



AM3 SPIN-OFF
ADVANCED MODELS AND METHODS
IN MARITIME ENGINEERING



COMUNE DI CAPRAIA ISOLA

STUDIO SU MODELLO NUMERICO DEL
SISTEMA DI CORRENTI MARINE
NELL'AREA DEDICATA L'ALLEVAMENTO
ITTICO NELL'ISOLA DI CAPRAIA

RELAZIONE SINTETICA

AM3 SPIN-OFF s.r.l.

GIÀ SPIN-OFF
DELL' UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI FIRENZE

info@am3.spinoff.com
www.am3spinoff.com

Via Madonna del Piano, 6
50019 Sesto Fiorentino (FI)
P. IVA / C.F. 06375900484

AM3 Spin-off s.r.l.

Advanced Models and Methods in Maritime Engineering

Via Madonna del Piano, 6
50019 Sesto Fiorentino (FI)
P.IVA 06375900484 REA FI 623251

INDICE

Premessa.....	2
1. Obiettivi dello studio	3
2. Descrizione dell'impianto e della produzione	4
2.1. CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO DI CAPRAIA.....	4
2.2. LA PRODUZIONE	5
2.3. DESCRIZIONE DELL'IMPATTO DEGLI ALLEVAMENTI OFF-SHORE DURANTE IL PROCESSO PRODUTTIVO	6
2.4. CONCENTRAZIONI DI AZOTO E FOSFORO NEL CIBO NON INGERITO	9
3. Descrizione generale del modello numerico	9
3.1. DESCRIZIONE DEL MODELLO E DEI FENOMENI RIPRODOTTI	9
3.2. Il Dominio di Studio e la griglia di calcolo.....	11
4. Metodologia di simulazione della dispersione delle emissioni delle itticolture	14
5. Ricostruzione dell'idrodinamica tramite modello numerico	21
6. Ricostruzione della diffusione delle emissioni delle itticolture tramite modello numerico	23
7. Conclusioni	30

PREMESSA

AM3 Spin-off srl già spin-off dell'Università degli Studi di Firenze è partner del Laboratorio Congiunto A-MARE Acque Mare Ambiente Energia (www.amare.unifi.it), istituito in convezione con l'Università degli Studi di Firenze e finalizzato alla conduzione di ricerche tecnico scientifiche e all'attuazione del trasferimento tecnologico nei campi della dinamica delle acque costiere, protezione e gestione dei litorali in collaborazione con il Laboratorio di Ingegneria Marittima, LABIMA (www.labima.unifi.it).

Il Comune di Capraia Isola nell'ambito di un progetto con finanziamento FLAG Golfo degli Etruschi ha incaricato AM3 Spin-off di eseguire uno studio su modello numerico sulle correnti marine presenti nell'area dell'Isola di Capraia interessata dell'impianto di allevamento ittico della Cooperativa Maricoltura e Ricerca

Il progetto ha lo scopo di studiare la dispersione dei reflui dell'impianto sotto l'azione idrodinamica locale e mappare l'areale di impatto per valutare sia l'estensione dell'area marina interessata sia la dinamica del decadimento della concentrazione all'aumentare della distanza dall'impianto di allevamento anche al fine di orientare futuri programmi di monitoraggio in situ.

L'interesse di questo studio, riveste soprattutto per gli aspetti di originalità e generalità dell'impostazione che evidenzia i risultati ottenuti in un caso specifico, ma illustra una metodologia generale per la stima della dispersione dei reflui di emessi da un impianto posizionato in mare.

Questo metodo prevede l'utilizzo di dati relativi alle correnti marine raccolti in banche dati pubbliche e disponibili in tutto il Mediterraneo.

Lo studio è stato basato sulla determinazione del campo di correnti presenti nell'area di studio per mezzo di un modello idrodinamico che tiene conto dei venti locali e dalla circolazione generata, a più grande scala, dalla marea astronomica e dalle dinamiche atmosferiche.

Noto il campo di correnti è stato implementato un modello di dispersione in grado di ricostruire le dinamiche di trasporto e diffusione tridimensionali, quindi anche alle diverse profondità, dei reflui immessi da un impianto di maricoltura.

1. OBIETTIVI DELLO STUDIO

Lo studio si propone di descrivere le dinamiche idrauliche delle correnti nell'area interessata dall'impianto di allevamento di Maricoltura Capraia presso l'isola di Capraia (*Figura 1*) e la dispersione dei reflui prodotti dall'impianto. L'impianto di maricoltura off-shore presente all'Isola di Capraia è ubicato nello specchio acqueo di Porto Vecchio (versante nord-orientale dell'isola). L'impianto è localizzato su un'area data in concessione dal Comune di Capraia alla Cooperativa Maricoltura e Ricerca (Coop. Ma.Ri.).



Figura 1, Ubicazione dell'impianto di maricoltura.

Lo studio ha lo scopo di riprodurre il sistema delle correnti indotte dai venti locali, dalla circolazione generata, a più grande scala, dalla marea astronomica e dalle dinamiche atmosferiche intorno all'isola di Capraia per il periodo di un anno con scansione temporale oraria.

Una volta ricostruito il campo idrodinamico è stato implementato un modello di dispersione in grado di ricostruire i percorsi dei reflui trasportati dalle correnti tenendo conto delle differenze di velocità presenti alle diverse profondità.

Lo studio ha fornito come risultati mappe di dispersione descrittive delle condizioni medie mensili delle concentrazioni dei reflui all'interno dell'area di studio.

2. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO E DELLA PRODUZIONE

2.1. CARATTERISTICHE DELL'IMPIANTO DI CAPRAIA

L'azienda si trova nell' Arcipelago Toscano, all'interno del Parco Nazionale, ed è una delle rare realtà italiane in questo settore ad allevare orate e spigole in acque così incontaminate.

L'allevamento attualmente occupa un'area di circa 3.000 m², situata su fondali compresi tra 33 m e 40 m di profondità.

L'impianto dispone ad oggi di otto gabbie galleggianti (Figura 2) più tre sperimentali, collocate in uno specchio acqueo di 42 mila metri quadrati.

Le gabbie sono dei grandi "contenitori" circolari con un volume di circa 4800 metri cubi ciascuna. Sono composte da una parte emersa in polietilene di 25 metri di diametro e da una parte sommersa ben ancorata sul fondo. Si sviluppa in profondità con 18 metri di rete in maglia larga abbastanza da permette un ottimo ricambio dell'acqua e l'assoluta ossigenazione dell'ambiente di allevamento.

La produzione media annuale si attesta su 250 - 300 tonnellate l'anno di spigole e orate.



Figura 2, Vasche dell'impianto di maricoltura.

Il pesce non viene stimolato alla crescita ed i tempi di accrescimento vanno quindi dai 18 ai 24 mesi proprio come avverrebbe allo stato brado.

La pesca avviene una volta raggiunta la giusta pezzatura, ovvero un peso dai 600 agli 800 grammi, per il successivo invio al consumatore.

2.2. DESCRIZIONE DELL'IMPATTO DEGLI ALLEVAMENTI OFF-SHORE DURANTE IL PROCESSO PRODUTTIVO

Le sostanze rilasciate dagli allevamenti ittici nell'ambiente sono principalmente composte da materiale organico sospeso originato da materiale fecale e da cataboliti, nonché da residui di mangime non consumato. Diversi sono i fattori che influenzano il rilascio di biodepositi da parte di un allevamento, e in primo luogo questo risulta essere direttamente proporzionale alla biomassa allevata, alla taglia del pesce, alla qualità (intesa come digeribilità, più è digeribile meno deiezioni avremo) dell'alimento utilizzato all'interno del sistema di allevamento.

Naturalmente, l'impatto dovuto al materiale organico in sospensione è da mettere in relazione con le caratteristiche fisiche del corpo ricevente, e, in primo luogo, con l'idrodinamismo che ne permettere la dispersione. Infatti, gli effetti generati da un impianto di maricoltura nel sistema marino possono interessare, in funzione delle condizioni idrologiche, sia la colonna d'acqua sia il sedimento nelle vicinanze dell'impianto.

Una parte della materia organica proveniente da un allevamento si può disciogliere nella colonna d'acqua, e una parte arriva sul fondo. Fattori fisici quali la profondità dell'acqua sotto la gabbia, la velocità della corrente, la velocità di sedimentazione del mangime e del materiale fecale fanno sì che l'area interessata sia più o meno ampia. La quantità di cataboliti prodotti e rilasciati nell'ambiente è strettamente correlata al sistema di allevamento adottato. Gioca un ruolo fondamentale l'efficienza del sistema di distribuzione dell'alimento, che permette di diminuire la quota di cibo non sfruttata. Il mangime distribuito automaticamente è sotto forma di pellets, e viene quasi totalmente ingerito.

Le proteine, i lipidi ed i carboidrati, ottenuti con la digestione e l'assimilazione del mangime ingerito, forniscono ai pesci energia e nutrienti per il metabolismo, la crescita e la riproduzione. Il resto del cibo ingerito, ma non assimilato, viene escreto nelle feci come rifiuto solido (SW, solid waste), mentre i cataboliti (ammonio, urea, fosfati, ecc.) escreti come rifiuto disciolto nell'acqua (DW, dissolved waste). Il totale dei rifiuti (TW, total waste) associato all'alimentazione è quindi composto dalla somma dei rifiuti solidi fecali, dei rifiuti disciolti e del cibo non ingerito:

$$TW = SW + DW + FW.$$

La quantità di azoto (o di fosforo) rilasciata nell'ambiente da un impianto di allevamento, n_{rel} (kg/anno), è la differenza fra la quantità fornita con il cibo, $n_{supplied}$, e la quantità invece usata effettivamente dai pesci per la propria crescita,

Studi promossi dalla Regione toscana (ARPAT – CIBM) hanno dimostrato come in condizioni di normali velocità della corrente solo una piccola parte del sedimento cada sotto le gabbie mentre la maggior parte venga diffusa nell'areale circostante.



Figura 3, Gabbia per allevamento in impianto in mare aperto.

2.3. CONSIDERAZIONI SULLA RIDUZIONE DEGLI IMPATTI E MONITORAGGIO

Il vero problema ambientale, che può causare un impianto di acquacultura off-shore è quello di un parziale aumento dell'eutrofizzazione (aumento del carico organico) nei pressi delle gabbie che attraverso il movimento delle correnti può andare ad interferire con le coste diminuendone la qualità delle acque che in presenza di aree utilizzate per la balneazione costituisce una potenziale criticità.

A questo scopo i modelli numerici di dispersione sono stati in passato ritenuti utili strumenti per la valutazione dell'impatto dei rifiuti prodotti dalla maricoltura, nonostante non fossero ancora disponibili codici di calcolo specifici e non fossero disponibili neppure banche dati per una conoscenza adeguata del sistema di correnti marine nell'intorno degli impianti.

Nella valutazione dell'impatto ambientale dell'acquacoltura marina sono anche stati usati dei modelli di trasporto innestati in modelli idrodinamici per la simulazione dei fenomeni di sedimentazione, risospensione e decadimento dei rifiuti organici da maricoltura (Panchang et al., 1997; Dudley et al., 2000).

Tenendo quindi presenti le caratteristiche produttive dell'impianto si riporta di seguito una sintesi che definisce, in termini quantitativi, le sostanze rilasciate in mare, che rappresentano le principali sorgenti di impatto sull'ambiente marino per un allevamento di spigole e orate e con una produzione per sicurezza assunta di 300 t/anno.

Il fattore di conversione utilizzato (FCR), che è il rapporto fra il mangime distribuito e la biomassa ittica prodotta [$FCR = \text{quantità di cibo fornito} / (\text{biomassa finale} - \text{biomassa iniziale})$], con il protocollo adottato e con le densità di

allevamento indicate, sarà 1.7/1.8.

