

Progetto

SINAPSI

**asSistenza alla Navigazione per l'Accesso ai Porti in
Sicurezza**



ATTIVITA' T2.1: IMPLEMENTAZIONE MODELLISTICA NUMERICA

PRODOTTO T2.1.3: REPORT DI VALIDAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

Partner responsabile: UNIGE

Partner contributori: CNR-ISMAR, UTLN, LaMMA

SOMMARIO

<i>Descrizione del prodotto</i>	<i>i</i>
1. INTRODUZIONE	1
2. MODELLAZIONE DEL PORTO DI GENOVA	1
3. MODELLAZIONE DELLA BAIJA DI TOLONE	10
4. MODELLAZIONE DEL GOLFO DI LA SPEZIA	12
5. Bibliografia	18

Descrizione del prodotto

Il presente report presenta la validazione dei modelli numerici impiegati per la caratterizzazione del clima marino nelle aree di studio del progetto SINAPSI. In particolar modo, sono presentati dei casi studio per la validazione dei modelli idrodinamici nel Porto di Genova, nella baia di Tolone e nel Golfo di La Spezia.

Si precisa come nel presente prodotto siano mostrati esclusivamente i risultati dei modelli sopracitati, confrontandoli con dati misurati assunti a riferimento per la verifica della bontà delle modellazioni. Per una descrizione dettagliata dei modelli, ovvero le equazioni su cui sono basati e gli schemi numerici adottati per la risoluzione delle stesse, si rimanda al report T2.1.1. – “DEFINIZIONE MODELLI NUMERICI PER LA DINAMICA MARINA DEI PORTI”.

1. INTRODUZIONE

L'idrodinamica di baie ed aree portuali è fortemente condizionata non solo dalle forzanti ambientali meteo-marine che vi insistono (quali clima ondoso, venti, escursioni di marea etc.), ma anche dalla particolare geometria di questi, che può alterare i regimi correntometrici e ondometrici in modo significativo.

In virtù di quanto sopra, l'analisi dei processi fisici all'interno di geometrie composite difficilmente può avvalersi di formule parametriche semplificate, né le complesse equazioni che regolano l'idrodinamica costiera possono essere risolte per via analitica. Al contrario, è prassi comune avvalersi di modelli numerici in grado di simulare in dettaglio i processi litoranei sia da un punto di vista euleriano (dinamica della concentrazione) che da un punto di vista lagrangiano (dispersione di massa e oggetti).

Attualmente, sono numerosi i modelli numerici disponibili, così come riportato nel prodotto T2.1.1. – "DEFINIZIONE MODELLI NUMERICI PER LA DINAMICA MARINA DEI PORTI". La scelta del modello più adatto al caso in esame dipende dal tipo di processo che si intende esaminare, e deve necessariamente essere condotta con le dovute cautele. Tramite il presente report, sono in particolar modo valutate le prestazioni di due diversi modelli numerici, utilizzati per il calcolo dell'idrodinamica all'interno di tre diverse aree di studio parte del progetto SINAPSI: il porto di Genova, la baia di Tolone, il golfo di La Spezia.

2. MODELLAZIONE DEL PORTO DI GENOVA

Il DICCA dell'Università di Genova ha sviluppato un modello numerico tridimensionale della suite Delft3D, sviluppata e gestita da Deltares (ex Delft Hydraulics; <https://www.deltares.nl/en/>), la quale consiste in una varietà di moduli che si interfacciano dinamicamente per lo scambio di dati e risultati, ognuno dei quali si occupa di un particolare dominio di interesse come flussi, trasporto di sedimenti, onde, qualità dell'acqua, sviluppi morfologici ed ecologia.

Tra i moduli disponibili incorporati nel pacchetto, quello adottato nel presente lavoro è Delft3D-FLOW, un sistema integrato di modellazione di flusso e trasporto che consente un approccio multidisciplinare e calcoli 3D per le regioni costiere, fluviali ed estuariali, utilizzato per lo studio delle acque portuali di Genova e per le zone ad esse attigue. Questo modello è uno degli strumenti più robusti ed affidabili per lo studio della dinamica delle correnti, trasporto di sedimenti, variazioni di livello, onde e qualità

dell'acqua, sia da un punto di vista applicativo che da un punto di vista di sviluppo e ricerca.

Il dominio di calcolo sviluppato per l'area di Genova è mostrato in Figura 1; si costituisce di due diverse maglie computazionali innestate l'una sull'altra, a risoluzione variabile così come riportato in Tabella 1.

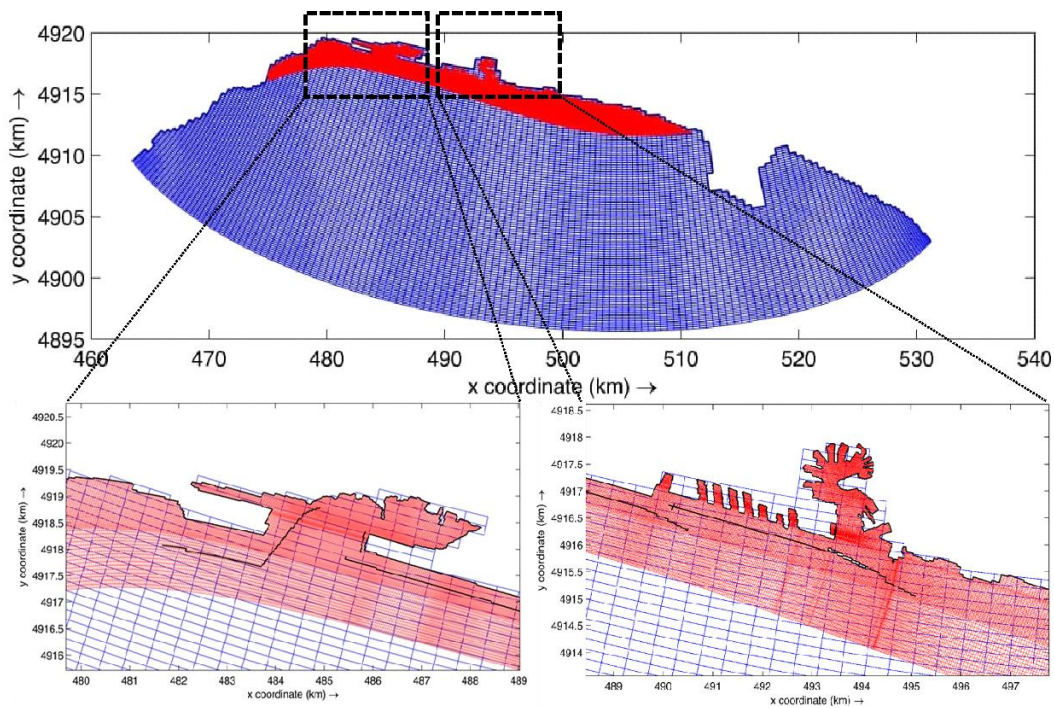


Figura 1. Maglie computazionali per il porto di Genova.

Delft3D-FLOW utilizza un metodo delle differenze finite "ciclico" (C-FDM) per risolvere entrambe le equazioni di quantità di moto e continuità orizzontali sui nodi della griglia computazionale (Figura 1).

Tabella 1. Proprietà della maglia computazionale – dominio di Genova.

Proprietà griglia (inner/outer)	11418/60413
Numero celle direzione M	138/1028
Numero celle direzione N	116/185
Rapporto celle direzione M	1.1/1.1
Rapporto celle direzione N	1.1/1.1
Estensione bordo direzione M	705 m~175 m / 5 m~96 m
Estensione bordo direzione N	79 m~197 m / 5 m~117 m
Risoluzione griglia (parte interna porto)	112 m~356 m / 8 m~87 m
ortogonalità	0~0.02 / 0~0.01

Il modello è stato forzato con gli scenari meteo-marini introdotti nel prodotto T2.1.2, al fine di calcolare i pattern idrodinamici maggiormente significativi per l'area in esame. Oltre ai dati ondametrici, estratti a partire dal servizio hindcast del DICCA, il modello è stato forzato altresì con le escursioni mareali riprodotte in loco tramite l'utilizzo del software TPXO (<https://www.tpxo.net/global/tpxo9-atlas>), propagate dal largo verso riva unitamente alle onde di mare (più corte), al fine di derivare le serie di livello all'interno dell'area portuale in corrispondenza degli scenari poc'anzi menzionati.

