

**Progetto FSRU Alto Tirreno e
Collegamento alla Rete Nazionale
Gasdotti**

REL-AMB-E-00010

**STUDIO MODELLISTICO DI DISPERSIONE
TERMICA/CHIMICA AL LARGO DEL
TERMINAL PORTUALE DI VADO LIGURE (SV)**

Prof. Ing. Giovanni Besio

Dr. Ing. Francesco De Leo

Genova, marzo 2024

SOMMARIO

1.INTRODUZIONE	5
1.1. PREMESSA	5
1.2. SOLUZIONE PROPOSTA	5
1.3. STRUTTURA DEL DOCUMENTO	6
2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLO STUDIO	7
2.1. AREA DI STUDIO	7
2.2. CONFIGURAZIONE PROGETTUALE CONSIDERATA	8
3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE	10
4. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO	13
5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	17
6. CONCLUSIONI	40

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Punto di ormeggio lungo la costa ligure a diversi gradi di ingrandimento. Si noti che, rispetto alla foto aerea (fonte: Google Earth), è in fase di realizzazione una modifica nel layout della diga principale del Porto di Vado di cui si terrà conto nelle analisi di dispersione condotte in questo studio.	7
Figura 2. Griglia computazionale implementata per il caso studio.	11
Figura 3. Batimetria (ovvero, quota del fondale) nell'area di studio.....	11
Figura 4. Punto hindcast utilizzato per la definizione delle forzanti meteo-marine. ..	13
Figura 5. Serie di altezze d'onda significativa lungo la finestra temporale considerata.	14
Figura 6. Serie di velocità del vento lungo la finestra temporale considerata.	15
Figura 7. Oscillazione mareale in corrispondenza della finestra temporale considerata per le simulazioni. In figura è visibile il regime semi-diurno e micro-tidale dell'area. Le oscillazioni associate a periodo di due settimane corrispondono alle fasi di spring e neap tides.	16
Figura 8. Spiegazione delle scale di colore utilizzate per mostrare le distribuzioni spaziali delle grandezze scalari considerate. La barra di sx si riferisce al cloro in superficie; la barra al centro si riferisce al cloro sul fondale; la barra sulla dx indica il gradiente termico (si usa la stessa convenzione per strato superficiale e quota al fondo).	18
Figura 9. Punti di controllo usati per il monitoraggio dei profili di cloro e temperatura.	19



Figura 10. Concentrazione di cloro dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione. Strato superficiale. Il triangolo indica l'ormeggio della FSRU (vedi analogamente le figure sottostanti).....	20
Figura 11. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione.....	20
Figura 12. Concentrazione di cloro dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	21
Figura 13. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione.....	21
Figura 14. Concentrazione di cloro dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	22
Figura 15. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione.....	22
Figura 16. Concentrazione di cloro dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	23
Figura 17. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione.....	23
Figura 18. Gradiente termico dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	24
Figura 19. Gradiente termico sul fondo dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione.	24
Figura 20. Gradiente termico dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	25
Figura 21. Gradiente termico sul fondo dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione.	25
Figura 22. Gradiente termico dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	26
Figura 23. Gradiente termico sul fondo dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione.	26
Figura 24. Gradiente termico dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.	27
Figura 25. Gradiente termico sul fondo dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione.	27
Figura 26. Concentrazione di Cloro in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4). Strato superficiale.	30
Figura 27. Segue da Figura 26.	31
Figura 28. Concentrazione di Cloro sul fondale in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4).	32
Figura 29. Segue da Figura 28.	33
Figura 30. Temperatura in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4). Strato superficiale.	34
Figura 31. Segue da Figura 30.	35

Figura 32. Temperatura sul fondale in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4).	36
Figura 33. Segue da Figura 32.	37
Figura 34. Concentrazione di cloro in corrispondenza di tutti i punti di controllo di cui a Figura 9. Strato superficiale.	38
Figura 35. Concentrazione di cloro sul fondo in corrispondenza di tutti i punti di controllo di cui a Figura 9.	39

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Coordinate del punto di ormeggio della FSRU espresse in due diversi sistemi di riferimento (SR).	7
Tabella 2. Condizioni di operatività considerate nel modello numerico.	9
Tabella 3. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).	14
Tabella 4. Coordinate dei punti selezionati per l'estrazione dei risultati lungo tutta la finestra temporale considerata (SR: WGS84). L'etichetta ID indica il codice usato più avanti per la discussione dei risultati.	19

1. INTRODUZIONE

1.1. PREMESSA

Nell'ambito delle iniziative legate alla realizzazione di nuove capacità di rigassificazione regolate dall'art. 5 del DL n.50 del 17/5/2022 e mirate a diversificare le fonti di approvvigionamento di gas ai fini della sicurezza energetica nazionale, Snam FSRU Italia, società Proponente e controllata al 100% da Snam S.p.A ("Snam"), ha ottenuto in data 25/10/2022 l'autorizzazione unica per la realizzazione di un Terminale di Rigassificazione nel porto di Piombino, tramite l'ormeggio di un mezzo navale tipo FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) e la realizzazione delle connesse infrastrutture per l'allacciamento alla rete di trasporto esistente (di seguito l'"Autorizzazione Unica").

L'Autorizzazione Unica ha prescritto di presentare, entro 45 giorni dalla pubblicazione della Ordinanza medesima sul Bollettino Regionale della Toscana, il progetto di ricollocazione della FSRU in un sito off-shore, nonché il progetto relativo agli interventi necessari per il disormeggio della FSRU Tundra dal porto di Piombino decorso il suddetto termine di tre anni dalla sua entrata in esercizio. Con successive Ordinanze di proroga, il predetto termine di presentazione del progetto di ricollocazione è stato fissato al 26 giugno 2023.

Il Progetto FSRU Alto Tirreno, di cui il presente documento è parte integrante insieme ai suoi allegati, illustra la soluzione sviluppata dagli ingegneri e specialisti incaricati da Snam per il ricollocamento della FSRU TUNDRA per i successivi 22 anni una volta lasciato il porto di Piombino. In particolare, gli allegati tecnici riportano le principali caratteristiche del Progetto, analizzano gli aspetti ambientali, paesaggistici ed urbanistici e riportano le valutazioni relative ai temi Seveso ed antincendio.

1.2. SOLUZIONE PROPOSTA

L'analisi condotta dal Proponente ha escluso la possibilità di trovare un ormeggio a lungo termine della FSRU all'interno di un porto diverso da quello di Piombino, non rinvenendosi in nessun altro porto le seguenti caratteristiche peculiari proprio di Piombino, quali: (i) una banchina idonea per geometria e capacità strutturali, (ii) un pescaggio del porto ovunque maggiore di 15 m, (iii) un punto di ingresso nella Rete nazionale Gasdotti ad una distanza ragionevole ed in grado di ricevere l'incremento di portata previsto (i.e., 5 miliardi di metri cubi/anno).

La ricerca della soluzione si è indirizzata verso possibili siti offshore verificando la sussistenza di tre requisiti essenziali: (i) il collegamento in un punto della Rete Nazionale in grado di ricevere la portata prevista, (ii) la fattibilità tecnica, urbanistica ed ambientale del tracciato della condotta a mare ed a terra, (iii) la capacità della FSRU di svolgere con continuità il servizio di rigassificazione rispetto alle condizioni meteomarine attese nel sito prescelto.

I requisiti sopra richiamati hanno portato a selezionare un sito offshore della costa ligure di ponente di fronte a Vado Ligure (SV) potendo evitare sia le rotte di ingresso/uscita del traffico navale che sfruttare l'approdo a terra in prossimità di un varco in adiacenza all'area industriale di Tirreno Power.

1.3. STRUTTURA DEL DOCUMENTO

In fase di predisposizione degli studi ambientali, il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale (DICCA) dell'Università degli Studi di Genova è stato incaricato di implementare un modello numerico per valutare la dispersione del contenuto termico e chimico delle acque di scarico dell'impianto a servizio della FSRU Tundra in ambiente marino. Tale studio fornirà quindi le informazioni relative alle caratteristiche di dispersione di ipoclorito e di temperatura sulle quali sarà possibile valutare i possibili effetti sull'ambiente marino dovuti al rilascio delle acque di processo della FSRU.

Il presente documento illustra le analisi effettuate e ne riporta i principali risultati ed è strutturato come segue:

- il Paragrafo 2 presenta l'area di studio e i dati progettuali;
- il Paragrafo 3 introduce il modello numerico utilizzato per il calcolo dell'idrodinamica e della conseguente dispersione dei residui (cloro e temperatura);
- i dati meteo-marini utilizzati per forzare il modello sono mostrati nel Paragrafo 4;
- il Paragrafo 5 mostra le risultanze delle simulazioni.

2. INQUADRAMENTO GENERALE DELLO STUDIO

2.1. AREA DI STUDIO

L'ubicazione selezionata per il ricollocamento a lungo termine della FSRU Tundra interessa un sito al largo della costa ligure di ponente, al largo di Vado Ligure (SV). Il punto di ormeggio selezionato, posto all'interno della cosiddetta "zona Charlie" attualmente destinata all'allibio di navi commerciali, è mostrato nella figura sottostante. La Tabella 1 ne riporta le relative coordinate.

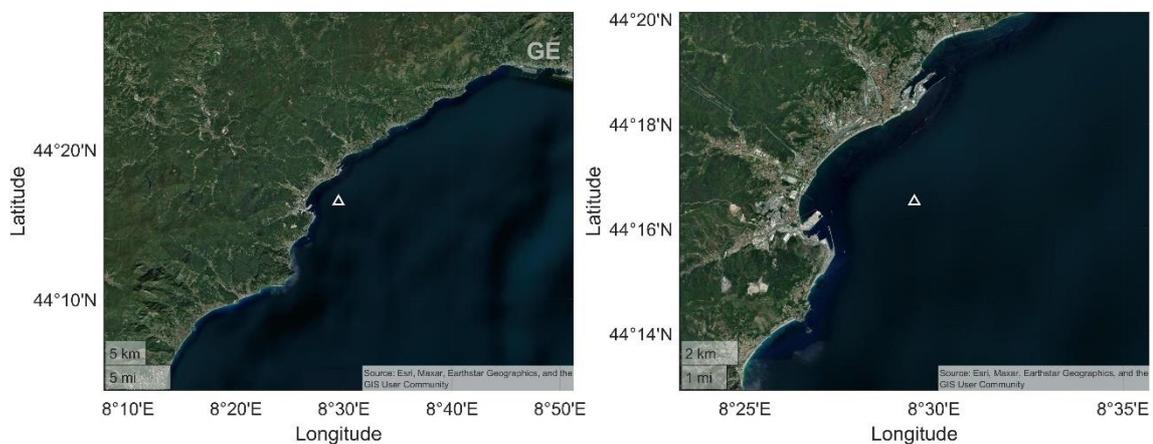


Figura 1. Punto di ormeggio lungo la costa ligure a diversi gradi di ingrandimento. Si noti che, rispetto alla foto aerea (fonte: Google Earth), è in fase di realizzazione una modifica nel layout della diga principale del Porto di Vado di cui si terrà conto nelle analisi di dispersione condotte in questo studio.

Tabella 1. Coordinate del punto di ormeggio della FSRU espresse in due diversi sistemi di riferimento (SR).

	LON	LAT
WGS 84	8,49524	44,27651
UTM 32	459720	4902709

Nel suddetto punto sarà ormeggiata la FSRU TUNDRA, che a sua volta verrà rifornita ad intervalli regolari (5/7 giorni) da metaniere di taglia variabile nonché potrà rifornire metaniere di piccola/media taglia (metaniere Small Scale LNG). L'FSRU

assicurerà un flusso annuo di almeno 5 miliardi di standard metri cubi di gas naturale all'interno della rete nazionale gasdotti.

Il sistema di rigassificazione installato a bordo della FSRU Tundra utilizza l'acqua di mare come fonte di calore per la vaporizzazione del gas naturale liquido (GNL). L'acqua utilizzata nel ciclo di vaporizzazione del gas liquefatto viene quindi scaricata in mare ad una temperatura inferiore rispetto a quella di prelievo (massimo -7°C) e con un contenuto di ipoclorito di sodio (massimo $0,2\text{ mg/l}$) necessario per prevenire la crescita di organismi marini nel sistema di scarico.