Nella simulazione sono state fatte le seguenti assunzioni:

- produzione, $P = 250-300$ t, che rappresenta la produzione annua dell'impianto offshore; fattore di conversione $FCR = 1.7$ (1.7 kg di mangime per kg di pesce prodotto);
- le emissioni prodotte sono state stimate sulla base delle informazioni fornite dal produttore del mangime e riassunte nella Tabella 2, che riporta le quantità di Fosforo e Azoto prodotti per ogni tonnellata di pesce durante l'intero processo produttivo assunto di 18 mesi pari a 548 giorni.

Tabella 1, Produzione di reflui con il mangime completo per pesci di mare prodotto da MFR Marine (2022)

N Solubile (kg/t)	92.9
P Solubile (kg/t)	7.8
N Fecale (kg/t)	30.7
P Fecale (kg/t)	7.8

Pertanto, per 300 t prodotte in 18 mesi si può stimare che vengano immessi nell'ambiente marino 24780 kg di Azoto solubile e 2310 kg di Fosforo solubile rispettivamente pari a 51 kg/giorno e 4.3 kg/ giorno rispettivamente. Tali valori sono stati assunti nel modello per simulare l'immissione dei reflui in sospensione e in soluzione.

I reflui sedimentabili costituiti dal cibo non ingerito e dai rifiuti solidi sedimentabili precipitano sul fondo ed interessano un'area di superficie crescente al crescere della velocità della corrente ed inversamente proporzionale alla velocità di sedimentazione. Sulla base di valori di letteratura e di una velocità media della corrente presente nell'area dell'impianto questa superficie ha dimensioni dell'ordine di qualche decina di metri superiori alle dimensioni in superficie dell'impianto

Un grosso aiuto alla rimozione dall'ambiente del materiale particolato che può fuoriuscire dalle gabbie e disperdersi verso il fondo, è dato dalla numerosa fauna selvatica che si avvicina agli allevamenti sia per il cosiddetto "effetto relitto" sia perché qui trova appunto cibo e protezione dai loro predatori.

Per valutare l'impatto ambientale dell'allevamento è inoltre necessario verificare se l'arricchimento organico del fondale sottostante ad esso superi o meno la capacità assimilativa dell'ambiente.

Dalle stime sopra riportate, si evince la massa della sostanza organica prodotta, uscente dalle gabbie, potenzialmente si dovrebbe muovere seguendo le correnti



studiate con il modello di ricostruzione che hanno direzioni prevalenti dirette verso nord nordest e verso sud scorrendo lungo la costa orientale dell'Isola di Capraia.

Questo favorisce la dispersione della sostanza organica che viene introdotta nella catena alimentare e nel ciclo biologico dei popolamenti esistenti.

Si deve anche tener conto che al di là della stima fatta in precedenza, molto del refluo uscente dalle gabbie viene consumato e trasformato ancor prima di sedimentarsi. Queste informazioni possono essere ottenute solo con una adeguata e mirata campagna di misure sul sito dell'impianto

Il cibo quindi crea una alterazione dell'ambiente circostante. Questo può aumentare l'attività batterica a livello del sedimento presso le gabbie o nel punto in cui le correnti faranno depositare l'alimento. Se questo eccesso non supera determinati valori l'attività batterica e fauna bentonica, unitamente al fitoplancton riuscirà a mantenere condizioni salubri nell'area senza che alcun tipo di fenomeno distrofico possa rendersi evidente.

3. DESCRIZIONE GENERALE DEL MODELLO NUMERICO

La ricostruzione dell'idrodinamica nei pressi della Maricoltura Capraia è stato effettuato tramite l'utilizzo del codice di calcolo ai volumi finiti per la risoluzione tridimensionale delle equazioni di acque basse MIKE3 Flow Model FM (*Danish Hydraulic Institute, DHI*).

3.1. DESCRIZIONE DEL MODELLO E DEI FENOMENI RIPRODOTTI

Il modello MIKE3 Flow Model FM è un codice di calcolo per la simulazione delle correnti a pelo libero in tre dimensioni. Il codice permette di ricavare le quantità di interesse per la descrizione dell'idrodinamica di un corpo idrico tramite la risoluzione numerica delle equazioni di acque basse, nella versione tridimensionale. Le equazioni di governo sono risolte dal codice in una griglia di calcolo non strutturata, basata sulla discretizzazione della geometria tramite dei prismi. La costruzione avviene realizzando la griglia di calcolo bidimensionale, attraverso la discretizzazione del dominio mediante elementi triangolari. Successivamente, la griglia di calcolo è duplicata lungo la verticale in un numero di piani (*layer*) definiti dall'utente, in cui la connessione tra i triangoli delle mesh bidimensionali di ogni piano genera il prisma della griglia di calcolo.

Il modello riproduce i seguenti fenomeni:

- Campo di moto tridimensionale e livelli della superficie indotti dai venti locali e dalla circolazione generata, a più ampia scala, dalla marea astronomica e dalle dinamiche atmosferiche¹;
- Trasporto e decadimento di sostanze disciolte o sospese nell'acqua, con un approccio lagrangiano che modella i processi di avvezione e dispersione della sostanza.

La descrizione batimetrica dei fondali nell'area di studio si basa sui dati forniti da EMODNET², che dispone di un dataset ad alta risoluzione (circa 50 m) nei dintorni dell'Isola di Capraia.

Il modello numerico implementato effettua un *downscaling* dell'idrodinamica a livello del bacino dell'intero Mediterraneo fornita dal servizio CMEMS (*Copernicus Environment Monitoring Service*) del programma Copernicus, aumentandone la

risoluzione dai circa 4.5 km del modello a grande scala ai 20 m circa adottati in prossimità delle gabbie nel modello di dettaglio sviluppato nel presente studio

Il database contiene dati orari delle due componenti della velocità delle correnti e il livello della superficie libera relativi ai due anni precedenti alla data di accesso, con 10 giorni di previsione futura (rendendo, cioè, possibili anche applicazioni in modalità previsionale estremamente utile per la programmazione di griglie e tempistiche di campionamento per monitoraggi futuri).

Per ciascun nodo di calcolo ai bordi del dominio (*Figura 4*), sono utilizzate le seguenti condizioni al contorno:

- Prescrizione dei valori orari delle componenti Est-Ovest e Nord-Sud (u e v) di velocità della corrente, variabili nello spazio (interpolati linearmente fra i 5 vertici CMEMS disponibili su ogni bordo e per i diversi layers sulla verticale).
- Prescrizione del valore orario dell'elevazione della superficie libera (interpolato linearmente fra i vertici CMEMS disponibili ai bordi).

È stata inclusa nel modello la forzante atmosferica del vento, assunto come uniforme sull'intera estensione del modello, e coincidente le estrazioni nel punto avente latitudine 43.0°N e longitudine 10.0°E del database ERA5.

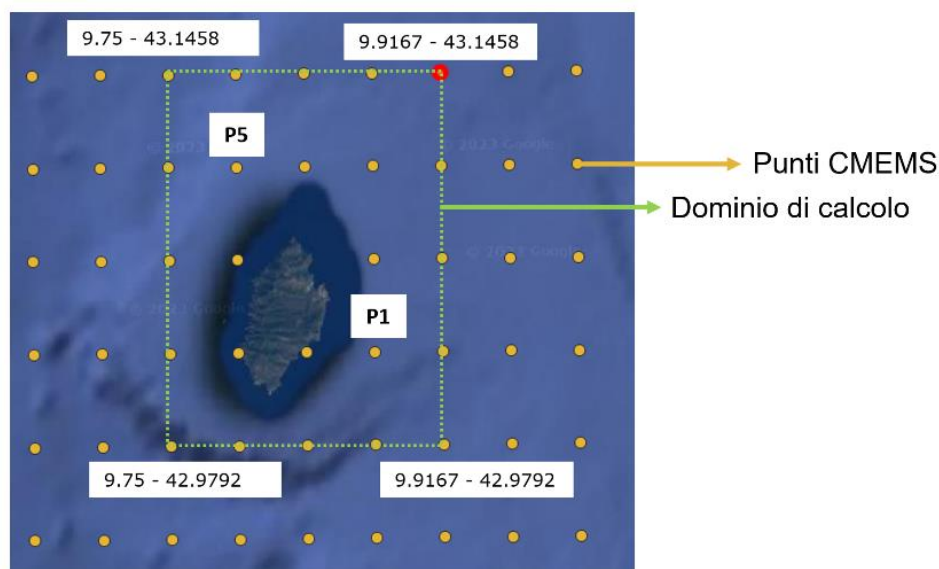


Figura 4, Estensione del dominio di calcolo del modello idrodinamico e individuazione dei punti P1 e P5 utilizzati come riferimento per verificare la coerenza fra risultati del modello e dati del database CMEMS di Copernicus.

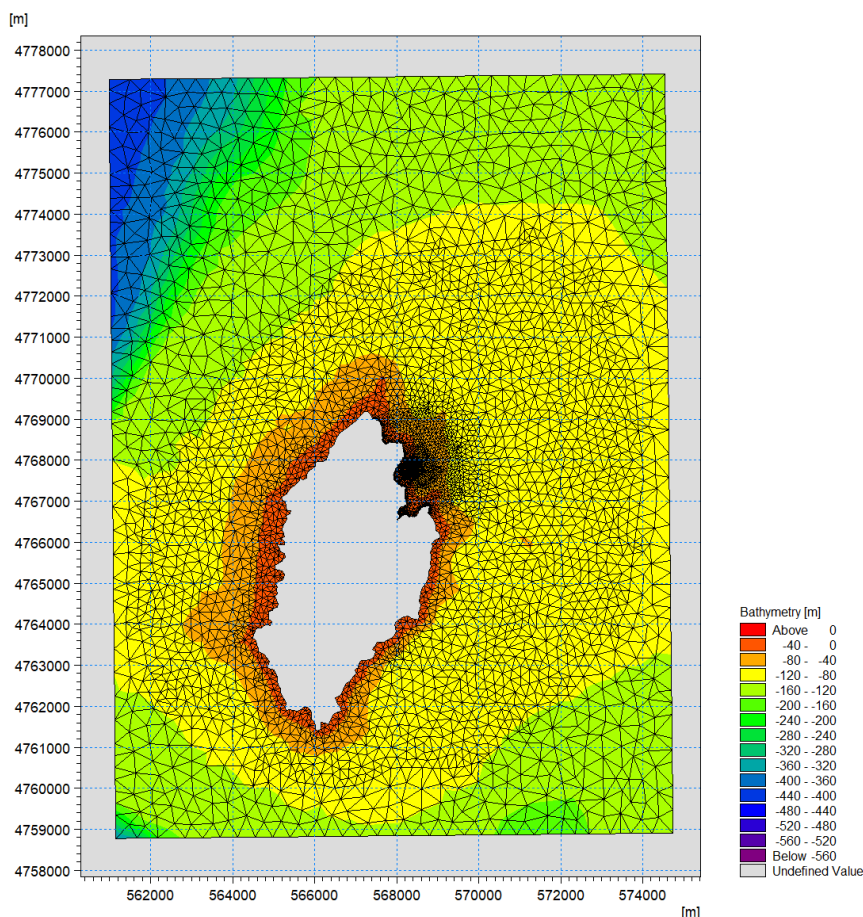


Figura 5, Griglia di calcolo e batimetria del modello idrodinamico.

3.2 Dominio di Studio e la griglia di calcolo

Il dominio di calcolo, di forma rettangolare e dimensioni di circa 18 km (in direzione Nord-Sud) per 14 km (in direzione Est-Ovest) è stato dimensionato in modo tale da avere verticici coincidenti con i vertici del modello a grande scala CMEMS che fornisce le condizioni al contorno. Per ciascun bordo del modello, sono disponibili 5 vertici del modello CMEMS che forniscono dati orari di livelli della superficie libera e componenti u e v della velocità. Tali dati sono interpolati linearmente per fornire le condizioni al contorno ai bordi del modello di calcolo, sia sull'orizzontale che sulla verticale.

