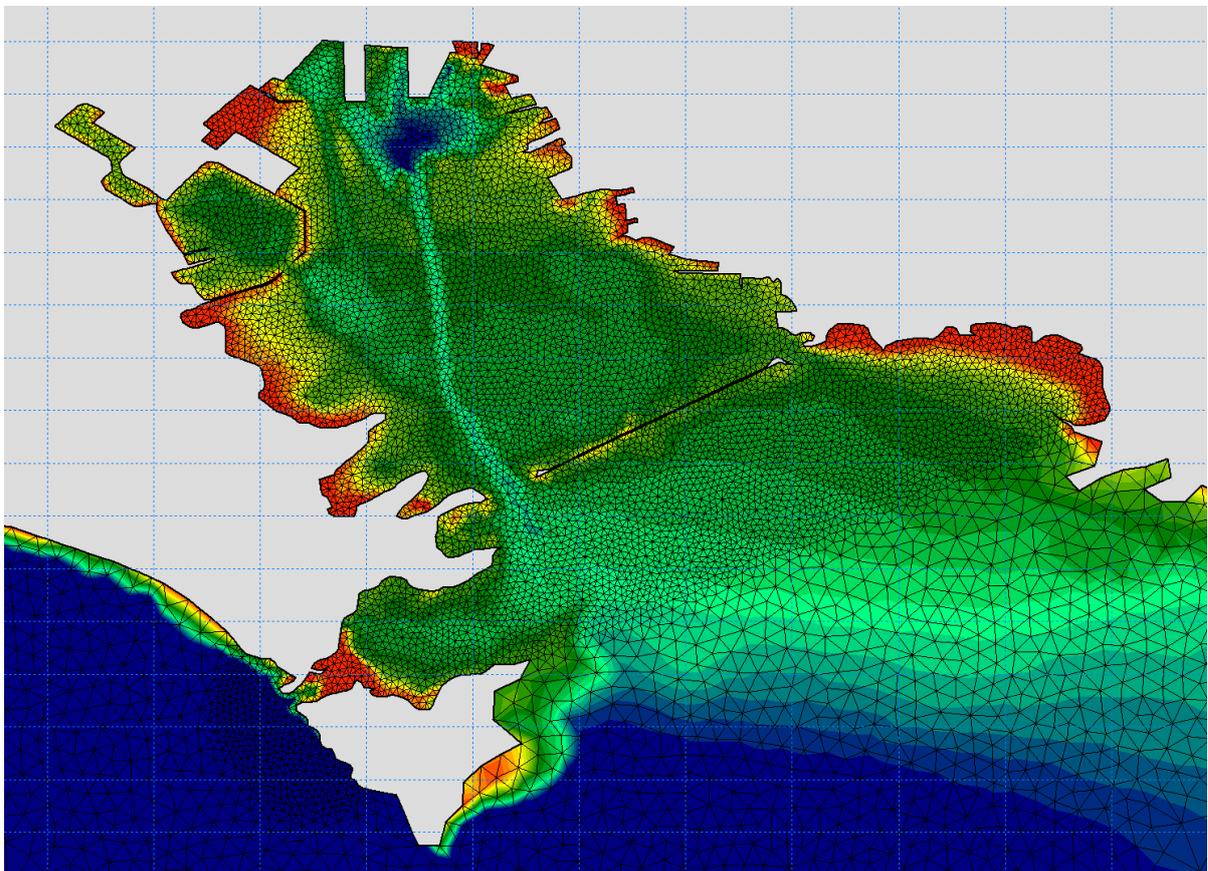


Autorità Portuale della Spezia

Attività di dragaggio dei fondali antistanti il molo
Garibaldi

Studio modellistico numerico della dispersione dei sedimenti
– nota preliminare



INDICE

1	Premessa	3
2	Il sistema modellistico previsionale del Mar Ligure.....	3
2.1	La catena modellistica meteo-idrologica in ARPAL – CFMI: i modelli MOLOCH e DRiFt	4
2.2	Il modello di circolazione del Mar Mediterraneo - MFS	6
2.3	Il modello idrodinamico del Mar Ligure – HD Mar Ligure	7
3	Il modello di circolazione – downscaling sulla rada di La Spezia	12
3.1	Mesh di calcolo e batimetria	12
3.2	Apporti locali	13
3.3	Risultati del modello di circolazione.....	14
4	Il modello di dispersione dei sedimenti	16
4.1	Risultati del modello di dispersione dei sedimenti	17
5	Riferimenti.....	18

1 Premessa

Nell'ambito delle attività di bonifica/dragaggio dell'area del porto della Spezia posta nelle immediate adiacenze del Molo Garibaldi, avviate a partire dal 09/12/2014 dall'Autorità Portuale della Spezia, sono state effettuate ad intervalli irregolari operazioni di escavo del fondale, al fine di garantire pescaggi adeguati alle navi che si prevedono ormeggiare in futuro in corrispondenza delle banchine del Molo Garibaldi stesso.

Le attività di escavo hanno subito un'accelerazione, con impiego di tre differenti draghe ("Annamaria", "Fabio Duò" e "Angelo B.") a partire dal 2 Febbraio 2015. L'area oggetto degli interventi di dragaggio è stata fin dal principio delle operazioni conterminata tramite "panne antitorbidità", l'impiego delle quali è stato previsto nel Progetto di Bonifica dell'area marina redatto da ISPRA (ex ICRAM) quale misura atta a contenere la torbidità entro la zona delle operazioni.

Le panne antitorbidità sono state impiegate prevalentemente in modalità "fissa" ma in alcune circostanze, sia nel dragaggio del fondale antistante il molo Garibaldi (a partire dal 2 Febbraio 2015), sia nel dragaggio di alcuni settori del Bacino di Evoluzione (attività antecedenti all'avvio delle operazioni intorno al Molo Garibaldi), si è reso necessario l'impiego di "panne mobili".

Dai dati del monitoraggio ambientale contestuale alle operazioni di movimentazione del sedimento, di cui è incaricata ARPAL, è emerso che il sistema di conterminazione a panne mobili si è rivelato molto meno efficace del sistema a panne fisse ed in alcune rilevazioni in prossimità delle draghe, in profondità, si sono riscontrati valori di torbidità molto elevati, mai evidenziati in precedenti dragaggi.

A seguito della segnalazione di una anomala moria di mitili nell'area interna alla diga di ponente, avvenuta tra il 6 ed il 7 Febbraio 2015, e ad una serie di dati elevati di torbidità in corrispondenza della sonda fissa ubicata proprio presso l'impianto di mitilicoltura lato Ponente, l'Autorità Portuale della Spezia ha commissionato a DHI uno studio modellistico numerico finalizzato a verificare l'estensione dell'area portuale potenzialmente interessata dal pennacchio "plume" di sedimenti dragati e di simulare l'andamento spazio-temporale della concentrazione di sedimento sospeso rilasciato nella colonna d'acqua durante le operazioni di dragaggio.

Il presente elaborato illustra in dettaglio il contenuto dello studio modellistico. La sezione 2, in particolare, è rivolta alla descrizione del sistema modellistico di circolazione del Mar Ligure, che DHI ha predisposto per conto di ARPAL e che è stato utilizzato nel presente studio. La sezione 3 illustra la predisposizione ed i risultati del modello di dettaglio della circolazione della rada di La Spezia, della temperatura e della salinità. Nella sezione 4 viene invece descritto il modello di dispersione di sedimenti, con le assunzioni adottate, i dati di input ed i risultati, sia in forma di mappe spazio-temporali sia in forma di serie temporali puntuali.

2 Il sistema modellistico previsionale del Mar Ligure

DHI, nell'ambito della pluriennale collaborazione con ARPAL (Agenzia Regionale di Protezione dell'Ambiente Ligure) ha sviluppato un sistema modellistico integrato che, a partire dalla previsione della componente idrodinamica (correnti, livelli superficiali) e fisica (temperatura, salinità) supporta operativamente ARPAL con una serie di applicativi finalizzati a:

- prevedere la dispersione, la destinazione ed i possibili spiaggiamenti di idrocarburi accidentalmente sversati nel Mar Ligure (in collaborazione con il progetto POR-FESR 2007-2013 "SEAGOSS");
- prevedere la dispersione e la destinazione del sedimento fine apportato dai corsi d'acqua in concomitanza con eventi di piena (in collaborazione con il progetto POR-FESR 2007-2013 "SEAGOSS");

- prevedere la dispersione e destinazione dei residui dell'impianto di acquacoltura posto al largo di Lavagna (in collaborazione con il progetto POR-FESR 2007-2014 "IMPAQUA");
- prevedere la qualità delle acque di balneazione, secondo la Direttiva 2006/7/CE, recepita in Italia con D.lgs n. 116/08, con particolare riferimento alla concentrazione di Escherichia coli ed Enterococchi fecali immessi in mare attraverso le foci fluviali e gli impianti di depurazione.

Il sistema costituisce oggi una solida base per predisporre ulteriori modelli locali, ad elevata risoluzione, dedicati alla simulazione di fenomenologie specifiche. In quest'ottica, la simulazione della dispersione dei sedimenti dragati all'interno del porto di La Spezia si colloca perfettamente in questa tipologia di applicazioni.

