



Autorità di Sistema Portuale
del Mare di Sardegna

PORTO DI CAGLIARI

ADEGUAMENTO TECNICO FUNZIONALE

Titolo elaborato :

S3 - STUDIO DI CIRCOLAZIONE IDRICA

Scala:

2 4

0 1 0

P R

0 0 3

- 4

M A R

Segretario Generale:
Avv. Natale Ditel

R.U.P.:
Ing. Alessandra Mannai

Collaboratore del R.U.P.:
Ing. Monica Deidda

Consulenze specialistiche di
Ingegneria idraulica marittima



Gruppo di lavoro:
Ing. Paolo Contini
Prof. Ing. Paolo De Girolamo
Ing. Myrta Castellino
Ing. Jessica Ciarrocchi
Arch. Fabrizio D'Andrea

Ing. Gioele Ruffini
Ing. Davide Saltari

Rif. Dis.	Data	Rev.	DESCRIZIONE	Redatto:	Controllato:	Validato:
	03/04/2025	4	INTEGRAZIONE PER ISTRUTTORIA PARERE CSLLPP	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	24/03/2025	3	AGGIORNAMENTO PER PARERE CSLLPP	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	31/01/2025	2	AGGIORNAMENTO PER PARERE CSLLPP	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	20/12/2024	1	EMISSIONE DEFINITIVA	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini
	08/10/2024	0	EMISSIONE IN BOZZA	Ciarrocchi	De Girolamo	Contini

La MODIMAR s.r.l. si riserva la proprietà di questo disegno con la proibizione di riprodurlo o trasferirlo a terzi senza autorizzazione scritta.
This document is property of MODIMAR s.r.l. Reproduction and divulgation forbidden without written permission

Visto del Committente:

Adeguamento Tecnico Funzionale	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 24.03.2025					
	24	010	PR	003	3	MAR

INDICE

1 INTRODUZIONE	1
1.1 Obiettivi dello studio e metodologia di lavoro.....	1
2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO DI INTERESSE E CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI IDRAULICHE	3
3 PARAMETRI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEL RICAMBIO IDRICO PORTUALE	7
4 IMPOSTAZIONE DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE	10
4.1 Modelli numerici utilizzati.....	10
4.2 Scenari e configurazioni esaminate e relative griglie di calcolo.....	10
4.3 Condizioni al contorno e modalità esecutive delle simulazioni	16
5 RISULTATI IDRODINAMICI RELATIVI ALLA FASE 1	18
5.1 Validazione marea astronomica.....	18
5.2 Risultati dell'idrodinamica in configurazione ATTUALE	19
5.2.1 Configurazione ATTUALE.....	19
5.2.2 Configurazione ATTUALE con pompa	21
5.2.3 Comparazione idrodinamica nelle sezioni tra configurazione ATTUALE con e senza pompa	24
5.3 Risultati idrodinamica portuale configurazione di PRP	25
5.3.1 Configurazione di PROGETTO con 1 pompa	26
5.3.2 Configurazione di PRP con 2 pompe	30
6 RISULTATI IDRODINAMICI RELATIVI ALLA FASE 2	34
6.1 Configurazione di ATF2025 con 2 pompe	34
6.1.1 Configurazione di ATF2025 con 3 pompe.....	37
6.1.2 Comparazione idrodinamica nelle sezioni tra configurazione di ATF2025 con 2 e 3 pompe.....	40
7 RICAMBIO IDRICO PORTUALE	41
7.1 Risultati areali.....	42
7.2 Tempo di Lavaggio ed Efficienza del ricambio idrico	49
8 CONCLUSIONI	52

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

1 INTRODUZIONE

L'AdSP del Mare di Sardegna con Decreto n. 216 del 14/06/2024 ha affidato alla società Modimar s.r.l. l'attività di supporto specialistico alla Direzione Tecnica SUD dell'Ente per lo studio della configurazione delle opere marittime e per gli aspetti di ingegneria marittima, finalizzato alla predisposizione dell'Adeguamento Tecnico Funzionale del PRP per la "Zona A" – Porto Turistico del Porto di Cagliari (CIG B22212C614).

La presente relazione riporta i risultati dello "Studio di circolazione idrica" che costituisce parte del servizio di supporto specialistico di cui sopra.

Il ruolo di coordinamento del gruppo di lavoro della Modimar, che ha curato le prestazioni specialistiche di ingegneria idraulica marittima a supporto del Servizio Tecnico dell'AdSP, è stato svolto dall'Ing. Paolo Contini.

Questo specifico Studio sulla circolazione idrica, inerente la "Zona A" considerando le conformazioni planimetriche attuali, di PRP e di Adeguamento Tecnico Funzionale, è stato redatto dal Prof. Ing. Paolo De Girolamo che si è avvalso del supporto del Dott. Ing. Ruffini Gioele.

1.1 Obiettivi dello studio e metodologia di lavoro

L'obiettivo del presente studio è quello di analizzare il ricambio idrico dell'area marina del Porto Vecchio di Cagliari destinata a costituire il Porto Turistico (vedi Figura 2.3) in località "Su Siccu" individuata dal vigente PRP come "Zona A". Questo studio specialistico si è articolato in due fasi:

- FASE 1: nella quale viene analizzato il ricambio idrico in relazione alle seguenti configurazioni riscontrando lo specifico aspetto idraulico marittimi rilevato ⁽¹⁾ dal CSLP nel nell'ambito del Parere n.43/2010 reso nell'adunanza del 4/08/2010, sul PRP:
 - **Configurazione Attuale** (vedi Figura 4.1);
 - **Configurazione Attuale con circolazione forzata tramite una pompa** avente la funzione di facilitare il ricambio idrico (vedi Figura 4.2);
 - **Configurazione di PRP** (ovvero prolungamento dell'attuale Molo Bonaria per la delimitazione della Zona A Porto Turistico) **con circolazione forzata tramite una pompa** (vedi Figura 4.3);
 - **Configurazione di PRP con circolazione forzata tramite due pompe** (vedi Figura 4.4).
- FASE 2: il ricambio idrico viene analizzato in relazione all'ottimizzazione della configurazione di PRP contemplata dall'Adeguamento Tecnico Funzionale (2025) specifico per la Zona A:
 - **Configurazione di ATF2025 con due pompe** (vedi Figura 4.5);
 - **Configurazione di ATF2025 con tre pompe** (vedi Figura 4.6).

Complessivamente si sono analizzati sei scenari, utilizzando la modellistica di seguito illustrata.

Come descritto con maggior dettaglio nei capitoli seguenti, l'ATF inerente la "zona A" Porto Turistico, contempla l'ottimizzazione funzionale del prolungamento previsto dal vigente PRP per l'attuale Molo di Bonaria tramite l'inserimento di uno sporgente interno (molo) avente la funzione razionalizzare lo specchio d'acqua del Porto Turistico delimitandolo in due distinte sub-aree di ormeggio.

¹ A pagina 36 del Parere è precisato: *riguardo la porzione del porto storico destinata al diporto nautico ("Su Siccu"), si suggerisce, in fase progettuale e/o gestionale, l'adozione di idonei provvedimenti per garantire la vivificazione del relativo specchio acqueo.*

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

Tenuto conto, come peraltro evidenziato nel parere del CSLPP, che la riqualificazione strutturale (in prolungamento) del Molo di Bonaria, delimitando significativamente lo specchio d'acqua rispetto alla conformazione attuale, potrebbe condizionare le attuali condizioni naturali di ricambio idrico, l'obiettivo del presente studio specialistico è quello di valutare oggettivamente la necessità o meno di adottare un sistema ricambio forzato dei volumi d'acqua invasati nello specchio d'acqua del porto turistico esaminando diversi scenari di intervento.

Per la valutazione oggettiva della capacità di ricambio idrico si è fatto riferimento ai parametri specifici suggeriti dalla letteratura di settore per effettuare analisi di questo tipo.

Per quanto riguarda le forzanti idrauliche da prendere in esame per effettuare lo studio, si è deciso, utilizzando un approccio cautelativo, di considerare la sola marea astronomica, trascurando quindi l'azione del vento, il moto ondoso e gli apporti idrici di origine fluviale costituiti nella zona in esame da quelli relativi al Canale San Bartolomeo che sfocia in prossimità del Porto Turistico.

La valutazione del ricambio idrico portuale è stata effettuata utilizzando due modelli numerici, sviluppati dal famoso laboratorio olandese Deltares.

Il primo modello è stato utilizzato per calcolare il campo idrodinamico del porto, forzato da una serie di cicli di variazioni del livello del mare, indotti dalla marea astronomica, della durata complessiva di circa 10 giorni.

Il secondo modello, invece, noto il campo idrodinamico, risolve le equazioni di dispersione e diffusione di sostanze presenti nell'acqua.

Utilizzando un approccio consueto per questo tipo di studi, nel caso in esame si è supposto che nella porzione di porto di interesse, all'inizio delle simulazioni sia presente, con una concentrazione unitaria, un soluto passivo, ovvero che non subisce fenomeni chimici di decadimento nel tempo. Partendo quindi da queste condizioni, si è potuto valutare in quanto tempo i soli cicli di marea astronomica riescono a ridurre in maniera significativa la concentrazione della stessa sostanza.

2 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DEL SITO DI INTERESSE E CARATTERIZZAZIONE DELLE FORZANTI IDRAULICHE

Con riferimento alla Figura 2.1, il Porto di Cagliari si colloca nella porzione meridionale dell'isola e nella zona centrale dell'omonimo golfo che si affaccia sul Canale di Sardegna, il quale divide la stessa dalle coste della Tunisia.

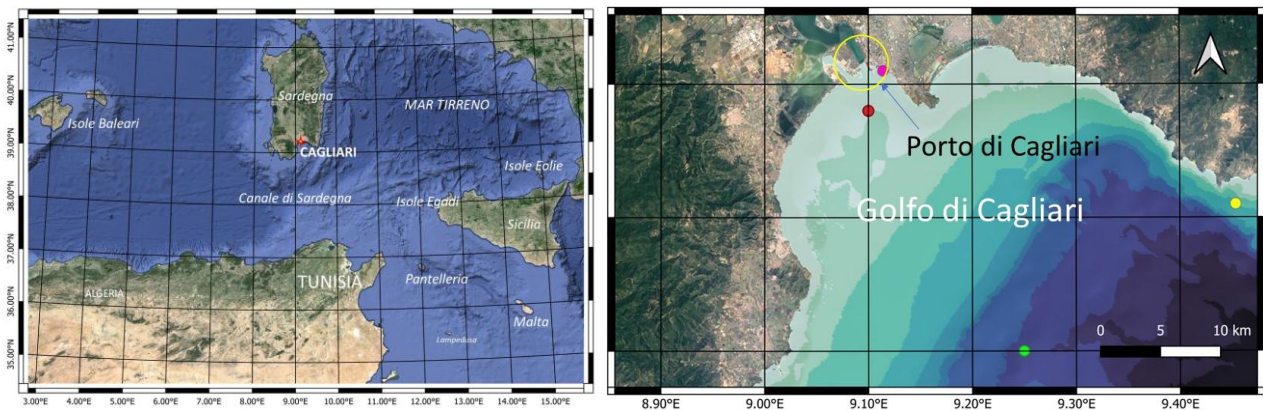


Figura 2.1 - Inquadramento geografico di Cagliari e del Porto.



Figura 2.2 - Porto di Cagliari nello stato attuale (2024).

Nella Figura 2.2 è riportata la situazione attuale del Porto di Cagliari il quale è suddiviso in due parti, il Porto Canale, situato ad Ovest, e il Porto Vecchio situato ad Est.

Nella Figura 2.3 è riportata la zonizzazione del Porto di Cagliari prevista dal PRP.

L'area di interesse per il presente lavoro è costituita dalla Zona A (porto turistico) che è localizzata nella parte meridionale del Porto Vecchio ed è evidenziata nella Figura 2.3 con la linea tratteggiata gialla. Inoltre nella figura è evidenziata la nuova diga di delimitazione del Porto Turistico prevista dal PRP.

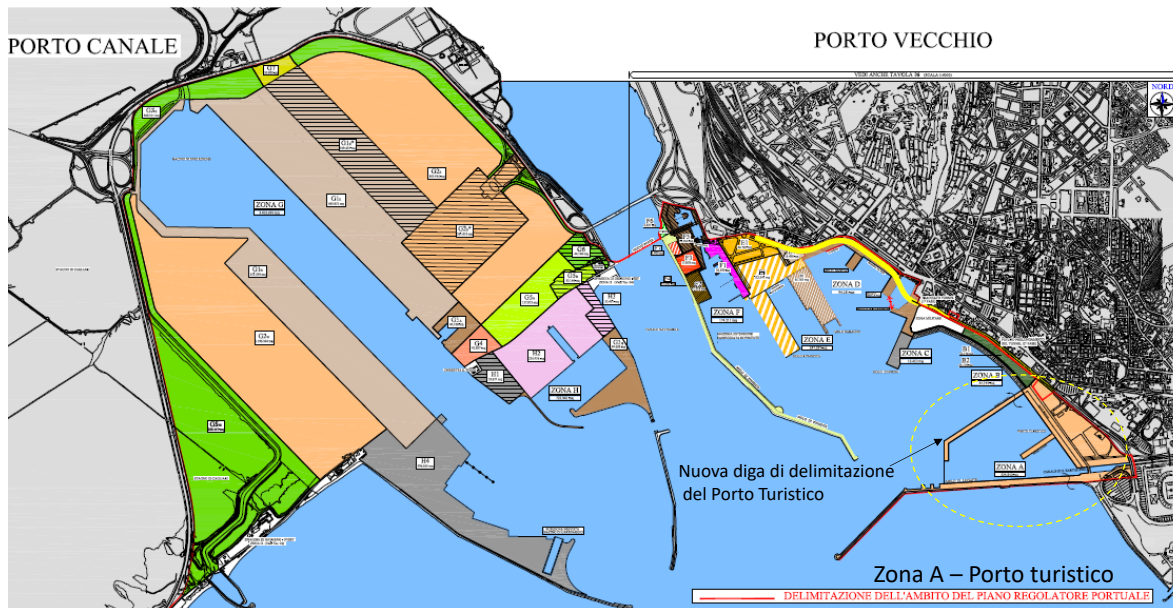
PORTO DI CAGLIARI

Figura 2.3 - Porto di Cagliari - Zonizzazione del Porto Canale e del Porto Vecchio prevista dal PRP.