2.2. CONFIGURAZIONE PROGETTUALE CONSIDERATA

La configurazione progettuale considerata nel modello numerico assume condizioni di funzionamento conservative rispetto alla valutazione dei processi di dispersione di temperatura e concentrazione che si realizzano durante il processo di rigassificazione, anche se non rappresentative dell'esercizio ordinario della FSRU. In particolare, si è assunto:

- a. Portata di acqua di mare durante la rigassificazione: si è assunto il massimo valore tecnicamente raggiungibile, anche che si verificherà per tempi molto limitati, pari a circa $18.000\text{ m}^3/\text{h}$.
- b. Temperatura dell'acqua di mare in uscita dai vaporizzatori: si è assunto il valore del massimo gradiente di temperatura raggiungibile (corrispondente alla massima portata di rigassificazione di cui al punto a. precedente) pari a un ΔT di -7°C rispetto alla temperatura dell'acqua in entrata. Inoltre, è stata assunta una temperatura ambientale dell'acqua di mare pari a 13°C al fine di simulare condizioni invernali. Infatti, tale condizione risulta essere maggiormente conservativa rispetto alla simulazione delle condizioni estive in quanto non sono presenti eventuali termoclini che potrebbero inibire lo sprofondamento di acque più fredde verso i fondali circostanti. In condizioni estive, infatti, la differenza di temperatura conseguente alla dispersione delle acque di processo potrebbe non essere sufficiente a far oltrepassare il gradiente termocline tipico del periodo estivo alle acque di processo; queste ultime rimarrebbero quindi confinate negli strati superficiali non andando a coinvolgere i fondali marini.
- c. Contenuto di cloro dell'acqua di mare allo scarico: si è assunto un valore pari a $0,2\text{ mg/l}$, equivalente a $2 \times 10^{-4}\text{ kg/m}^3$.
- d. Caratteristiche di presa e scarico della FSRU: sono state considerate le sezioni di carico e scarico aventi diametro pari a $1,4\text{ m}$. Questo corrisponde a velocità di flusso pari a $3,25\text{ m/s}$, data la portata dell'impianto ($18'000\text{ m}^3/\text{ora}$ equivalgono a $5\text{ m}^3/\text{s}$). Tutte le condizioni sui parametri di presa e scarico (temperatura, velocità

del flusso, concentrazione di cloro), implementate all'interno del modello di calcolo (vedi Paragrafo 3) si intendono riferite a profondità pari a -8 m e -3,3 m, rispettivamente.

Una sintesi dei settaggi imposti in corrispondenza di carico e scarico dell'impianto è mostrata in Tabella 2.



Tabella 2. Condizioni di operatività considerate nel modello numerico.

PRESA (profondità -8,0 m)				
Portata [m ³ /s]	Velocità [m/s]	Salinità [ppt]	Temperatura [°C]	Cloro [kg/m ³]
5	3.25	37	13	0
SCARICO (profondità -3,3 m)				
Portata [m ³ /s]	Velocità [m/s]	Salinità [ppt]	Temperatura [°C]	Cloro [kg/m ³]
5	3.25	36	T presa -7°C	0,0002

3. MODELLAZIONE NUMERICA DELL'IDRODINAMICA E DELLA DISPERSIONE

Per la simulazione dell'idrodinamica marina e per lo studio dell'evoluzione spazio/temporale della temperatura e della concentrazione di cloro nell'area in prossimità della FSRU è stato impiegato il modello numerico Delft3D, sviluppato e mantenuto da Deltares (precedentemente Delft Hydraulics; <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>)¹. Tale modello numerico è uno dei più robusti e affidabili strumenti per lo studio della dinamica delle correnti, del trasporto di sedimenti, delle onde e della qualità delle acque, sia da un punto di vista applicativo che da un punto di vista di sviluppo e ricerca. Delft3D è composto da diversi moduli che possono essere eseguiti indipendentemente o possono essere accoppiati per risolvere mutuamente le rispettive dinamiche.

In particolare, Delft3D-FLOW è un modulo che risolve l'idrodinamica ed il trasporto, prendendo in considerazione una vasta gamma di forzanti quali eventi meteorologici, maree, scarichi antropici, etc. Le equazioni di governo del modulo sono quelle, ben note, di continuità e di conservazione della quantità di moto lungo le due direzioni orizzontali (*Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* o RANS). Le suddette equazioni sono risolte dal modello con approssimazione idrostatica tramite schemi numerici alle differenze finite, i quali richiedono la definizione di una griglia computazionale che può essere cartesiana rettangolare oppure curvilinea. Nel presente studio è stata impiegata una maglia cartesiana a risoluzione variabile, con infittimento progressivo in prossimità della FSRU e dell'isola di Bergeggi per permettere un maggior grado di dettaglio in prossimità dello scarico e di un'area di particolare interesse naturalistico.

In un secondo momento, a ciascun nodo della maglia è stato associato un valore di profondità a partire dai dati batimetrici forniti da EMODNET (<https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>), combinati con dati dell'Istituto Idrografico della Marina Militare. La Figura 2 mostra l'estensione dell'intero dominio computazionale del modello. È bene precisare come, sebbene la nave possa ruotare, le dimensioni della stessa non sono tali da comportare differenze tangibili nella dinamica della dispersione; pertanto, si è considerata un'unica configurazione dei punti di carico e scarico della FSRU. La batimetria interpolata sul dominio computazionale è mostrata in Figura 3.

¹ Deltares, D. (2013). Delft3D-FLOW user manual. Deltares Delft, The Netherlands, 330.

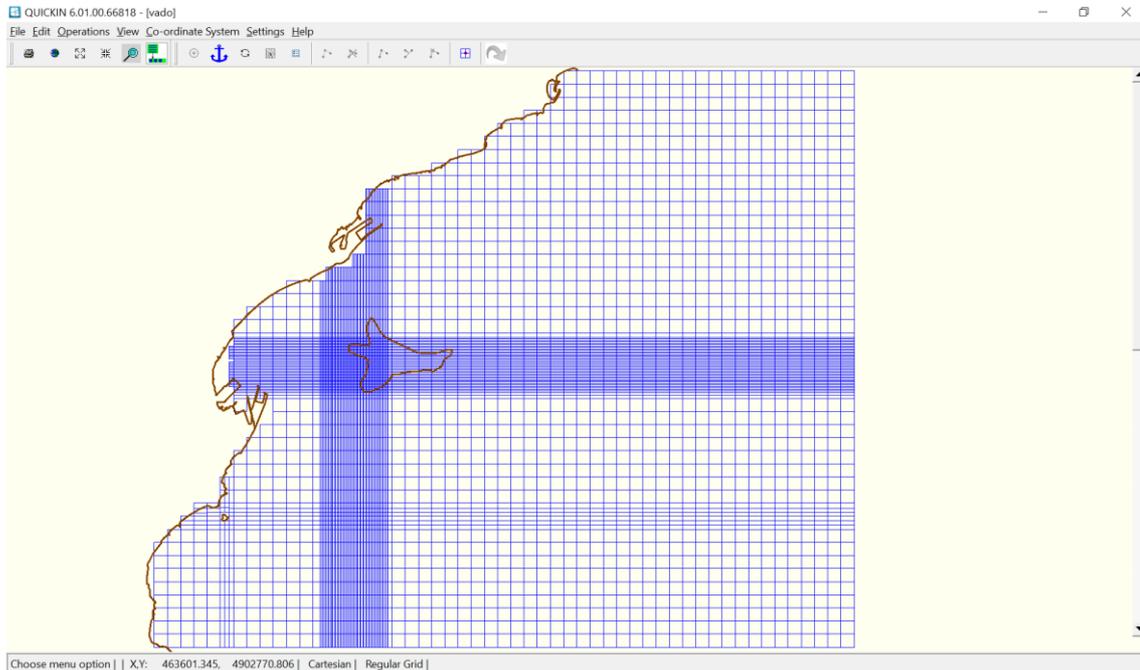


Figura 2. Griglia computazionale implementata per il caso studio.

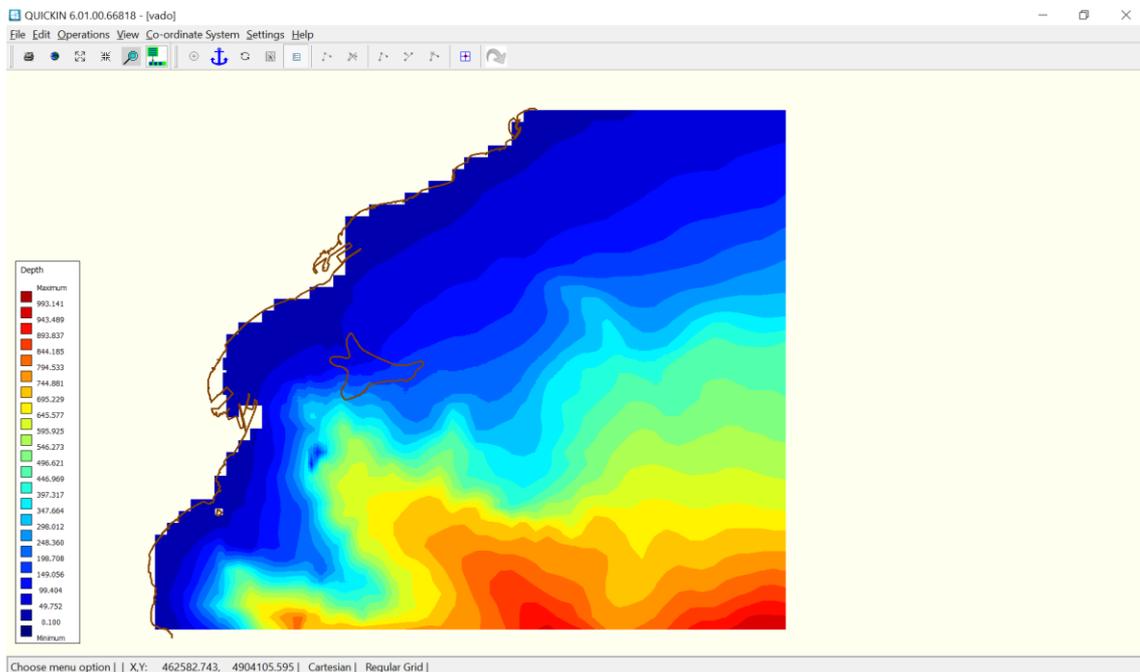


Figura 3. Batimetria (ovvero, quota del fondale) nell'area di studio.

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

dicca.unige.it

P. IVA 00754150100

+39 010 3352491

Via Montallegro 1, 16145 Genova

direttore@dicca.unige.it



Per poter provvedere alla soluzione numerica del problema è necessario definire: i) le *condizioni al contorno*, ovvero le forzanti ambientali che controllano la dinamica marina e i conseguenti fenomeni di trasporto e dispersione dei reflui; ii) condizioni di *chiusura*, di modo che il modello abbia tutte le informazioni necessarie per poter evolvere nel tempo e nello spazio e per ricavare la soluzione del campo di moto.

In riferimento alle prime, la scelta si è avvalsa di dati meteo-marini ricostruiti all'interno dell'area di studio, così come riportato nel Paragrafo 4; per quanto attiene alle seconde, per quanto riguarda la turbolenza è stato impiegato un classico modello $k - \varepsilon$. La condizione al contorno al fondo viene fornita in funzione della tensione che dipende da un parametro di scabrezza tipico, impostato dall'utente. Le relazioni che legano le tensioni al fondo e sulla superficie libera con le derivate della velocità sono quelle classiche relative all'imposizione di una velocità di attrito a un determinato livello di riferimento.

4. CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI AMBIENTALI NELL'AREA DI STUDIO

Il modello numerico idrodinamico di cui al Paragrafo 3 può essere forzato sulla superficie libera da un vento e una pressione atmosferica variabili nel tempo e nello spazio, e sui bordi da forzanti d'onda o variazioni di livello legate alle escursioni mareali. A tal proposito, sono stati presi a riferimento i dati meteo-marini (anemometrici ed ondometrici) elaborati dal DICCA (www3.dicca.unige.it/meteocean/hindcast.html). Tramite una re-analisi delle condizioni atmosferiche, il DICCA ha ricostruito un database, detto *hindcast*, contenente dati orari di onda, vento e campo barico definiti su una griglia con risoluzione lon/lat pari approssimativamente di 10 km, estesa a tutto il bacino del Mar Mediterraneo, nel periodo 1979-2023². L'implementazione dell'*hindcast* è avvenuta in seguito alla validazione e alla ottimizzazione della catena di modelli numerici impiegata (WRF per la parte meteo e WaveWatchIII per la parte onde) e ad oggi questi dati sono stati utilizzati in numerose ricerche ed applicazioni. Il nodo utilizzato per la definizione delle variabili meteo-marine al largo di Vado Ligure è lo 000258, mostrato in Figura 4 (le coordinate rispettive sono riportate in Tabella 3).

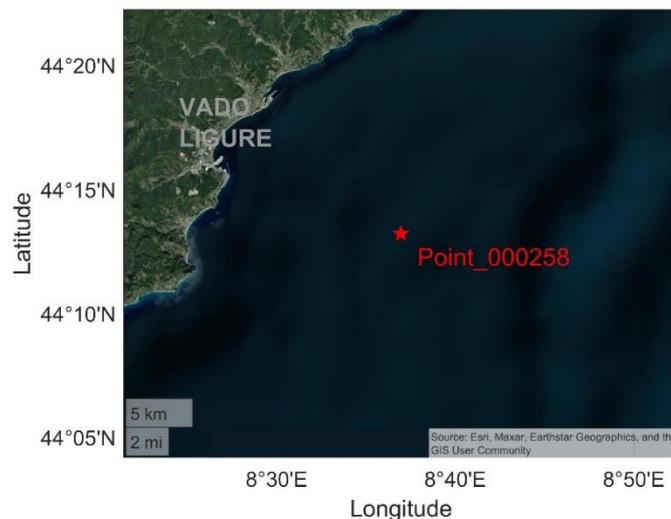


Figura 4. Punto hindcast utilizzato per la definizione delle forzanti meteo-marine.

² Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2013). Developing and validating a forecast/hindcast system for the Mediterranean Sea. *Journal of Coastal Research*, (65 (10065)), 1551-1556.

Mentaschi, L., Besio, G., Cassola, F., & Mazzino, A. (2015). Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea. *Ocean Modelling*, 90, 82-94.

Tabella 3. Coordinate del nodo hindcast utilizzato nel prosieguo del report (SR: WGS84).

Nodo	Lon	Lat
000258	8,616	44,22

Al fine di selezionare condizioni significative per l'area in esame, è stata considerata una finestra di durata pari a 5 settimane giornali (i.e., un mese), selezionando il subset associato ad un contenuto energetico delle onde (calcolato come sommatoria delle altezze significative d'onda) pari alla media calcolata lungo tutto il periodo coperto dai dati nel nodo 000258. Le serie delle altezze d'onda significativa (H_s) e velocità del vento (U_w) sono mostrate rispettivamente in Figura 5 e Figura 6.

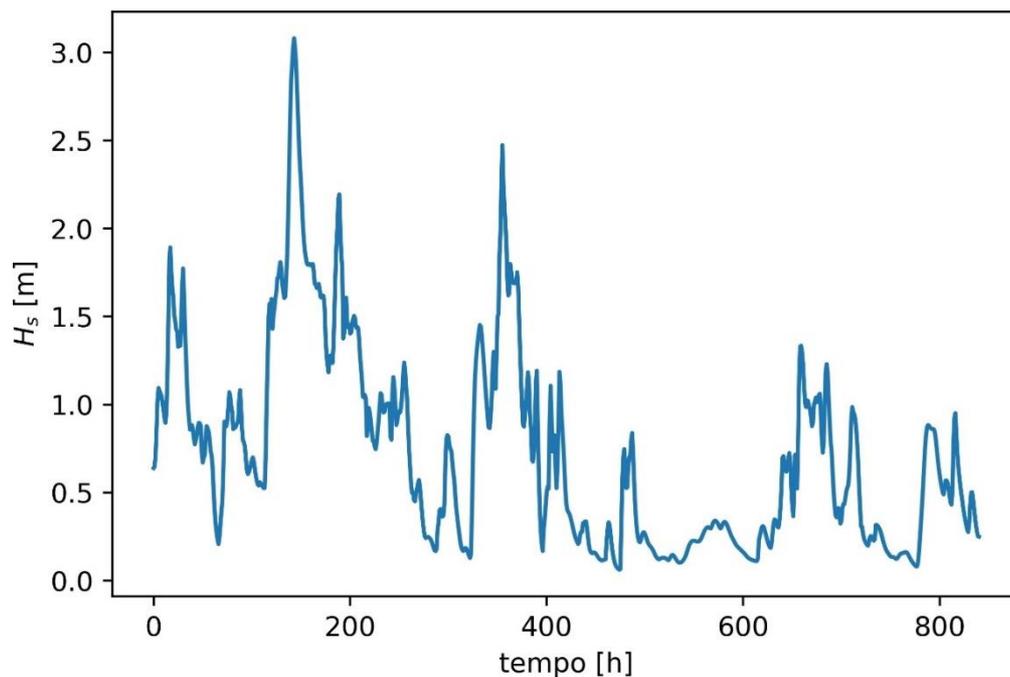


Figura 5. Serie di altezze d'onda significativa lungo la finestra temporale considerata.

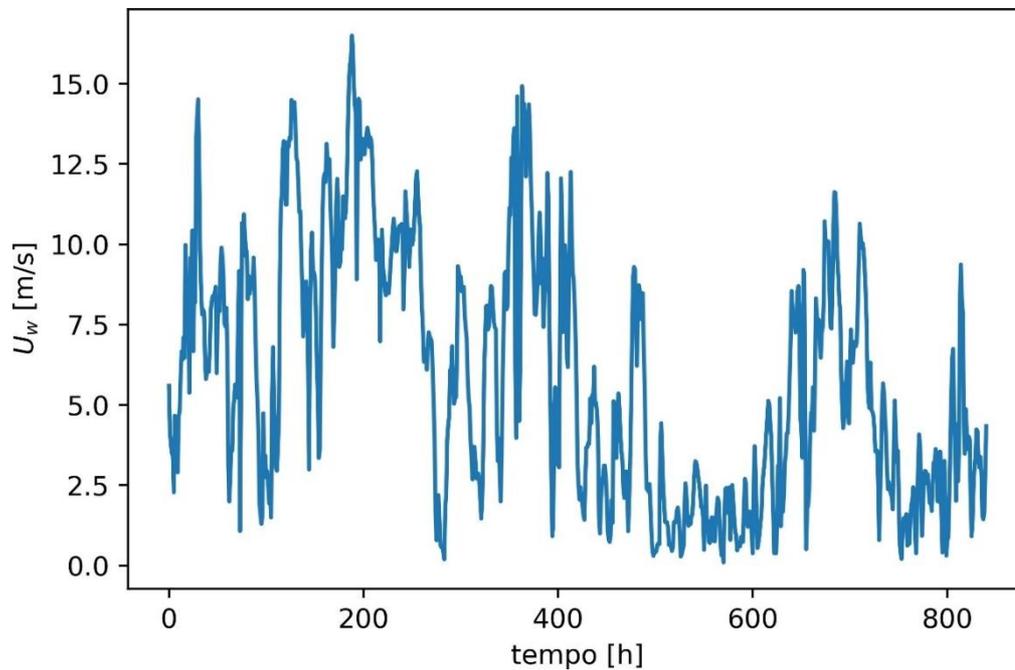


Figura 6. Serie di velocità del vento lungo la finestra temporale considerata.

In seguito sono state ricavate: i) le forzanti di marea (di seguito indicate come $\Delta\eta$) in corrispondenza del nodo hindcast grazie al Software di Previsione di Marea (TPXO.3) fornito dall'Università dello Stato dell'Oregon³, sullo stesso intervallo di tempo e con la stessa frequenza dei dati meteomarini di hindcast (vedi Figura 7); ii) i dati di corrente a scala di bacino dal repository del Copernicus Marine Service (di seguito abbreviato in CMS; <https://marine.copernicus.eu/it>). Anche in questo caso, le serie temporali sono state selezionate in concomitanza delle date associate allo scenario meteomarino precedentemente identificato.

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

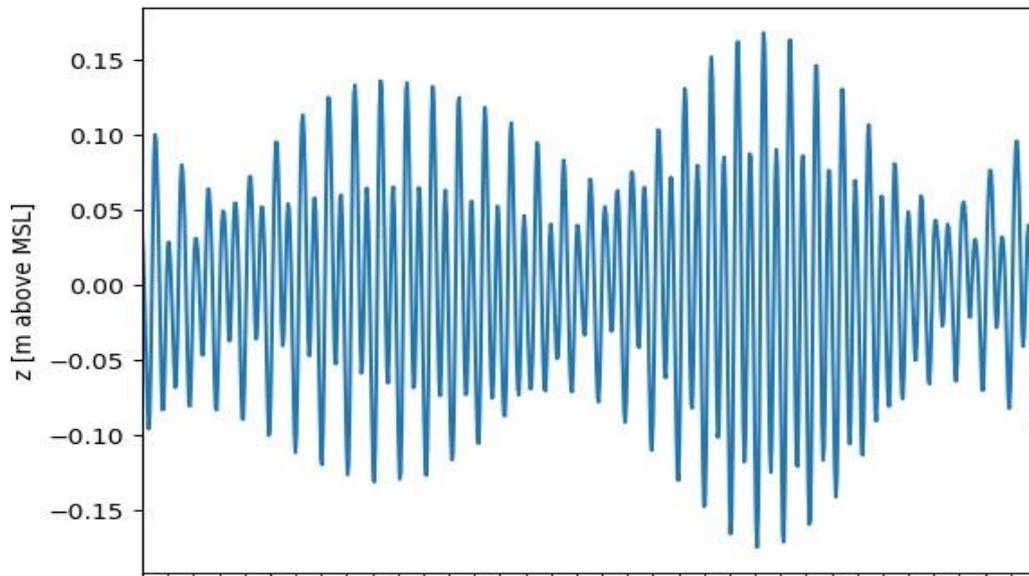


Figura 7. Oscillazione mareale in corrispondenza della finestra temporale considerata per le simulazioni. In figura è visibile il regime semi-diurno e micro-tidale dell'area. Le oscillazioni associate a periodo di due settimane corrispondono alle fasi di spring e neap tides.

5. RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

Il modello è stato dunque forzato con gli scenari meteo-marini di cui al precedente paragrafo, imponendo le serie di onda e marea sul lato Est della maglia (Figura 2), mentre i dati di vento interessano l'intero dominio di calcolo, unitamente alle serie del CMS sui lati Nord e Sud del dominio computazionale.

Nel seguito, sono presentati i risultati ottenuti dalla modellazione numerica per la configurazione progettuale descritta in precedenza.

Guida alla lettura dei risultati:

- a. **Le distribuzioni spaziali delle grandezze scalari** (concentrazione del cloro e temperatura) vengono presentate per **quattro diversi istanti temporali** nell'arco della durata della simulazione (i.e., un mese), ovvero 1 giorno, 7 giorni, 15 giorni e 30 giorni dall'inizio della simulazione, **in corrispondenza del fondale e della superficie**.
- b. Nelle figure Figura 10, Figura 12, Figura 14, e Figura 16, vengono presentate **le mappe relative agli ipocloriti** per i quattro istanti temporali considerati in riferimento allo **strato superficiale**. I diversi livelli di concentrazione sono rappresentati **con tonalità di rosso** crescenti, da 0 (limite inferiore che indica assenza di ipoclorito) a 2×10^{-3} mg/l (i.e., 0,002 mg/l), pari ad un centesimo della concentrazione di cloro imposta allo scarico della FSRU. Le figure Figura 11, Figura 13, Figura 15 e Figura 17, presentano gli stessi risultati referiti alla **quota del fondale**; in questo caso, il limite superiore è posto pari a 2×10^{-3} mg/l (i.e., 0,002 mg/l), ossia un millesimo della concentrazione di cloro imposta allo scarico della FSRU. Tale scelta si rende necessaria al fine di poter apprezzare eventuali variazioni rispetto alla condizione indisturbata, dal momento che sul fondale le concentrazioni risultano essere ridimensionate (si vedano a tal proposito i commenti ai risultati più avanti nel documento).
- c. Nelle figure Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24 e Figura 25 vengono presentate **le mappe relative alla differenza di temperatura** per i quattro istanti temporali considerati, in cui viene rappresentata la differenza registrata fra la temperatura ambiente, pari a 13°C (vedi Tabella 2), e la temperatura indotta nell'area dovutamente alla presenza dello scarico della FSRU. Le diverse **tonalità di blu** variano da -0.01°C (ovvero, un centesimo di grado), che equivale ad una temperatura pari a 12.99°C, a 0°C, condizione quest'ultima rappresentata dal colore bianco, che indica una temperatura inalterata e dunque eguale alla temperatura ambientale considerata nel modello.