La base idrodinamica alla scala del Mar Ligure (sistema "ARPAL-Mar Ligure") è stata realizzata mediante l'applicazione di modellistica tridimensionale — modulo MIKE 3 HD FM di DHI. Il modulo idrodinamico costituisce il cuore di una complessa catena modellistica, che prevede l'impiego di:

- condizioni al contorno in termini di velocità di corrente, temperatura e salinità ricavate dal sistema di previsione del Mare Mediterraneo MFS (Mediterranean Forecast System), disponibili nell'ambito del programma europeo COPERNICUS, progetto MyOcean;
- forzanti atmosferiche in termini di venti superficiali, temperatura dell'aria, umidità relativa, copertura nuvolosa ricavate dal modello atmosferico ad area limitata (LAM) MOLOCH, operativo presso ARPAL CFMI – PC;
- apporti idrici dai principali bacini liguri ricavati dal modello afflussi deflussi DRiFt, anch'esso operativo presso ARPAL CFMI – PC.

Nel seguito è descritta in dettaglio la catena modellistica che, operativa con due run giornalieri (00 e 12 UTC) permette di simulare a risoluzioni assai elevate per la scala oceanografica (fino a 500 m) l'andamento delle correnti, della salinità, della temperatura e dei livelli superficiali nel Mar Ligure per le 48 ore successive.

2.1 La catena modellistica meteo-idrologica in ARPAL – CFMI: i modelli MOLOCH e DRiFt

La disponibilità delle previsioni delle principali variabili atmosferiche (pressione, venti superficiali, temperatura dell'aria, nuvolosità, umidità relativa, precipitazioni) e idrologiche (idrogrammi di piena dei principali corsi d'acqua) costituisce un requisito fondamentale per la progettazione di una catena modellistica operativa che preveda la simulazione delle dinamiche marine alla scala del Mar Ligure. Sia il modello atmosferico, sia quello idrologico afflussi-deflussi sono operativi presso ARPAL-CFMI (Centro Funzionale Meteo-Idrologico di Protezione Civile della Regione Liguria).

ARPAL-CFMI gestisce una catena operativa di modelli meteorologici ad alta risoluzione per la previsione numerica del tempo atmosferico. I modelli utilizzati sono stati sviluppati e vengono aggiornati dall'Istituto ISAC-CNR di Bologna, nell'ambito di un accordo di collaborazione scientifica pluriennale con ARPAL.

La catena modellistica comprende il modello idrostatico BOLAM e il modello non idrostatico MOLOCH, innestato in BOLAM.

Le condizioni iniziali e al contorno del BOLAM sono fornite dalle quattro analisi giornaliere (00, 06, 12, 18 UTC) e previsioni del modello globale dell'ECMWF (UE) e consentono di avere run

aggiornati ogni 6 ore. Il modello BOLAM viene innestato a partire direttamente dai campi su livelli ibridi dell'ECMWF.

Il dominio di integrazione del BOLAM copre gran parte dell'Europa con una risoluzione di 0.1 gradi, per un totale di 362 x 322 punti griglia su 45 livelli. Il dominio del MOLOCH interessa invece il Nord Italia ad una risoluzione di 0.02 gradi con 206 x 202 punti griglia su 50 livelli verticali.

Le integrazioni numeriche sono eseguite su un cluster di PC in ambiente GNU/Linux CentOS: si tratta di 5 host dotati di processore Intel 17-980X 4.20GHz, per un totale di 30 core.

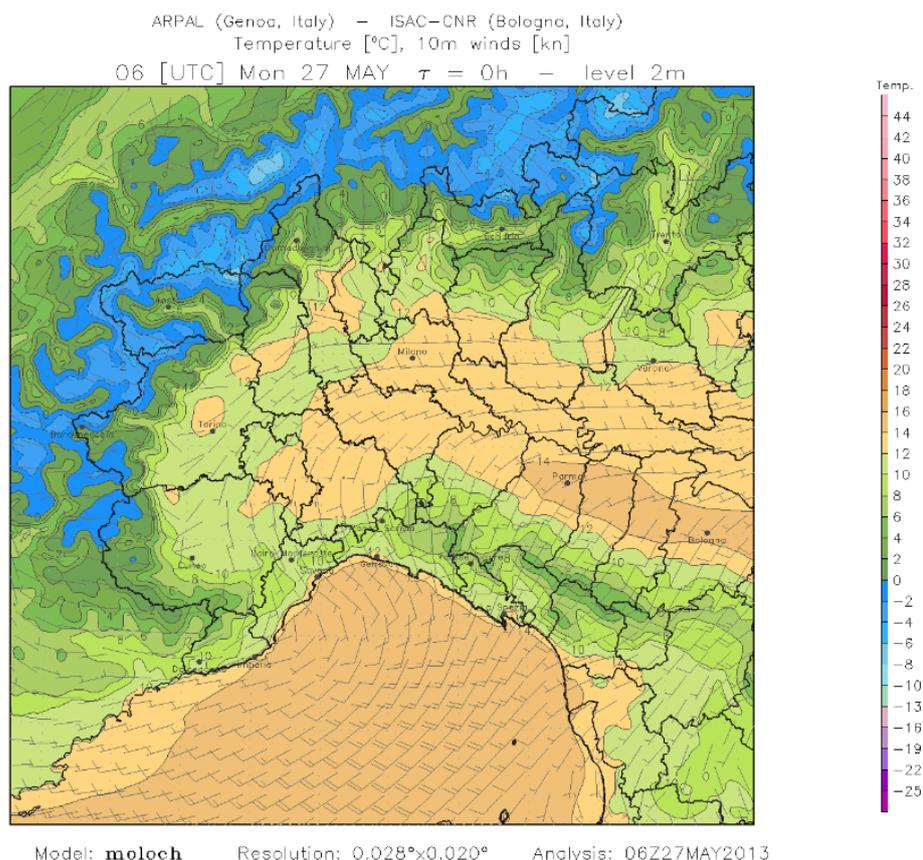


Figura 2-1 Esempio di mappa previsionale del modello MOLOCH

Il modello afflussi-deflussi DRIFt, sviluppato dal CIMA, è un modello idrologico lineare, semi-distribuito, parziale e in grado di effettuare simulazioni a scala d'evento. Si propone come strumento di semplice utilizzo per la simulazione e la previsione degli idrogrammi di piena, in grado di interpretare le caratteristiche ritenute di maggiore importanza per gli ambienti naturali quali quello dell'arco alpino-appenninico, caratterizzati da particolari strutture drenanti di dimensioni spaziali ridotte, la cui parte montana risulta preponderante nei processi di formazione della piena rispetto a quella con caratteristiche spiccatamente vallive.

Il modello si basa sulla teoria che la risposta idrologica di un sistema idrografico ad eventi intensi di precipitazione, è dominata dalla morfologia del bacino e consente di trascurare i complessi effetti di dispersione idrodinamica che influenzano la propagazione dell'acqua fino alla foce.

E' definito semi-distribuito in quanto accetta e gestisce l'informazione in ingresso spazialmente distribuita sul territorio e fornisce il risultato concentrato in una sezione specifica. Il bacino in analisi viene grigliato con un reticolo georeferenziato a maglia quadrata e risulta, quindi, suddiviso in un certo numero di celle aventi dimensioni corrispondenti a quelle del modello digitale di elevazione del terreno.

La sua versione base ha cinque parametri: due di carattere morfologico per l'individuazione della rete di drenaggio e la distinzione tra canali e versanti, due di carattere cinematico, velocità in canale e sul versante, ed un parametro fisico rappresentante lo stato di umidità del terreno che identifica la situazione iniziale.

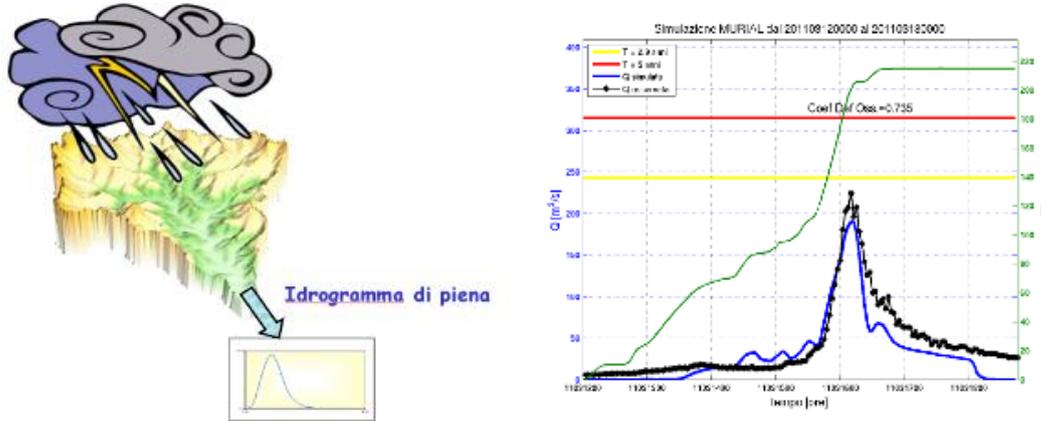


Figura 2-2 Schema concettuale del modello idrologico afflussi deflussi DRiFt (a sinistra) e rappresentazione di un idrogramma di piena simulato (linea blu) ed osservato (linea nera)

Il modello MOLOCH ed il modello DRiFt sono i modelli di riferimento rispettivamente atmosferico e idrologico afflussi-deflussi per la catena modellistica previsionale delle correnti del Mar Ligure, che DHI ha predisposto per conto di ARPAL e che costituisce la base “idrodinamica” dalla quale il modello di circolazione della rada della Spezia (sezione3) attingerà le condizioni al contorno.