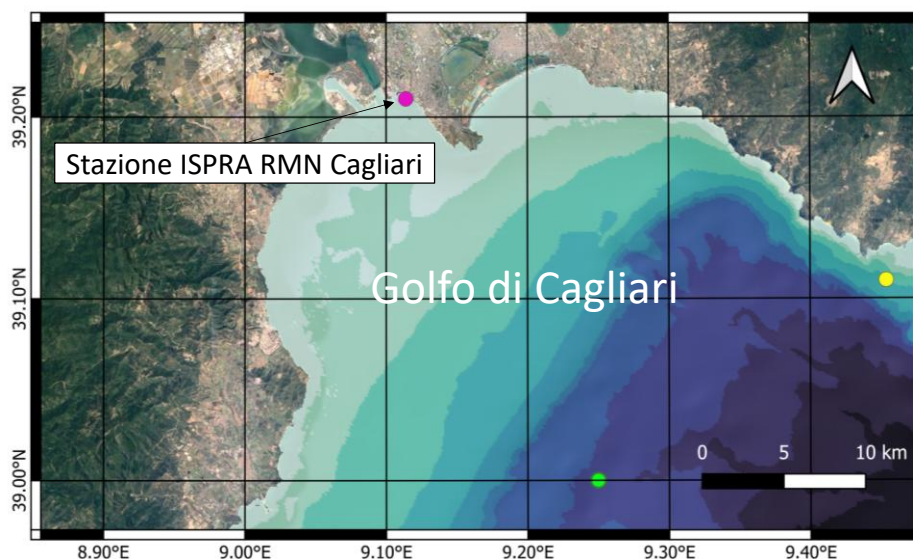


Figura 2.4 - Posizione della Stazione della Rete Mareografica Nazionale (RMN) di Cagliari gestita dall'ISPRM.

Per definire le forzanti idrauliche necessarie per lo studio del ricambio idrico portuale, si sono utilizzati i risultati di alcune analisi eseguite nell'ambito dello Studio Meteomarinò al quale si rimanda per i necessari approfondimenti, richiamandone di seguito solo quelli di diretto interesse per le analisi descritte nel presente rapporto.

In generale si può affermare che nella situazione in esame le principali forzanti idrauliche in grado di generare l'idrodinamica del porto sono costituite:

- dalla marea astronomica;
- dall'azione del vento;
- dall'azione del moto ondoso.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

A Cagliari, come in gran parte del Mediterraneo, il moto ondoso può essere considerato correlato con il vento.

Di queste tre forzanti, la sola che è in grado di agire in modo continuativo è costituita dalla marea astronomica perché il vento e il moto ondoso nei giorni di calma non sono presenti.

Con riferimento allo studio meteomarinico e ai dati anemometrici registrati dalla stazione RMN di Cagliari (vedi Figura 2.4) situata nel Porto Vecchio, il vento risulta di intensità inferiore od uguale a 4 kn per circa il 25% del tempo e quindi praticamente non è in grado di generare una sensibile circolazione idrica nel porto.

Pertanto, utilizzando un approccio cautelativo per le finalità del presente studio specialistico, si è deciso di utilizzare nelle simulazioni numeriche la marea astronomica come unica forzante idraulica.

Sostanzialmente operando in questo modo si è deciso di analizzare le peggiori condizioni meteomarine che si possono verificare a Cagliari rispetto alla capacità di ricambio idrico naturale del porto.

Per caratterizzare la marea astronomica si sono utilizzati i risultati dello Studio Meteomarinico che sono basati sulle misure di marea registrate dalla stazione di Cagliari appartenente alla Rete Mareografica Italiana (RMN) gestita dall'ISPRA e posizionata, come già accennato, nel Porto Vecchio (vedi Figura 2.4).

Le caratteristiche dei dati mareografici della stazione RMN di Cagliari sono riportate nella Tabella 2.1.

Rif.	Fonte dati	Descrizione	Posizione	Periodo
1	Rete Mareografica Nazionale (RMN - ISPRA) Stazione di Cagliari http://dati.isprambiente.it/	Dati di livello misurati	39.210°N 9.114° E	2010 2024

Tabella 2.1 - Dati di livello acquisiti.

I valori caratteristici della marea astronomica di Cagliari, desunti dalle misure di marea sono sintetizzati nella Tabella 2.2 (tratta dallo Studio Meteomarinico) dove si è utilizzata la nota simbologia internazionale.

	Zero-strumento (m)	L.M.M. (m)
HAT	0.44	0.24
MHWS	0.34	0.14
MHWN	0.29	0.10
MSL	0.19	0.00
MLWN	0.11	-0.08
MLWS	0.06	-0.13
LAT	-0.06	-0.25

Tabella 2.2 - Livelli caratteristici della marea astronomica per la stazione di Cagliari. Ricostruzione basata su circa quindici anni di misura.

Dalla Tabella 2.2 si evince che l'escursione di livello indotta dalla marea astronomica a Cagliari è modesta come lo è nella maggior parte dei porti del Mediterraneo. In particolare risulta compresa tra circa 18 cm nelle epoche di quadratura (differenza tra MHWN e MLWN) e in circa 28 cm nelle epoche di sizigia (differenza tra MHWS e MLWS).

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

Le simulazioni numeriche descritte nel seguito sono state eseguite per un intervallo di tempo di 10 giorni, facendo riferimento a condizioni di marea medie che includono la fase di sizigia.

Nel caso del Porto Vecchio di Cagliari in realtà ci sarebbe una ulteriore forzante idraulica da prendere in esame nell'ambito dell'analisi del ricambio idrico portuale. Questa forzante è costituita dagli apporti idrici al bacino portuale del canale San Bartolomeo che sfocia nel Porto Vecchio in adiacenza al molo Sud, ovvero nella zona interessata dal Porto Turistico.

Tuttavia, dall'analisi dei documenti messi a disposizione dalla AdSP inerenti gli aspetti idraulici dell'area, si è desunto che il Canale San Bartolomeo, a causa del modesto bacino sotteso, è soggetto a portate discontinue che possono risultare significative per il ricambio idrico portuale solo durante gli eventi di piena del canale. Pertanto si è deciso di non tenerne conto.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

3 PARAMETRI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DEL RICAMBIO IDRICO PORTUALE

Al fine di confrontare quantitativamente i diversi scenari oggetto delle simulazioni numeriche è necessario definire uno o più parametri che quantifichino il ricambio idrico del porto turistico di Cagliari.

Come riportato dalla letteratura internazionale, tali parametri possono avere sia un significato globale che locale. Nel primo caso ci si riferisce a parametri che rappresentano l'intero bacino portuale, nel secondo a zone specifiche poste all'interno dello stesso.

I parametri tipicamente impiegati in applicazioni di tipo portuale sono:

- il "Prisma di marea" (Tidal Prism, TP);
- il "Tempo di lavaggio" (Flushing Time, FT);
- l'Efficienza del ricambio idrico.

Nel seguito si descrivono i parametri sopra menzionati e le rispettive procedure di valutazione.

Prisma di marea

L'evoluzione temporale dei livelli determinati dalla presenza dell'azione oscillatoria della marea astronomica determina un flusso oscillante che attraversa l'imboccatura portuale o il canale di collegamento tra il porto o la rada con il mare aperto. Durante la fase crescente della marea (flusso, "flood"), un certo volume di fluido (dipendente dalle caratteristiche della marea e della zona interna in esame) entra nel porto o nella rada per poi uscire durante la fase calante (riflusso, "ebb"). Il risultato di tale movimento idrico causa il mescolamento dell'acqua contenuta nel porto o nella rada con quella presente all'esterno della zona. L'efficienza E_{TP} di tale scambio può essere quantificata tramite il rapporto del volume fluido in ingresso nella rada (prisma di marea – Tidal Prism, TP) ed il volume totale fluido contenuto nel porto o nella rada (V_{tot}):

$$E_{TP} = \frac{TP}{V_{tot}}$$

Si osserva che, alla luce della definizione di efficienza (globale) del ricambio, è possibile definire il tempo di ricambio (TR) come il rapporto tra il volume fluido contenuto nella rada e la portata media giornaliera in ingresso o in uscita (\bar{Q}):

$$TR = \frac{V_{tot}}{\bar{Q}} = T \frac{V_{tot}}{TP}$$

nella quale il periodo T è la durata della fase di flusso (o riflusso).

Si evidenzia che i parametri descritti (E_{TP} e TR) possono essere utilizzati anche per valutare il ricambio indotto dai cicli di brezza laddove le fasi di flusso e riflusso siano indotte dall'alternanza di eventi anemometrici (brezza).

Nell'ambito della valutazione dell'efficacia del ricambio è possibile caratterizzare il ricambio idrico tramite la valutazione dell'estensione del getto che accompagna l'entrata di fluido nella rada. Tale parametro può essere valutato determinando l'estensione dell'area interessata da velocità superiori ad una soglia prefissata.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

La valutazione dei parametri appena descritti necessita solo dell'applicazione di un modello di idrodinamica.

Tempo di lavaggio

Il tempo di lavaggio (flushing time, FT) è definito convenzionalmente come il tempo necessario a far scendere la concentrazione di una sostanza passiva (non reagente con il fluido e non influente sul campo cinetico), inizialmente presente nell'intero bacino da un valore pari a 100%, ad un valore (medio) pari a 36,8% (corrispondente ad una frazione pari a $0,368 = e^{-1}$):

$$FT = t(\bar{c} = 36.8\%) - t(\bar{c} = 100\%)$$

Tale parametro può essere stimato tramite l'utilizzo di un modello numerico idrodinamico, per il calcolo del campo cinetico, e di un modello numerico in grado di risolvere le equazioni di diffusione e dispersione.

Si nota che il tempo di lavaggio FT è intimamente correlato con il tempo di ricambio descritto precedentemente (TR). Si consideri di porre una quantità nota (M_0) di una sostanza passiva in un volume di controllo V nell'istante t_0 a cui corrisponde una concentrazione C_0 . Nel caso di volume V e flussi al contorno costanti la variazione nel tempo della concentrazione di sostanza $C(t - t_0)$ è descritta dalla seguente relazione:

$$C(t - t_0) = C_0 e^{-(Q/V)(t-t_0)}$$

nella quale Q rappresenta il flusso di sostanza (entrante o uscente) attraverso i contorni del volume di controllo. Dalle definizioni di tempo di lavaggio e di ricambio e ponendo $t_0 = 0$ si ottiene:

$$0.368C_0 = \frac{C_0}{e} = C_0 e^{-(Q/V)FT}$$

da cui discende, ricordando la definizione del tempo di ricambio TR ,

$$FT = TR$$

Tale identità è valida considerando la portata di sostanza media uscente (o entrante) dal volume di controllo pari a quella del fluido, nel rispetto, dunque, dell'ipotesi per cui la sostanza sia considerata passiva (non reagente con il fluido e non influente sul campo cinetico).

Si evidenzia che il calcolo di questo parametro richiede l'applicazione in successione di due modelli: un modello di idrodinamica e un modello che risolve le equazioni di dispersione (e diffusione) di un soluto passivo disciolto nell'acqua.

Efficienza del ricambio idrico

L'efficienza del ricambio idrico (E) per ogni ciclo di marea (o di brezza) viene definito come segue:

$$E(x) = 1 - \left[\frac{C_i(x)}{C_0(x)} \right]^{1/i}$$

nella quale $C_0(x)$ è la concentrazione iniziale di una sostanza passiva in corrispondenza della posizione x , $C_i(x)$ è la concentrazione della sostanza dopo un numero i di cicli di marea in corrispondenza della stessa posizione x . Si nota che tale parametro permette di valutare l'efficienza del ricambio idrico (e sue variazioni in caso di modifica della configurazione) in ogni punto del

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

dominio di interesse. Tuttavia, è possibile definire l'efficienza del ricambio idrico anche di macro-aree (o dell'intero specchio portuale) utilizzando valori medi di concentrazione.

