessarie per la modellistica del clima meteomarinario, si è fatto riferimento alla Stazione di *La Spezia* appartenente alla *Rete Mareografica Nazionale* (RMN), i cui dati sono liberamente consultabili tramite il sito www.mareografico.it messo a disposizione da ISPRA (*Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale*). Tramite tale portale, è possibile interrogare in tempo reale le banche dati delle stazioni mareografiche e delle boe meteo-ondametriche tramite interfacce grafiche e con la possibilità di consultare ed estrarre sotto licenza aperta i dati osservati dei livelli di marea, del moto ondoso e dei principali parametri meteomarini nelle località d'installazione delle stazioni automatiche di misura. La banca dati consente, inoltre, di consultare i dati storici delle suddette reti di monitoraggio e di effettuare confronti tra i relativi parametri in modalità interattiva. Il portale offre, inoltre, la possibilità di geolocalizzare su mappa (Figura 3.5) la posizione di altre stazioni automatiche di monitoraggio con dati accessibili collegandole a tutte le reti di monitoraggio automatico di interesse oceanografico gestite dal Centro Nazionale per la caratterizzazione ambientale e la protezione della fascia costiera, la climatologia marina e l'oceanografia operativa di ISPRA.



Figura 3.5 – Copertura della Rete Mareografica Nazionale (RAN) a sinistra, copertura della Rete Ondametrica Nazionale (RON) a destra

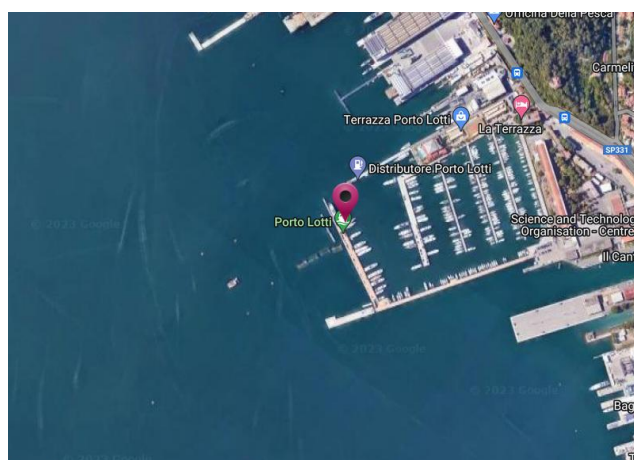


Figura 3.6 – Posizionamento della stazione ISPRa all'interno della rada del porto della Spezia



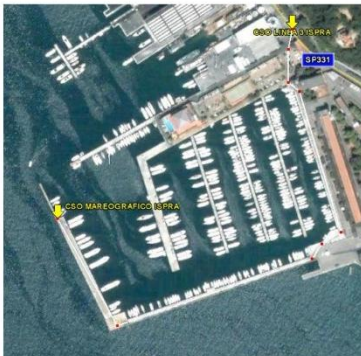






 ISPRa <small>Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale</small>	Rete idrografica e mareografica nazionale LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE ORIGINE IGM Cs bullone: CSO 32 12 Punto GPS: 095708	Rilievi anno 2009 - 2010 Annotazioni: a seguito dello spostamento della stazione mareografica la linea di livellazione è stata allacciata al caposaldo a bullone 3 di linea ISPRa	Nuova stazione mareografica di La Spezia
CSO MAREOGRAFICO Coordinate piane UTM - ETRF 2000 N: 4882954.810 E: 568924.659 Quota s.l.m.: m. 1.3405 quota italgeo 2005: m.1.332 Bullone in acciaio inox murato sulla banchina lato in angolo, allineato con il sensore mareografico			
STAFFA MAREOGRAFICA Quota s.l.m.: m. 1.2868 Staffa in acciaio inox murato sulla verticale della banchina lato del mareografo			
PIANO DI PARAGONE MAREOGRAFICO Quota s.l.m.: m. 2.1237 Piano di supporto degli strumenti mareografici			
CSO 3 DI LINEA ISPRa DI ALLACCIAMENTO Quota s.l.m.: m. 2.7305 Bullone in acciaio inox murato sul cordolo di sostegno di una recinzione, a sinistra del cancello, di fronte all'accesso al porto turistico Porto Lotti			

Tabella 3.1 – Monografia della Stazione ISPRa di La Spezia

LATITUDINE	44° 05' 47.79" N	LONGITUDINE	09° 51' 27.52" E
-------------------	------------------	--------------------	------------------

Tabella 3.2 – Coordinate Geografiche della Stazione

ANEMOMETRO ULTRASONICO	Anemometro ultrasonico (WINSON) per la misura combinata di velocità e direzione del vento. Il sensore, la cui parte sensibile è composta di 3 trasduttori con duplice funzione di trasmettitori e ricevitori, sfrutta il principio per cui le onde acustiche, nel percorrere una certa tratta, sono influenzate dai movimenti dell'aria che attraversano.
ASTA IDROMETRICA	L'asta idrometrica (in plexiglas) realizzata secondo le raccomandazioni dell'IOC (<i>Intergovernmental Oceanographic Commission</i>) nei colori giallo traffico e nero (numeri e segni di graduazione), con graduazione positiva e negativa.
BAROMETRO DIGITALE	progettato per sopportare i campi di misura (da 500 a 1100 hPa) e operativi (da -40 a 60 °C) estremi. Garantisce una precisione di 0,3 hPa. Il sensore, calibrato in fabbrica, non prevede alcuna ritaratura in campo: è consigliata una taratura, da effettuarsi in laboratorio, ogni 24 mesi.
IDROMETRO A GALLEGGIANTE	L'elemento sensibile è costituito da un encoder assoluto digitale che codifica ciascuna posizione angolare in codice Gray (a 25 Bits). Mediante l'uso di un microprocessore, si forniscono in uscita segnali proporzionali al livello idrometrico.
TRASDUTTORE DI LIVELLO RADAR	Il trasduttore genera una serie di impulsi a microonde che vengono inviati e direzionati dall'antenna del radar in direzione del livello da misurare. Le microonde riflesse vengono rilevate dall'antenna ed inviate all'elettronica. Qui un microprocessore valuta il segnale ed identifica l'eco riflesso dalla superficie determinando la distanza dall'emettitore.
TRASDUTTORE DI TEMPERATURA ACQUA	L'elemento sensibile è costituito da termoresistenza al platino Pt100 con curva di risposta secondo norme DIN 43760 classe 1/3.
TRASDUTTORE DI TEMPERATURA ARIA E UMIDITÀ RELATIVA	L'elemento sensibile è di tipo polimero-capacitivo tagliato al laser (in un processo termoregolato), con un sistema integrato di condizionamento del segnale

Tabella 3.3 – Dotazioni della Stazione di La Spezia della Rete (RAN)



Figura 3.7 – Strumentazione a supporto della stazione di La Spezia. Da destra si riportano la stazione, l'asta idrometrica, l'idrometro galleggiante, il trasduttore di temperatura e l'anemometro ultrasonico

In ragione della dotazione strumentale della stazione, ISPRA mette a disposizione le seguenti serie di dati a partire dal 01/01/2010:

- livello idrometrico;
- temperatura dell'acqua;
- temperatura dell'aria;
- umidità relativa;
- pressione atmosferica;
- direzione del vento;
- velocità del vento.

Di questi, di particolare si è fatto riferimento alle serie relative alla temperatura dell'aria ed alla umidità relativa, oltre che alla direzione e velocità del vento.

3.2.2 PORTALE METOCEAN DATA

Laddove risulti necessario colmare eventuali vuoti delle serie storiche si è fatto riferimento al *MetOcean Data Portal* è un portale commerciale di *DHI Worldwide* che consente l'accesso a circa 40 anni (dal 1979 al 2017) di dati meteoceanografici ad elevata qualità su scala globale, quali vento, onde, livelli e correnti. Il portale nasce con lo scopo di soddisfare la crescente richiesta di informazioni meteoceanografiche fondamentali per lo sviluppo di studi di fattibilità, pianificazione e progettazione, nonché per le fasi di realizzazione ed operatività di strutture localizzate in ambiente costiero ed offshore.

I dati disponibili provengono da modelli regionali e/o locali ad alta risoluzione, oppure da datasets a copertura globale, e sono sempre validati prima di essere caricati sul portale in modo da assicurare la qualità dei dati forniti.

Tra i database presenti all'interno del portale, si è fatto riferimento ai seguenti due:

- **ERA5**: che rappresenta la quinta generazione ECMWF di rianalisi di dati climatici e meteorologici per le scorse 8 decadi, con dati che partono dal 1940, fornendo stime orarie per un gran numero di quantità atmosferiche, delle onde oceaniche e della superficie terrestre. I dati sono stati riorganizzati su una griglia regolare latitudine-longitudine di 0,25 gradi per la rianalisi e 0,5 gradi per la stima dell'incertezza (0,5 e 1 grado rispettivamente per le onde oceaniche).
- **CFSR** (*Climate Forecast System Reanalysis*): un prodotto di rianalisi di terza generazione. Si tratta di un sistema globale, ad alta risoluzione, accoppiato atmosfera-oceano-superficie terrestre-ghiaccio marino progettato per fornire la migliore stima dello stato di questi domini accoppiati nel periodo di riferimento.

La risoluzione dell'atmosfera globale della CFSR è di ~38 km (T382) con 64 livelli. L'oceano globale è di 0,25° all'equatore, estendendosi fino a 0,5° globali oltre i tropici, con 40 livelli. Il modello globale della superficie terrestre ha 4 livelli di suolo e il modello globale del ghiaccio marino ha 3 livelli.

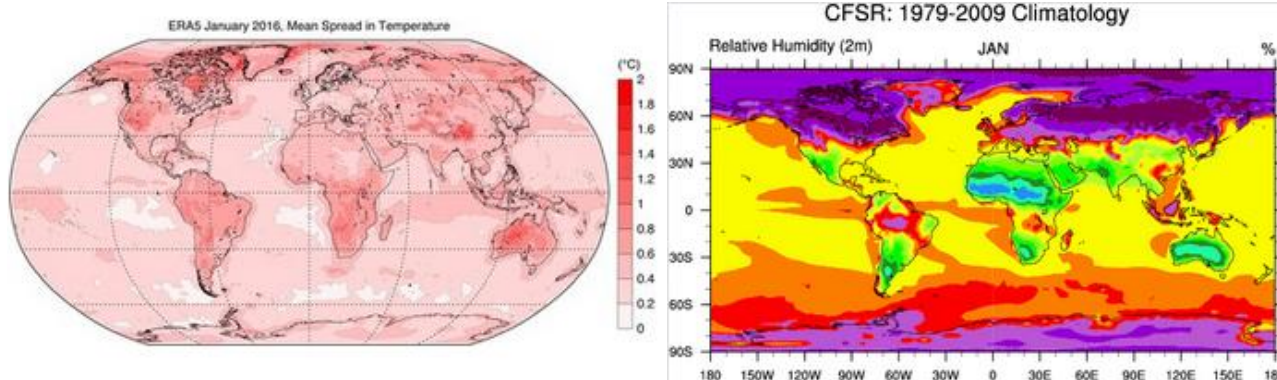


Figura 3.8 – Estensione dei due database: ERA5 a sinistra e CFSR a destra

Dai due database, tramite il portale MetOcean, sono state ricavate le seguenti informazioni:

- temperatura dell'aria;
- umidità relativa dell'aria;
- indice di limpidezza (*clearness index*);
- velocità e direzione del vento.

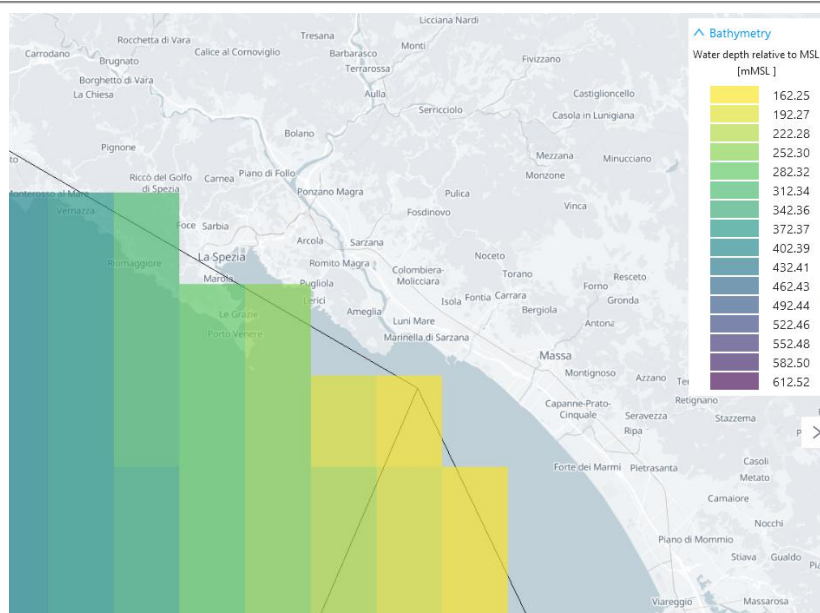


Figura 3.9 – Estratto del portale MetOcean nella zona di interesse

3.3 DATI METEOCLIMATICI

3.3.1 DATI PORTALE COPERNICUS

Al fine di individuare le forzanti alla modellistica si è fatto riferimento al database *COPERNICUS Marine Data Store*. In particolare, si è fatto riferimento alla *Mediterranean Sea Physics Reanalysis* (Rianalisi fisica del Mar Mediterraneo). Il database è generato da un sistema numerico composto da un modello idrodinamico, fornito dal *Nucleous for European Modeling of the Ocean* (NEMO) e da uno schema variazionale di assimilazione dei dati (*OceanVAR*) per i profili verticali di temperatura e salinità e variazioni di livello lungo i dati del tracciato. La risoluzione della griglia orizzontale del modello è $1/24^\circ$ (circa 4-5 km) e i livelli verticali distanziati in modo non uniforme sono 141.

Il database contiene:

- **Set di dati di rianalisi che includono:** campi 3D medi giornalieri, mensili e annuali di temperatura potenziale, salinità, velocità zonale e meridionale; Campi medi 2D giornalieri, mensili e annuali dello spessore dello strato misto oceanico e della temperatura potenziale del fondo; Campi medi 2D giornalieri, orari, mensili e annuali dell'altezza della superficie del mare e campi medi orari della velocità zonale e meridionale della superficie del mare.
- **Set di dati provvisori che includono:** campi medi mensili 3D di temperatura potenziale, salinità, velocità zonale e meridionale; Campi medi mensili 2D dello spessore dello strato misto dell'oceano, della temperatura potenziale del fondo e dell'altezza della superficie del mare.

La serie temporale di rianalisi viene fornita dal 01/01/1987 e viene estesa due volte l'anno (o con una frequenza inferiore a seconda della disponibilità dei dati osservativi rielaborati) e messa a disposizione sul server *Copernicus Marine*. La serie temporale intermedia viene prodotta utilizzando il sistema di modellazione Reanalysis ma forzata con i dati NRT, viene inizializzata con l'ultimo giorno di Reanalysis e viene estesa ogni mese. Ogni volta che la serie temporale di rianalisi viene estesa, la serie temporale provvisoria viene reinizializzata e sostituita sul server CMEMS. Per maggiori approfondimenti in merito al database *Mediterranean Sea Physics Reanalysis* si rimanda al manuale.

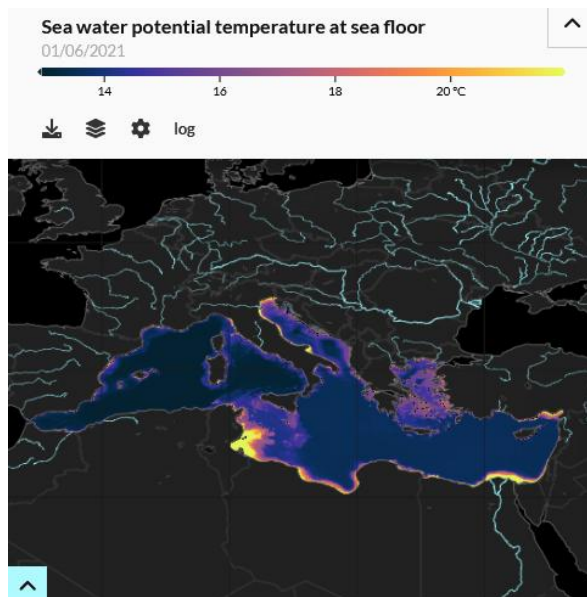


Figura 3.10 – Estratto del Mediterranean Sea Physics Reanalysis

Dal database Copernicus sono stati estrapolati i dati di cui alla seguente tabella, derivanti dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC).

TIPOLOGIA	CODICE DEL DATASET	DISCRETIZZAZIONE
Velocità della corrente (Current)	<i>med-cmcc-cur-rean-d</i>	media giornaliera
Salinità (Salinity)	<i>med-cmcc-sal-rean-d</i>	media giornaliera
Temperatura (Temperature)	<i>med-cmcc-tem-rean-d</i>	media giornaliera
Variazione di livello della superficie marina (Sea Surface Height)	<i>med-cmcc-ssh-rean-h</i>	media oraria

Tabella 3.4 – Serie di dati estratte dal Mediterranean Sea Physics Reanalysis

3.3.2 DATI DI MAREA

Al fine di tener conto dell'escursione di livello indotta dalla variazione di marea si è fatto riferimento al *Global Tide Model* del software *Mike 21 Powered by DHI*, ed in particolare al *Global Tide Model for Heights* (Modello globale di previsione delle altezze d'onda da marea). Il *Global Tide Model* mette a disposizione dati per la previsione delle maree dei livelli dell'acqua, disponibile fino ad una risoluzione di $0,125^\circ \times 0,125^\circ$.

Il modello utilizza le misurazioni multi-missione degli ultimi 17 anni provenienti da *TOPEX/Poseidon* (fase A e fase B), *Jason-1* (fase A e fase B) e *Jason-2* per l'analisi dei residui del livello del mare.

Per ulteriori approfondimenti si rimanda al manuale del software.

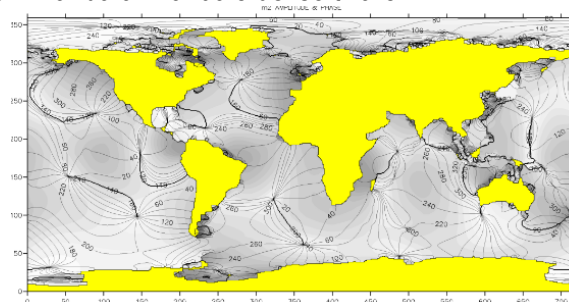


Figura 3.11 – Esempio della Componente M2

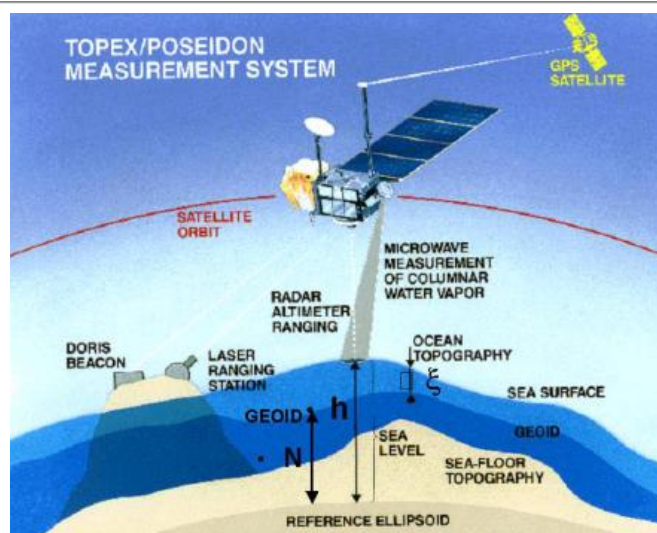


Figura 3.12 – Sistema di misurazione del satellite TOPEX/Poseidon

4. APPROCCIO METODOLOGICO

Lo schema metodologico adottato si basa essenzialmente su criteri analitici che, partendo dalle registrazioni meteorologiche strumentali in corrispondenza del luogo oggetto di indagine, conducono alla definizione della massima estensione dei pennacchi di torbida attesi nei periodi di riferimento.

Al fine di individuare i periodi di riferimento su cui condurre le analisi vengono analizzate le serie storiche di parametri meteorologici che hanno influenza sul moto ondoso, registrate in prossimità dell'area di intervento. Dato il particolare luogo di interesse, situato all'interno del Mar Mediterraneo, ed a maggior ragione all'interno della rada del porto, la componente principale del moto ondoso dipende dalla velocità e dalla direzione del vento. Per tale ragione al fine di determinare un periodo di simulazione che sia rappresentativo delle condizioni medie del clima meteomarinico si fa riferimento alle serie storiche relative ai parametri di vento.

Il periodo di riferimento deve essere individuato in maniera tale da avere il duplice scopo di massimizzare l'agitazione del moto ondoso e, dunque, le velocità idrodinamiche della corrente (condizione solitamente raggiunta nel periodo invernale) e di massimizzare i fenomeni di stratificazione del gradiente termico e di salinità (condizione solitamente raggiunta in estate). In ragione di ciò, è prassi consolidata scegliere due periodi di riferimento, uno invernale ed uno estivo.

A seguito della scelta dei periodi di simulazione, è d'uopo caratterizzare il regime di correnti idrodinamiche che si instaurano nell'area di interesse. A tal fine vengono utilizzati codici di calcolo che indagano la propagazione delle varie condizioni meteorologiche all'interno di un dominio bi- o tri-dimensionale. Nel presente studio è stato fatto riferimento al software MIKE 3 a griglia flessibile (flexible mesh) di DHI, ed in particolare al modulo idrodinamico (HD).

La caratterizzazione del regime delle correnti viene condotta a partire da dati di natura atmosferica, meteorologica e meteorologica derivanti da serie storiche registrate da stazioni meteorologiche (quali la Rete Mareografica Nazionale) o da reti di monitoraggio satellitare di comprovata validità, quali Copernicus, ERA5 e CFSR.

Una volta individuato il regime idrodinamico all'interno del dominio di calcolo è dunque possibile stimare il massimo pennacchio di torbida atteso nei due periodi di riferimento. A tal fine è stato qui utilizzato il software Mike 3D di DHI tramite attivazione del modulo Mud Transport (MT). L'individuazione del pennacchio viene in genere fatta attraverso la definizione di un'unità operativa, che può essere l'intera lavorazione o una sua quota parte ben rappresentativa. L'approccio adottato per le simulazioni di trasporto di sedimento è del tipo a "finestre mobili": per ogni periodo di riferimento su cui è stata cimentata l'analisi idrodinamica (mese estivo e invernale tipico) ha girato il modulo di trasporto di sedimento ad essa accoppiato, ipotizzando che le operazioni abbiano inizio in diversi giorni del mese, ottenendo molteplici simulazioni indipendenti tra loro che coprono tutte le condizioni meteorologiche dell'intero periodo di riferimento. Tale approccio permette di stimare il massimo pennacchio di torbida atteso tramite inviluppo dei massimi dei singoli eventi simulati. Si sottolinea come l'approccio a finestre mobili risulti pienamente conforme ai contenuti delle linee guida ISPRA.

5. DEFINIZIONE DEI PERIODI DI RIFERIMENTO DEL CLIMA METEOMARINO

In prima istanza si sono analizzati i dati atmosferici al fine di individuare due periodi rappresentativi del clima meteomarinico dell'intera serie. Poiché infatti siamo in uno specchio d'acqua protetto come la rada di La Spezia, la componente più influente sulla formazione delle onde marine è il vento.

Scopo dell'analisi è quello di individuare:

- un periodo di riferimento invernale, al fine di massimizzare le agitazioni tipiche della corrente dovute al moto ondoso;
- un periodo di riferimento estivo, al fine di massimizzare le stratificazioni tipiche dei gradienti di temperatura e di salinità nella colonna d'acqua.

Si è fatto dunque riferimento alle registrazioni anemometriche della Stazione ISPRA di La Spezia (di cui al §3.2.1). La stazione fornisce registrazioni per gli anni dal 2010 al 2022 con risoluzioni diverse (Tabella 5.1).

ANNO	TIPO DI ANNO	PASSO REGISTRAZIONI
2010	Civile (365 gg)	1 [h]
2011	Civile (365 gg)	1 [h]/10 [minuti]
2012	Bisestile (366 gg)	10 [minuti]
2013	Civile (365 gg)	10 [minuti]
2014	Civile (365 gg)	10 [minuti]
2015	Civile (365 gg)	10 [minuti]
2016	Bisestile (366 gg)	[-]
2017	Civile (365 gg)	[-]
2018	Civile (365 gg)	[-]
2019	Civile (365 gg)	10 [minuti]
2020	Bisestile (366 gg)	10 [minuti]
2021	Civile (365 gg)	10 [minuti]
2022	Civile (365 gg)	10 [minuti]

Tabella 5.1 – Serie di dati disponibili per Stazione ISPRA La Spezia

Si è, dunque, proceduto alla omogeneizzazione delle risoluzioni della serie, ottenendo una serie di 13 anni con risoluzione oraria. Dall'analisi di questa serie di evince (Tabella 5.2) come per gli anni dal 2016-2018 non siano disponibili registrazioni; dunque, questi anni sono stati esclusi dall'analisi.

ANNO	TIPO DI ANNO	NUMERO MASSIMO POSSIBILE DATI	DATI DISPONIBILI VELOCITA' VENTO	DATI DISPONIBILI VELOCITA' VENTO
2010	Civile (365 gg)	8760	4412	4386
2011	Civile (365 gg)	8760	8640	8618
2012	Bisestile (366 gg)	8784	8742	8741
2013	Civile (365 gg)	8760	6792	6793
2014	Civile (365 gg)	8760	8714	8714
2015	Civile (365 gg)	8760	539	539
2016	Bisestile (366 gg)	8784	0	0
2017	Civile (365 gg)	8760	0	0
2018	Civile (365 gg)	8760	0	0
2019	Civile (365 gg)	8760	7100	7100
2020	Bisestile (366 gg)	8784	8666	8666
2021	Civile (365 gg)	8760	8653	8653
2022	Civile (365 gg)	8760	8704	8704

Tabella 5.2 – Analisi della serie di dati ISPRA La Spezia

Risulta evidente, inoltre, come per gli altri anni le serie risultino parziali. In ragione di ciò, nell'analisi del periodo di riferimento si sono esclusi gli anni 2010, 2013, 2015, 2016, 2017 e 2018 e si è quindi fatto riferimento alla serie rimanente. Le registrazioni disponibili sono consultabili in forma grafica nelle seguenti figure.

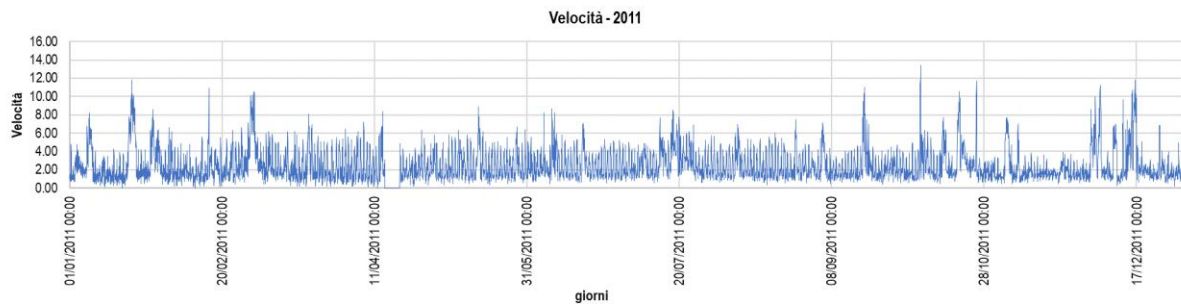


Figura 5.1 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2011

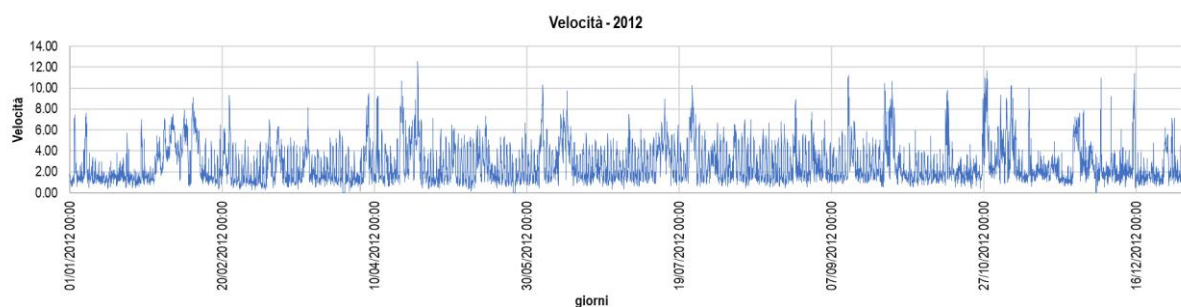


Figura 5.2 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2012

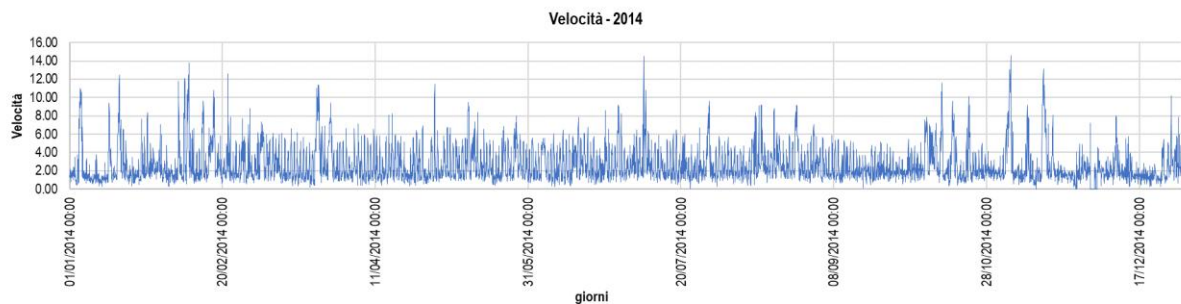


Figura 5.3 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2014

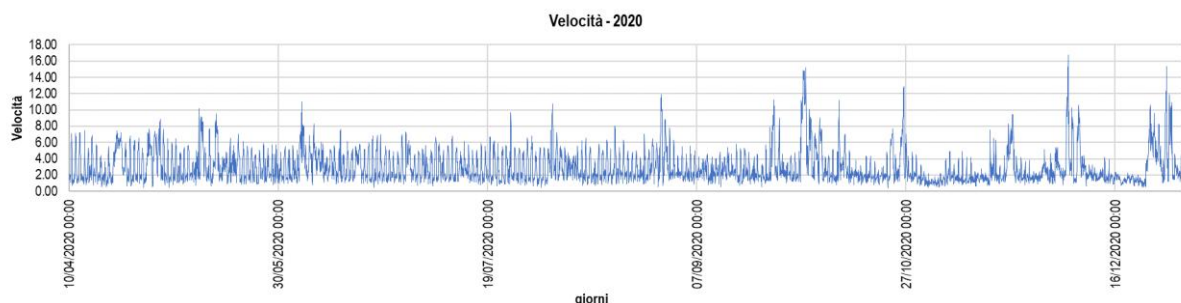


Figura 5.4 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2020

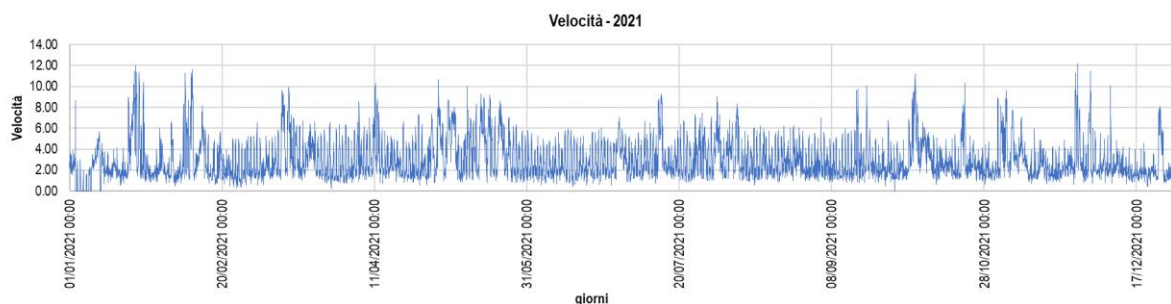


Figura 5.5 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2021

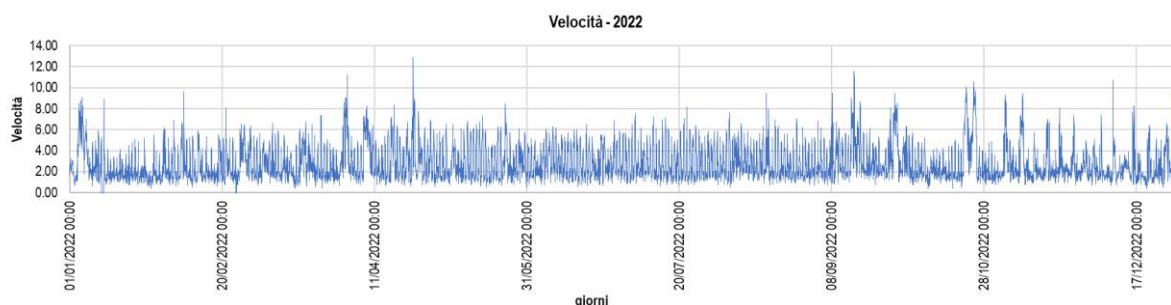


Figura 5.6 – Stazione ISPRA La Spezia Serie – velocità del vento 2022

A seguire sono riportati i dati di vento per l'intera serie considerata sotto forma di rosa dei venti, nelle quali la lunghezza dei settori direzionali è proporzionale alla frequenza. L'analisi dei dati di vento per l'intera serie (Figura 5.7) in termini di velocità e direzione, mostra che i venti più frequenti provengono dai settori di Sud-Est, eccezion fatta per i venti dei settori Nord - Est che, però, non sono di interesse per la presente analisi in quanto aventi direzione da terra a largo e, dunque, non incidono nella generazione della componente principale del moto ondoso.

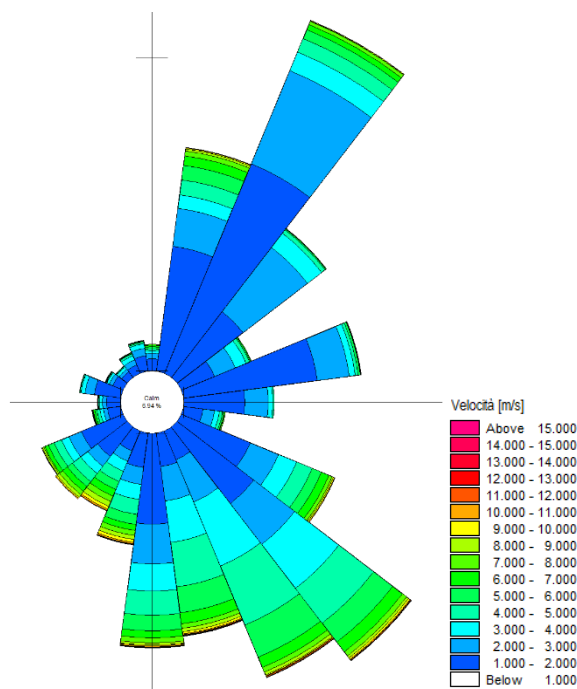


Figura 5.7 – Rosa dei venti per l'intera serie di riferimento (2010-2022)

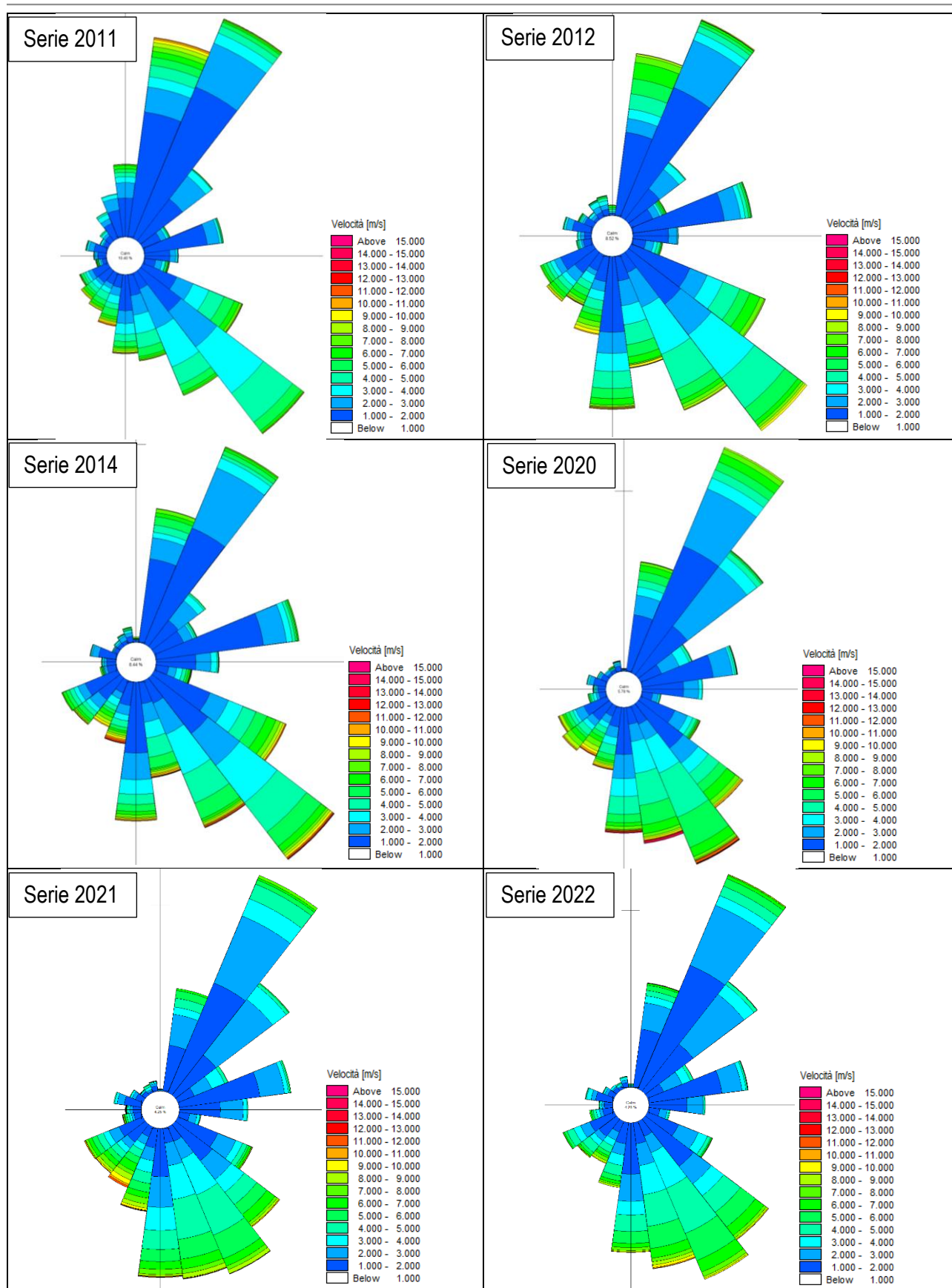


Figura 5.8 – Rosa dei venti per le serie relative, rispettivamente, agli anni 2011, 2012, 2014, 2020, 2021 e 2022

Effettuando la stessa analisi sulle serie relative ai singoli anni (Figura 5.8) e confrontandole con la rosa relativa all'intera serie, si evince come l'anno **2020** possa essere ritenuto ben rappresentativo dell'andamento tipico dell'intera serie.

Dalla serie dell'anno 2020 sono stati dunque estratti le serie temporali relative a **febbraio** e **agosto**, che sono risultati ben rappresentativi dell'andamento tipico dei mesi invernali ed estivi dell'intera serie di dati disponibili e quindi presi a riferimento per le successive analisi.

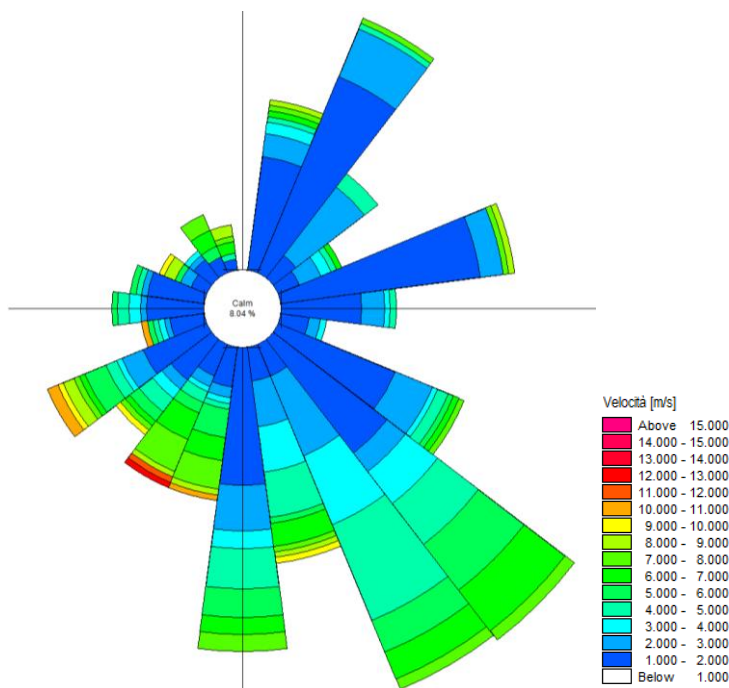


Figura 5.9 – Rosa dei venti febbraio 2020

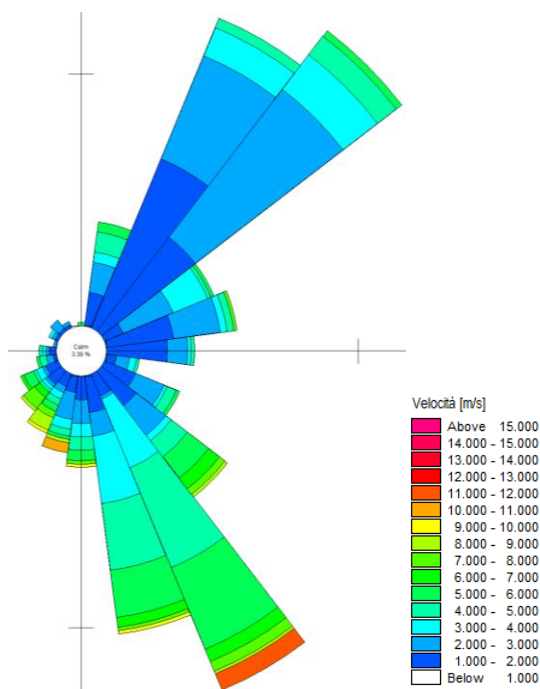


Figura 5.10 – Rosa dei venti agosto 2020

6. MODELLO IDRODINAMICO (HD) DI DOWNSCALING

Al fine di dettagliare le condizioni idrodinamiche tipiche che interessano l'area in analisi, è stata implementata una modellazione di tipo idrodinamico, di fatto un *modello di downscaling* dei dati del modello globale di Copernicus. Attraverso l'approccio modellistico tridimensionale è possibile riprodurre il campo di correnti indotte dal moto ondoso durante specifici eventi particolarmente significativi o determinati periodi, così da interpretare le possibili dinamiche di circolazione, con particolare interesse a quelle che si innescano all'interno della rada del porto di La Spezia. Per studiare in dettaglio i campi di corrente indotta dal moto ondoso durante i periodi scelti si è utilizzato il modello idrodinamico MIKE 3 HD di DHI, di seguito brevemente dettagliato.

6.1 MODELLAZIONE IDRODINAMICA HD

Per il modello idrodinamico HD in Mike 3D, la superficie libera viene presa in considerazione utilizzando un approccio di trasformazione delle coordinate sigma o utilizzando una combinazione di un sistema di coordinate sigma e di livello z.