2.2 Il modello di circolazione del Mar Mediterraneo - MFS

Oltre alla disponibilità delle previsioni delle principali variabili atmosferiche e idrologiche, un ulteriore requisito per la progettazione di una catena modellistica operativa che preveda la simulazione delle dinamiche marine è costituito dalla disponibilità delle previsioni delle principali variabili idrodinamiche e fisiche che regolano la circolazione alla scala del Mar Mediterraneo, anche a risoluzione non elevata (livelli superficiali, correnti alle diverse profondità, temperatura e salinità). La disponibilità di tali variabili è fondamentale al fine di limitare alla zona di interesse il dominio di modellazione, utilizzando di volta in volta le condizioni al contorno ricavate da un modello “padre”, anche a bassa risoluzione, e focalizzando la modellazione sull’area di interesse, con risoluzione adeguata ai processi che si vogliono simulare, senza la necessità di dover riprodurre ex-novo la circolazione dell’intero bacino del Mar Mediterraneo.

Il modello di circolazione del Mar Mediterraneo preso a riferimento per la catena modellistica del Mar Ligure è costituito dal modello MFS (Mediterranean Forecast System), ora disponibile nell’ambito del programma Copernicus, precedentemente conosciuto come GMES (Global Monitoring for Environment and Security), supportato e coordinato dalla Commissione Europea.

Il sistema è stato implementato in tutto il bacino del Mediterraneo come accoppiamento di un modello idrodinamico e di un modello di moto ondoso, con una risoluzione orizzontale pari a $1/16^\circ \times 1/16^\circ$ (circa $6 \div 7$ km) e 72 livelli verticali non omogeneamente distribuiti. La figura seguente mostra il dominio del modello ed un esempio di distribuzione della temperatura superficiale del modello MFS.

Il Mediterranean Forecasting System MFS (Tonani et al 2014, Dombrowsky et al. 2009) fornisce sin dall’anno 2000 previsioni a breve termine per il Mar Mediterraneo.

Il codice numerico utilizzato nel modello idrodinamico è il Nucleous for European Modelling of the Ocean (NEMO), mentre la componente di moto ondoso è calcolata attraverso l’utilizzo del codice WaveWatch-III. Le soluzioni del modello sono corrette attraverso un algoritmo di assimilazione

dati (basato sullo schema 3DVAR) di profili verticali osservati di temperatura e salinità, nonché da osservazioni da satellite di anomalie di livello superficiale.

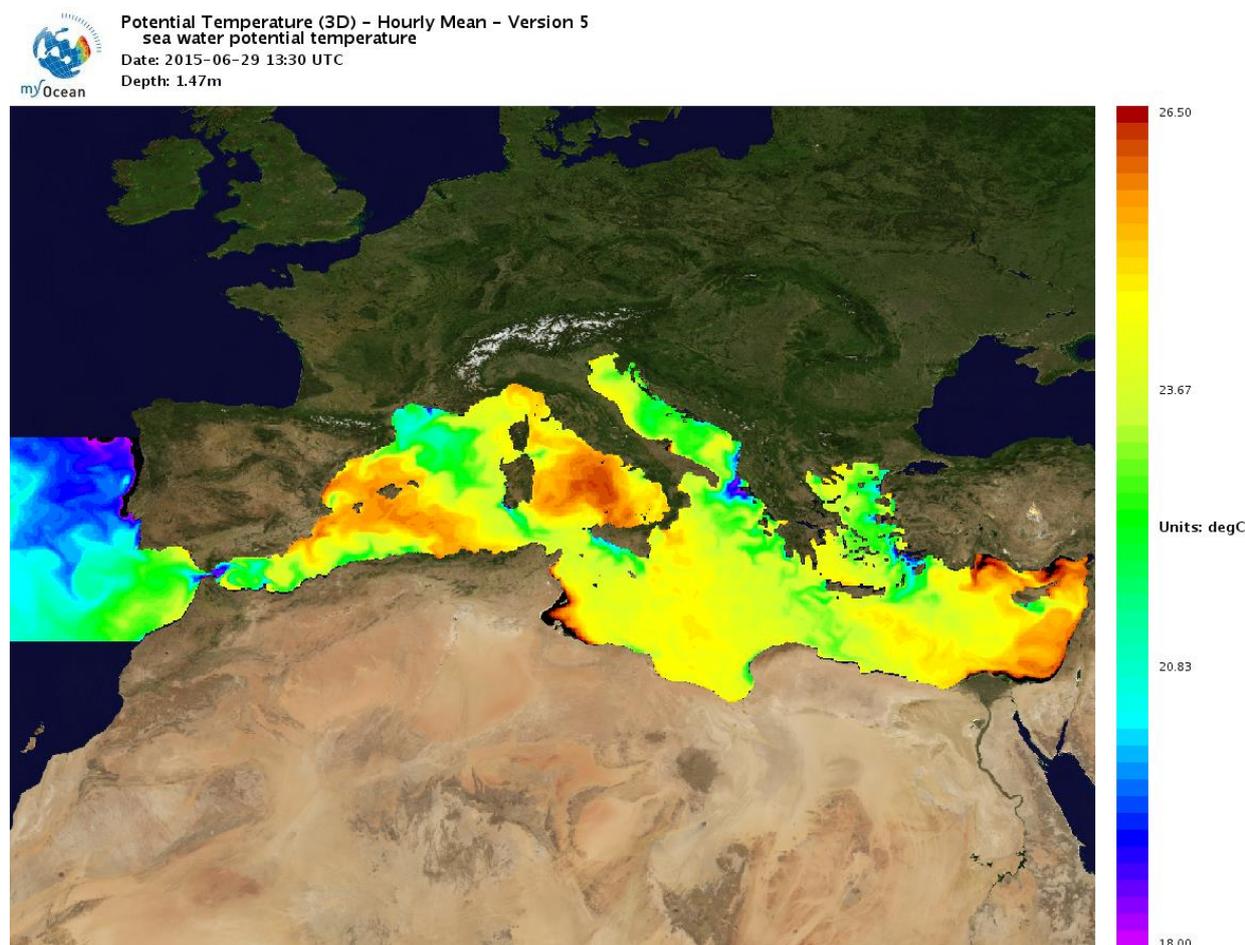


Figura 2-3 Dominio di calcolo ed esempio di distribuzione della temperatura superficiale - modello MFS – Mediterranean Forecast System. Immagine disponibile in marine.copernicus.eu

2.3 Il modello idrodinamico del Mar Ligure – HD Mar Ligure

Il modello previsionale di circolazione nel Mar Ligure (“HD Mar Ligure”), implementato presso ARPAL-CFMI ad opera di DHI, è realizzato mediante l’utilizzo del codice di calcolo MIKE 3 di DHI, descritto in dettaglio nell’Allegato A al presente documento. Tale codice simula le variazioni di livello e corrente in risposta alle differenti tipologie di forzanti considerate e può essere utilizzato da solo o insieme ad altri moduli che, pur finalizzati alla simulazione di altri fenomeni (es. trasporto di particolato) richiedono la risoluzione contestuale degli aspetti idrodinamici. Il codice consente di tenere in considerazione tutti i fenomeni principali che hanno influenza sull’idrodinamica degli ambienti oceanici e/o costieri: gradienti di densità (temperatura/salinità), effetto delle maree, effetto del vento, scambio termico con l’atmosfera, forza di Coriolis, moto ondoso ed apporti fluviali.

MIKE 3 si basa sulla soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes mediate sotto le ipotesi di Boussinesq ed in condizioni di pressione idrostatica. Il modello risolve le equazioni di continuità, quantità di moto, temperatura, salinità e densità. La densità non dipende dalla pressione ma dai soli gradienti di temperatura e salinità.

Relativamente alle tecniche di risoluzione numerica, MIKE 3 utilizza un metodo ai volumi finiti per la discretizzazione delle equazioni di flusso e trasporto con valori centrati sul singolo elemento. Il

dominio spaziale è discretizzato tramite la suddivisione del continuo in elementi/celle non sovrapposte. Nelle dimensioni orizzontali è utilizzata una maglia non strutturata costituita da triangoli, mentre per la dimensione verticale si può utilizzare sia l'approccio di discretizzazione della colonna d'acqua secondo i cosiddetti *layers* sigma (*layers* di spessore variabile in funzione della profondità locale) o l'approccio combinato sigma-zeta (si prevede l'utilizzo di *layers* orizzontali di spessore non dipendente dalla profondità locale).