- Le convenzioni utilizzate per rappresentare i risultati attraverso diverse scale di colore di cui ai punti b., c. sono esplicitate in Figura 8.
- d. Nelle figure da Figura 26 a Figura 35 si riportano **i valori di temperatura e concentrazione di cloro lungo tutto l'arco della simulazione** in corrispondenza di **otto punti di controllo** ritenuti indicatori di condizioni ambientali potenzialmente sensibili mostrati in Figura 9 e le cui coordinate sono riportate nella Tabella 4 sottostante. I risultati sono estratti su intervalli di dieci minuti lungo tutto l'arco del mese considerato.
- e. A valle della presentazione dei risultati è riportato un commento conclusivo riassuntivo del comportamento della dispersione della concentrazione e della temperatura nel caso analizzato.

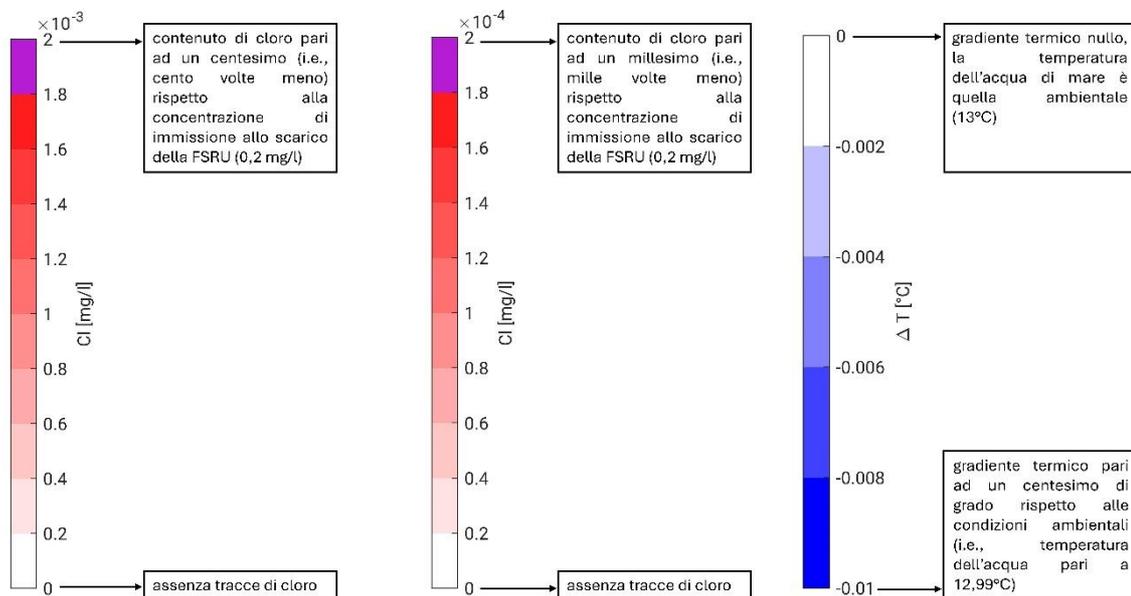


Figura 8. Spiegazione delle scale di colore utilizzate per mostrare le distribuzioni spaziali delle grandezze scalari considerate. La barra di sx si riferisce al cloro in superficie; la barra al centro si riferisce al cloro sul fondale; la barra sulla dx indica il gradiente termico (si usa la stessa convenzione per strato superficiale e quota al fondo).

Tabella 4. Coordinate dei punti selezionati per l'estrazione dei risultati lungo tutta la finestra temporale considerata (SR: WGS84). L'etichetta ID indica il codice usato più avanti per la discussione dei risultati.

Punto	ID	lon	Lat
Noli	A1	8.4230	44.2123
Bergeggi	A2	8.4503	44.2304
Vado 1	A3	8.4496	44.2449
Vado2	A4	8.4650	44.2558
FSRU	A5	8.4995	44.2762
coralligeno 1	A6	8.5236	44.2764
coralligeno 2	A7	8.5032	44.2834
Savona	A8	8.4883	44.2958

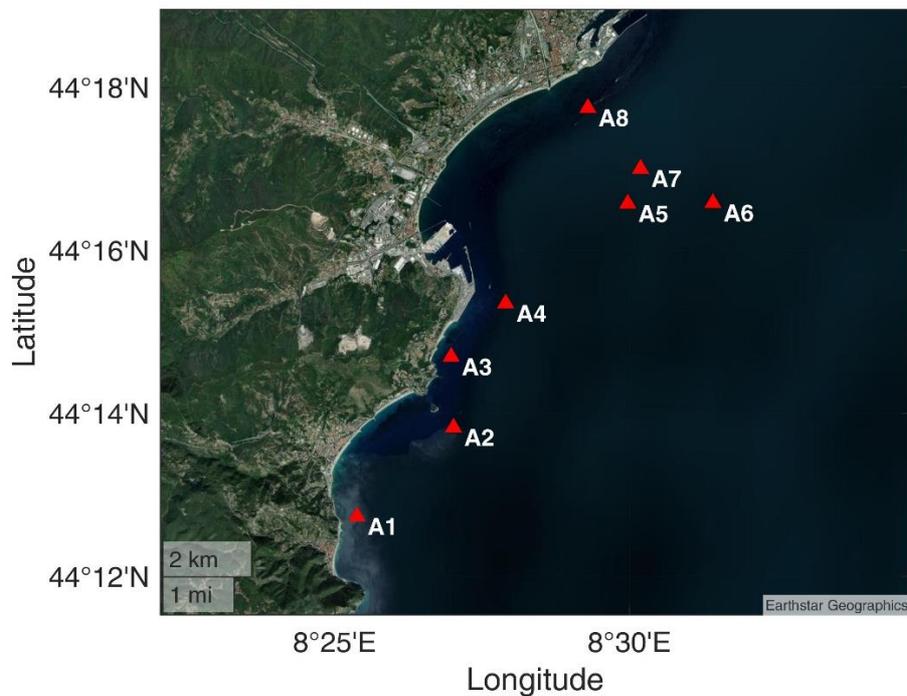


Figura 9. Punti di controllo usati per il monitoraggio dei profili di cloro e temperatura.

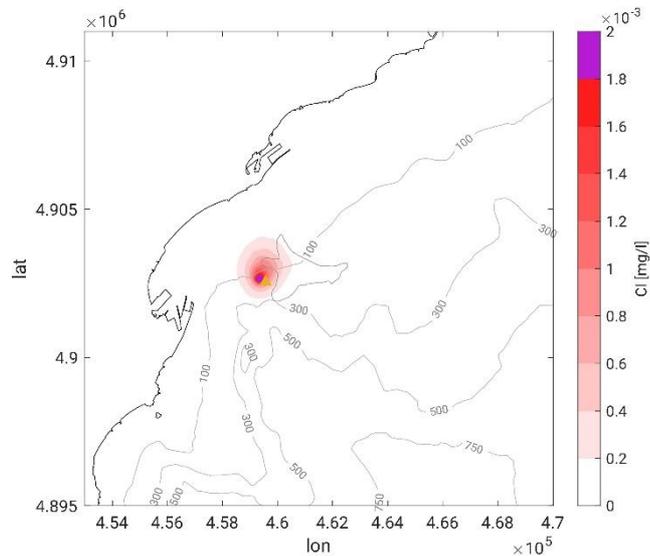


Figura 10. Concentrazione di cloro dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione. Strato superficiale. Il triangolo indica l'ormeggio della FSRU (vedi analogamente le figure sottostanti).

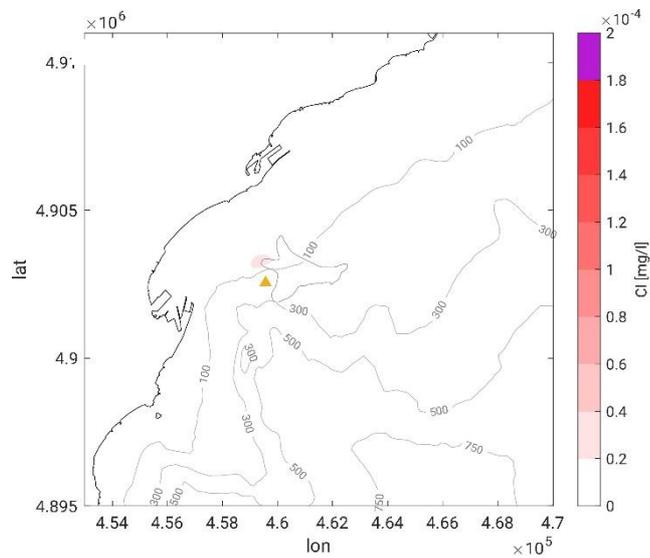


Figura 11. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione.

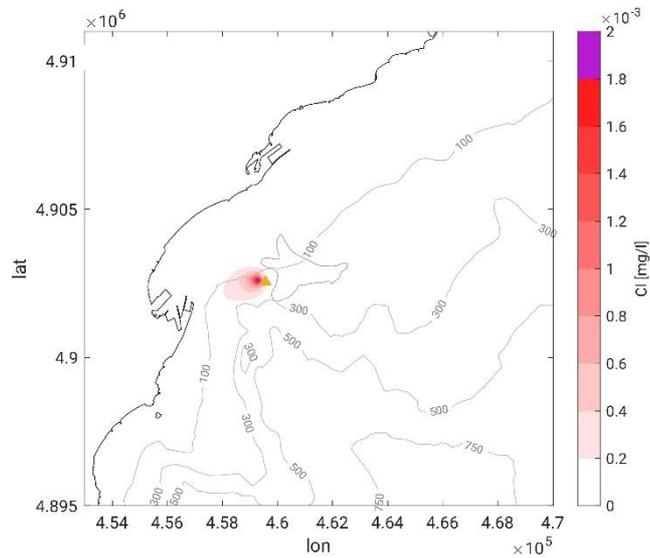


Figura 12. Concentrazione di cloro dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

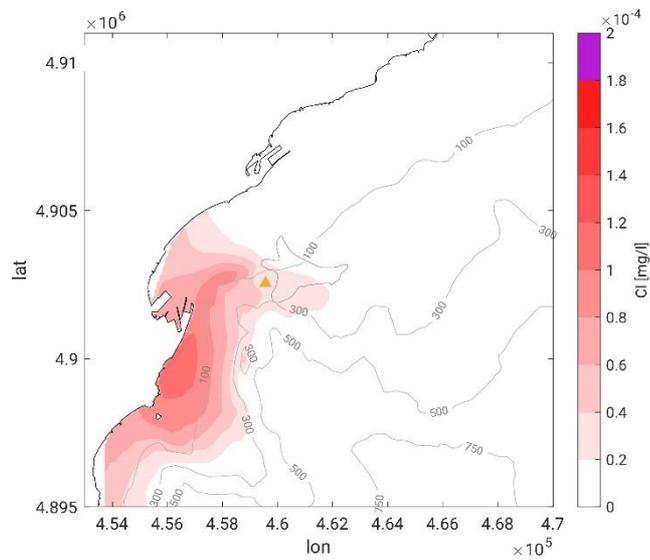


Figura 13. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione.

