

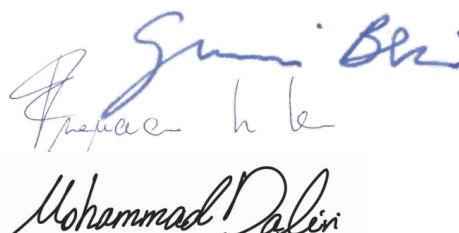


EMERGENZA GAS  
INCREMENTO CAPACITÀ DI RIGASSIFICAZIONE (DL 17.05.2022, n. 50)  
FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti

**PROGETTO**  
**FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE**  
**GASDOTTI**

RISPOSTA ALLA RICHIESTA DI INTEGRAZIONI DELLE ANALISI DI  
DISPERSIONE TERMICO-CHIMICA (REL-AMB-E-09010) DA PARTE DI  
ISPRA

Prof. Ing. Giovanni Besio  
Dr. Ing. Francesco De Leo  
Dr. Ing. Mohammad Daliri



Genova, 13 Luglio 2023

## SOMMARIO

<b>1. PREMESSA</b> .....	3
<b>2. MISURE DI LIVELLO NEL PORTO DI RAVENNA</b> .....	5
<b>3. ANALISI DEI PARAMETRI D'ONDA</b> .....	12

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Posizione del mareografo ISPRA all'interno del porto di Ravenna. ....	5
Figura 2. Scenario 4. Serie di dati osservati (in nero) e simulati (in blu).....	8
Figura 3. Scenario 43. Serie di dati osservati (in nero) e simulati (in blu). ....	8
Figura 4. Scenario 93. Serie di dati osservati (in nero) e simulati (in blu).....	9
Figura 5. Diagramma di Taylor per gli scenari meteo-marini analizzati. I raggi rappresentano isolinee dei valori di $p$ ; i semicerchi sono associati a isolinee dei valori di NRMSE. La stella indica il perfetto allineamento tra dati osservati e simulati. .....	9
Figura 6. Confronto tra serie modellate tramite Delft3D (in blu) ed estratte dal software mareale TPXO.3 (in rosso) in corrispondenza del mareografo ISPRA (cfr. Figura 1).....	10
Figura 7. Posizione della boa RON (in blu) e del nodo hindcast (in rosso) utilizzato per il confronto in Ancona. ....	12
Figura 8. Posizione della boa RON (in blu) e del nodo hindcast (in rosso) utilizzato per il confronto in Venezia.....	13
Figura 9. Confronto tra dati misurati ( $H_s^{RON}$ ) e modellati ( $H_s^{DICCA}$ ) in Ancona.....	14
Figura 10. Confronto tra dati misurati ( $H_s^{RON}$ ) e modellati ( $H_s^{DICCA}$ ) in Venezia. ....	14

## INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Date degli scenari meteo-marini utilizzati nella relazione del DICCA. ....	6
Tabella 2. Indici di correlazione tra le serie osservate dal mareografo ISPRA e i dati modellati con Delft3D.....	7
Tabella 3. Periodi con dati reperibili per le due boe considerate, utilizzati per i confronti tra osservazioni e dati simulati (intervalli orari).....	12
Tabella 4. Indici di correlazione tra le serie di $H_s$ osservate dalle boe della RON e i dati modellati dal DICCA.....	13

## 1. PREMESSA

Il presente elaborato intende rispondere alle osservazioni pervenute dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) in data 30/04/2023, inerenti il documento REL-AMB-E-09010 – STUDIO MODELLISTICO DI DISPERSIONE TERMICA/CHIMICA IN FASE DI ESERCIZIO AL LARGO DEL TERMINAL PORTUALE DI RAVENNA (RA), redatto dall'Università degli Studi di Genova e di seguito abbreviato in "REL-AMB-E-09010.

Nello specifico, ISPRA rileva al punto 3 del Paragrafo 3.6.1.1 quanto segue:

1. *Relativamente a quanto riportato nel Documento REL-AMB-E-09010 - "Studio modellistico di dispersione termica/chimica in fase di esercizio al largo del terminal portuale di Ravenna" e ad integrazione di quanto già richiesto in prima istanza, dopo ulteriori approfondimenti, si conferma che lo studio descritto utilizza modelli numerici precedentemente validati in letteratura scientifica. Le simulazioni numeriche del modello di diffusione sono forzate con dati di marea prodotti da un altro modello. Si chiede di fornire indicazione sulla possibilità di utilizzare, come forzanti dei modelli implementati, dati mareografici effettivamente registrati, come ad esempio quelli accolti da ISPRA presso la stazione Ravenna, nonché altre eventuali misure in situ necessarie al processo di validazione [...].*