La griglia di calcolo adotta, per ciascuno strato orizzontale, una maglia ad elementi triangolari a risoluzione variabile fra un minimo di 20 m in prossimità delle itticolture ad un massimo di 500 m per distanze superiori ai 5 km dalla zona di principale interesse (e profondità dei fondali superiori ai 120 m), come dettagliato in *Figura 5*. Entro un raggio di 2 km circa dalla posizione delle vasche di itticoltura, la griglia di calcolo si compone di 5 zone con dimensione caratteristica degli elementi triangolari variabile fra i 20 e i 180 m (Zona 1 – Zona 5 in *Figura*

6). Il dominio di calcolo si compone di un totale di 8 *layer* sulla verticale, avente uno spessore variabile e dimensioni crescenti dagli strati più superficiali a quelli più profondi.

L'esame del profilo velocità della corrente nei punti di controllo di mostra evidenti inversioni della velocità lungo la verticale (si veda, a titolo di esempio, la **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), con correnti di intensità marcatamente più elevata e una maggiore variabilità negli strati più superficiali (entro i primi 15-20 m circa) della colonna d'acqua. Risulta evidente che la velocità della corrente a profondità superiori a 30 raramente supera i 10 cm/s mentre in superficie può raggiungere velocità almeno 3 volte superiori per effetto degli effetti del vento.

Tale evidenza giustifica la necessità di un approccio modellistico tridimensionale, in grado di riprodurre l'impatto di tale variabilità della circolazione idrodinamica alle diverse profondità nella successiva analisi sulla dispersione dei reflui delle vasche per l'itticoltura.

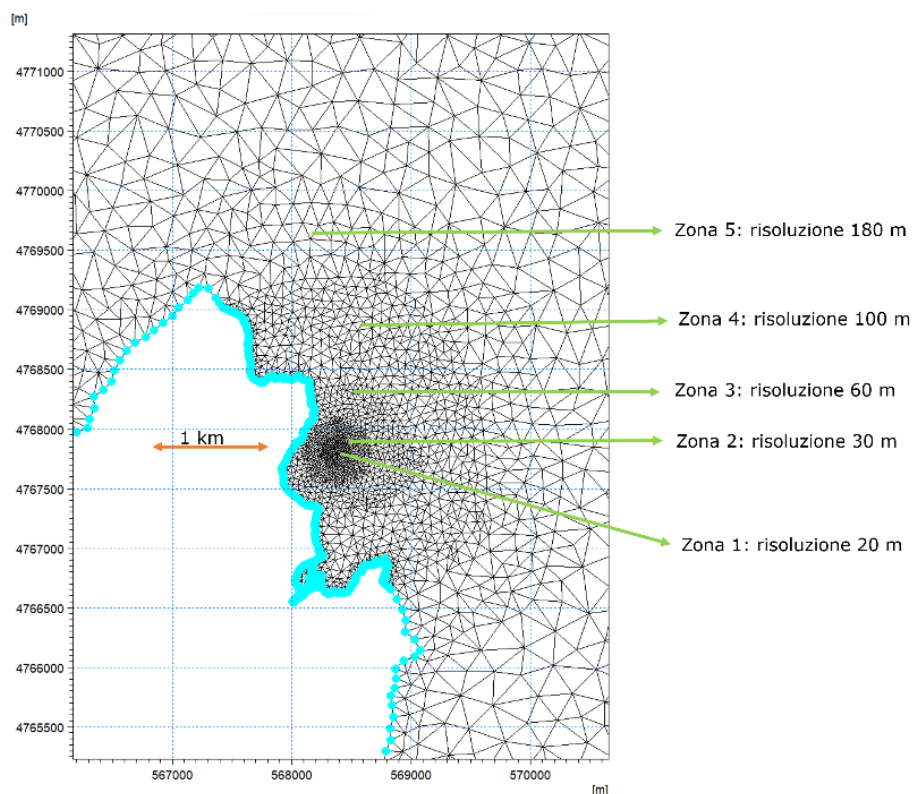


Figura 6, Zone a differente risoluzione del modello idrodinamico nei dintorni dell'area di interesse.

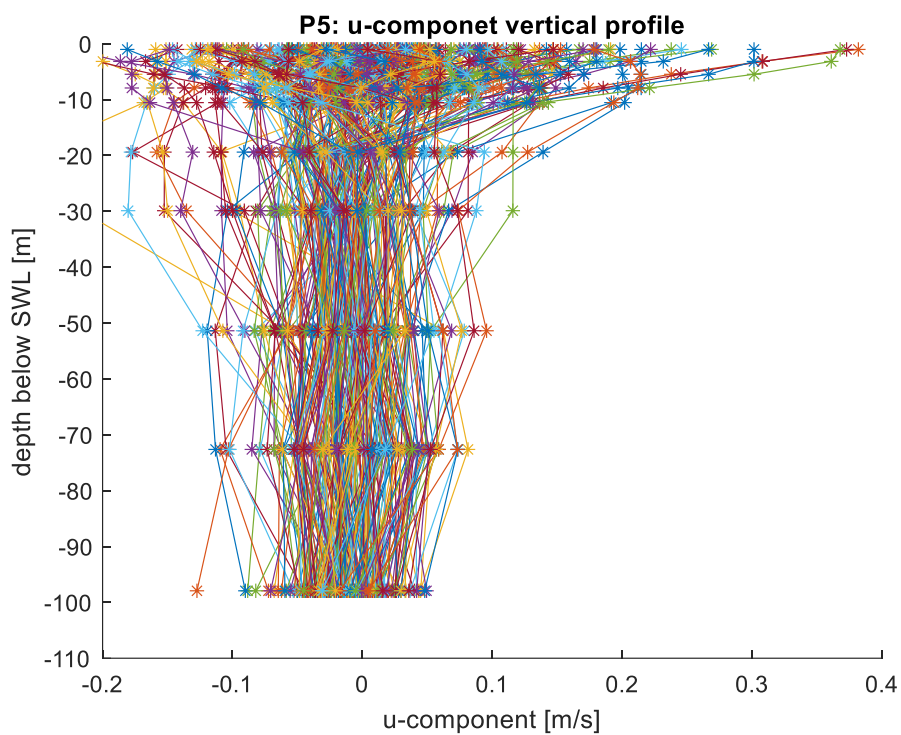


Figura 7, Esempio di profilo della componente u della velocità lungo la verticale nel punto P5.

4. RICOSTRUZIONE DELL'IDRODINAMICA TRAMITE MODELLO NUMERICO

Il modello numerico tridimensionale implementato è stato utilizzato per modellare le caratteristiche della corrente nel dominio di calcolo per un anno tipo, con riferimento al periodo maggio 2021 – maggio 2022.

Il modello restituisce, in ciascuno degli oltre 9000 punti della griglia di calcolo, valori di intensità e direzione della corrente con frequenza di 10 minuti, alle diverse quote lungo la verticale corrispondenti al centro dei 8 *layer* utilizzati per la discretizzazione tridimensionale del dominio.

L'insieme dei dati forniti dal modello si presta a numerose post elaborazioni in funzione dello scopo dello studio; in questo caso sono state riportate sia rappresentazioni sintetiche della frequenza e direzione delle correnti marine in alcuni punti predeterminati sia delle rappresentazioni vettoriali del campo della velocità della corrente mediata lungo la verticale in determinati istanti temporali.

Per quanto riguarda la frequenza e direzione delle correnti sono stati presi in esame i punti in cui vengono raccolti i campioni delle acque per i controlli periodici sulla presenza qualità delle acque; in particolare il punto T1 è stato considerato rappresentativo dell'area dell'impianto insieme ai punti 300m a nord e 300 m a sud. Sulle aree più lontane è stato scelto un punto 1000 m a nord utilizzato per le analisi delle acque come campione indisturbato dall'impianto ed uno a 1000 m a sud. Un ulteriore punto di estrazione è stato preso in prossimità del porto. (Fig. 8) Sono riportati le rose di distribuzione della velocità e direzione media del vento per i valori di maggio e novembre, sufficienti ad evidenziare la variabilità nel corso dell'anno. Nell'edizione integrale della relazione sono state riportate le rose per ogni mese.

Per quanto riguarda la direzione media della corrente si può osservare che nel punto 1000m a nord dell'impianto si mantiene con direzione diretta verso nord ovest o sud-est con frequenze molto simili in tutti i mesi estivi mentre nei mesi invernali son prevalenti le correnti dirette verso sud-est ma distribuite in più ampio settore direzionale (Fig. 9).



Figura 7, Individuazione grafica dei punti di controllo per l'estrazione dei risultati del modello numerico, le cui coordinate sono riportate in Tabella 5.

Nell'area dell'impianto nel punto T1 (Fig. 11), la velocità è generalmente la più bassa fra i punti di controllo presi in esame; solo raramente viene superato il valore di 0.1 m/s e quando viene superato la corrente è diretta verso nord-nordest (mesi di dicembre, gennaio e febbraio) le correnti sono prevalentemente dirette verso nord-nordest e solo in primavera sono dirette con frequenza maggiore verso sud anche se la velocità media è inferiore a 0.1 m/s

Nel punto 300 Nord (punto 300N, Fig. 10) si osservano complessivamente velocità maggiori rispetto alla zona dell'impianto; vengono superati frequentemente i 25cm/s sia verso sud che verso nord- nordest, la loro direzione è focalizzata sulle direzioni sud e verso nord nord-est.

Nel punto 300 m sud (punto 300S, Fig.12) la direzione prevalente della corrente è diretta verso nord- nordovest e sud sudest; le velocità sono più basse simili a quelle presenti nel centro dell'impianto. Vengono superati i 10 cm/sec solo sulla direzione nord nordovest dove nei mesi invernali la velocità arriva a 15 cm/s.

Il punto 1000 m sud (punto 1000S, Fig. 13) è più lontano dalla maricoltura ed è interessato da correnti più veloci. Le direzioni principali sono sud-sudest e nord-nordovest con netta prevalenza della seconda; solo nei mesi invernali le frequenze sulle due direzioni sono simili. Le velocità sono nettamente più alte sulle direzioni meridionali dove si raggiungono valori di frequenza del 25% per correnti con velocità comprese fra 10 e 30 cm/s.

Nel punto di controllo posto in prossimità del porto di Capraia (punto Porto, Figura 14) del quale si riporta, la sola rosa annuale delle velocità della corrente, si nota una direzione principale ovest-est, con velocità fortemente ridotte rispetto agli altri punti di osservazione (non vengono, infatti, superati i 10 cm/s).

Da questa analisi si può dedurre che i reflui dell'impianto si spostano lentamente nella zona d'immissione in mare; tuttavia, una volta raggiunta una distanza dell'ordine di 300 m che può essere percorsa nei momenti più sfavorevoli, in poche ore, trovano correnti più veloci che li allontanano più rapidamente.

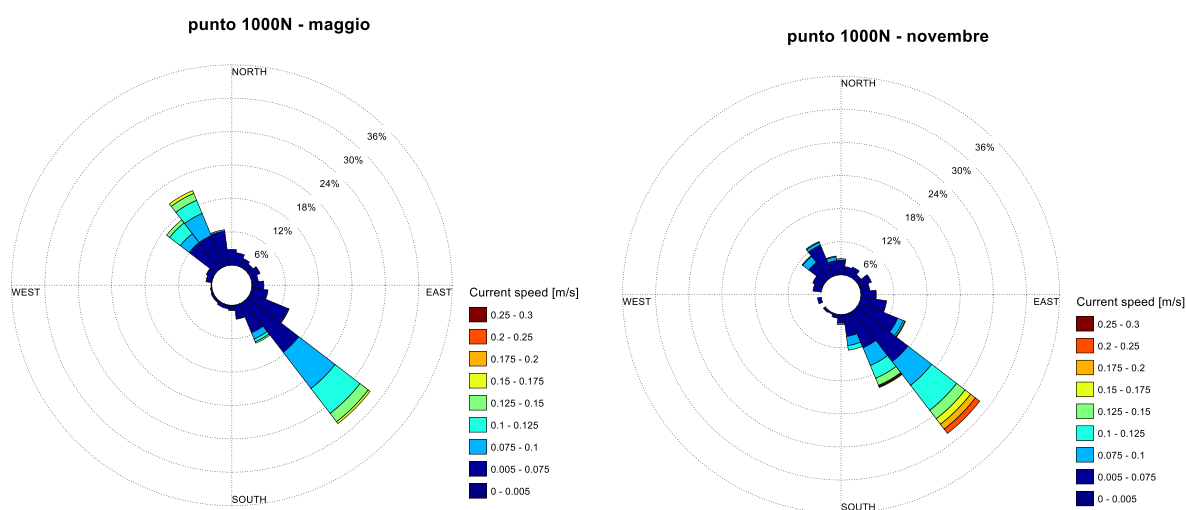


Figura 9, Rose mensili della corrente media sulla verticale nel punto 1000N.