Di seguito le equazioni governanti sono presentate utilizzando le coordinate cartesiane. L'equazione di continuità locale è scritta come:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

e le due equazioni della quantità di moto orizzontale, rispettivamente per le componenti x e y, sono:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Nel modulo idrodinamico HD, il calcolo di trasporto di temperatura (T) e salinità (s) seguono una equazione generale di trasporto/diffusione, ovvero:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + T_s S$$

La diffusione orizzontale è definita come:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

Le equazioni per il flusso bidimensionale si ottengono integrando le equazioni sulla profondità. È compreso anche lo scambio termico con l'atmosfera

Nelle equazioni sopra riportate

- T è il tempo;
- x, y, z sono le coordinate cartesiane;
- u, v, w

- T, s sono temperatura e salinità;
- D_v è il coefficiente della componente diffusiva verticale (vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient);
- \hat{H} è il termine dovuto allo scambio con l'atmosfera;
- S è la portata dovuta alle forzanti puntuali;
- T_s, s_s sono temperature e salinità delle forzanti;
- F_T, F_s, F_c sono i termini diffusive orizzontali;
- D_h è il coefficiente diffusivo orizzontale;
- h è la profondità.

Gli input principali previsti sono suddivisi nei seguenti gruppi:

Dominio di calcolo spazio/temporale	<ul style="list-style-type: none"> • mesh di calcolo computazionale • batimetria • lunghezza della simulazione • passo temporale [time step di calcolo]
Fattori di calibrazione	<ul style="list-style-type: none"> • coefficiente di dispersione • fattori di attrito del vento • resistenza del fondo
Condizioni Iniziali	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie del livello del mare • Componenti di velocità
Condizioni al contorno	<ul style="list-style-type: none"> • Livello dell'acqua • portata • Altre
Altre forzanti	<ul style="list-style-type: none"> • velocità e direzione del vento • escursione mareale • immissioni (source) e dispersioni (sink) puntuali • wave radiation stress

Tabella 6.1 – Principali input del codice di calcolo di Mike 3D HD

Per approfondimenti in merito al codice di calcolo, ai dati in ingresso e ai risultati forniti dal software rimandiamo all'APPENDICE B – MODELLO HD o al documento di presentazione del software *Short Description – Mike 21 & MIKE 3 Flow Model FM – Hydrodynamic Module* messo a disposizione di DHI.

6.2 BATIMETRIA E DOMINIO DI CALCOLO

Il modello alla base del software di calcolo è basato sulla modellazione tridimensionale dell'acqua sviluppato da DHI. Il software MIKE 3 è di tipo FM (*flexible mesh*), ovvero griglie a maglia flessibile. Queste offrono il massimo grado di flessibilità, garantendo ad esempio:

- il controllo della distribuzione dei nodi;
- adozione di diverse risoluzioni della mesh;
- variazione in funzione della profondità e adattabilità ai contorni.

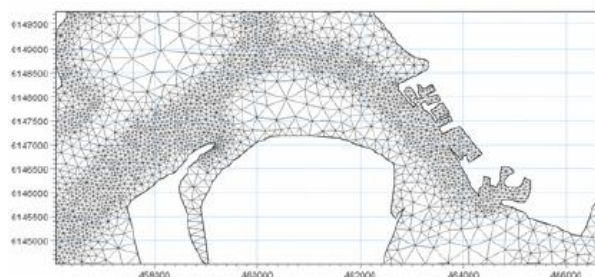


Figura 6.1 – Esempio di Flexible Mesh

Al fine di rappresentare opportunamente la variabilità batimetrica al dettaglio necessario per una corretta caratterizzazione della circolazione idrodinamica delle correnti su profondità limitate e, al contempo, garantire la sostenibilità dei tempi computazionali, l'area del dominio di calcolo è stata suddivisa in differenti sottodomini planimetrici, ognuno caratterizzato da una risoluzione (intesa come lato del triangolo della mesh) differente. La scelta di aumento incrementale di risoluzione verso l'area di interesse consente di riprodurre le dinamiche prettamente costiere (frangimento, rifrazione, shoaling, attrito con il fondo) ad un grado di dettaglio adeguato agli obiettivi del presente lavoro.

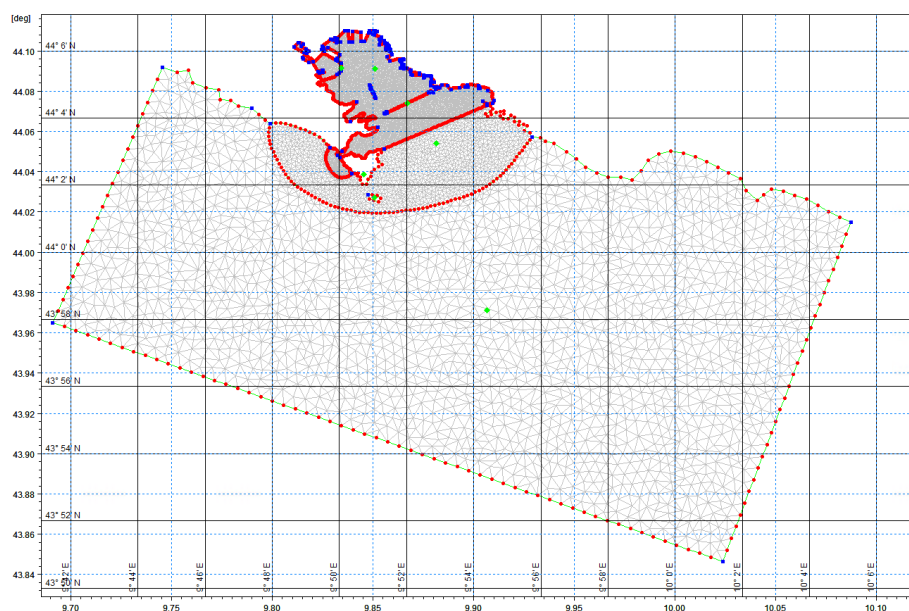


Figura 6.2 – Distribuzione della risoluzione della mesh di calcolo del modello

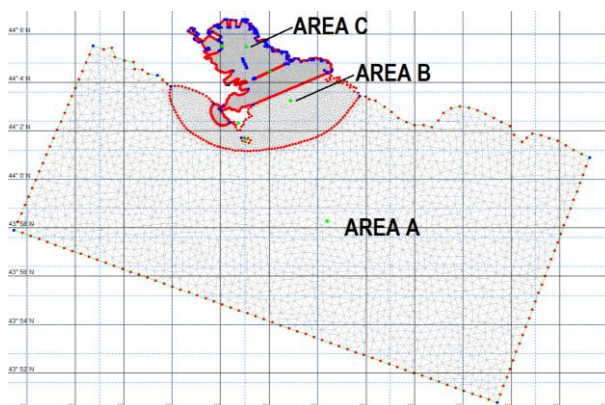


Figura 6.3 – Suddivisione dominio di calcolo in sottodomini

AREA MESH	Lato [m]	Area [m ²]
A	600	180000
B	200	20000
C	65	2112.5

Tabella 6.2 – Principali input del codice di calcolo

La dimensione e la risoluzione del dominio di calcolo sono state individuate al fine di rappresentare al meglio tutti i fenomeni che intervengono nella propagazione dell'onda da largo verso costa, ottimizzando al contempo i tempi computazionali di calcolo. La griglia di mesh determinata è, allo strato superficiale, caratterizzata 22467 elementi triangolari e 11868 nodi. Per quanto concerne la discretizzazione geometrica della colonna d'acqua si rimanda ai paragrafi successivi.

La caratterizzazione batimetrica dell'area oggetto di analisi è stata effettuata sulla base dei rilievi di dettaglio e della cartografia disponibile così come descritti nel paragrafo § 3.1 - *Dati topo-batimetrici*.

Il risultato finale dell'interpolazione dei dati batimetrici a disposizione è riportato nella sua estensione completa in Figura 6.4 e con riferimento alla sola rada del porto di La Spezia in Figura 6.5.

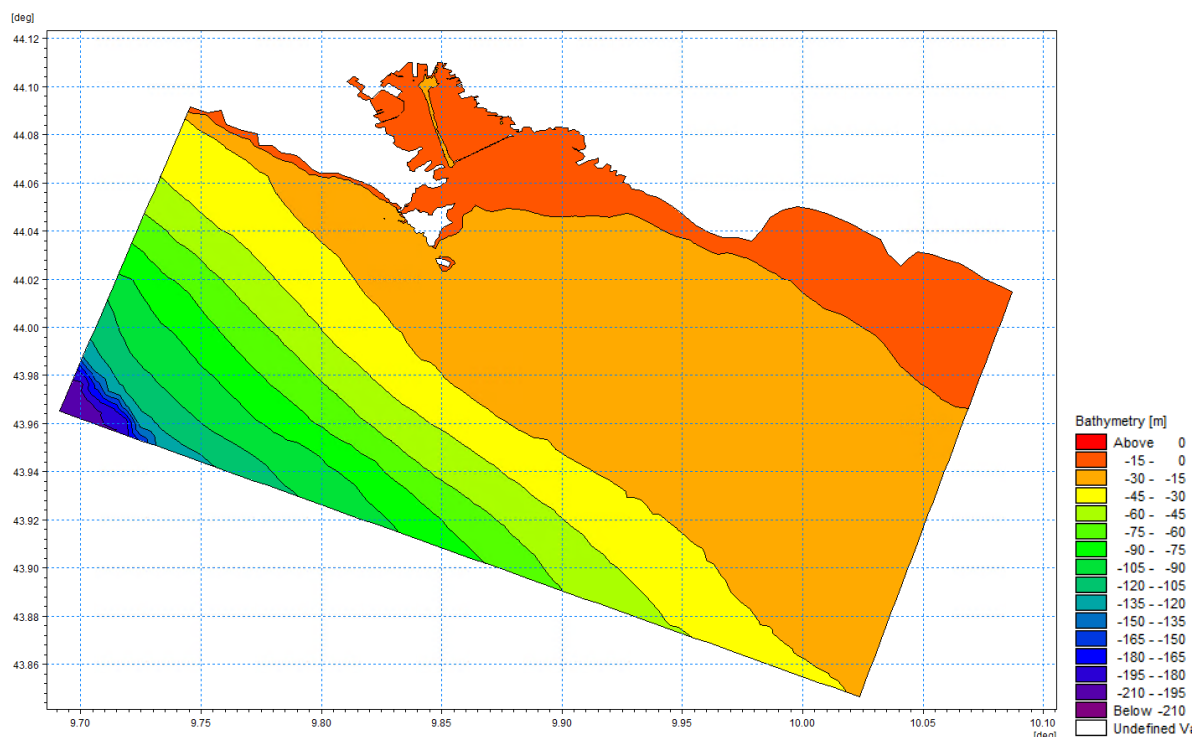


Figura 6.4 – Batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

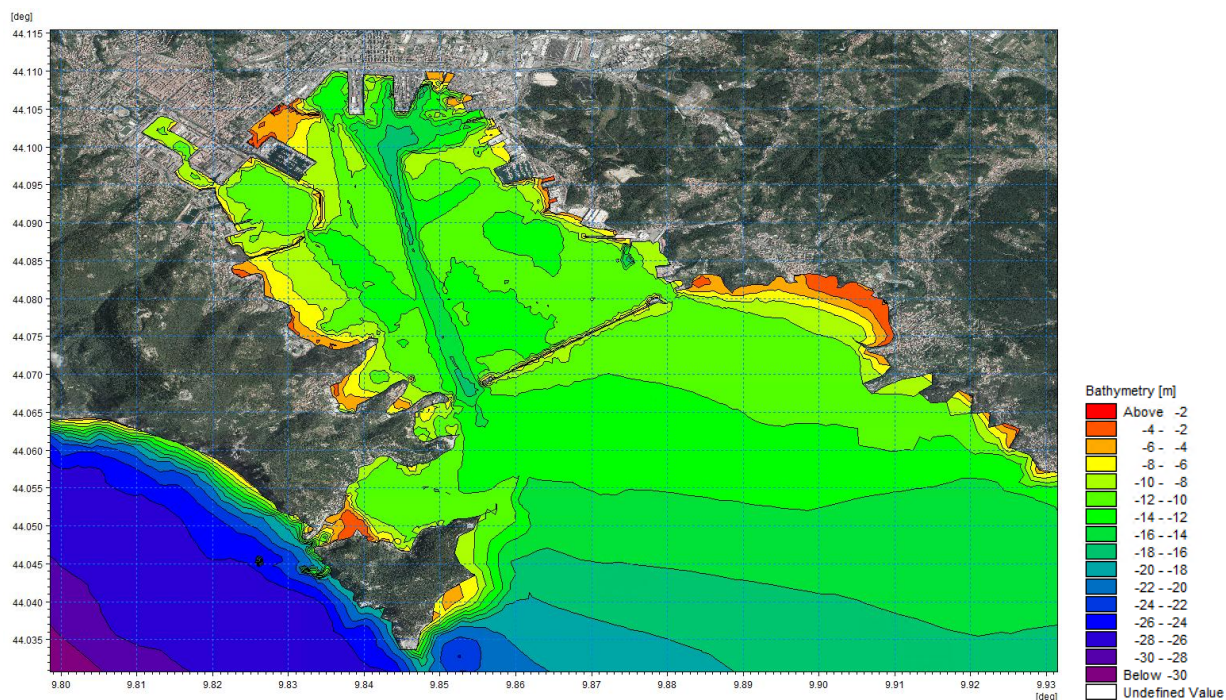


Figura 6.5 – Stralcio all'interno della Rada di La Spezia della batimetria ottenuta dal processamento dei dati a disposizione

6.3 DISCRETIZZAZIONE VERTICALE

Come descritto nel paragrafo precedente, la mesh tridimensionale di Mike 3D offre una buona variabilità in funzione della profondità (Figura 6.6).

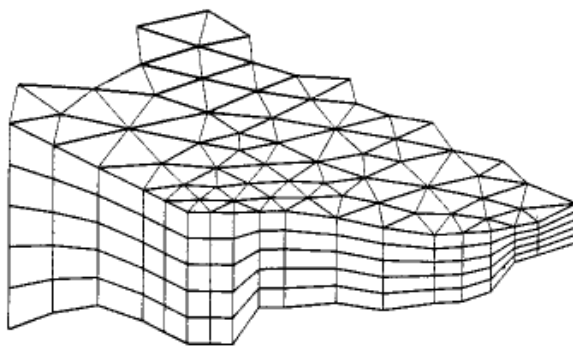


Figura 6.6 – Principio di funzionamento della mesh tridimensionale

Il codice di calcolo permette una discretizzazione verticale della mesh secondo tre modalità:

- attraverso l'uso di *sigma layer*, ovvero una suddivisione della colonna d'acqua in un numero fisso di strati di spessore variabile in proporzione alla profondità complessiva (Figura 6.7);
- attraverso l'uso di *zeta layer*, ovvero una suddivisione della colonna d'acqua in un numero variabile di strati di altezza fissa;
- attraverso l'uso combinato di *sigma* e *zeta layer*.

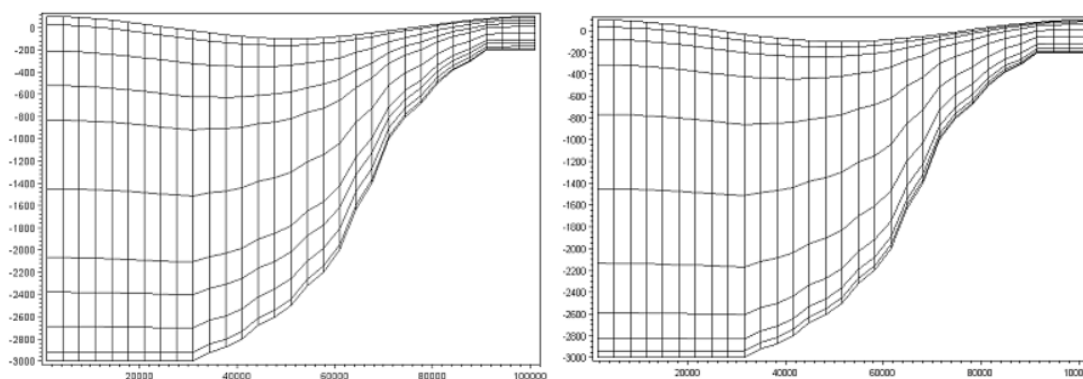


Figura 6.7 – Esempi di sigma layer

Al fine di meglio dettagliare le dinamiche di corrente nelle zone di acque basse (*shallow water*) e al contempo di rappresentare tutte le profondità del dominio di calcolo ottimizzando i tempi computazionali di calcolo, si è optato per l'uso accoppiato di 10 *sigma-layer* fino alla profondità di 40 metri rispetto al livello del medio mare e 7 *zeta-layer* sulla restante porzione di colonna d'acqua (circa 400 m).

6.4 CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO

In questo paragrafo si riportano le condizioni iniziali e al contorno applicate al modello idrodinamico, individuate a partire dai dati raccolti e dettagliati ai paragrafi § 3.2 - *Dati atmosferici* e §3.3 - *Dati meteorologici*.

Come **condizioni iniziali** sono stati ricavati, a partire dai dati meteorologici di cui al paragrafo §3.3, i valori di velocità della corrente, di temperatura e salinità in ogni punto della colonna d'acqua nel volume di calcolo. Sono inoltre stati stimati i valori di altezza totale della colonna d'acqua in ogni punto del dominio.

Come **condizioni al contorno** sono state ricavate condizioni sia di tipo meteorologico sia di tipo atmosferico, al fine di tener conto delle dinamiche della corrente e degli scambi di energia e temperatura tra aria e acqua, sui limiti esterni del dominio di calcolo (*boundaries*) di cui alla seguente figura.

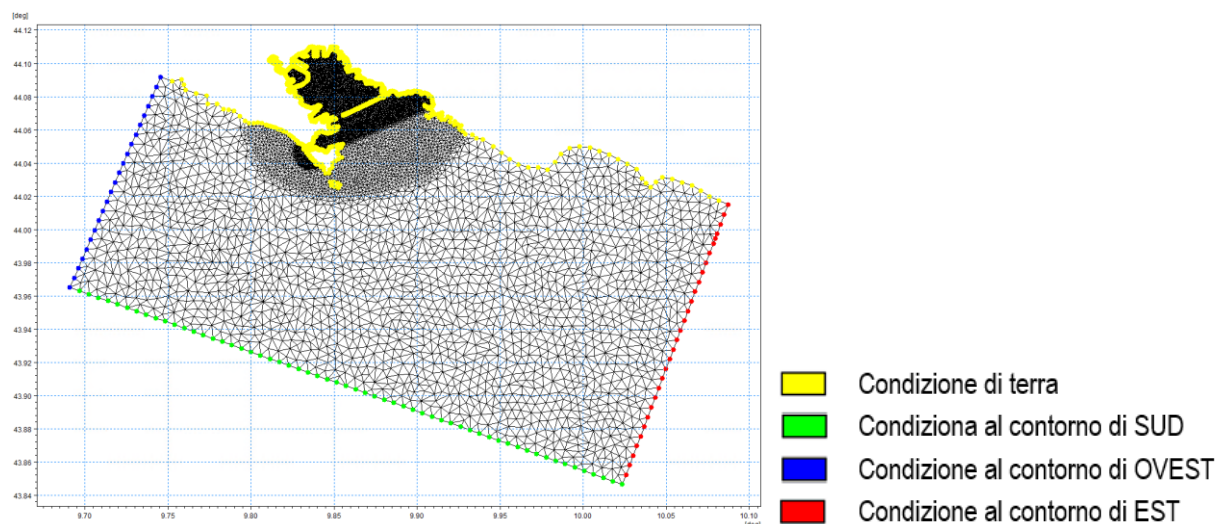


Figura 6.8 – Distribuzione delle condizioni al contorno nel dominio di calcolo

A partire dai dati di cui al §3.3, sono state individuate le condizioni al contorno sui bordi est, sud e ovest relative a velocità della corrente, temperatura e salinità sulla colonna d'acqua e il livello del mare. Tali condizioni sono state elaborate al fine di tener conto sia della componente d'onda dovuta al vento (§3.3.1 - *Dati Portale Copernicus*) sia della componente relativa all'escursione mareale (§3.3.2 - *Dati di marea*).

Al fine di tener conto degli scambi aria-acqua, sono state inserite quali condizioni al contorno valide sull'intero dominio di calcolo la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, oltre che l'indice di limpidezza del cielo (*clearness index*). Sono state inoltre inserite condizioni relative alla velocità ed alla direzione del vento. Tali condizioni sono state derivate dalle registrazioni della stazione ISPRA di La Spezia (§ 3.2.1 - *Rete Mareografica Nazionale*) ed integrate, laddove necessario, tramite i dati ricavati dal database MetOcean (§ 3.2.2 - *Portale MetOcean Data*).

6.5 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

Nel presente capitolo si riportano i risultati delle modellazioni idrodinamiche condotte. In particolare, a titolo di esempio, si graficizzano i risultati relativi alle dinamiche della corrente ed alla distribuzione di temperatura e salinità in uno step temporale rappresentativo per ciascun periodo di riferimento:

- **Invernale**, relativo al 11/02/2020 alle ore 15:00;
- **Estivo**, relativo al 13/08/2020 alle ore 16:00.

Nelle figure seguenti si riportano le planimetrie relative allo strato superficiale, a mezza colonna d'acqua e al fondo in corrispondenza della rada del porto della Spezia ed una sezione verticale rappresentativa per le aree del porto.

6.5.1 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE HD DEL PERIODO INVERNALE

I risultati del modello HD cimentato sul periodo medio invernale evidenziano come i regimi della corrente siano caratterizzati da velocità modeste con circolazione da largo verso l'interno della rada sugli strati più superficiali della colonna d'acqua, mentre sugli strati inferiori si registra spesso un'inversione della circolazione.

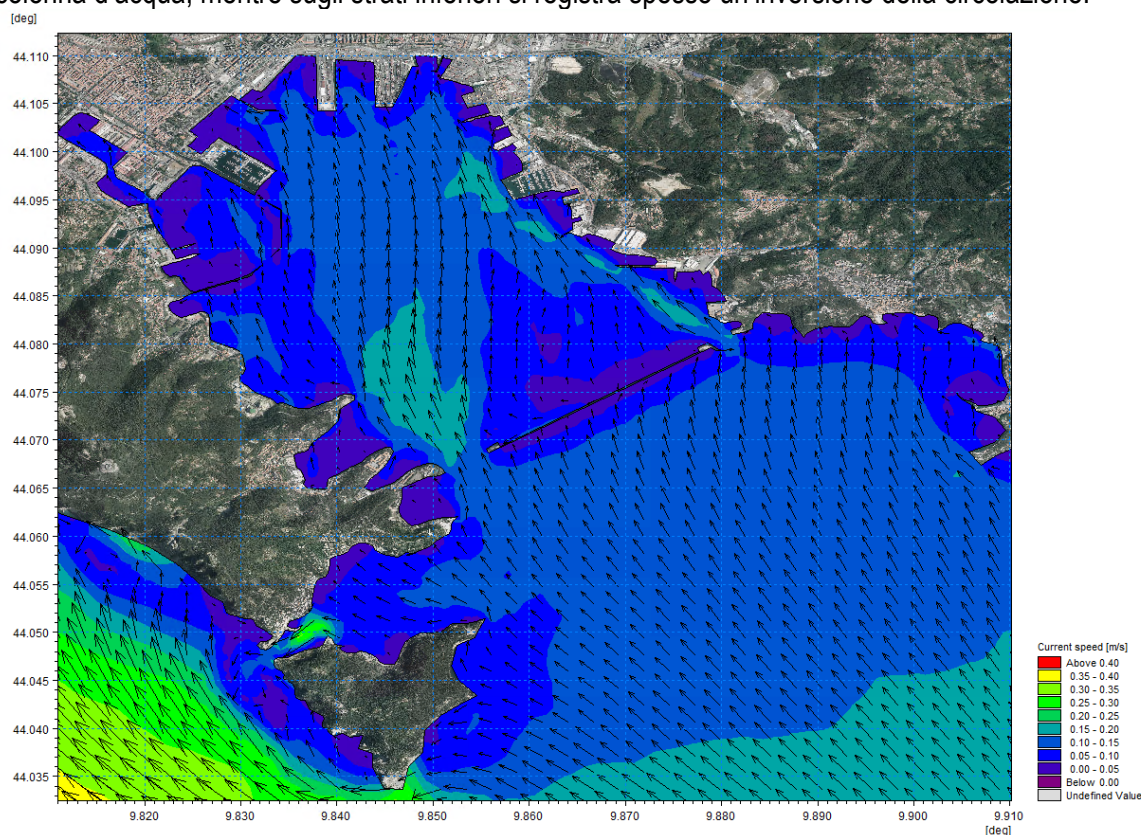


Figura 6.9 – Campo di velocità di corrente in superficie nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

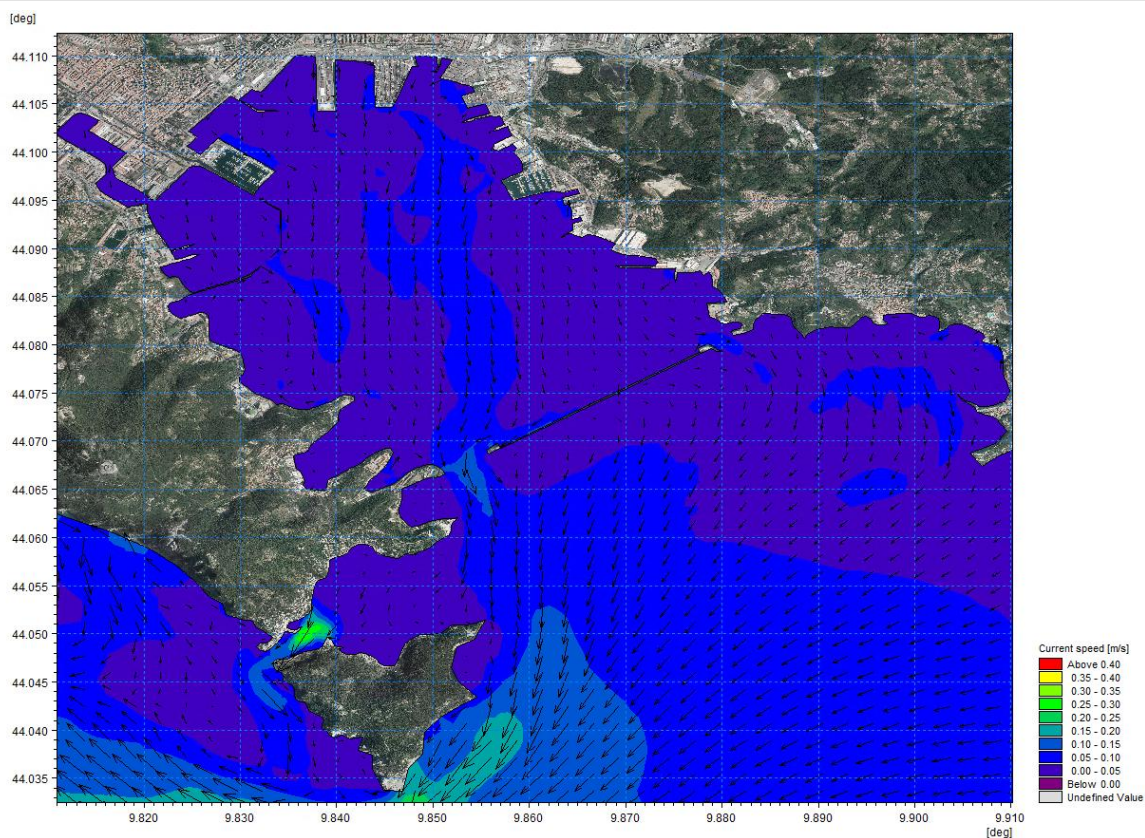


Figura 6.10 – Campo di velocità di corrente a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

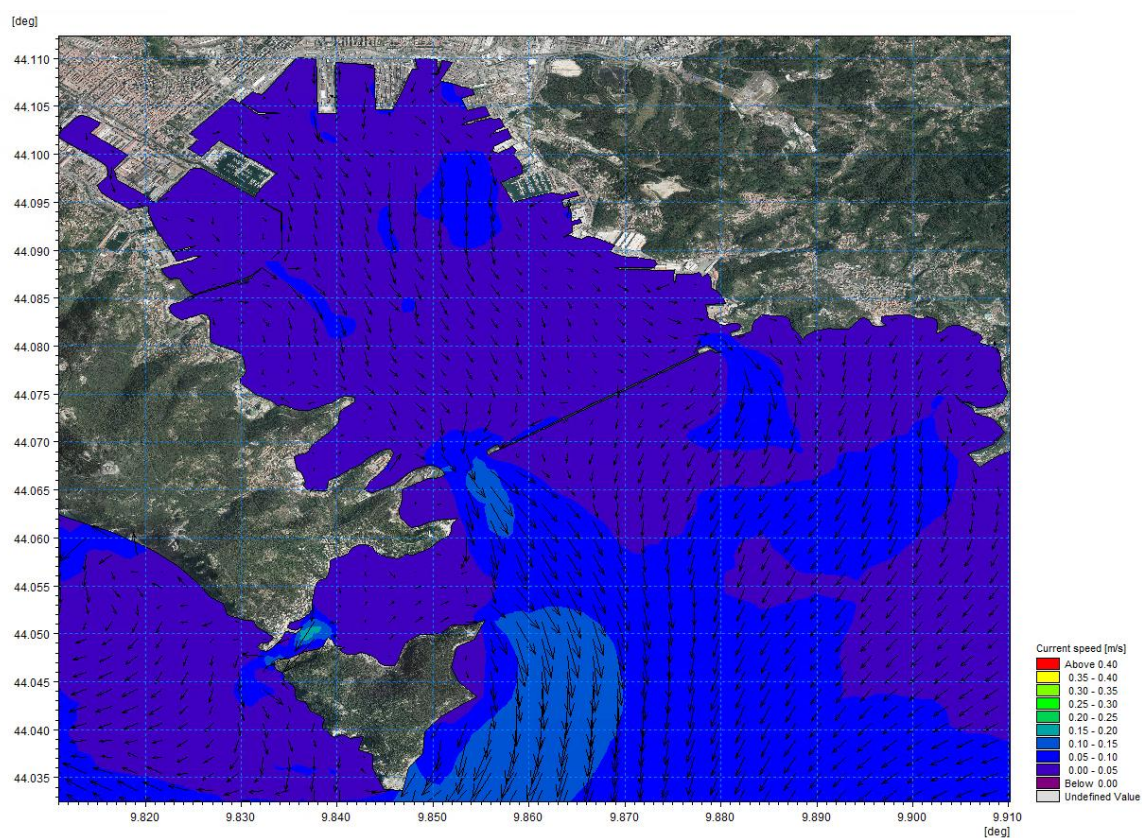


Figura 6.11 – Campo di velocità di corrente al fondo nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

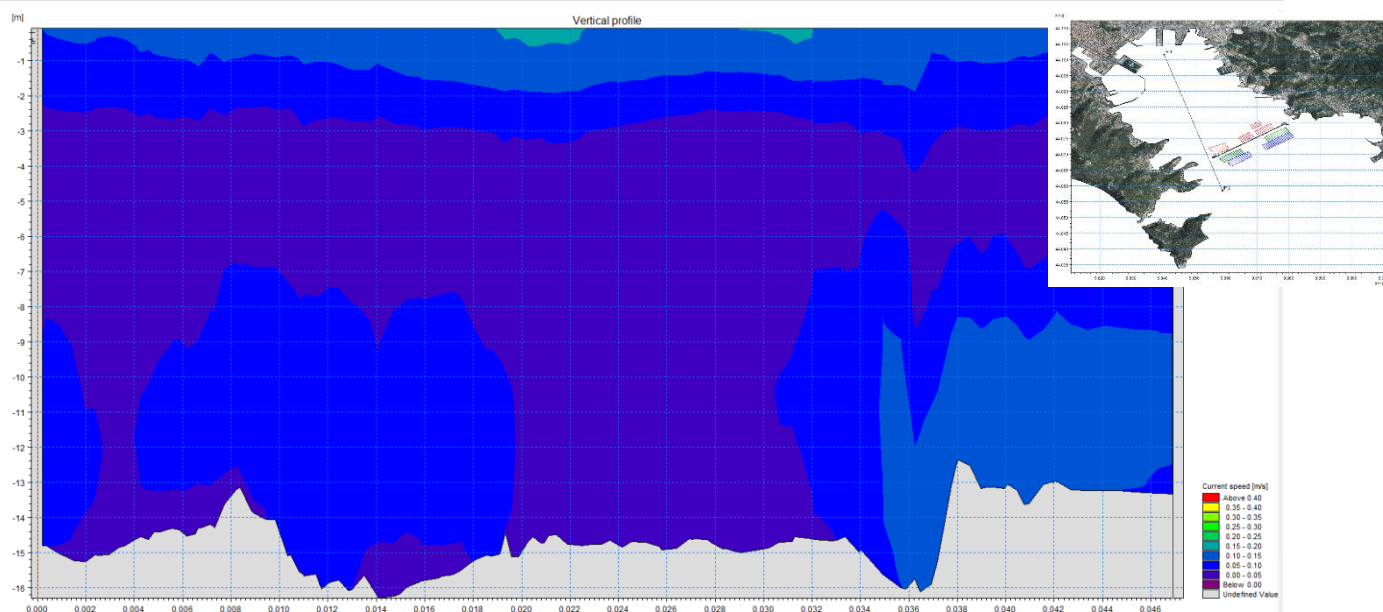


Figura 6.12 – Campo di velocità di corrente in sezione verticale il giorno 11/02/2020

La distribuzione delle temperature risulta molto contenuta con valori molto simili tra strati superficiali e fondale.

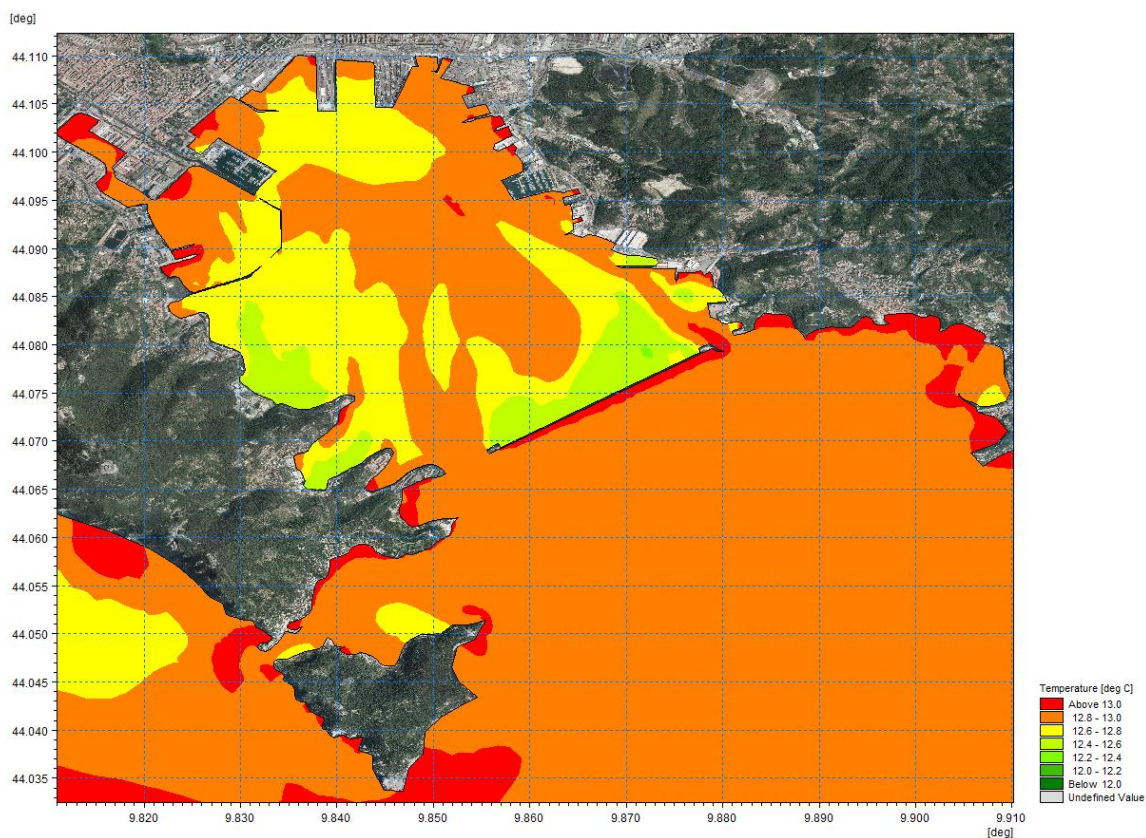


Figura 6.13 – Gradienti di temperatura in superficie nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

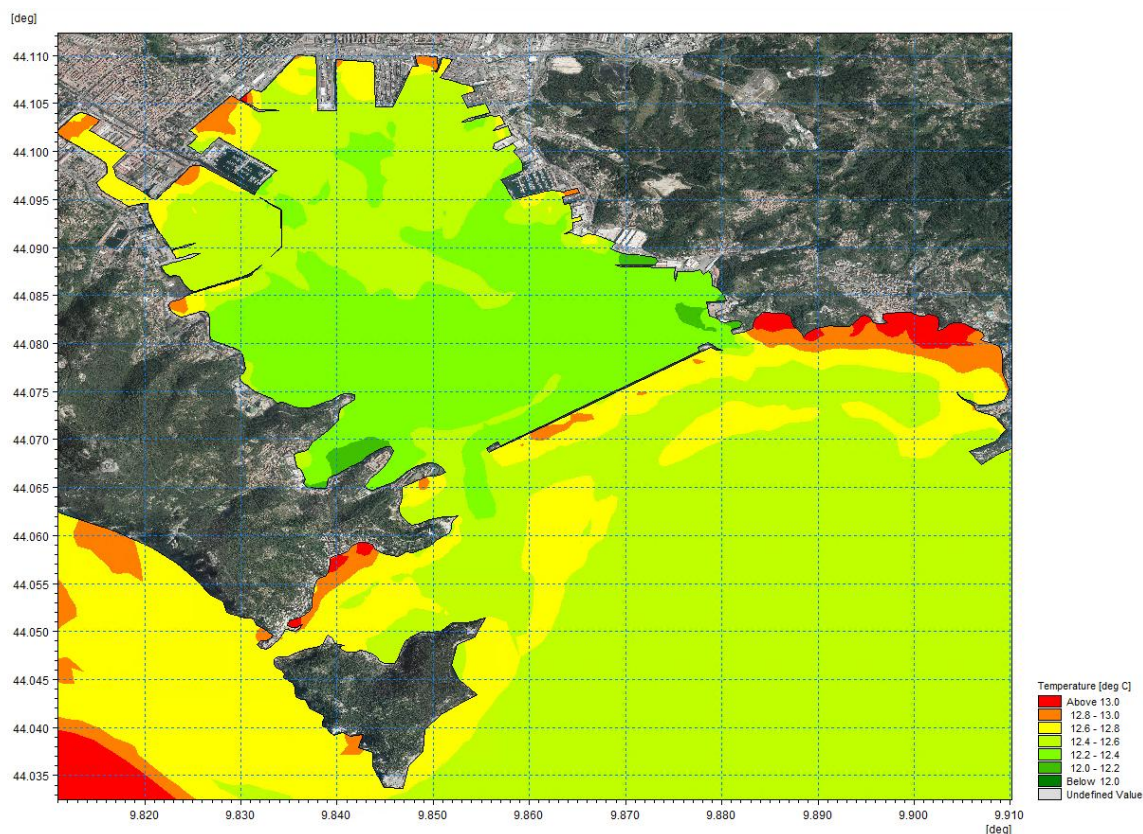


Figura 6.14 – Gradienti di temperatura a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

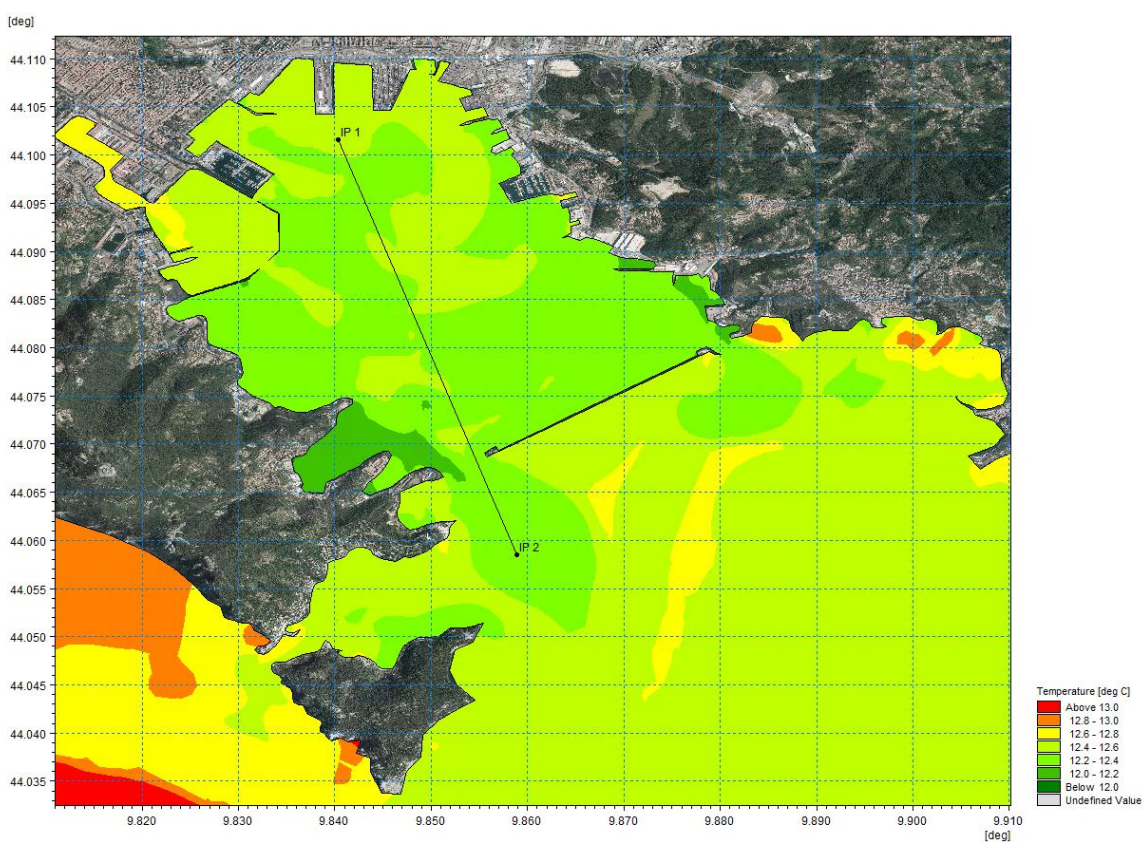


Figura 6.15 – Gradienti di temperatura al fondo nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

INTERVENTO DI MANUTENZIONE ED APPROFONDIMENTO DEI FONDALI NEL PORTO MERCANTILE DELLA SPEZIA
LOTTO FUNZIONALE N.1 - TERZO BACINO PORTUALE E CANALE DI INGRESSO

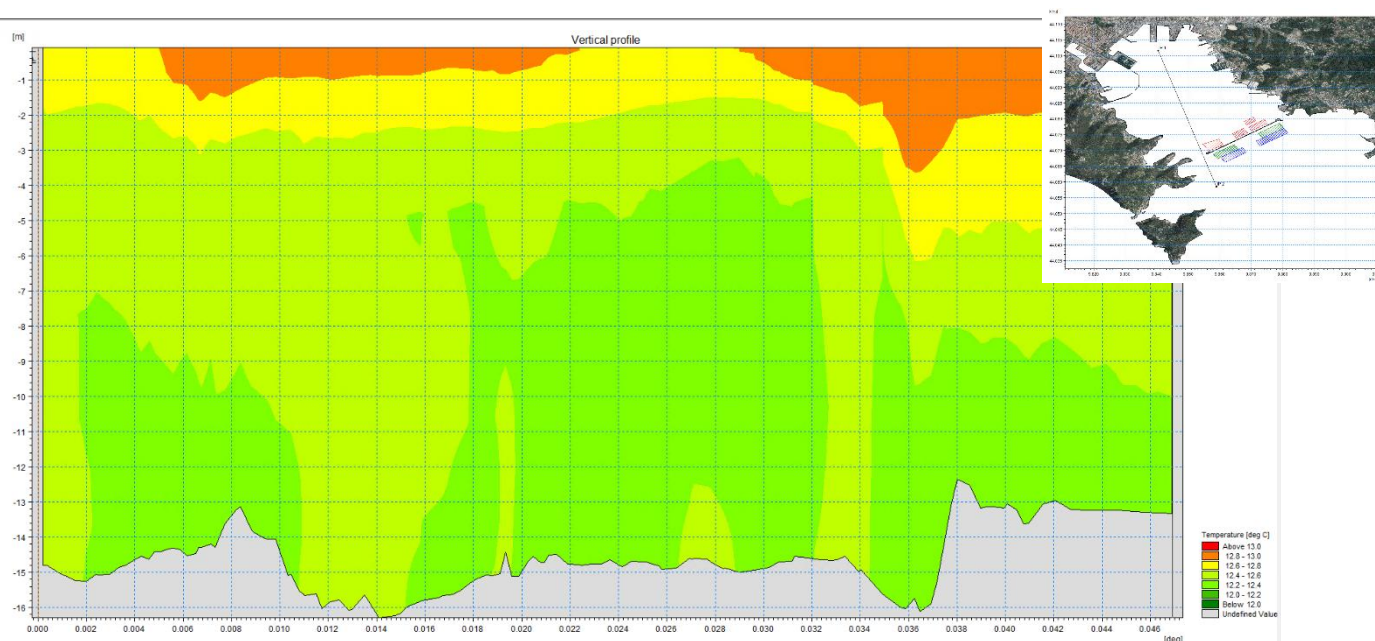


Figura 6.16 – Gradienti di temperatura in sezione verticale il giorno 11/02/2020

La distribuzione della salinità evidenzia valori più alti all'interno della rada e un gradiente significativo sulla colonna d'acqua.