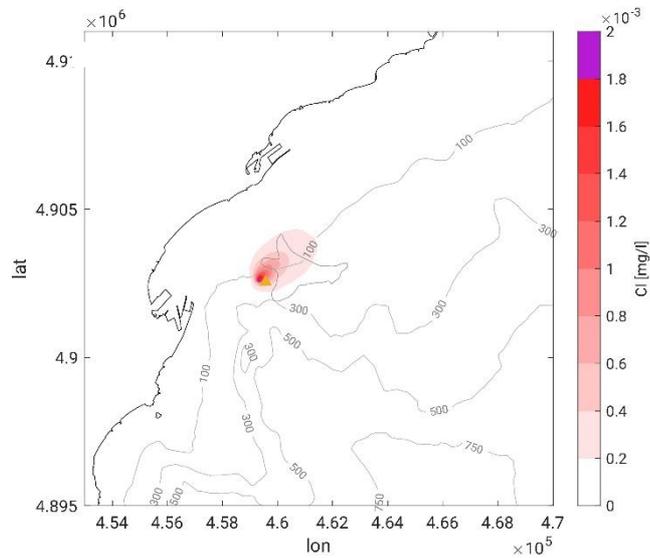


Figura 14. Concentrazione di cloro dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

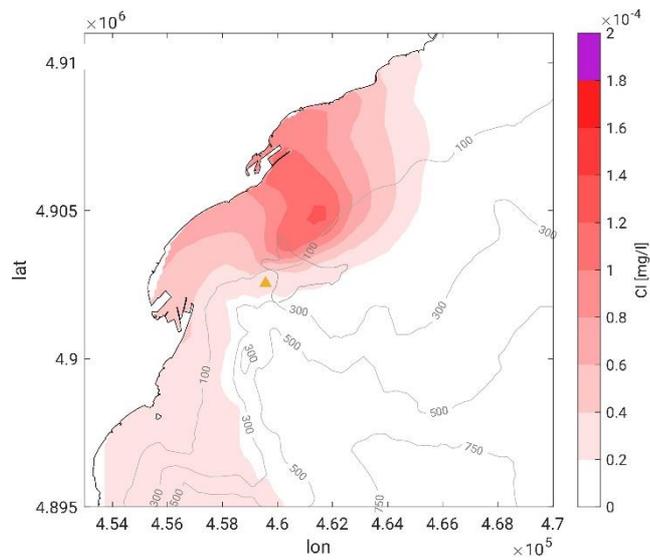


Figura 15. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione.

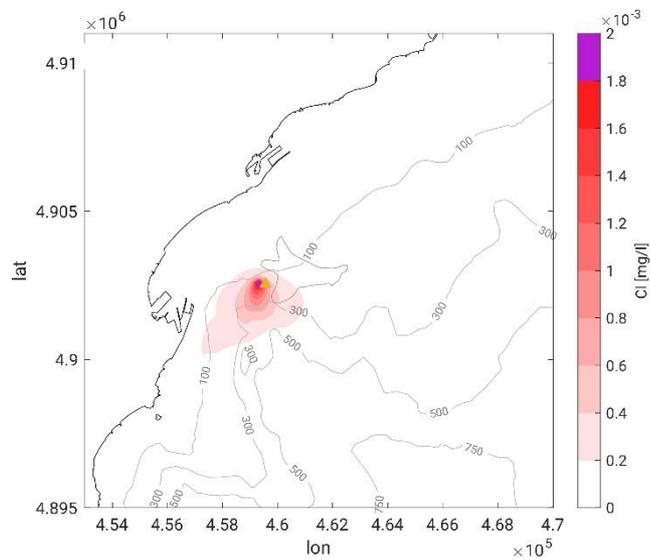


Figura 16. Concentrazione di cloro dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

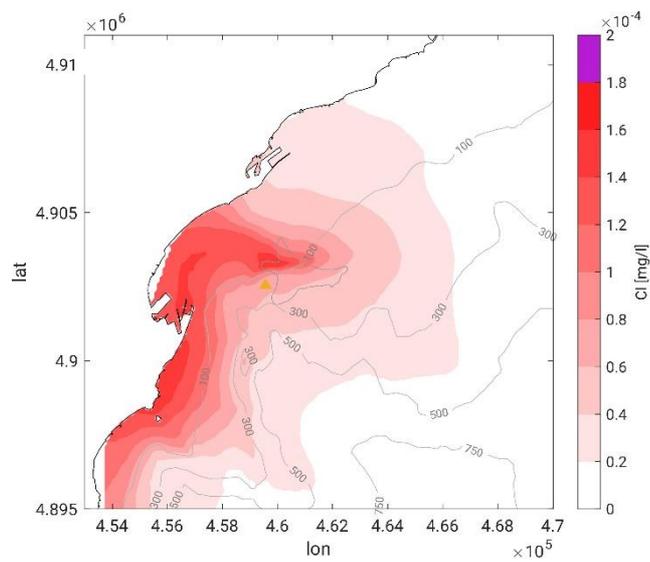


Figura 17. Concentrazione di cloro sul fondo dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione.

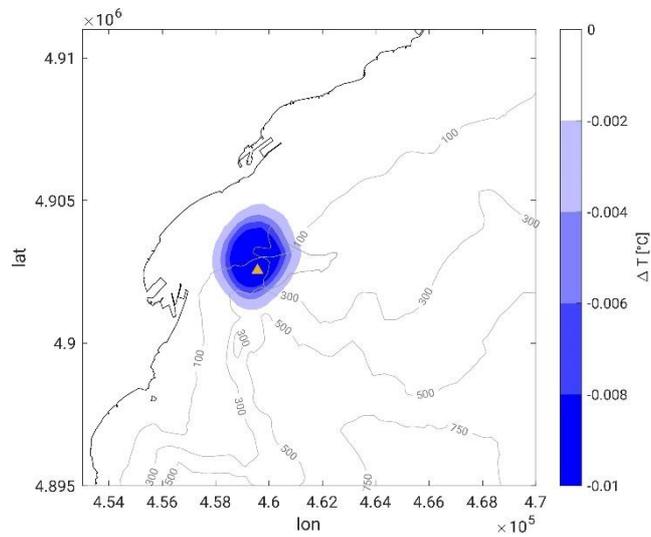


Figura 18. Gradiente termico dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

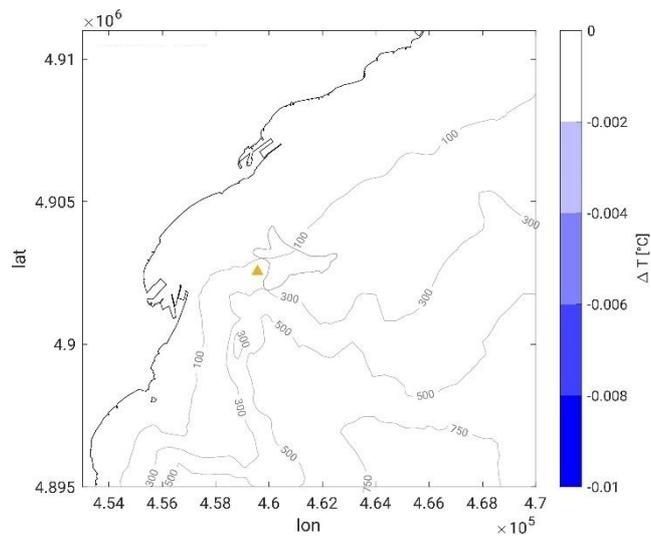


Figura 19. Gradiente termico sul fondo dopo 1 giorno dall'inizio della simulazione.

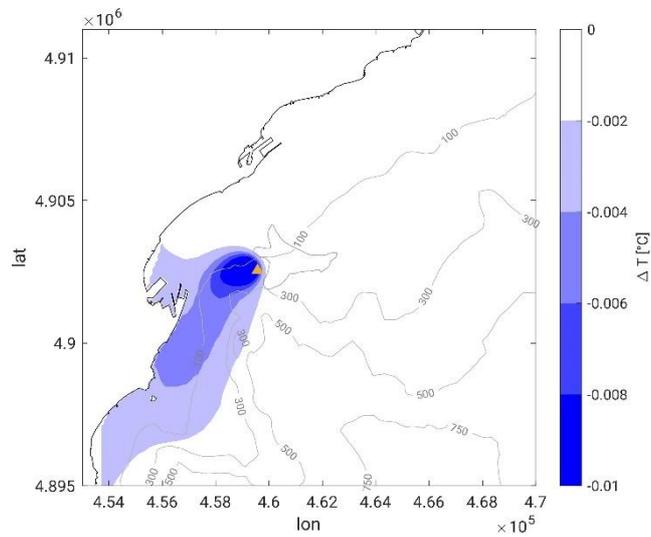


Figura 20. Gradiente termico dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

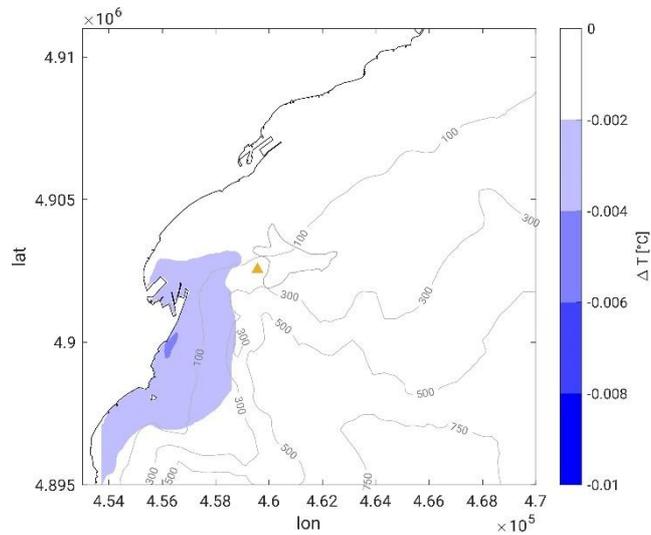


Figura 21. Gradiente termico sul fondo dopo 7 giorni dall'inizio della simulazione.

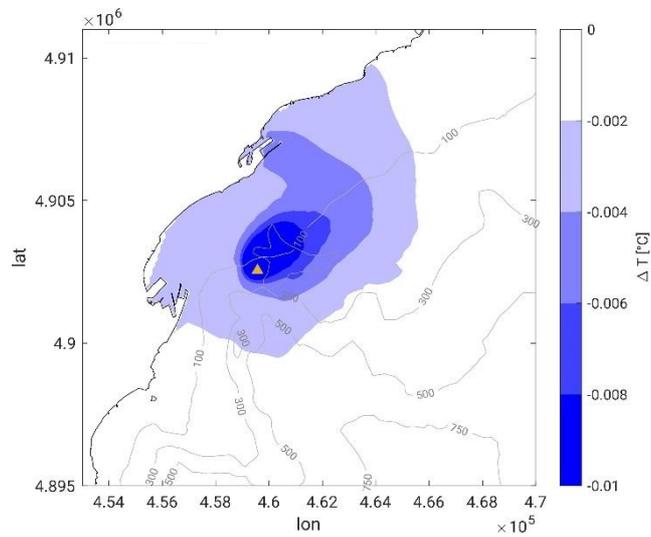


Figura 22. Gradiente termico dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

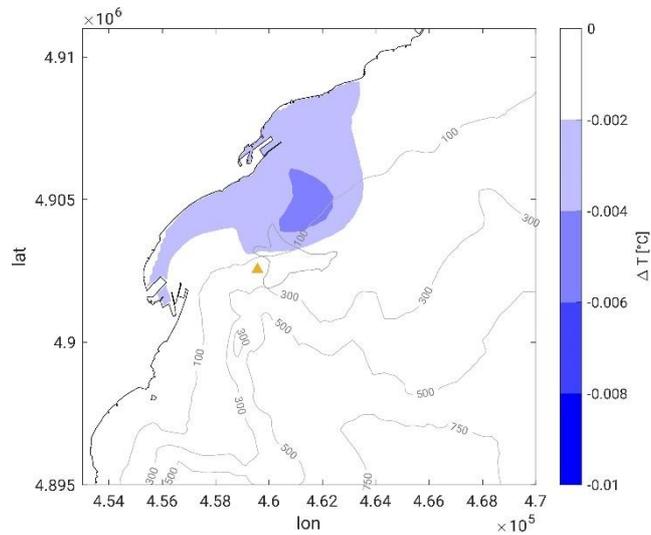


Figura 23. Gradiente termico sul fondo dopo 15 giorni dall'inizio della simulazione.