Scelta dei parametri utilizzati nell'analisi del ricambio idrico portuale

Per lo studio corrente si è deciso di utilizzare come parametri di riferimento il tempo di lavaggio e l'efficienza del ricambio idrico e di non utilizzare il Prisma di marea in quanto questo parametro (più semplice da determinare perché non richiede l'applicazione del modello di diffusione e dispersione) non è adatto per valutare l'efficienza del ricambio idrico di una porzione di un bacino portuale come nel caso in esame.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

4 IMPOSTAZIONE DELLE SIMULAZIONI NUMERICHE

4.1 Modelli numerici utilizzati

I modelli numerici utilizzati per valutare il ricambio idrico portuale sono costituiti dal modulo FLOW-FM e dal modulo Water Quality facenti parte della suite DELFT3D-FM (FM = Flexible Mesh) sviluppata da Deltares.

Il modulo FLOW-FM risolve le equazioni di Navier-Stokes utilizzando l'ipotesi di "acqua bassa" ("shallow water") con l'approssimazione di Boussinesq. Il modello è stato utilizzato nel presente lavoro nella sua formulazione 3D (a strati) utilizzando 8 layers (strati) orizzontali che risolvono le grandezze idrodinamiche nella direzione verticale.

Il modulo Water Quality risolve le equazioni per calcolare processi di trasporto fisico, (bio)chimico e biologico di sostanze. Alla base del modello numerico viene usata un'equazione di avvezione-diffusione-reazione che viene risolta numericamente. Il modello è stato utilizzato nel presente lavoro nella sua formulazione integrata sulla verticale.

I due moduli sono stati applicati in modalità accoppiata "offline" in modo tale che FLOW-FM risolva il campo idrodinamico indotto da marea astronomica e Water Quality, utilizzando i risultati dell'idrodinamica calcolata da FLOW-FM, possa a sua volta calcolare la dispersione del soluto passivo.

Il codice consente di schematizzare il dominio di calcolo mediante una griglia agli elementi finiti e quindi permette di aumentare la risoluzione spaziale nelle aree in cui si sviluppano i massimi gradienti di velocità e di seguire agevolmente i contorni "terra", costituiti dalla costa e dalle opere marittime, anche fortemente irregolari.

4.2 Scenari e configurazioni esaminate e relative griglie di calcolo

Utilizzando la modellistica numerica sopra descritta, si sono analizzati i seguenti scenari:

- FASE 1:
 - **Configurazione Attuale** (assenza della diga interna di delimitazione del porto turistico);
 - **Configurazione Attuale con una pompa** avente la funzione di facilitare il ricambio idrico;
 - **Configurazione di PRP con una pompa** (presenza della diga interna di delimitazione del porto turistico vedi Figura 2.3);
 - **Configurazione di PRP con due pompe.**
- FASE 2:
 - **Configurazione ATF2025 con due pompe** (configurazione di progetto ottimizzata, vedi Figura 4.5);
 - **Configurazione ATF2025 con tre pompe.**

In totale quindi si sono analizzati sei scenari, costituiti da tre configurazioni diverse per le opere marittime (assenza e presenza della nuova diga di delimitazione del porto turistico e delimitazioni specchi acquei nell'ottimizzazione della configurazione di PRP).

Le pompe utilizzate nelle simulazioni numeriche presentano le caratteristiche tipiche di quelle utilizzate per questi scopi. Si tratta di pompe intubate a bassa prevalenza con portate nell'ordine del metro cubo al secondo.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

Per riprodurre le batimetrie e le opere marittime del presente studio si è fatto riferimento ai seguenti dati batimetrici e topografici:

- database Emodnet, estratto a Luglio 2024, utilizzato per riprodurre i fondali all'esterno dei bacini portuali;
- rilievo batimetrico di dettaglio delle zone interne portuali fornito dalla AdSP;
- configurazione di PRP per le opere marittime concordi con quelle previste dall'ATF.

La griglia di calcolo generale, riportata in Figura 4.1, è stata generata con un'estensione che ricopre l'intera zona portuale e la zona limitrofa, includendo anche il porto canale con una risoluzione spaziale variabile compresa tra circa 50 m lungo il contorno di largo, fino ad un minimo di 10.0 m nella zona circostante e interna ai bacini portuali. La griglia è stata definita con una risoluzione più ampia, pari a circa 150 m all'interno del Porto Canale in quanto, nonostante si sia deciso di includerlo nelle simulazioni in modo tale da considerarne il suo possibile effetto idrodinamico sul bacino del Porto Vecchio, non risulta necessario descriverne con esattezza l'idrodinamica perché l'area è posta al di fuori della zona di interesse. La griglia di calcolo è stata realizzata con maglie triangolari in modo tale da poter discretizzare agevolmente la linea di costa e le opere portuali ed è stata delimitata, lato mare aperto, con un contorno circolare in corrispondenza del quale è stata imposta la variazione del livello indotta dalla marea astronomica.

I dettagli delle griglie di calcolo utilizzate per simulare i sei scenari sono riportate nella Figura 4.2, nella Figura 4.3, nella Figura 4.4, nella Figura 4.5 e nella Figura 4.6. In generale le caratteristiche di tutte le griglie sono le stesse in modo tale da poter rendere confrontabili tra di loro i vari scenari.

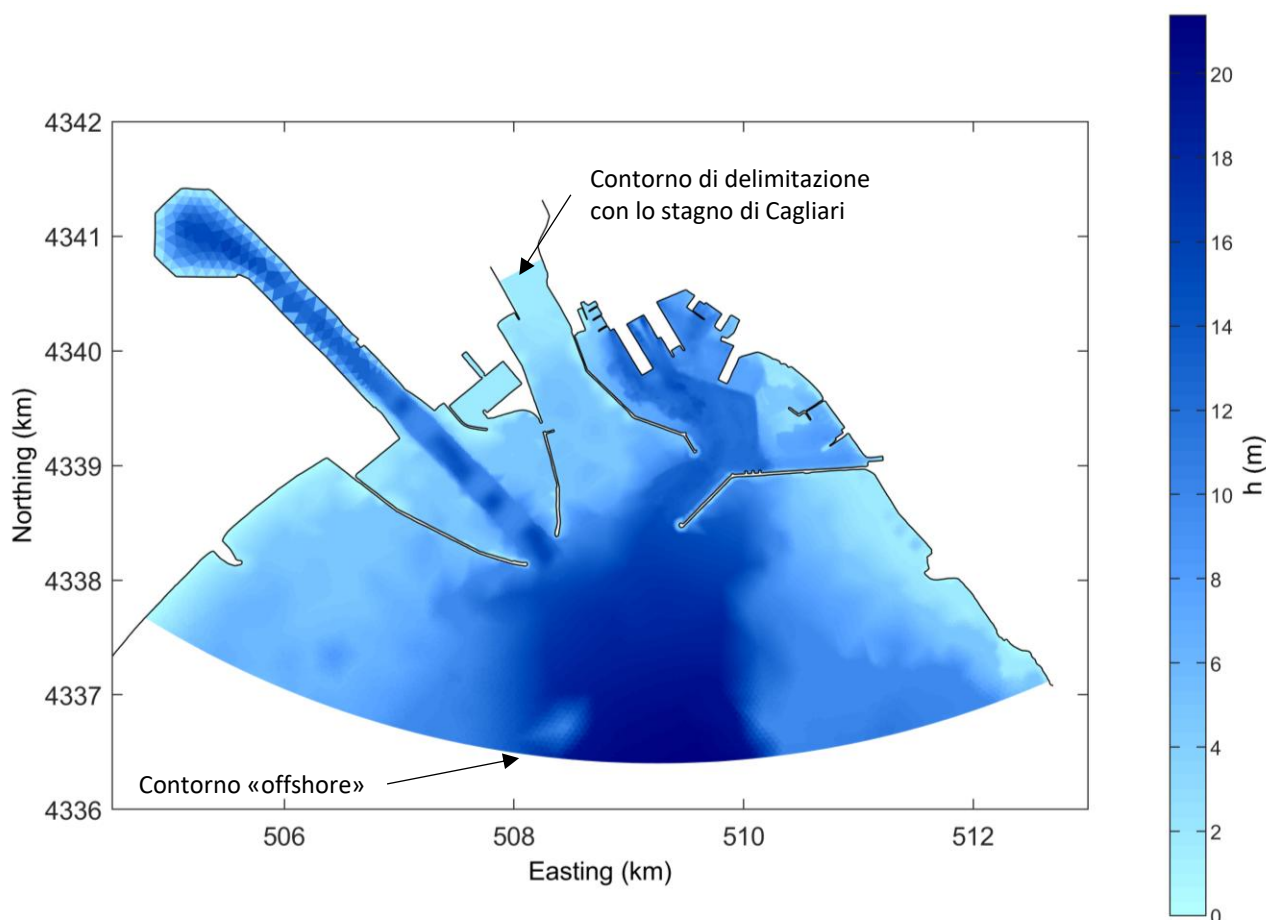


Figura 4.1 - Griglia di calcolo e batimetria per le simulazioni della configurazione ATTUALE.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

Per ogni griglia di calcolo sono state definite anche due sezioni di controllo rappresentate nelle figure in nero, una posizionata in corrispondenza all'imboccatura principale del porto (sezione 1-1') ed una posizionata in prossimità della nuova imboccatura del porto turistico (sezione 2-2'), dalla quale sono state esportate le grandezze idrodinamiche. Come convenzione è stato utilizzato un valore positivo di velocità per un flusso entrante nel bacino portuale (flood).

Come si può vedere dalle figure, le pompe sono state posizionate il più lontano possibile dalla nuova imboccatura portuale del porto turistico per aumentare la loro efficienza nel favorire il ricambio idrico.

Per quanto riguarda la direzione di funzionamento delle pompe, si è assunto come d'obbligo in queste situazioni che la pompa prelevi l'acqua dalla zona posta all'esterno del bacino dove si deve favorire il ricambio idrico, forzando quindi una circolazione idrica che mediamente si muove dalla zona di immissione dell'acqua verso l'imboccatura portuale.

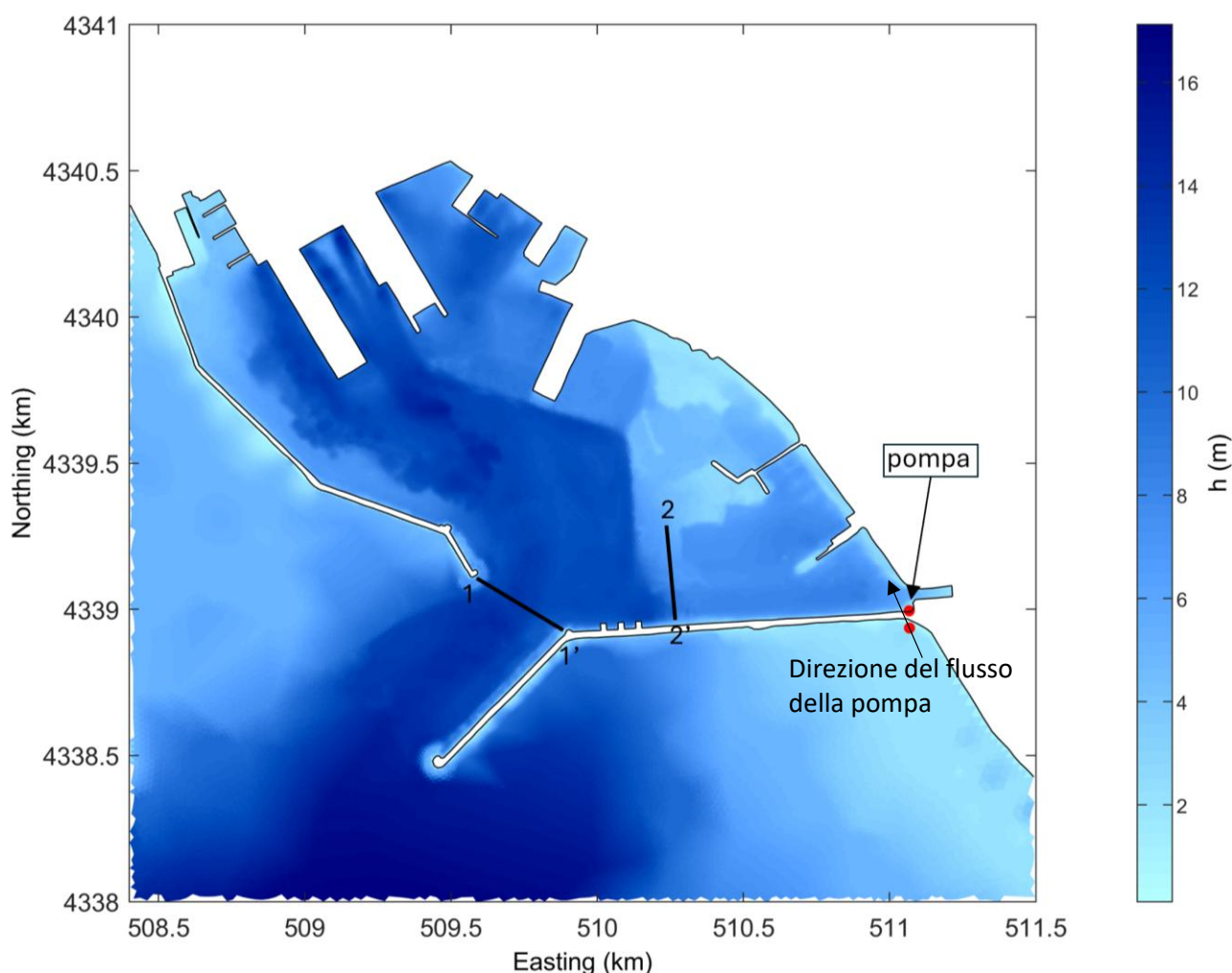


Figura 4.2 - Ingrandimento della griglia di calcolo e batimetria per le simulazioni della configurazione ATTUALE. In rosso è rappresentata la condizione al contorno source/sink utilizzata per simulare la pompa ed in nero le due sezioni usate per la misura della velocità entrante ed uscente dall'intero bacino portuale.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