Il codice di calcolo MIKE 3 risulta pertanto adeguato per il *downscaling* di modelli oceanografici ad ampia scala (quale è il modello MFS – Mediterranean Forecast Model) fino alla scala costiera.

Mesh di calcolo e batimetria

Il modello è implementato su un dominio di calcolo sufficientemente esteso da comprendere le principali dinamiche del Mar Ligure. In particolare, il dominio di calcolo comprende tutto l'arco costiero composto da: parte della Toscana, l'intera Liguria e parte della costa francese (indicativamente da Livorno a Nizza). Il modello risulta caratterizzato da quattro contorni aperti che partendo da Ovest verso Est congiungono la Costa Azzurra con la Corsica, quest'ultima con l'Isola di Capraia nell'Arcipelago Toscano e Capraia alla costa toscana.

Per quanto riguarda la caratterizzazione batimetrica dell'area di studio, si è fatto riferimento al database CM-93 di C-MAP, un database globale di cartografia nautica digitale realizzato e costantemente aggiornato dalla Società norvegese C-MAP.

La *mesh* di calcolo è caratterizzata da una risoluzione, intesa come lunghezza media dei lati dei triangoli, variabile: minima al largo (circa 4 Km) e massima sotto costa (circa 500 m). In Figura 2-4 e Figura 2-5 sono riportate rispettivamente la batimetria e la *mesh* di calcolo insieme con la localizzazione dei quattro contorni aperti del modello.

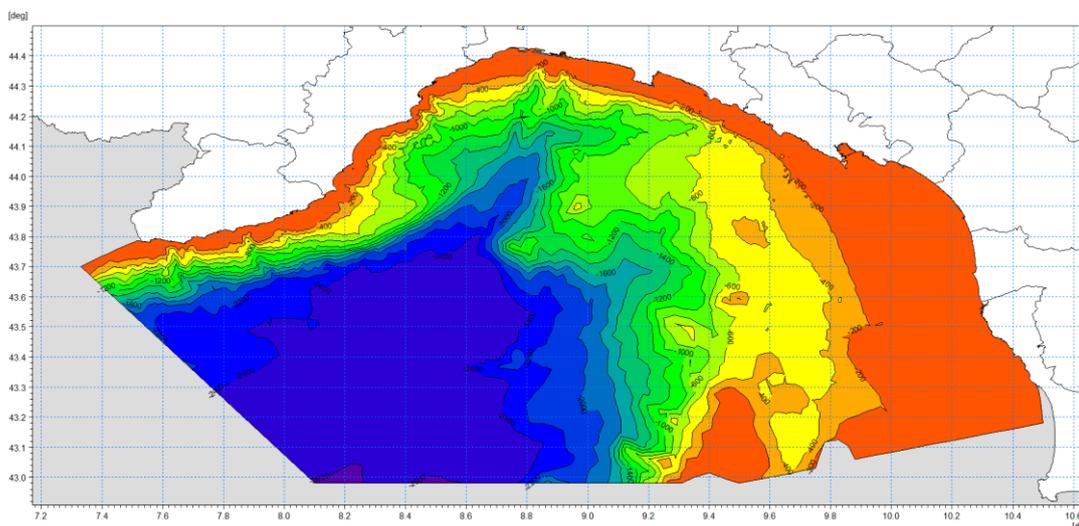


Figura 2-4 Batimetria di calcolo del modello HD - Mar Ligure

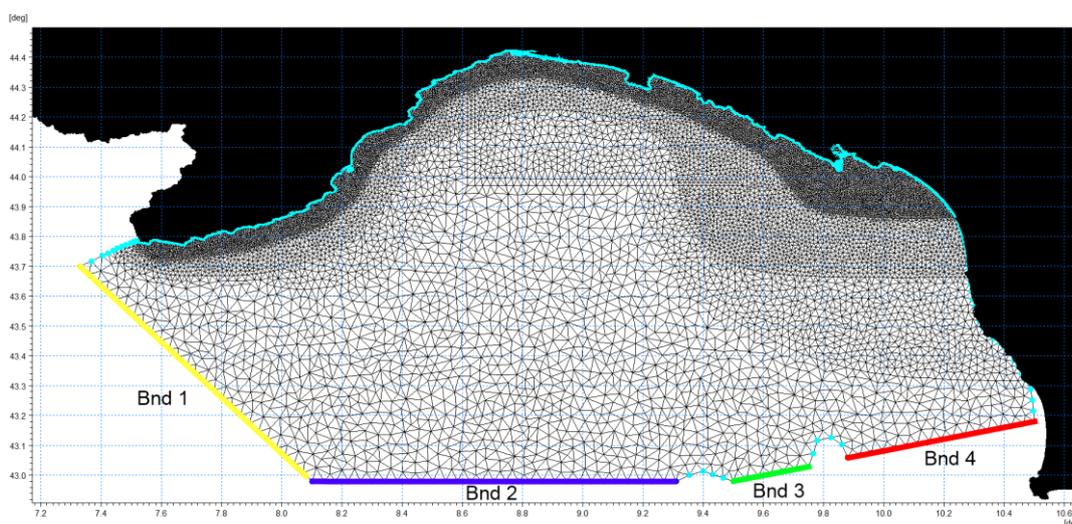


Figura 2-5 Mesh di calcolo con indicazione dei contorni aperti del dominio– Modello HD Mar Ligure

La dimensione verticale è discretizzata nel modello mediante 10 livelli a spessore variabile (*sigma-layers*) e 30 livelli a spessore costante (*z-layers*) per un totale di 40 livelli. Lo spessore minimo dei *layers* superficiali è dell'ordine del metro.

Nelle due figure seguenti è illustrata la discretizzazione del modello nella dimensione verticale per una generica sezione. In particolare, in Figura 2-6 sono rappresentati i 40 *layers* sigma-zeta mentre, in Figura 2-7 è riportato un dettaglio dei 10 *layers* sigma che arrivano fino alla profondità di -40 m.