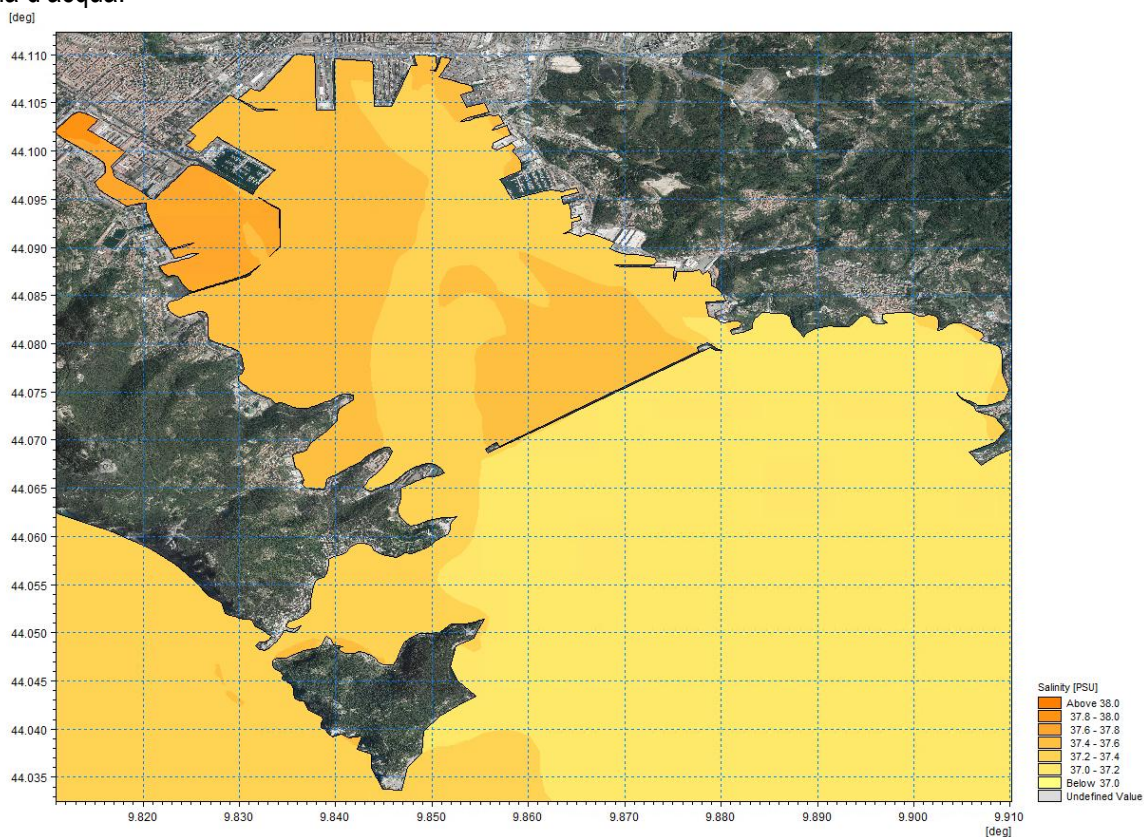


Figura 6.17 – Gradienti di salinità in superficie nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

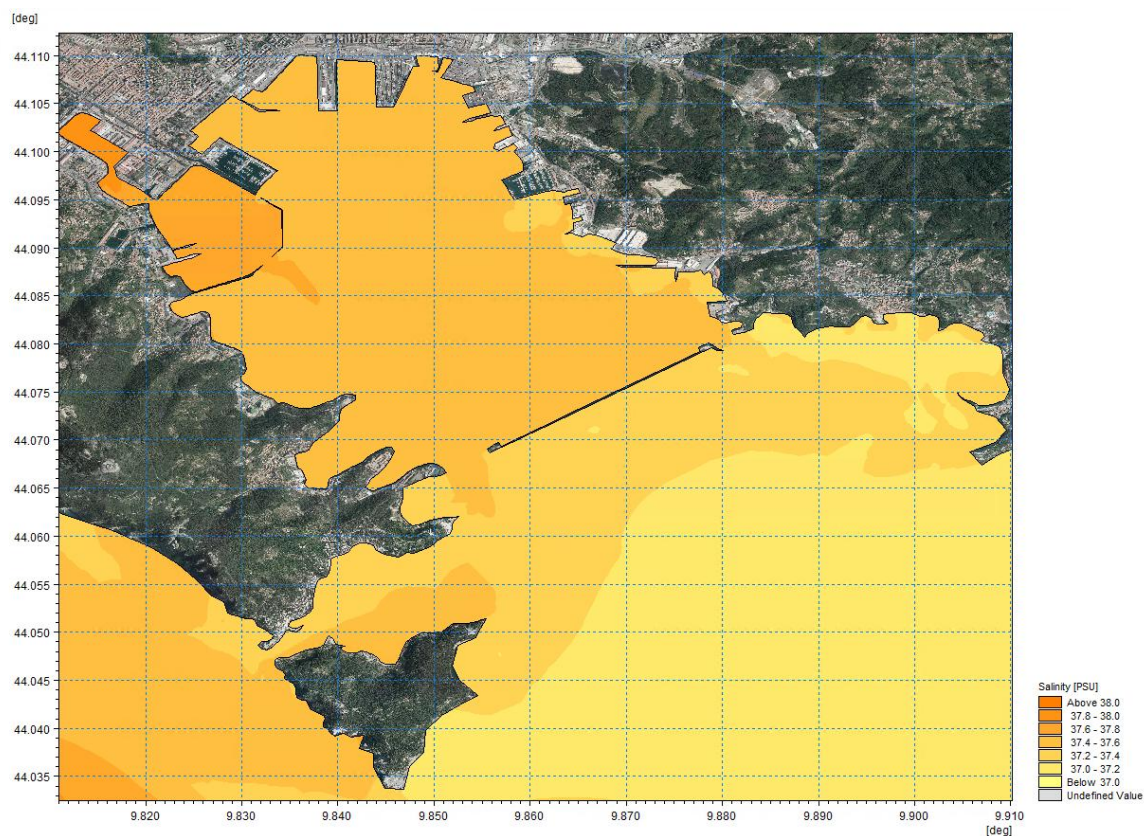


Figura 6.18 – Gradienti di salinità a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

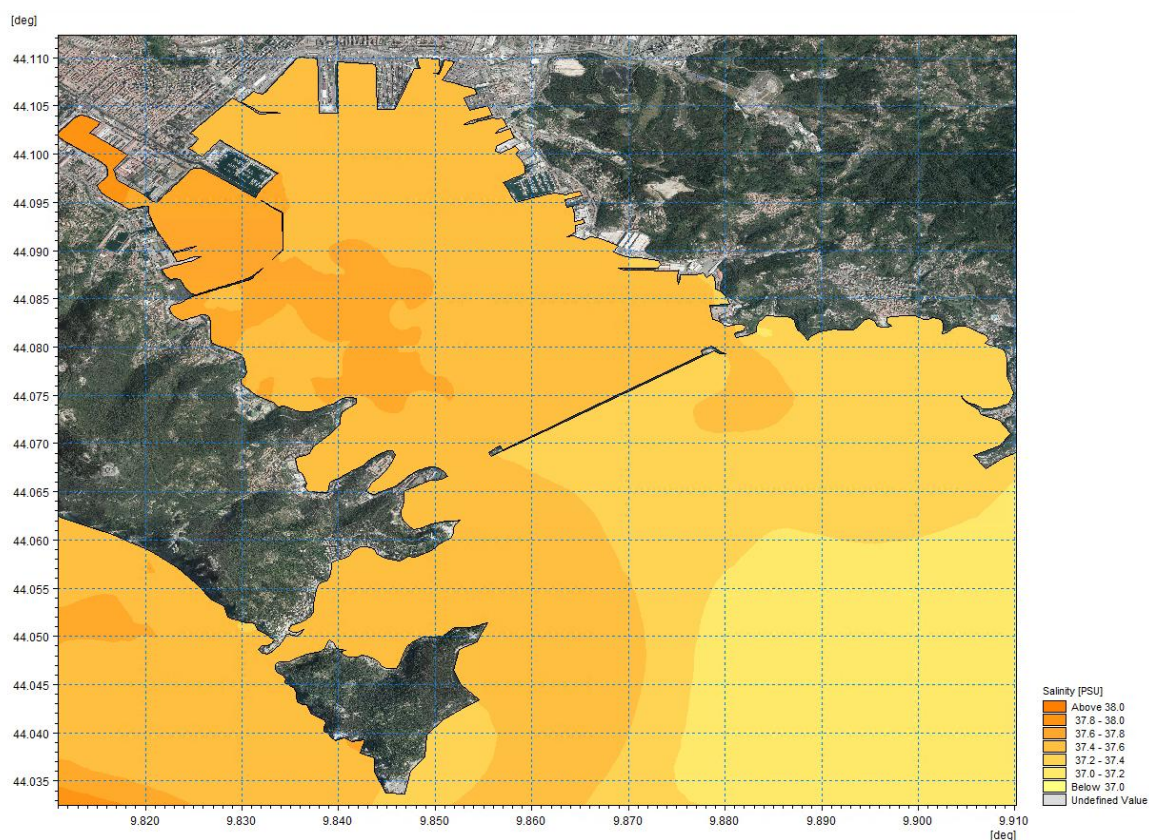


Figura 6.19 – Gradienti di salinità al fondo nel dominio di calcolo il giorno 11/02/2020

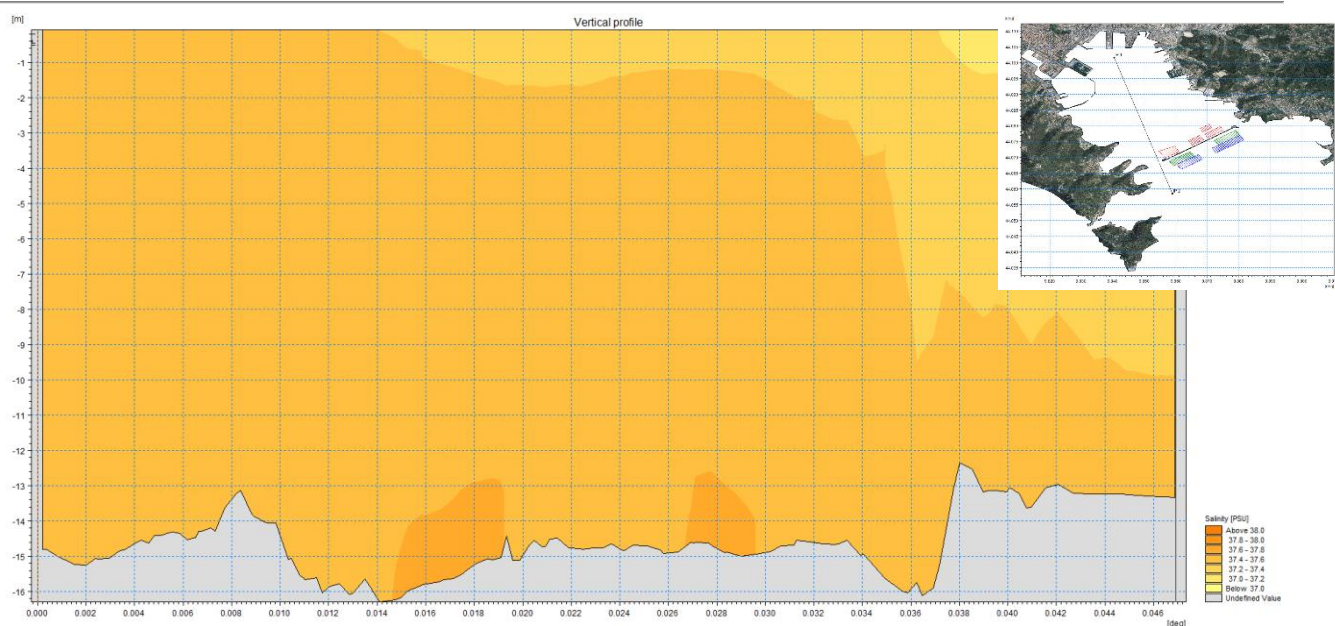


Figura 6.20 – Gradienti di salinità in sezione verticale il giorno 11/02/2020

6.5.2 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE HD DEL PERIODO ESTIVO

I risultati del modello HD cimentato sul periodo medio estivo evidenziano regimi della corrente caratterizzati da velocità inferiori rispetto al periodo invernale, con circolazione da largo verso l'interno della rada sugli strati più superficiali della colonna d'acqua, mentre sugli strati inferiori si registra spesso un'inversione della circolazione sebbene meno marcata.

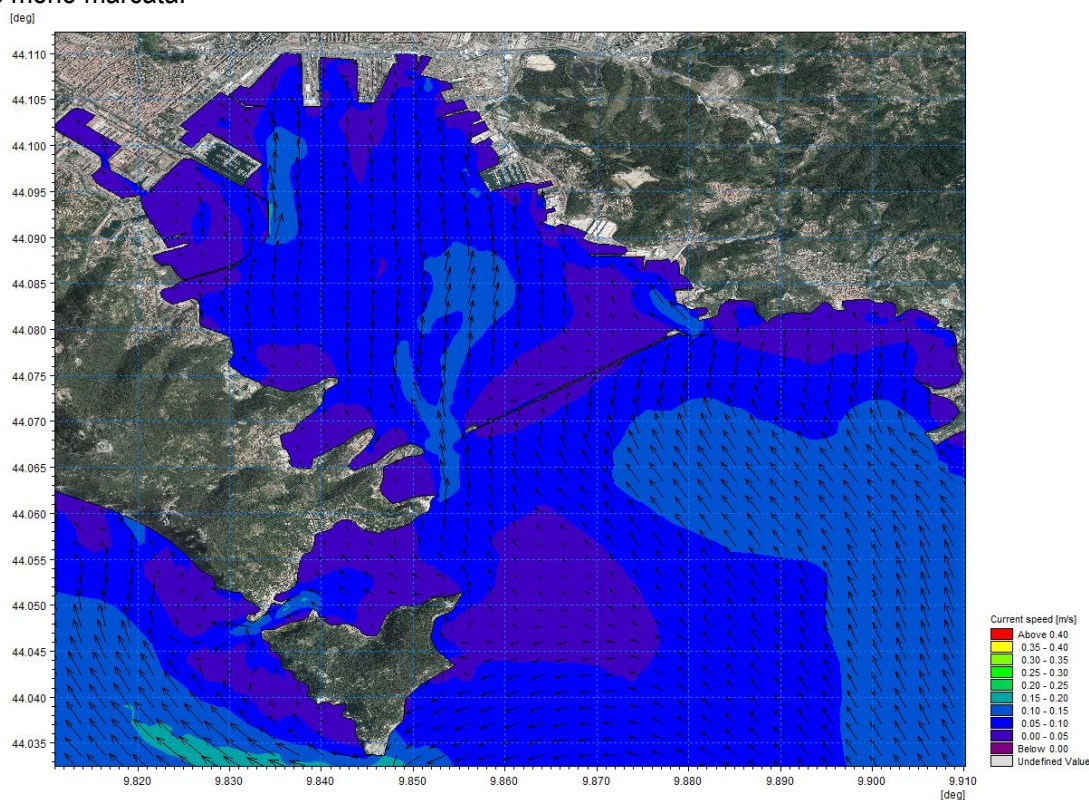


Figura 6.21 – Campo di velocità di corrente in superficie nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

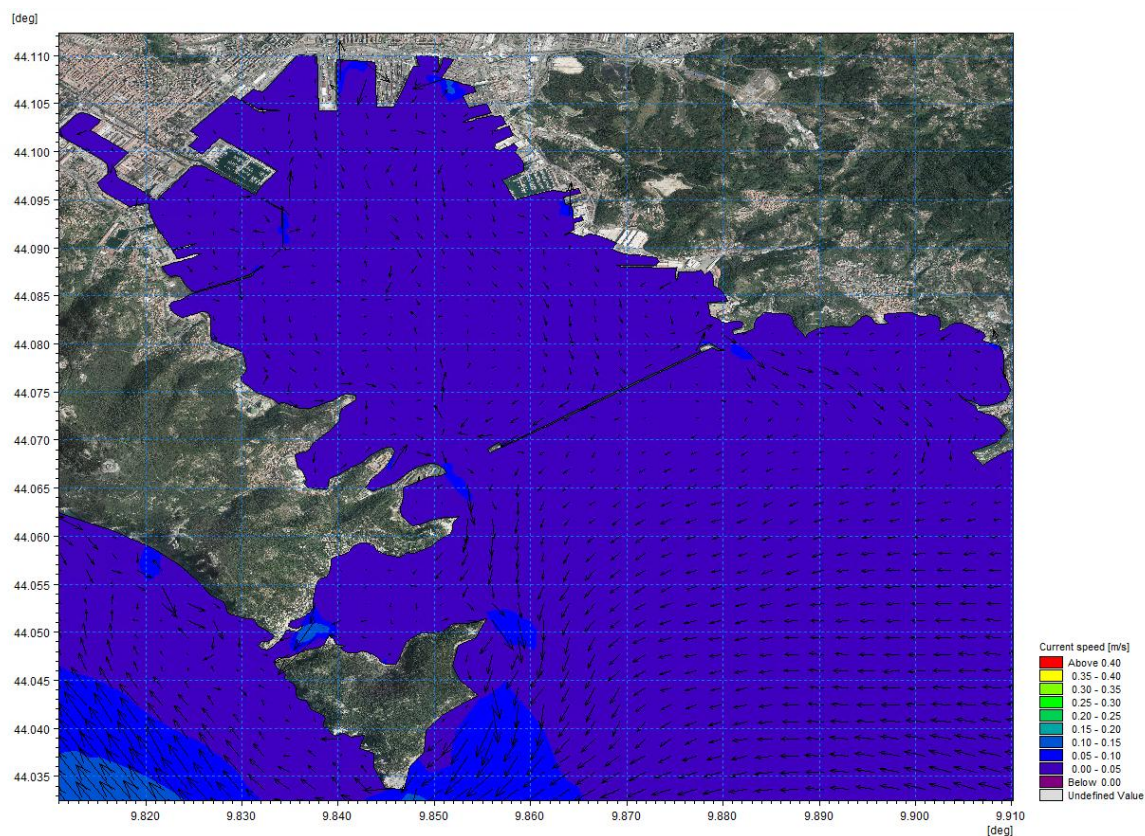


Figura 6.22 – Campo di velocità di corrente a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

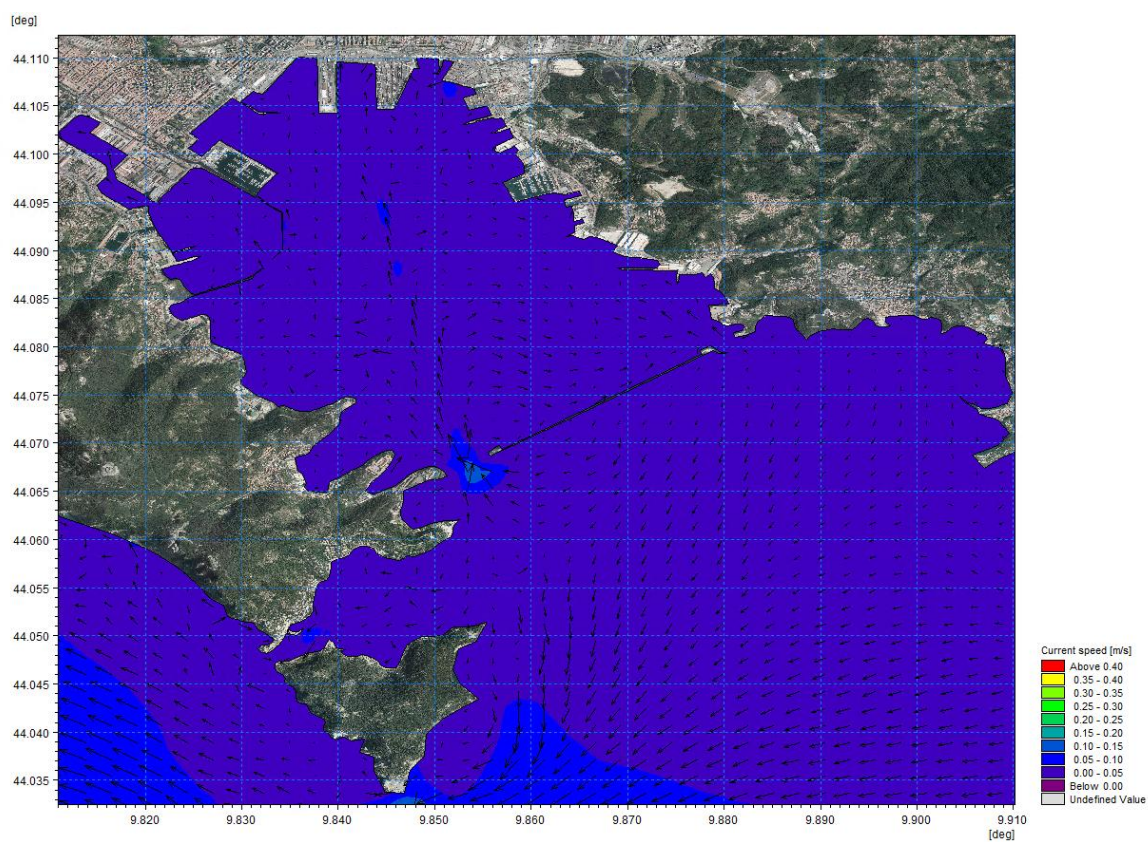


Figura 6.23 – Campo di velocità di corrente al fondo nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

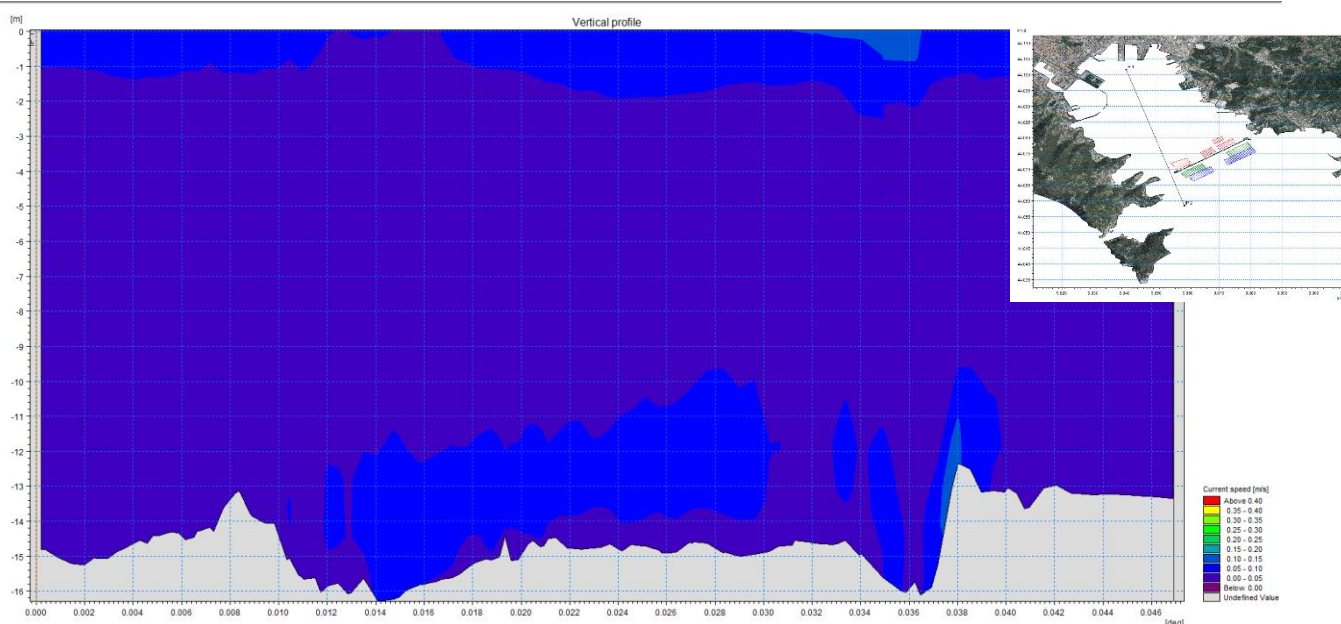


Figura 6.24 – Campo di velocità di corrente in sezione verticale il giorno 13/08/2020

Si registrano ampi gradienti di temperatura tra gli strati superficiali e il fondale.

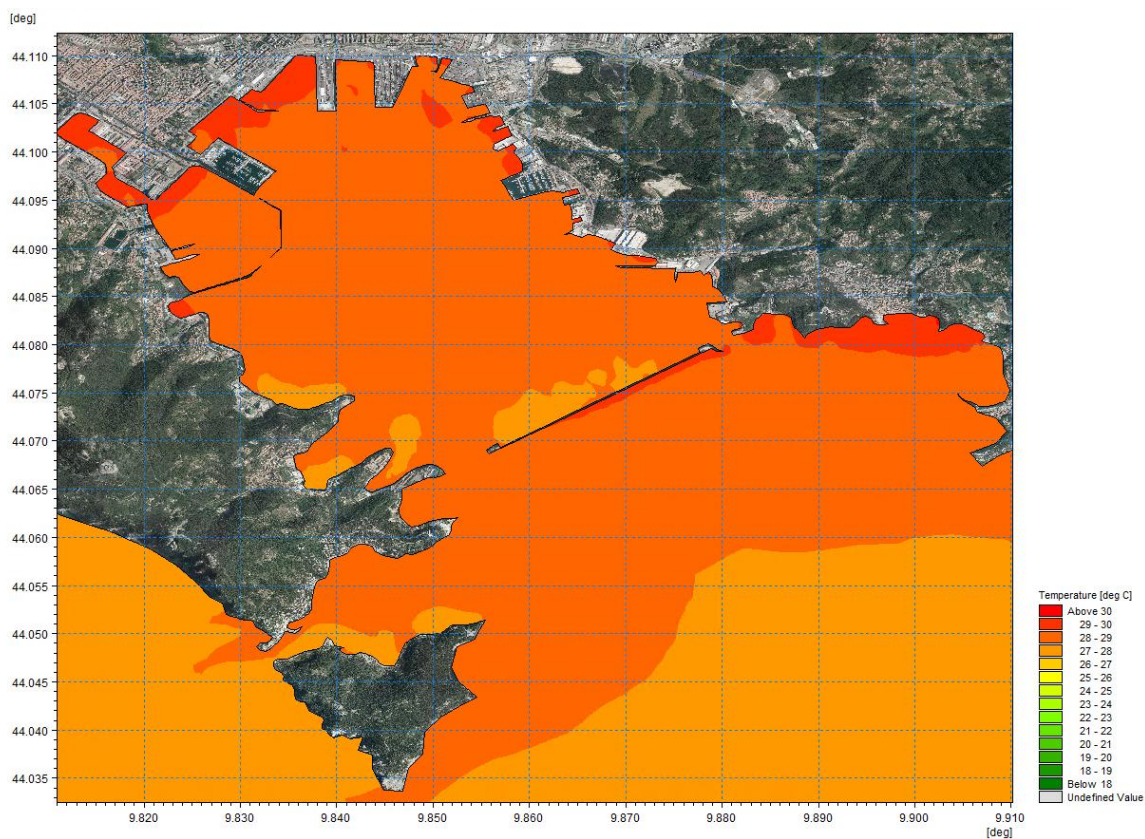


Figura 6.25 – Gradienti di temperatura in superficie nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

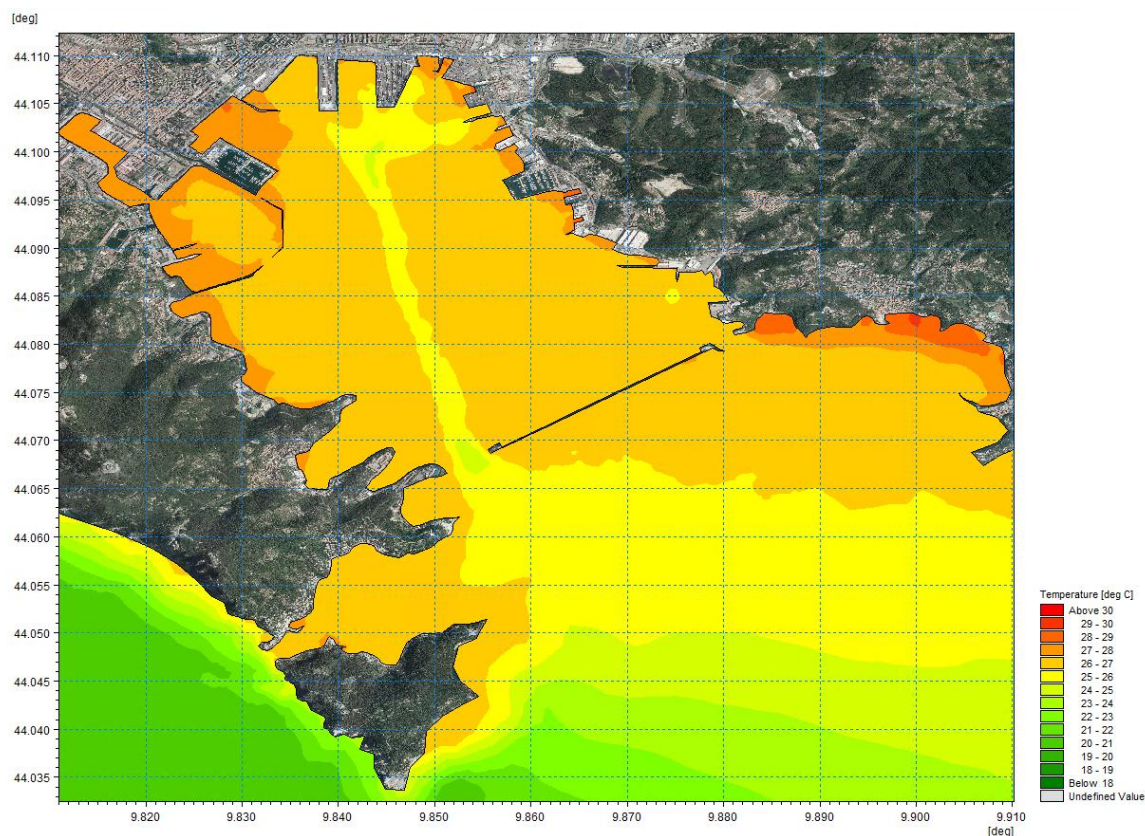


Figura 6.26 – Gradienti di temperatura a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

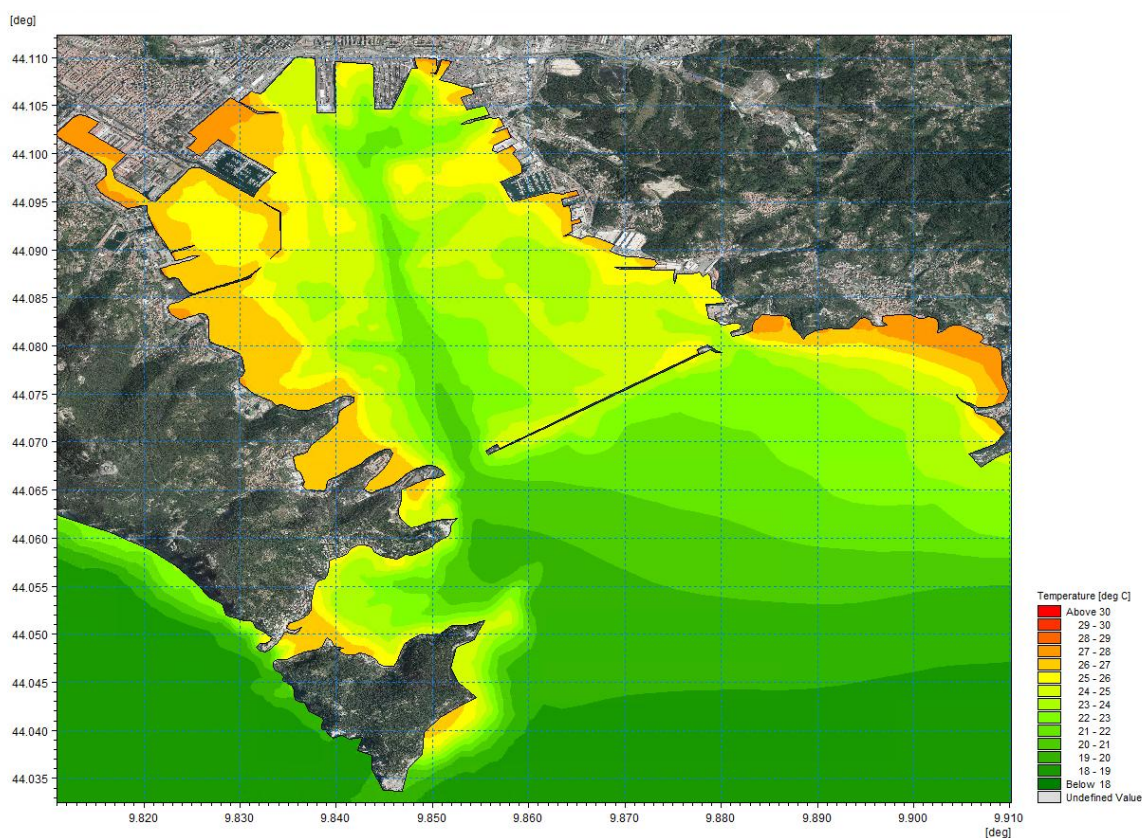


Figura 6.27 – Gradienti di temperatura al fondo nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

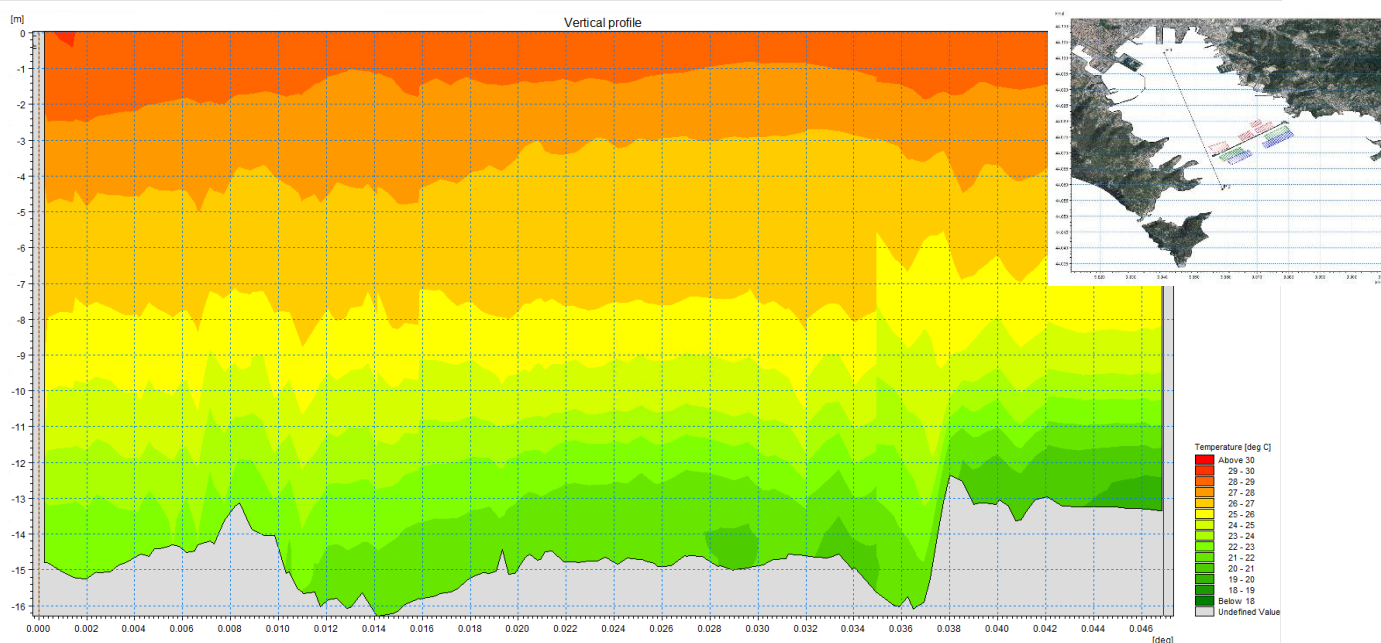


Figura 6.28 – Gradienti di temperatura in sezione verticale il giorno 13/08/2020

La distribuzione della salinità evidenzia valori molto simili lungo la colonna d'acqua, ma in un range superiore rispetto al periodo invernale.