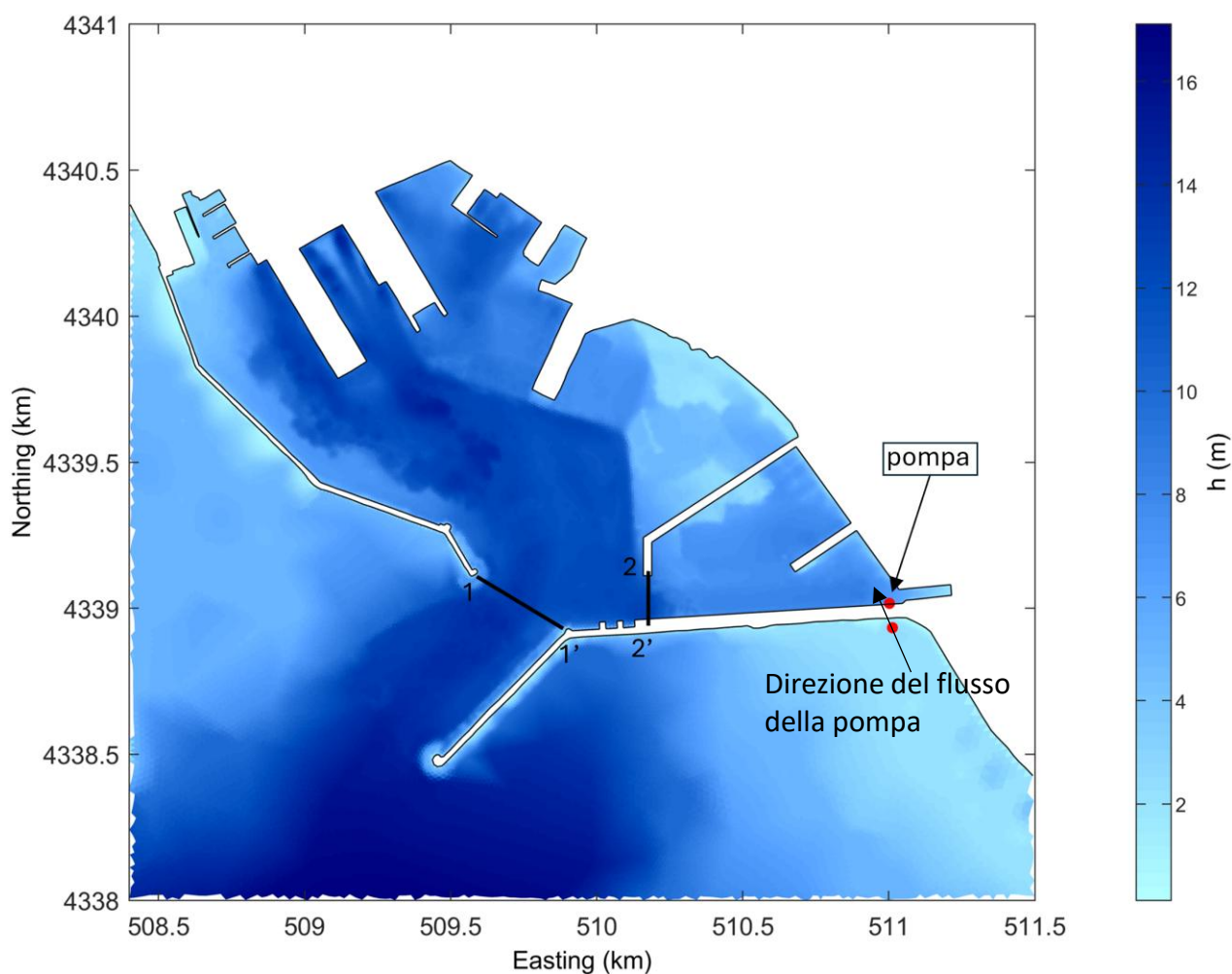


Figura 4.3 - Ingrandimento della griglia di calcolo e batimetria per le simulazioni della configurazione di PRP con 1 pompa. In rosso è rappresentata la condizione al contorno source/sink utilizzata per simulare la pompa ed in nero le due sezioni usate per la misura della velocità entrante ed uscente dall'intero bacino portuale.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

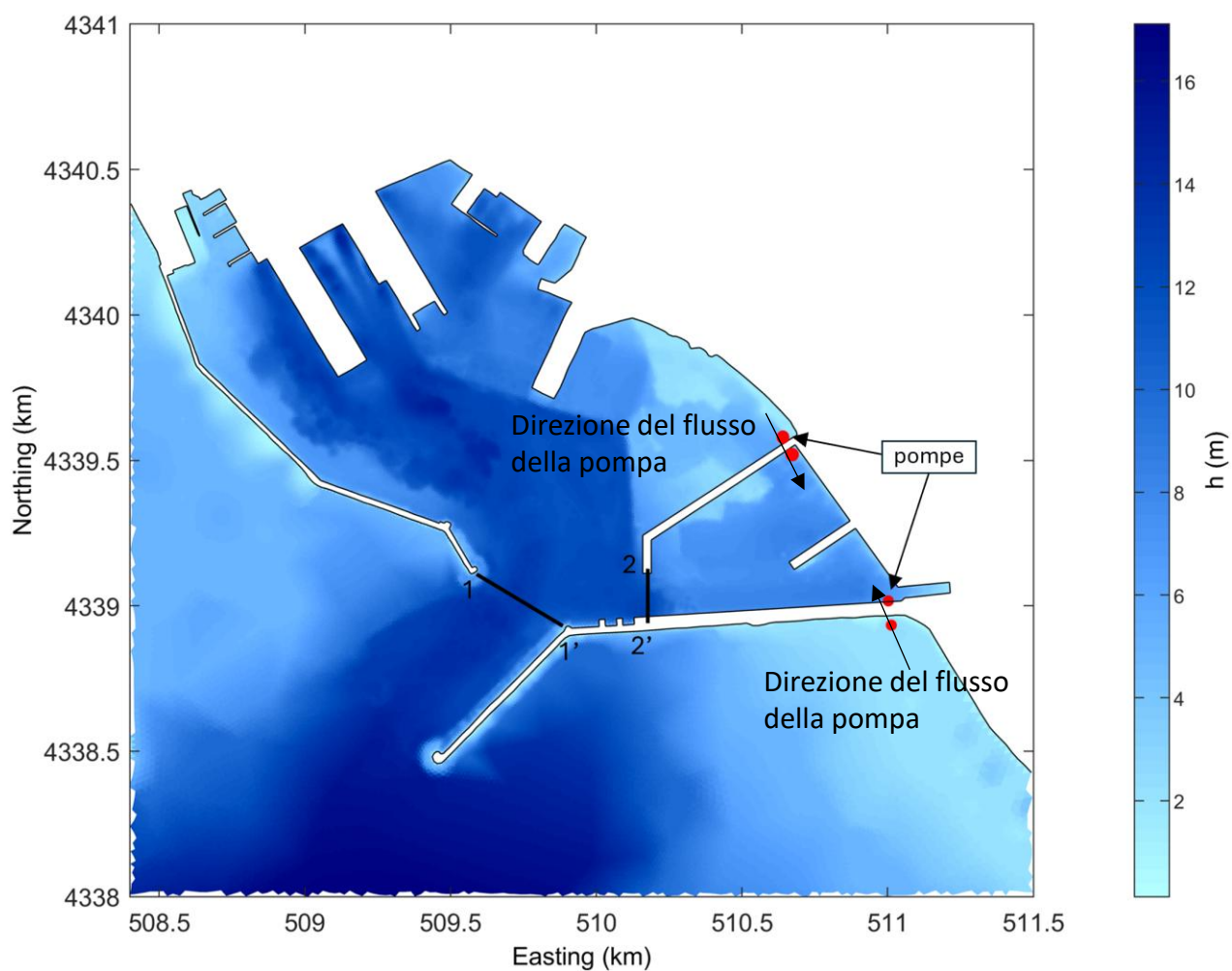


Figura 4.4 - Ingrandimento della griglia di calcolo e batimetria per le simulazioni della configurazione di PRP con 2 pompe. In rosso è rappresentata la condizione al contorno source/sink utilizzata per simulare la pompa ed in nero le due sezioni usate per la misura della velocità entrante ed uscente dall'intero bacino portuale.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

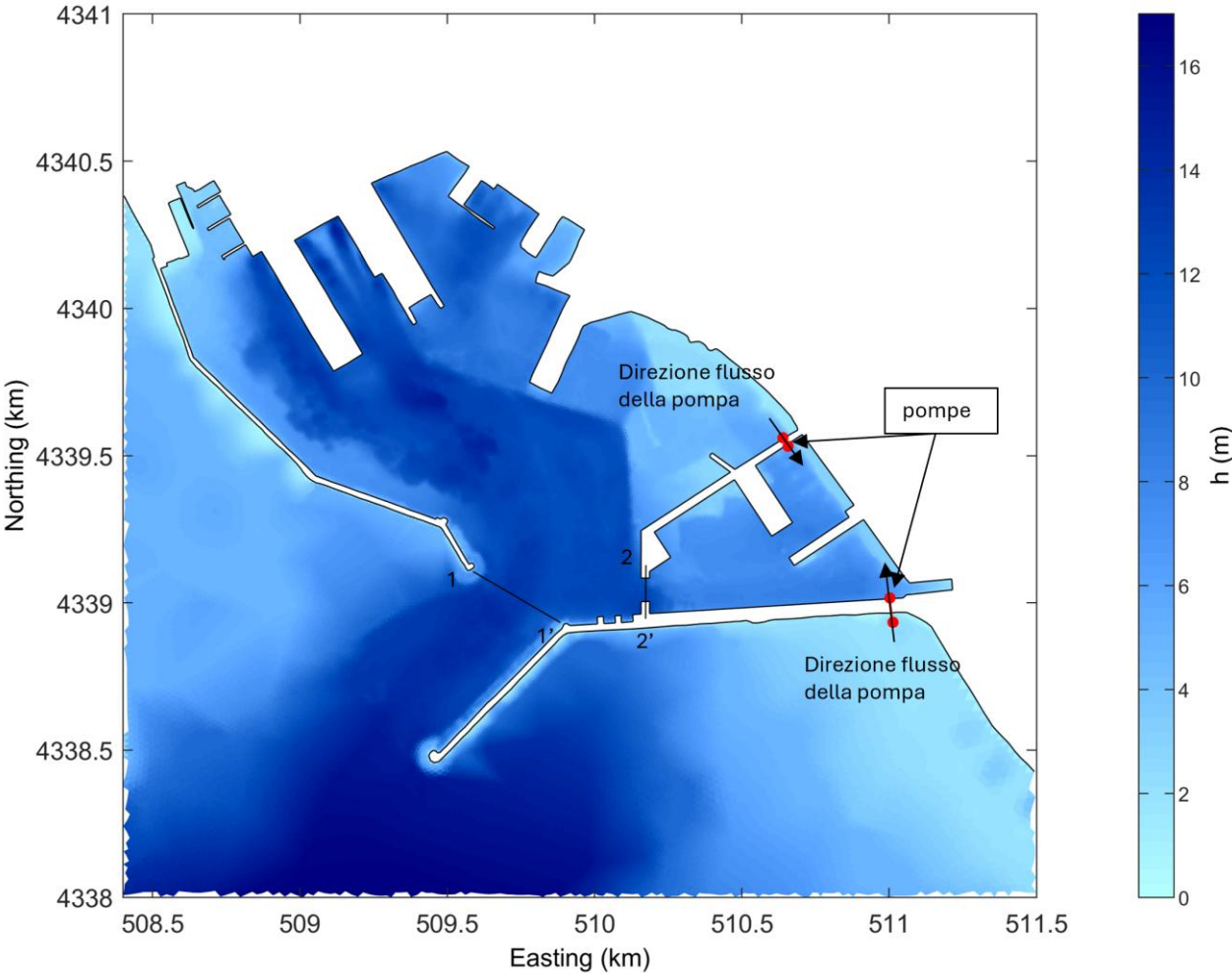


Figura 4.5 - Ingrandimento della griglia di calcolo e batimetria per le simulazioni della configurazione di ATF2025 con 2 pompe. In rosso è rappresentata la condizione al contorno source/sink utilizzata per simulare la pompa ed in nero le due sezioni usate per la misura della velocità entrante ed uscente dall'intero bacino portuale.