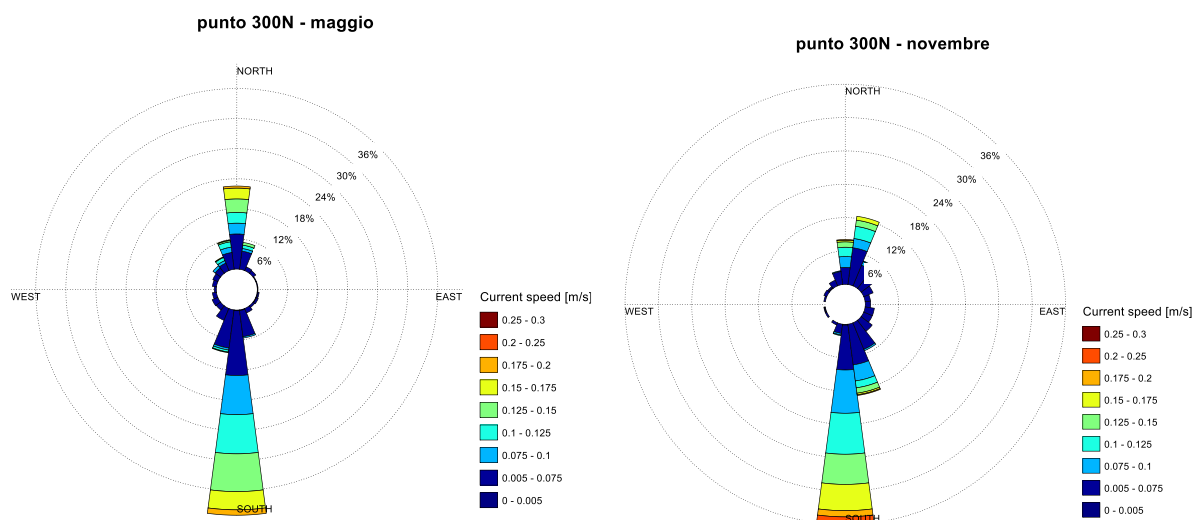


Figura 10 rose mensili della corrente media sulla verticale nel punto 300N.

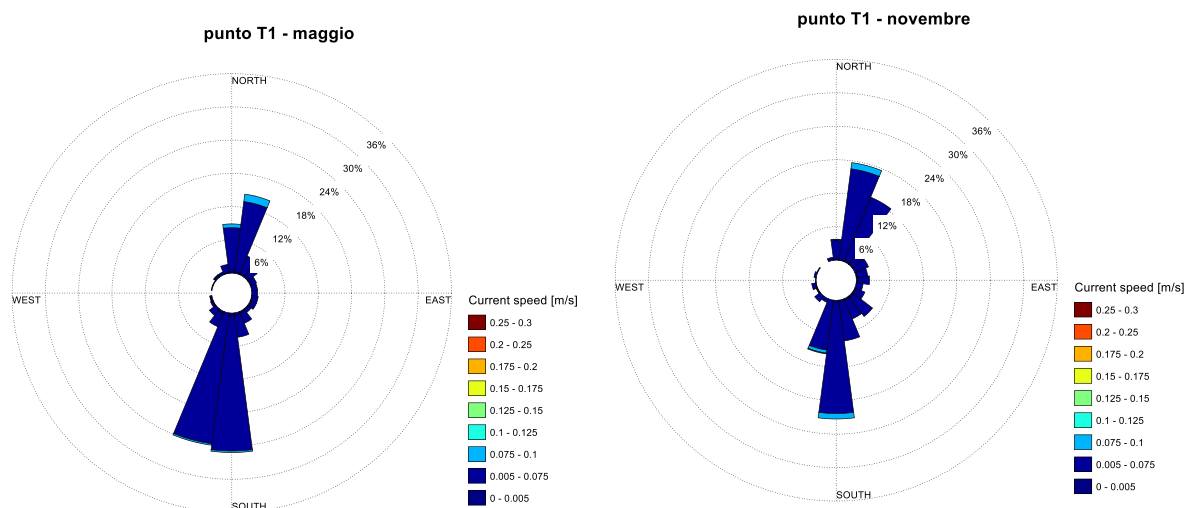


Figura 8, Rose mensili della corrente media sulla verticale nel punto T1.

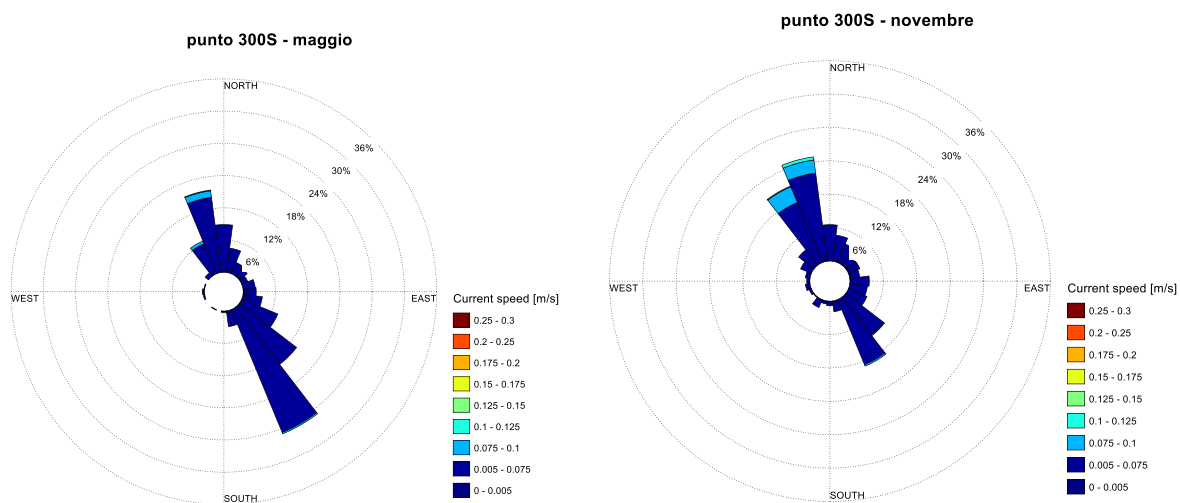


Figura 9, Rose mensili della corrente media sulla verticale nel punto 300S.

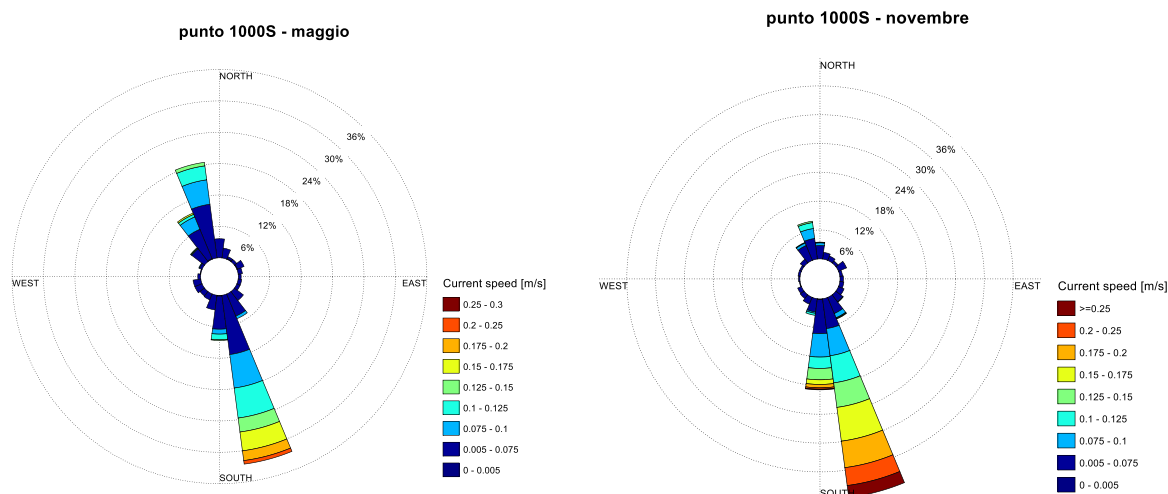


Figura 10, Rose mensili della corrente media sulla verticale nel punto 1000S.

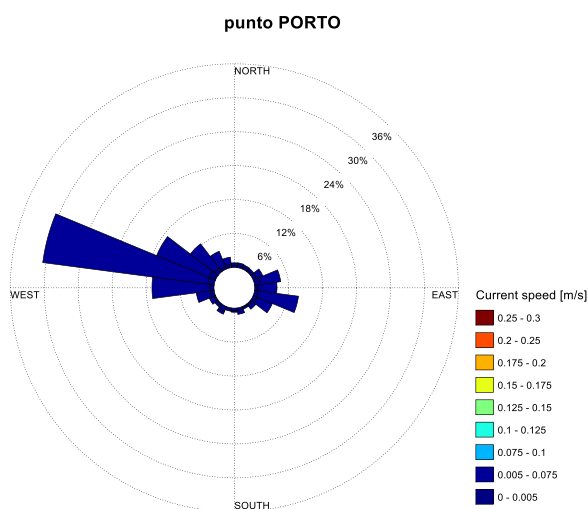


Figura 11, Rosa annuale della corrente media sulla verticale nel punto di controllo posto in prossimità del porto dell'Isola di Capraia (punto Porto).

Le figure successive mostrano, a titolo esemplificativo per il giorno 15 dei mesi di maggio e giugno 2021, il campo di velocità presente ogni 6 ore nella zona di interesse (Figura 12-Figura 15). Le velocità in corrispondenza del giorno 15 dei restanti mesi dell'anno sono riportate, nell' Allegato 1 della relazione completa.

È interessante notare come la circolazione nei dintorni dell'area di studio presenti caratteristiche spiccatamente tempo-varianti, con evidenti cicliche inversioni della direzione più evidenti all'estremità nord dell'isola.

La velocità della corrente nell'area dell'impianto da questa analisi risulta quasi sempre inferiore a 10 cm/s come in gran parte delle aree sotto costa, mentre in prossimità dei promontori si osservano correnti più veloci con velocità massime di circa 30 cm/s. Durante la stessa giornata le velocità non risultano mai stazionarie e si passa, nell'intervallo di tempo di 6 ore, da velocità dell'ordine di pochi cm/s a valori più alti intorno a 20 cm/s anche con inversioni del verso della corrente. I valori più alti comunque risultano quasi sempre localizzati in aree ristrette in prossimità dei promontori

Queste informazioni possono essere utilizzate in modi diversi, ad esempio, nota la velocità di sedimentazione dei mangimi non utilizzati dai pesci o la velocità di caduta delle deiezioni solide può essere calcolata l'area di deposizione sui fondali combinando queste informazioni con la velocità della corrente locale.

Le informazioni più interessanti consistono comunque nella stima delle aree interessate dal trasporto dei reflui in soluzione o in sospensione che possono raggiungere distanze ben maggiori dei materiali sedimentabili.