Successivamente, si avanza la seguente richiesta al punto 3.6.1.7:

2. *In fase di esercizio, per quanto riguarda lo studio modellistico di dispersione termica/chimica delle acque derivanti dal processo di rigassificazione, si ritiene importante che il processo di calibrazione sia realizzato con misure di campo, prevedendo un set di misure prese mentre il processo di rigassificazione è in Corso"*

Per quanto riguarda il punto numero 1, occorre precisare come il modello numerico propaghi le forzanti ambientali (quali oscillazioni mareali e onde) dal largo verso riva, ossia come lo stesso sia forzato sul bordo esterno del dominio computazionale (lato est; cfr. Figura 10 in REL-AMB-E-09010). In questo modo, è possibile trasferire le condizioni al contorno in prossimità della costa, riproducendo le dinamiche di interesse per lo studio in esame. La richiesta di utilizzare i dati mareografici registrati come forzanti del modello confligge dunque con questo schema di calcolo, poiché i medesimi sono campionati dalla stazione mareografica posta all'interno del porto di Ravenna, ovvero sul lato ovest del dominio di calcolo.

I dati suddetti, al contrario, costituiscono validissimo riferimento per verificare la bontà della modellazione numerica. A tal proposito, nel Paragrafo 2 si riportano i confronti tra i dati di livello misurati dalla stazione Ravenna ed i dati riprodotti dal modello idrodinamico sulla base di forzanti ricostruite numericamente.



Successivamente, si effettua un ulteriore confronto sui parametri d'onda utilizzati nel modello, avvalendosi dei dati misurati dalla Rete Ondametrica Nazionale (RON<sup>1</sup>) nei siti di Ancona e Venezia, quali siti più prossimi all'area di studio che garantiscano una sufficiente disponibilità di dati per sviluppare un confronto robusto e statisticamente significativo (Paragrafo 3).

Le operazioni di cui sopra permettono di rispondere in parte anche al punto numero 2. Si conviene infatti come, nonostante il modello numerico utilizzato costituisca strumento ampiamente utilizzato dalla Comunità scientifica di settore, sia necessario verificarne le prestazioni per il caso studio specifico tramite appositi confronti con dati misurati e ritenuti di certa affidabilità, da cui seguono i confronti poc'anzi richiamati. Tuttavia, siffatta validazione deve effettuarsi su misure *pregresse*: se il modello riesce a riprodurre il clima meteo-marino passato, non vi è motivo di dubitare che sia in grado di rappresentare allo stesso modo le condizioni future, dal momento che non sono attese nell'area tendenze significative che possano alterare le forzanti mareali, ondametriche e/o correntometriche. Pertanto, le misure di onde e correnti prese in fase di esercizio saranno utilizzate esclusivamente per il monitoraggio sulle condizioni di operabilità dell'impianto, mentre le misure dei cloro derivati lungo la colonna d'acqua potranno essere utilizzate per verificare la rispondenza tra ordini di grandezza misurati e modellati, ma non saranno oggetto di ulteriori modellazioni numeriche, per le quali si ritiene esaustiva la validazione sviluppata sui periodi pregressi all'entrata in funzione dell'impianto.