Tali misure sono state poste a confronto con i dati forniti da ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), che dispone di una rete di mareografi (quello sito in Genova è mostrato in Figura 2). Per il periodo compreso tra il 1998 (anno di creazione della Rete Mareografica Nazionale) e il 2009 ISPRA fornisce i dati di velocità e direzione del vento, temperatura dell'aria e dell'acqua, pressione atmosferica e livello per 26 stazioni di misura aventi tutte medesimo riferimento altimetrico, sebbene la disponibilità di questi dati sia leggermente variabile da stazione a stazione e la raccolta abbia inizio in anni diversi e presenti periodi mancanti. I dati di livello, disponibili in generale con misurazioni ogni 10 minuti, sono stati osservati attraverso un sensore idrometrico ad ultrasuoni presente in ogni stazione di misura della RMN dal 1998 ed in uso ancora oggi. Per avere informazioni antecedenti al 1998 (fino a circa il 1970, ma solamente per alcune stazioni di misura), l'archivio ISPRA comprende anche dati raccolti dalle stazioni esistenti precedentemente alla creazione della RMN e gestite da servizi idrografici locali. Sono tuttavia disponibili solamente misurazioni orarie per il parametro relativo al livello del mare e la raccolta di questi dati ha inizio in anni diversi a seconda delle stazioni e presenta periodi mancanti.

PRODOTTO N. T2.1.3

Il risultato del confronto tra i dati simulati (con Delft3D) ed osservati (dati ISPRA) per alcuni degli scenari meteo-marini di cui al prodotto T2.1.2 sono mostrati nelle figure da Figura 3 a Figura 12.



Figura 2. Stazione di misura del livello del mare per la località di Genova.

I risultati mostrano confronti coerenti sia per quanto riguarda la fase che l'ampiezza delle oscillazioni di livello per gli scenari 5, 10, 11, 12, mentre per i restanti scenari sono correttamente riprodotte le oscillazioni in fase a discapito di una ridotta attendibilità per quanto attiene alle ampiezze delle oscillazioni. Tali divergenze sono verosimilmente da imputarsi al contributo di innalzamenti di livello medio mare indotti da gradienti di pressione e/o *storm surge*, piuttosto che da fenomeni più locali.

Una sintesi dei risultati è mostrata nel diagramma di Taylor (Figura 13).

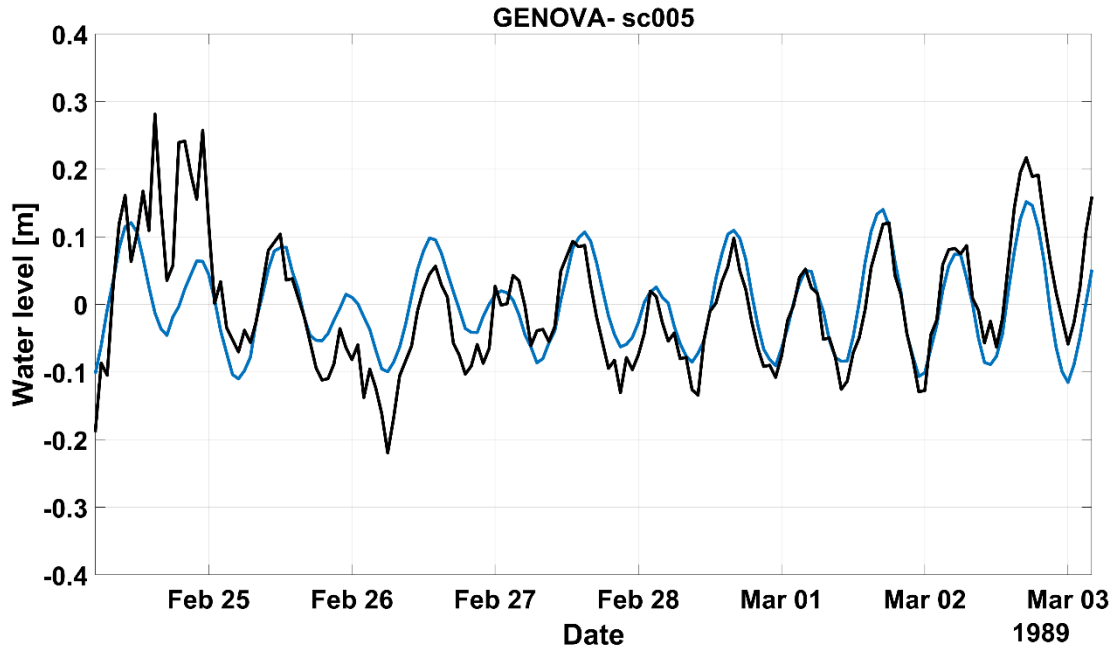


Figura 3. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 5 in Genova.

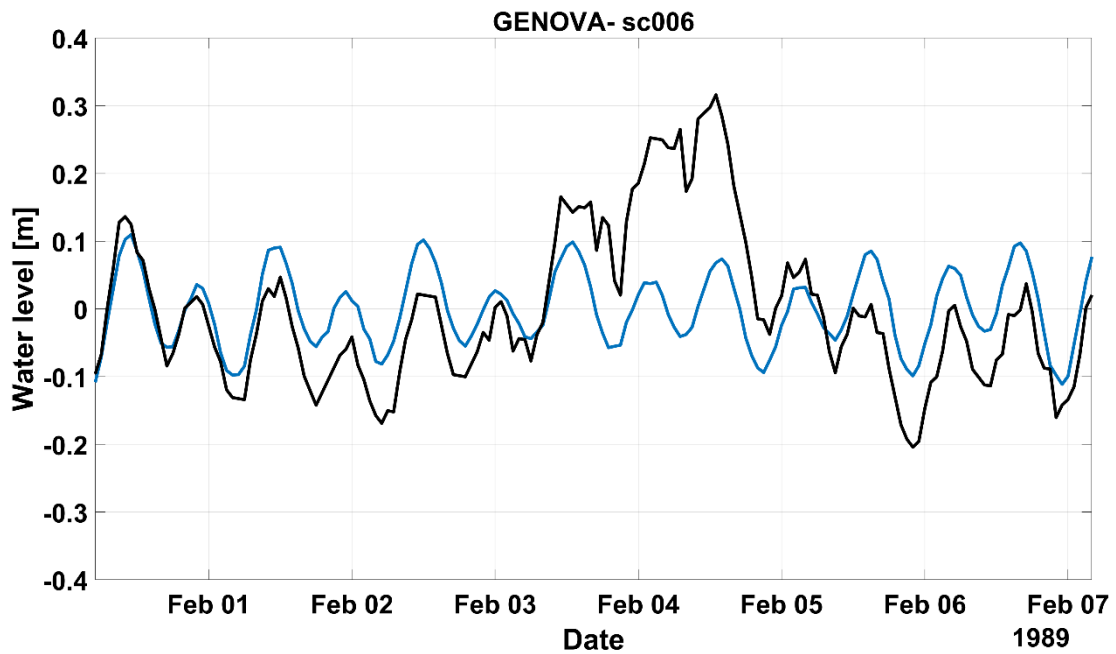


Figura 4. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 6 in Genova.