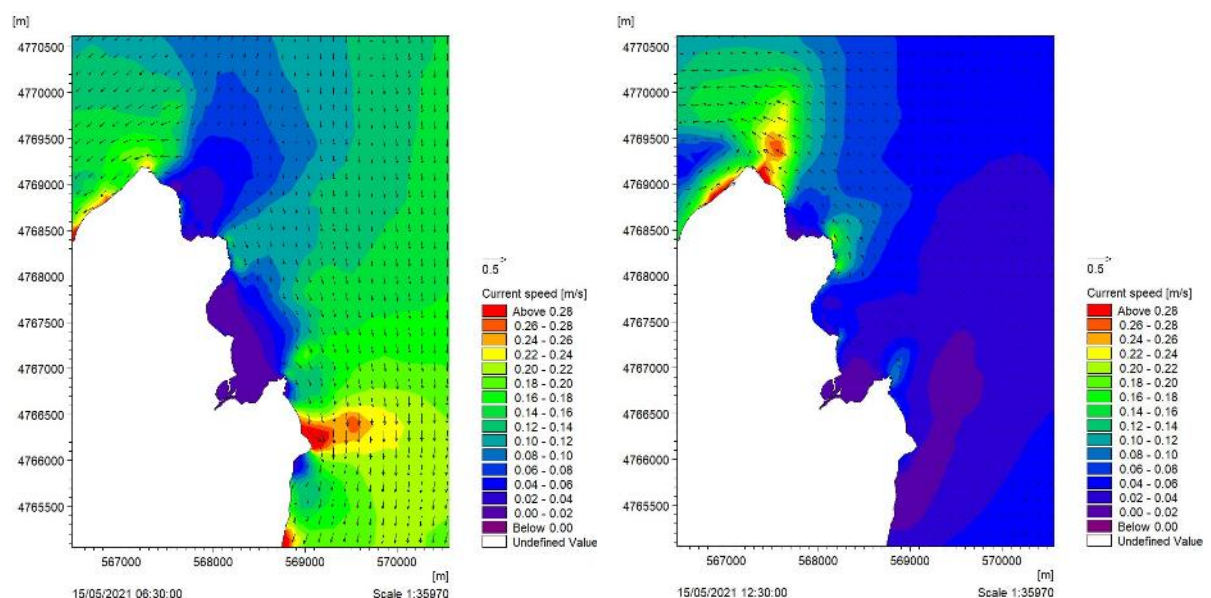


Figura 12, Esempio di campo di velocità della corrente, mediata sulla verticale, alle ore 06:30 (sinistra) e alle ore 12:30 (destra) del 15/05/2021.

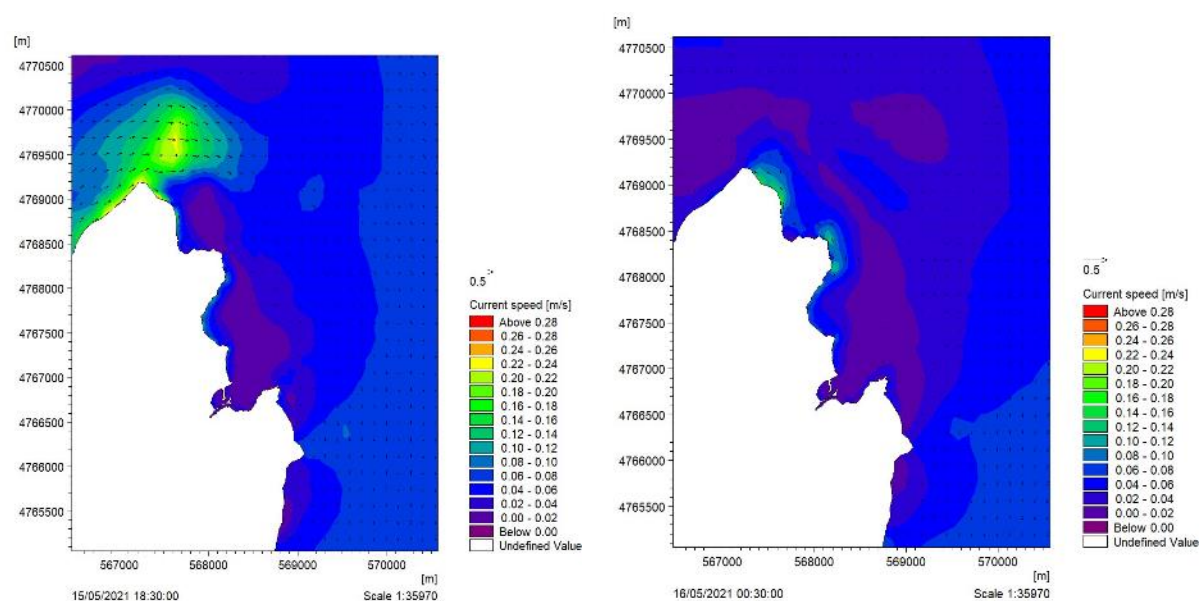


Figura 13, Esempio di campo di velocità della corrente, mediata sulla verticale, alle ore 18:30 (sinistra) del 15/05/2021 e alle ore 06:30 (destra) del 16/05/2021.

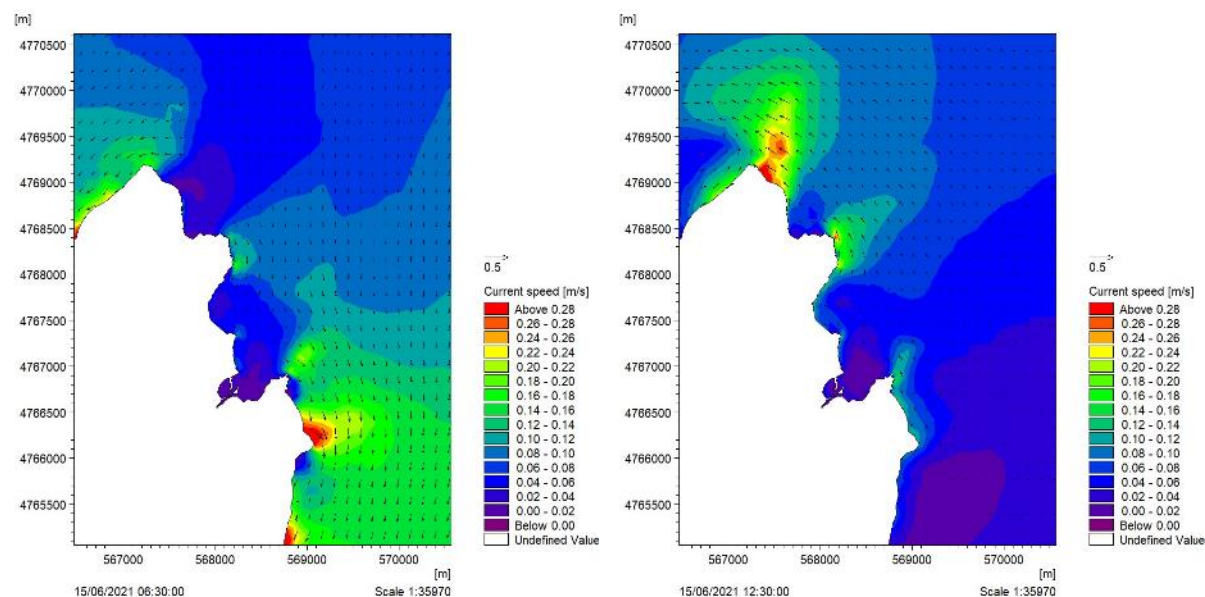


Figura 14, Esempio di campo di velocità della corrente, mediata sulla verticale, alle ore 06:30 (sinistra) e alle ore 12:30 (destra) del 15/06/2021.

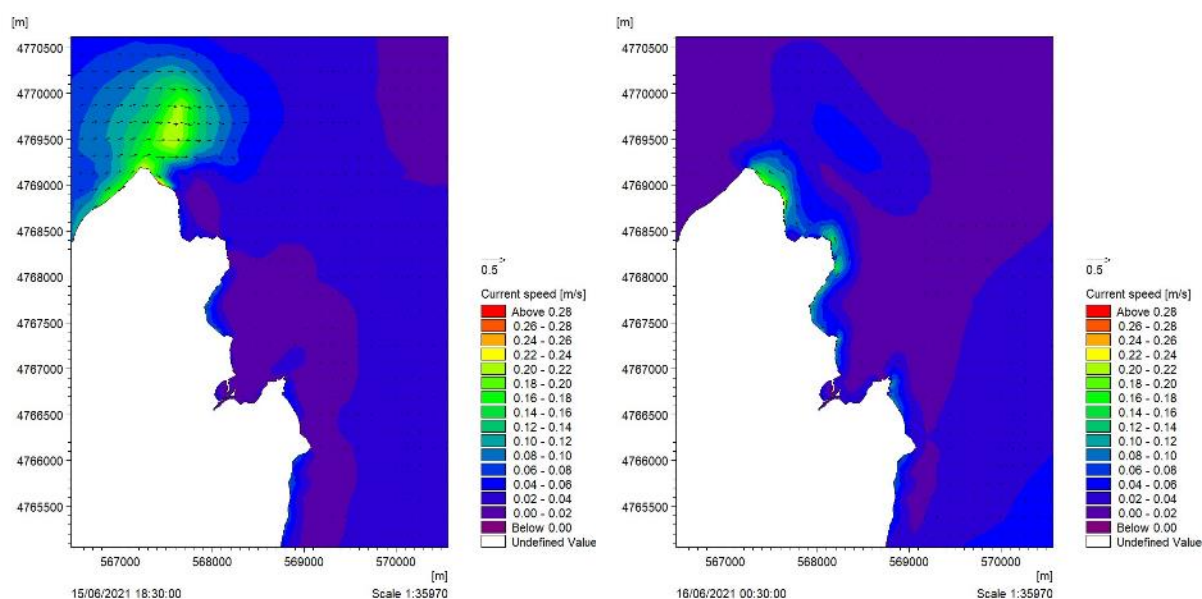


Figura 15, Esempio di campo di velocità della corrente, mediata sulla verticale, alle ore 18:30 (sinistra) del 15/06/2021 e alle ore 06:30 (destra) del 16/06/2021.

5. METODOLOGIA DI SIMULAZIONE DELLA DISPERSIONE DELLE EMISSIONI DELLE ITTICOLTURE

I campi di moto ricostruiti tramite il modello idrodinamico descritto nella sezione precedente hanno fornito la base per la successiva modellazione della diffusione delle emissioni prodotte dalle gabbie per l'allevamento ittico, con particolare riferimento all'azoto totale e al fosforo totale presenti nell'intorno dell'impianto di allevamento.

Il presente studio ha avuto quale focus principale la quantificazione dell'areale di impatto indotto dalle emissioni nutrienti disciolti e in sospensione presenti nell'acqua e imputabili alle gabbie di itticoltura. La quantificazione dell'entità di tale sorgente emissiva è avvenuta sulla base delle informazioni reperite circa la massa ittica mediamente presente nelle gabbie (consistente in circa 300 tonnellate), della quantità di mangime fornito quotidianamente e della composizione del mangime stesso, come certificata dal produttore (Tabella 2).

I valori di nutrienti riportati rappresentano la somma di azoto totale e fosforo totale emesso dai pesci. I valori riportati nelle mappe elaborate col modello non rappresentano la reale situazione chimica e biologica delle acque, ma hanno le funzione di tracciante dei reflui per seguire la loro dispersione e di conseguente abbattimento del carico nutritivo man mano che la corrente li trasporta lontano dalla zona di allevamento.

A questo scopo è stata stimata una emissione di fosforo e azoto disciolto in acqua nei reflui non sedimentabili di 55 kg/g. A tale qualità, nelle simulazioni, è stato applicato un fattore di sicurezza di 1.5, per tener conto di eventuali approssimazioni nella quantificazione dell'emissione.