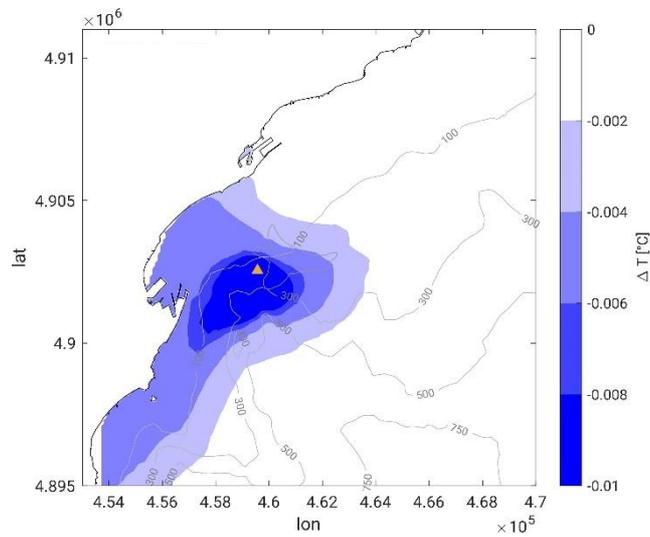


Figura 24. Gradiente termico dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione. Strato superficiale.

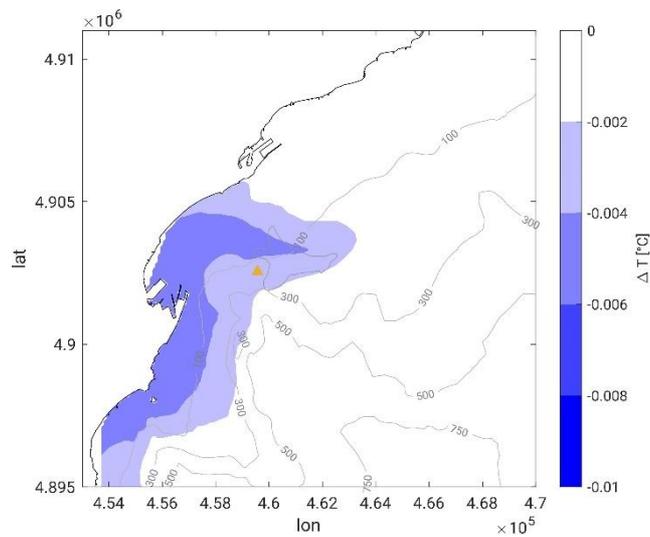


Figura 25. Gradiente termico sul fondo dopo 30 giorni dall'inizio della simulazione.

Commento dei risultati

Le mappe mostrano come i meccanismi di dispersione delle grandezze scalari per medesimi istanti temporali siano analoghi, poiché il trasporto di cloro e della temperatura dipendono dalle correnti indotte dalle forzanti ambientali in un dato istante temporale; si confrontino a tal proposito le forme dei pennacchi rossi e blu tra e.g., Figura 10 e Figura 18, Figura 17 e Figura 25, etc.

Inoltre, le concentrazioni di cloro ed i gradienti termici risultano essere più marcati in superficie: infatti, sebbene l'acqua più fredda tenda ad affondare a causa della maggior densità, la prossimità dello scarico al pelo libero dell'acqua fa sì che ivi si riscontrino le alterazioni maggiori. Tale circostanza emerge palese dal confronto tra mappe associate ad un medesimo istante temporale e diverse quote lungo la verticale, si vedano ad esempio le diverse distribuzioni di Figura 10 e Figura 11 (concentrazione di cloro dopo 1 giorno), Figura 12 e Figura 13 (concentrazione di cloro dopo una settimana), etc. Si può comunque affermare che ambedue le concentrazioni di cloro ed i gradienti di temperatura disperdano rapidamente all'interno dell'area di studio e lungo la direzione verticale, e le rispettive grandezze vengano diluite in spazi e tempi circoscritti, raggiungendo sul fondale valori massimi dell'ordine dei 2×10^{-4} mg/l per quanto riguarda l'ipoclorito e di $-0,01^\circ\text{C}$ per quanto riguarda il gradiente termico. Nel primo caso quindi vi è un abbattimento di tre ordini di grandezza (al minimo) e nel secondo caso le differenze massime di temperature nel campo intermedio e lontano sono contenute nell'ordine di qualche centesimo di grado. In superficie, gli ordini di grandezza di cloro e gradiente termico raggiungono al più i 10^{-3} mg/l e gli $-0,1^\circ\text{C}$.

I risultati summenzionati trovano riscontro nelle curve estratte in corrispondenza dei punti di controllo (cfr. Figura 9 e Tabella 4), così come mostrato da Figura 26 a Figura 29 in riferimento al cloro e da Figura 30 a Figura 33 per quanto attiene alla temperatura. Come lecito aspettarsi, i valori più alti di concentrazione di ipocloriti sono riscontrati in prossimità della FSRU (il punto A5), dove si registra parimenti la maggiore riduzione di temperatura, sia in riferimento alla quota superficiale che alla quota del fondo. Si ricorda, a tal proposito, che i valori a fondo scala nei grafici riferiti al fondale sono circoscritti a valori di concentrazione pari a tre ordini di grandezza di meno rispetto alla concentrazione di immissione in ambiente (ossia $0,00025$ mg/l), al fine di poter apprezzare le variazioni rispetto alle condizioni ambientali che non sarebbero altrimenti apprezzabili con una maggior estensione dell'asse delle y, come quella adottata nei grafici riferiti alla superficie (Figura 26, Figura 27), nelle quali fondo

scala è pari a un centesimo del valore imposto alle condizioni al contorno (ossia 0,0025 mg/l).

Tale osservazione trova ampio riscontro nelle figure Figura 34 e Figura 35, le quali mostrano le medesime concentrazioni di cloro con un fondo scala (ovvero, un'estensione dell'asse verticale delle y) pari alle condizioni imposte allo scarico della FSRU, ovvero 0,2 mg/l. Nelle due figure, è pressoché impossibile distinguere le oscillazioni nei valori di concentrazione tra i diversi siti attenzionati, poiché tutte le curve appaiono piatte a causa dei ridotti ordini di grandezza delle variabili in gioco.

Infine, giova rilevare come le oscillazioni indotte nelle curve associate a cloro e temperatura siano di natura apparentemente randomica. Tale comportamento è evidentemente legato alla natura caotica delle forzanti meteo-marine responsabili dell'innescò delle correnti che disperdono i reflui, che cambiano di intensità e direzione nel tempo favorendone accumulo e dispersione a fasi alterne prive di qualsivoglia ciclicità. Nelle curve, non è infatti possibile distinguere tendenze significative nei valori di concentrazione di ipoclorito (vedi da Figura 26 a Figura 29) né nei gradienti di temperatura (da Figura 30 a Figura 33).

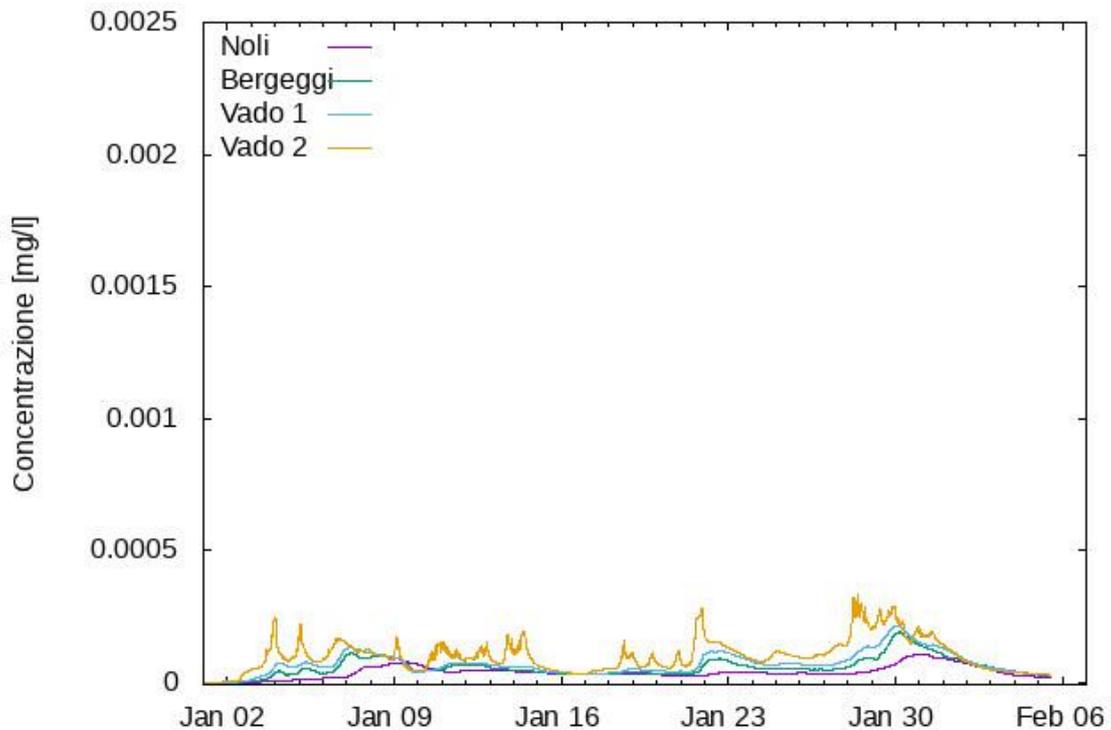


Figura 26. Concentrazione di Cloro in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4). Strato superficiale.

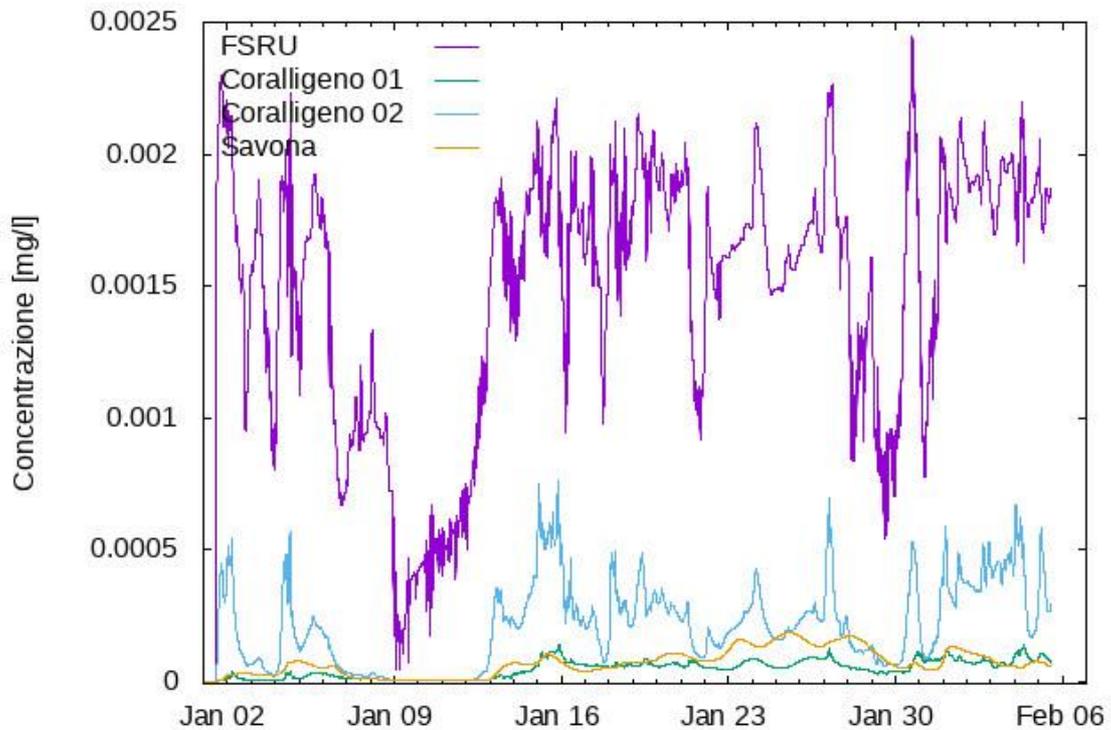


Figura 27. Segue da Figura 26.