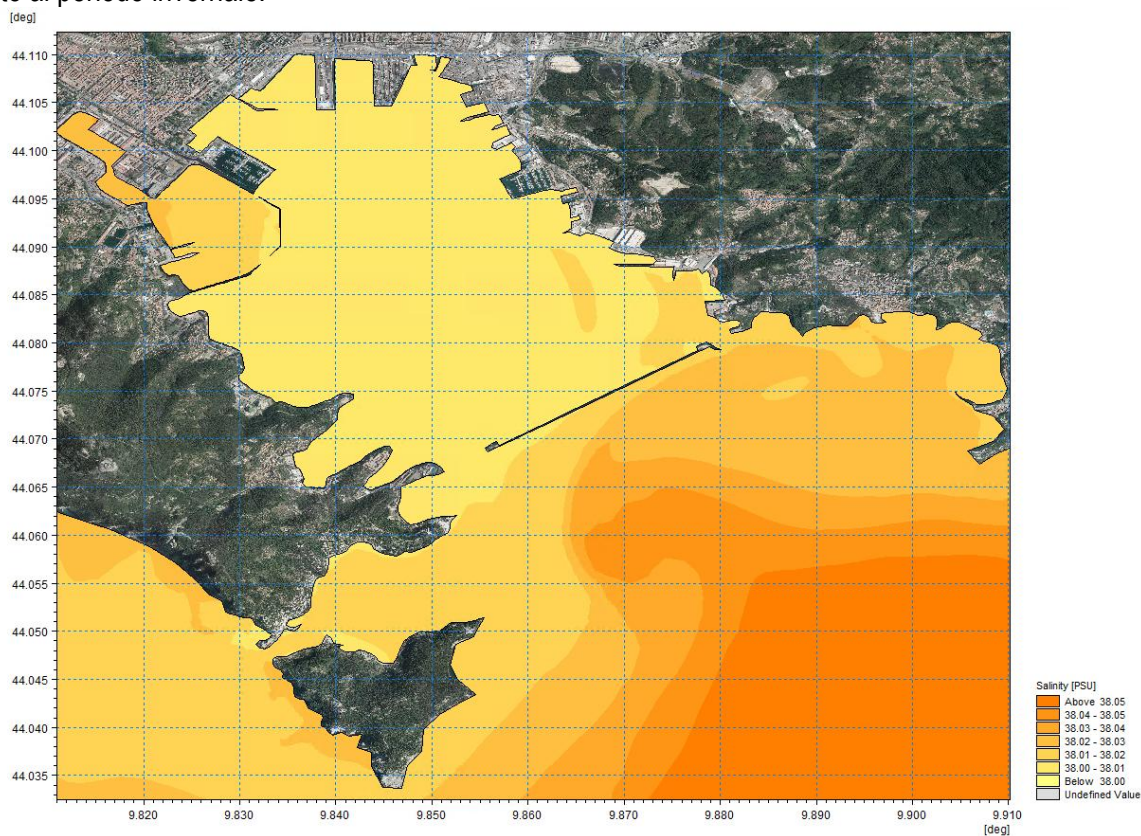


Figura 6.29 – Gradienti di salinità in superficie nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

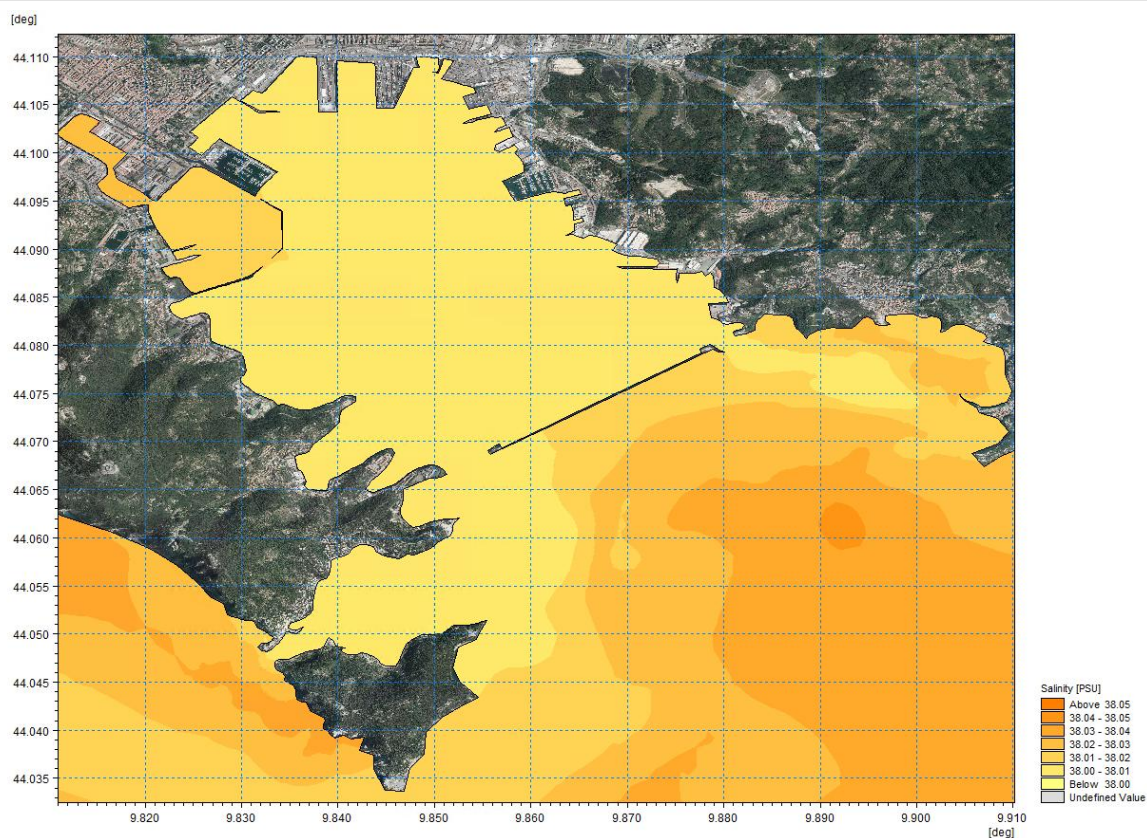


Figura 6.30 – Gradienti di salinità a metà colonna d'acqua nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

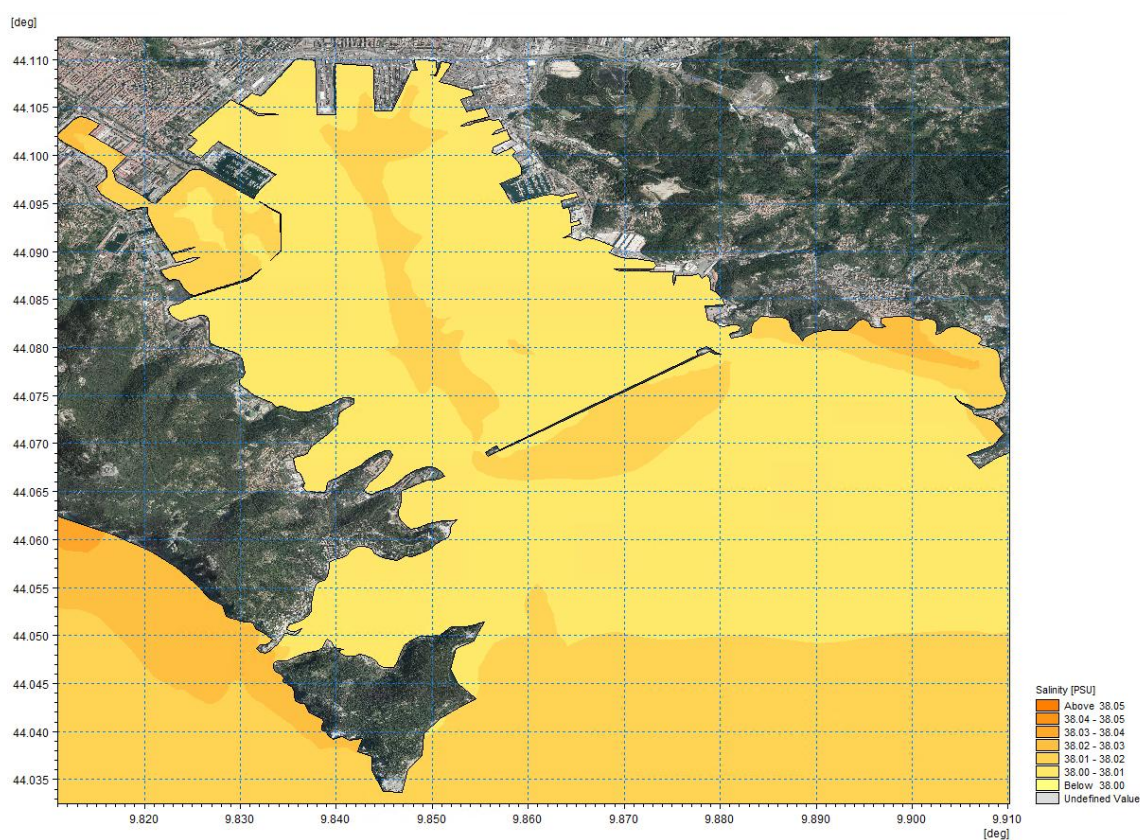


Figura 6.31 – Gradienti di salinità al fondo nel dominio di calcolo il giorno 13/08/2020

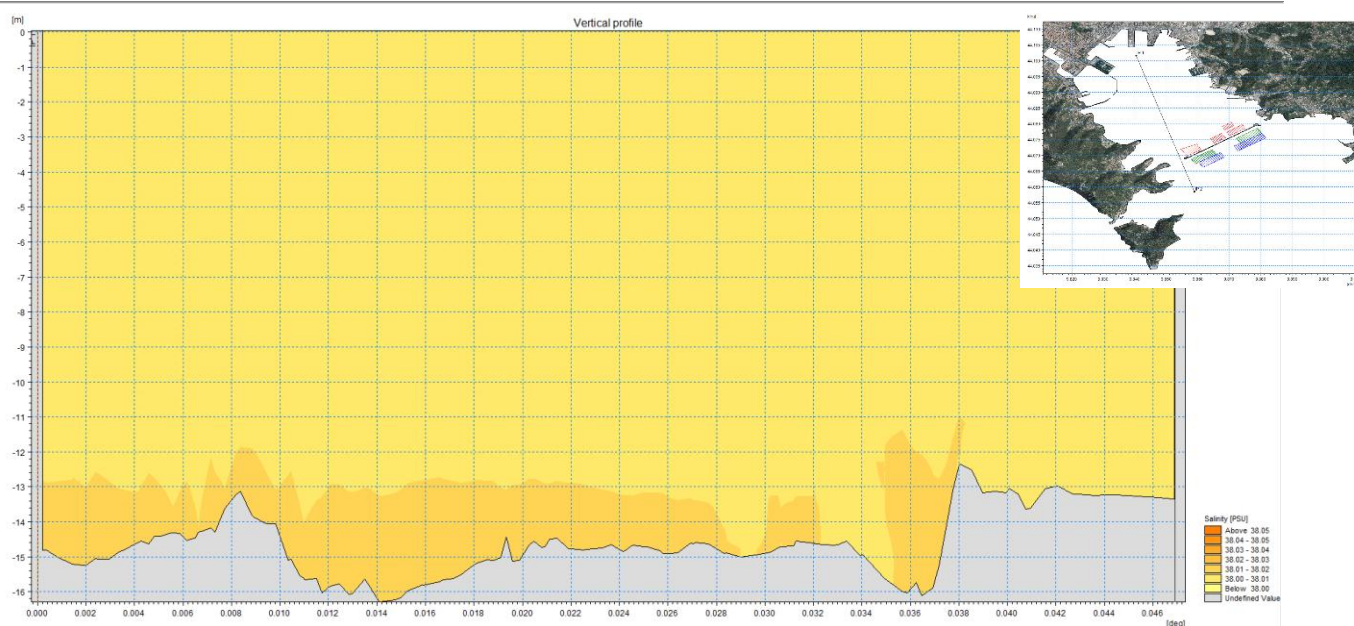


Figura 6.32 – Gradienti di salinità in sezione verticale il giorno 13/08/2020

7. MODELLO DI TRASPORTO DEI SEDIMENTI (MT)

Il presente capitolo è dedicato alla valutazione dei fenomeni di dispersione, trasporto e deposizione dei sedimenti messi in sospensione in ragione delle attività di dragaggio in progetto.

Il modello utilizzato, *MIKE 3 MT - Mud Transport* di DHI, descrive i fenomeni succitati sulla base delle simulazioni idrodinamiche effettuate con il modulo MIKE 3 HD.

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

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

In Figura 7.1 sono illustrati schematicamente i processi che sono simulabili con il modello MIKE 3 MT.

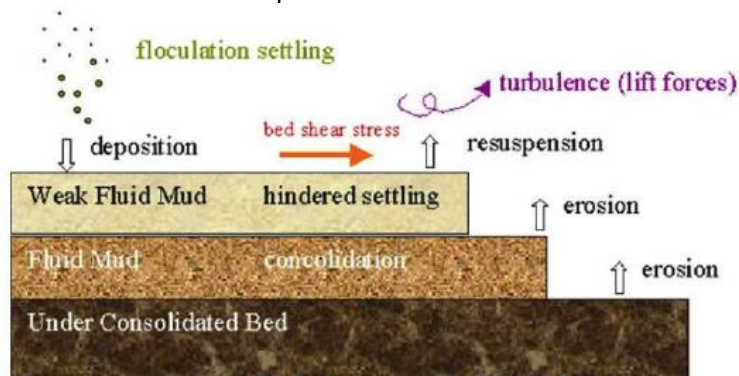


Figura 7.1 – Rappresentazione schematica dei processi simulati nel Modulo Mud Transport (MT) in MIKE 3

Una descrizione dettagliata del modello MIKE 3 MT è riportata nell'APPENDICE C – MODULO MIKE 21 - MUD TRANSPORT (MT). Si rimanda altresì alla *Short Description* del software *Mike 21 & Mike 3 Flow Model FM – Mud Transport Module* messo a disposizione online da DHI.

7.1 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI DISPERSIONE DEI SEDIMENTI

Nel presente paragrafo si descrive l'approccio adottato nell'implementazione del modello di dispersione dei sedimenti, le forzanti utilizzate ed i risultati ottenuti.

7.1.1 BATIMETRIA E DOMINIO DI CALCOLO

Per quanto concerne la batimetria e la discretizzazione del dominio di calcolo a supporto del modello MT, questa coincidono con quanto utilizzato per il modello idrodinamico (HD). Si rimanda dunque ai paragrafi §6.2 - *Batimetria e dominio di calcolo* e §6.3 - *Discretizzazione Verticale* per una descrizione.

7.1.2 CARATTERIZZAZIONE DEL MODELLO

Con lo scopo di simulare la dispersione e l'evoluzione del pennacchio di torbida di sedimento messo in sospensione in ragione delle operazioni di dragaggio in progetto, si è provveduto alla definizione all'interno del modello delle caratteristiche dei sedimenti che saranno movimentati.

In particolare, sono state inserite le seguenti informazioni:

- componenti tessiturali e loro percentuali e dimensioni medie pesate dei sedimenti costituenti ciascuna frazione granulometrica, e, in funzione di queste, velocità di sedimentazione associata a ciascuna frazione; a tal fine si è fatto riferimento agli studi sedimentologici più recenti (ottobre 2024), prendendo a riferimento i valori medi dei campioni.

Classe Tessiturale	Diametro medio [μm]	Percentuale tessiturale [%]
Sabbia	250	47
Limo	15.6	43
Argilla	3.5	10

Tabella 7.1 – Dati sedimentologici in input al modello MT

- densità del sedimento secco e del sedimento appena depositato, quindi in presenza di porosità. Tali valori sono stati impostati rispettivamente pari a 2650 [kg/mc] e 180 [kg/mc];
- limite di flocculazione*: è stata imposta per concentrazioni di sedimento coesivo superiori a 10 [mg/l]. Per concentrazioni maggiori, la probabilità di collisione delle singole particelle di sedimento aumenta e di conseguenza, tende ad innescarsi il fenomeno della flocculazione. Quando si formano aggregazioni di particelle di sedimento, i cosiddetti “fiocchi”, la velocità di sedimentazione aumenta al crescere della concentrazione del sedimento. Nei sedimenti non coesivi (sabbie) tale fenomeno non si attiva e pertanto la velocità di sedimentazione può essere considerata costante ed indipendente dalla concentrazione del sedimento nella colonna d'acqua;
- limite di sedimentazione ostacolata (hindered settling)*: l'attivazione della sedimentazione ostacolata è stata imposta per concentrazioni di sedimento coesivo superiori a 10000 [mg/l]. Questo fenomeno si innesca infatti quando, a causa dell'elevata concentrazione, le particelle entrano in contatto tra loro e non sono in grado di sedimentare “liberamente” verso il fondo;
- il fondo naturale è stato considerato non erodibile, al fine di evitare che la stima della torbidità e della deposizione durante le operazioni sia influenzata dalla eventuale messa in sospensione del sedimento in caso di mareggiata. È invece ammessa la possibilità che il sedimento depositato, in ragione dell'evoluzione delle operazioni, possa essere rimesso in sospensione;
- la tensione tangenziale critica al fondo, ossia la tensione oltre la quale il sedimento depositato viene messo in sospensione dalle forzanti in gioco (onda e corrente), è stata imposta pari a 0.1 [N/mq].

L'area di intervento è stata suddivisa in aree operative ai fini modellistici e di cantierizzazione dell'intervento (Figura 7.2). Per ciascuna area operativa sono stati individuati i volumi di materiale che è necessario movimentare per il dragaggio del fondale.

Nell'ottica di applicare un approccio a finestre temporali mobili, metodologia conforme ai contenuti delle già citate linee guida ISPRA del 2017 relative alla *Modellistica Matematica nella Valutazione degli aspetti fisici legati alla movimentazione dei sedimenti in aree marino-costiere*, tra le aree oggetto di intervento è stata individuata come **unità operativa** di riferimento per i LAVORI PRINCIPALI la cella denominata **T11** e per i LAVORI OPZIONALI la cella **T31**. La scelta è ricaduta su tali aree sulla base dei seguenti criteri:

- quantitativo di sedimenti da movimentare;
- dinamiche di corrente;
- fondale marino (altezza della colonna d'acqua);
- disposizione planimetrica.

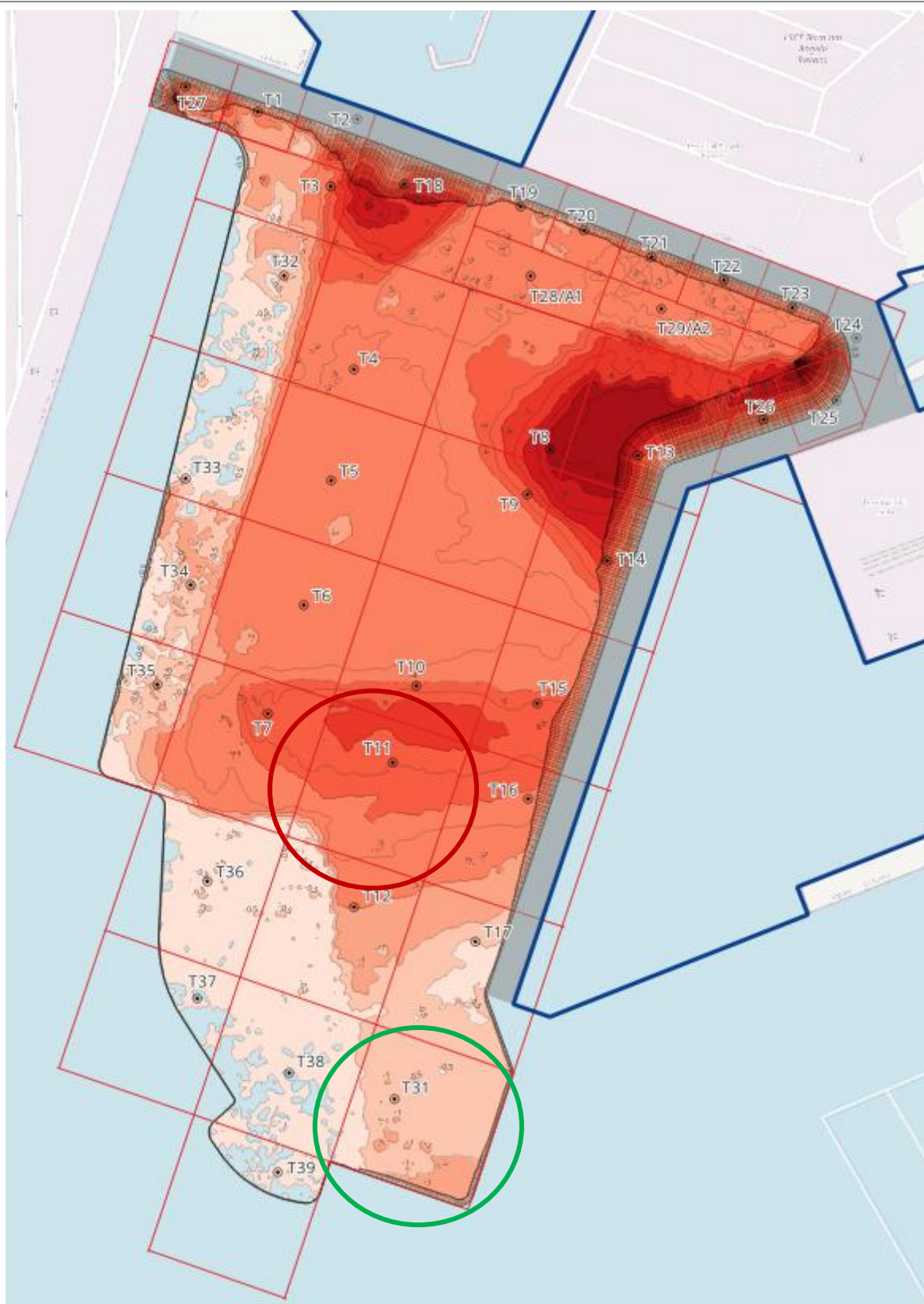


Figura 7.2 – Suddivisione dell'intervento in aree operative ed individuazione delle unità operative di riferimento (in rosso per i lavori principali, in verde per i lavori opzionali)

In tale unità è stato localizzato il prelievo di sedimento e la conseguente perdita di una frazione dello stesso, responsabile della formazione del pennacchio di torbida.

Nel “**dredging module file**” richiesto in input dal modello MT è stato definito l’andamento temporale del tasso di volume oggetto di movimentazione ed il relativo tasso di *spill* (ovvero di *perdita accidentale* dovuta alle operazioni di dragaggio).

Al fine di definire il rateo di spill si è fatto riferimento alla **Tabella SE.4** delle Linee Guida ISPRA, di cui in Tabella 7.2 si riporta uno stralcio.

In ragione del sistema adottato per le lavorazioni di cui trattasi e della relativa attrezzatura (**dragaggio di tipo meccanico eseguito con impiego di motonavi a stiva stagna e benna ecologica ecograb che minimizza le perdite di sedimento al fondo**), si è cautelativamente adottato un **tasso di spill pari al 5%**.

L’impresa esecutrice dovrà utilizzare un sistema avente tali caratteristiche o equivalente, in modo tale da garantire, durante l’intera durata delle operazioni di livellamento, il non superamento di tale tasso di spill.

PARAMETRI CONSIDERATI IN FEOLA et al., 2016				PARAMETRI CONSIDERATI IN BECKER et al., 2015			
Parametro	U.M.	Draga Meccanica	Draga Idraulica	Parametro	U.M.	Draga Meccanica	Draga Idraulica
% spill	%	5		Percentuale di fine rilasciato dalla benna (σ_b), o dalla testa dragante (σ_d)	%	4	3

Tabella 7.2 – Stralcio della Tabella SE.4 delle Linee Guida ISPRA: Parametri considerati per l’implementazione del termine sorgente associato a draga di tipo meccanico ed idraulico (Feola et al., 2016) e comparazione con i termini analoghi utilizzati da Becker et al., 2015 relativi a draga meccanica del tipo BHD e idraulica del tipo TSHD

In base alle valutazioni condotte sulla cantierizzazione dell’intervento e sui quantitativi concordati nel cronoprogramma delle attività finalizzate al riutilizzo dei sedimenti presso i cassoni della costruenda nuova diga di Genova (20000-35000 mc/15 gg), per la tecnica di dragaggio proposta si prevede una **capacità di produzione di 1300-2600 [mc] al giorno**, ipotizzando un **turno lavorativo di 4-8 [ore]**, con utilizzo di motonavi a stiva stagna con capacità di carico di 1300 mc e tempi di carico di 4 ore.

Sulla base di queste considerazioni, risulta un tasso di movimentazione pari a circa **165 [kg/s]**, assumendo una densità media del sedimento pari a circa 1800 kg/mc.

Sulla base delle considerazioni sopra riportate, su ciascuna unità operativa di riferimento sono state predisposte le seguenti **analisi giornaliere**:

- A) movimentazione di 1300 mc in 4 ore, con durata complessiva della simulazione pari a 24 ore (20 ore di sola propagazione/deposizione del pennacchio di torbida);**
- B) movimentazione di 2600 mc in 8 ore, con durata complessiva della simulazione pari a 24 ore (16 ore di sola propagazione/deposizione del pennacchio di torbida).**

Le simulazioni di trasporto di sedimento sono state eseguite con **approccio a “finestre mobili”**: per ogni mese di simulazione idrodinamica (estivo e invernale) il modulo di trasporto di sedimento ad essa accoppiato è stato cimentato ipotizzando che le operazioni abbiano inizio il giorno 1-2-3-4-5-...-30 del mese. A fronte della durata

netta delle operazioni di dragaggio (4-8 ore), ciascuna simulazione di MT ha una durata maggiorata (24 ore) al fine di simulare l'evoluzione del pennacchio di torbida non solo durante le operazioni, ma anche ore successive fino ad un suo completo esaurimento (completa deposizione al fondo o presenza di concentrazioni trascurabili in colonna d'acqua nel dominio di calcolo).

7.1.3 RISULTATI DELLA MODELLISTICA

Di seguito si riportano i risultati ottenuti mediante l'applicazione del modello *MIKE 3 - Mud Transport*. Per entrambi i periodi di riferimento indagati, invernale ed estivo tipico, i risultati sono riportati in termini di:

- **distribuzione spaziale della concentrazione massima di sedimento sospeso** (di seguito massimo pennacchio di torbida atteso), in termini totali (ovvero la somma delle tre frazioni, argilla, limo e sabbia), al fondo, a mezza colonna ed in superficie. I valori rappresentati sono calcolati come valore medio dei massimi valori di concentrazione riscontrati durante ogni singola simulazione a finestra mobile;
- **stratificazione nella colonna d'acqua del massimo pennacchio di torbida atteso** (sezione verticale lungo la direttrice principale del pennacchio);
- **distribuzione spaziale dei tempi di superamento della soglia minima di riferimento per la concentrazione**.

Per ciascuna unità operativa di riferimento (T11 e T31), le analisi sono state svolte ipotizzando 2 produttività giornaliere tipo (durata complessiva 24h):

- A) 1300 mc in 4 ore, seguite da 20 ore di riposo;
- B) 2600 mc in 8 ore, seguite da 16 ore di riposo.

Si evidenzia che le mappe di concentrazione riportate nel seguito rappresentano i valori massimi raggiunti, in ogni punto del dominio, durante l'intero periodo di simulazione. Non sono pertanto rappresentativi di uno specifico istante temporale, ma individuano gli involuipi delle condizioni peggiori che si possono raggiungere in diversi istanti, durante il periodo di esecuzione delle operazioni.

La scelta del valore minimo di riferimento della concentrazione di sedimento rappresentabile nelle mappe illustrate non è immediata in quanto non esiste in assoluto un valore limite accettabile di concentrazione di sedimento sospeso, ma l'accettabilità o meno di concentrazioni di sedimento sospeso dipende in ogni caso dallo specifico contesto di riferimento (ambiente ed ecosistema). A livello internazionale la concentrazione di **2 [mg/l]** viene diffusamente considerata la soglia al di sotto della quale l'acqua è da considerarsi "limpida" e per valori di concentrazione di sedimento inferiori a tale soglia nessuna specie può essere "perturbata". Tuttavia l'acqua inizia in genere ad essere definita "torbida" quando i valori di concentrazione di sedimento sospeso superano i **10 [mg/l]**. Si evidenzia altresì che il valore di **30 [mg/l]** può essere assunto quale soglia al di sotto della quale l'impatto della risospensione dei sedimenti sull'ambiente circostante è minimo. Tale valore è infatti confrontabile, per durata ed intensità, con quello dovuto alla concentrazione che può essere raggiunta con accettabile frequenza nel corso di eventi naturali (temporali, mareggiate e correnti di marea). Si tratta in pratica di un valore di torbidità che determina una modificazione tollerabile rispetto alla situazione indisturbata dell'ecosistema.

Le mappe di concentrazione massima di sedimento sospeso su base mensile mostrano che il pennacchio di torbida rimane principalmente confinato al fondo e centrato sulle aree di lavorazione. Le concentrazioni maggiori si presentano esclusivamente in prossimità dell'area operativa e si riducono significativamente rimanendo sostanzialmente confinate all'interno delle aree oggetto di lavorazione.

La distribuzione della concentrazione massima di sedimento sospeso mette in evidenza che il materiale rimane confinato negli strati più profondi, con concentrazioni progressivamente più basse procedendo verso la superficie. Facendo riferimento a valori limite di 2 mg/l, il pennacchio di sedimenti non raggiunge mai la superficie sia nel periodo invernale che nel periodo estivo.

Per meglio comprendere la distribuzione del pennacchio di torbida lungo la colonna d'acqua, si può far riferimento al grafico di concentrazione massima di sedimento sospeso sulla verticale lungo l'asse di propagazione del pennacchio di torbida.

Anche i tempi di permanenza dei sedimenti in sospensione sono contenuti, evidenziando quindi la tendenza del materiale anche nella sua frazione più fine a permanere negli strati più profondi e a ridepositarsi in tempi rapidi. Si evidenzia infatti che sono sufficienti le ore di pausa giornaliera delle lavorazioni per far sì che la concentrazione del materiale in sospensione scenda al di sotto del limite di limpidezza assunto conservativamente pari a 2 mg/l.

7.1.4 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE MT - LAVORI PRINCIPALI

Si rappresentano di seguito per l'unità operativa T11 (rappresentativa per le lavorazioni principali) i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nelle varie modalità di produzione giornaliera.

7.1.4.1 Unità operativa T11 - Produttività giornaliera ipotesi A) – Periodo INVERNALE

Di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi A), ovvero operazioni di dragaggio di durata 4 ore (consecutive) per complessivi 1300 mc seguite da 20 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo invernale.

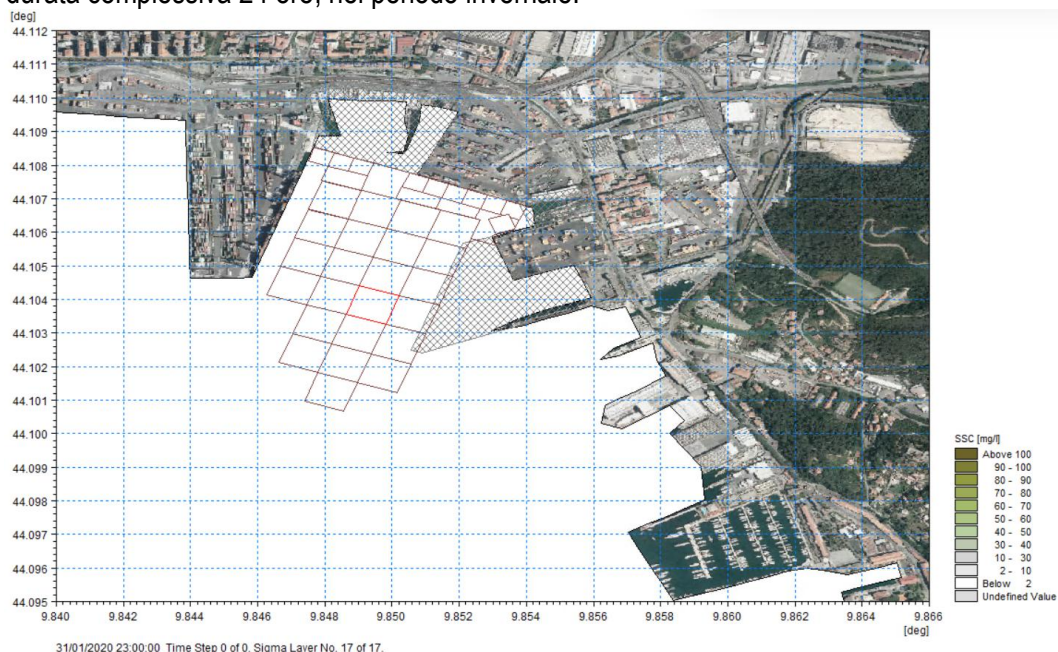


Figura 7.3 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale

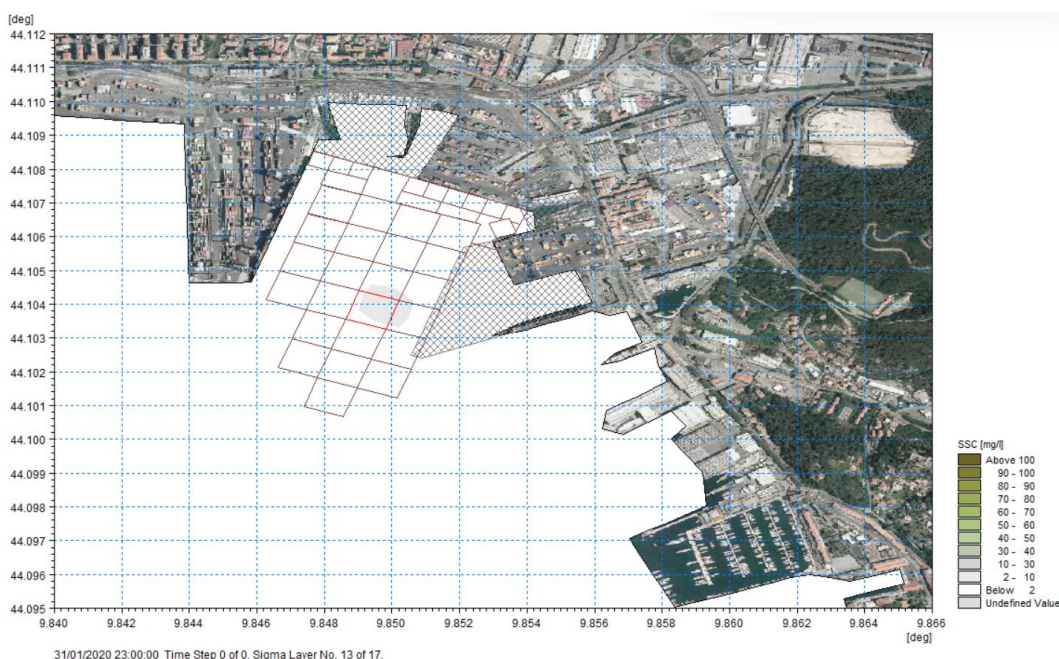


Figura 7.4 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua

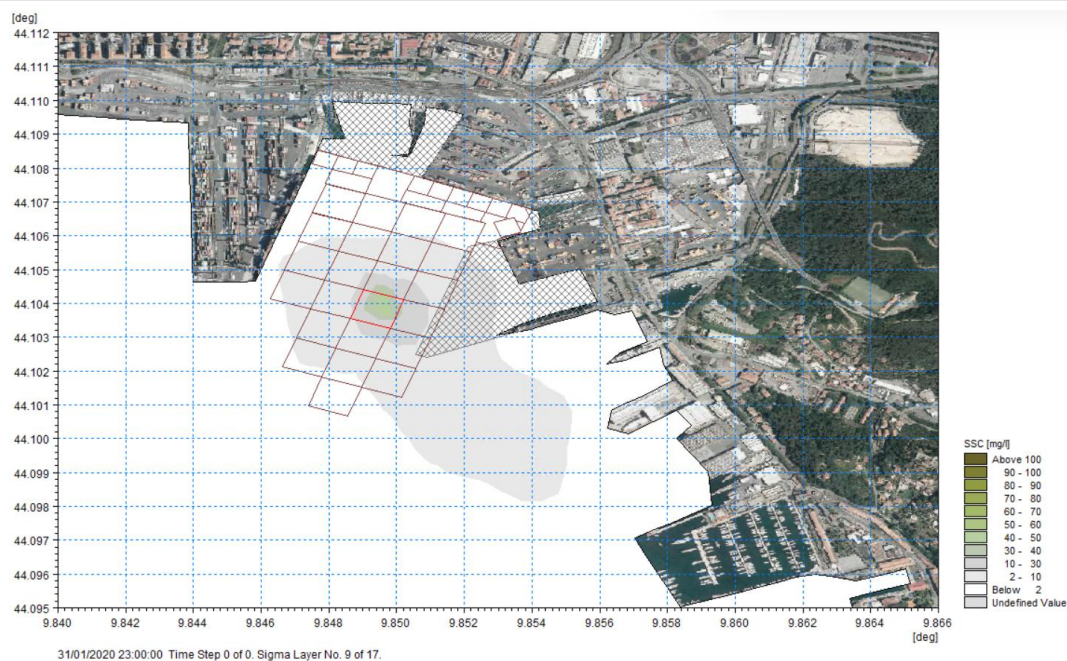


Figura 7.5 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo

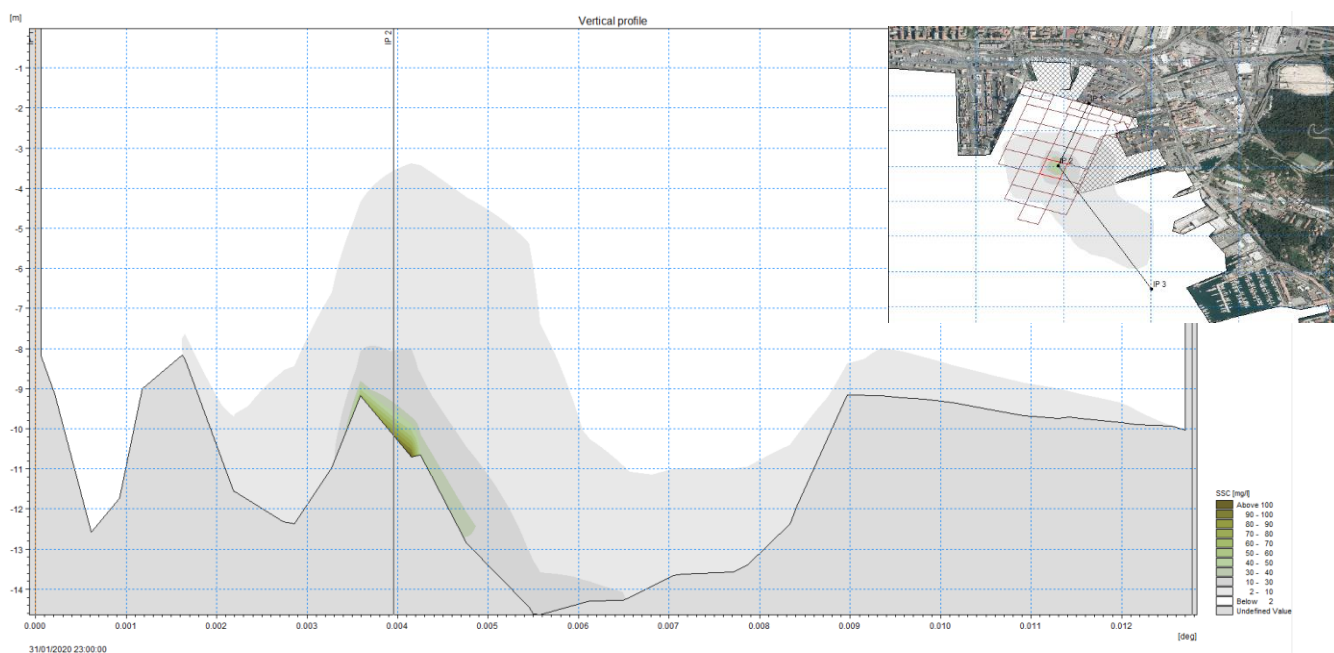


Figura 7.6 – Unità operativa T11– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale

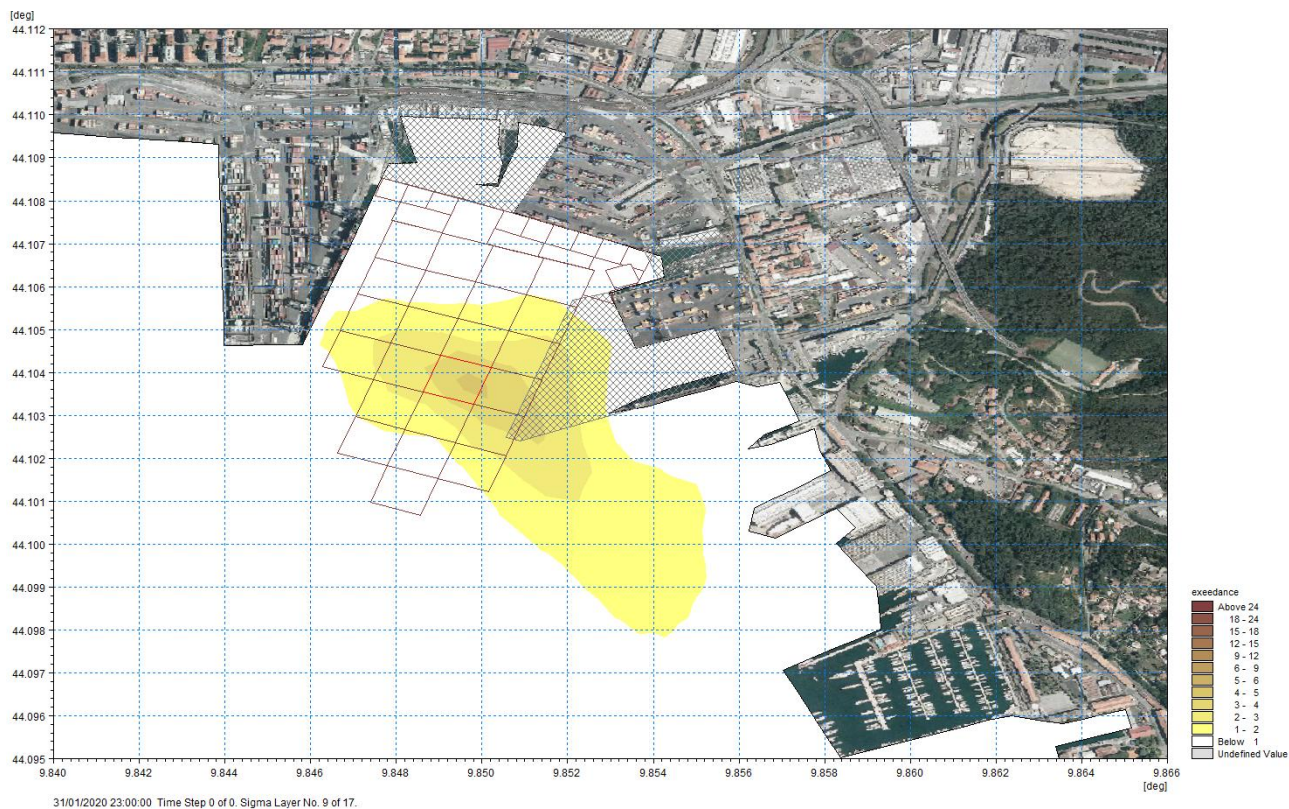


Figura 7.7 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo

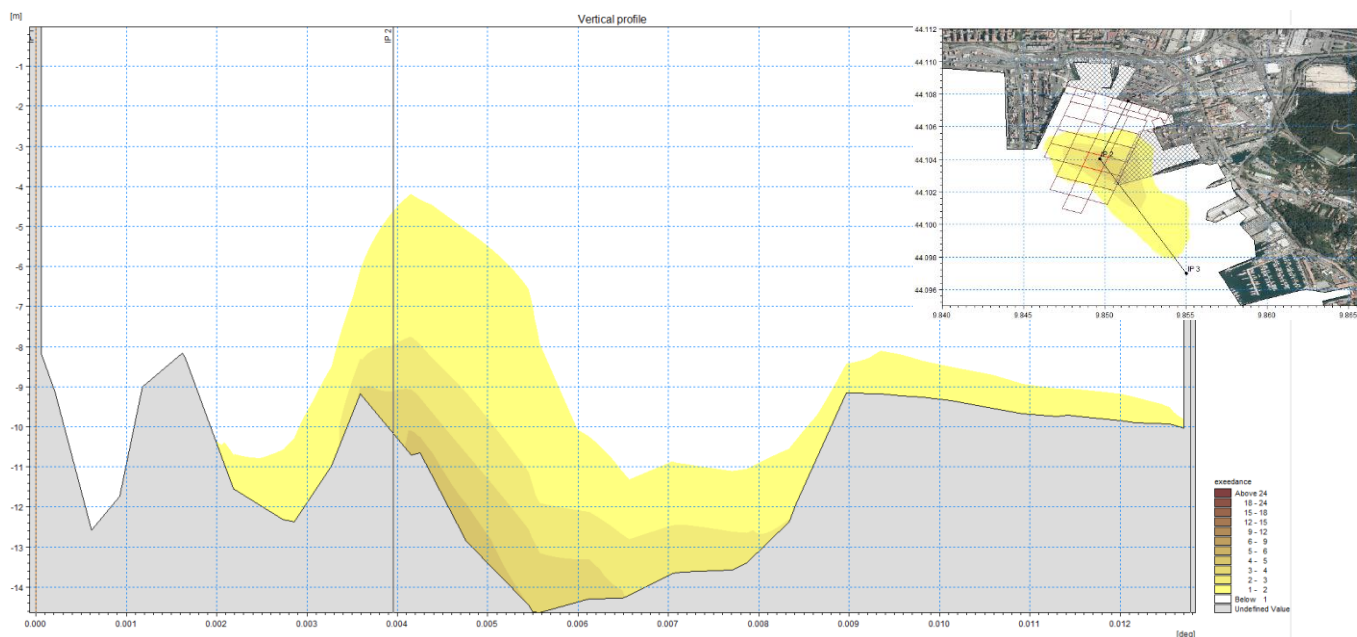


Figura 7.8 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale

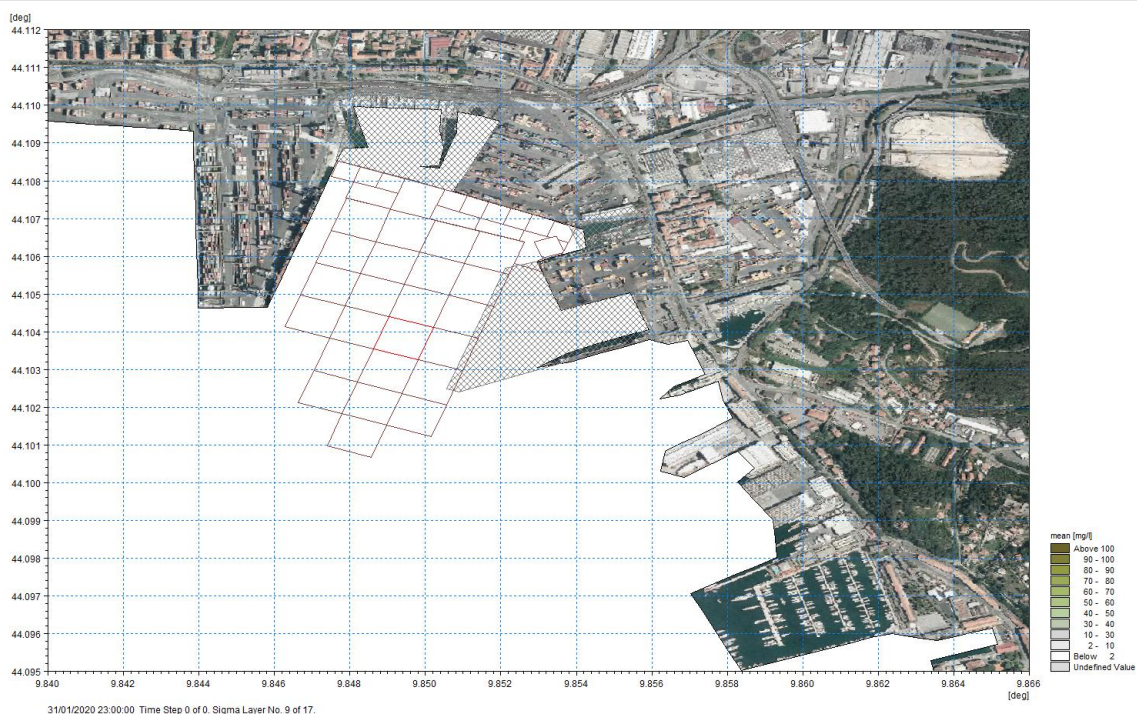


Figura 7.9 Unità operativa T11 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo

7.1.4.2 Unità operativa T11 - Produttività giornaliera ipotesi A) – Periodo ESTIVO

Si rappresentano di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi A), ovvero operazioni di dragaggio di durata 4 ore (consecutive) per complessivi 1300 mc seguite da 20 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo estivo.