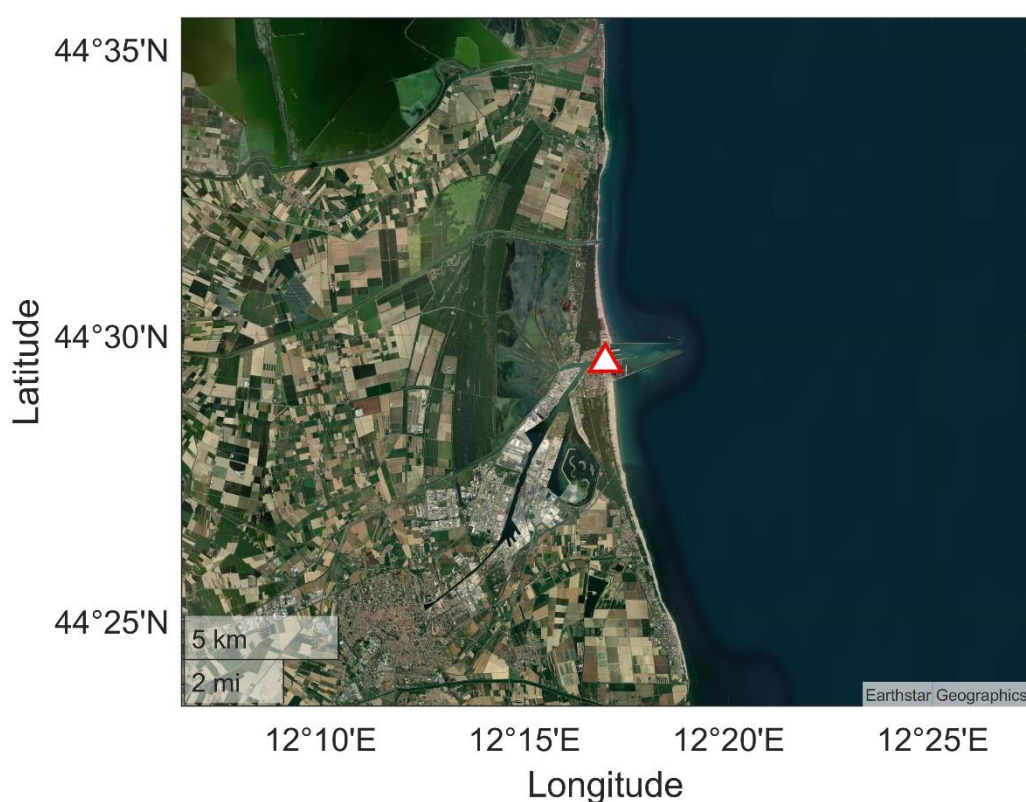
---

<sup>1</sup> Bencivenga, M., Nardone, G., Ruggiero, F., & Calore, D. (2012). The Italian data buoy network (RON). Adv. Fluid Mech. IX, 74(321), 305.

## 2. MISURE DI LIVELLO NEL PORTO DI RAVENNA

I dati utilizzati per la validazione del modello derivano da ISPRA (<https://www.isprambiente.gov.it/it>), il quale fornisce diversi dati geofisici campionati su tutto il suolo italiano, comprese le coste e le acque marine territoriali.

Nel caso di studio, il sito selezionato al fine di eseguire un confronto tra i dati osservati e i dati modellati è posizionato all'interno del porto di Ravenna, come mostrato in Figura 1. Lo strumento di misura è un mareografo, il quale registra il livello del medio mare lungo assegnati intervalli di tempo.



*Figura 1. Posizione del mareografo ISPRA all'interno del porto di Ravenna.*

Nel caso specifico, le serie misurate dalla stazione ISPRA sono state estratte in corrispondenza degli scenari meteo-marini selezionati per descrivere la variabilità climatica dell'area, per i quali si rimanda al Capitolo 2 della relazione REL-AMB-E-09010. Nella tabella sottostante, sono riportate le date associate a ciascuno scenario. Occorre precisare come nello studio del DICCA fossero stati selezionati no. 4 scenari

meteo-marini di riferimento; tuttavia, lo scenario no. 82 è stato scartato, poiché non vi sono misure di livello disponibili nella relativa finestra temporale (03/02/1991-11/02/1991) da parte di ISPRA.

*Tabella 1. Date degli scenari meteo-marini utilizzati nella relazione del  
DICCA.*

<b>scenario</b>	<b>Data inizio</b>	<b>Data fine</b>
4	01/02/2012	09/02/2012
43	22/04/2000	30/04/2000
93	07/01/2003	15/01/2003

Le serie di livello osservate nelle date riportate in Tabella 1 sono state dunque confrontate con le serie modellate tramite il modello numerico Delft3D (vedasi Capitolo 3 dell'elaborato REL-AMB-E-09010).

A partire da due serie di dati osservati e simulati (denominate *O* e *S*, rispettivamente), se ne può verificare l'allineamento tramite i due indici di seguito riportati:

$$\rho = \frac{cov(S,O)}{\sigma_S \sigma_O} \quad (1)$$

$$NRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N O_i^2}} \quad (2)$$

L'equazione (1) definisce l'indice di correlazione di Pearson (indicato tramite la lettera  $\rho$ ), che assume valore 1 nel caso di serie perfettamente correlate (indicativo di una modellazione ottimale), 0 nel caso di serie non correlate (i.e., una modellazione scadente). L'indice *NRMSE* (equazione 2) indica invece il Normalized Root Mean Square Error, che quantifica la rilevanza delle divergenze tra *S* e *O* in riferimento ai valori assoluti dei dati osservati. Valori di *NRMSE* inferiori all'unità indicano che i discostamenti tra le serie sono marginali.