È stato inoltre considerato separatamente il contributo del mangime non ingerito (assunto pari a 10 kg/giorno) che precipita, come particolato, con una velocità di caduta di circa 0.12 m/s. che si deposita sul fondo.

Per entrambe le tipologie di emissioni, si è ipotizzato un profilo giornaliero di rilascio delle emissioni caratterizzato da due picchi in corrispondenza degli orari nei quali viene somministrato il mangime nelle gabbie (i.e. intorno alle 6 AM e alle 17 PM), come in Figura 16. Tale profilo giornaliero è stato ipotizzato costante in ogni periodo dell'anno.

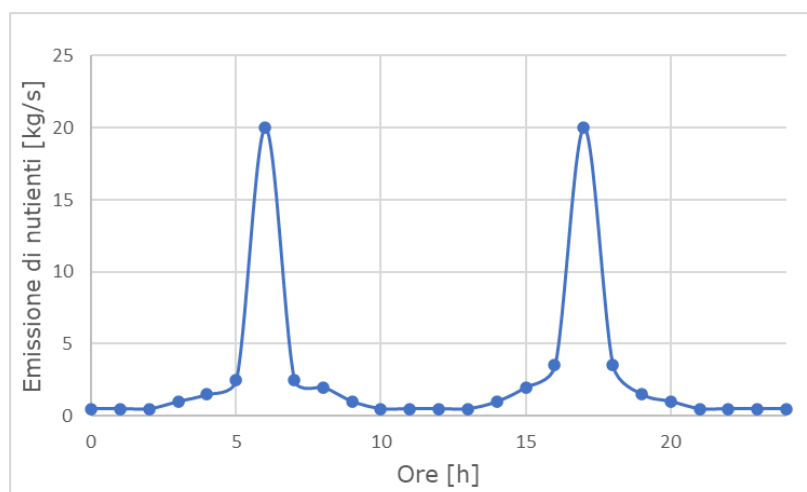


Figura 16, Profilo giornaliero dell'emissione di nutrienti dalle gabbie di maricoltura impostato per le simulazioni numeriche della dispersione dei reflui.

La simulazione della dispersione delle emissioni di azoto e fosforo totale dalle gabbie di itticoltura ha fatto uso del modulo di *particle tracking* del software di calcolo MIKE3 di DHI.

Sono state simulati 24 punti sorgente dell'emissione approssimativamente coincidenti con la posizione centrale delle 8 gabbie principali, con tre diverse quote di rilascio (-5 m, -10 m e -15 m sotto al livello medio del mare).

Al fine di avere una stima conservativa della dispersione delle emissioni di fosforo e azoto totale, e del relativo areale di impatto medio mensile e annuale, il complesso di reazioni di decadimento e trasformazione, cui tali emissioni vanno incontro nella situazione reale, non sono state incluse nel presente studio.

Al fine di contenere l'onere computazionale del modello numerico, proporzionale al numero di particelle totali presenti all'interno del dominio di calcolo, le simulazioni sono state condotte impostando una permanenza massima di ciascuna particella nel dominio pari a 3 giorni. Tale scelta è stata supportata dall'evidenza di come la dispersione delle emissioni delle itticolture sia caratterizzata da tempi scala essenzialmente sub giornalieri, con concentrazioni residue del materiale emesso trascurabili in ogni punto del dominio a distanza di pochi giorni dall'emissione.

Tutte queste assunzioni, per poter verificare i risultati ottenuti con i valori delle campagne di monitoraggio sulla qualità delle acque, richiederebbero una verifica di campo con una adeguata campagna di misura dei valori dei nutrienti presenti nella zona di rilascio ed in opportuni punti di controllo.

6. RICOSTRUZIONE DELLA DIFFUSIONE DELLE EMISSIONI DELLE ITTICOLTURE TRAMITE MODELLO NUMERICO

Il modello numerico è stato utilizzato per tracciare la dispersione dei reflui dell'itticoltura per il periodo maggio 2021–maggio 2022, con riferimento all'indicatore costituito dai nutrienti in sospensione e in soluzione e sotto l'ipotesi di profilo di emissione giornaliero dei reflui come riportato in Figura 19.

Il modello permette di stimare con cadenza temporale di un'ora la concentrazione dei nutrienti in tutti i 9000 punti della griglia di calcolo dove sono state stimate le velocità delle correnti. La grande quantità dei dati forniti può essere elaborata in modi diversi in funzione dello scopo dello studio.

Le figure successive mostrano, ancora una volta a titolo esemplificativo, la distribuzione spaziale nei dintorni dell'area di interesse delle concentrazioni istantanee dei nutrienti emessi dell'itticoltura, osservate ad intervalli di 3 ore durante una giornata.

L'andamento osservabile nelle concentrazioni riflette, in primo luogo, l'assunzione fatta circa le modalità di rilascio dei reflui dalle gabbie (con due accentuati picchi giornalieri, corrispondenti approssimativamente agli istanti nei quali avviene la nutrizione dei pesci, così come riportato in Figura 19). La successiva dispersione dell'emissione riflette, invece, la forte non stazionarietà della velocità della corrente osservata nella Sezione precedente: durante la stessa giornata, la direzione principale del trasporto dei reflui passa da quella nord-sud (Fig. 15-18) a quella sud-nord, in corrispondenza dell'inversione nel verso della corrente.

È da notare, inoltre, come le massime concentrazioni dei reflui in soluzione o in sospensione, che si localizzano in prossimità dell'area delle gabbie nelle ore successive alla distribuzione del mangime (Fig. 21 e 23), risultino rapidamente diluite durante i processi di trasporto e diffusione, tanto da ridursi a valori residui inferiori ad 1/10 del valore di picco nelle 6 ore successive alla massima emissione

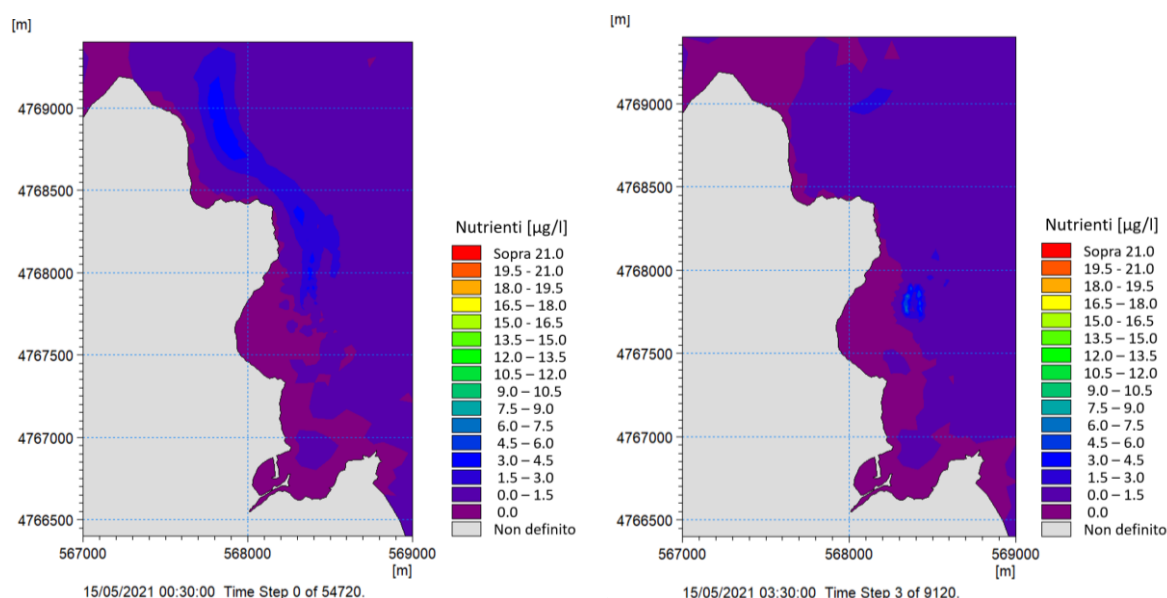


Figura20, Esempio di concentrazione dei nutrienti emessi delle gabbie di maricoltura alle ore 00:30 (sinistra) e alle ore 03:30 (destra) del 15/05/2021.

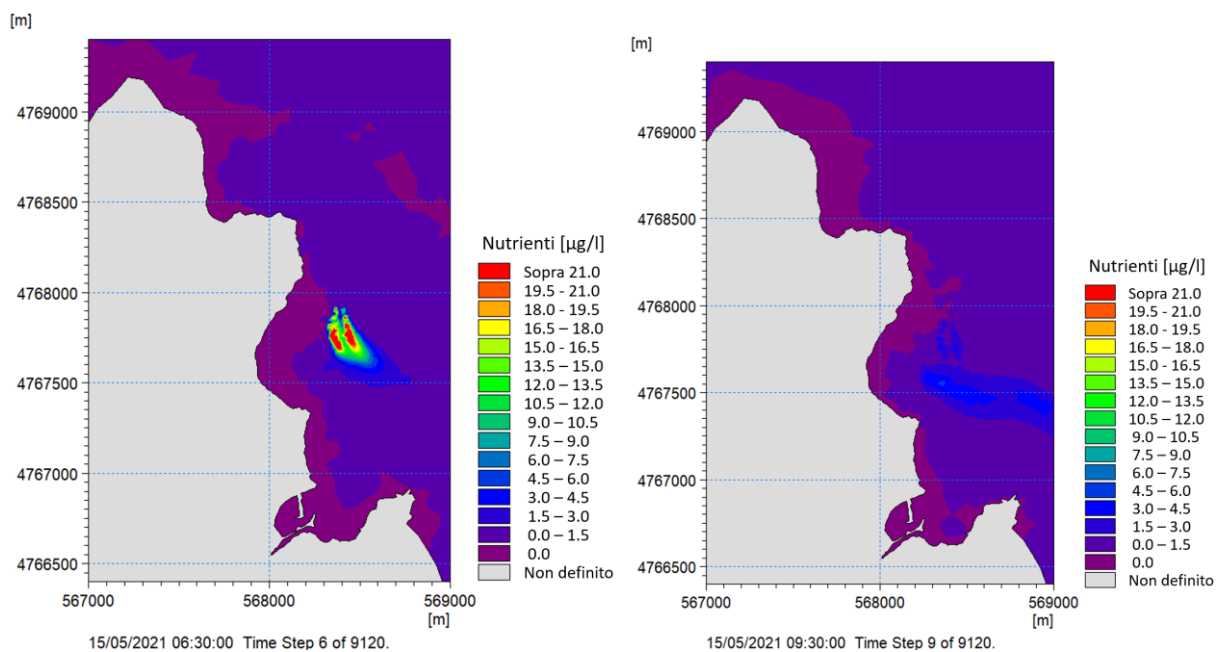


Figura 21 Esempio di concentrazione dei nutrienti emessi delle gabbie di maricoltura alle ore 06:30 (sinistra) e alle ore 09:30 (destra) del 15/05/2021.