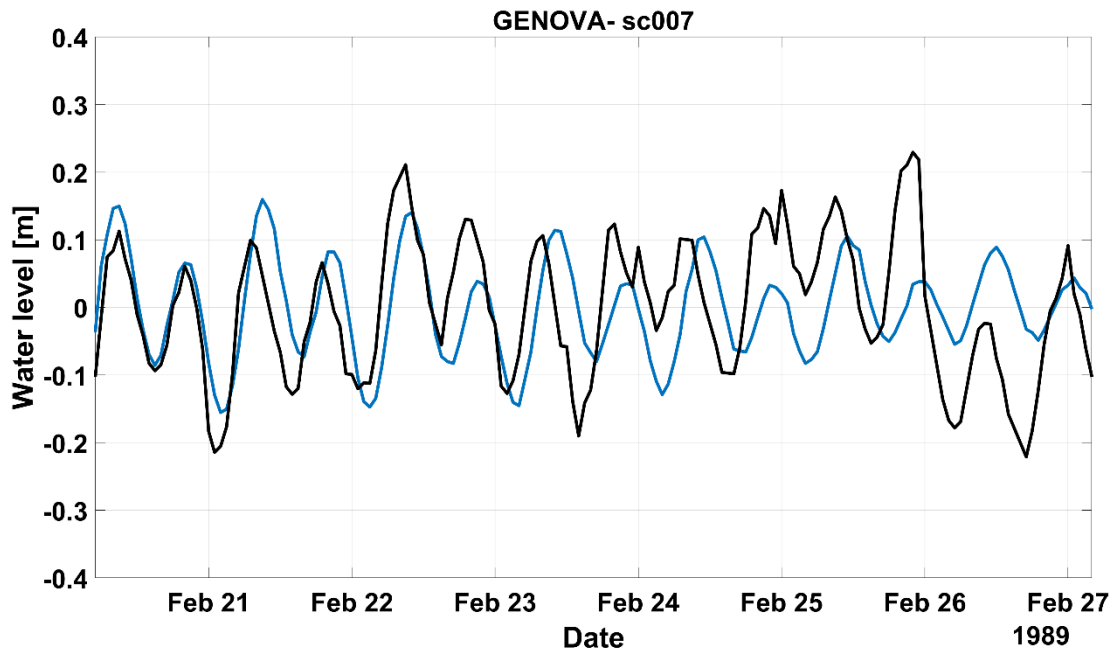


Figura 5. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 7 in Genova.

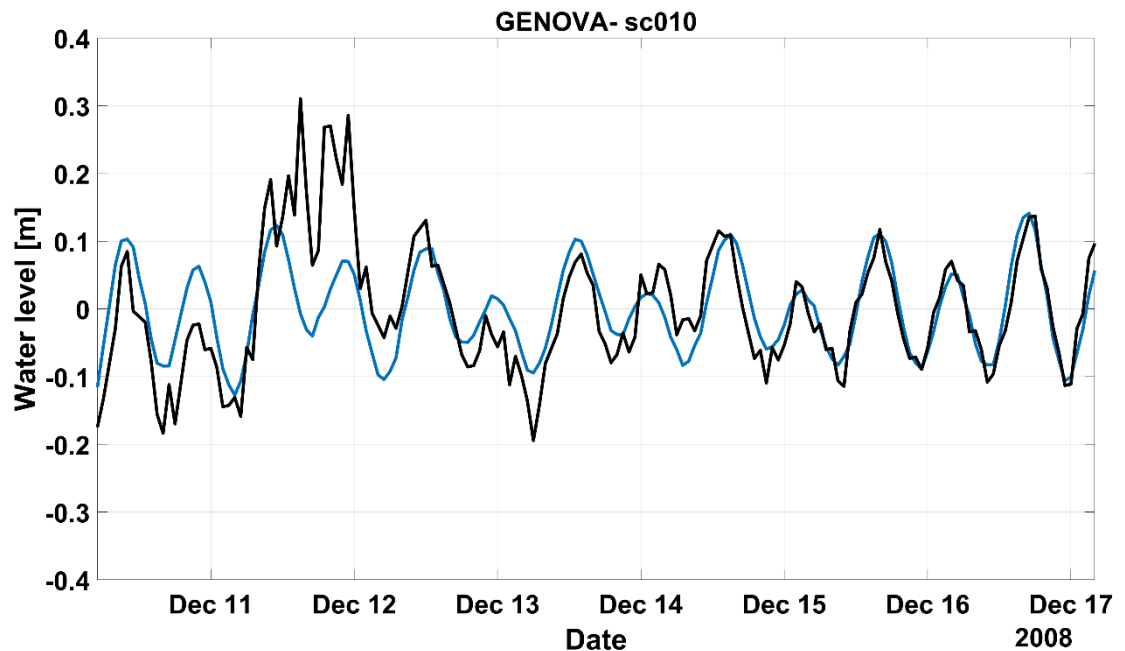


Figura 6. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 10 in Genova.

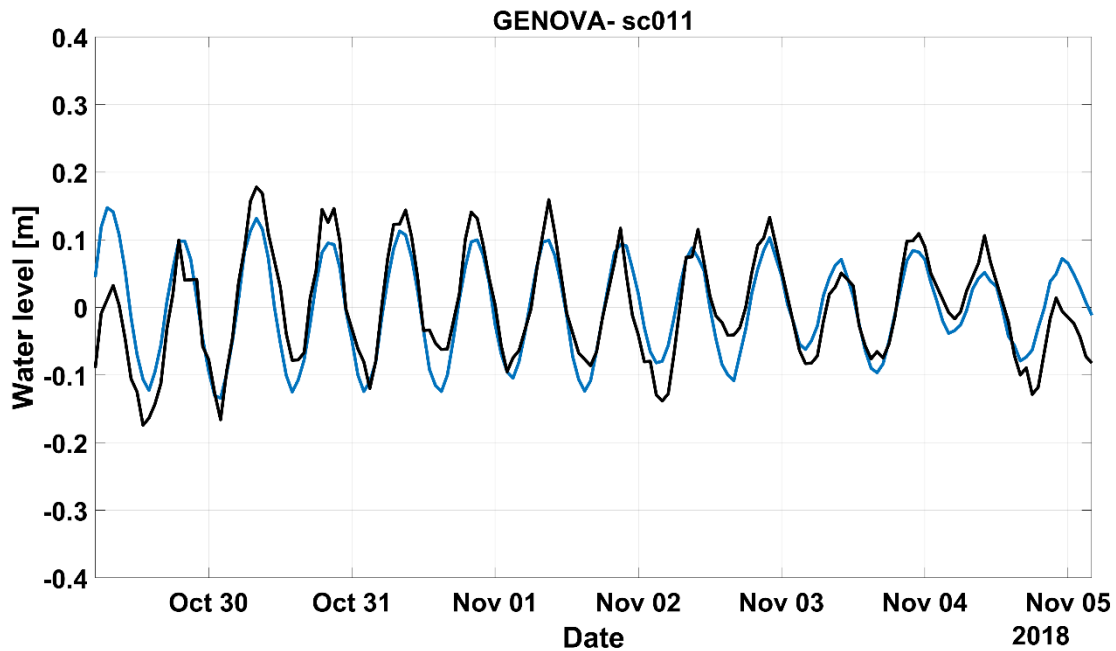


Figura 7. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 11 in Genova.

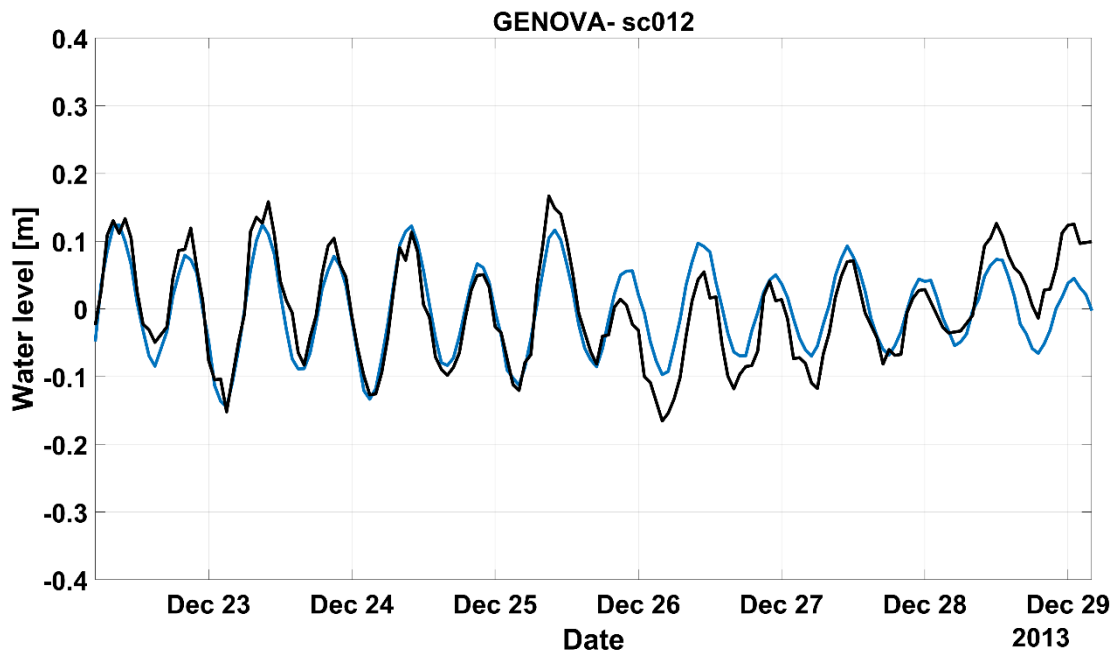


Figura 8. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 12 in Genova.