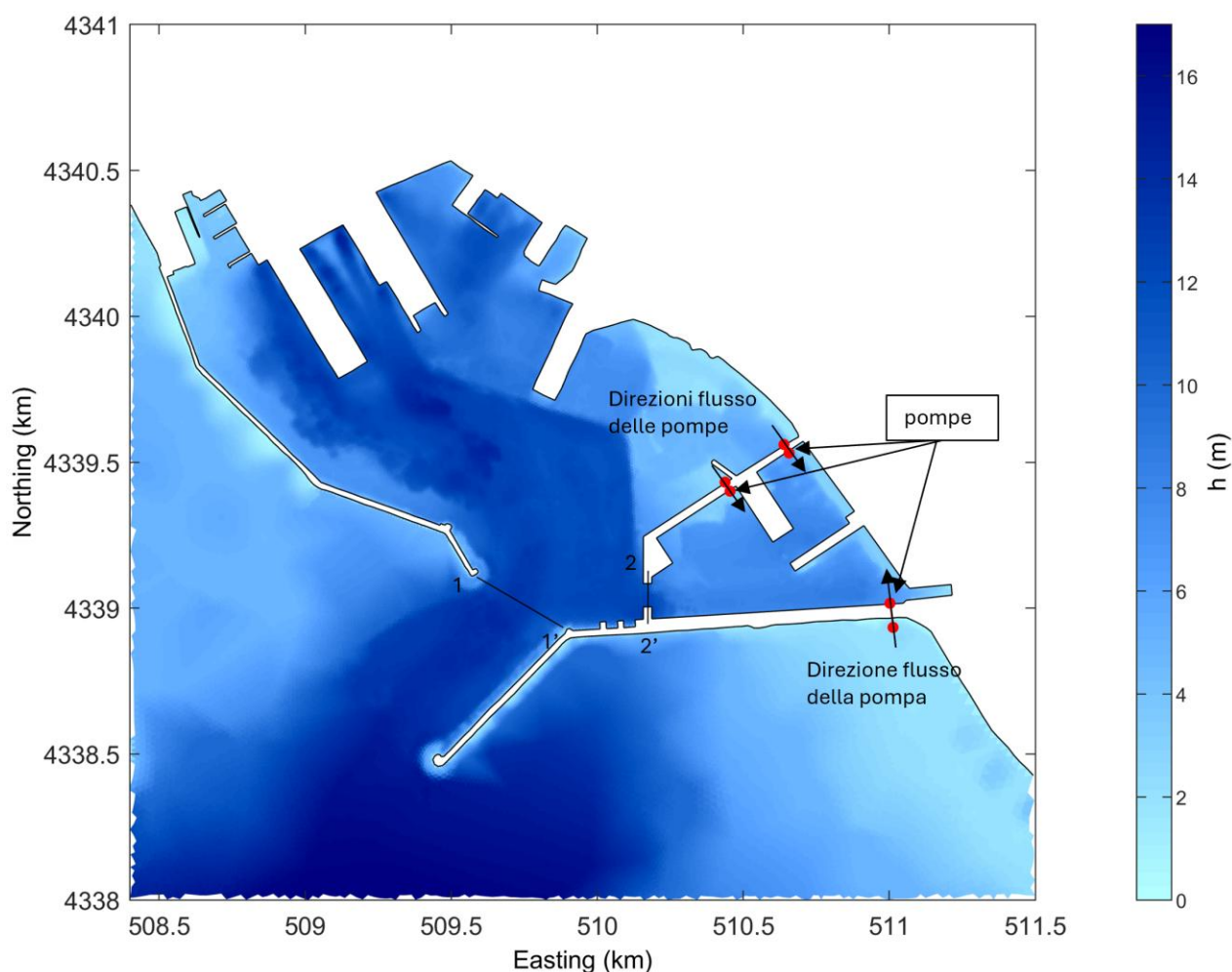


Figura 4.6 - Ingrandimento della griglia di calcolo e batimetria per le simulazioni della configurazione di ATF2025 con 3 pompe. In rosso è rappresentata la condizione al contorno source/sink utilizzata per simulare la pompa ed in nero le due sezioni usate per la misura della velocità entrante ed uscente dall'intero bacino portuale.

4.3 Condizioni al contorno e modalità esecutive delle simulazioni

Per quanto riguarda il calcolo del campo idrodinamico forzato dalla marea astronomica, come accennato in precedenza, la condizione al contorno di variazione della superficie libera è stata imposta lungo il contorno offshore della griglia di calcolo (vedi Figura 4.1) in accordo con le componenti armoniche di marea ottenute sulla base delle misure mareografiche eseguite nel porto di Cagliari dalla stazione RMN dell'ISPRA.

Per la rimanente parte del contorno aperto della griglia di calcolo, costituito dal contorno di delimitazione con lo Stagno di Cagliari (vedi Figura 4.1), sono state definite delle opportune condizioni non riflettenti in modo tale da considerare anche l'eventuale generazione di correnti di flusso e riflusso (flood ed ebb) all'imboccatura dello Stagno.

Cautelativamente tutte le superfici delle opere portuali sono considerate senza attrito utilizzando una condizione di free-slip.

Per quanto riguarda le simulazioni relative alla dispersione e diffusione del soluto immesso nel fluido con concentrazione iniziale unitaria, eseguite con il modello di Water Quality, si è utilizzato un soluto

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

passivo, ovvero non reagente con l'acqua, non influente sul campo cinetico, non soggetto ad un decadimento nel tempo e con capacità dispersive nulle in caso di velocità nulla del fluido.

Il soluto è stato introdotto all'inizio della simulazione solamente all'interno dell'area del nuovo bacino portuale turistico con una concentrazione uniforme pari a 100 g/m^3 (assunta unitaria) in modo tale da poter valutare la sua variazione di concentrazione nel tempo.

Si è utilizzato un coefficiente di dispersione orizzontale $D = 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$ definito dalla letteratura specializzata come valore intermedio del range tipico da utilizzare per simulazioni 3D in modo da risolvere fenomeni di diffusione turbolenti orizzontali con una dimensione spaziale minore a quella della griglia utilizzata. Per la dispersione verticale invece sono stati utilizzati i valori calcolati dal modello numerico FLOW-FM che include un modello di turbolenza $k-\epsilon$ nella sua formulazione 3D.

Per le simulazioni idrodinamiche si è definito un tempo di simulazione di circa 11 gg di cui le prime 24h sono state poi scartate dai risultati in modo da rimuovere possibili instabilità numeriche dell'idrodinamica durante l'inizializzazione del modello.

La pompa, nelle simulazioni in cui è stata inclusa, è stata simulata come una condizione al contorno del tipo "source/sink" con il sink (pozzo) posizionato lato mare fuori dal porto turistico e la source (sorgente) posizionata all'interno del porto alla base del molo di Levante (Figura 4.2 e Figura 4.3). Nello scenario in cui si sono utilizzate 2 pompe, la seconda condizione "source/sink" è stata posizionata in prossimità della radice del molo Bonaria nella FASE 1 (vedi Figura 4.4). Nello scenario in FASE 2 in cui si sono utilizzate 2 pompe la loro posizione non è stata variata rispetto a quelle posizionate nella FASE 1 per consistenza. Invece, per lo scenario in FASE 2 con tre pompe, la terza condizione "source/sink" è stata posizionata all'attaccatura tra lo sporgente Bonaria e il nuovo molo Bonaria (vedi Figura 4.6). Come già accennato, tutte le pompe hanno flussi entranti all'interno del nuovo bacino del porto turistico. Questo approccio, utilizzando condizioni di pozzo/sorgente, permette un mantenimento di massa costante all'interno del dominio di calcolo (ad eccezione della variazione dovuta alla marea astronomica). Ogni pompa è stata considerata con una portata di circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Oltre all'idrodinamica calcolata da FLOW-FM includendo il contributo delle pompe, nel modello Water Quality, è stato considerato anche un ingresso di acqua priva del soluto utilizzando la stessa portata di $1 \text{ m}^3/\text{s}$. In questo modo si è incluso anche l'effetto di diluizione generato dall'ingresso dell'acqua nell'area portuale del Porto Turistico.

Per quanto riguarda il Canale San Bartolomeo si è trascurato il suo eventuale contributo sia in termini di idrodinamica, sia in termini di capacità di diluizione.

Per i rimanenti parametri e variabili che caratterizzano le simulazioni numeriche sono stati utilizzati valori "standard" suggeriti dalla letteratura specializzata in situazioni idrodinamiche simili.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

5 RISULTATI IDRODINAMICI RELATIVI ALLA FASE 1

In questo capitolo si mostrano i risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche effettuate nella FASE1.

In primo luogo, si riporta la validazione effettuata della variazione della superficie libera nel tempo causata dalla marea astronomica.

Successivamente si mostrano i risultati ottenuti per i quattro scenari esaminati in questa prima fase.

5.1 Validazione marea astronomica

La corretta propagazione della marea astronomica all'interno del dominio di calcolo è stata verificata nella situazione attuale comparando la variazione della superficie libera, ottenuta numericamente con quella teorica (indicata nel seguito) ricostruita sulla base delle misure mareografiche eseguite dalla stazione RMN dell'ISPRA.

Il confronto è riportato nella Figura 5.1 dove si può notare un'ottima corrispondenza tra la serie temporale dell'elevazione della superficie libera simulata e quella ricostruita dalle misure del mareografo. Si può notare un'ottima corrispondenza delle fasi e delle distanze cresta-cavo con una modesta differenza nei valori minimi e massimi.

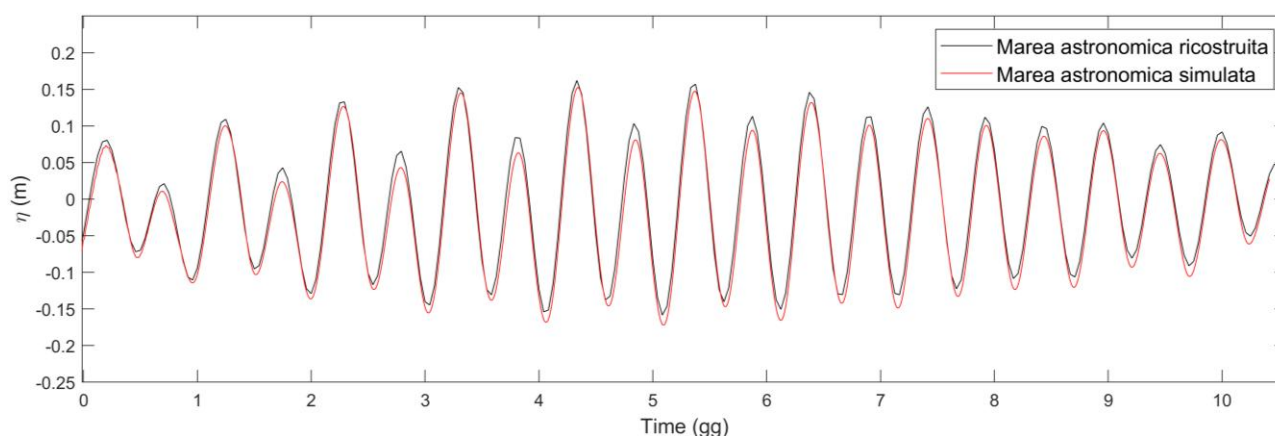


Figura 5.1 - Comparazione della variazione dell'elevazione della superficie libera indotta da marea astronomica simulata e ricostruita.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

5.2 Risultati dell'idrodinamica in configurazione ATTUALE

Nella presente sezione sono mostrati i risultati idrodinamici ottenuti in riferimento alle due simulazioni numeriche eseguite in relazione alla configurazione delle opere marittime in stato ATTUALE.

La prima simulazione è stata eseguita forzando l'idrodinamica solo con la marea astronomica, mentre la seconda simulazione è stata eseguita inserendo una pompa in prossimità della radice del molo Sud del Porto vecchio.

In primo luogo, sono mostrati i campi di velocità idrodinamici ottenuti all'interno dell'area portuale (Porto Vecchio) in corrispondenza degli istanti in cui si verificano le massime velocità raggiunte in condizioni di flusso ("flood") e di riflusso ("ebb") nelle due sezioni di controllo indicate nella Figura 4.2, in modo tale da rappresentare il massimo flusso entrante ed uscente all'interno del bacino del Porto turistico.

Vengono poi comparate le velocità ottenute con le due simulazioni numeriche, nelle due sezioni di controllo.

Le scale di colori utilizzate per rappresentare i campi di velocità sono state definite in funzione dei valori massimi di velocità ottenuti nella sezione 1-1' relativa all'imboccatura portuale. Questo approccio è stato seguito in modo da poter apprezzare la variazione di velocità all'interno del porto dove si misurano velocità molto inferiori rispetto alla zona esterna (circa 0.35 m/s all'imboccatura dello stagno di Cagliari).

5.2.1 Configurazione ATTUALE

Nella Figura 5.2 e nella Figura 5.3 si mostrano i campi di velocità ottenuti in prossimità e all'interno del Porto Vecchio in relazione alle condizioni massime di flood e di ebb.

Le figure mostrano che le velocità risultano, nella zona del porto turistico, piuttosto modeste anche durante le fasi di massima velocità in condizioni di "flood" ed "ebb".