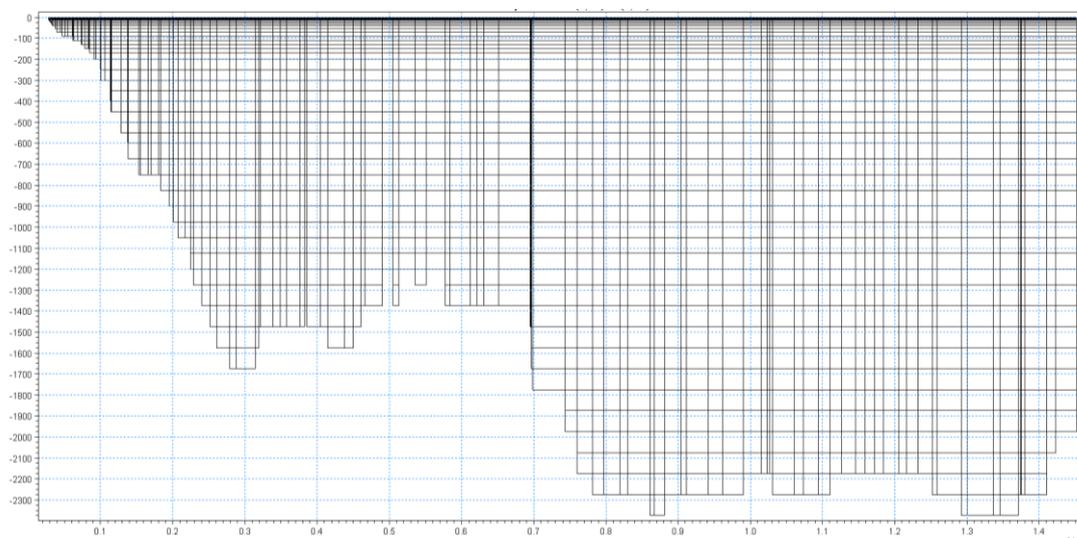


Figura 2-6 Esempio di discretizzazione verticale – Modello HD Mar Ligure

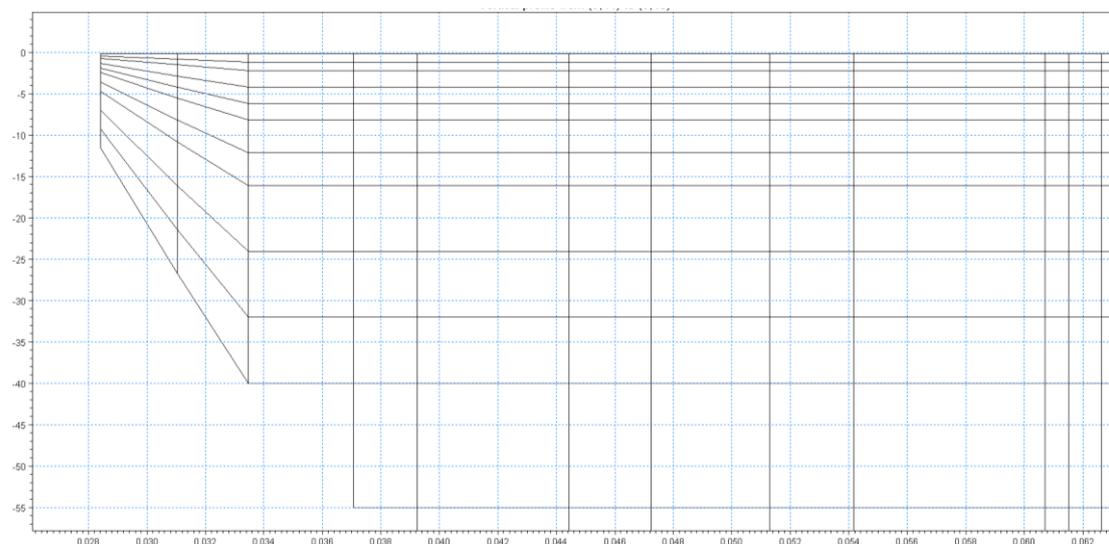


Figura 2-7 Esempio di discretizzazione verticale – Modello HD Mar Ligure

Condizioni al contorno

In corrispondenza dei quattro contorni aperti del dominio di calcolo è stato necessario definire specifiche condizioni al contorno. Queste sono determinate a partire dal modello MFS (descritto in precedenza) e specificate, in termini idrodinamici (livelli superficiali, velocità di corrente) ed in termini di temperatura e salinità.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno idrodinamiche, sono state impostate secondo una *Flather Boundary*, ovvero una condizione diffusamente utilizzata in ambito oceanografico, in particolare per applicazioni di *downscaling* [5, 12], molto efficace per limitare le instabilità in presenza di flussi stratificati.

Forzante meteo

Come illustrato nella sezione 2.1, la catena modellistica del Mar Ligure è basata sulla forzante atmosferica del modello MOLOCH.

Condizioni iniziali

In modalità operativa il modello viene inizializzato sulla base dei risultati idrodinamici (livelli e velocità di corrente), di temperatura e salinità, ottenuti dal *run* precedente. Questo tipo di operazione consente di limitare al massimo il periodo di *spin-up* iniziale del modello, ovvero il periodo richiesto dal modello stesso per correggere le inconsistenze tra la condizione iniziale (spesso ricavata da modelli diversi, a risoluzioni spazio temporali non omogenee), le condizioni al contorno e le forzanti. Durante il periodo di *spin-up* i risultati del modello non sono attendibili e vanno scartati, pertanto la minimizzazione di tale finestra è fondamentale per l'ottimizzazione di una catena operativa previsionale.

Portate fluviali

Come illustrato nella sezione 2.1, la catena modellistica del Mar Ligure è basata sulla forzante idrologica del modello DRiFt. Pur non essendo presenti grossi bacini scolanti, soprattutto in concomitanza di eventi di precipitazione intensa, il contributo dell'apporto di acqua dolce determina una significativa variazione locale di salinità, non trascurabile, in corrispondenza delle foci fluviali.

I corsi d'acqua inclusi nel modello sono i seguenti:

- Magra
- Entella
- Centa
- Nervia
- Roia

La seguente Figura 2-8 evidenzia la localizzazione dei quattro input idrologici al modello HD Mar Ligure.

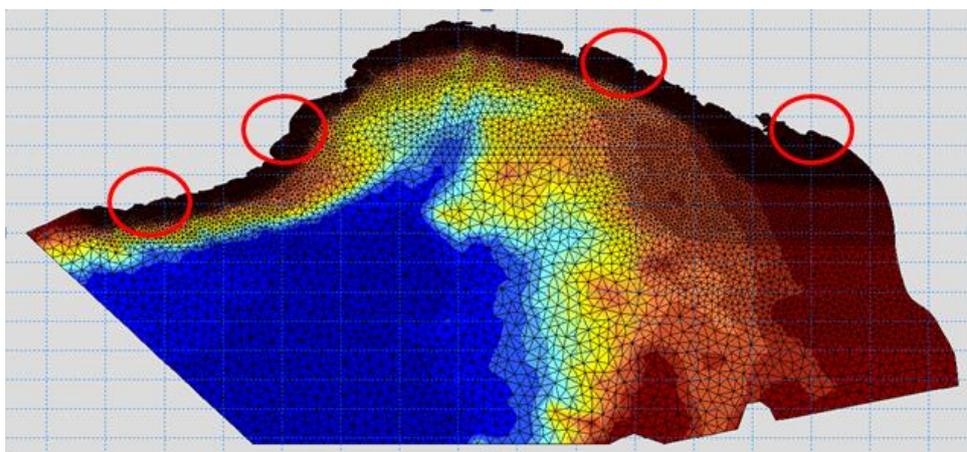


Figura 2-8 Localizzazione dei tratti di costa che ospitano le foci dei cinque corsi d'acqua sopra indicati, per i quali vengono introdotti gli input idrologici al modello HD Mar Ligure

Risultati

Le simulazioni effettuate, mediante l'utilizzo di MIKE 3, consentono di ottenere gli andamenti delle principali grandezze idrodinamiche (livelli e velocità di corrente), unitamente alle distribuzioni di temperatura e salinità in ciascun punto del dominio di calcolo e a qualsiasi profondità.

Un esempio di risultati del modello HD Mar Ligure è presentato in Figura 2-9 in termini di velocità di corrente superficiale. Dalle immagini si può osservare il classico andamento della Corrente Ligure-Provenzale, caratterizzata da velocità di corrente massime anche superiori a 0.5 m/s nella zona al largo della Riviera Ligure di Ponente.

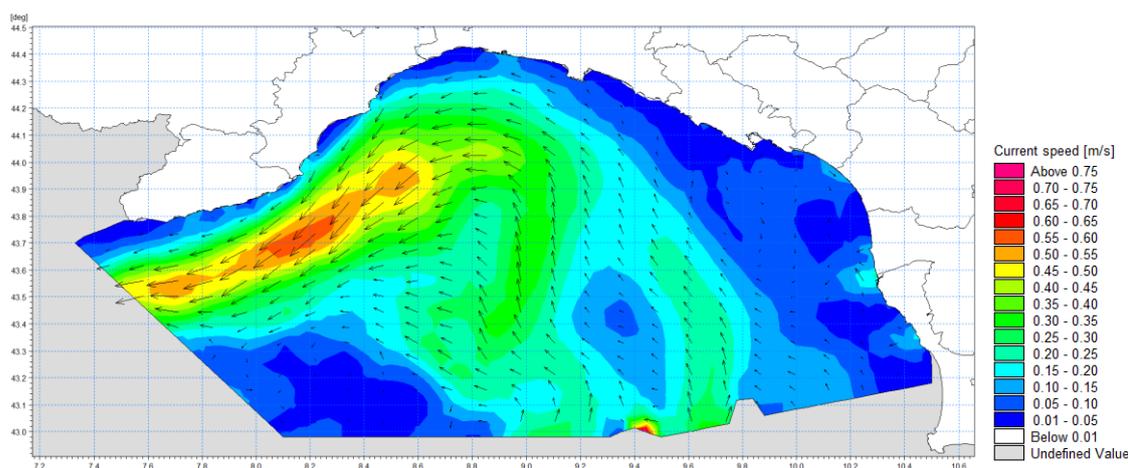


Figura 2-9 Esempio di risultati del modello HD - Mar Ligure in termini di distribuzione velocità e direzione di corrente superficiale

3 Il modello di circolazione – downscaling sulla rada di La Spezia

Il modello di circolazione alla scala del Mar Ligure descritto diffusamente nella sezione 2 è stato quindi utilizzato come base per la predisposizione di un secondo modello, caratterizzato da una risoluzione spaziale più spinta ed in grado di risolvere le complesse dinamiche interne alla rada della Spezia.

3.1 Mesh di calcolo e batimetria

Al fine di predisporre un modello tridimensionale adeguato a simulare la circolazione interna alla rada della Spezia è necessario prevedere una risoluzione spaziale più fine rispetto a quella del modello “Mar Ligure” descritto in precedenza. In particolare, la risoluzione dei 500 metri circa, massimo livello di dettaglio del modello “Mar Ligure” non si presenta adeguata a rappresentare correttamente né i flussi attraverso le due imboccature della rada della Spezia (Ponente e Levante, rispettivamente caratterizzate da larghezze pari a circa 400 metri e 200 metri) né il complesso andamento della linea di costa interna alla rada, con presenza di infrastrutture portuali, cantieri e strette insenature.

La risoluzione adottata per il modello di dettaglio è variabile dai circa 500 metri al di fuori della rada fino a circa 50 metri in tutta l’area interna alla rada, alle imboccature ed al tratto di mare che divide l’isola Palmaria dalla terraferma. In Figura 3-1 e Figura 3-2 sono riportate rispettivamente la mesh di calcolo del modello locale (con indicazione della profondità del fondale) ed un dettaglio della stessa in corrispondenza della rada.