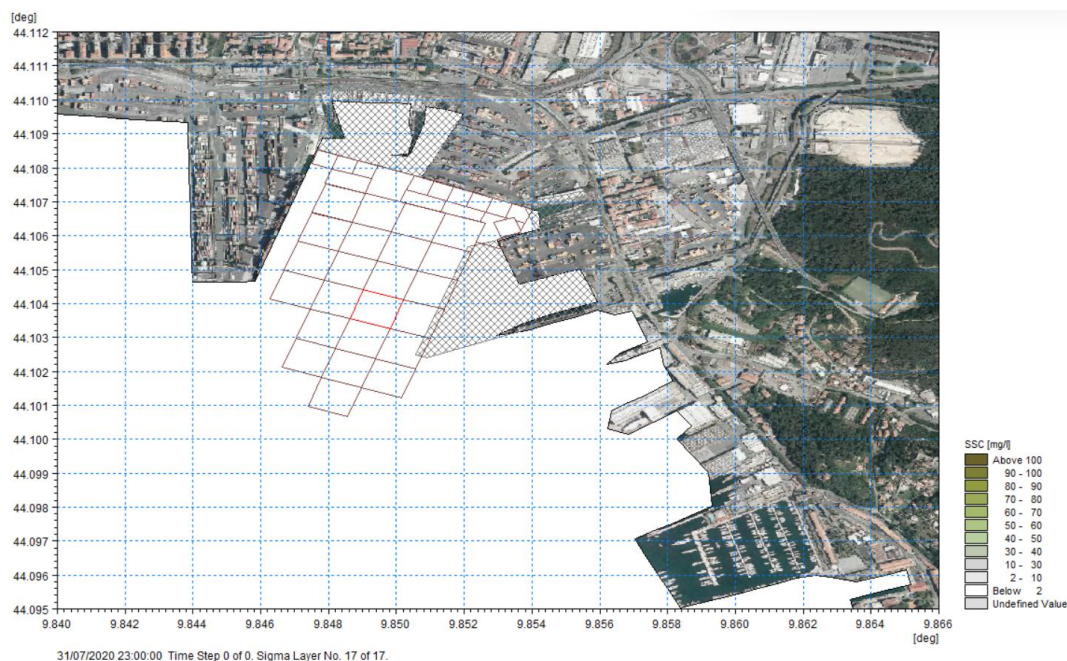


Figura 7.10 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale

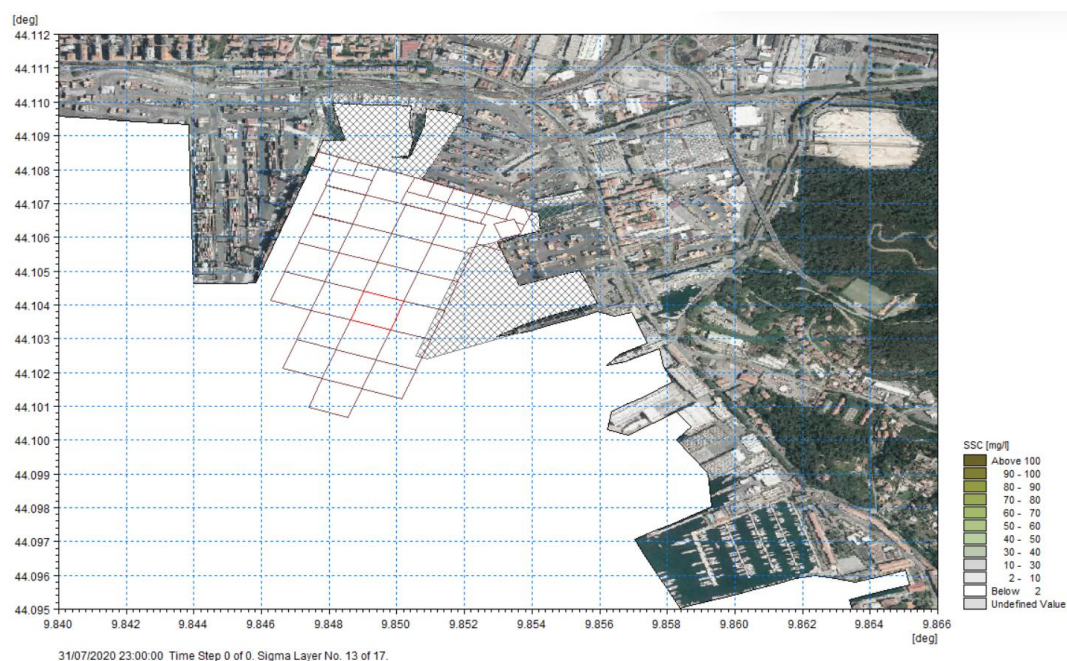


Figura 7.11 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua

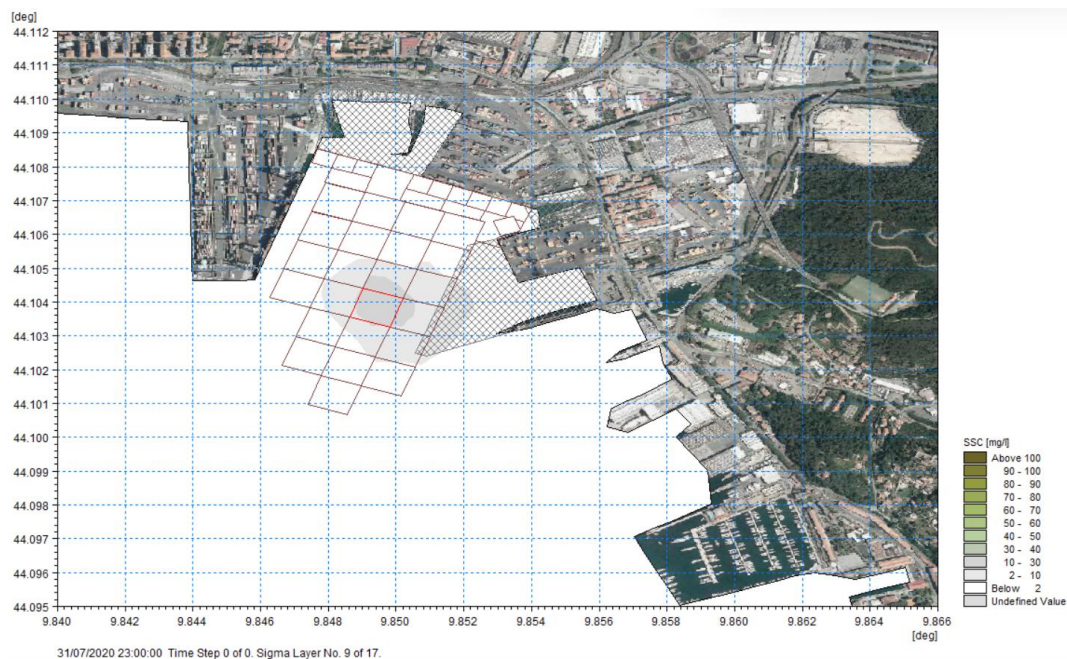


Figura 7.12 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo

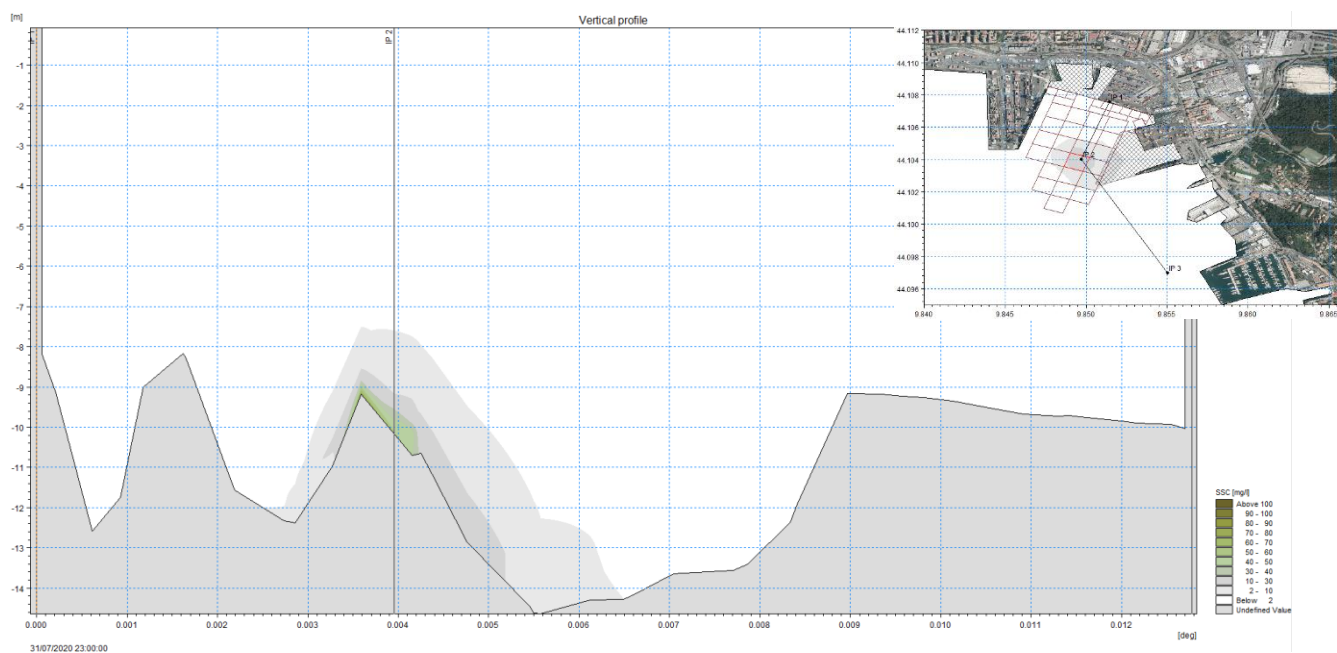


Figura 7.13 – Unità operativa T11– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo

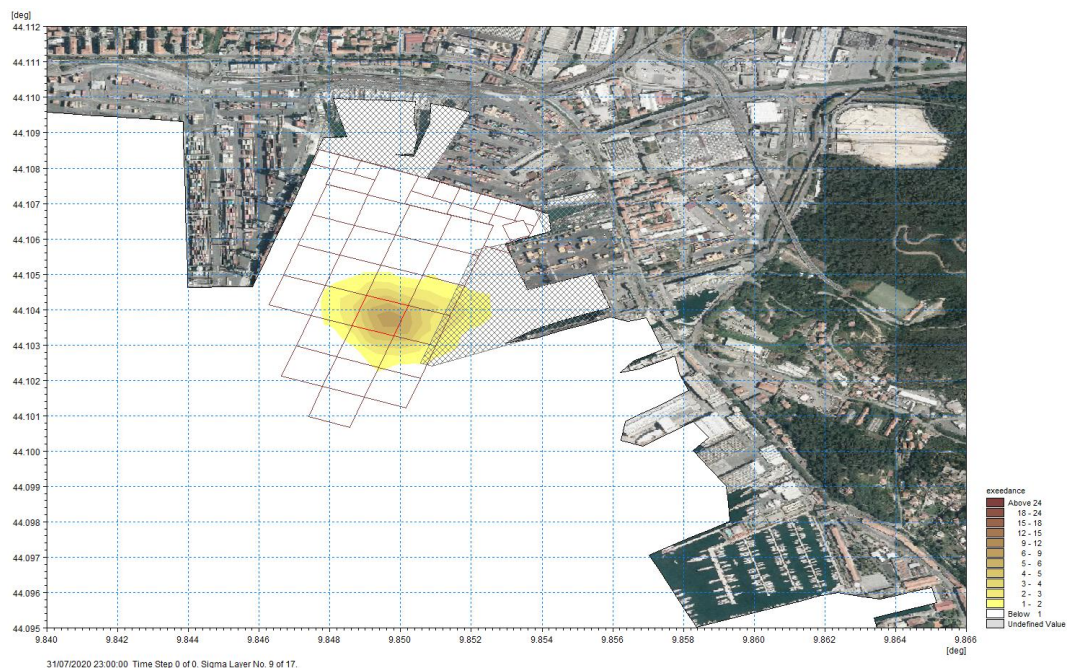


Figura 7.14 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo

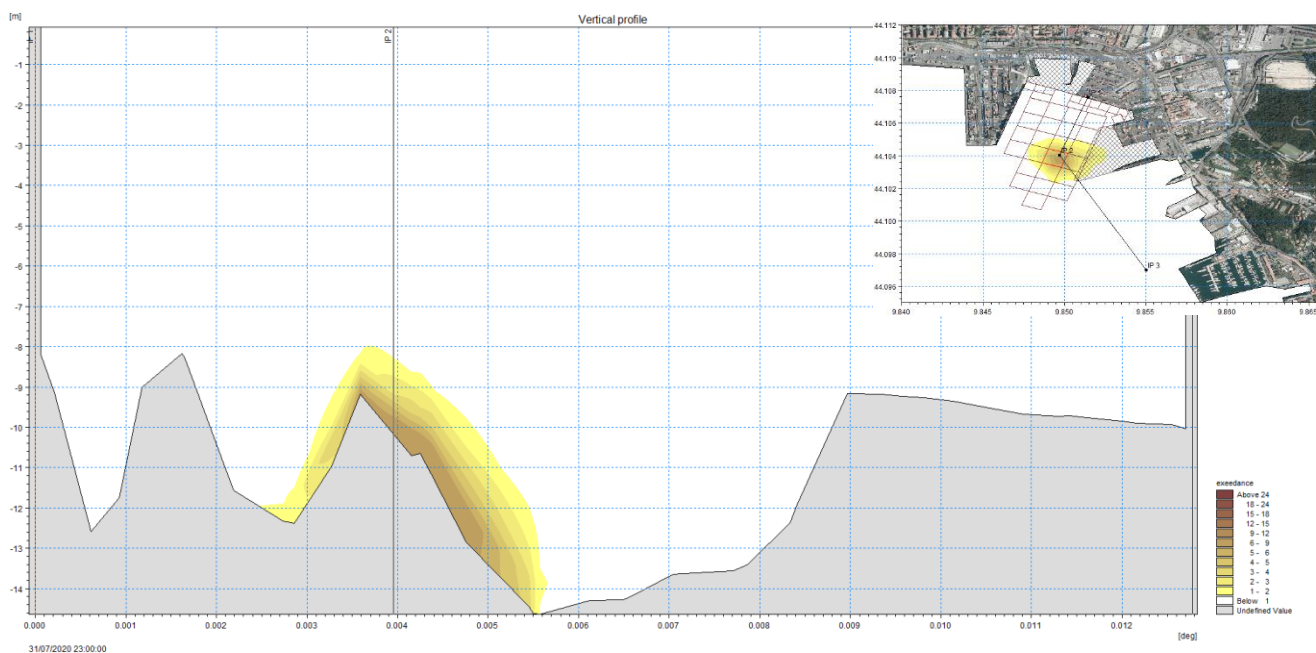


Figura 7.15 – Unità operativa T11 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo

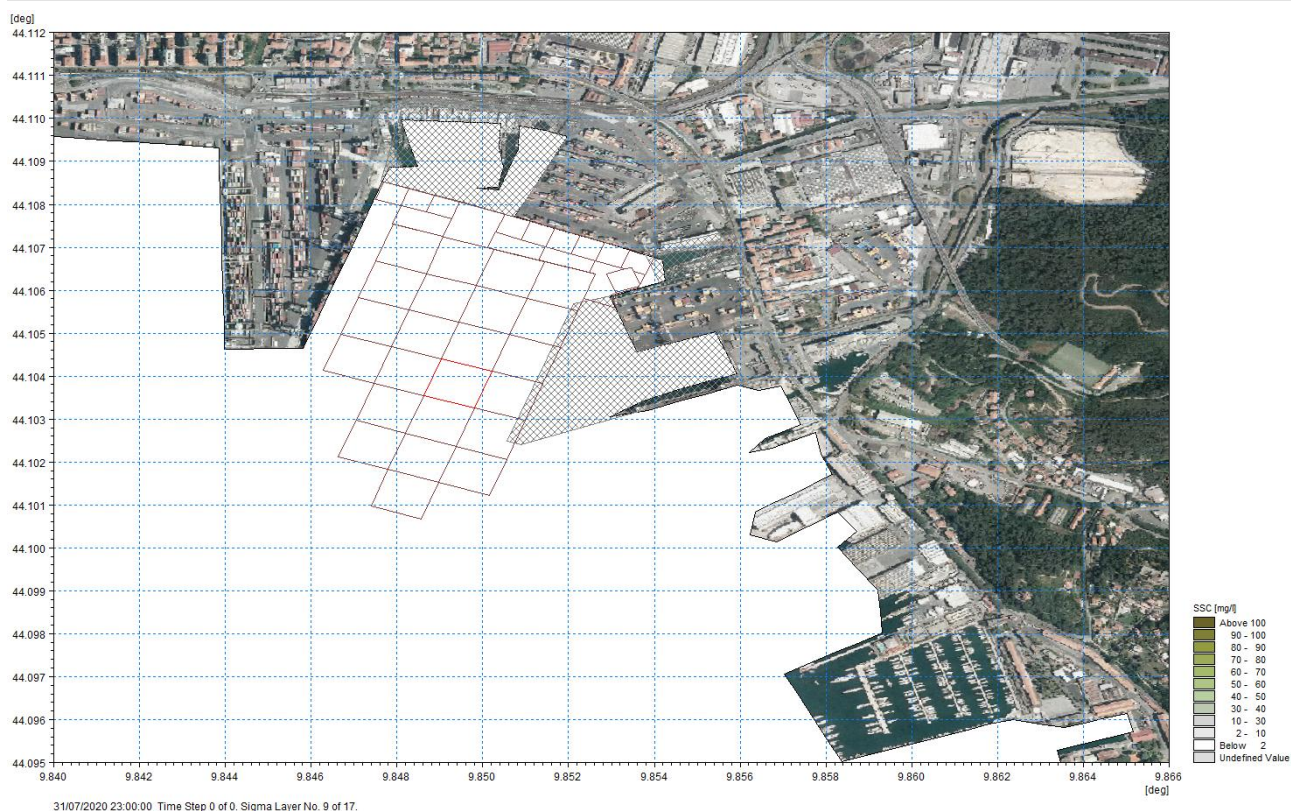


Figura 7.16 Unità operativa T11 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo

7.1.4.3 Unità operativa T11 - Produttività giornaliera ipotesi B) – Periodo INVERNALE

Si rappresentano di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi B), ovvero operazioni di dragaggio di durata 8 ore (consecutive) per complessivi 2600 mc seguite da 16 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo invernale.

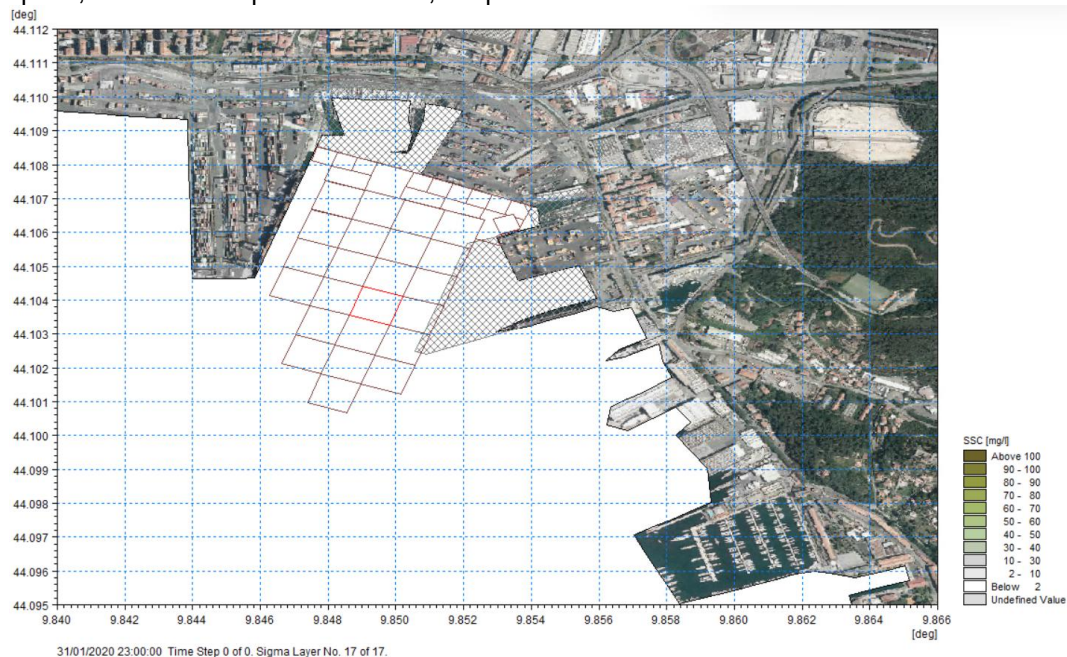


Figura 7.17 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale

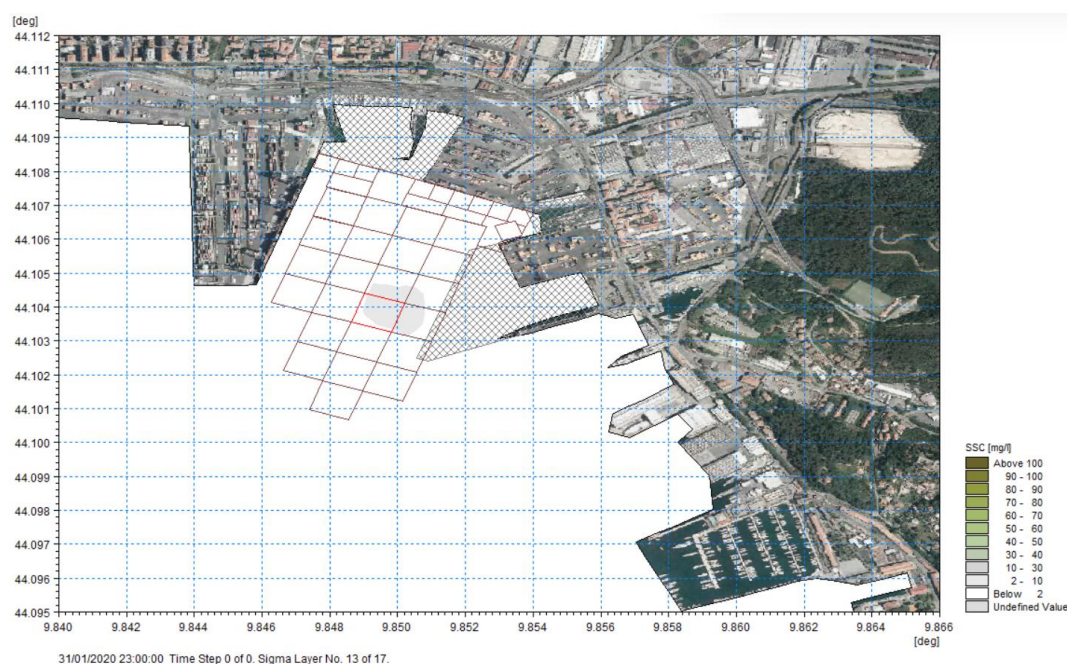


Figura 7.18 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua

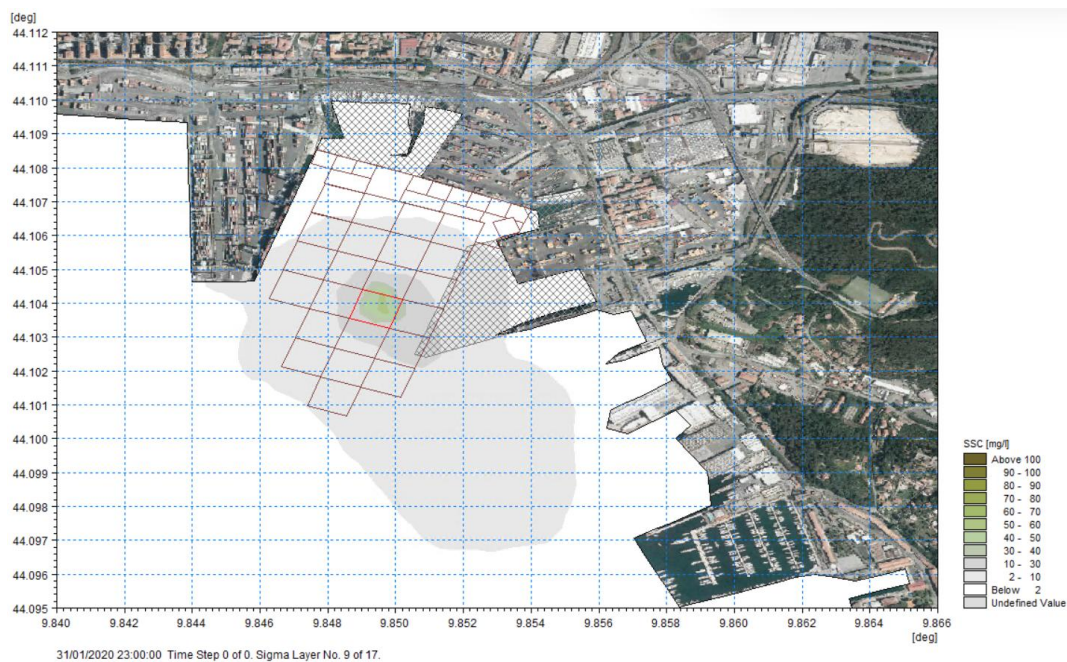


Figura 7.19 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo

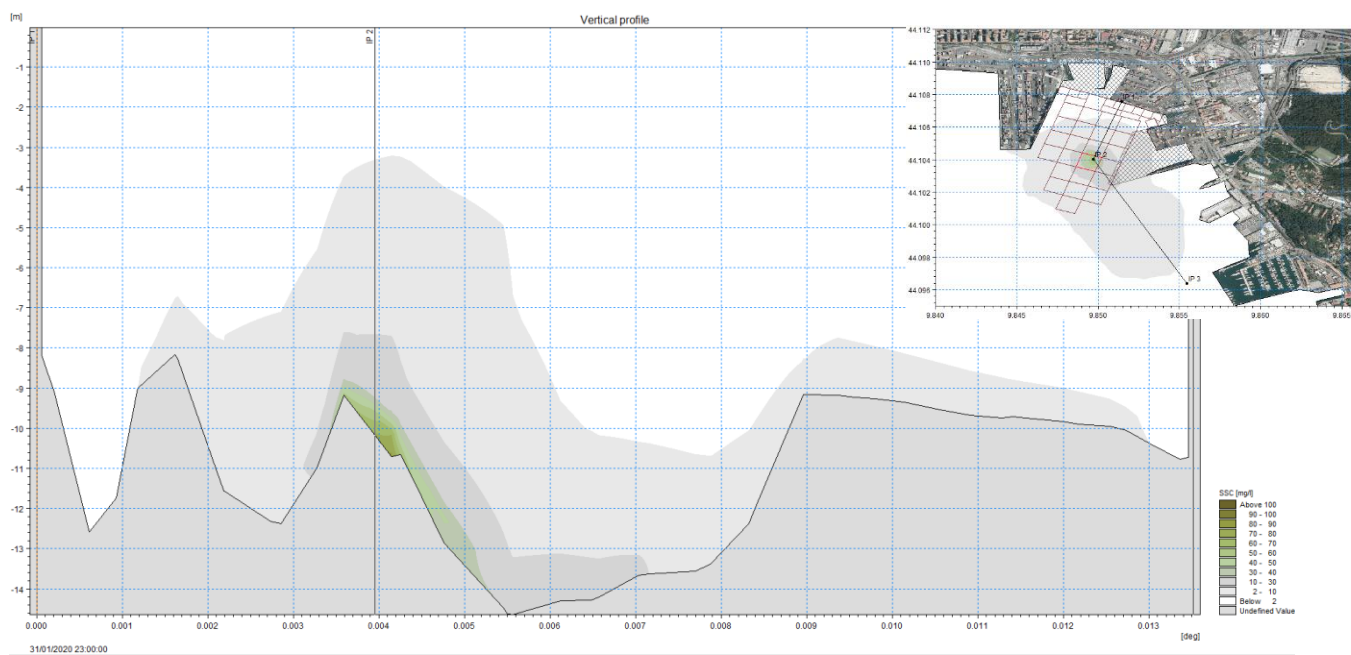


Figura 7.20 – Unità operativa T11– Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale

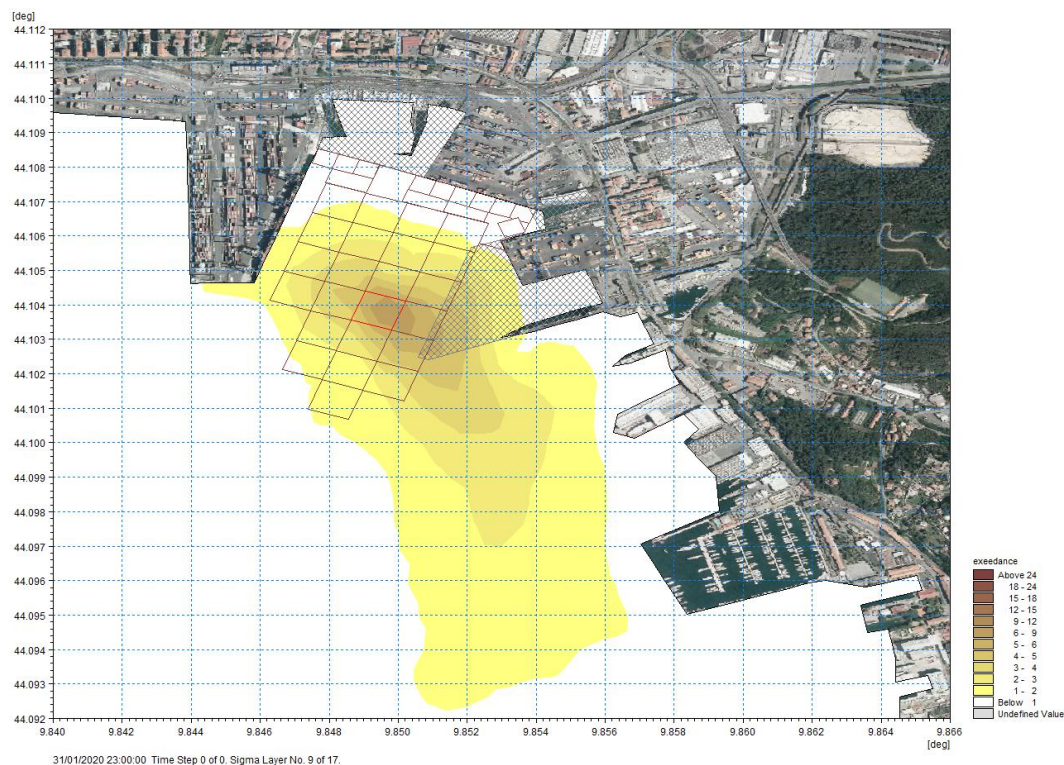


Figura 7.21 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo

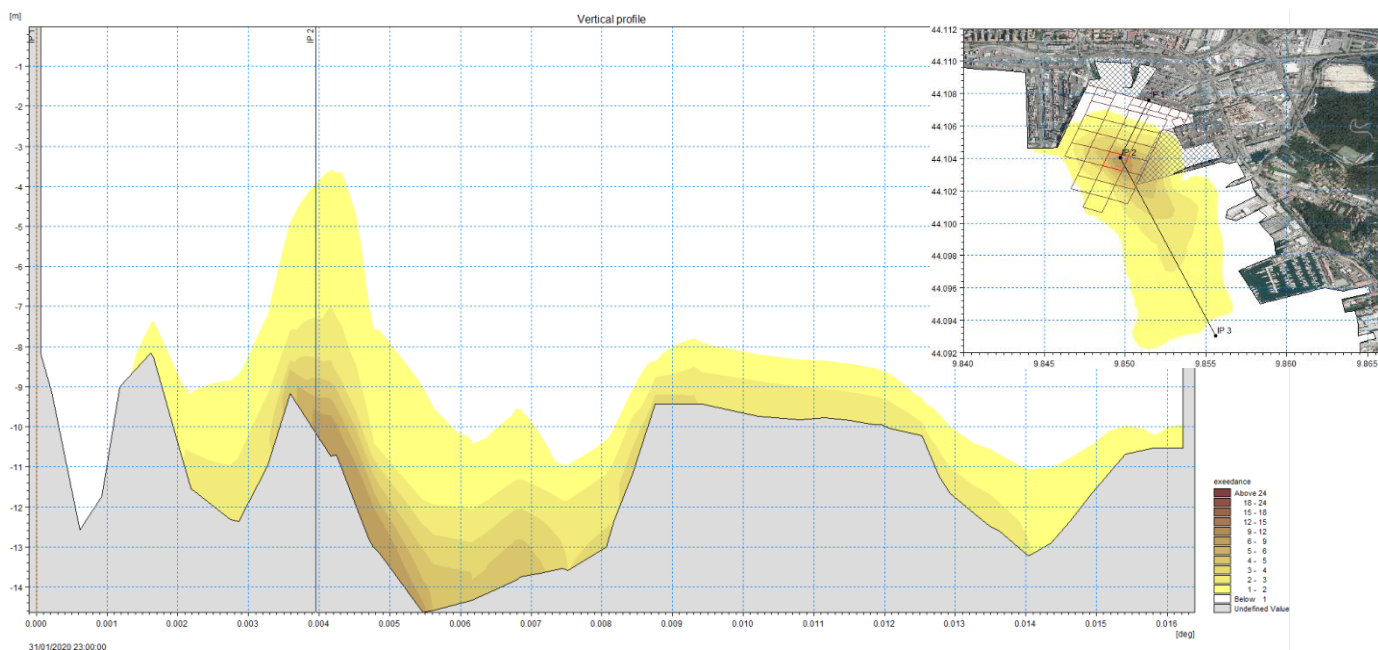


Figura 7.22 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale

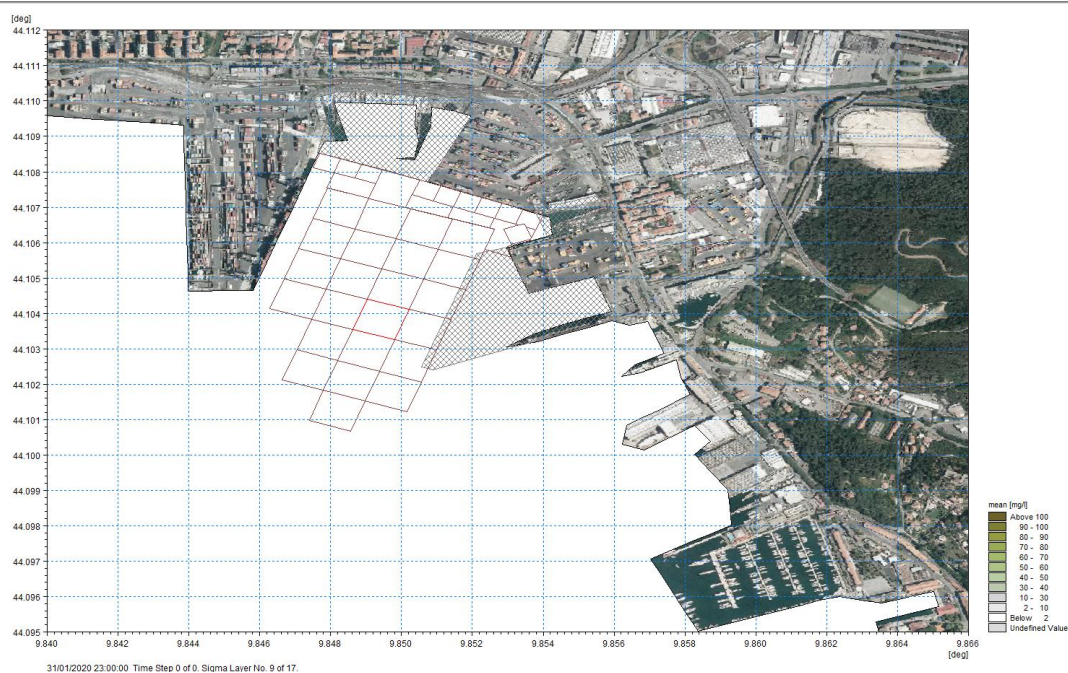


Figura 7.23 Unità operativa T11 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo

7.1.4.4 Unità operativa T11 - Produttività giornaliera ipotesi B) – Periodo ESTIVO

Si rappresentano di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi B), ovvero operazioni di dragaggio di durata 8 ore (consecutive) per complessivi 2600 mc seguite da 16 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo estivo.