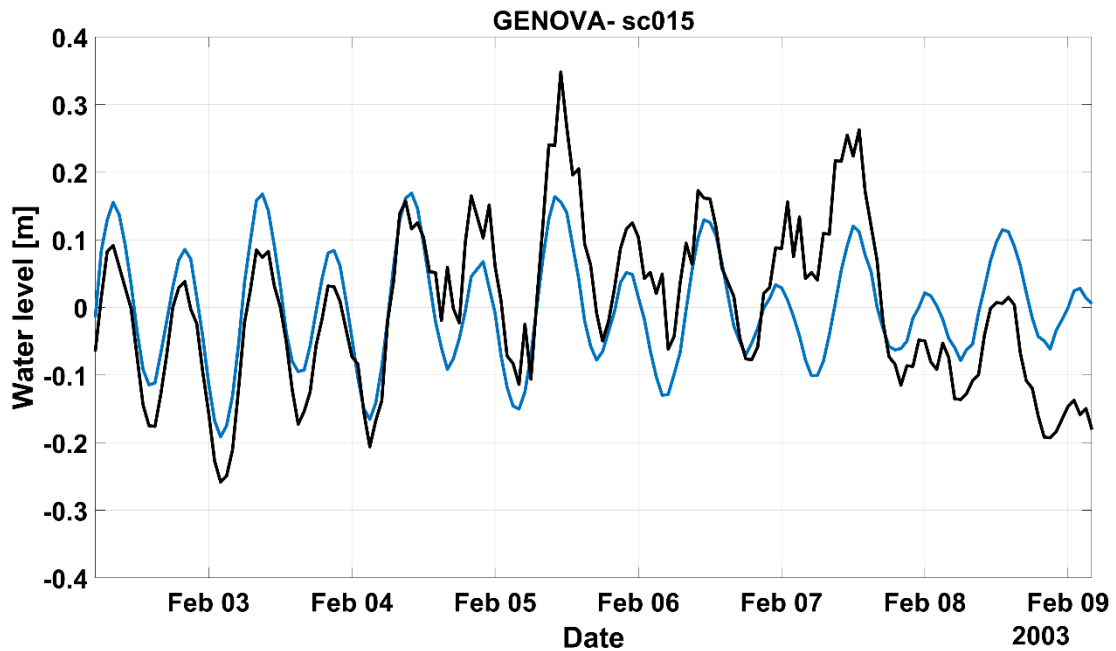


Figura 9. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 15 in Genova.

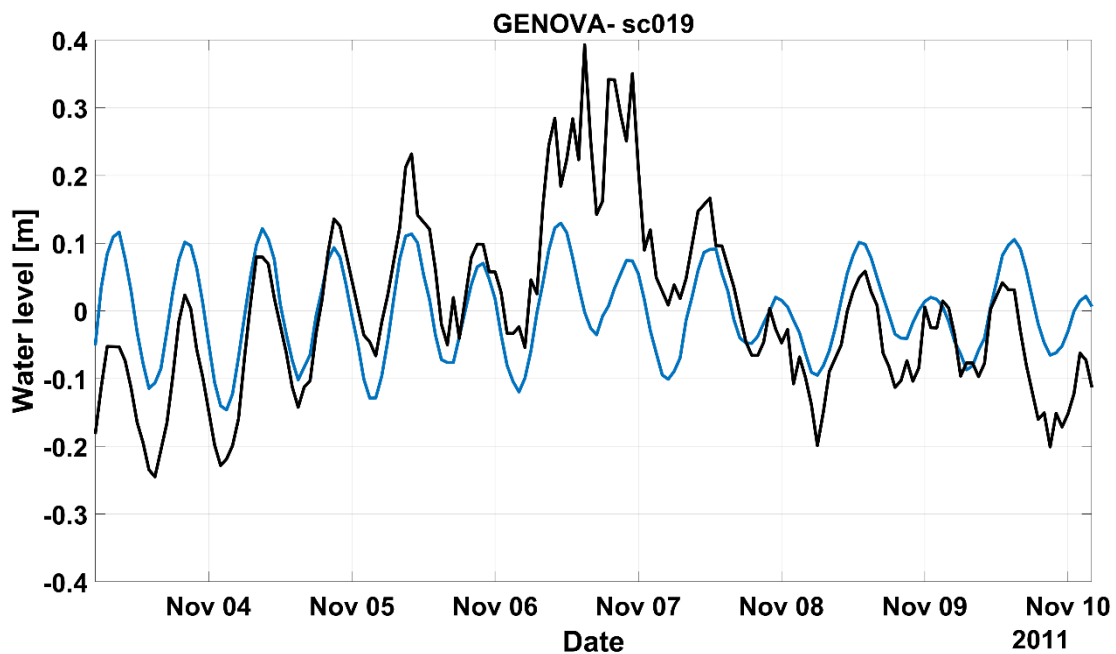


Figura 10. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 19 in Genova.

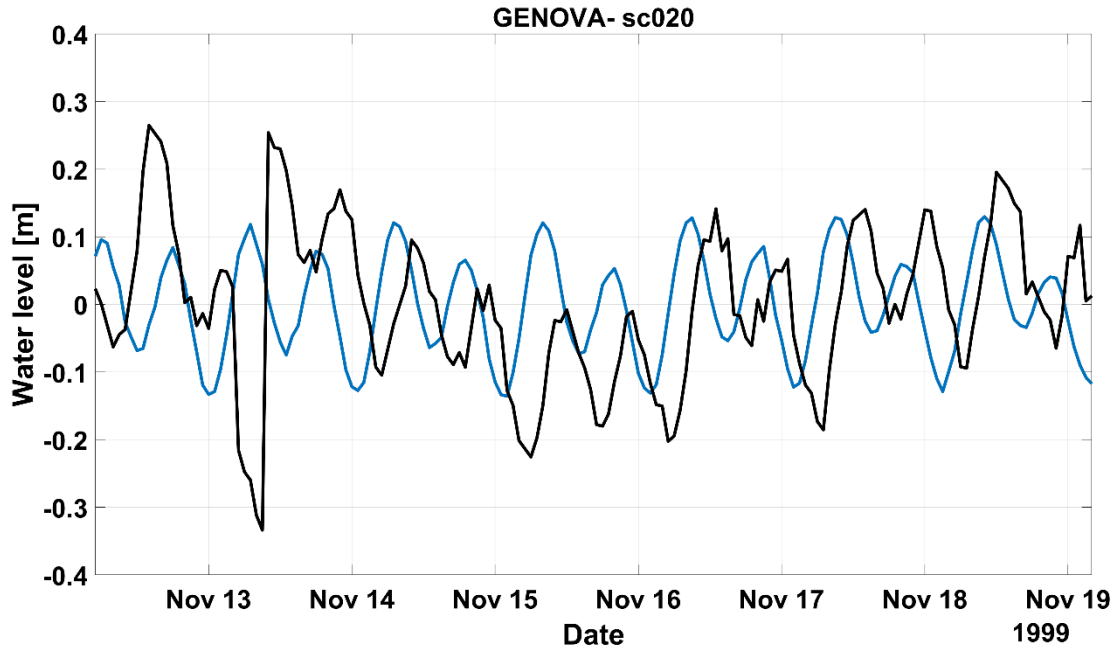


Figura 11. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 20 in Genova.