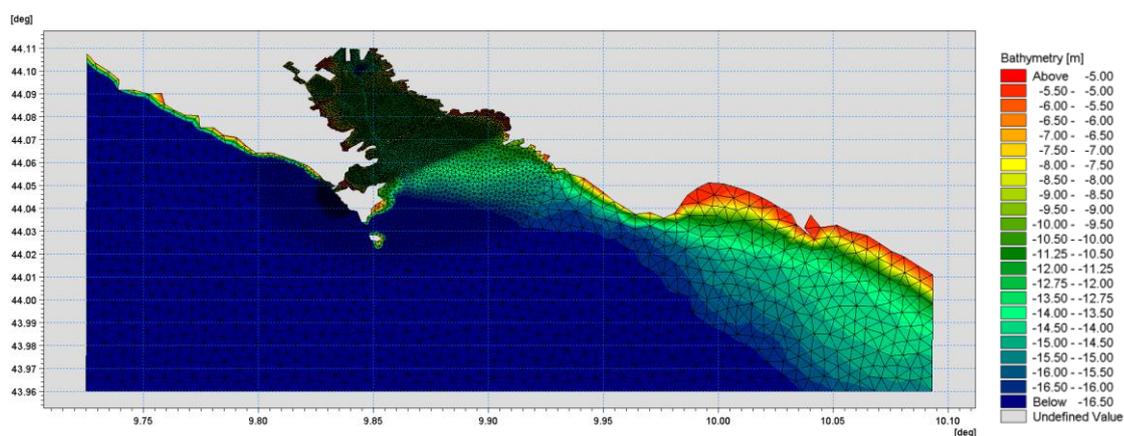


Figura 3-1 Mesh di calcolo del modello locale con indicazione delle profondità del fondale

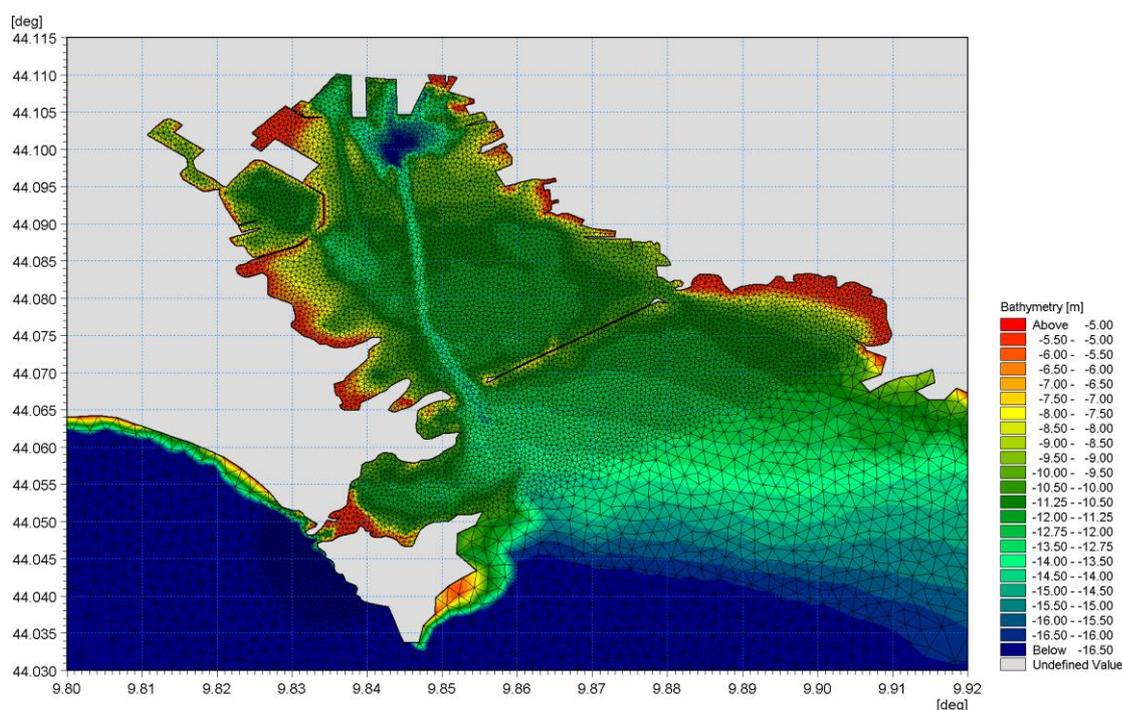


Figura 3-2 Mesh di calcolo del modello locale con indicazione delle profondità del fondale – dettaglio in corrispondenza della rada della Spezia

3.2 Apporti locali

Due sono gli apporti locali di portata liquida considerati nel modello locale:

- apporto del fiume Magra;
- apporto dello scarico della centrale termoelettrica ENEL “Eugenio Montale”.

In Figura 3-3 è riportato l’andamento delle portate liquide del fiume Magra ricostruito intersecando le uscite del modello DRiFt nel periodo 31/01/2015 – 10/03/2015 (dati basati in larga misura sulla pioggia osservata ai pluviometri del bacino).

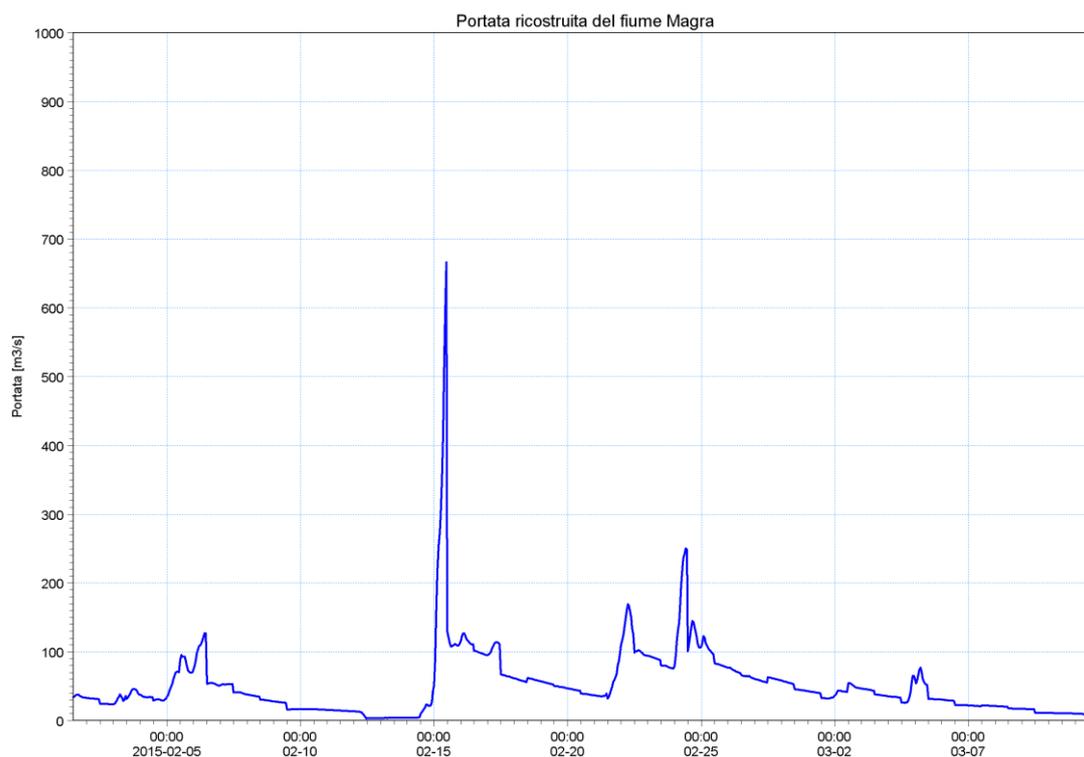


Figura 3-3 Portata liquida del fiume Magra nel periodo 31/01/2015 – 10/03/2015 ricostruita attraverso il modello DRiFt

Per l’apporto dello scarico della centrale ENEL “Eugenio Montale”, in assenza di dati relativi al periodo simulato, si è fatto riferimento alla “Dichiarazione Ambientale – Anno 2014” sull’Impianto termoelettrico di La Spezia redatta da ENEL.

In tale documento sono riportati sia i volumi totali delle acque di raffreddamento restituite a mare negli anni compresi tra il 2010 ed il 2013, sia le temperature medie mensili misurate allo scarico negli anni compresi tra il 2009 ed il 2013.

L’analisi di tali dati ha permesso di stimare in circa 15 m³/s la portata media allo scarico ed in circa 5°C l’eccesso di temperatura allo scarico rispetto alle condizioni presenti in corrispondenza dell’opera di presa.

3.3 Risultati del modello di circolazione

Nelle immagini a seguire si riportano alcuni risultati del modello di circolazione in termini di distribuzione delle velocità e direzioni della corrente sull’intero dominio di calcolo (Figura 3-4) e internamente alla rada (Figura 3-5 e Figura 3-6). Le immagini fanno riferimento allo strato superficiale.