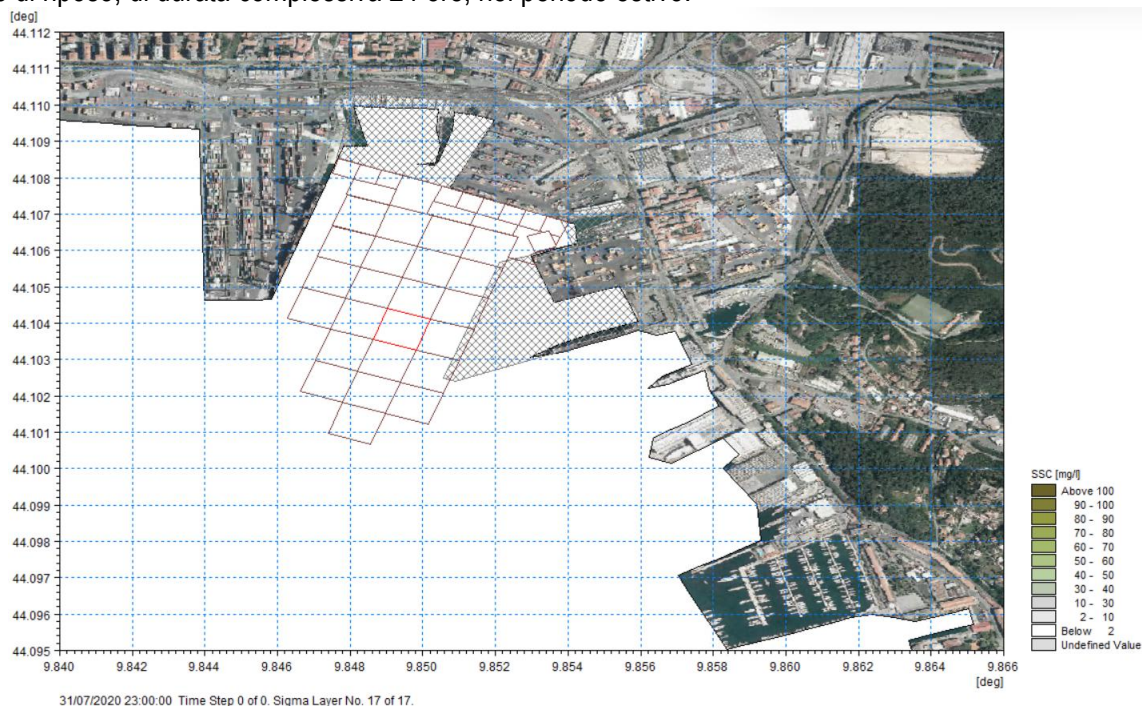


Figura 7.24 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale

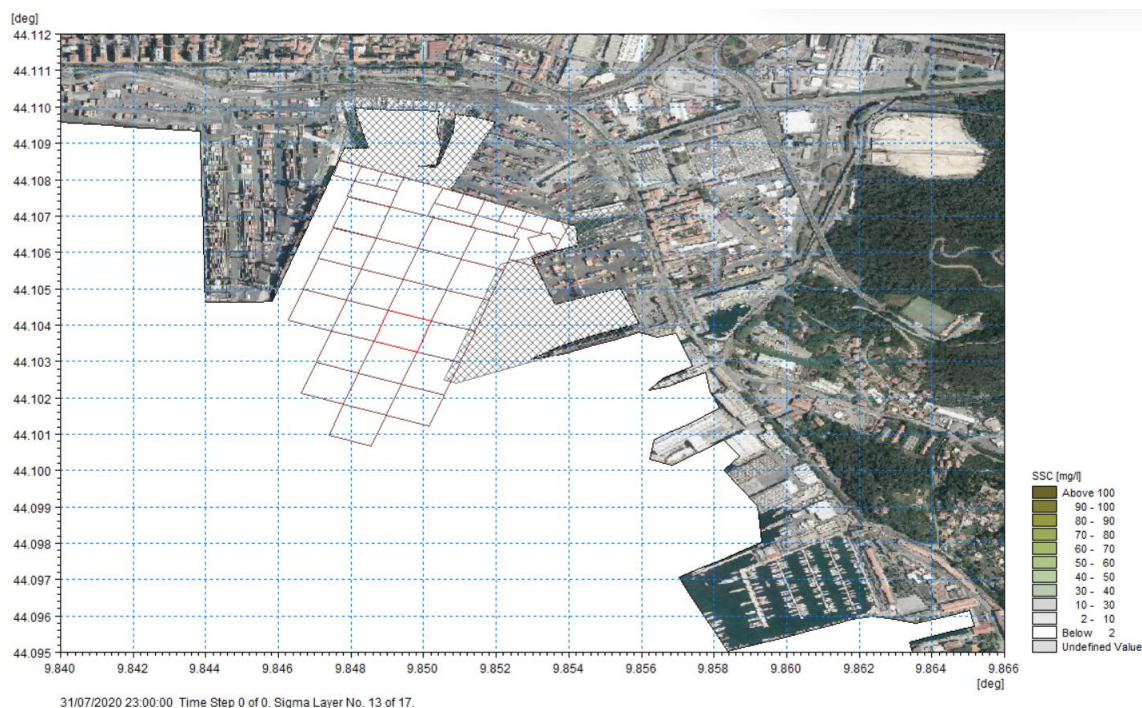


Figura 7.25 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua

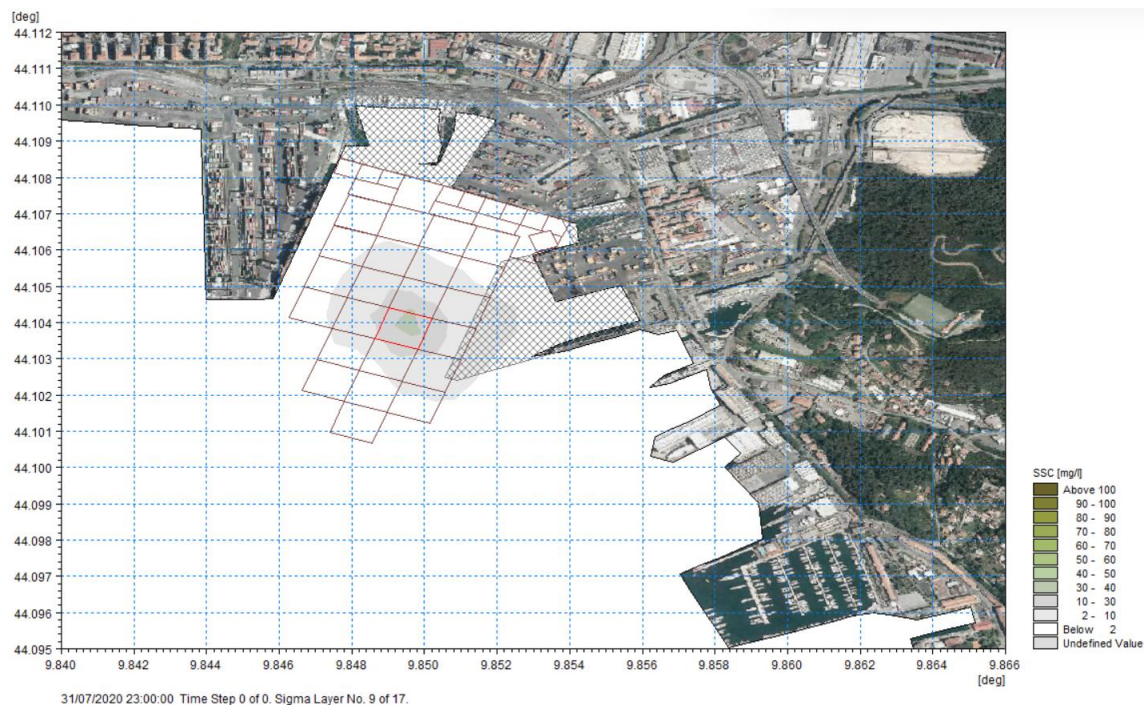


Figura 7.26 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo

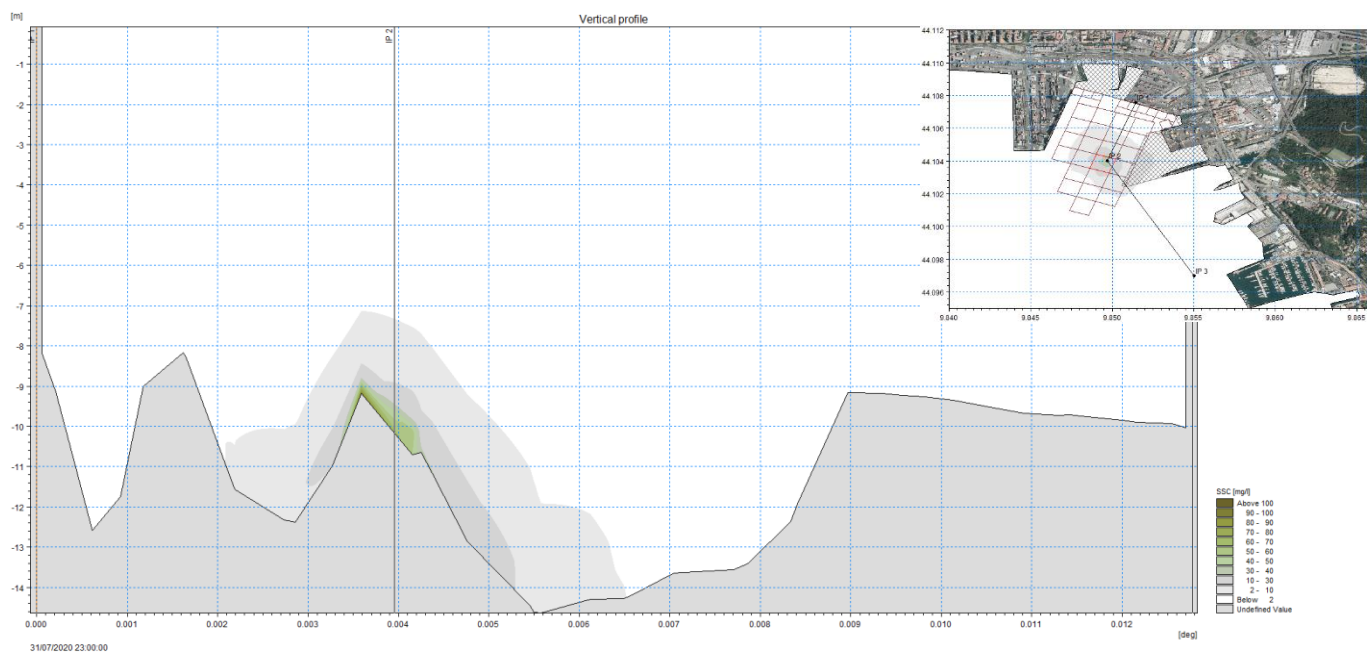


Figura 7.27 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo

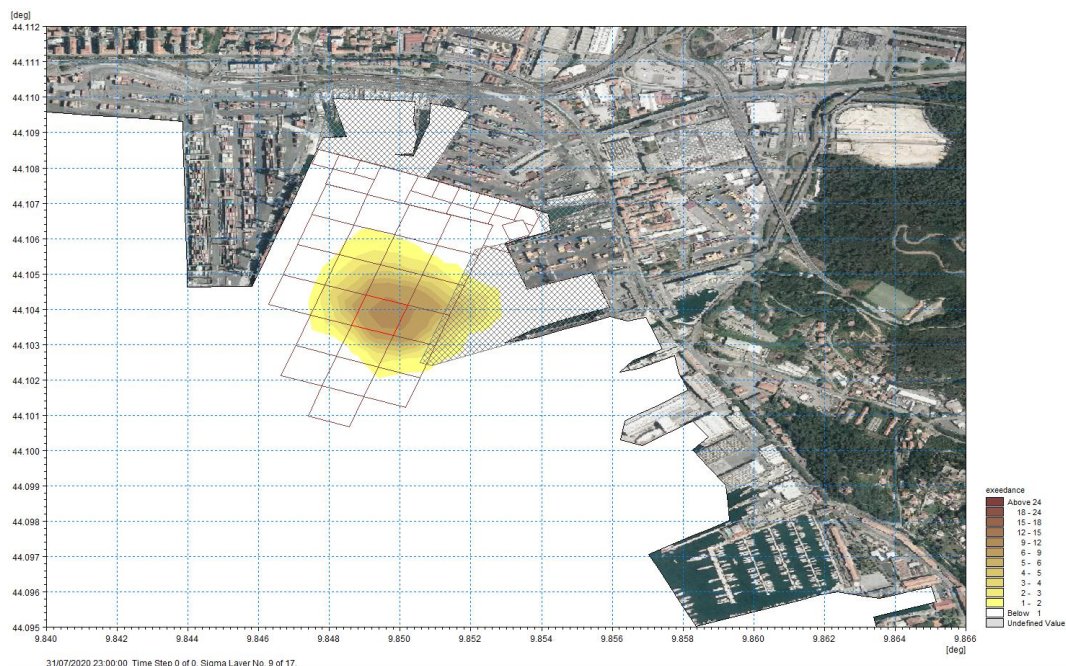


Figura 7.28 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo

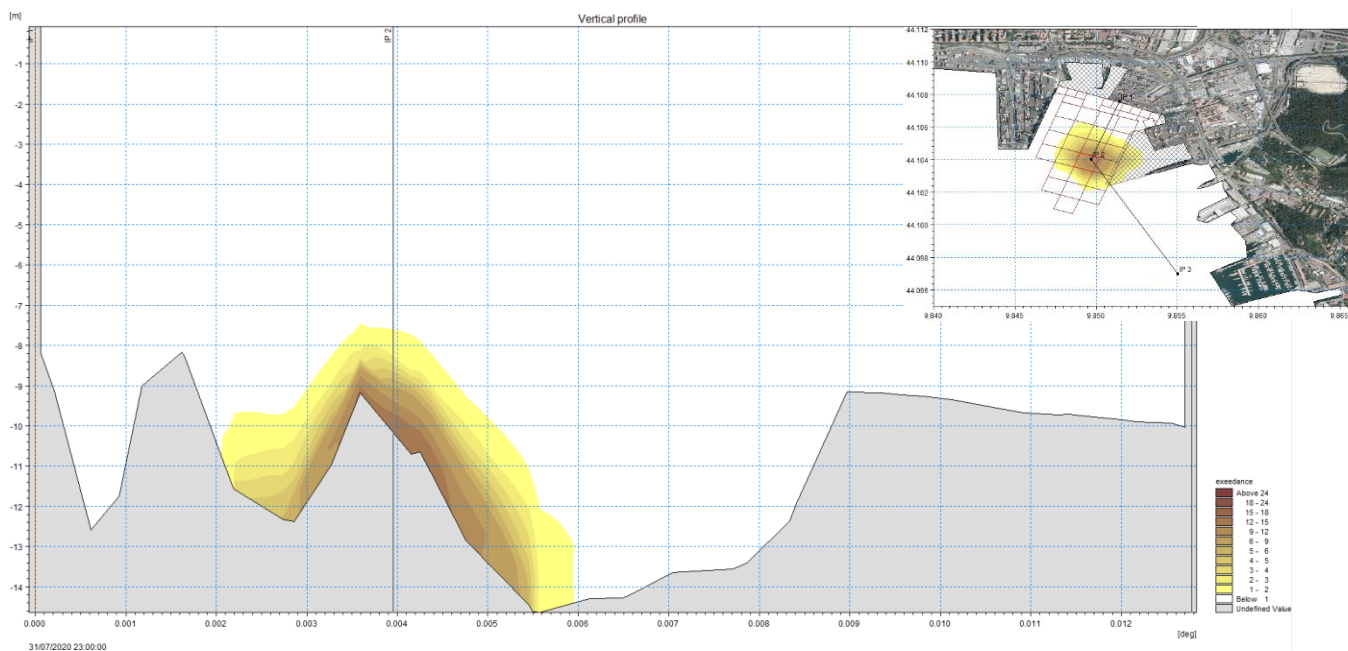


Figura 7.29 – Unità operativa T11 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo

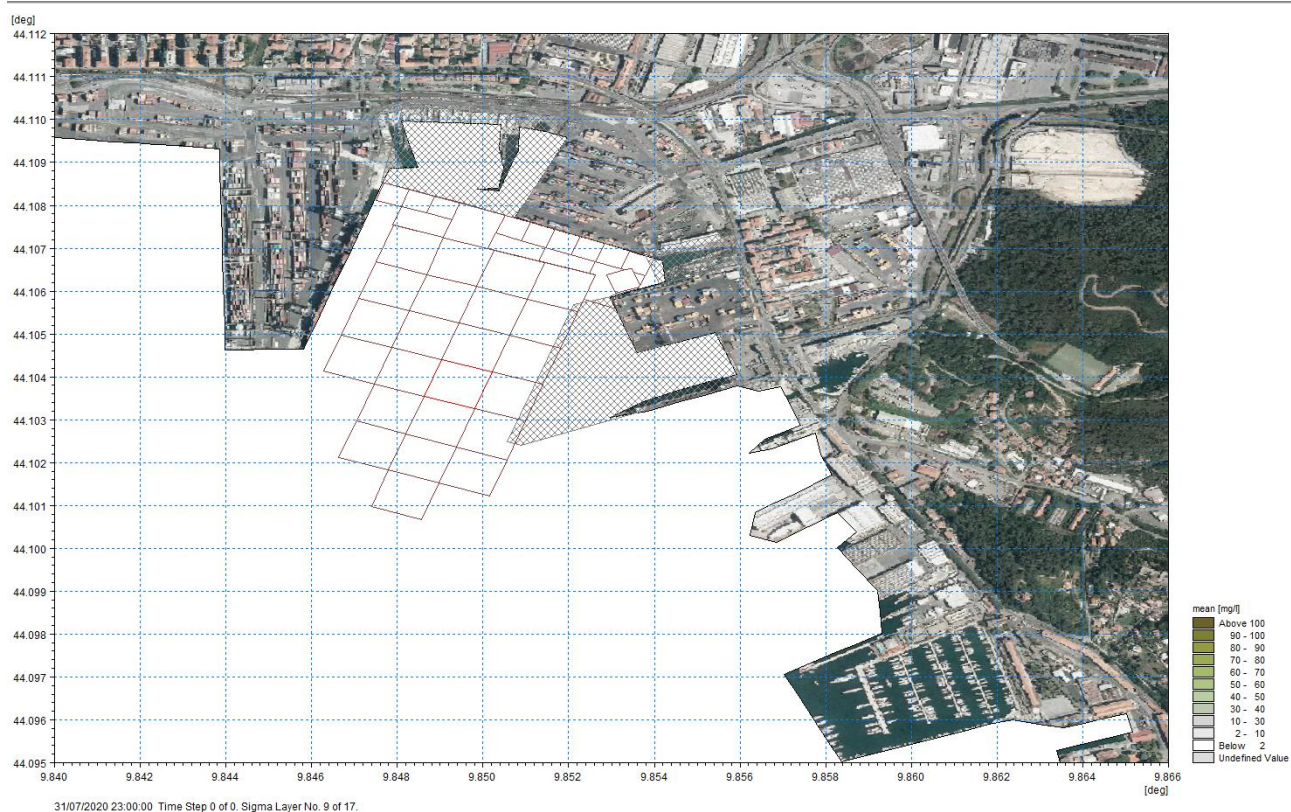


Figura 7.30 Unità operativa T11 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo

7.1.5 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE MT - LAVORI OPZIONALI

Si rappresentano di seguito per l'unità operativa T31 (rappresentativa per le lavorazioni opzionali) i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nelle varie modalità di produzione giornaliera.

7.1.5.1 Unità operativa T31 - Produttività giornaliera ipotesi A) – Periodo INVERNALE

Di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi A), ovvero operazioni di dragaggio di durata 4 ore (consecutive) per complessivi 1300 mc seguite da 20 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo invernale.

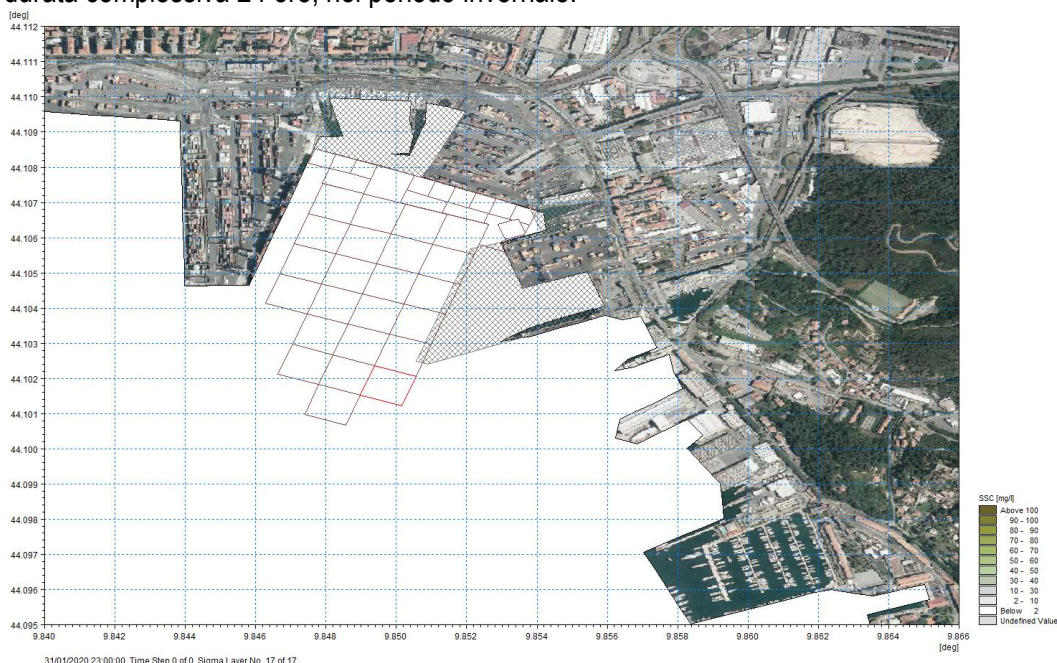


Figura 7.31 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale

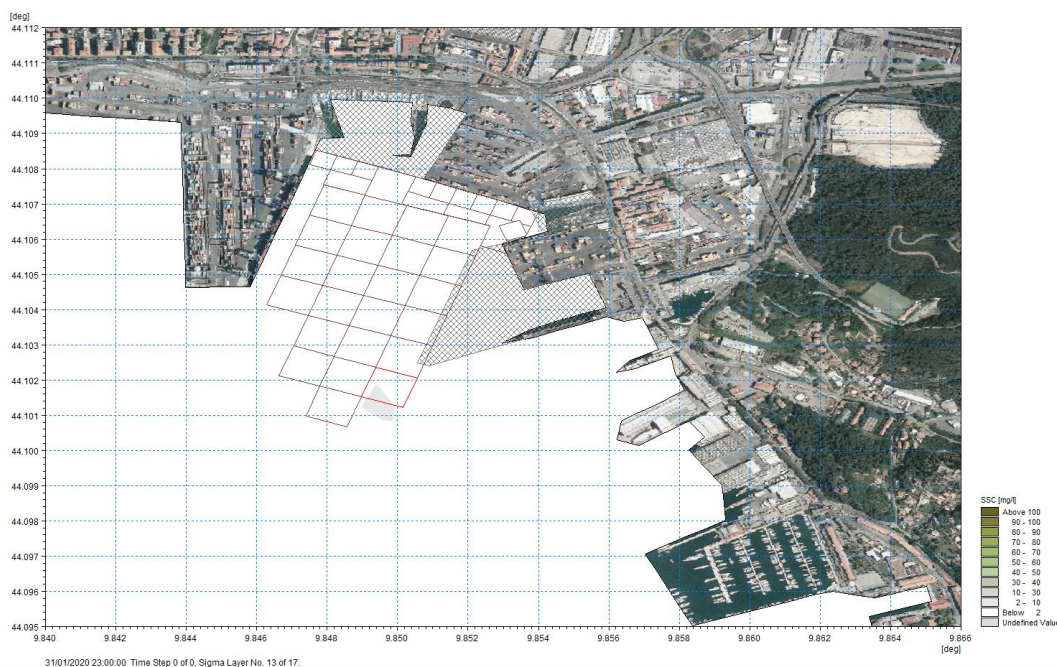


Figura 7.32 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua

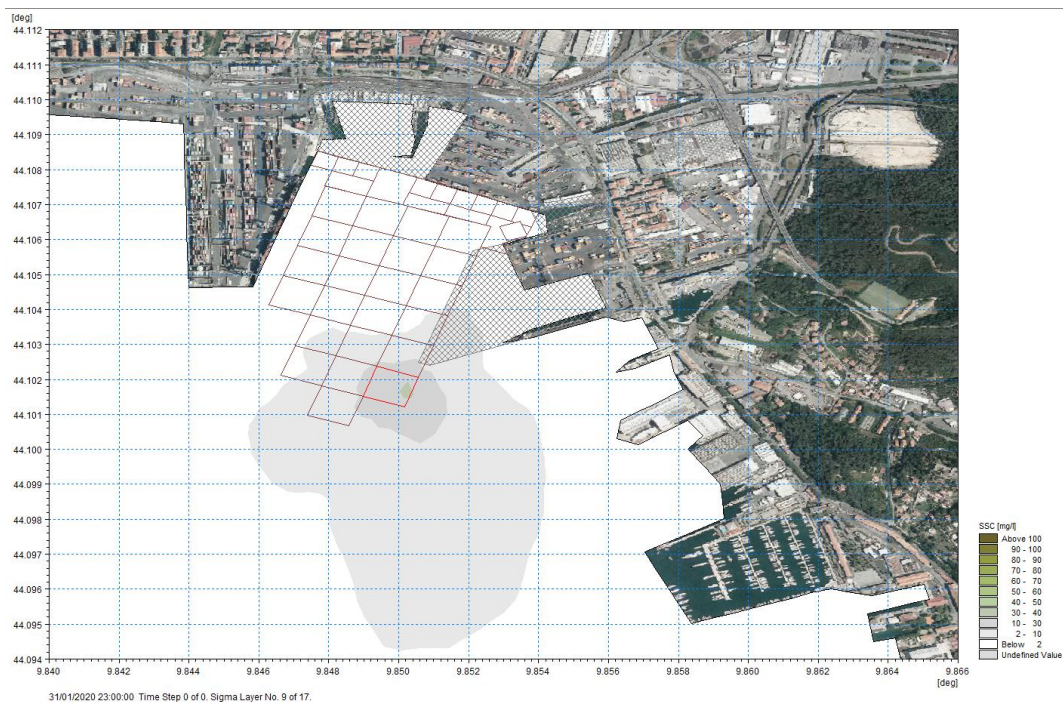


Figura 7.33 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo

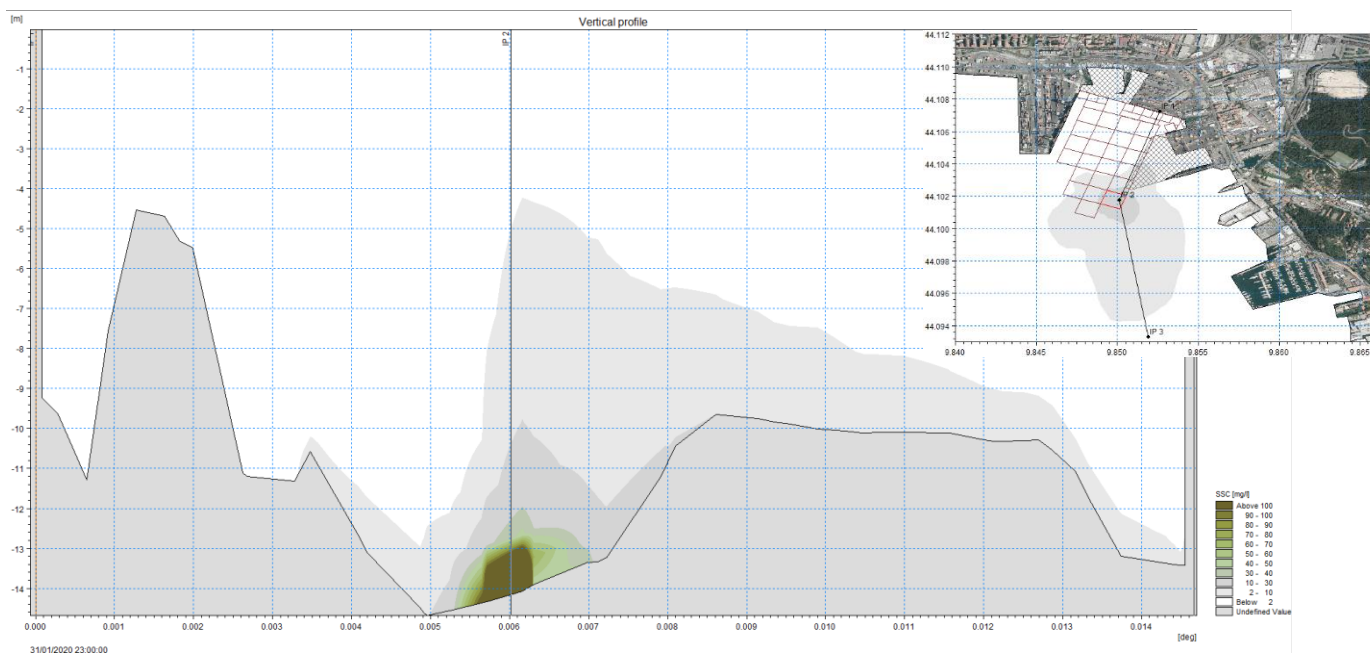


Figura 7.34 – Unità operativa T31– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale

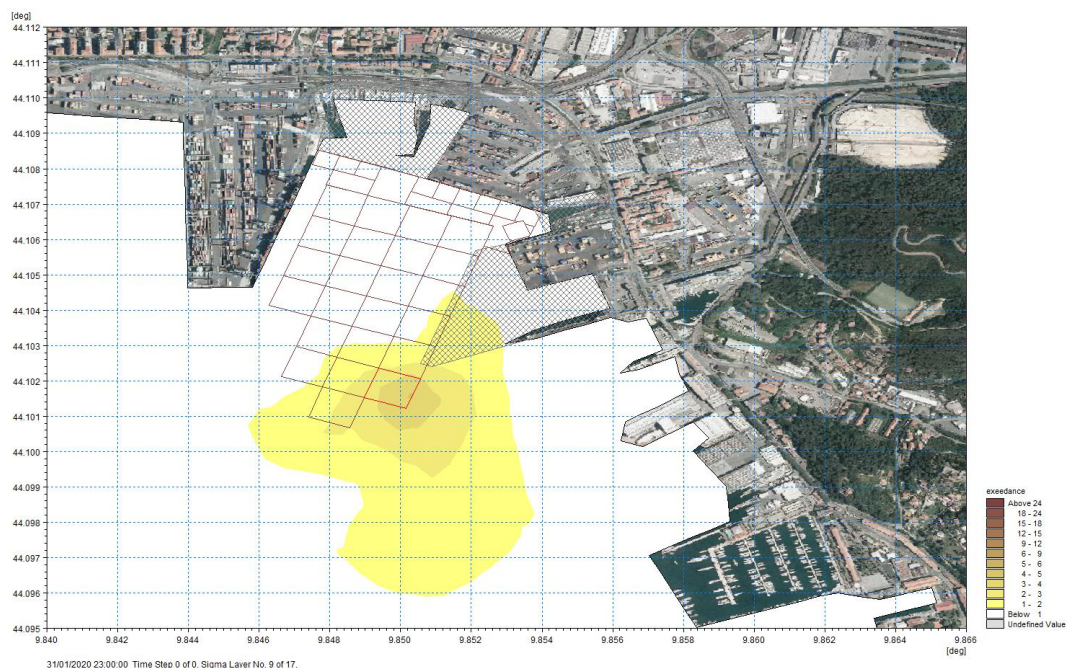


Figura 7.35 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo

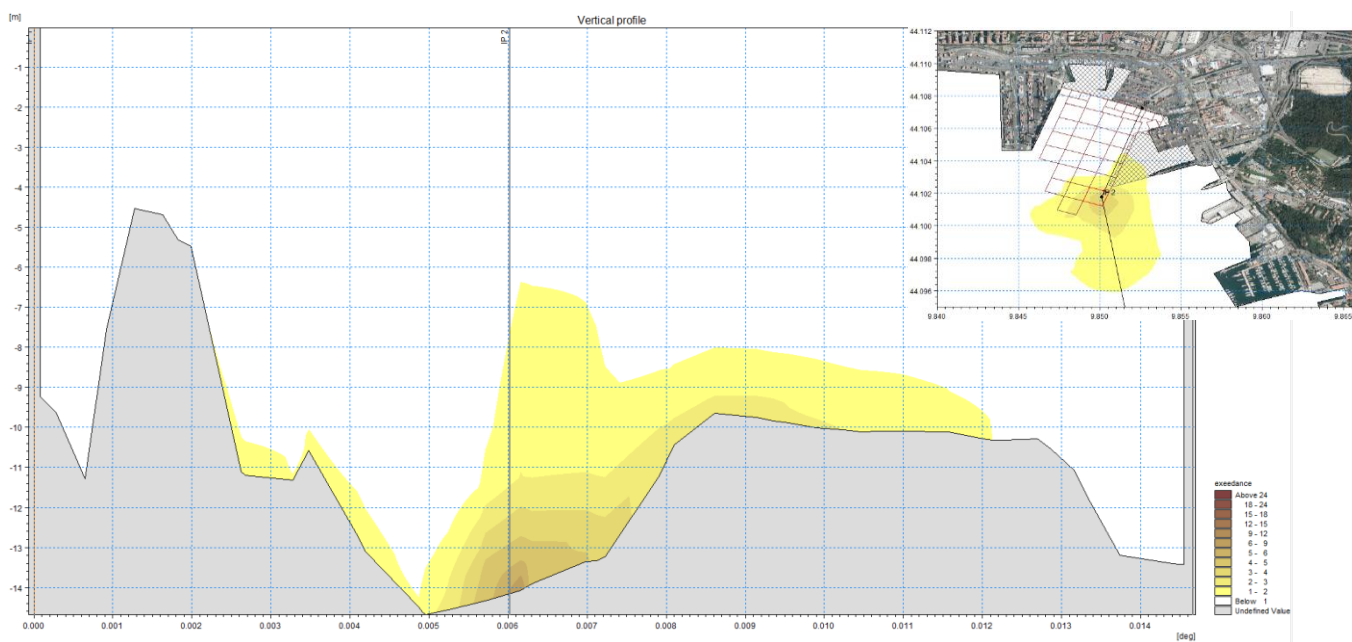


Figura 7.36 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale

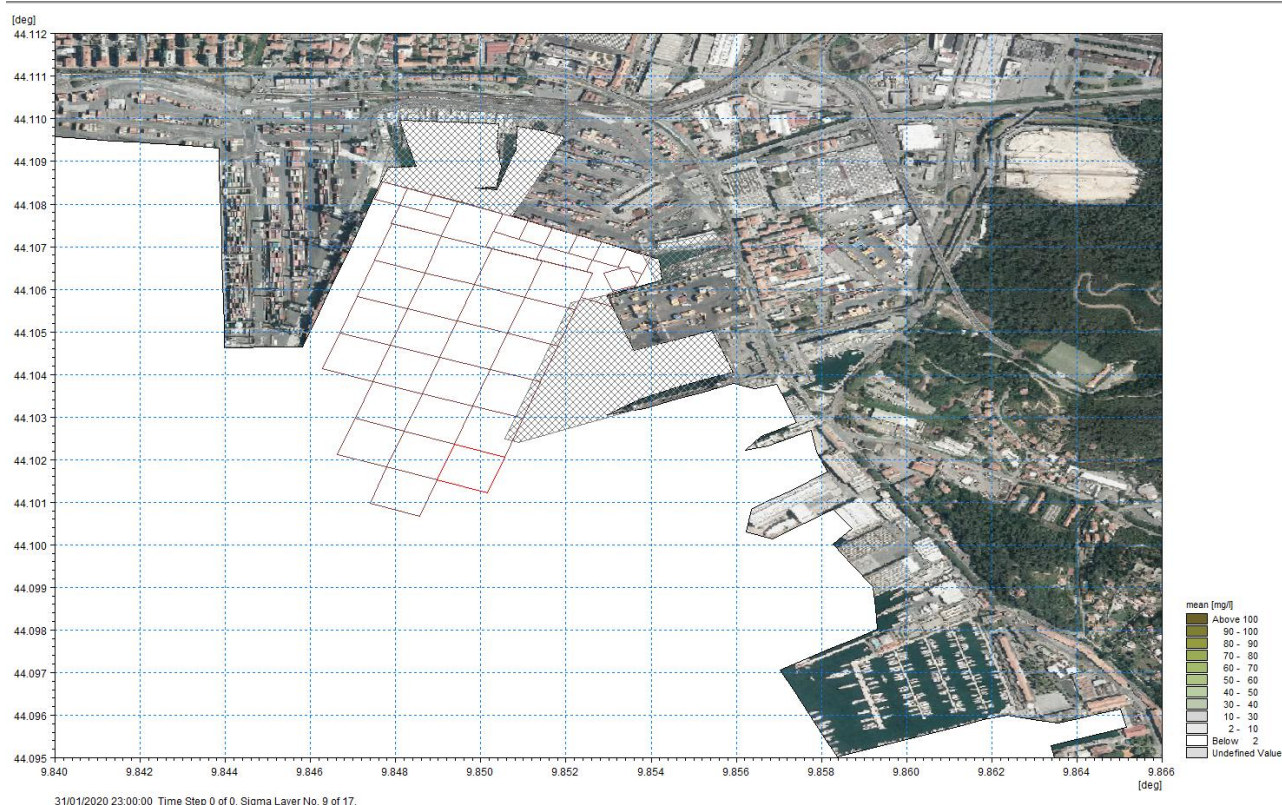


Figura 7.37 Unità operativa T31 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo

7.1.5.2 Unità operativa T31 - Produttività giornaliera ipotesi A) – Periodo ESTIVO

Si rappresentano di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi A), ovvero operazioni di dragaggio di durata 4 ore (consecutive) per complessivi 1300 mc seguite da 20 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo estivo.

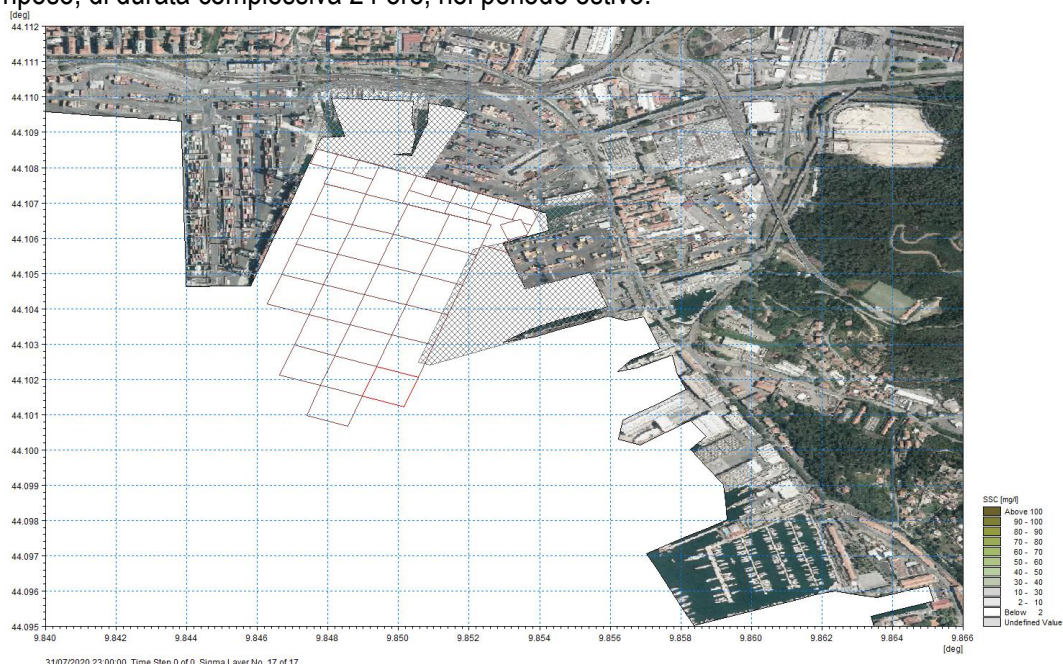


Figura 7.38 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale

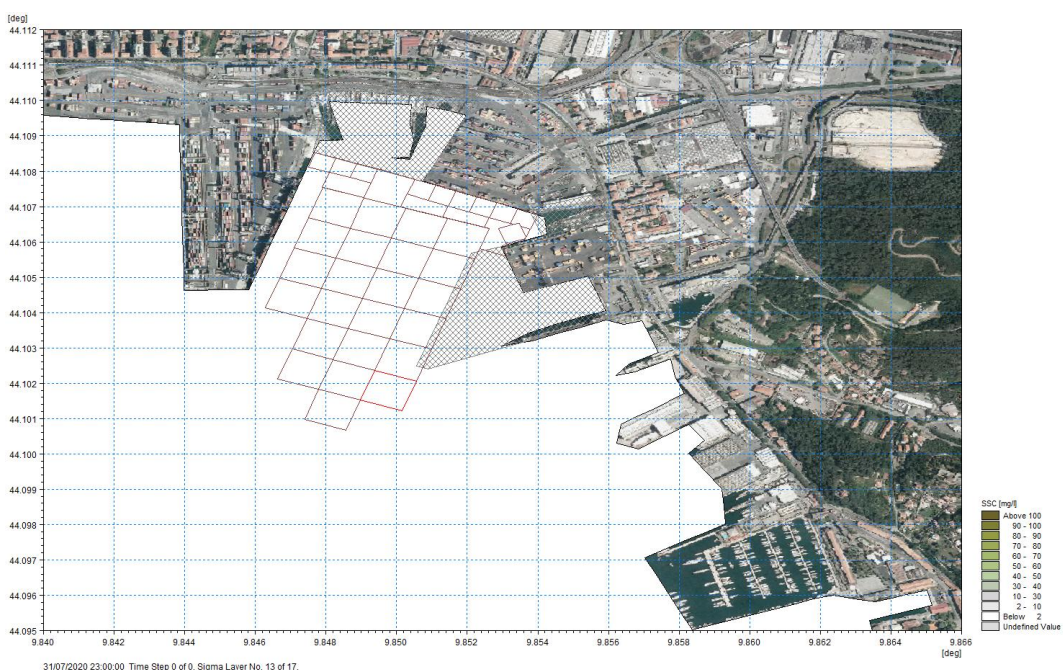


Figura 7.39 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua

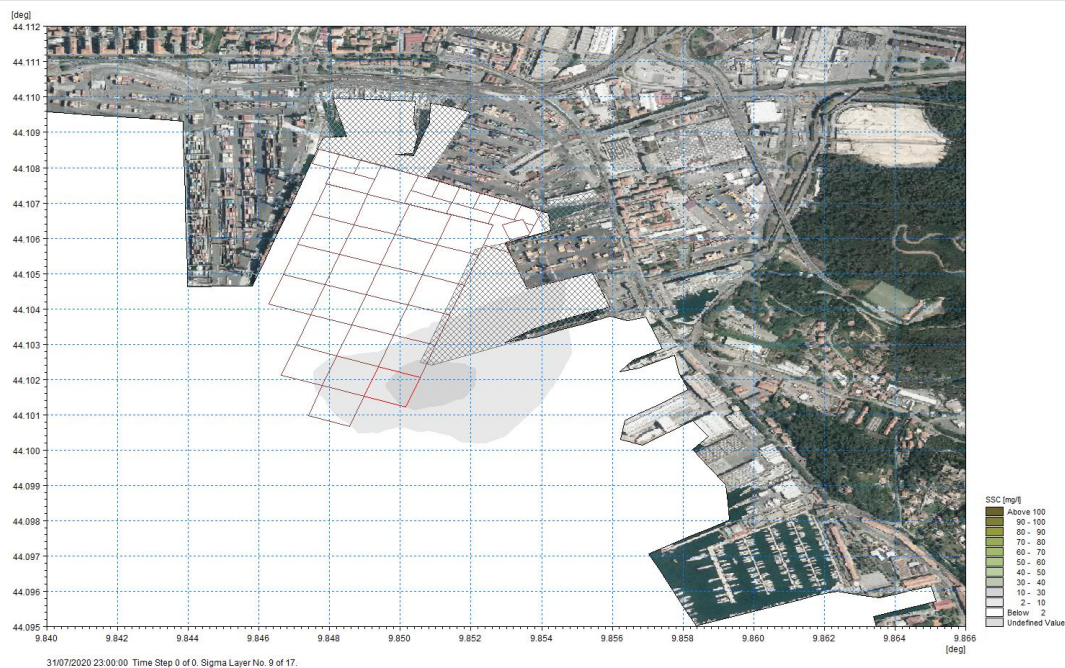


Figura 7.40 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo

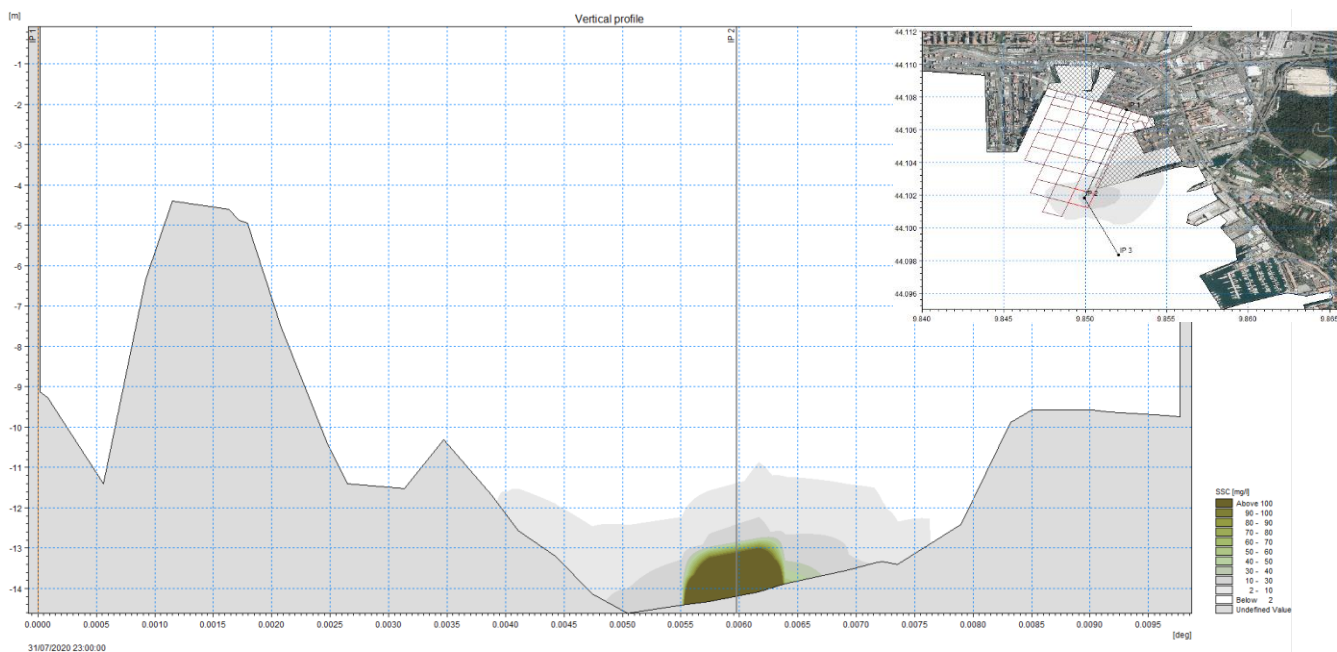


Figura 7.41 – Unità operativa T31– Ipotesi A – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo

INTERVENTO DI MANUTENZIONE ED APPROFONDIMENTO DEI FONDALI NEL PORTO MERCANTILE DELLA SPEZIA
LOTTO FUNZIONALE N.1 - TERZO BACINO PORTUALE E CANALE DI INGRESSO

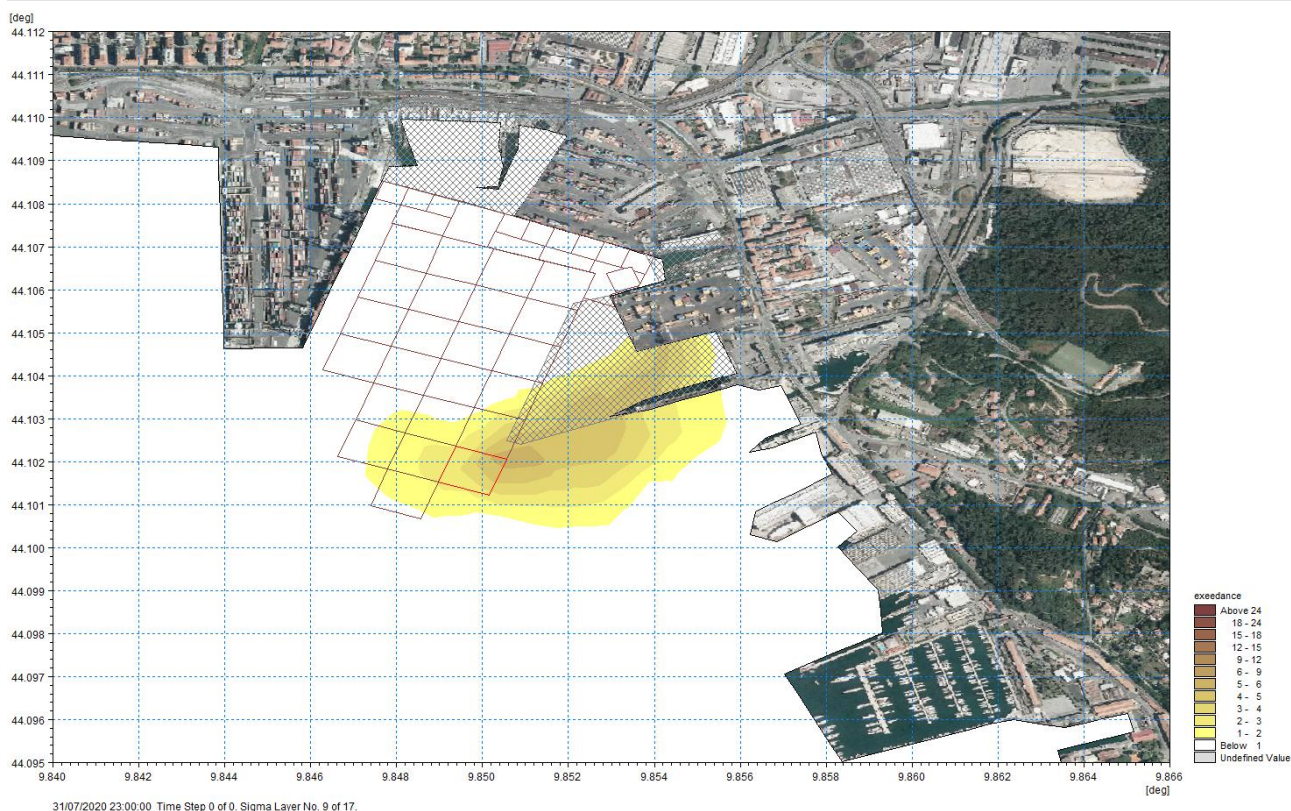


Figura 7.42 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo

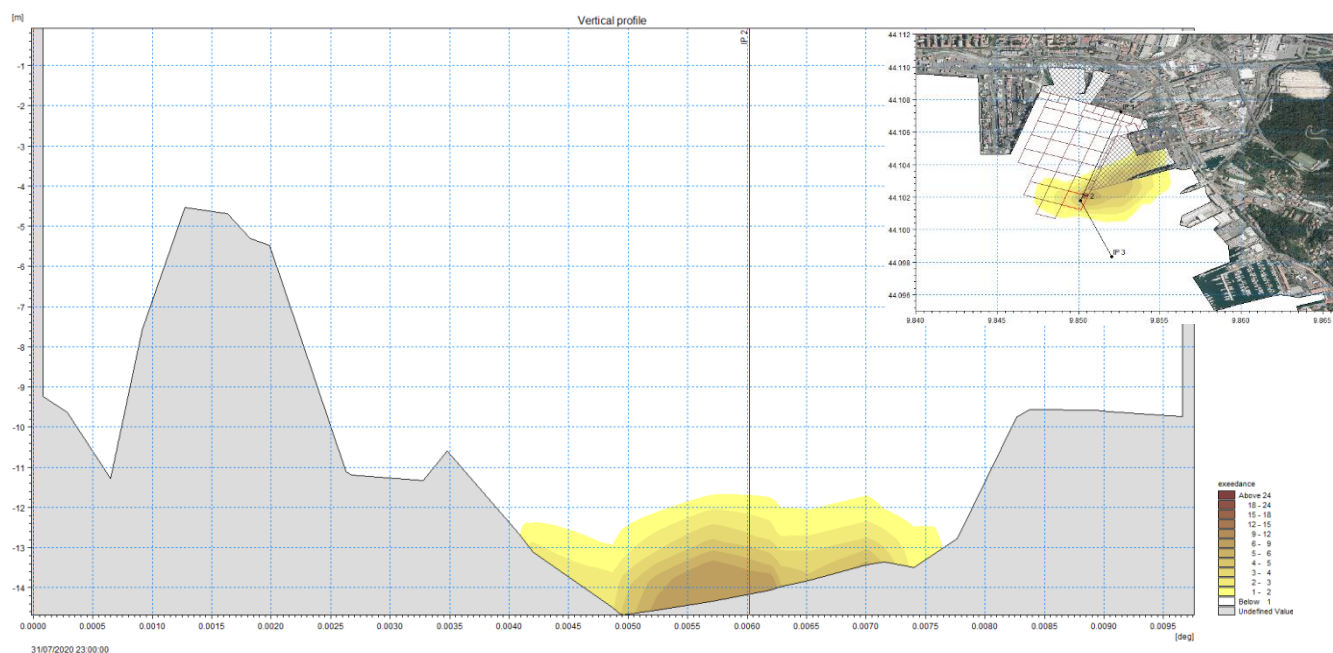


Figura 7.43 – Unità operativa T31 – Ipotesi A – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo

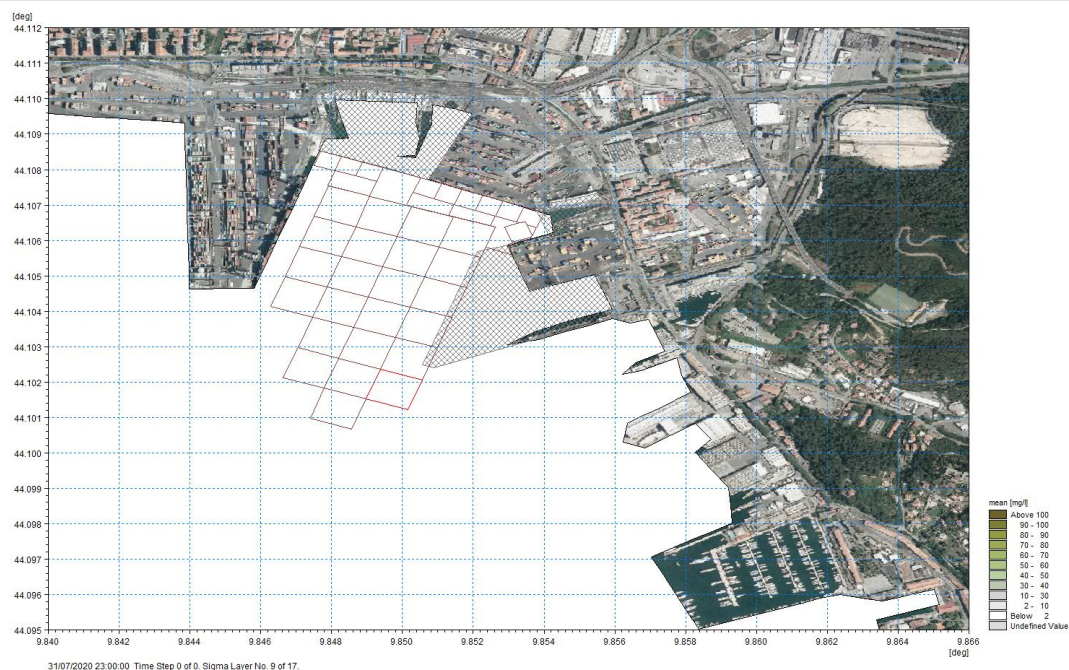


Figura 7.44 Unità operativa T31 – Ipotesi A – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo

7.1.5.3 Unità operativa T31 - Produttività giornaliera ipotesi B) – Periodo INVERNALE

Si rappresentano di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi B), ovvero operazioni di dragaggio di durata 8 ore (consecutive) per complessivi 2600 mc seguite da 16 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo invernale.