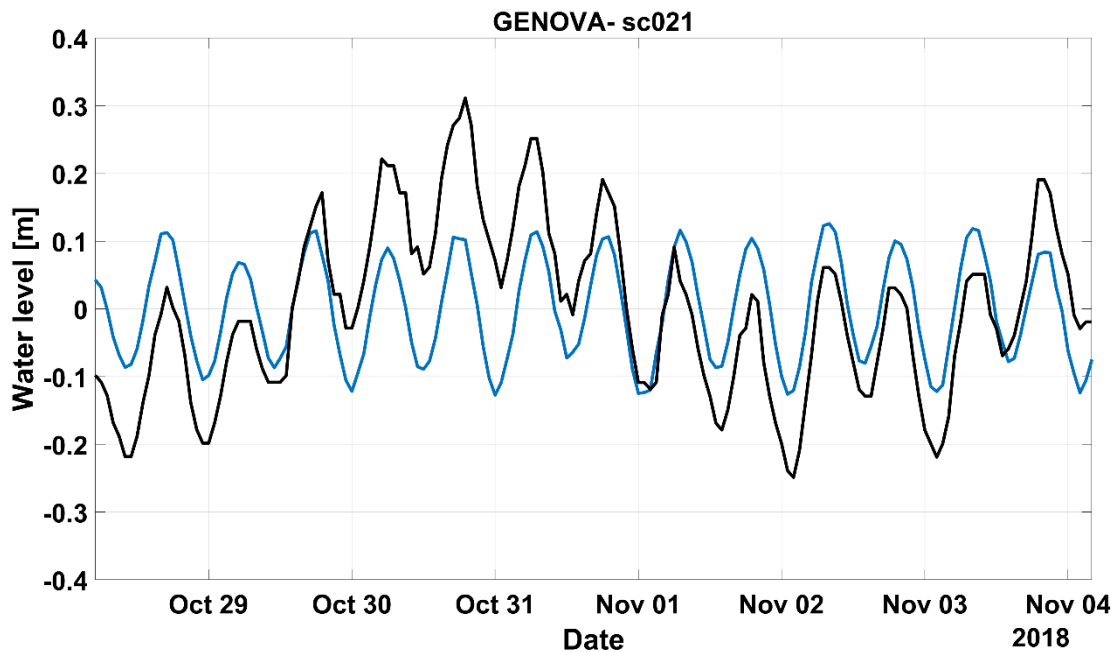


Figura 12. Confronto tra serie osservate (in nero) e simulate (in blu) per lo scenario 21 in Genova.



genova

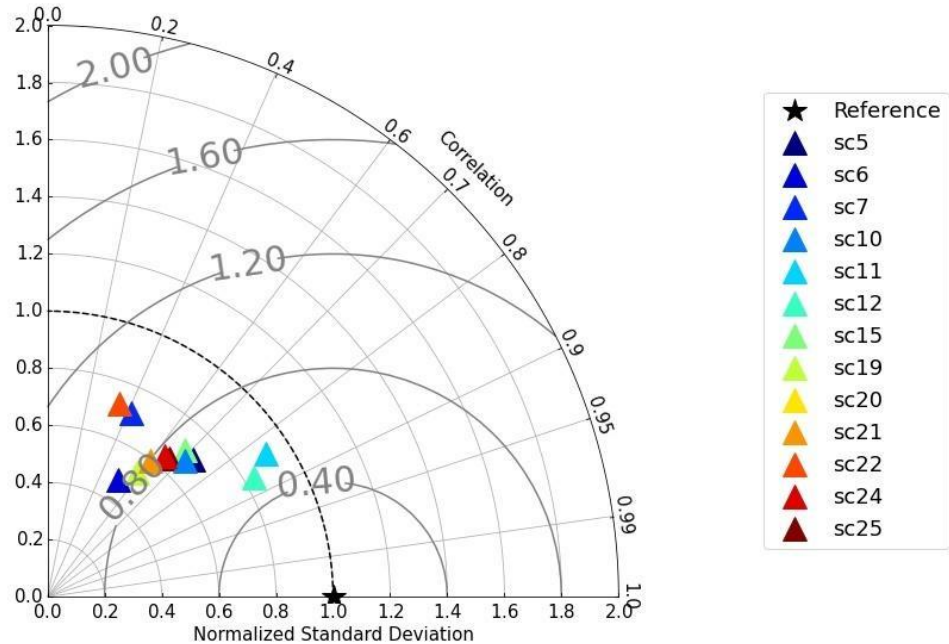


Figura 13. Diagramma di Taylor per il confronto tra dati di livello misurati ed osservati nel porto di Genova (un perfetto allineamento tra le serie ricadrebbe in corrispondenza della stella nera).

3. MODELLAZIONE DELLA BAIJA DI TOLONE

L'Università di Tolone ha sviluppato e convalidato un modello numerico con 3 annidamenti successivi (i.e., tre maglie nestate l'una sull'altra), che sta attualmente funzionando operativo, producendo simulazioni ad altissima risoluzione dal Golfo del Leone alla Baia di Tolone.

La configurazione operativa PSY4V3R1, sviluppata da Mercator Ocean e che copre l'intero Mediterraneo, viene utilizzata per alimentare il primo livello della catena modellistica a scala regionale attraverso i bordi aperti (<http://www.mercator-ocean.fr>). La risoluzione spaziale è pari a ca. 1/12 di grado sull'orizzontale, caratterizzata da 50 livelli verticali e 130 livelli verticali nella regione del Golfo del Leone con la configurazione GLAZUR64.

Il livello successivo è raggiunto con il NIDOR192, che copre l'area costiera del Var ad una risoluzione di circa 400 m. Queste tre configurazioni si basano sul modello di circolazione generale NEMO, che risolve numericamente le equazioni primitive 3D su una griglia C in coordinate z. Si tratta di un modello idrostatico, con l'approssimazione

di Boussinesq, l'opzione TKE per la chiusura della turbolenza e una formulazione parametrica per i forzanti atmosferici.

L'ultimo anello della catena modellistica è la configurazione TBAY100, che copre la baia semi-chiusa di Tolone con una risoluzione di 100 m e si basa sul MIT General Circulation Model (MITgcm) nella sua versione idrostatica. Questo modello è un modello a superficie libera, in coordinate z , e la discretizzazione è in volumi finiti.

Le tre configurazioni sono forzate dai dati atmosferici (vento, flusso di calore, evaporazione) prodotti dal modello operativo ARPEGE di Météo-France. In particolare, i dati ottenuti con le simulazioni numeriche della configurazione TBAY100 sono stati posti a confronto con i dati campionati tramite i 3 ADCP posizionati nella baia di Tolone

L'analisi della frequenza in energia cinetica mostrata in Figura 14 consente di valutare il modello numerico. I due spettri sono molto vicini e i maggiori picchi di energia (12 e 24 ore) misurati dall'ADCP sono ben presenti nelle simulazioni. Inoltre, le pendenze che caratterizzano le cascate di energia sub- e sovra-inerziali sono simili, anche se per le alte frequenze il modello sottostima leggermente l'energia totale.

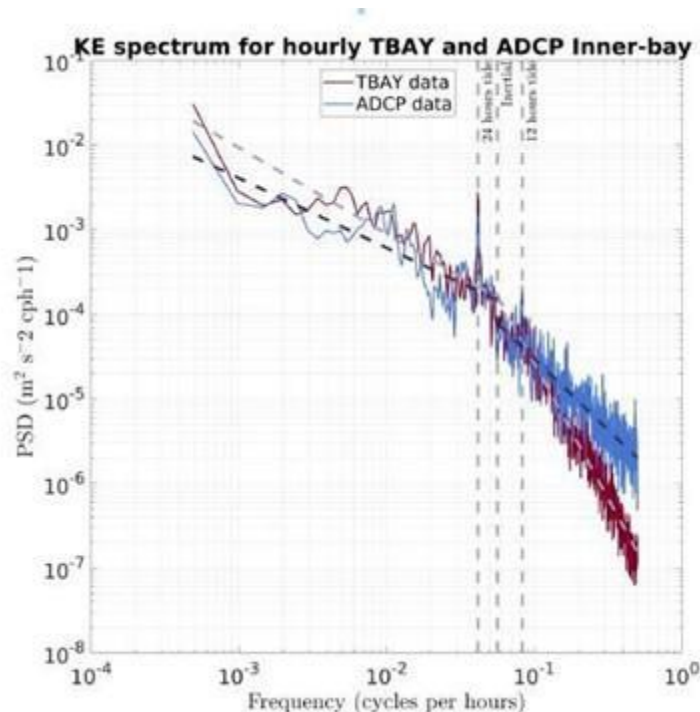


Figura 14. Densità spettrale dell'energia cinetica calcolata dalle correnti misurate dalla stazione ADCP 3 in superficie (blu) e simulate dal modello (rosso).