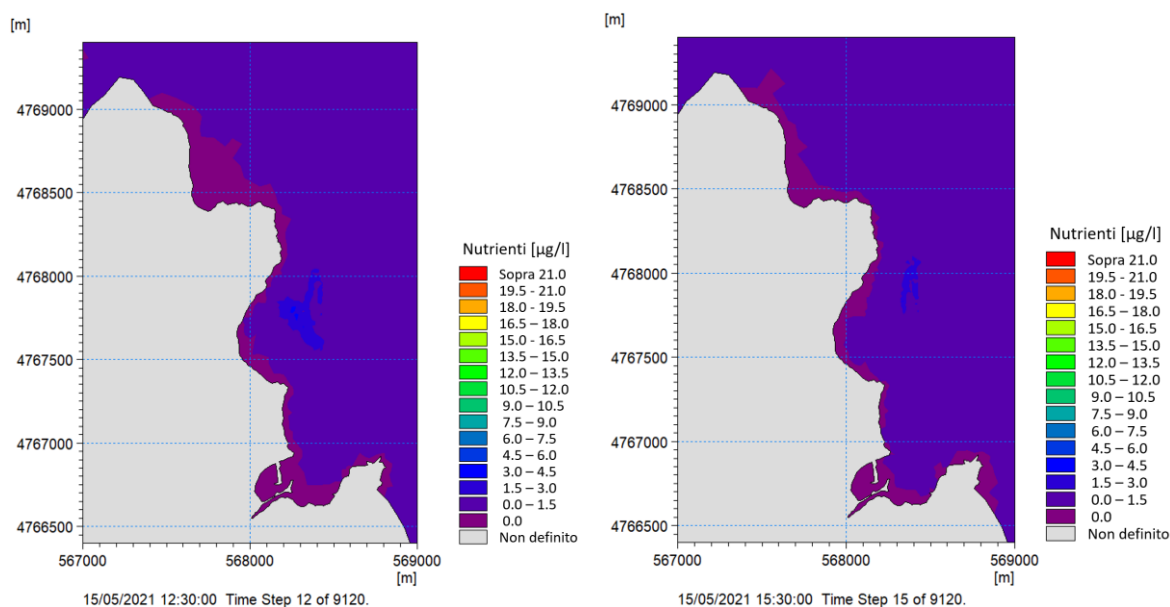


Figura 172, Esempio di concentrazione dei nutrienti emessi delle gabbie di maricoltura alle ore 12:30 (sinistra) e alle ore 15:30 (destra) del 15/05/2021.

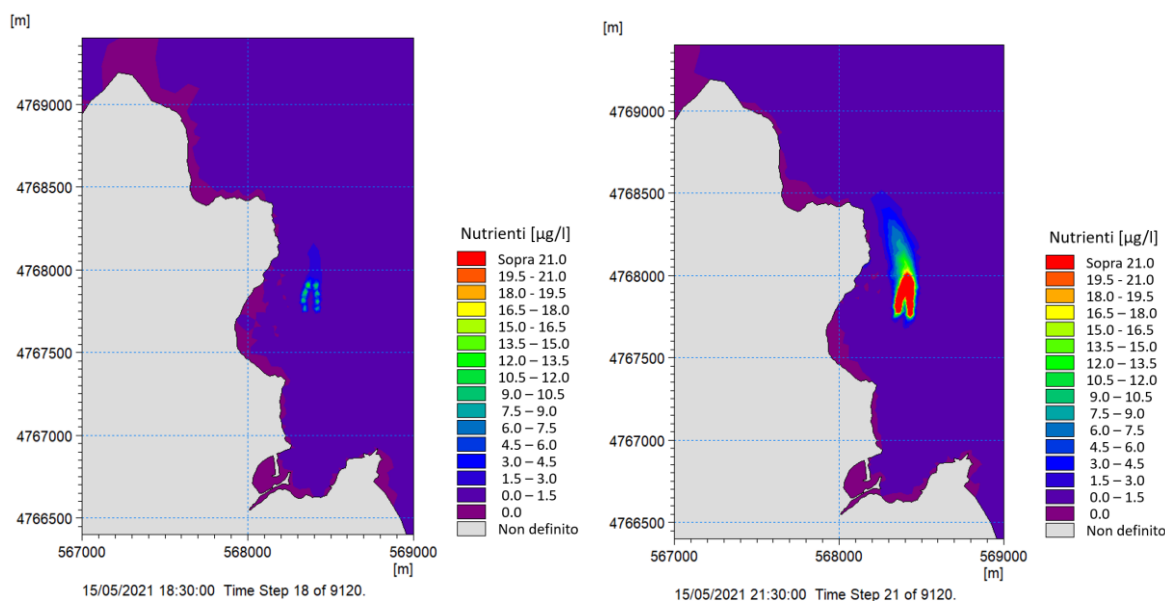


Figura 23, Esempio di concentrazione dei nutrienti emessi delle gabbie di maricoltura alle ore 18:30 (sinistra) e alle ore 21:30 (destra) del 15/05/2021.

L'osservazione che le concentrazioni rilevanti di nutrienti abbiano un carattere marcatamente circoscritto alle immediate vicinanze delle gabbie può essere ulteriormente supportata considerando le serie temporali, con frequenza di 1 ora, della concentrazione di tale materiale nei diversi punti di controllo coincidenti con quelli dove sono state stimate le correnti, introdotti in Figura 8.

Ricordiamo nuovamente che le concentrazioni stimate non hanno valenza reale ma i valori forniti dal-modello forniscono una stima della dispersione del carico nutritivo dell'impianto, della sua direzione e dell'area marina interessata.

Nel punto T2 (Figura 24), interno alla zona delle gabbie, si osservano valori medi sulla verticale della concentrazione di nutrienti con picchi fino a 100 µg/l circa. L'ordine di grandezza del picco nella concentrazione dei nutrienti appare, quindi, confrontabile con i risultati delle campagne di monitoraggio svolte nel 2018, nell'area interna alle gabbie. Le concentrazioni, in questo stesso punto, sono fortemente variabili nell'arco delle 24 ore, durante le quali si passa da valori prossimi allo 0 ai valori massimi, con un valore medio che rimane inferiore ai 30 µg/l.

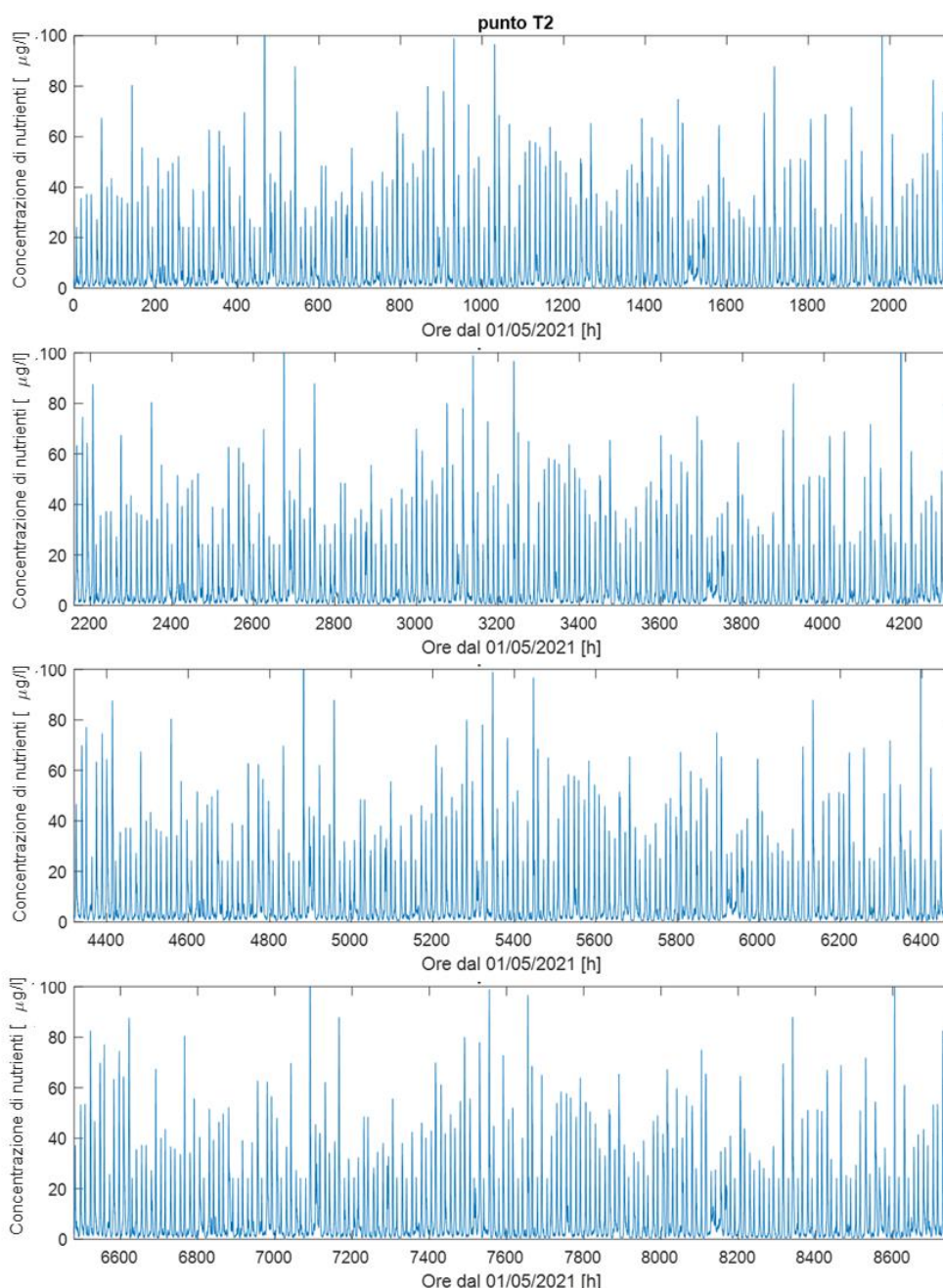


Figura 184 Serie temporale annuale della concentrazione dei nutrienti emessi dalla maricoltura, mediata sulla verticale, nel punto di controllo "T2" situato nell'area delle gabbie. La serie temporale è stata suddivisa in pannelli trimestrali (circa 4300 ore), per una migliore leggibilità.

Nei punti 300S e 300N, situati circa 300 m a sud e a nord, rispettivamente, dell'area delle gabbie, la serie temporale delle concentrazioni di nutrienti per l'anno di riferimento (Fig. 25 e 26) mostra valori di picco raramente superiori ai 20 µg/l e mai eccedenti la soglia dei 40 µg/l.

Allontanandosi ulteriormente dalle gabbie, nei punti a 1000 m (1000S e 1000N, Fig. 27 e 28), le concentrazioni di picco di nutrienti nell'acqua imputabili alla

presenza dell'itticoltura non superano i 10 $\mu\text{g/l}$, con medie $<2 \mu\text{g/l}$, risultando quindi scarsamente significativi.

La stessa considerazione vale per il punto di osservazione collocato in prossimità del porto dell'Isola di Capraia (Fig. 29), dove le massime concentrazioni di nutrienti imputabili ai reflui delle itticultore modellate per l'anno di studio sono inferiori ai 5 $\mu\text{g/l}$.

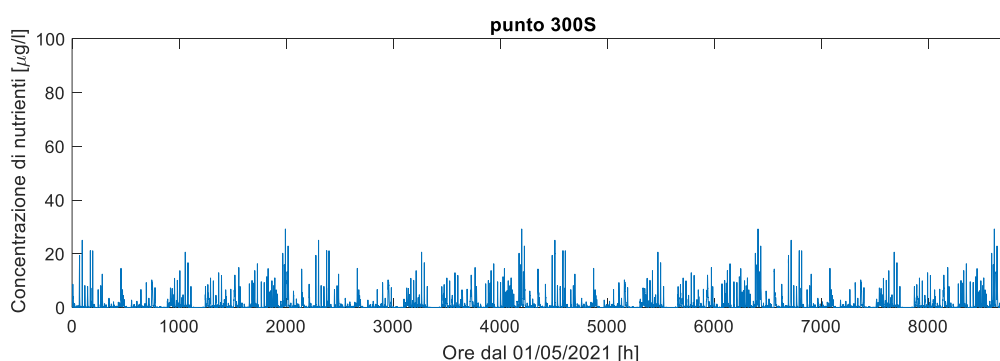


Figura 19, Serie temporale annuale della concentrazione dei nutrienti emessi dalla maricoltura, mediata sulla verticale, nel punto di controllo "300S".