I suddetti indici sono stati utilizzati per quantificare la similarità tra le serie simulate in corrispondenza del mareografo e le serie campionate da ISPRA, assunte quale benchmark di riferimento. Infine, le misure di errore per tutti gli scenari utilizzati (ovvero, le 3 serie temporali) sono state graficate avvalendosi del diagramma di



Taylor, che permette di riunire i diversi indici al fine di apprezzare in modo diretto la bontà dei dati modellati rispetto alle osservazioni<sup>2</sup>.

I confronti tra le serie di dati osservati e simulati sono riportati nelle figure da Figura 2 a Figura 4, e mostrano un'elevata performance del modello numerico nel riprodurre i dati osservati per gli scenari 4 e 43 (numerazione introdotta nel documento REL-AMB-E-09010 e derivante dalle analisi di *machine learning*). In questi casi, la modellazione numerica restituisce serie di livello in grado di riprodurre correttamente le oscillazioni di marea, sia per quanto riguarda la fase che in riferimento all'ampiezza.

Al contrario, lo scenario 93 mostra marcate divergenze tra le serie di dati misurati e modellati: in questo caso, il modello numerico non sembra in grado di catturare correttamente la ampiezza delle oscillazioni mareali (cfr. Figura 4).

Questi risultati sono riassunti nel diagramma di Taylor: i punti associati agli scenari 4 e 43 sono associati a correlazioni superiori al 80% (0,8) e valori di *NRMSE* inferiori a 0,6 (si osservino, rispettivamente, i raggi e le isolinee circolari in Figura 5). Al contrario, il marker associato allo scenario 93 è associato a bassi valori di correlazione (i.e., 0,2), a riprova dello scarso allineamento tra le serie osservate e simulate.

I valori degli indici di correlazione sono riassunti nella tabella sottostante.

*Tabella 2. Indici di correlazione tra le serie osservate dal mareografo ISPRA e i dati modellati con Delft3D.*

scenario	$\rho$	<i>NRMSE</i>
4	0,8	0,57
43	0,5	0,89
93	0,2	1,1

<sup>2</sup> Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.

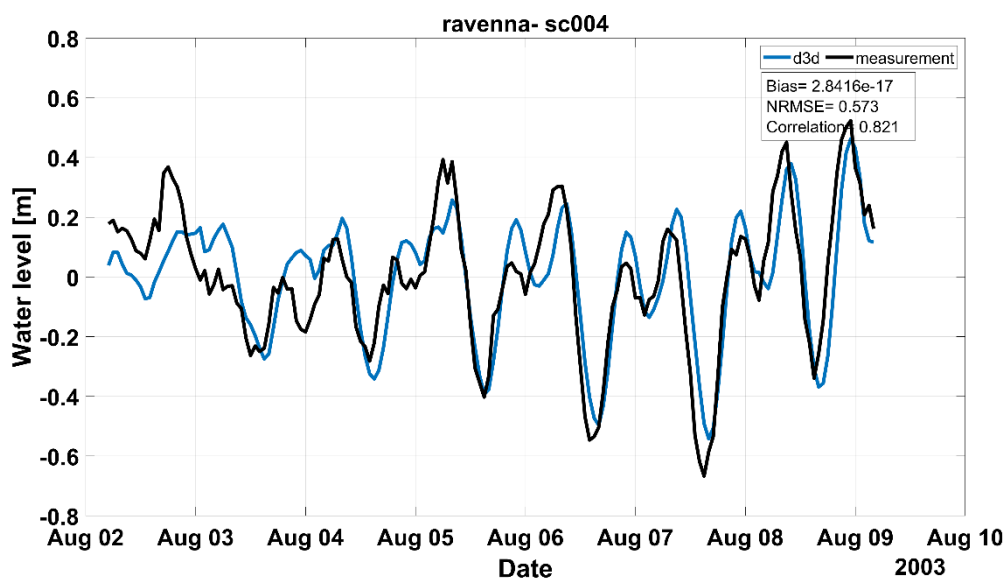


Figura 2. Scenario 4. Serie di dati osservati (in nero) e simulati (in blu).