4. MODELLAZIONE DEL GOLFO DI LA SPEZIA

La circolazione marina nell'area del Golfo di La Spezia è simulata dal CNR-ISMAR utilizzando il modello Delft3D (Deltares, 2022a). Delft3D è un modello numerico "open-source" e a superficie libera che risolve le equazioni di Navier-Stokes per un fluido incomprimibile. La scelta del modello Delft3D è motivata da diverse ragioni. In primo luogo, Delft3D è in grado di simulare flussi non stazionari in acque relativamente basse come quelle del Golfo e delle aree costiere circostanti. Il modello considera anche gli effetti delle maree, dei venti e delle differenze di densità con diversi schemi di chiusura turbolenta. In secondo luogo, Delft3D permette di generare griglie orizzontali ad alta risoluzione e di risolvere geometrie complesse grazie all'uso delle "thin dams", ossia barriere infinitamente sottili che impediscono lo scambio di flusso tra due celle computazionali adiacenti. Questi elementi sono adatti a modellare frangiflutti, moli e banchine come quelli presenti nella parte interna del Golfo. In terzo luogo, Delft3D presenta caratteristiche utili che saranno sfruttate in futuro: in particolare, la sua capacità non idrostatica e la possibilità di modellare gli effetti delle onde attraverso l'accoppiamento con il modello SWAN (Deltares, 2022b).

In questo prodotto viene utilizzata la configurazione idrostatica e che segue la batimetria ("sigma") del modello insieme alla formulazione predefinita dell'equazione di stato (UNESCO, 1981). I bordi aperti sono situati a sud, ovest ed est del dominio, mentre il bordo nord è chiuso a causa della costa ligure (Figura 15). Il dominio è discretizzato con una griglia orizzontale non uniforme di 980×330 punti: la maglia numerica ad alta risoluzione è uniforme e ha un passo di griglia pari a $\Delta x = 50$ m nell'area di interesse. La maglia si allarga linearmente negli ultimi 20 punti avvicinandosi ai tre bordi aperti e raggiungendo il valore massimo di $\Delta x = 300$ m. La dimensione verticale è suddivisa in 30 strati "sigma" che sono raggruppati sia in superficie che sul fondo, al fine di risolvere l'influenza dei forzanti superficiali e della complessa batimetria sulla circolazione. I dati batimetrici provenienti sia dall'Istituto Idrografico della Marina Militare e sia dal nuovo database EMODnet Digital Bathymetry (DTM) sono combinati insieme e interpolati sulla griglia computazionale.

In questo studio sono considerati 12 diversi esperimenti numerici (Tabella 2) per studiare i cambiamenti nei risultati dovuti alle dinamiche tridimensionali, ai venti e alla diversa stratificazione dell'acqua per il cambio delle stagioni. Tutte le simulazioni iniziano a riposo con una superficie del livello del mare non perturbata. Su tutti i bordi materiali viene applicata una condizione "no-slip" o di assenza di scivolamento e per il termine di attrito sul fondo viene utilizzato un coefficiente di Chezy pari a $C = 50 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$. I valori di viscosità e diffusività orizzontali sono fissati a $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, mentre negli



PRODOTTO N. T2.1.3

esperimenti 3D viene utilizzato uno schema di chiusura turbolenta "k-epsilon" in verticale con valori di viscosità e diffusività verticali di fondo entrambi fissati a $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Il tempo di integrazione per tutti gli esperimenti è pari a 7 giorni, mentre il passo temporale è pari a 6 s per rispettare la condizione Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). I valori delle variabili marine simulate, quali temperatura, salinità e velocità delle correnti, vengono salvati ogni ora e in ogni punto di griglia.

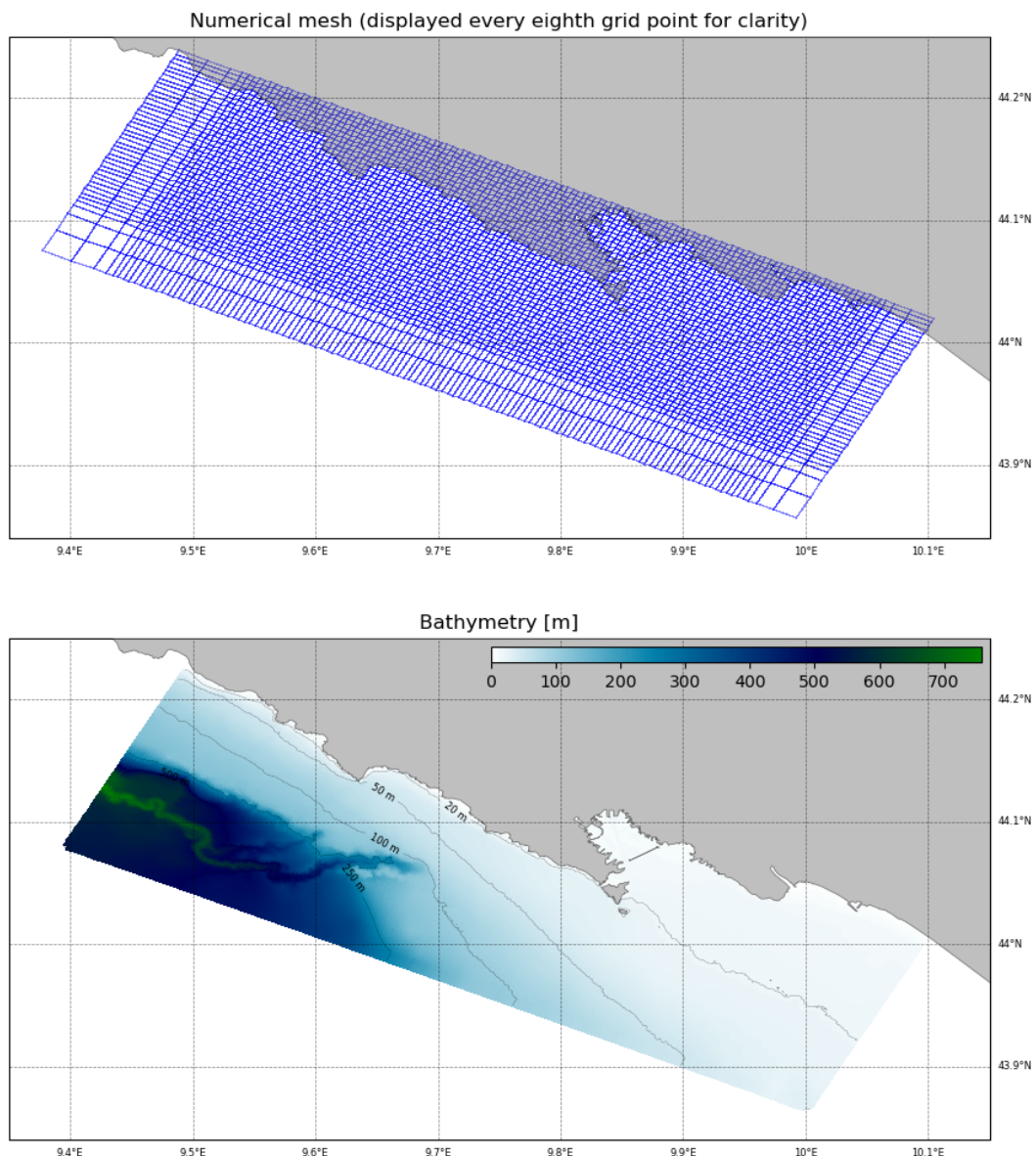


Figura 15. Pannello superiore: estensione del dominio di calcolo e griglia numerica. Per chiarezza viene mostrata solo una maglia di griglia ogni otto. Pannello inferiore: batimetria (colore).