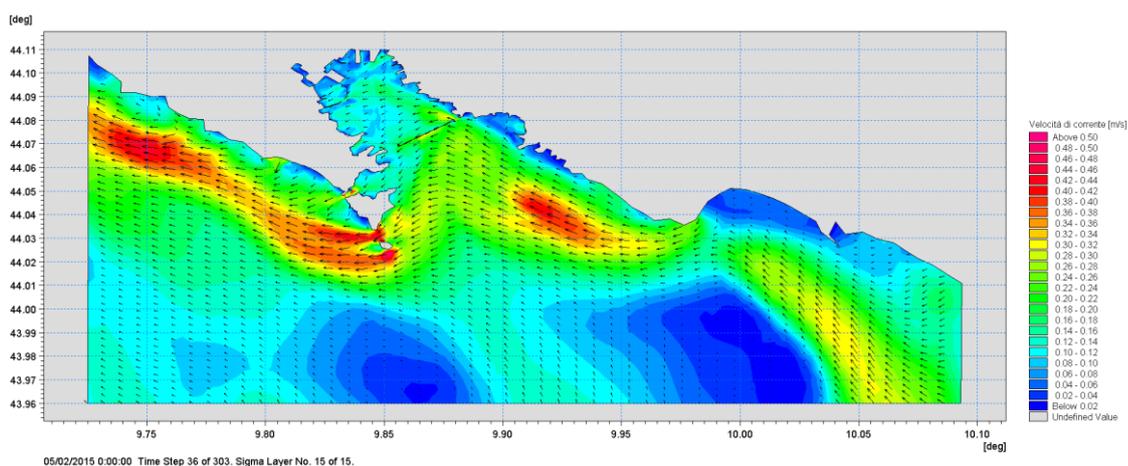


Figura 3-4 Esempio di distribuzione delle velocità e direzioni della corrente nel dominio di calcolo (strato superficiale)

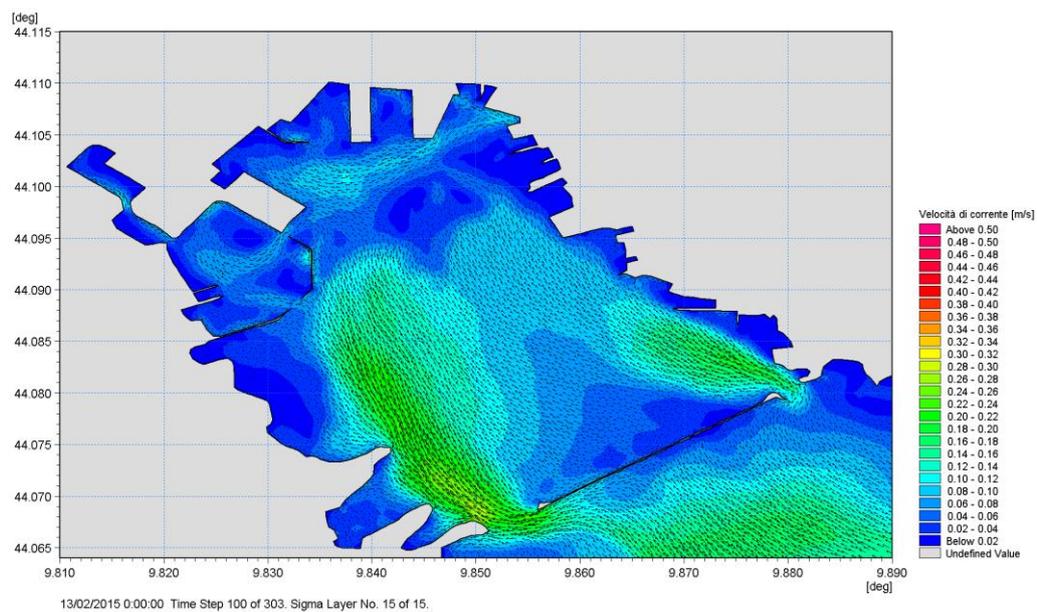


Figura 3-5 Esempio di distribuzione delle velocità e direzioni della corrente nel dominio di calcolo (strato superficiale) – dettaglio interno alla rada - 1

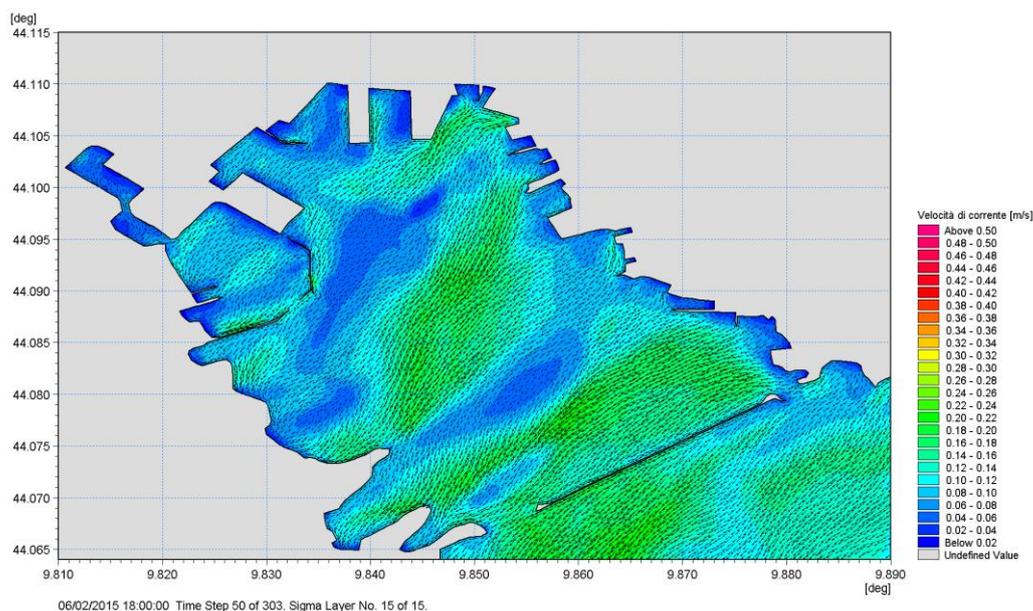


Figura 3-6 Esempio di distribuzione delle velocità e direzioni della corrente nel dominio di calcolo (strato superficiale) – dettaglio interno alla rada - 2

4 Il modello di dispersione dei sedimenti

Per la rappresentazione della dispersione del sedimento dovuta alle operazioni di dragaggio è stato utilizzato il modulo MIKE 3 MT (Mud Transport), dinamicamente accoppiato al modulo idrodinamico MIKE 3 HD descritto in precedenza

La dispersione del sedimento è stata simulata tenendo conto delle seguenti assunzioni:

- sulla base del “quaderno delle operazioni”, messo a disposizione dall’Autorità Portuale, è stato possibile ricostruire con buona approssimazione sia l’effettiva durata delle operazioni di scavo con riferimento alle tre draghe “Annamaria”, “Angelo B.” e “Fabio Duò”, sia i volumi di escavo;
- basandosi su indicazioni diffusamente reperibili in letteratura, è stato stimato (cautelativamente) che il 5% del volume di sedimento dragato venga “perso” e rilasciato nella colonna d’acqua;
- cautelativamente, non è stata considerata la presenza di panne antitorbidità;
- il rilascio nella colonna d’acqua è stato ipotizzato uniformemente distribuito sull’intera colonna e localizzato nel settore di scavo in cui la draga risultava operare nella specifica fase delle operazioni (informazione anch’essa fornita da Autorità Portuale)
- nel modello è stata simulata la dispersione di tre componenti caratterizzate da una differente granulometria e conseguente velocità di sedimentazione. Le frazioni modellate sono state ricavate dalla caratterizzazione dei sedimenti prodotta da ISPRA. La seconda frazione pelitica (la più fine, caratterizzata da un diametro medio di appena 8 micron), è stata introdotta cautelativamente per garantire una maggiore propensione alla dispersione del sedimento su lunghe distanze. In Tabella 1 sono riportate le frazioni granulometriche considerate nello studio, la composizione % ed il diametro di riferimento per ciascuna frazione.

Tabella 1 Frazioni granulometriche considerate, composizione % e diametro medio di riferimento per ciascuna frazione

N° frazione	Tipo	%	D50 (micron)
1	pelite 1	57	16
2	pelite 2	10	8
3	sabbia	33	250

4.1 Risultati del modello di dispersione dei sedimenti

I risultati del modello sono forniti sotto forma di mappe tempovarianti relative alla distribuzione spaziale della concentrazione di sedimento sospeso e della massa sedimentata. In corrispondenza della sonda fissa ubicata proprio presso l'impianto di mitilicoltura lato Ponente sono inoltre fornite le serie temporali di concentrazione di sedimento sospeso a differenti profondità.

In Figura 4-1 è riportata la serie temporale di concentrazione modellata di sedimento sospeso (SSC) a diverse profondità in corrispondenza della sonda fissa ubicata presso l'impianto di mitilicoltura lato Ponente. Come si può osservare dal grafico, in alcune condizioni in cui la corrente è diretta dall'interno della rada verso la diga foranea, si può riscontrare una modesta concentrazione di sedimento sospeso in corrispondenza della sonda. I valori di concentrazione, tuttavia, risultano sempre ben al di sotto della soglia di 2 mg/l, considerata comunemente come soglia di tracciabilità della torbidità in mare.