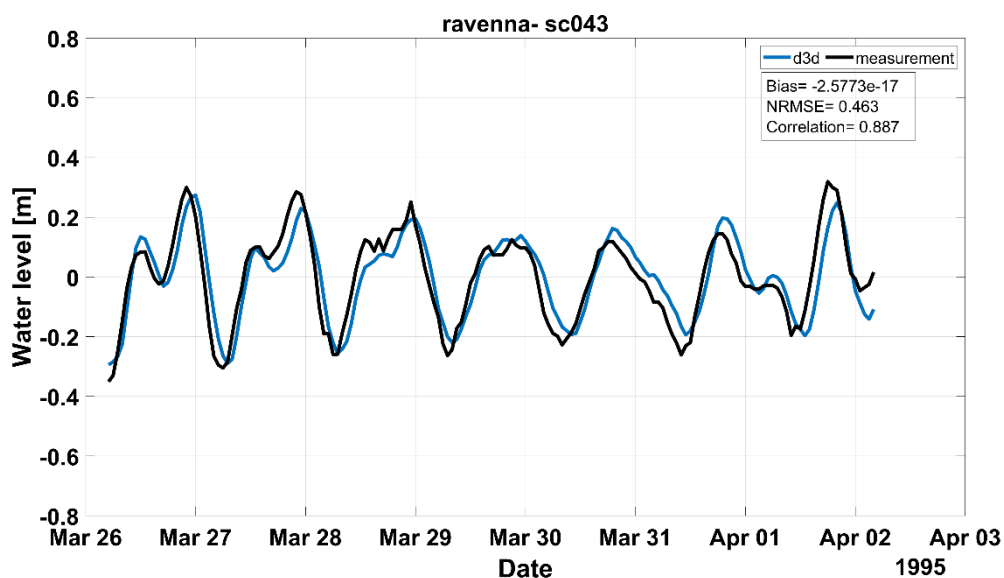


Figura 3. Scenario 43. Serie di dati osservati (in nero) e simulati (in blu).



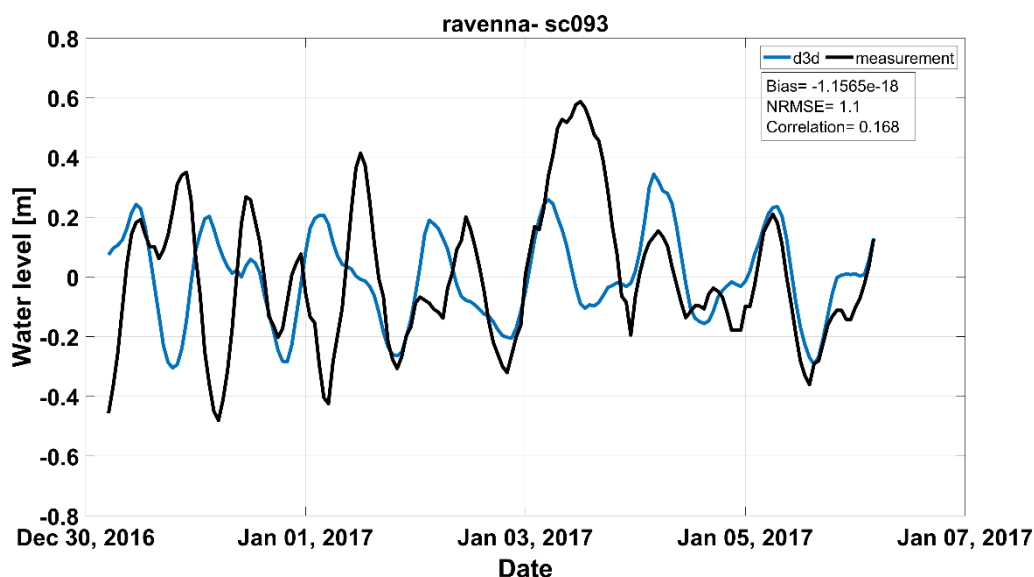


Figura 4. Scenario 93. Serie di dati osservati (in nero) e simulati (in blu).