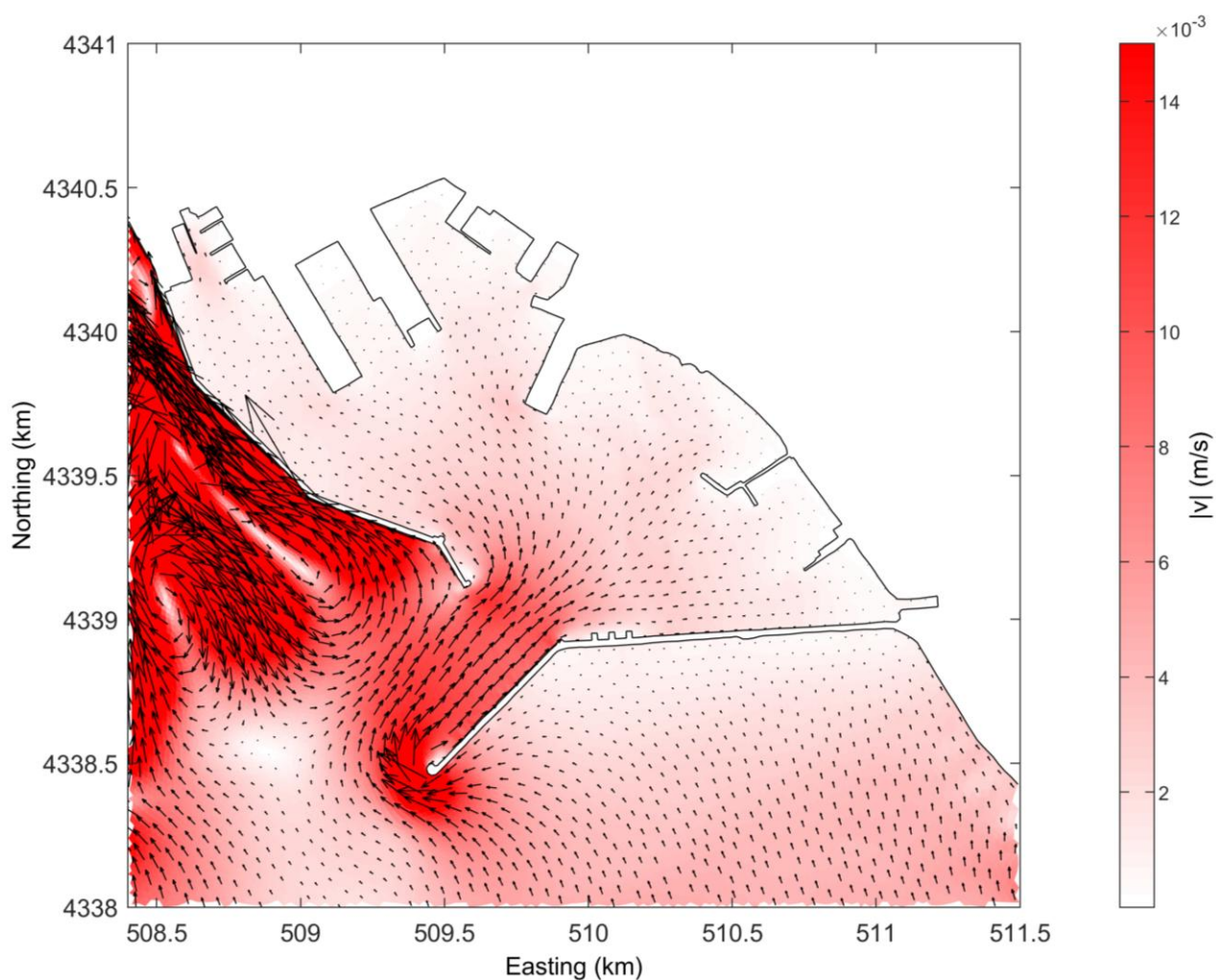


Figura 5.2 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di flood durante la simulazione per la configurazione ATTUALE.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

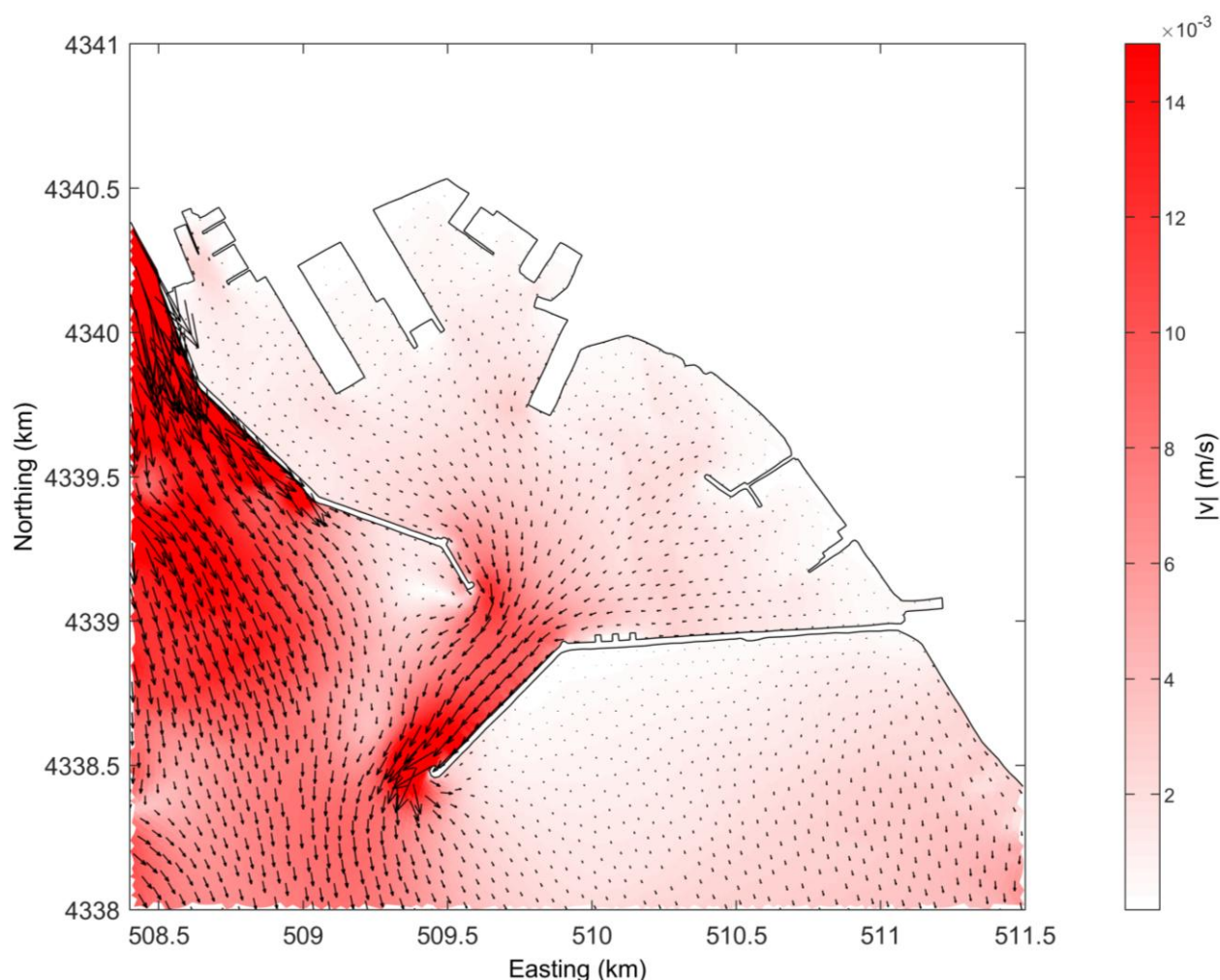


Figura 5.3 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione ATTUALE.

5.2.2 Configurazione ATTUALE con pompa

La Figura 5.4 (fase di flood) e la Figura 5.5 (fase di ebb) mostrano chiaramente come l'aggiunta della pompa contribuisca ad aumentare le velocità localmente con picchi di circa 0.05 m/s.

La scala delle figure è stata considerata minore della velocità massima localmente in quanto diminuisce drasticamente nelle aree rimanenti del porto. Questo permette una migliore visualizzazione delle velocità nelle parti restanti del porto.

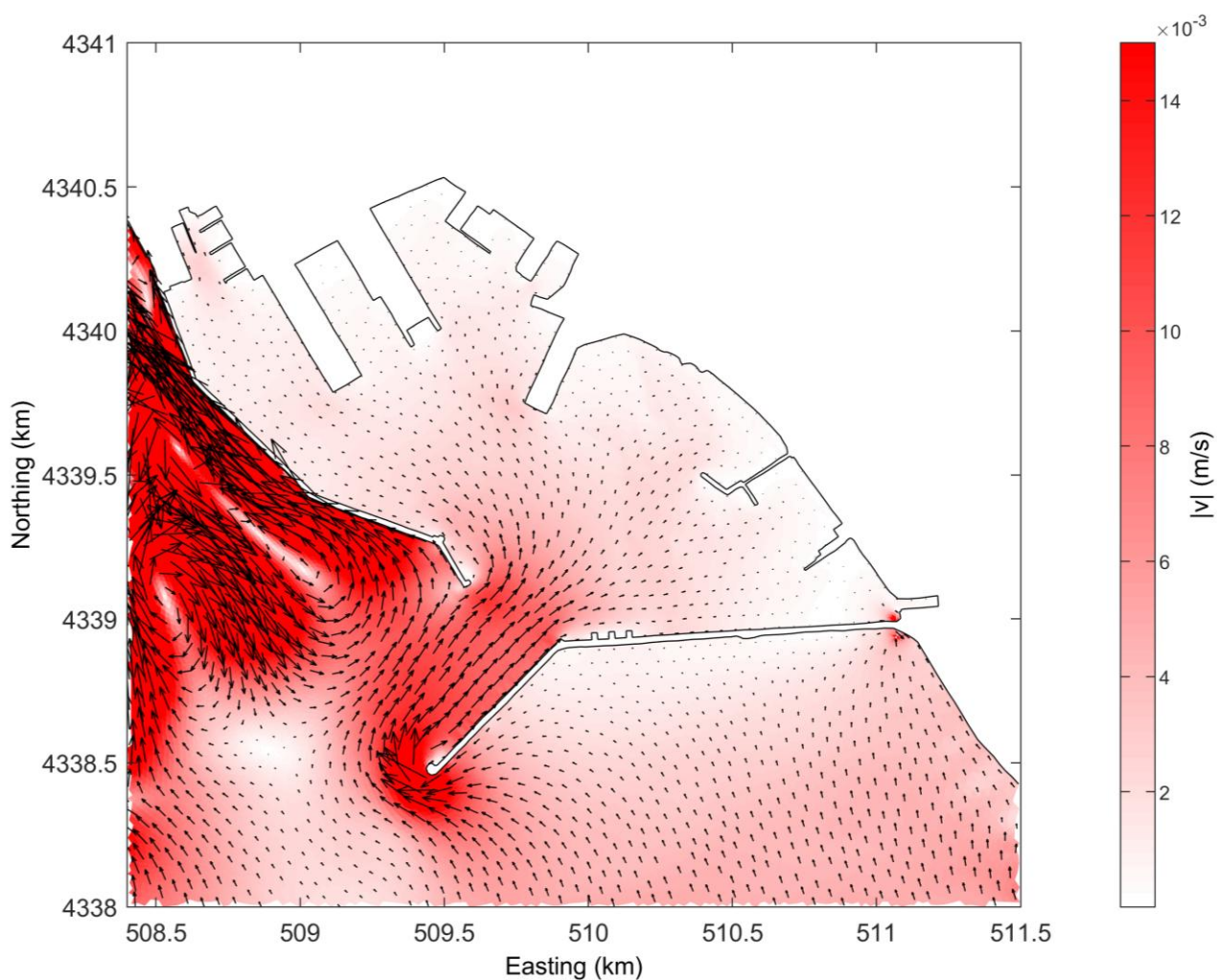


Figura 5.4 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di flood durante la simulazione per la configurazione ATTUALE con pompa.