PRODOTTO N. T2.1.3

Il metodo "ciclico" (Stelling e Leendertse, 1992) basato sullo schema di errore dissipativo a fase ridotta, è utilizzato per integrare implicitamente i termini di avvezione e diffusione per entrambe le equazioni della quantità di moto e del tracciante. Gli output numerici a 300 m di risoluzione orizzontale provenienti dal modello Ligurian Integrated Modelling Effort general circulation model (LIMEgcm, Sciascia et al., 2022) sono utilizzati ai tre bordi aperti per considerare la circolazione a larga scala nell'area. Le medie di velocità climatologiche del LIMEgcm integrate verticalmente sono ottenute considerando i tre mesi invernali di gennaio, febbraio e marzo, e quelli estivi di luglio, agosto e settembre durante gli anni 2004, 2005 e 2006. Le medie vengono utilizzate come condizioni "velocity-type" per forzare tutte le simulazioni con diversi profili di velocità orizzontali costanti ai tre bordi aperti. Ai profili stabili a est e a ovest viene aggiunta una velocità sinusoidale per riprodurre il segnale mareale semidiurno osservato nella regione e riportato da Marri et al. (1991) e Borella et al. (1992). A sud, le velocità sono poi corrette per minimizzare il flusso netto e applicate con un coefficiente di riflessione pari a 1 anno per implementare una condizione mista al contorno e più "Riemann-type" (Stelling e Rijkswaterstaat, 1984; Verboom e Slob, 1984; Verboom e Segal, 1987). Questa condizione consente la propagazione dei segnali attraverso il confine più lungo e riduce al minimo la loro riflessione nel dominio di calcolo. A tutte le velocità di bordo è infine applicata una rampa di un giorno per facilitare la partenza delle simulazioni e ridurre l'ampiezza delle onde corte introdotte al loro inizio.

I primi tre esperimenti numerici sono bidimensionali (2D) e i campi di temperatura e salinità sono uniformemente pari ai valori di 13°C e 38 su tutto il dominio e ai tre bordi aperti. Per studiare il ruolo dei venti, questa prima serie di tre esperimenti considera in primo luogo l'assenza della forzante ventosa (esperimento 2D_NoWind), e in secondo luogo venti che aumentano linearmente da 0 a 5 m/s durante il primo giorno per poi soffiare costantemente per il resto delle simulazioni. La direzione del vento varia negli ultimi due esperimenti: in 2D_SouthWind e 2D_NorthWind i venti soffiano rispettivamente da sud ("Mezzogiorno" o venti meridionali) e da nord ("Tramontana" o venti settentrionali). Questa idealizzazione della forzante ventosa è in accordo con la direzione principale da sud e l'intensità media del vento riportate in Gasparini et al. (2009) e con il regime di brezza marina nella direzione nord-sud osservato in Marri et al. (1991).

Tabella 2. Simulazioni utilizzate nello studio della circolazione nel Golfo di La Spezia.

Numero e codice simulazione	Stratificazione (stagione)	Direzione vento (nome comune)	Velocità vento
1) 2D_NoWind	Assente	Assente	Assente
2) 2D_SouthWind	Assente	Da sud (Mezzogiorno)	5 m/s
3) 2D_NorthWind	Assente	Da nord (Tramontana)	5 m/s
4) Uniform_NoWind	Assente	Assente	Assente
5) Uniform_SouthWind	Assente	Da sud (Mezzogiorno)	5 m/s
6) Uniform_NorthWind	Assente	Da nord (Tramontana)	5 m/s
7) Summer_NoWind	Estiva	Assente	Assente
8) Summer_SouthWind	Estiva	Da sud (Mezzogiorno)	5 m/s
9) Summer_NorthWind	Estiva	Da nord (Tramontana)	5 m/s
10) Winter_NoWind	Invernale	Assente	Assente
11) Winter_SouthWind	Invernale	Da sud (Mezzogiorno)	5 m/s
12) Winter_NorthWind	Invernale	Da nord (Tramontana)	5 m/s

Tutti gli altri esperimenti sono tridimensionali (3D). Nel primo gruppo di simulazioni tridimensionali (esperimenti Uniform_NoWind, Uniform_SouthWind e Uniform_NorthWind), si guarda alla risoluzione esplicita della dimensione verticale sempre in assenza di stratificazione: in questi esperimenti, i campi di temperatura e salinità sono ancora tenuti su tutto il dominio e ai tre bordi aperti ai valori di 13°C e 38 come nei corrispondenti casi bidimensionali. Nelle restanti sei simulazioni tridimensionali vengono cambiate le forzanti legate ai venti e alla stagionalità, considerando la stratificazione estiva e invernale delle acque. Per questi esperimenti, si utilizzano i profili verticali estivi e invernali di temperatura e salinità climatologici che provengono sempre dal modello LIMegcm e rappresentano i valori medi orizzontali stagionali negli stessi mesi e anni utilizzati per le medie delle velocità ai bordi. Questi profili verticali stagionali e climatologici sono ripetuti orizzontalmente come condizioni iniziali e mantenuti costanti ai bordi aperti per tutta la durata delle simulazioni. In tutte le simulazioni tridimensionali, le direzioni e le intensità del vento variano come negli esperimenti bidimensionali (vedi Tabella 2).



Interreg



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA



SINAPSI

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

PRODOTTO N. T2.1.3

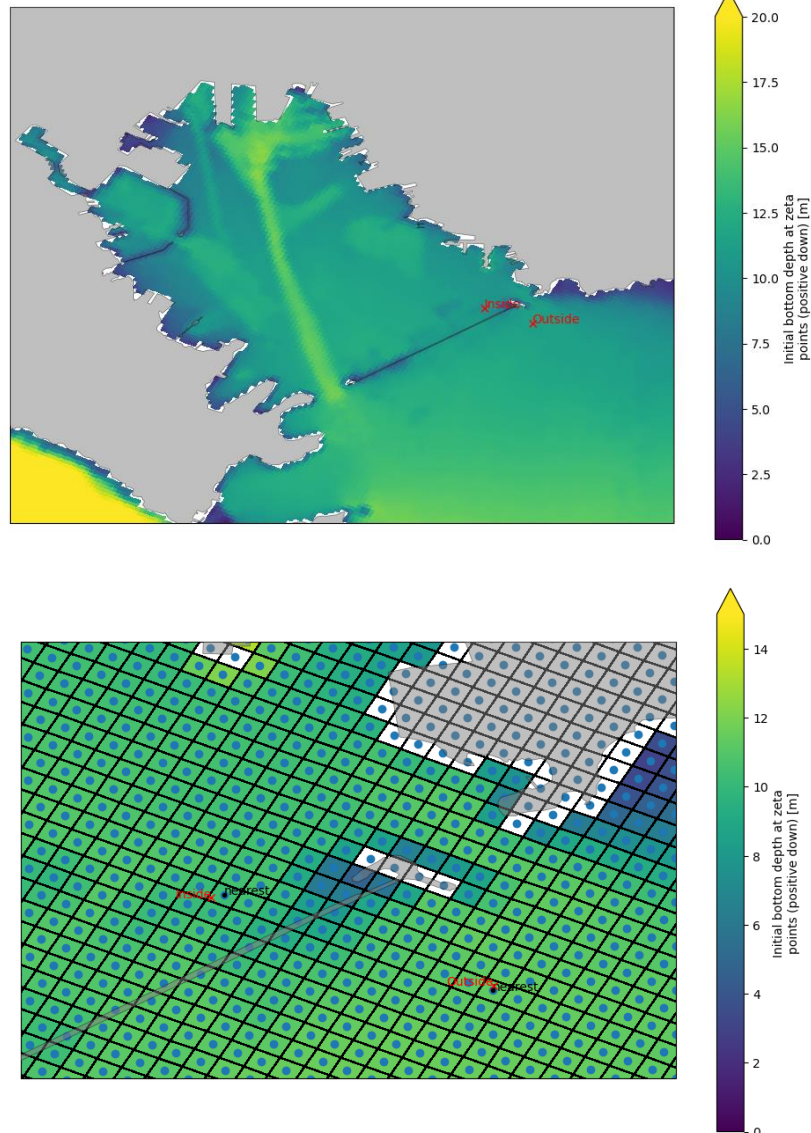


Figura 16. Pannello superiore: batimetria (colore) e posizioni dei due correntometri (croci rosse), all'esterno e all'interno del Golfo. Pannello inferiore: batimetria (colore) in ogni punto della griglia del modello (punti blu), posizioni dei due correntometri (croci rosse) e corrispondenti punti computazionali per il confronto con le velocità del modello (punti neri).