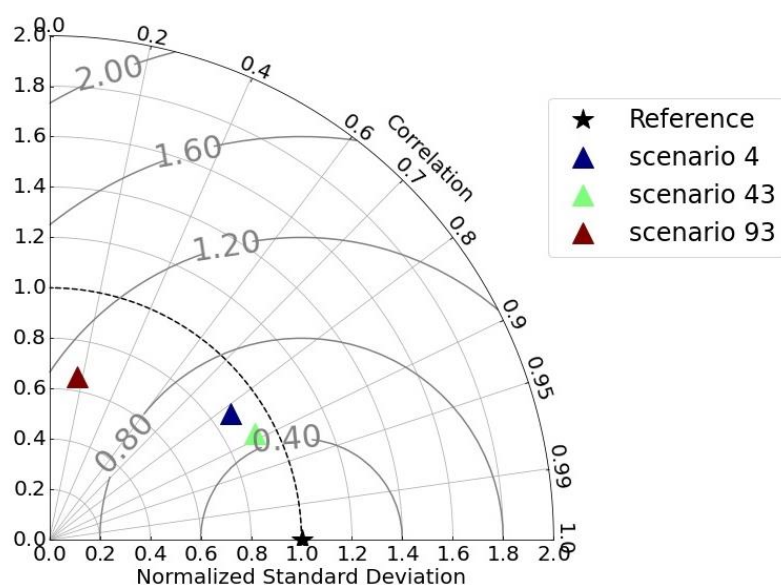


Figura 5. Diagramma di Taylor per gli scenari meteo-marini analizzati. I raggi rappresentano isolinee dei valori di  $p$ ; i semicerchi sono associati a isolinee dei valori di NRMSE. La stella indica il perfetto allineamento tra dati osservati e simulati.

I risultati associati allo scenario 93 richiedono un dettagliato approfondimento: in questo caso, infatti, i valori di livello associati alla modellazione numerica non sembrano essere in grado di riprodurre il comportamento reale del sistema. Le cause sono da imputarsi alle condizioni ambientali occorse nel periodo dello scenario, associate ad un elevato fenomeno di *storm surge* come mostrano i dati misurati successivamente al 3 Gennaio (si osservi la curva in nero in Figura 4, che indica un sopralzo di 60 cm rispetto al livello medio mare). In questo caso, i livelli del mare sono esacerbati dalla bassa pressione atmosferica (il cd. *storm surge*) che difficilmente riesce ad essere riprodotta in modo numerico unitamente agli altri fattori in gioco. Le condizioni al contorno di livello del modello numerico, definite tramite il software di marea TPXO.3<sup>3</sup>, non contemplano i possibili effetti legati all'interazione tra la marea ed altri sistemi che, nel caso di condizioni ambientali molto intense, possono essere predominanti e del tutto caotiche<sup>4</sup>.

Questa osservazione trova immediato riscontro nel confronto ottimale tra le serie di dati simulati e le serie di marea estratte dal software TPXO.3 all'interno del porto in corrispondenza dello scenario 93, così come mostrato in Figura 6.

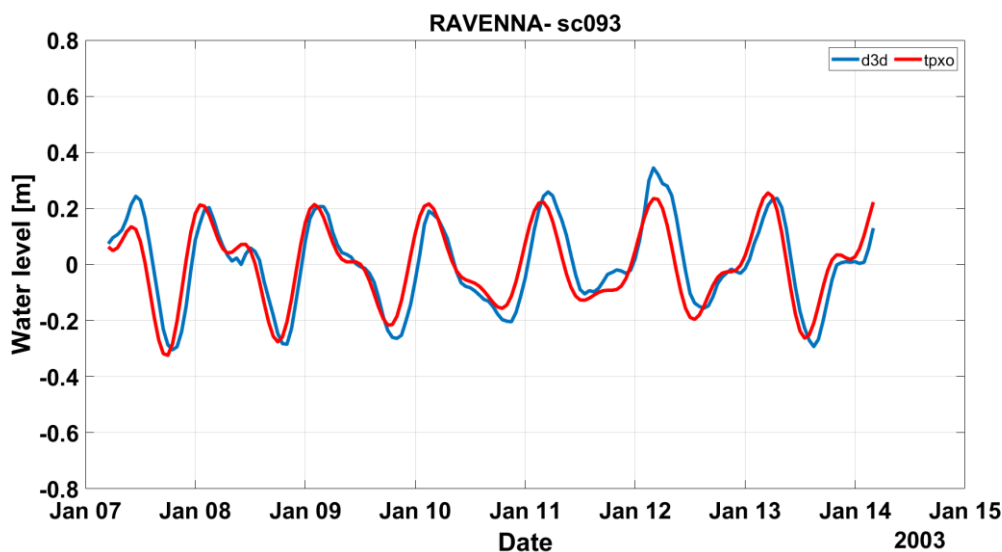


Figura 6. Confronto tra serie modellate tramite Delft3D (in blu) ed estratte dal software mareale TPXO.3 (in rosso) in corrispondenza del mareografo ISPRA (cfr. Figura 1).