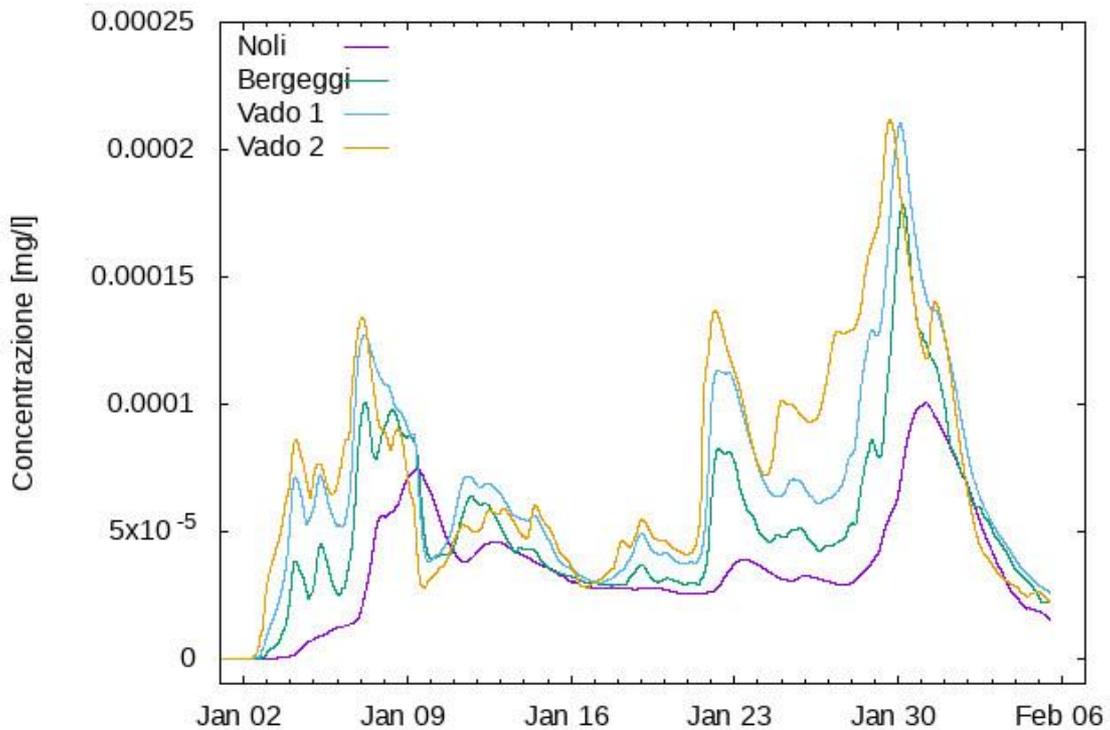


Figura 28. Concentrazione di Cloro sul fondale in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4).

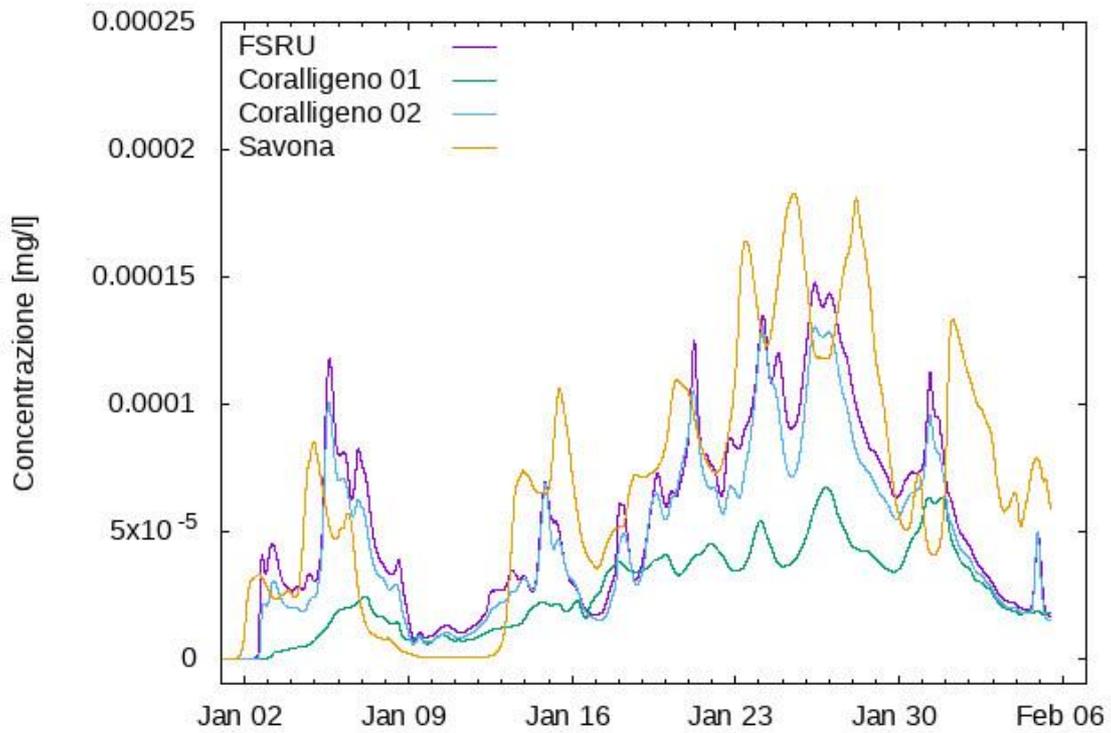


Figura 29. Segue da Figura 28.

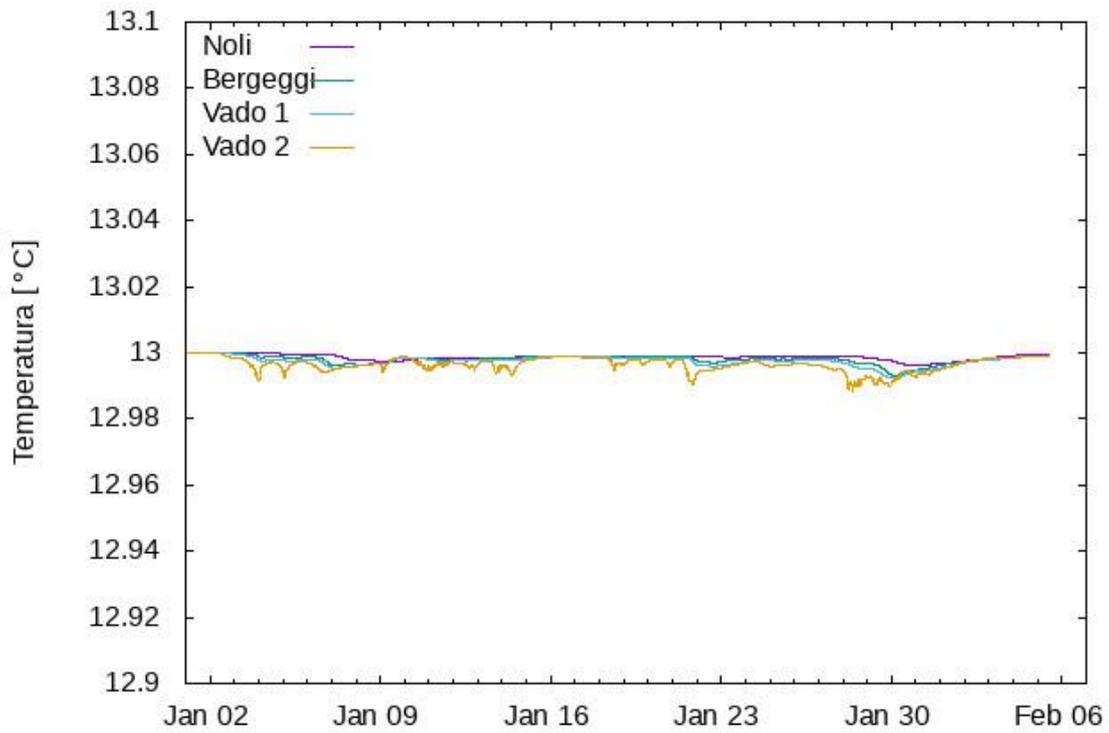


Figura 30. Temperatura in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4). Strato superficiale.

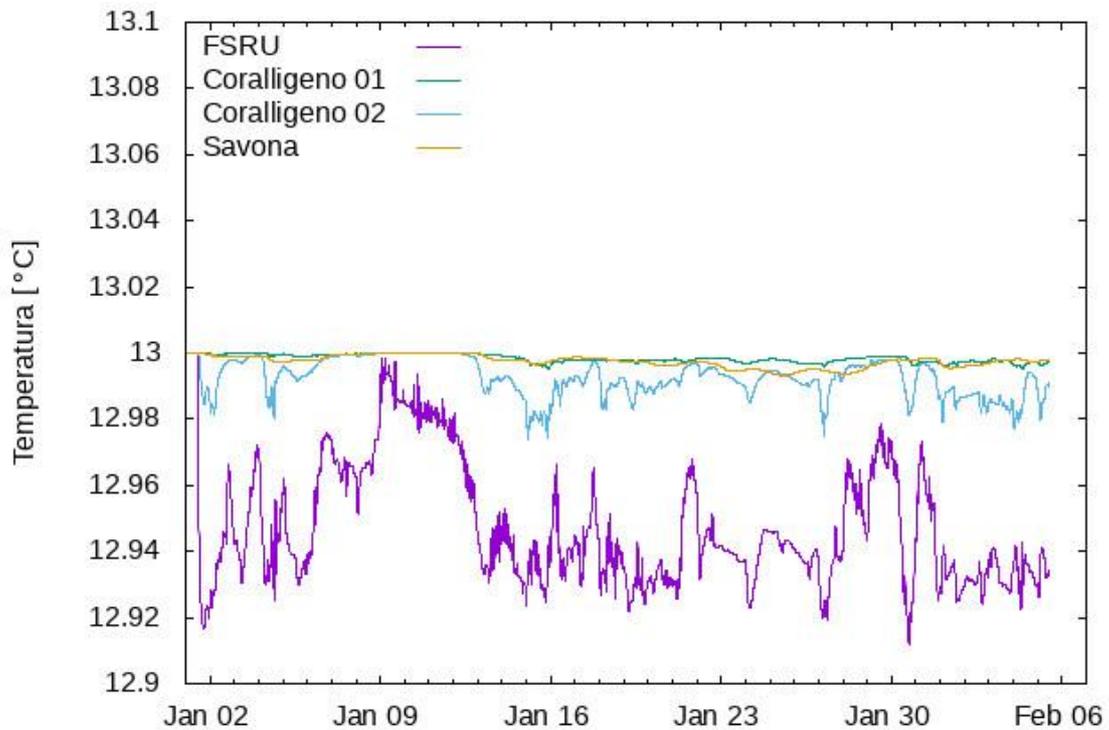


Figura 31. Segue da Figura 30.