Per la validazione vengono considerate le misure sperimentali di velocità della corrente marina messe a disposizione dal Centro Ricerche Ambiente Marino Santa Teresa dell'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA). Le misure hanno una frequenza nominale pari ad 1 dato ogni 30 min e provengono da due correntometri a punto singolo (modello Aanderaa DCS.Z-Pulse) posti all'esterno e all'interno del Golfo (Figura 16) a una profondità media pari a circa 5 m. Le velocità della corrente marina sono state misurate nei due punti nei mesi di luglio e agosto 2022.



PRODOTTO N. T2.1.3

Per il confronto con il periodo delle misure viene considerata la simulazione tridimensionale "Summer_NoWind", cioè la simulazione con stratificazione estiva e in assenza di vento, e le posizioni dei due punti computazionali più prossimi ai due correntometri.

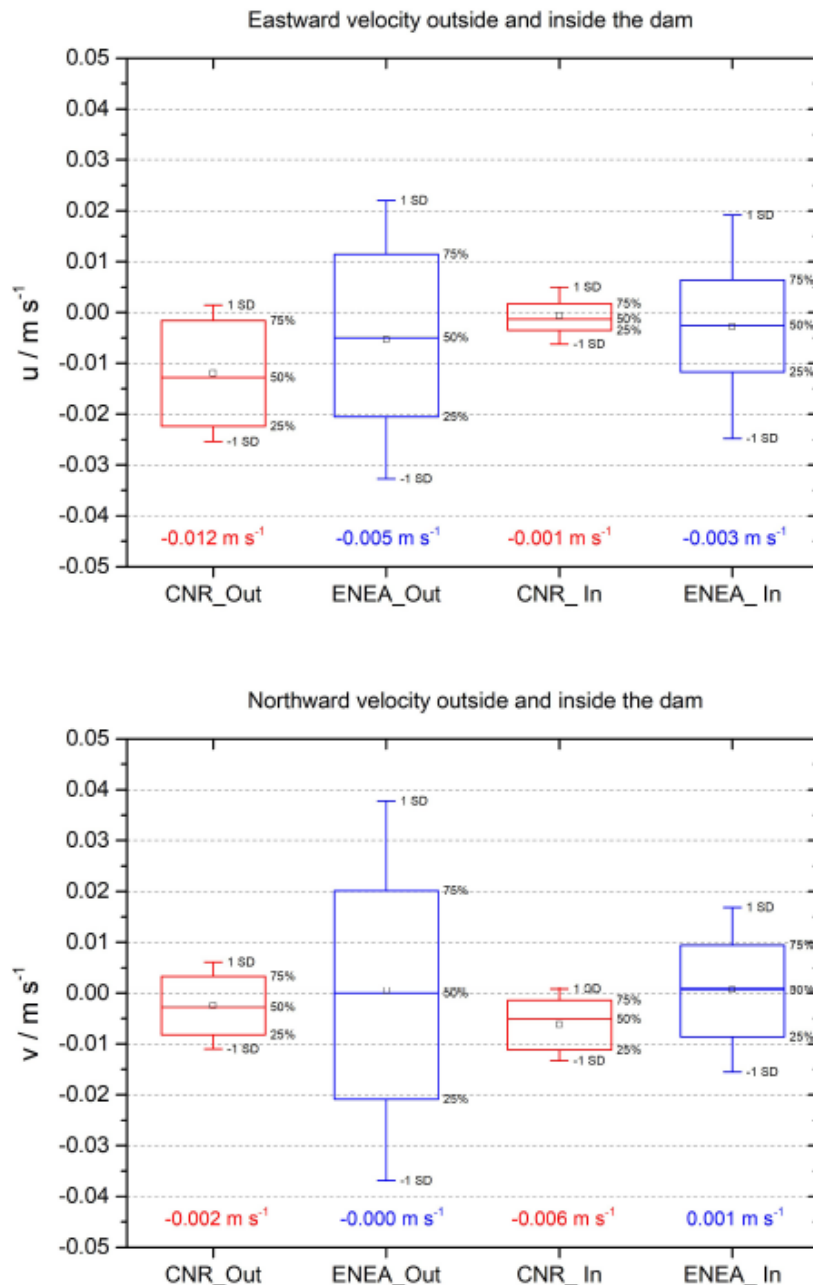


Figura 17. Box-plot di confronto tra il modello e le osservazioni tra le componenti zonali (pannello superiore) e meridionali (pannello inferiore) per i punti all'esterno e all'interno del Golfo.



Interreg



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA



SINAPSI

MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fonds européen de développement régional
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

PRODOTTO N. T2.1.3

La Figura 17 mostra i box-plot di confronto tra le osservazioni e il modello. Il confronto risulta soddisfacente considerando che il modello ricostruisce gli andamenti della corrente in una settimana estiva climatologica, in assenza di vento e in particolari condizioni idealizzate di forzante mareale costante nel suo periodo e nella sua ampiezza. Le misure sperimentali, invece, sono ovviamente soggette ad una variabilità reale che il modello al momento non considera. Nonostante queste differenze i valori numerici mediani nelle due posizioni risultano realistici per entrambe le componenti e per le due posizioni. Inoltre, sia le misure sperimentali che il modello mostrano come la corrente all'interno del Golfo abbia una velocità inferiore e pari a circa la metà di quella all'esterno.

5. Bibliografia

Borella, A., Cambiaghi, M., Marri, P., Meloni, R., Miserocchi, M., Nair, R., and Tomasino, M.: *Gulf of La Spezia: An Analysis of the Mechanisms of Water Exchange between the Inner Gulf and the Open Sea*, pp. 297–312, Thomas Telford, <https://doi.org/10.1680/mt.16897.0021>, 1992

Deltares: Delft3D-Flow. Simulations of multi-dimensional hydro-dynamic flows and transport phenomena, including sediments, Deltares, 2022a.

Deltares: Delft3D-Wave. Simulation of short-crested waves with SWAN, Deltares, 2022b.

Gasparini, G., Abbate, M., Bordone, A., Cerrati, G., Galli, C., Lazzone, E., and Negri, A.: *Circulation and biomass distribution during warm season in the Gulf of La Spezia (north-western Mediterranean)*, *Journal of Marine Systems*, 78, S48–S62, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2009.01.010>, 2009.

Marri, P., Meloni, R., Pontrelli, G., and Purini, R.: *A numerical model for tidal and wind driven circulation: An application to the Gulf of La Spezia*, *Computer Modelling in Ocean Engineering*, 91, 1991.

Sciascia, R., Guizien, K., and Magaldi, M. G.: *Larval dispersal simulations and connectivity predictions for Mediterranean gorgonian species: sensitivity to flow representation and biological traits*, *ICES Journal of Marine Science*, 79, 2043–2054, <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsac135>, 2022.

Stelling, G. and Leendertse, J.: *Approximation of Convective Processes by Cyclic AOI Methods*, *Estuarine and Coastal Modeling*, pp. 771–782, 1992.

Stelling, G. and Rijkswaterstaat, N.: *On the Construction of Computational Methods for Shallow Water Flow Problems*, *Netherlands Rijkswaterstaat Communications, Government Pub. Office*, 1984.

UNESCO: *Background Papers and Supporting Data on the International Equation of State of Seawater 1980*, *Unesco technical papers in marine science*, UNESCO, 1981.

Verboom, G. and Slob, A.: *Weakly-reflective boundary conditions for two-dimensional water flow problems*, *Advances in Water Resources*, 7, 192–197, [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(84\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0309-1708(84)90018-6), 1984.

Verboom, G. K. and Segal, A.: *Weakly-Reflective Boundary Conditions for Shallow Water Equations*, pp. 115–129, *Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden*, https://doi.org/10.1007/978-3-322-89729-9_9, 1987.