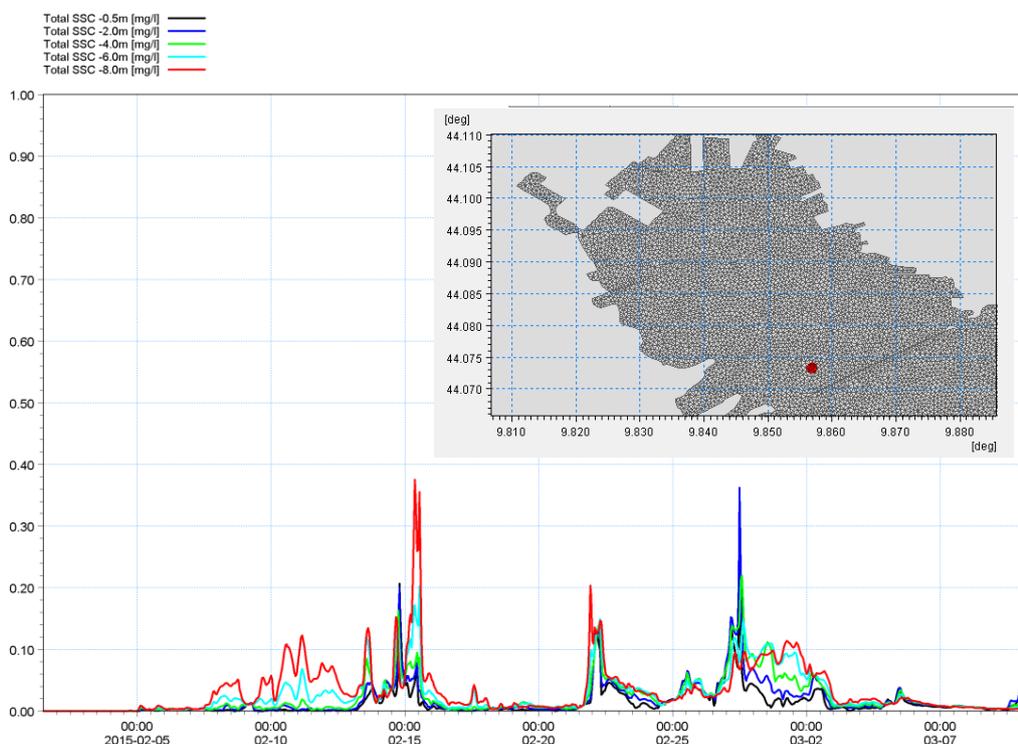


Figura 4-1 Serie temporale di concentrazione modellata di sedimento sospeso (SSC) a diverse profondità in corrispondenza della sonda fissa ubicata presso l'impianto di mitilicoltura lato Ponente

In Figura 4-2 è riportata la distribuzione della massa di sedimento accumulata a seguito delle operazioni di dragaggio in tutto il periodo considerato (31 gennaio – 10 marzo), dalla quale si evince che gli accumuli di sedimento dragato dai fondali antistanti il molo Ravano si concentrano prevalentemente nei pressi della zona delle operazioni. Spostandosi verso il centro della rada, la massa accumulata complessivamente nel periodo preso in esame si riduce a pochi grammi/m².

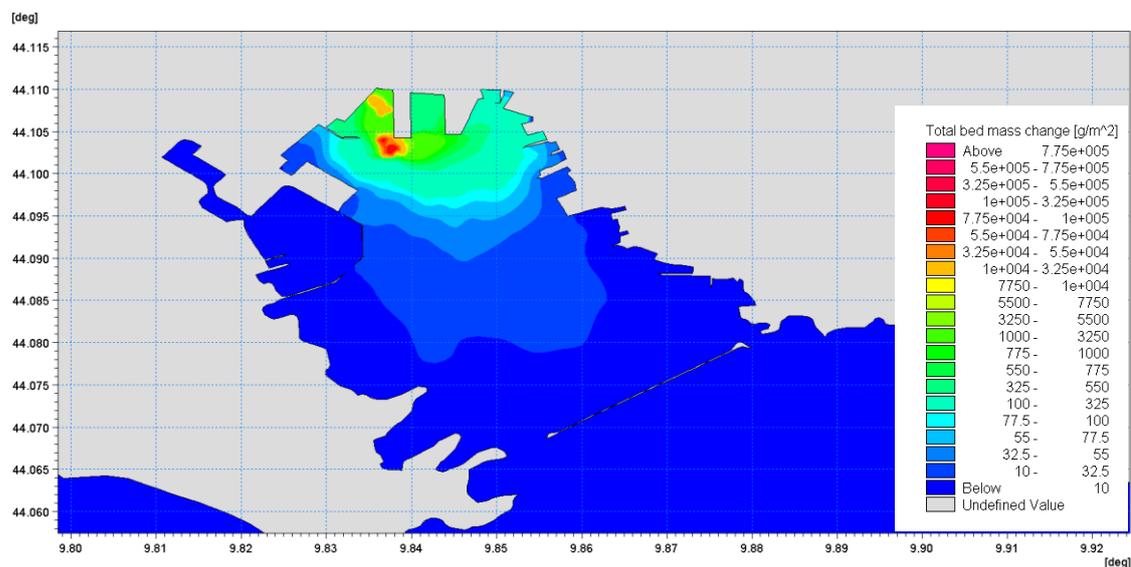


Figura 4-2 Distribuzione della massa di sedimento accumulata a seguito delle operazioni di dragaggio in tutto il periodo considerato (31 gennaio – 10 marzo). Per una più chiara lettura del risultato, la scala dei colori non è lineare

5 Riferimenti

Dobricic, S. and N. Pinardi, 2008. An oceanographic three-dimensional variational data assimilation scheme. *Ocean Modelling*, 22, 3-4, 89-105.

Dobricic, S., 2005. New mean dynamic topography of the mediterranean calculated from assimilation system diagnostic. *GRL*, 32.

Dobricic, S., N. Pinardi, M. Adani, M. Tonani, C. Fratianni, A. Bonazzi, and V. Fernandez, 2007. Daily oceanographic analyses by Mediterranean Forecasting System at the basin scale. *Ocean Sci.*, 3, 149-157.

Dombrowsky E., L. Bertino, G.B. Brassington, E.P. Chassignet, F. Davidson, H.E. Hurlburt, M. Kamachi, T. Lee, M.J. Martin, S. Meu and M. Tonani 2009: GODAE Systems in operation, *Oceanography*, Volume 22-3, 83,95.

Maraldi C., J. Chanut, B. Levier, N. Ayoub, P. De Mey, G. Reffray, F. Lyard, S. Cailleau, M. Drévilion, E. A. Fanjul, M. G. Sotillo, P. Marsaleix, and the Mercator Research and Development Team, 2013: NEMO on the shelf: assessment of the Iberia–Biscay–Ireland configuration. *Ocean Sci.*, 9, 745–771.

NEMO ocean engine, Note du Pole de modelisation, Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France, No 27 ISSN No 1288-1619. Oddo P., M. Adani N. Pinardi, C. Fratianni, M. Tonani, D. Pettenuzzo, 2009. A Nested Atlantic-Mediterranean Sea General Circulation Model for Operational Forecasting. *Ocean Sci. Discuss.*, 6, 1093-1127.

Oddo P., A. Bonaduce, N. Pinardi and A. Guarnieri, 2014. Sensitivity of the Mediterranean sea level to atmospheric pressure and free surface elevation numerical formulation in NEMO. *Geosci.*

Model Dev., 7, 3001–3015, 2014. www.geosci-model-dev.net/7/3001/2014/ doi:10.5194/gmd-7-3001-2014.

Pinardi, N., I. Allen, P. De Mey, G. Korres, A. Lascaratos, P.Y. Le Traon, C. Maillard, G. Manzella and C. Tziavos, 2003. The Mediterranean ocean Forecasting System: first phase of implementation (1998-2001). *Ann. Geophys.*, 21, 1, 3-20. Rouillet G. and G. Madec, 2000: Salt conservation, free surface, and varying levels: a new formulation for ocean general circulation models. *J.G.R.*, 105, C10, 23,927-23,942.

Tolman H., User Manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14, 2009. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Technical Note 276, 194 pp + Appendices.

Tonani M., A. Teruzzi, G. Korres, N. Pinardi, A. Crise, M. Adani, P. Oddo, S. Dobricic, C. Fratianni, M. Drudi, S. Salon, A. Grandi, G. Girardi, V. Lyubartsev and S. Marino, 2014. The Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre, a component of the MyOcean system. Proceedings of the Sixth International Conference on EuroGOOS 4-6 October 2011, Sopot, Poland. Edited by H. Dahlin, N.C. Fleming and S. E. Petersson. First published 2014. Eurogoos Publication no. 30. ISBN 978-91-974828-9-9.

Tonani, M., N. Pinardi, S. Dobricic, I. Pujol, and C. Fratianni, 2008. A high-resolution free-surface model of the Mediterranean Sea. *Ocean Sci.*, 4, 1-14.