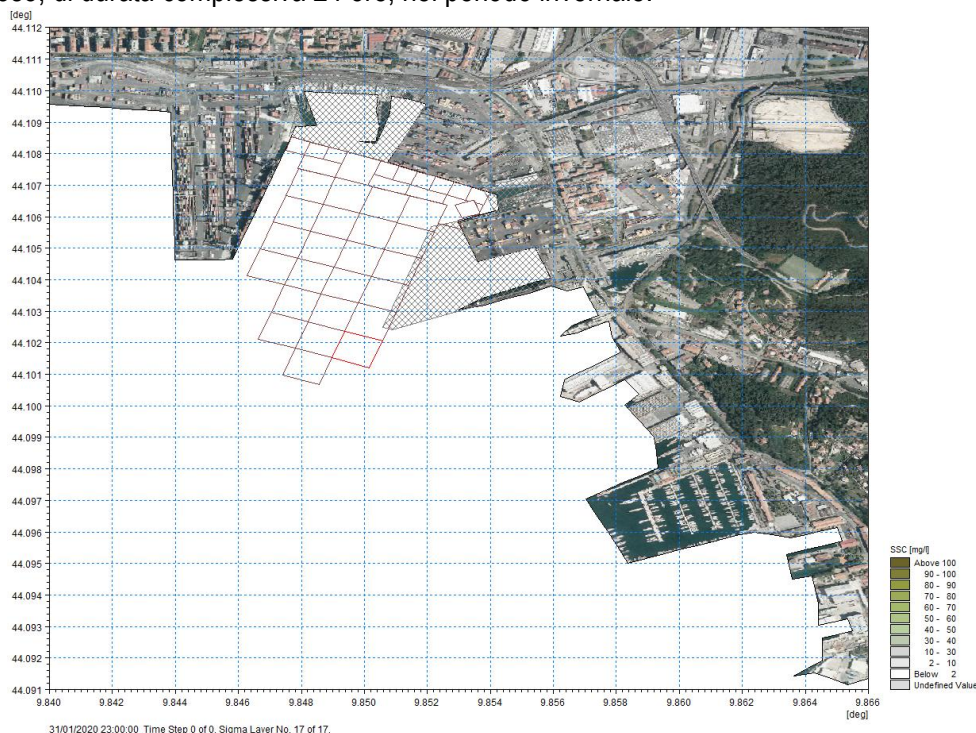


Figura 7.45 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato superficiale

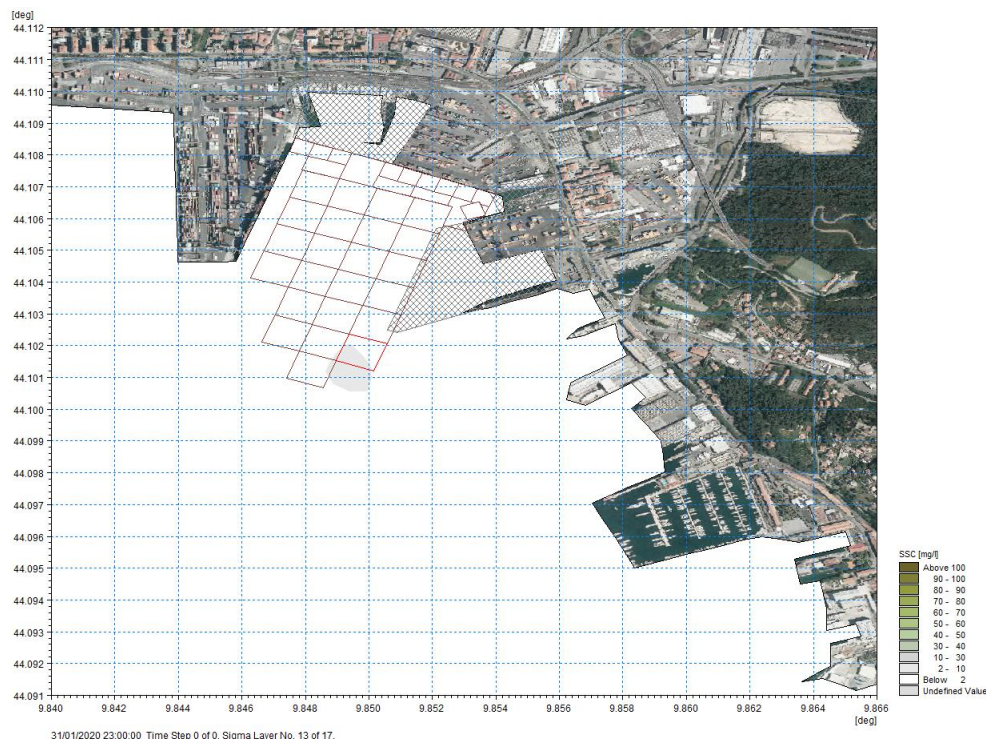


Figura 7.46 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale a metà della colonna d'acqua

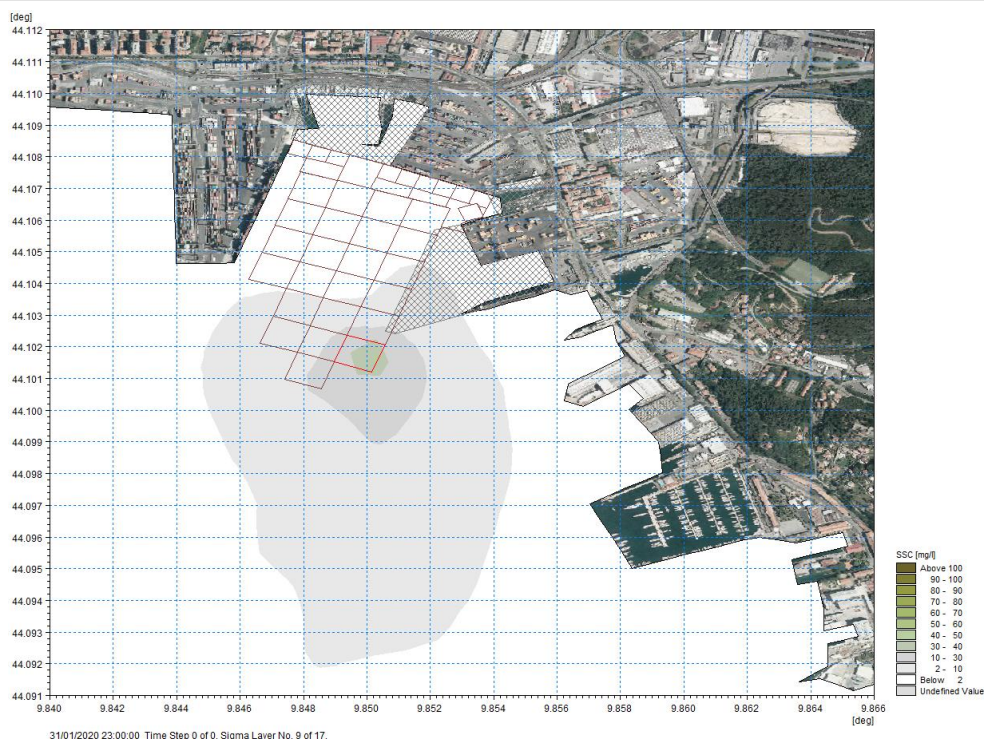


Figura 7.47 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo invernale allo strato di fondo

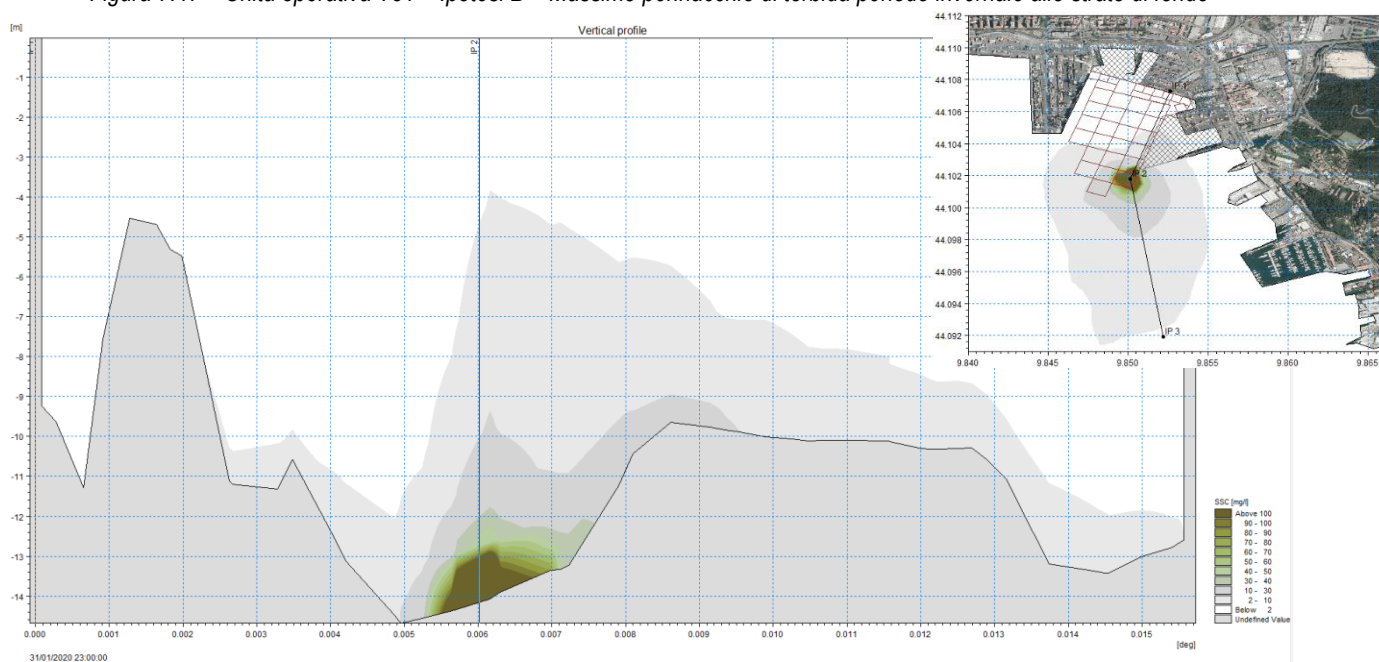


Figura 7.48 – Unità operativa T31– Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo invernale

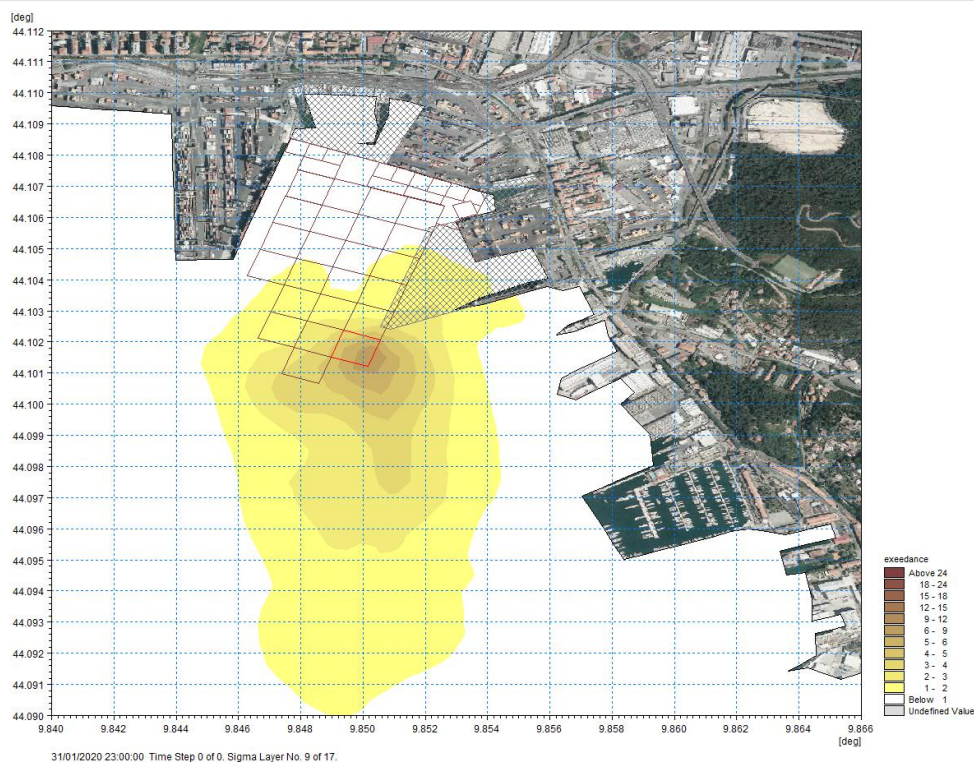


Figura 7.49 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale allo strato di fondo

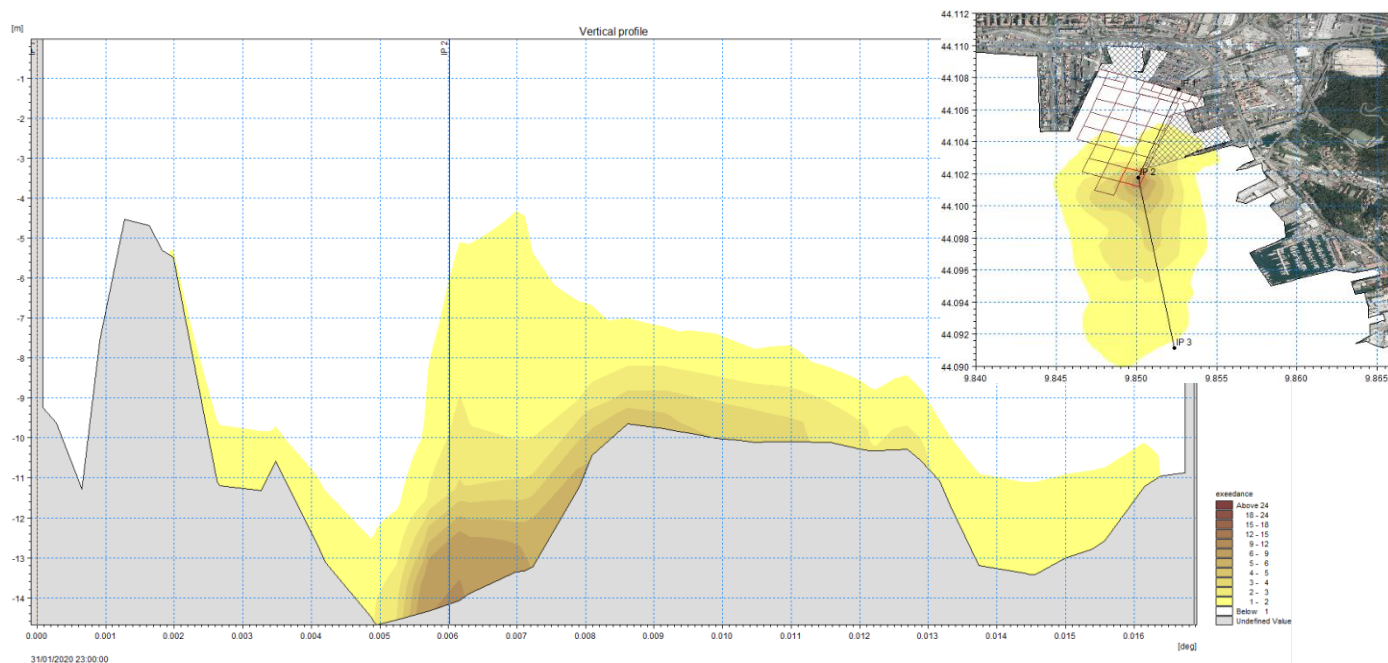


Figura 7.50 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo invernale

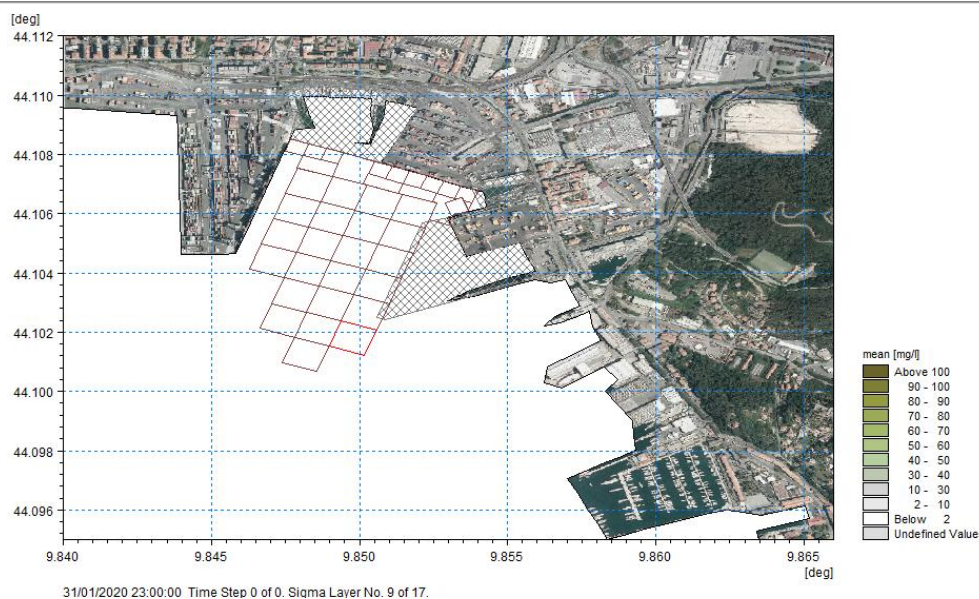


Figura 7.51 Unità operativa T31 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo invernale allo strato di fondo

7.1.5.4 Unità operativa T31 - Produttività giornaliera ipotesi B) – Periodo ESTIVO

Si rappresentano di seguito i risultati della modellazione di dispersione ed evoluzione del pennacchio di torbida nell'ipotesi B), ovvero operazioni di dragaggio di durata 8 ore (consecutive) per complessivi 2600 mc seguite da 16 ore di riposo, di durata complessiva 24 ore, nel periodo estivo.

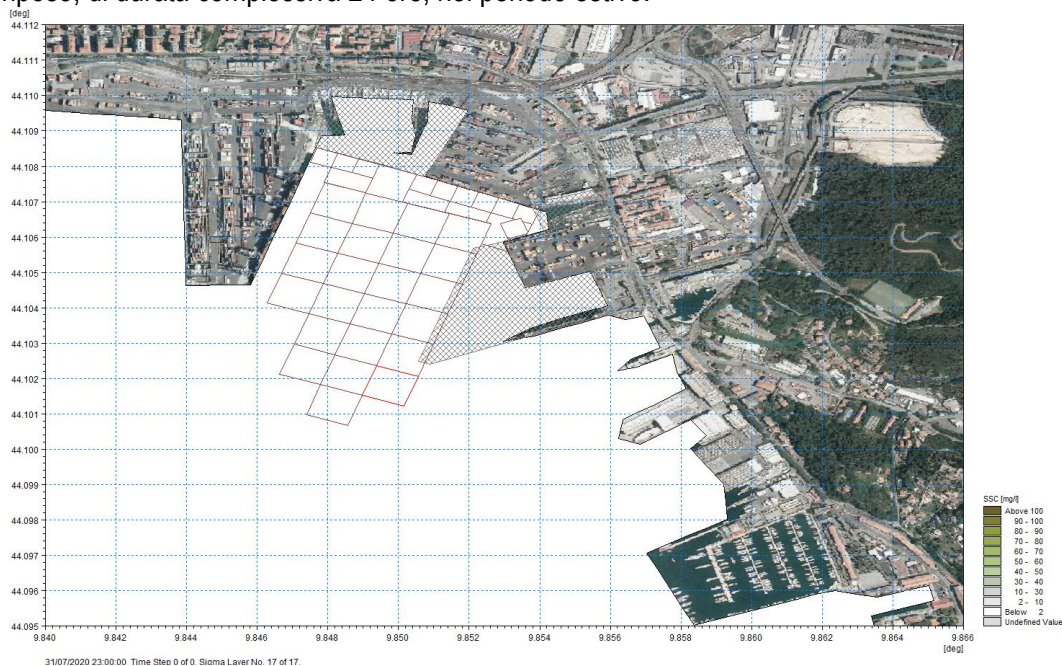


Figura 7.52 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato superficiale

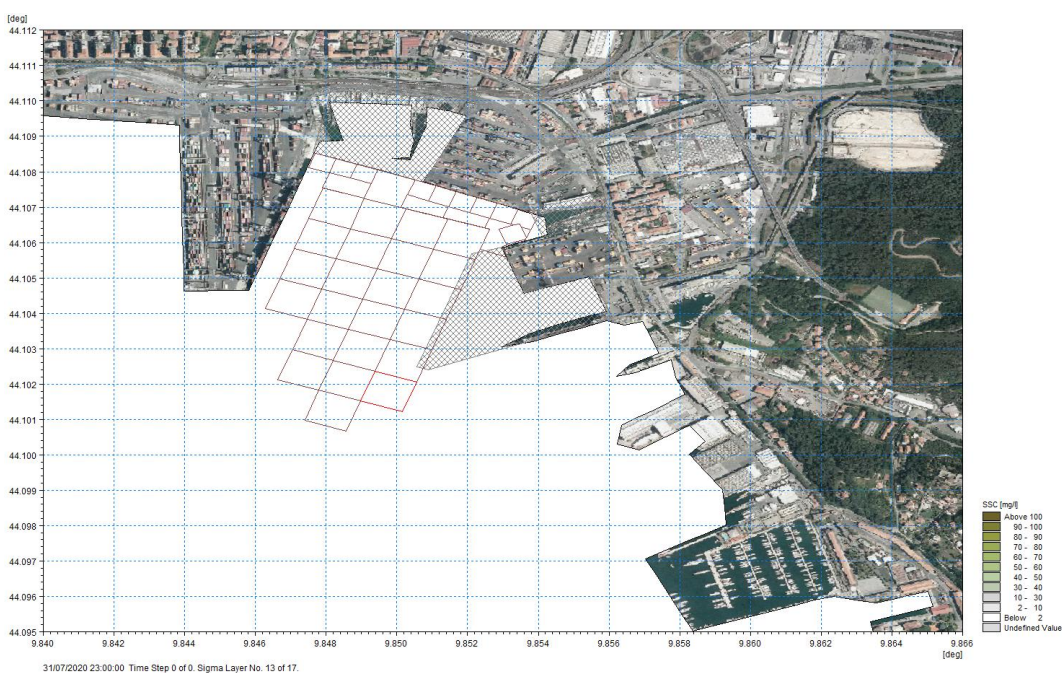


Figura 7.53 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo a metà della colonna d'acqua

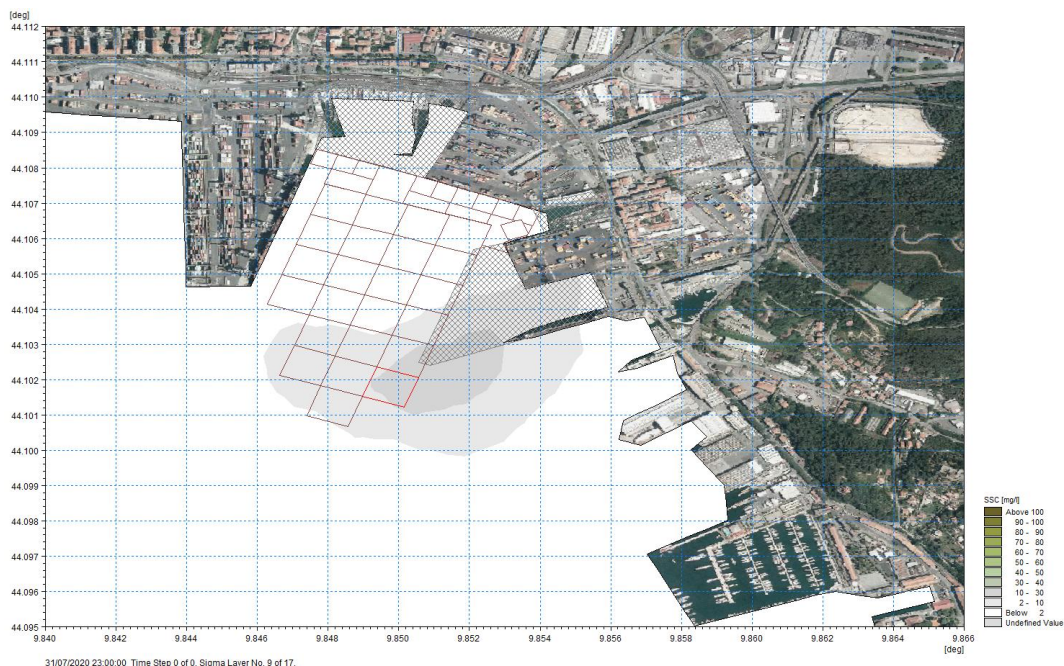


Figura 7.54 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Massimo pennacchio di torbida periodo estivo allo strato di fondo

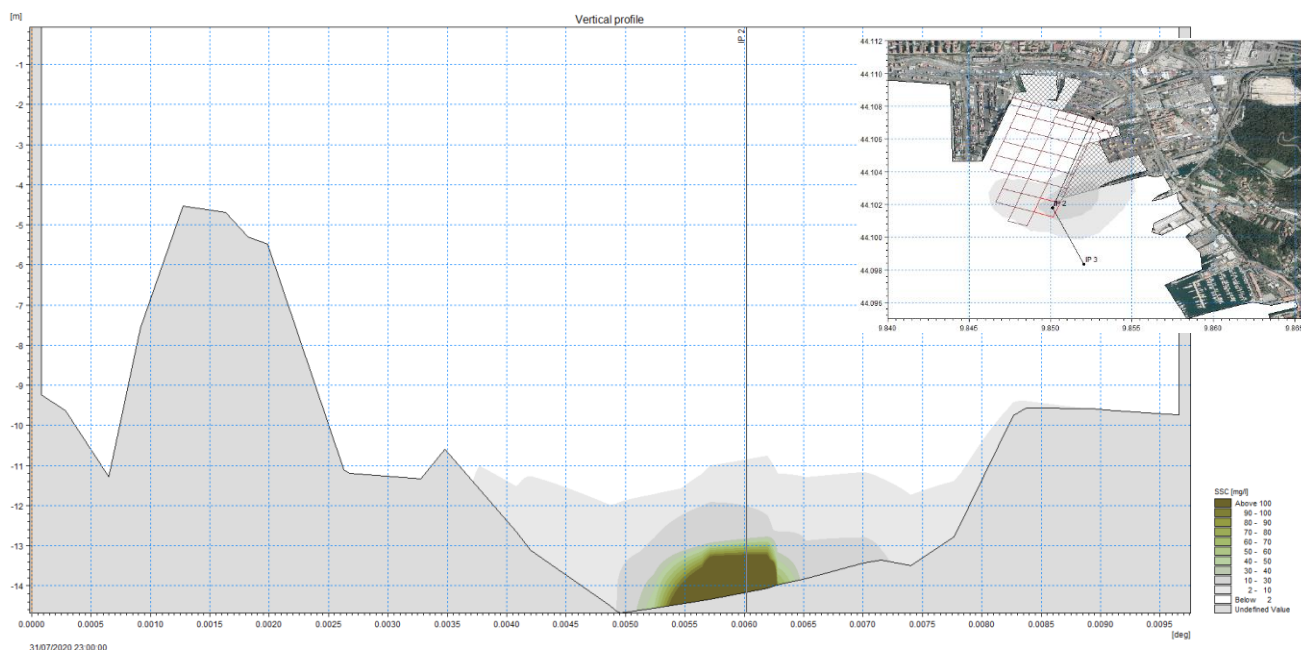


Figura 7.55 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Stratificazione nella colonna d'acqua del pennacchio di torbida periodo estivo

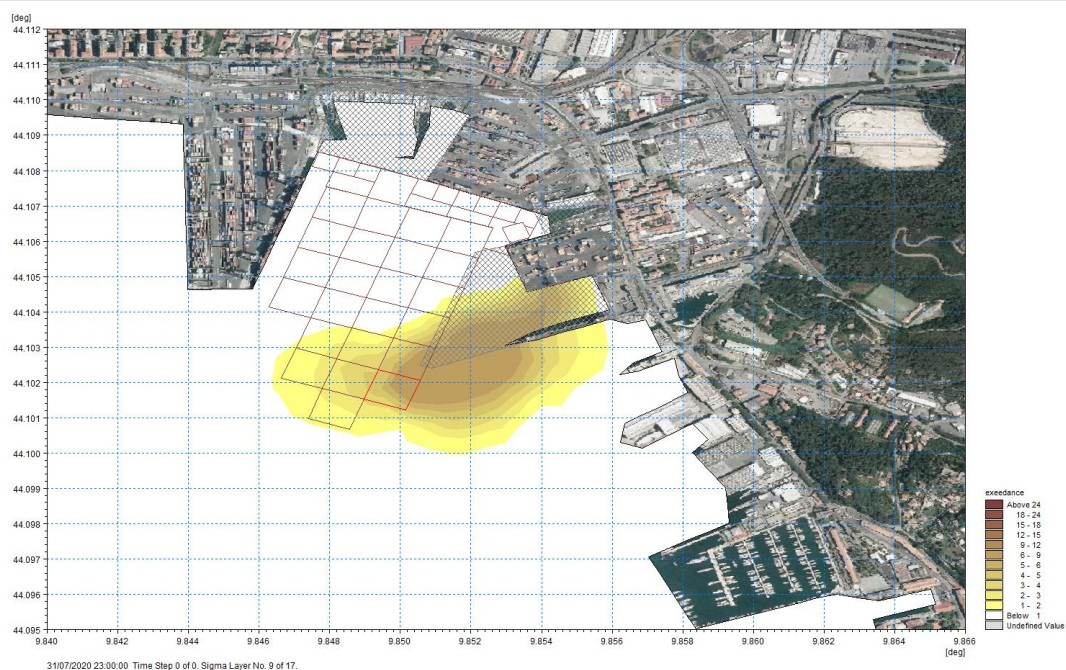


Figura 7.56 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo allo strato di fondo

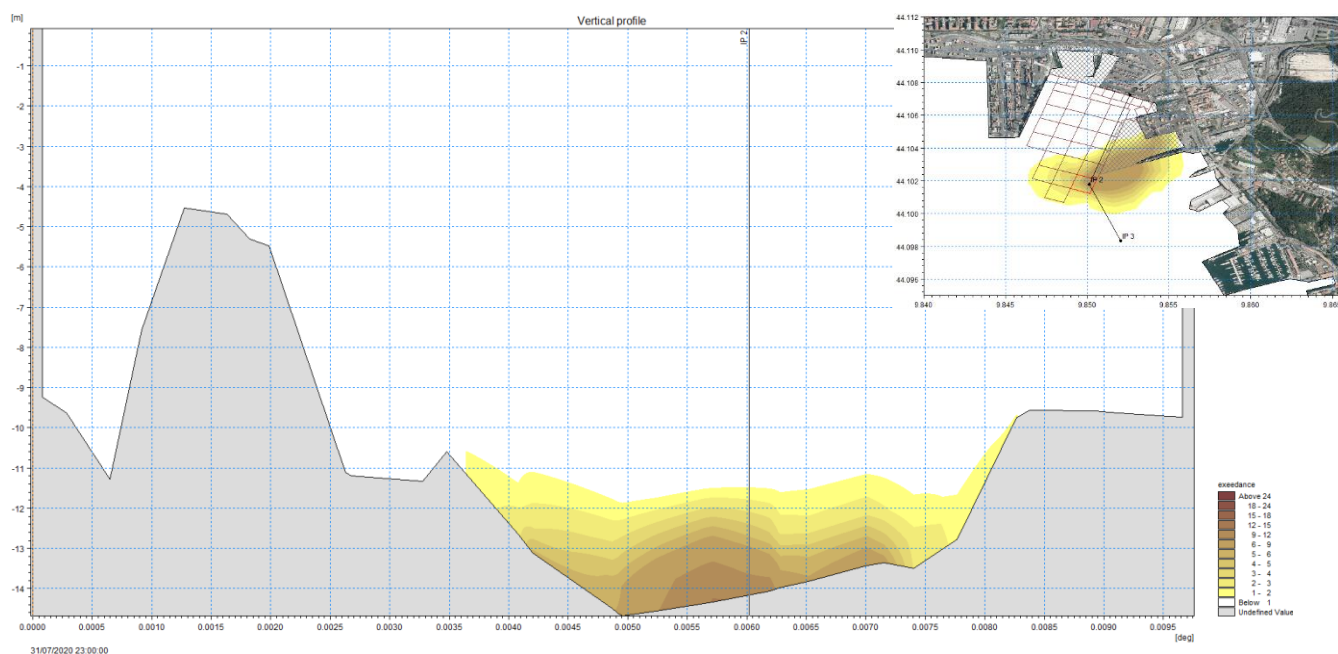


Figura 7.57 – Unità operativa T31 – Ipotesi B – Distribuzione stratigrafica dei tempi di superamento della soglia minima di concentrazione [2 mg/l] nel periodo estivo

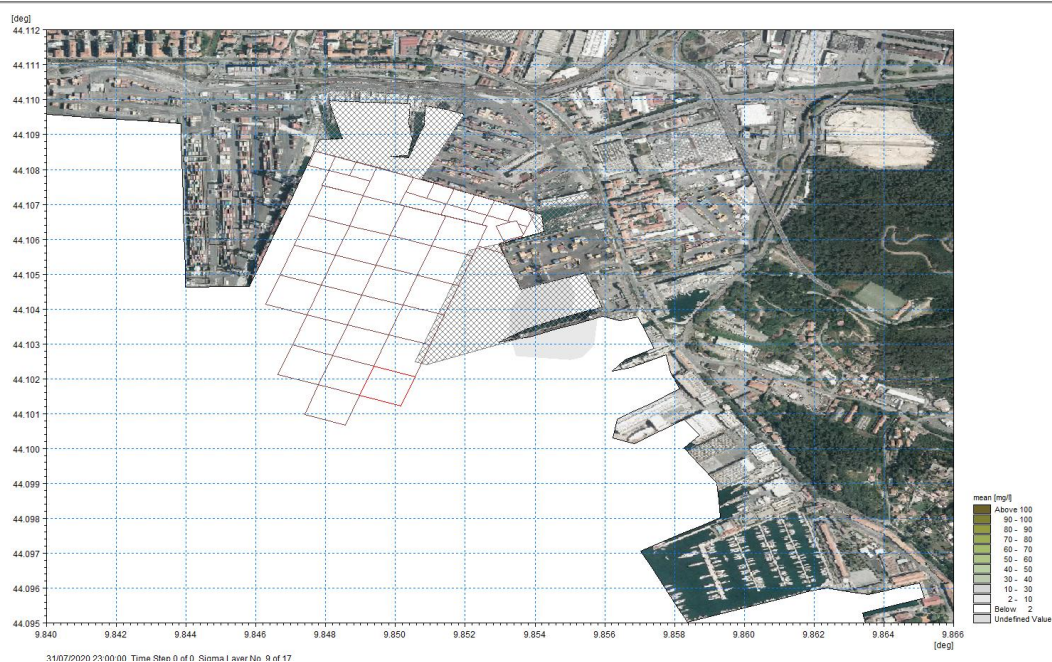


Figura 7.58 Unità operativa T31 – Ipotesi B – Pennacchio di torbida atteso a fine giornata (dopo 24 ore) nel periodo estivo allo strato di fondo

8. CONCLUSIONI

I risultati dei modelli di trasporto dei sedimenti sviluppati mettono in evidenza che durante le operazioni di dragaggio, eseguite secondo le modalità stabilite nel presente progetto, il materiale movimentato rimane confinato negli strati più profondi, con concentrazioni progressivamente più basse che non raggiungono la superficie, indipendentemente dalla stagione in cui sono eseguite le lavorazioni.

Anche i tempi di permanenza dei sedimenti in sospensione sono contenuti a poche ore, evidenziando quindi la tendenza del materiale, anche nella sua frazione più fine, a permanere negli strati più profondi e a ridepositarsi in tempi rapidi.

Si evidenzia infatti che sono sufficienti le ore di pausa notturna delle lavorazioni per far sì che la concentrazione del materiale in sospensione scenda al di sotto del limite di limpidezza assunto conservativamente pari a 2 mg/l.

APPENDICI

APPENDICE A – COPERNICUS – EUROPE'S EYES ON EARTH



Molte delle risorse naturali della Terra, da cui dipendiamo per la nostra sopravvivenza e sviluppo, sono finite o, quantomeno, limitate. Eppure, il nostro globale la popolazione continua a crescere, generando così un numero sempre crescente domanda di spazi abitativi sicuri, acqua dolce, terra fertile e aria pulita.

Nascono dunque le seguenti domande:

- Come possiamo gestire al meglio il nostro consumo e utilizzo delle risorse naturali della Terra e proteggere il nostro ambiente per il beneficio delle generazioni future?
- Come garantiremo la sicurezza, la protezione e la qualità della vita dei i milioni di futuri nuovi abitanti delle nostre città e regioni, e rispondere efficacemente ai disastri e alle crisi?
- Come possiamo migliorare la nostra comprensione delle cause e conseguenze del cambiamento climatico, preparare un'adeguata mitigazione e misure di adattamento?

Per rispondere a queste e ad altre domande correlate, la continua consapevolezza dello Stato e della salute dell'ambiente è necessaria, insieme alle capacità trasformare le informazioni in decisioni efficaci.

Il [programma COPERNICUS](#) è una pietra miliare degli sforzi dell'Unione Europea per monitorare la Terra e i suoi numerosi ecosistemi, garantendo al tempo stesso che i suoi cittadini siano preparati e protetti di fronte alle crisi e ai disastri naturali o di natura antropica. Costruito sulle basi di una profonda conoscenza scientifica ben radicata e decenni di investimenti dell'UE nella ricerca e lo sviluppo tecnologico, il programma COPERNICUS è un buon esempio della cooperazione strategica europea nella ricerca spaziale e nello sviluppo industriale.