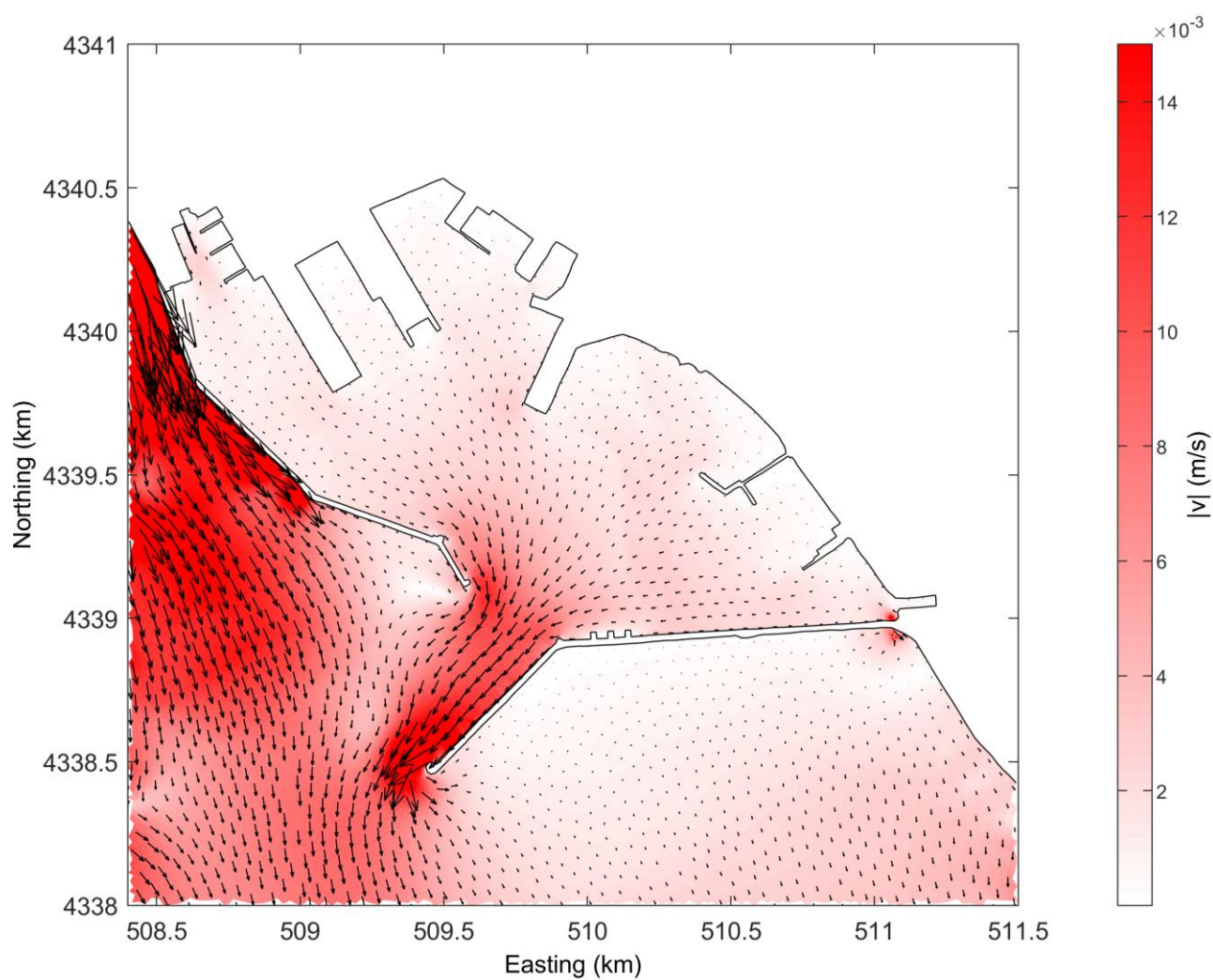


Figura 5.5 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione ATTUALE con pompa.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

5.2.3 Comparazione idrodinamica nelle sezioni tra configurazione ATTUALE con e senza pompa

La Figura 5.6 mostra la comparazione tra le velocità entranti ed uscenti dalle sezioni 1-1' e 2-2' con valori positivi quando ci si trova in condizioni di flood nel porto.

Si può notare che le variazioni di velocità sono comunque modeste passando dal caso senza pompa a quello con la pompa.

La variazione maggiore si può notare nella sezione 2-2' dove le velocità tendono ad assumere valori inferiori (maggiormente negativi) soprattutto in fase di ebb in quanto la corrente generata dalla marea lavora in condizioni sincrone con il flusso generato dalla pompa.

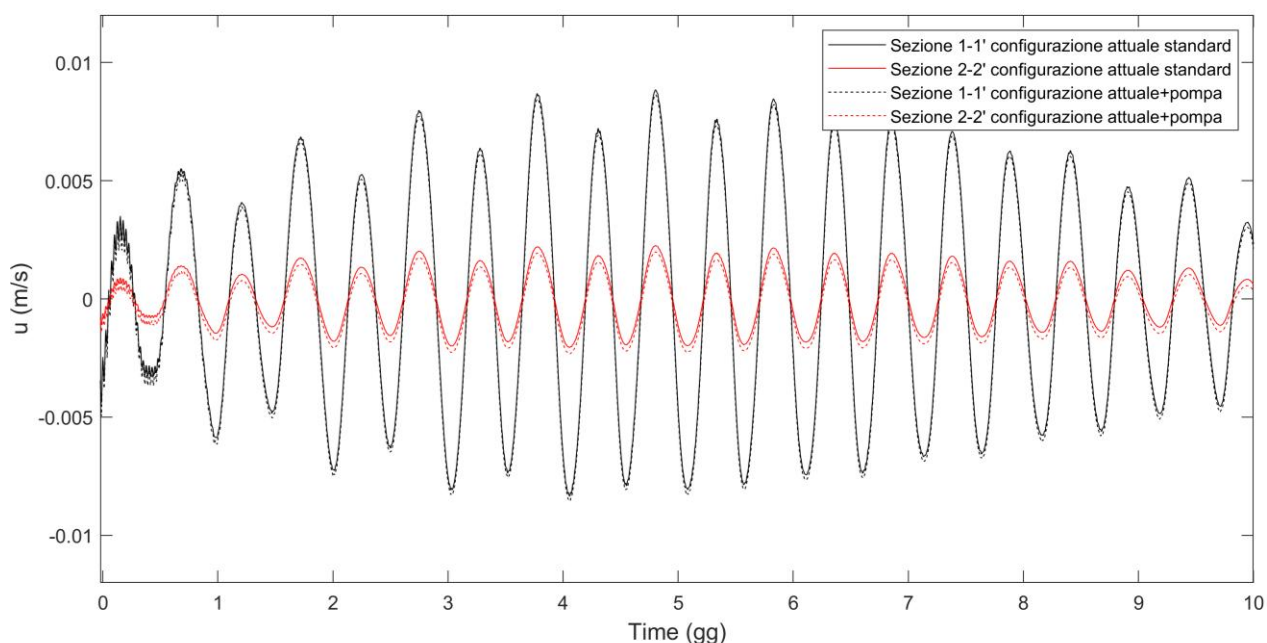


Figura 5.6 - Comparazione velocità medie nelle sezioni 1-1' e 2-2' per la configurazione ATTUALE con e senza pompa.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

5.3 Risultati idrodinamica portuale configurazione di PRP

Nella presente sezione sono mostrati i risultati idrodinamici delle 2 simulazioni numeriche effettuate prendendo in esame la configurazione di PRP, ovvero con la presenza della nuova diga di delimitazione lato nord del Porto Turistico.

La prima simulazione numerica è stata effettuata inserendo una sola pompa presso la radice del molo di Levante esistente.

La seconda simulazione è stata effettuata inserendo una seconda pompa presso la radice della nuova diga.

In primo luogo, si mostrano i campi idrodinamici all'interno dell'area portuale per gli istanti di massima velocità in condizioni di flusso (flood) e di riflusso (ebb) raggiunta durante la simulazione nelle due sezioni di controllo in modo da mostrare il massimo flusso entrante ed uscente all'interno del bacino portuale.

Le scale di colore, utilizzate per rappresentare i campi di velocità, sono state definite in funzione dei valori massimi di velocità ottenuti nella sezione 1-1', relativa all'imboccatura portuale. Questo approccio è stato seguito in modo da poter apprezzare la variazione di velocità all'interno del porto dove si misurano velocità molto inferiori rispetto alla zona esterna.

Vengono poi comparate le velocità ottenute con le due simulazioni numeriche nelle due sezioni di controllo indicate in Figura 4.3.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

5.3.1 Configurazione di PROGETTO con 1 pompa

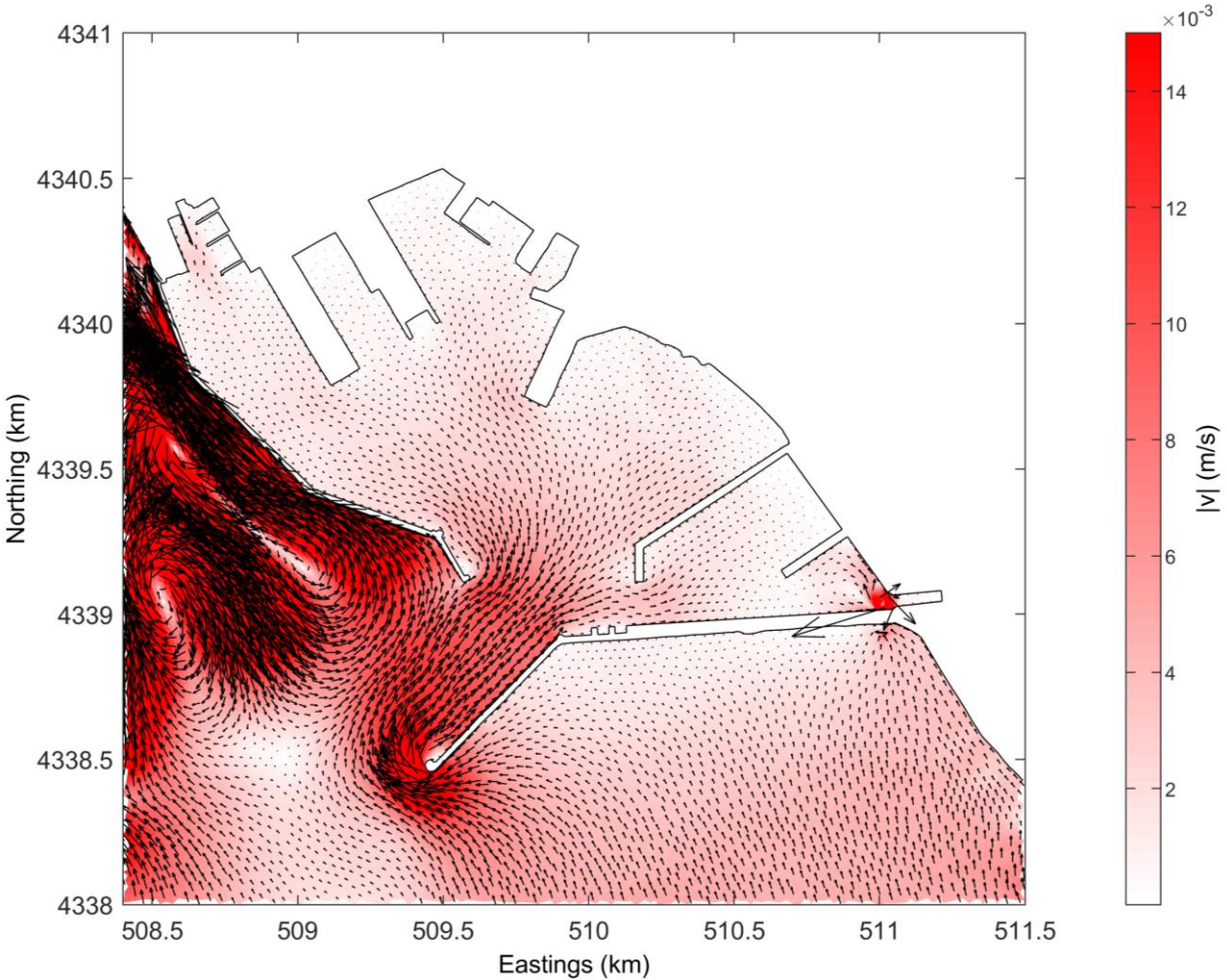


Figura 5.7 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di flood durante la simulazione per la configurazione di PRP con una pompa.

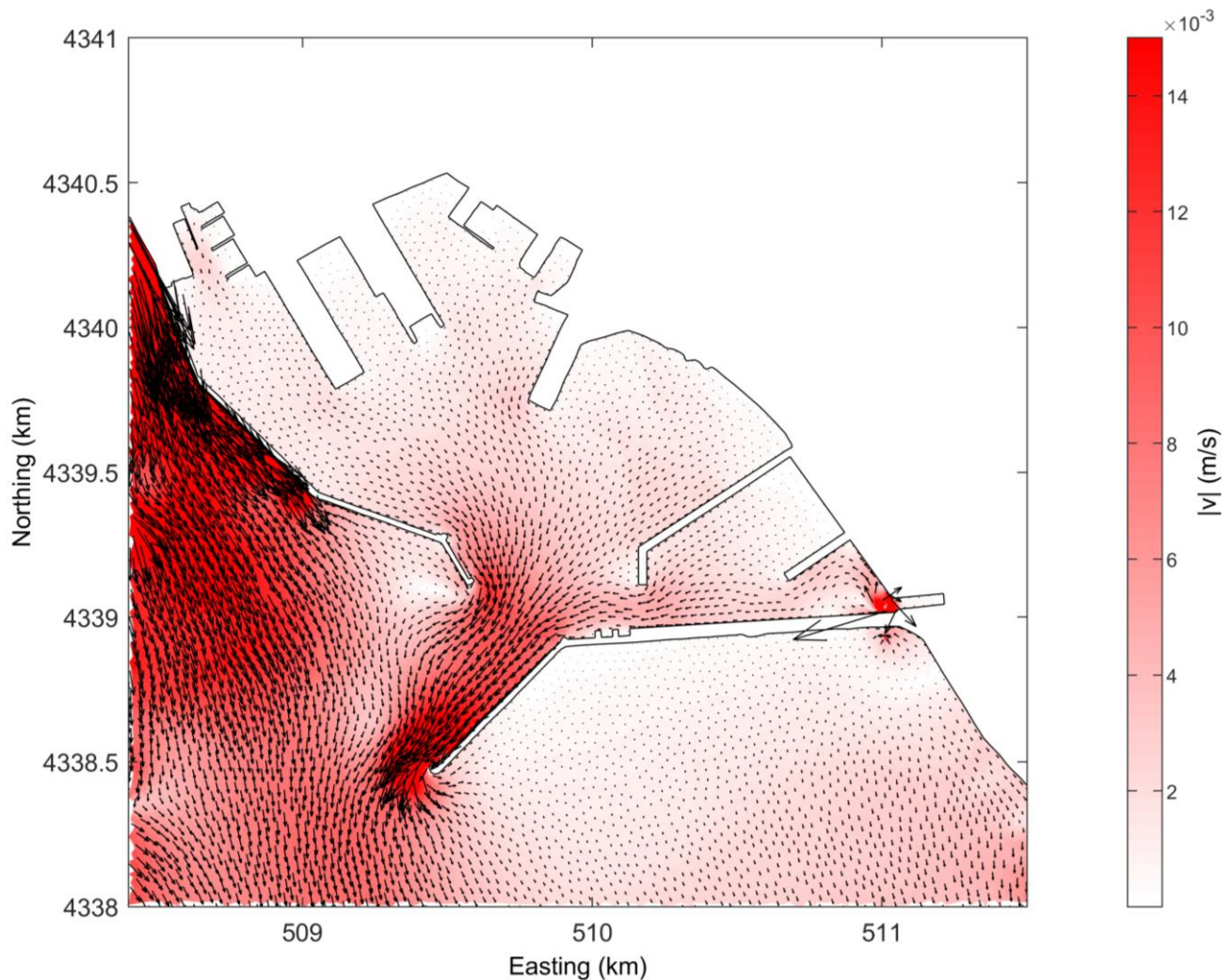


Figura 5.8 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di PRP con una pompa.