<sup>3</sup> Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic technology*, 19(2), 183-204.

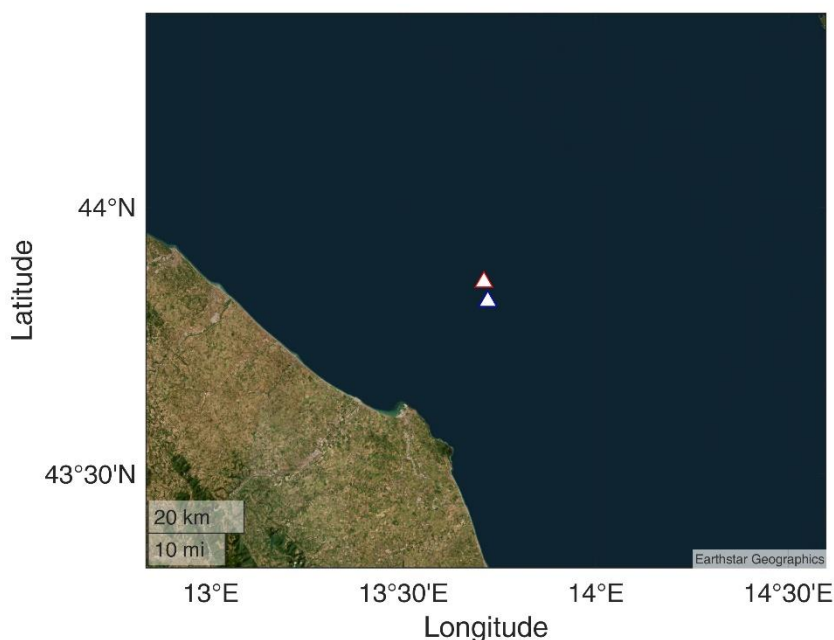
<sup>4</sup> Williams, J., Horsburgh, K. J., Williams, J. A., & Proctor, R. N. (2016). Tide and skew surge independence: New insights for flood risk. *Geophysical Research Letters*, 43(12), 6410-6417.



Tuttavia, i risultati sopra riportati mostrano come il modello numerico Delft3D sia in grado di riprodurre correttamente le serie di livello all'interno del porto di Ravenna (dove è posizionato l'unico mareografo disponibile nell'area di studio) nel caso di stati di mare caratterizzati da intensità medie, a cui può essere ricondotta la maggioranza degli stati di mare osservabili, e permettono dunque di affermare come le misure da esso derivate, quali dispersione di cloro e gradiente termico, siano altrettanto robuste e rappresentative degli effetti legati alle condizioni di servizio dell'impianto FSRU.

### 3. ANALISI DEI PARAMETRI D'ONDA

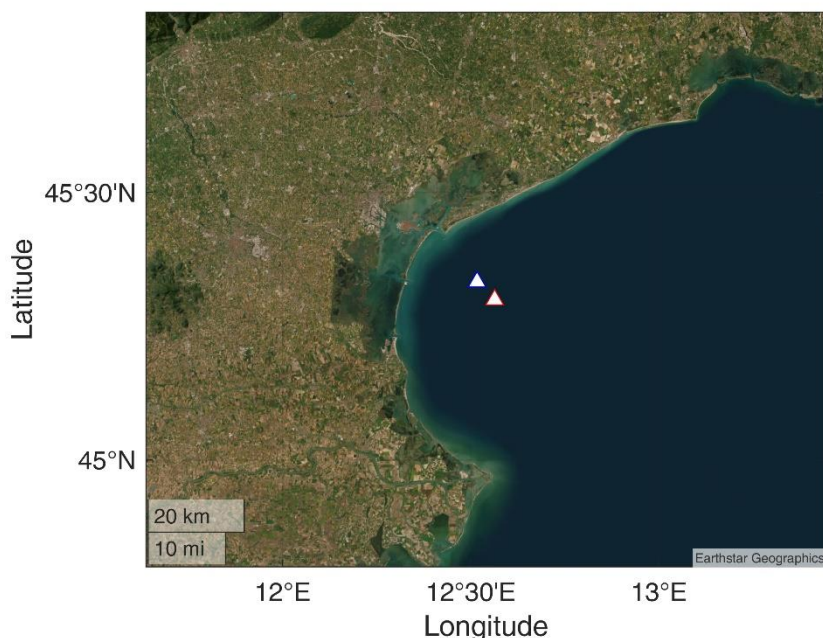
Per quanto riguarda l'analisi dei parametri ondametrici, occorre innanzitutto precisare che non si ha riscontro di boe all'interno del dominio di calcolo. Tuttavia, si può verificare la bontà dei dati ricostruiti numericamente avvalendosi delle due boe ondametriche afferenti alla RON e site in Venezia e Ancona (dunque a nord e sud dell'area di calcolo; si vedano Figura 7 e Figura 8 per le rispettive posizioni). Giova infatti ricordare come la catena modellistica per la ricostruzione dei parametri ondametrici sia stata sviluppata su tutto il bacino del Mediterraneo; pertanto, un buon allineamento tra dati misurati e modellati nei due casi test permette di comprovarne la bontà anche in prossimità della costa di Ravenna.