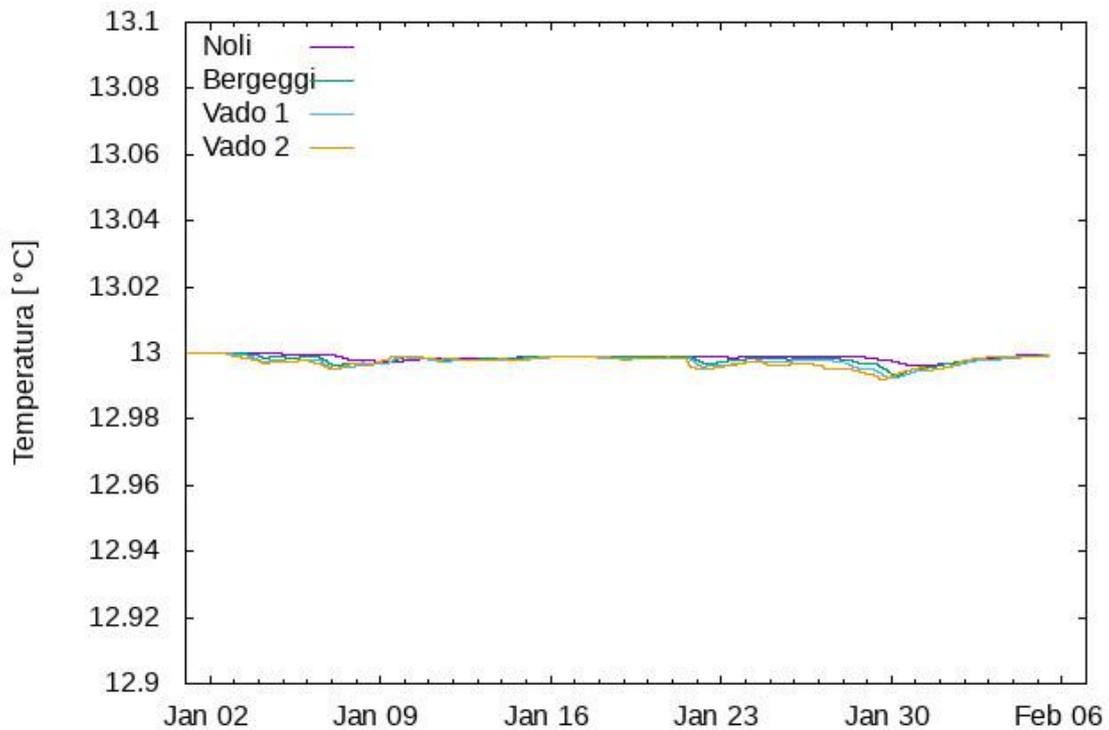


Figura 32. Temperatura sul fondale in corrispondenza dei punti di controllo (per i riferimenti delle etichette si rimanda a Tabella 4).

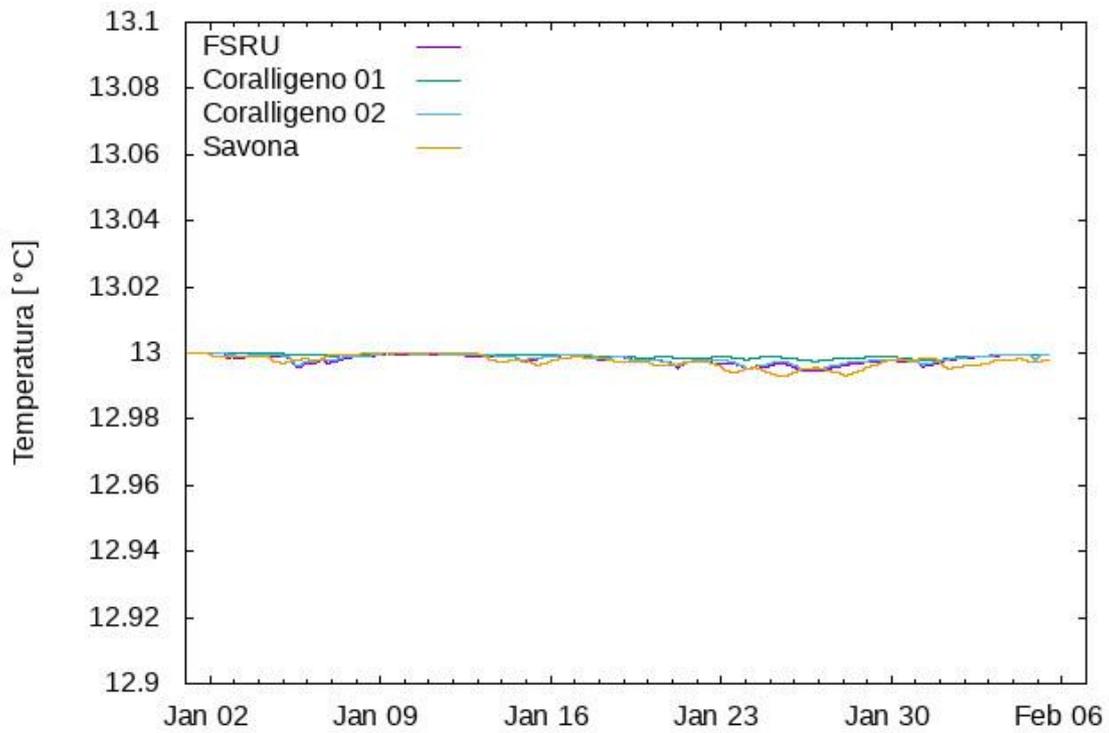


Figura 33. Segue da Figura 32.

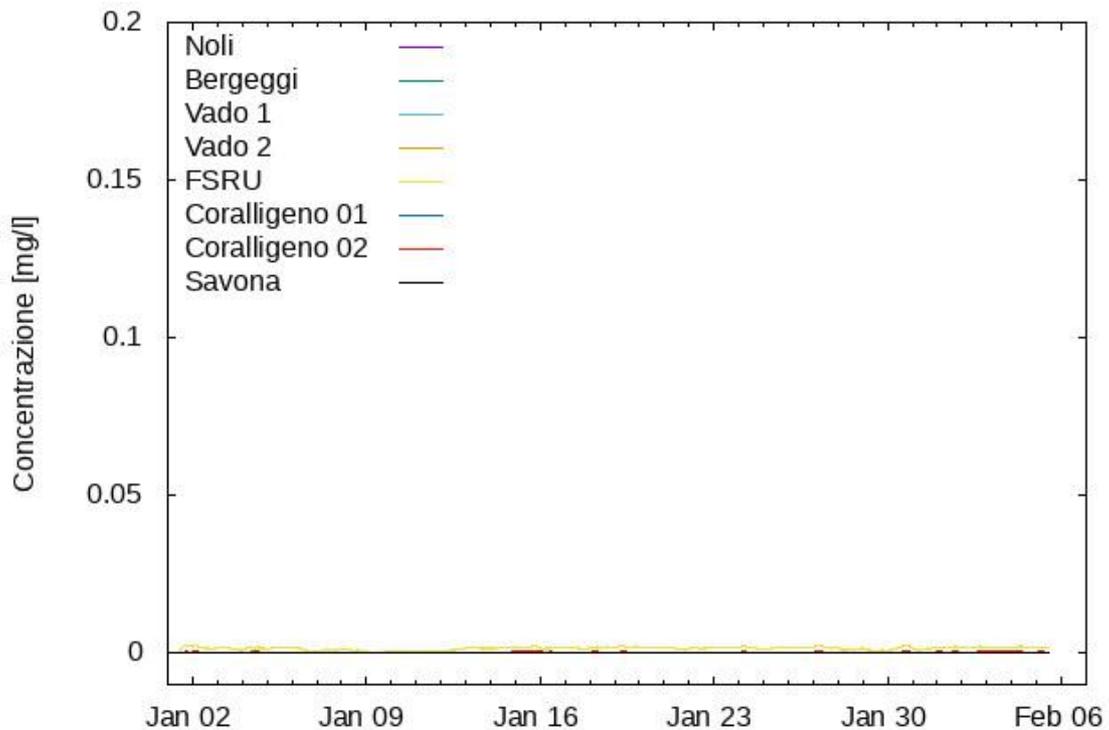


Figura 34. Concentrazione di cloro in corrispondenza di tutti i punti di controllo di cui a Figura 9. Strato superficiale.

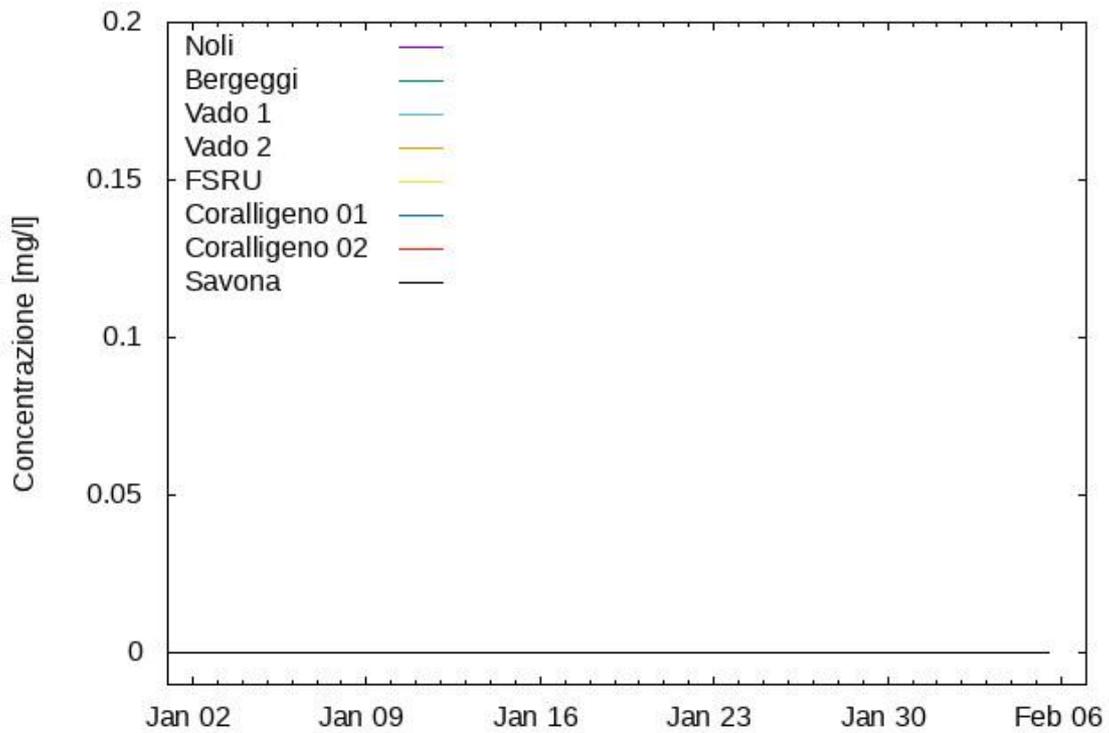


Figura 35. Concentrazione di cloro sul fondo in corrispondenza di tutti i punti di controllo di cui a Figura 9.

6. CONCLUSIONI

I risultati ottenuti nell'ambito del presente studio evidenziano alcuni aspetti di interesse per quanto riguarda i processi di dispersione dell'ipoclorito e della temperatura nell'area circostante la FSRU. In particolare, è possibile osservare come la dispersione abbatta le grandezze dei due scalari a valori inferiori di diversi ordini di grandezza rispetto alle condizioni di immissione da parte dell'impianto di processo della FSRU: i valori massimi di ipoclorito riscontrati nei punti di controllo presentano valori ridotti di tre ordini di grandezza rispetto al valore di immissione. Per quanto riguarda i valori di temperatura, i risultati mostrano come vi sia una compensazione verso i valori indisturbati ambientali in tempi e spazi molto contenuti, essendo apprezzabili nei punti di controllo esaminate variazioni nell'ordine del centesimo di grado al più.

I risultati mostrano altresì come i picchi dei due scalari non si mantengano costanti nel tempo, ma al contrario oscillino, presentando fasi di crescita e decrescita a fasi alterne e pressoché aleatorie ed imputabili alle caratteristiche idrodinamiche dell'area di studio, le quali presentano elevata variabilità su brevi lassi temporali.

I risultati del modello numerico, forzato da dati meteo-marini allo stato dell'arte, forniscono delle indicazioni sul comportamento nello spazio e nel tempo dei processi di dispersione delle acque di processo della FSRU. A tal proposito, giova ricordare come la catena modellistica utilizzata per il presente studio sia stata testata e validata in contesti analoghi in riferimento alla simulazione della circolazione costiera (paraggio del porto di Genova e di La Spezia nell'ambito dei progetti di ricerca GEREMIA, BE-READY e PROMPT), fornendo ottimi riscontri. I dati meteomarini impiegati (vento, onde e livello del mare) sono poi stati validati e impiegati in diversi studi scientifici allo stato dell'arte (<https://meteocean.science/research/publications>). Durante le attività operative della FSRU sarà comunque possibile operare in controllo real-time dei valori di concentrazione e temperatura misurati nell'ambito del Piano di Monitoraggio Ambientale, al fine di poter realizzare un confronto con le stime realizzate negli studi numerici di dispersione in funzione delle condizioni meteomarine rilevate e simulate, validando così la catena modellistica anche in riferimento al paraggio esaminato nel presente lavoro.