Il programma COPERNICUS offre un'ampia gamma di approfondimenti sul nostro pianeta a disposizione dei cittadini, delle autorità pubbliche e dei decisori politici, degli scienziati, di imprenditori e di imprese in modo completo, gratuito e aperto.

Con un approccio multidisciplinare, COPERNICUS riunisce da comunità scientifiche e a specialisti GIS e fornisce servizi operativi che vanno dal monitoraggio del ghiaccio marino artico alla risposta alle emergenze, attraverso il rilevamento delle fuoriuscite di petrolio e il monitoraggio dell'espansione urbana. I servizi di COPERNICUS supportano un'ampia gamma di applicazioni ambientali e di sicurezza, compreso il monitoraggio del cambiamento climatico, lo sviluppo sostenibile, i trasporti e la mobilità, la pianificazione regionale e locale, la sorveglianza marittima, l'agricoltura e salute.

I servizi COPERNICUS si basano sulle informazioni fornite da una costellazione dedicata di satelliti (detti "Sentinelle") oltre a decine di satelliti di terze parti generazione noti come *missioni spaziali contribuenti*, integrati dai dati di misurazione "in situ" (ovvero locali o sul posto).

Rendendo disponibile la stragrande maggioranza dei suoi dati, analisi, previsioni e mappe liberamente disponibile e accessibile, COPERNICUS contribuisce allo sviluppo di nuove applicazioni e servizi innovativi, su misura alle esigenze di gruppi specifici di utenti, che toccano una varietà di attività economiche e/o culturali e/o ricreative, dalla pianificazione urbanistica, vela e assicurazione all'archeologia. COPERNICUS segna, dunque, l'inizio di una nuova era nell'osservazione della Terra.

DATI SPAZIALI

Il programma COPERNICUS è supportato da una famiglia di satelliti dedicati, di proprietà dell'UE (*Sentinel*) progettati specificamente per soddisfare le esigenze dei servizi Copernicus e dei relativi utenti. Dal lancio del

primo di questi – *Sentinel-1A* – nel 2014, l'UE ha avviato un processo per mettere in orbita una costellazione di oltre una dozzina di satelliti nel corso dei successivi dieci anni. Le Sentinelle soddisfano l'esigenza di una fonte coerente e indipendente di dati di alta qualità per i servizi offerti dal programma.

COPERTURA DEI DATI

COPERNICUS si basa anche sulle infrastrutture spaziali esistenti: satelliti gestiti dall'Agenzia spaziale europea (ESA), dall'Organizzazione europea per lo sfruttamento dei satelliti meteorologici (EUMETSAT), dagli Stati membri dell'UE e da altri paesi terzi e fornitori commerciali. Queste sono note come *missioni contribuenti* e hanno fornito dati satellitari per il programma sin dal suo inizio. Continueranno a farlo, in particolare laddove sono richiesti dati ad altissima risoluzione, come nelle applicazioni di emergenza o di sicurezza.

I servizi Copernicus trasformano questa ricchezza di dati satellitari e in situ in informazioni a valore aggiunto, elaborando e analizzando i dati, integrandoli con altre fonti e convalidando i risultati. I set di dati che risalgono ad anni e decenni sono resi comparabili e ricercabili, garantendo così il monitoraggio dei cambiamenti; i modelli vengono esaminati e utilizzati per creare previsioni migliori, ad esempio, dell'oceano e dell'atmosfera. Le mappe vengono create da immagini, vengono identificate caratteristiche e anomalie e vengono estratte informazioni statistiche.

Queste attività a valore aggiunto sono razionalizzate attraverso sei sezioni tematiche:



Atmosfera



Cambiamento Climatico



Ambiente Marino



Energy management



Territorio



Sicurezza

ATTORI DI COPERNICUS

COPERNICUS rappresenta uno sforzo di collaborazione. Essendo un programma dell'UE finanziato con fondi pubblici, è innanzitutto proprietà di tutti i cittadini europei, che ne rimangono i proprietari e i beneficiari finali.

In collaborazione con gli Stati membri dell'UE, la Commissione europea supervisiona e coordina il programma e garantisce che rimanga orientato agli utenti. La Commissione Europea ha il compito di definire e sviluppare la visione politica del programma COPERNICUS e di mettere in atto gli elementi che consentono il corretto funzionamento del sistema. Insieme al Parlamento europeo e al Consiglio, la Commissione europea è responsabile dell'impegno finanziario a lungo termine, garantendo le basi per la sostenibilità del programma.

Gli Stati membri dell'UE e dell'ESA contribuiscono in diversi modi: attraverso lo sviluppo di satelliti nell'ESA, la fornitura di dati da infrastrutture spaziali di proprietà nazionale, la fornitura di dati da fonti di dati non spaziali (in situ) o partecipando, nell'ambito di il coordinamento della Commissione Europea, nei "segmenti di terra collaborativi", in cui gli Stati membri possono avere accesso diretto ai dati SENTINEL finanziando e sviluppando le proprie strutture dei segmenti di terra (stazioni di ricezione, centri di elaborazione e archiviazione, applicazioni specifiche per paese, ecc.) .).

Lo sviluppo della componente spaziale, compreso il lancio dei satelliti SENTINEL dedicati, è stato delegato all'ESA, che funge anche da architetto generale dei sistemi della componente spaziale e ne assicura il

coordinamento tecnico. Le operazioni delle Sentinelle sono state affidate all'ESA e all'EUMETSAT, sulla base del loro specifico know-how. Le Sentinelle sono di proprietà dell'Unione Europea.

L'attuazione operativa del programma, sotto la supervisione della direzione generale per il Mercato interno, l'industria, l'imprenditorialità e le PMI della Commissione europea, è eseguita direttamente dai servizi competenti della Commissione europea (in particolare il Centro comune di ricerca - JRC) oppure è affidata ad enti e agenzie europei dotati delle competenze adeguate.

Le agenzie europee coinvolte sono l'*Agenzia Europea dell'Ambiente* (AEA), che ha funzione di coordinamento delle forniture dei dati dalle strutture in situ, l'*Agenzia europea per la gestione della cooperazione operativa alle frontiere esterne degli Stati membri dell'Unione europea* (FRONTEX), l'*Agenzia europea per la sicurezza marittima* (EMSA) o l'*Agenzia satellitare europea Centro* (SatCen). Altre organizzazioni competenti coinvolte sono il *Centro europeo per le previsioni meteorologiche a medio termine* (ECMWF) e *Mercator Océan*.

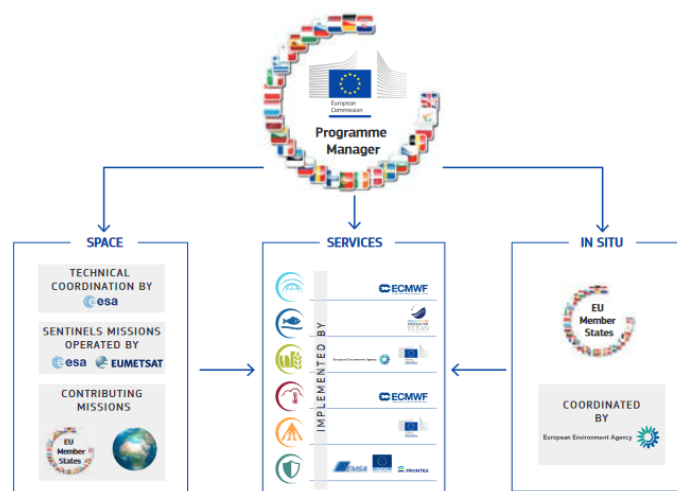


Figura A.1 – Attori di COPERNICUS

COPERNICUS MARINE SERVICE (CMEMS)



Il Servizio Marino di Copernicus (o *Copernicus Marine Environment Monitoring Service*) è la componente di monitoraggio marino del Programma COPERNICUS dell'Unione Europea. Fornisce informazioni autorevoli gratuite, regolari e sistematiche sullo stato dell'oceano Blu (fisico), Bianco (ghiacci marini) e Verde (biogeochimico) su scala globale e regionale. È finanziato dalla Commissione Europea e realizzato da *Mercator Ocean International*. È studiato per assistere le politiche UE e gli impegni legali presi a livello internazionale relativamente alla governance degli oceani, per provvedere alle esigenze della società nel suo complesso in merito alla loro conoscenza e per promuovere l'Economia Blu in tutti i settori marittimi, fornendo dati e informazioni gratuiti e aggiornati sugli oceani stessi.

Fornisce input chiave che supportano le principali politiche e iniziative UE e internazionali e possono contribuire a combattere l'inquinamento, a proteggere gli ecosistemi marini, a garantire la sicurezza marina e delle rotte, a guidare un uso sostenibile delle risorse dell'oceano, a sviluppare le risorse marine, alla crescita blu, al monitoraggio del clima, alle previsioni meteorologiche e altro ancora. Ha inoltre lo scopo di accrescere la consapevolezza nel pubblico generale, fornendo ai cittadini europei e del mondo informazioni sulle problematiche legate agli oceani.

MERCATOR OCEAN INTERNATIONAL (MOI)



Nel 2014, *Mercator Ocean International* (MOi) è stata selezionata dalla Commissione Europea per attuare il Copernicus Marine Service. Mercator Ocean International è un'organizzazione no profit che fornisce servizi scientifici di interesse generale in merito agli oceani, incentrati sulla tutela e sull'uso sostenibile degli oceani, dei mari e delle risorse marine (UN SDG14). Questa organizzazione multinazionale sviluppa sistemi di simulazione oceanica complessi (modelli numerici) basati sui dati di osservazione dell'oceano (da satellite e in situ) in grado di descrivere, analizzare e prevedere lo stato fisico, dei ghiacci marini e biogeochimico dell'oceano in qualsiasi momento, in superficie o in profondità, su scala globale o per un'area specifica, in tempo reale o in modalità differita.

MOi è un attore importante nella fornitura di servizi basati sull'osservazione terrestre, in particolare per quanto riguarda l'oceano globale. Inoltre, MOi è stato selezionato dalla Commissione Europea come uno dei tre enti responsabili dell'implementazione della piattaforma cloud Copernicus WEkEO DIAS, che fornisce tutti i dati Copernicus e Sentinel assieme alle risorse informatiche in un solo hub. Di recente, la Commissione europea ha affidato a MOi l'implementazione del progetto EU4OceanObs, parte della Foreign Policy Instrument Action on International Governance della Commissione Europea: componente UE delle osservazioni dell'oceano globale come parte della strategia a lungo termine sull'osservazione dell'oceano globale in situ dell'UE.

APPENDICE B – MODELLO HD

Il Flow Model FM è un sistema di modellazione completo per la modellazione dell'acqua bi/tridimensionale sviluppato da DHI. I modelli 2D e 3D portano gli stessi nomi delle classiche versioni del modello DHI MIKE 21 e MIKE 3 con l'aggiunta di una "FM" in riferimento al tipo di griglia del modello, ovvero una mesh flessibile.

Il sistema di modellizzazione è stato sviluppato per applicazioni complesse in ambienti oceanografici, costieri ed estuari. Tuttavia, essendo un sistema di modellazione generale per flussi a superficie libera 2D e 3D, può essere applicato anche per studi di acque superficiali interne, ad es. inondazioni terrestri e laghi o bacini artificiali.

I moduli della serie Flexible Mesh (FM) di DHI sono i seguenti:

- **Moduli FM modello di flusso**
 - Modulo idrodinamico, HD
 - Modulo di trasporto, TR
 - Modulo Ecologia, ECO Lab
 - Modulo per la fuoriuscita di petrolio, ELOS
 - Modulo di trasporto della sabbia, ST
 - Modulo di trasporto del fango, MT
 - Modulo di tracciamento delle particelle, PT
- **Modulo d'onda**
 - Modulo Onde Spettrali, SW

La serie FM soddisfa la crescente domanda di rappresentazioni realistiche della natura, sia per quanto riguarda la coerenza con la realtà che per la sua capacità di modellare processi accoppiati, ad es. accoppiamento tra correnti, onde e sedimenti. Tutti i moduli sono supportati da interfacce utente avanzate che includono strumenti efficienti e sofisticati per la generazione di mesh, la gestione dei dati, la visualizzazione 2D/3D, ecc. La serie FM costituisce uno strumento software professionale unico per servizi di consulenza relativi alla progettazione, attività di funzionamento e manutenzione nell'ambiente marino.

Una mesh non strutturata fornisce un grado ottimale di flessibilità nella rappresentazione di geometrie complesse e consente rappresentazioni uniformi dei confini. Piccoli elementi possono essere utilizzati in aree in cui si desidera maggiore dettaglio, ed elementi più grandi utilizzati dove sono necessari meno dettagli, ottimizzando le informazioni per un dato periodo di tempo di calcolo.

La discretizzazione spaziale delle equazioni governanti viene eseguita utilizzando un metodo a volume finito centrato sulla cella. Nel piano orizzontale viene utilizzata una griglia non strutturata mentre nel dominio verticale (3D) viene utilizzata una mesh strutturata.

MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM - HYDRODYNAMIC MODULE

Il modulo idrodinamico fornisce la base per i calcoli eseguiti in molti altri moduli, ma può anche essere utilizzato da solo. Simula le variazioni del livello dell'acqua e i flussi in risposta ad una varietà di funzioni forzanti nelle pianure alluvionali, nei laghi, negli estuari e nelle aree costiere. Di seguito se ne riporta una breve descrizione. Per una consultazione più approfondita si rimanda al manuale del software.

Il modulo idrodinamico incluso nel modello di flusso *FM MIKE 21* e *MIKE 3* simula il flusso instabile tenendo conto delle variazioni di densità, della batimetria e delle forzanti esterne. La scelta tra modello 2D e 3D dipende da una serie di fattori. Ad esempio, in acque poco profonde, il vento e la corrente di marea sono spesso sufficienti a mantenere la colonna d'acqua ben miscelata, cioè omogenea in salinità e temperatura. In questi casi è possibile utilizzare un modello 2D. Nei corpi idrici con stratificazione, sia per densità che per specie (ecologia),

dovrebbe essere utilizzato un modello 3D. Ciò vale anche per le acque chiuse o semichiusate in cui si verifica una circolazione guidata dal vento.

Le applicazioni tipiche del modulo HD sono:

- Valutazione delle condizioni idrografiche per la progettazione, costruzione ed esercizio di strutture ed impianti in acque stratificate e non stratificate;
- Studi di valutazione di impatto ambientale;
- Studi sulla circolazione costiera e oceanografica;
- Ottimizzazione delle infrastrutture portuali e di protezione delle coste;
- Idrodinamica dei laghi e dei serbatoi;
- Acqua di raffreddamento, ricircolo e desalinizzazione;
- Inondazioni costiere e mareggiate;
- Modellazione delle inondazioni interne e dei flussi terrestri;
- Sistemi di previsione e allerta.

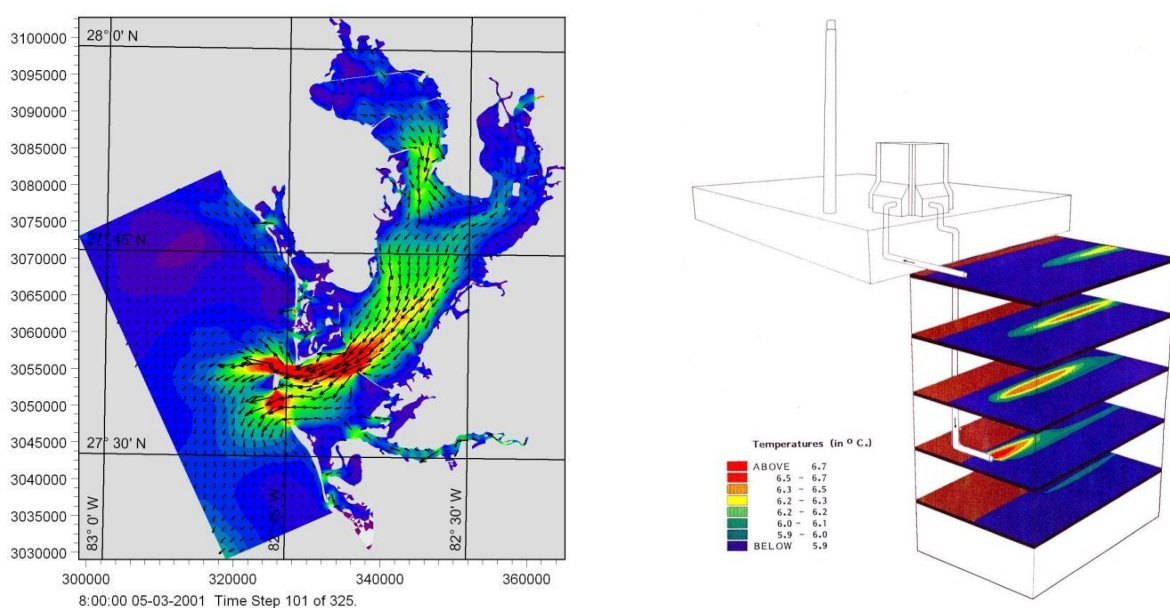


Figura A.2 – A sinistra: Esempio di flusso nella baia di Tampa (Florida), a destra: esempio di studio di circolazione termica

Il Modulo Idrodinamico (HD) è utilizzato, assieme al Modulo di Trasporto (TR), per simulare la diffusione e il destino delle sostanze disciolte e sospese. Questa combinazione di moduli viene applicata nelle simulazioni di traccianti, nel lavaggio e in semplici studi sulla qualità dell'acqua.

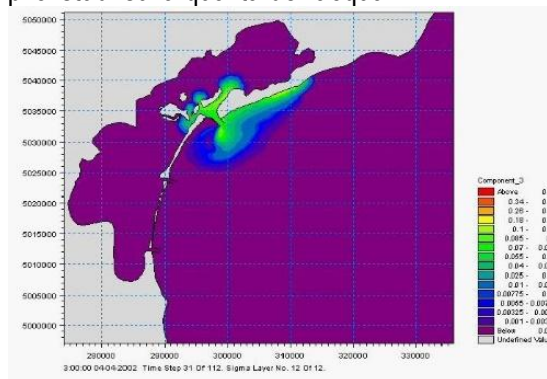


Figura A.3 – Esempio di diffusione di una singola componente nel mar Adriatico

Il Modulo Idrodinamico HD può essere accoppiato al Modulo Ecologico (ECO Lab) per costituire la base per studi ambientali sulla qualità dell'acqua comprendenti più componenti. Inoltre, il modulo HD può essere accoppiato a modelli sedimentari per il calcolo del trasporto solido. Il modulo di trasporto della sabbia (ST) e il modulo di trasporto del fango (MT) possono essere applicati per simulare rispettivamente il trasporto di sedimenti coesivi e non-coesivi.

Nella zona costiera il trasporto è determinato principalmente dalle condizioni delle onde e dalle correnti indotte dalle onde associate. Le correnti indotte dalle onde sono generate dai gradienti degli stress da radiazione (*radiation stress*) che si verificano nella zona del surf. Il modulo per l'onda spettrale (SW) può essere utilizzato per calcolare le condizioni delle onde e le sollecitazioni di radiazione associate.

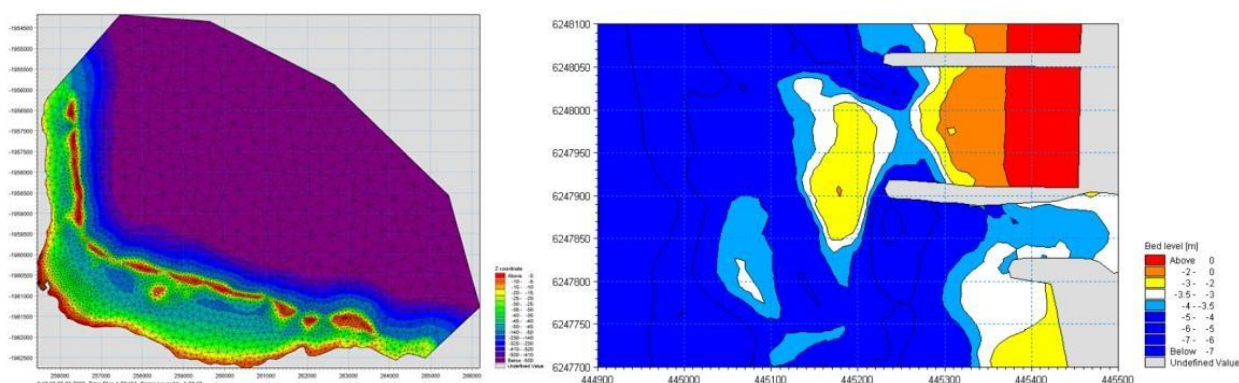


Figura A.4 –A sinistra: Esempio di modello batimetrico di Taravao Bay (Tahiti),
A destra: Applicazione dell'accoppiamento dei moduli HD,SW,ST nel porto di Torsminde (Danimarca)

CARATTERISTICHE COMPUTAZIONALI

Le principali caratteristiche del modulo idrodinamico (HD) sono:

- Allagamento e prosciugamento;
- Dispersione della quantità di moto;
- Sollecitazione di taglio sul fondo;
- Forza di Coriolis;
- Sollecitazione di wind shear;
- Gradienti di pressione barometrica;
- Copertura dei ghiacci;
- Potenziale mareale;
- Precipitazione ed evaporazione;
- Tensioni radianti delle onde (*radiation stress*);
- Forzanti e pozzi.

EQUAZIONI DELLA MODELLISTICA

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.

Pertanto, il modello è costituito da equazioni di quantità di moto di continuità, temperatura, salinità e densità ed è chiuso da uno schema di chiusura turbolento. La densità non dipende dalla pressione, ma solo dalla temperatura e dalla salinità.

Per il modello 3D, la superficie libera viene presa in considerazione utilizzando un approccio di trasformazione delle coordinate sigma o utilizzando una combinazione di un sistema di coordinate sigma e di livello z.

Di seguito le equazioni governanti sono presentate utilizzando le coordinate cartesiane. L'equazione di continuità locale è scritta come:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = S$$

e le due equazioni della quantità di moto orizzontale, rispettivamente per le componenti x e y, sono:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial vu}{\partial y} + \frac{\partial wu}{\partial z} = fv - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + F_u + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right) + u_s S$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial wv}{\partial z} = -fu - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_z^\eta \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + F_v + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) + v_s S$$

Nel modulo idrodinamico HD, il calcolo di trasporto di temperatura (T) e salinità (s) seguono una equazione generale di trasporto/diffusione, ovvero:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} + \frac{\partial wT}{\partial z} = F_T + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \hat{H} + T_s S$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial us}{\partial x} + \frac{\partial vs}{\partial y} + \frac{\partial ws}{\partial z} = F_s + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_v \frac{\partial s}{\partial z} \right) + T_s S$$

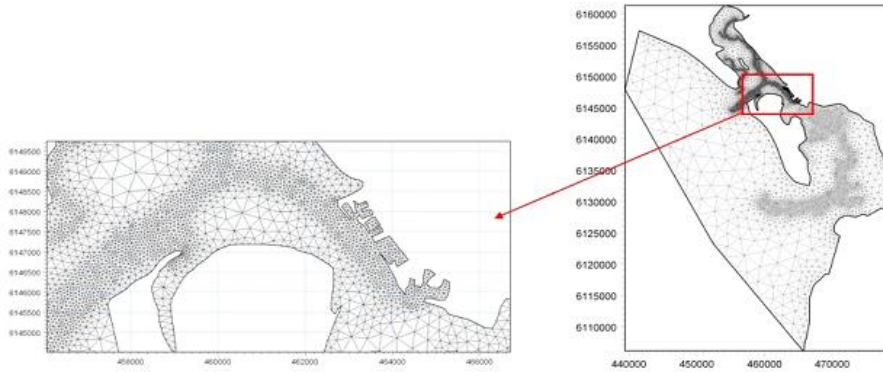


Figura A.5 – Esempio di mesh non strutturate

La diffusione orizzontale è definita come:

$$(F_T, F_s) = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h \frac{\partial}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h \frac{\partial}{\partial y} \right) \right] (T, s)$$

Le equazioni per il flusso bidimensionale si ottengono integrando le equazioni sulla profondità. È compreso anche lo scambio termico con l'atmosfera

Nelle equazioni sopra riportate

- T è il tempo;

- x, y, z sono le coordinate cartesiane;
- u, v, w
- T, s sono temperatura e salinità;
- D_v è il coefficiente della componente diffusiva verticale (vertical turbulent (eddy) diffusion coefficient);
- \hat{H} è il termine dovuto allo scambio con l'atmosfera;
- S è la portata dovuta alle forzanti puntuali;
- T_s, s_s sono temperature e salinità delle forzanti;
- F_T, F_s, F_c sono i termini diffusive orizzontali;
- D_h è il coefficiente diffusivo orizzontale;
- h è la profondità.

TECNICHE RISOLUTIVE

La soluzione delle equazioni del trasporto è strettamente legata alla soluzione delle condizioni idrodinamiche. La discretizzazione spaziale delle equazioni primitive viene eseguita utilizzando un metodo a volume finito centrato sulla cella. Il dominio spaziale è discretizzato mediante suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte. Nel piano orizzontale viene utilizzata una griglia non strutturata mentre nel dominio verticale nel modello 3D viene utilizzata una mesh strutturata. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangoli o quadrilateri. Nel modello 3D gli elementi possono essere prismi o mattoni le cui facce orizzontali sono rispettivamente triangoli ed elementi quadrilateri. L'integrazione temporale viene eseguita utilizzando uno schema esplicito.

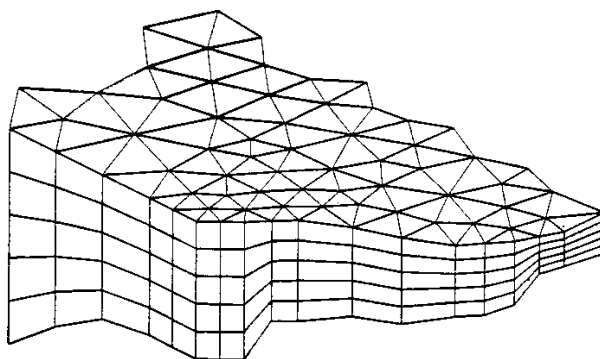


Figura A.6 – Principio della mesh tridimensionale

APPENDICE C – MODULO MIKE 21 - MUD TRANSPORT (MT)

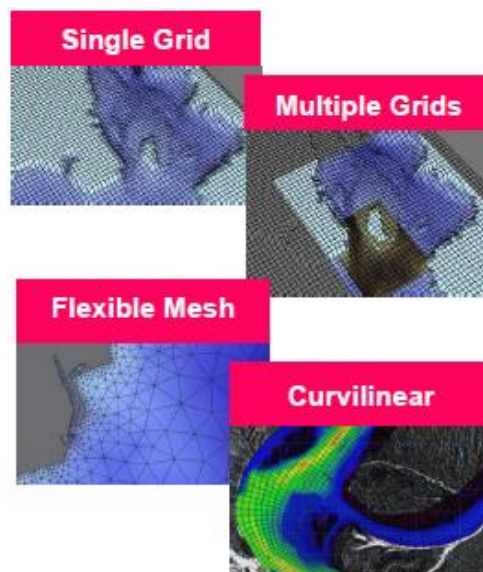
MIKE 21 è un modello numerico professionale per la simulazione di correnti, onde, trasporto solido e qualità delle acque in fiumi, laghi, baie, aree costiere e mare aperto. MIKE 21 offre un ambiente di lavoro completo, efficace e robusto a supporto dell'ingegneria e della pianificazione e gestione territoriale a diverse scale spaziali. La combinazione di un'interfaccia grafica avanzata con un motore di calcolo robusto ed affidabile, frutto di un pluriennale e continuo sviluppo da parte di DHI, rende oggi MIKE 21 lo strumento più utilizzato ed efficace per l'ingegneria fluviale e marittima in tutto il mondo.

Le sue applicazioni tipiche sono:

- Modellazione di idrodinamica, trasporto solido e qualità delle acque in fiumi, laghi ed aree golenali;
- Studio del moto ondoso in aree costiere, bacini portuali ed offshore;
- Analisi di idrodinamica, trasporto solido e morfologia in aree costiere;
- Analisi della qualità delle acque al largo e sotto costa;
- Supporto alla pianificazione e progettazione di opere costiere ed offshore;
- Supporto alla pianificazione e progettazione di opera fluviali;
- Supporto all'ottimizzazione di layout portuali;
- Analisi di impatto ambientale;
- Previsione degli stati di mare a supporto della navigazione;
- Analisi di allagamenti in aree costiere e fenomeni di surge.

Il pacchetto MIKE 21 è disponibile in 4 versioni che si differenziano in base alla schematizzazione geometrica adottata:

- *Griglia singola*: le equazioni di continuità e del moto sono risolte con una tecnica implicita alle differenze finite su una griglia rettangolare, uniforme in tutto il dominio di calcolo.
- *Griglia multipla*: questo schema utilizza lo stesso approccio della griglia singola, con la possibilità di innestare nel dominio griglie a risoluzione crescente nelle aree ove sia richiesto un maggiore dettaglio.
- *Volumi finiti*: l'approccio ai volumi finiti garantisce il massimo della flessibilità, in particolare per domini di calcolo estesi in cui sia necessario adottare una risoluzione spaziale variabile. È possibile utilizzare elementi triangolari o quadrangolari anche in modo accoppiato. MIKE 21 FM è oggi il codice di calcolo più utilizzato in campo marittimo e costiero.
- *Maglia curvilinea*: è la griglia adottata da MIKE 21 C, codice di calcolo studiato appositamente per applicazioni di morfologia fluviale.



MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM – MUD TRANSPORT MODULE

Si descrive qui brevemente il Mud Transport Module (MT), modulo aggiuntivo per MIKE 21 e MIKE 3 Flow Model FM. Powered by DHI, nell'ambito del sistema di modellazione completo per flussi bi/tridimensionali, la serie Flexible Mesh, sviluppata da DHI. Per una descrizione più approfondita si rimanda al manuale del software.

Il modulo MT include un modello all'avanguardia di trasporto dei fanghi che è in grado di simulare l'erosione, il trasporto, l'assestamento e la deposizione di sedimenti coesivi in aree marine, salmastre e di acqua dolce. Il modulo tiene conto anche del materiale non coesivo a grana fine.

Il Modulo MT richiede un accoppiamento al solutore idrodinamico e al solutore di trasporto per componenti passivi (modulo *AD Advection/Dispersion*). La base idrodinamica è ottenuta con il modulo MIKE 21 o MIKE 3 FM HD, descritto al paragrafo precedente. L'influenza delle onde sui modelli di erosione/deposizione può essere inclusa applicando il *modulo Spectral Wave, MIKE 21 FM SW*.

Con la serie FM è possibile combinare e far funzionare i moduli in modo dinamico. Se i cambiamenti morfologici all'interno dell'area di interesse sono dello stesso ordine di grandezza della variazione della profondità dell'acqua, allora è possibile prendere in considerazione l'impatto morfologico sull'idrodinamica. Questa interazione tra l'aggiornamento del fondale marino e il flusso d'onda può essere rilevante in aree d'acque basse (*shallow water*); ad esempio, dove si prendono in considerazione gli effetti a lungo termine. Inoltre, può essere rilevante in aree poco profonde dove sono pianificati interventi di dragaggio o di manutenzione considerevole e analogamente nei siti in cui avviene lo smaltimento del materiale dragato.

Il modulo MT viene utilizzato in un'ampia varietà di casi in cui l'erosione, la dispersione e la deposizione di sedimenti coesivi sono di interesse. I sedimenti a grana fine possono causare impatti in diversi modi. In sospensione, i materiali fini in sospensione possono ombreggiare aree per un dato periodo di tempo, il che può avere conseguenze per la sopravvivenza della fauna e della flora bentoniche dipendenti dalla luce. Il sedimento a grana fine può inoltre depositarsi in aree in cui la deposizione è indesiderata, quali ad esempio insenature dei porti e aree protette. Inoltre, gli inquinanti come i metalli pesanti e il TBT tendono ad aderire al sedimento coesivo. Se i sedimenti inquinati si depositassero in aree ecologicamente sensibili, potrebbero influenzare pesantemente la flora e la fauna locali e la qualità dell'acqua in generale.

Il modello MT viene spesso applicato nella stima dei tassi di interrimento, e rappresenta anche un aspetto importante da considerare quando si progettano nuovi canali o si approfondiscono canali esistenti per consentire l'accesso ai porti alle navi più grandi. Le simulazioni della dinamica dei sedimenti a grana fine possono contribuire da un lato a ottimizzare la progettazione per quanto riguarda la navigazione e la manovrabilità e dall'altro a ridurre al minimo la necessità di dragaggio di manutenzione.

Il modulo MT ha molte aree di applicazione e alcune delle più frequentemente utilizzate sono elencate di seguito:

- Dispersione del materiale dragato;
- Ottimizzazione delle operazioni di dragaggio;
- Insabbiamento dei porti;
- Interrimento nei canali di accesso;
- Dinamica e morfologia dei sedimenti coesivi;
- Dispersione dei pennacchi fluviali;
- Erosione di materiale a grana fine sotto la combinazione di onde e correnti;
- Flussi gravitazionali carichi di sedimenti e correnti di torbidità;
- Studi sulla dinamica dei sedimenti contaminati.

CARATTERISTICHE COMPUTAZIONALI

Le caratteristiche principali del modulo di trasporto del fango FM Flow Model MIKE 21 e MIKE 3 sono:

- Frazioni multiple di sedimenti;
- Strati multipli del letto;
- Flocculazione;
- Decantazione difficile;

- Inclusione di sedimenti non coesivi;
- Sollecitazione di taglio del letto dovuta alla combinazione di correnti e onde;
- Onde incluse come database delle onde o serie temporali 2D;
- Consolidamento;
- Aggiornamento morfologico del letto;
- Tracciamento delle fuoriuscite di sedimenti.

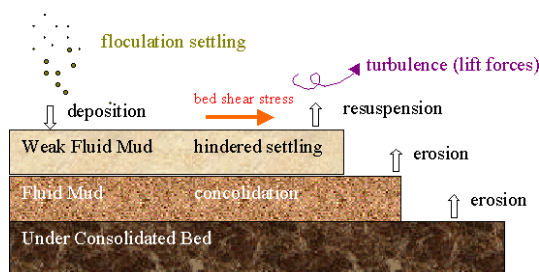


Figura A.7 – Esempio di modellazione dei processi fisici

EQUAZIONI DELLA MODELLISTICA

Le equazioni che governano il modulo MT sono essenzialmente basate su *Mehta et al. (1989)*. L'impatto delle onde viene introdotto attraverso lo sforzo di taglio del letto. Il modulo coesivo di trasporto dei sedimenti o modulo di trasporto del fango (MT) si occupa del movimento del fango in un fluido e dell'interazione tra il fango e il letto. Il trasporto dei fanghi è generalmente descritto dalla seguente equazione (es. *Teisson, 1991*):

$$\frac{\partial c^i}{\partial t} + \frac{\partial u c^i}{\partial x} + \frac{\partial v c^i}{\partial y} + \frac{\partial w c^i}{\partial z} - \frac{\partial w_s c^i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v_{Tx}}{\sigma_{Tx}^i} \frac{\partial c^i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v_{Ty}}{\sigma_{Ty}^i} \frac{\partial c^i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{v_{Tz}}{\sigma_{Tz}^i} \frac{\partial c^i}{\partial z} \right) + S^i$$

dove:

- t è il tempo;
- x, y, z sono le coordinate cartesiane (*cartesian coordinates*);
- u, v, w sono le componenti delle velocità del flusso (*flow velocity components*);
- D_v è il coefficiente della diffusione verticale turbolenta;
- c^i è l' i -esima componente scalare, definita come concentrazione di massa;
- w_s^i è la velocità di caduta (*fall velocity*);
- σ_{Tx}^i numero di Schmidt (*turbulent Schmidt number*);
- v_{Tx} viscosità anisotropa (*anisotropic eddy viscosity*);
- S^i forzante (source term).

Il trasporto del sedimento coesivo è gestito da un solutore di trasporto per componenti passivi (modulo AD). La velocità di sedimentazione w_s è un processo sedimentologico e come tale viene descritta separatamente con un termine aggiuntivo ($\frac{\partial w_s c^i}{\partial z}$) usando una tecnica di separazione.

L'interazione/aggiornamento del fondale ed i termini di velocità di assestamento sono gestiti nel modulo MT. Gli effetti sedimentologici sulla densità e sulla viscosità del fluido (sospensioni concentrate in prossimità del letto) non sono considerati parte del modulo del processo dei fanghi. Sono invece forniti come sotto moduli separati poiché sono rilevanti solo per concentrazioni di sedimenti sospesi (SSC) più elevate.

La velocità di sedimentazione del sedimento sospeso può essere specificata come valore costante. La flocculazione è descritta come una relazione con la concentrazione dei sedimenti sospesi come indicato in *Burt*

(1986). La sedimentazione ostacolata può essere applicata se la concentrazione di sedimenti sospesi supera un certo livello. Per distinguere tra tre diversi regimi di liquidazione, vengono definiti due limiti, c_{floc} e $c_{hindered}$, che sono le concentrazioni dove inizia rispettivamente la flocculazione e la sedimentazione ostacolata.

Al di sotto di una certa concentrazione di sedimenti sospesi la flocculazione può essere trascurabile e può essere applicata una velocità di sedimentazione costante:

$$w_s = k \quad c < c_{floc}$$

dove w_s è la velocità di sedimentazione e k è la costante.

Dopo aver raggiunto il c_{floc} , il sedimento inizierà a flocculare. *Burt (1986)* ha trovato la seguente relazione:

$$w_s = k \left(\frac{c}{\rho_{sediment}} \right) \quad c_{floc} > c > c_{hindered}$$

in cui k è una costante, $\rho_{sediment}$ è la densità del sedimento e γ è un coefficiente chiamato indice di sedimentazione.

Dopo che viene raggiunta una concentrazione di sedimenti relativamente elevata ($c_{hindered}$), le colonne di sedimentazione dei fiocchi iniziano a interferire, riducendo così la velocità di sedimentazione. Vengono implementate le formulazioni fornite da *Richardson e Zaki (1954)* e *Winterwerp (1999)*.

DEPOSIZIONE

La deposizione è descritta come (Krone, 1962):

$$S_D = w_s c_b p_d$$

dove w_s è la velocità di sedimentazione del sedimento sospeso [$m s^{-1}$], c_b è la concentrazione del sedimento sospeso in prossimità del fondale e p_d è l'espressione della probabilità di deposizione:

$$p_d = 1 - \frac{\tau_b}{\tau_{cd}}$$

Nel modello tridimensionale, c_b è semplicemente uguale alla concentrazione dei sedimenti nella cella ad acqua appena sopra il letto di sedimenti.

Nel modello bidimensionale sono disponibili due diversi approcci per il calcolo di c_b . Se viene applicato il profilo *Rouse*, la concentrazione di sedimenti del letto vicino è correlata alla concentrazione media di sedimenti in profondità moltiplicando per un'altezza del baricentro costante:

$$c_b = \bar{c} \cdot (\text{centroid height})$$

Teeter (1986) ha correlato le concentrazioni vicino al fondale al numero di Peclet (Pe), ai flussi del letto e alle concentrazioni medie di sedimenti sospesi in profondità. In questo caso, la concentrazione di sedimenti vicino al letto è descritta come:

$$c_b = \bar{c} \left(1 + \left(\frac{Pe}{1.25 + 4.75 (p_d^{2.5})} \right) \right)$$

dove Pe è il numero di Peclet così individuato:

$$Pe = \frac{w_s h}{D_z}$$

in cui h è l'altezza della colonna d'acqua, D_z è la diffusività (eddy diffusivity), entrambe computate nel modello idrodinamico.

EROSIONE

L'erosione è espressa nei due seguenti modi:

- Hard Bed: per un letto consolidato il tasso di erosione può essere scritto come (Partheniades, 1965)

$$S_E = E \left(\frac{\tau_b}{\tau_{ce}} - 1 \right)^n \quad \tau_b > \tau_c$$

dove E è l'erodibilità [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$], n è la potenza di erosione, τ_b è lo sforzo di taglio del fondo [N m^{-2}] e τ_{ce} è lo sforzo di taglio critico per l'erosione [N m^{-2}]. S_E è il tasso di erosione [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

- Soft Bed: per un letto soffice, parzialmente consolidato, il tasso di erosione può essere scritto come (Parchure e Mehta, 1985):

$$S_E = E \left(e^{\alpha \sqrt{(\tau_b - \tau_c)}} \right) \quad \tau_b > \tau_c$$

Quando vengono eseguite simulazioni a lungo termine, il consolidamento dei sedimenti depositati può essere un processo importante. Se vengono utilizzati più strati del letto, è possibile applicare un tasso di transizione (T_i). Ciò farà sì che i sedimenti dagli strati superiori vengano trasferiti agli strati successivi inferiori.

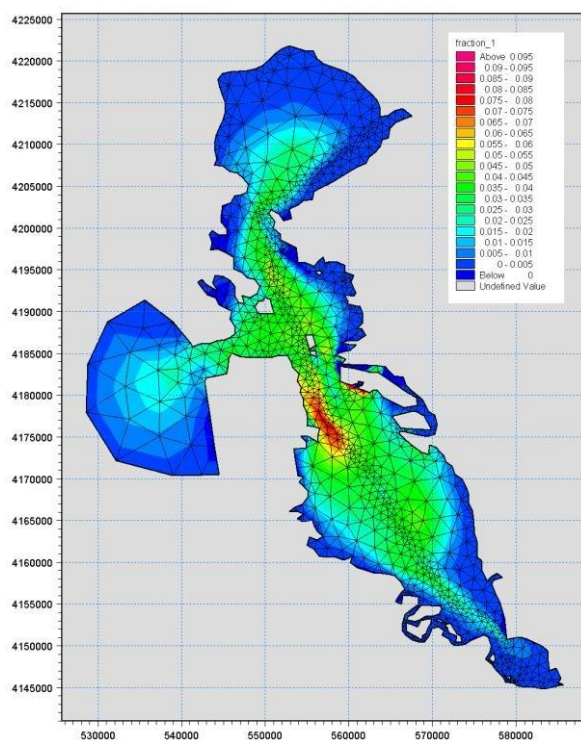


Figura A.8 – Il modulo MT è uno strumento per la gestione dei sedimenti in estuari complessi come la baia di San Francisco, California, USA

TECNICHE RISOLUTIVE

La soluzione delle equazioni del trasporto è strettamente legata alla soluzione delle condizioni idrodinamiche. La discretizzazione spaziale delle equazioni primitive viene eseguita utilizzando un metodo a volume finito centrato sulla cella. Il dominio spaziale è discretizzato mediante suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte. Nel piano orizzontale viene utilizzata una griglia non strutturata mentre nel dominio verticale nel modello 3D viene utilizzata una mesh strutturata. Nel modello 2D gli elementi possono essere triangoli o quadrilateri. Nel modello 3D gli elementi possono essere prismi o mattoni le cui facce orizzontali sono rispettivamente triangoli ed elementi quadrilateri. L'integrazione temporale viene eseguita utilizzando uno schema esplicito.

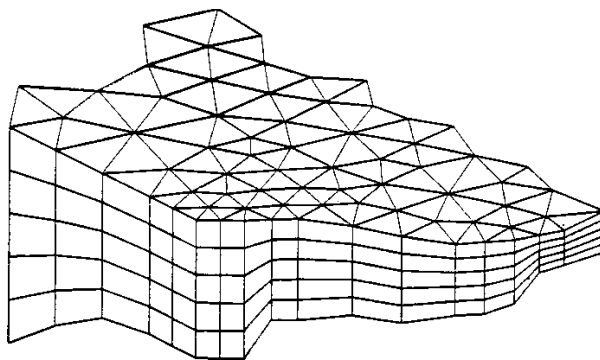


Figura A.9 – Principio della mesh tridimensionale