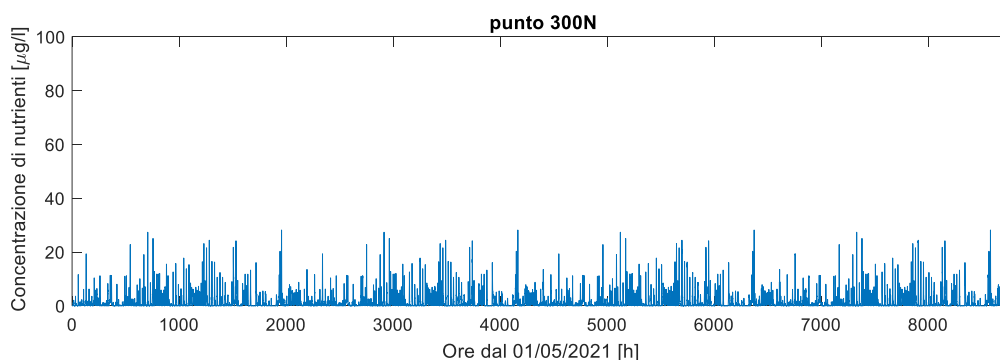


Figura 26, Serie temporale annuale della concentrazione dei nutrienti emessi dalla maricoltura, mediata sulla verticale, nel punto di controllo "300N".

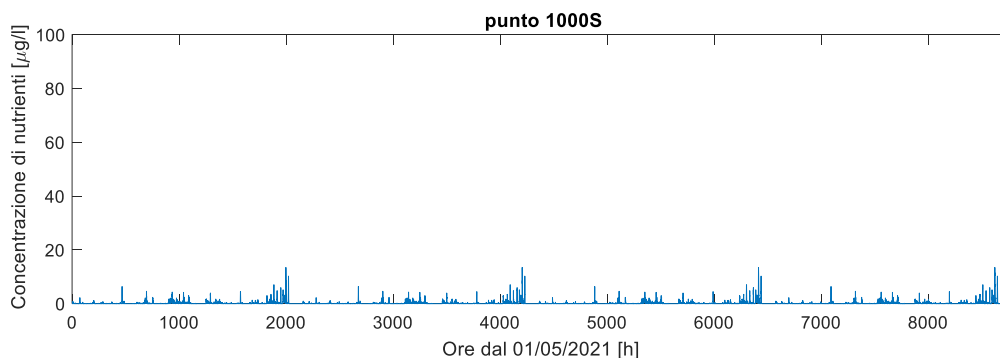


Figura 2720, Serie temporale annuale della concentrazione dei nutrienti emessi dalla maricoltura, mediata sulla verticale, nel punto di controllo "1000S".

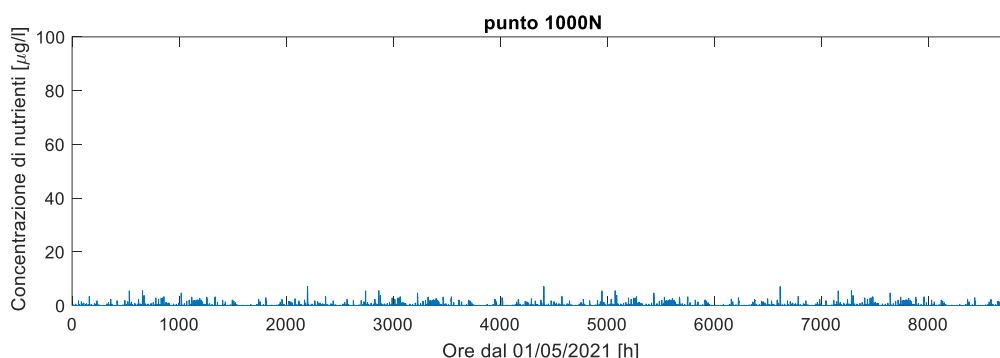


Figura 28, Serie temporale annuale della concentrazione dei nutrienti emessi dalla maricoltura, mediata sulla verticale, nel punto di controllo "1000N".

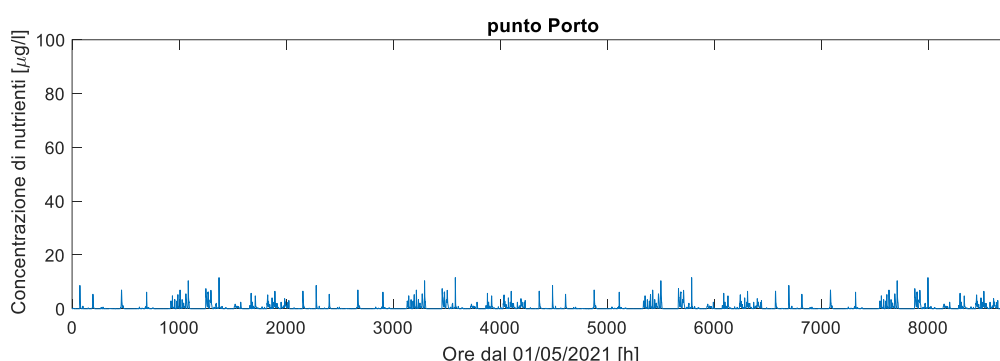


Figura 29, Serie temporale annuale della concentrazione dei nutrienti emessi dalla maricoltura, mediata sulla verticale, nel punto di controllo "Porto".

La Figura 21 riporta le mappe dei valori medi annui della concentrazione di nutrienti, mediata sulla verticale, in tutta l'area di studio; e possibile, osservare come l'area caratterizzata da concentrazioni medie mensili superiori ai 10 µg/l sia limitata ad una zona con estensione inferiore ai 100 m nei dintorni delle gabbie stesse. Ad una distanza di circa 500 m dalle gabbie, il valore medio annuo della concentrazione di nutrienti stimato risulta inferiore a 1 µg/l nell'intero dominio di calcolo, con la sola eccezione di una ristretta area costiera prospiciente la spiaggia di Porto Vecchio, dove comunque le concentrazioni medie stimate risultano notevolmente inferiori al valore di fondo (<10 µg/l). Relativamente ai valori di concentrazione di nutrienti osservati in prossimità della spiaggia, inoltre, e da sottolineare come essi rappresentino il limite superiore delle concentrazioni effettivamente attese, non includendo processi di decadimento dei nutrienti stessi né di diluizione e trasporto degli stessi ad opera delle dinamiche litoranee (e.g., effetti del moto ondoso).

Nella zona del Porto dell'Isola di Capraia, i valori medi mensili della concentrazione di nutrienti indotti dall'itticoltura risultano sostanzialmente indistinguibili da quelli di fondo (i.e., i valori sono prossimi allo zero nel modello numerico). Le figure mettono anche in evidenza come il modello implementato possa offrire uno strumento particolarmente utile per decidere come orientare

eventuali azioni di monitoraggio dell'impatto dell'itticoltura, fornendo una panoramica delle zone verso le quali, con maggiore probabilità, saranno trasportati i reflui ad opera della circolazione idrodinamica-

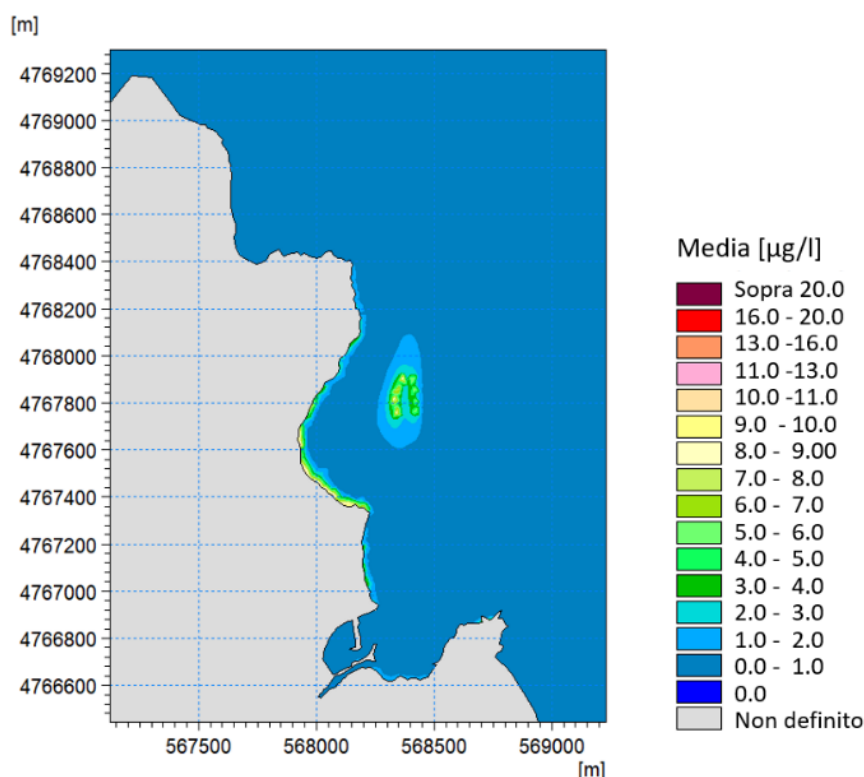


Figura 21, Mappa della concentrazione media annua dei nutrienti emessi dalle gabbie per maricoltura, mediate lungo la verticale, per il periodo maggio 2021 – maggio 2022.

7 CONCLUSIONI

Il lavoro condotto evidenzia che i dati disponibili sulle banche dati pubbliche, elaborati con specifici modelli numerici, sono idonei alla ricostruzione dettagliata del campo di correnti in una vasta area intorno agli impianti di maricoltura.

Nel caso di studio, durante il periodo ricostruito (maggio 2021 – aprile 2022) sono state evidenziate significative differenze fra il campo di velocità superficiale ed i valori presenti alle diverse profondità. Tale evidenza ha reso necessario un approccio modellistico tridimensionale, in grado di riprodurre l'impatto di tale variabilità della circolazione idrodinamica per lo studio della dispersione dei reflui emessi dall'impianto.

Lo studio è stato inoltre completato con la ricostruzione delle correnti nell'area di studio per il periodo di un intero anno per poter valutare le variazioni mensili o



stagionali. Le mappe della velocità mostrano valori occasionalmente molto più elevati in prossimità della costa rispetto ai valori al largo.

La dispersione dell'emissione riflette la forte non stazionarietà della velocità della corrente: durante la stessa giornata, la direzione principale del trasporto dei reflui può passare da quella nord-sud a quella sud-nord, in corrispondenza dell'inversione nel verso della corrente.

Risulta evidente il picco di concentrazione nell'area delle gabbie al momento dell'alimentazione e la rapida riduzione dei valori dei nutrienti presenti al variare del tempo e della distanza dall'alimentazione.

La concentrazione dei nutrienti, risulta più bassa in confronto ai risultati delle analisi eseguite nell'ambito dei piani di monitoraggio delle acque nell'area dell'impianto, ma un confronto diretto non è possibile in quanto non sono note le condizioni idrodinamiche nelle aree di prelievo e l'intervallo temporale fra il momento dell'alimentazione e il prelievo dei campioni.

Le mappe con i valori medi concentrazione possono essere utilizzate per rendere più efficace il campionamento per il monitoraggio della qualità delle acque ed individuare le zone dove l'impatto dell'impianto risulta più alto.

Il modello messo a punto potrebbe avere anche altre applicazioni in nuovi siti destinati alla pratica dell'acquacoltura potendo stimare a priori nell'area interessata la direzione ed intensità delle correnti nei diversi periodi dell'anno nonché le direzioni preferenziali e l'intensità della diffusione dei reflui. In questo modo potrebbero essere confrontati i risultati di diverse possibili localizzazioni anche in funzione dei diversi valori dei carichi produttivi ipotizzati per gli impianti.

L'accuratezza delle stime sugli impatti indotti da un impianto esistente potrebbe essere significativamente migliorata con misure dirette di velocità delle correnti e contemporanei prelievi di campioni per la determinazione delle concentrazioni in una griglia di punti rappresentativi dell'area di studio. Questi dati, ottenuti in almeno due campagne stagionali, permetterebbero la taratura del modello di dispersione e rendere possibili attendibili previsioni a lungo termine degli impatti sulla qualità delle acque.

Sesto Fiorentino 30 gennaio 2024

Prof Ing. Pier Luigi Aminti

Dr. Biol. Saverio Buzzichelli