*Figura 7. Posizione della boa RON (in blu) e del nodo hindcast (in rosso) utilizzato per il confronto in Ancona.*

*Tabella 3. Periodi con dati reperibili per le due boe considerate, utilizzati per i confronti tra osservazioni e dati simulati (intervalli orari).*

Boa	Periodo di misura
Ancona	1999-2013
Venezia	2004-2013



*Figura 8. Posizione della boa RON (in blu) e del nodo hindcast (in rosso) utilizzato per il confronto in Venezia.*

Il confronto sui valori di altezza d'onda significativa ( $H_s$ ) restituisce un'ottima rispondenza tra dati campionati e modellati, sia in Ancora (Figura 9) che in Venezia (Figura 10) così come mostrato dagli indici di errore discussi in precedenza, riportati nella tabella sottostante.

*Tabella 4. Indici di correlazione tra le serie di  $H_s$  osservate dalle boe della RON e i dati modellati dal DICCA.*

Boa	$\rho$	NRMSE
Ancona	0,9	0,53
Venezia	0,8	0,56

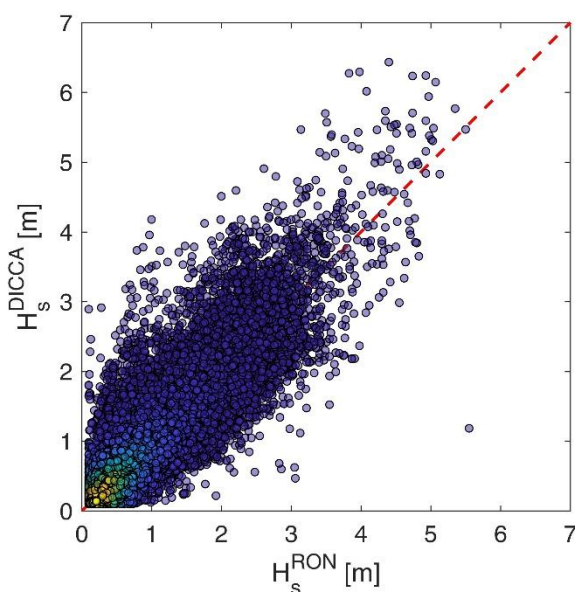


Figura 9. Confronto tra dati misurati ( $H_s^{RON}$ ) e modellati ( $H_s^{DICCA}$ ) in Ancona.

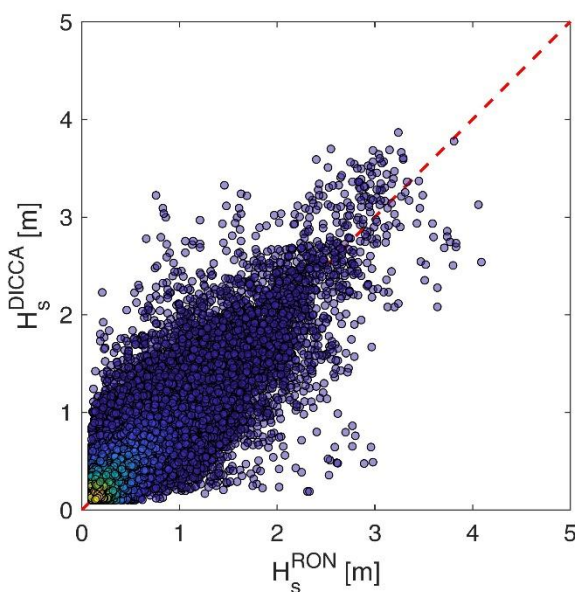


Figura 10. Confronto tra dati misurati ( $H_s^{RON}$ ) e modellati ( $H_s^{DICCA}$ ) in Venezia.