La Figura 5.7 e la Figura 5.8 mostrano i campi di velocità nella situazione di PRP con una pompa inserita alla base del molo di Levante. In questo caso si può vedere come si formi un vortice di corrente nell'imboccatura del canale San Bartolomeo probabilmente dovuto all'allargamento della banchina del molo di Levante che modifica la configurazione rispetto a quella ATTUALE.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

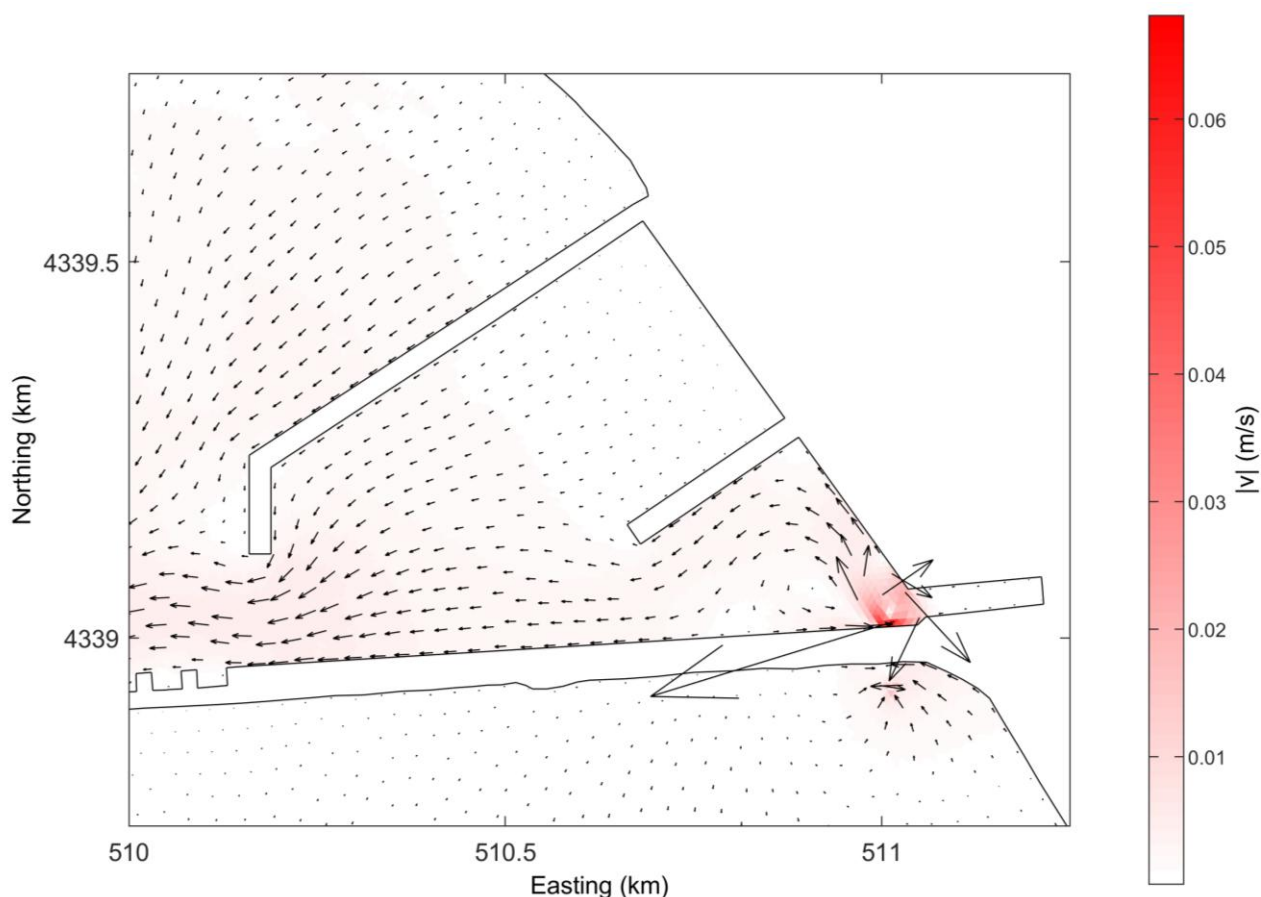


Figura 5.9 - Modulo di velocità omnidirezionale con ingrandimento nella zona del porto turistico per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di PRP con una pompa.

La Figura 5.9 mostra un ulteriore ingrandimento nel porto turistico, con scala di colori modificata in modo da accomodare le velocità massime generate dal flusso della pompa, così da poter evidenziare meglio le caratteristiche delle correnti all'interno dello stesso. Valori massimi di velocità della corrente generati dalla pompa si attestano su valori di circa 0.06 m/s che diminuiscono velocemente con la distanza dal punto sorgente all'interno del porto turistico.

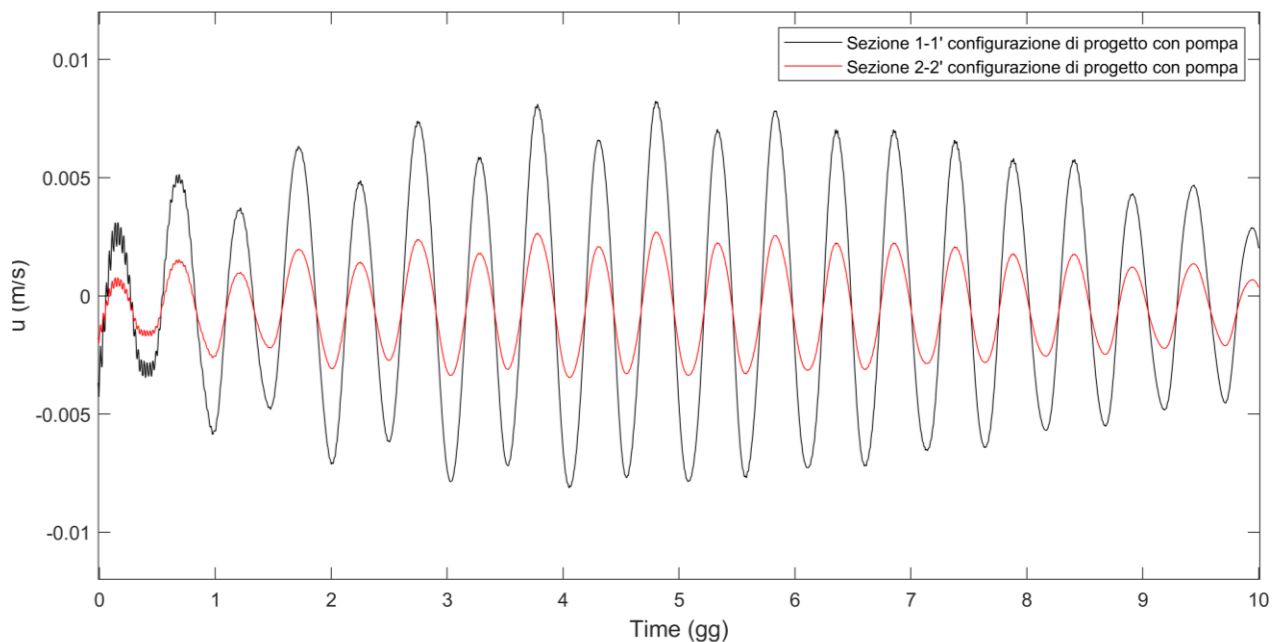


Figura 5.10 - Comparazione velocità medie nelle sezioni 1-1' e 2-2' per la configurazione di PRP con una pompa.

Figura 5.10 mostra risultati simili a quanto visto per la configurazione ATTUALE per la sezione 1-1'. Si sono osservate invece velocità maggiori nella sezione 2-2' dovuto dal restringimento generato dalla costruzione della nuova imboccatura del molo di Bonaria nel porto turistico.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

5.3.2 Configurazione di PRP con 2 pompe

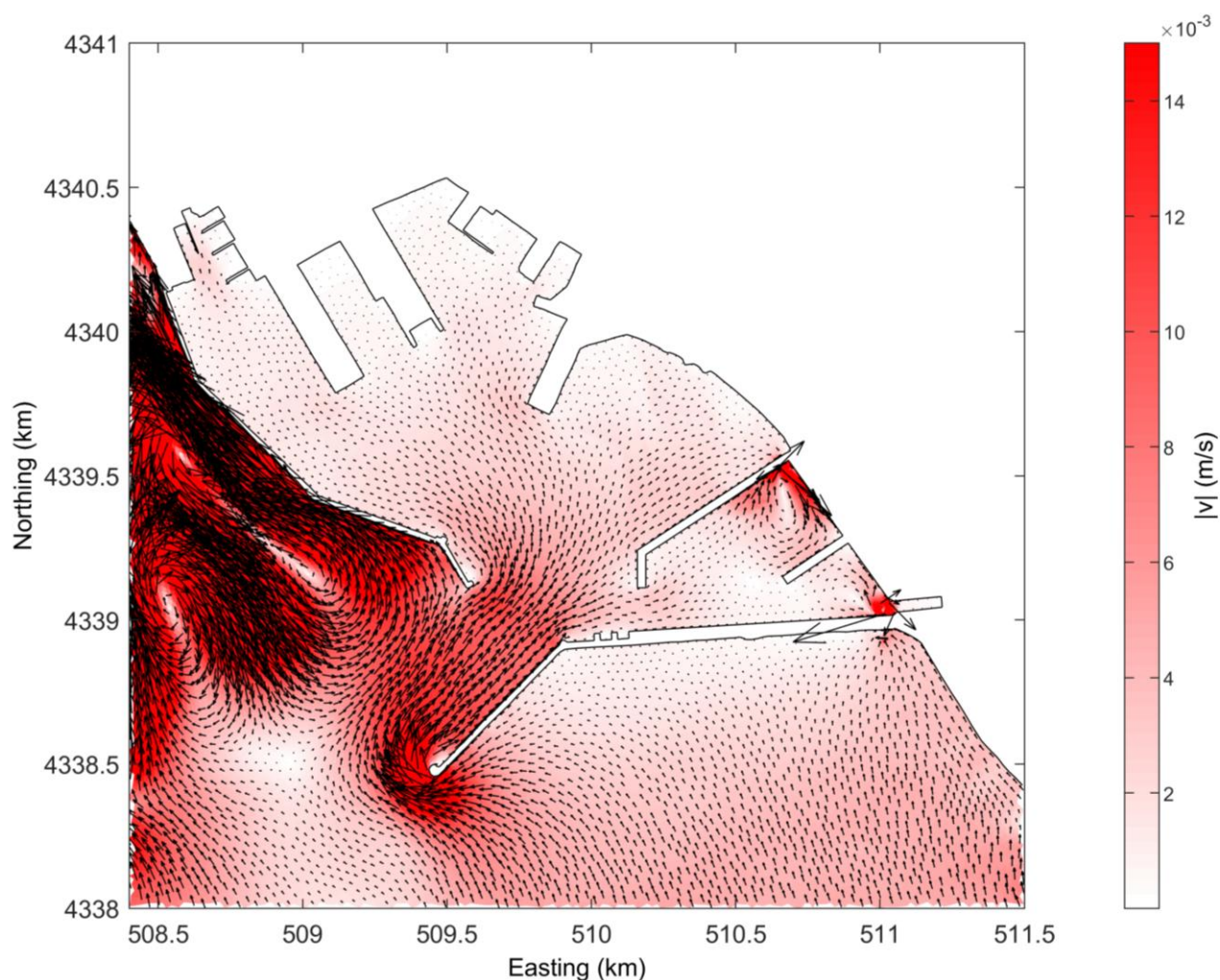


Figura 5.11 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di flood durante la simulazione per la configurazione di PRP con due pompe.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

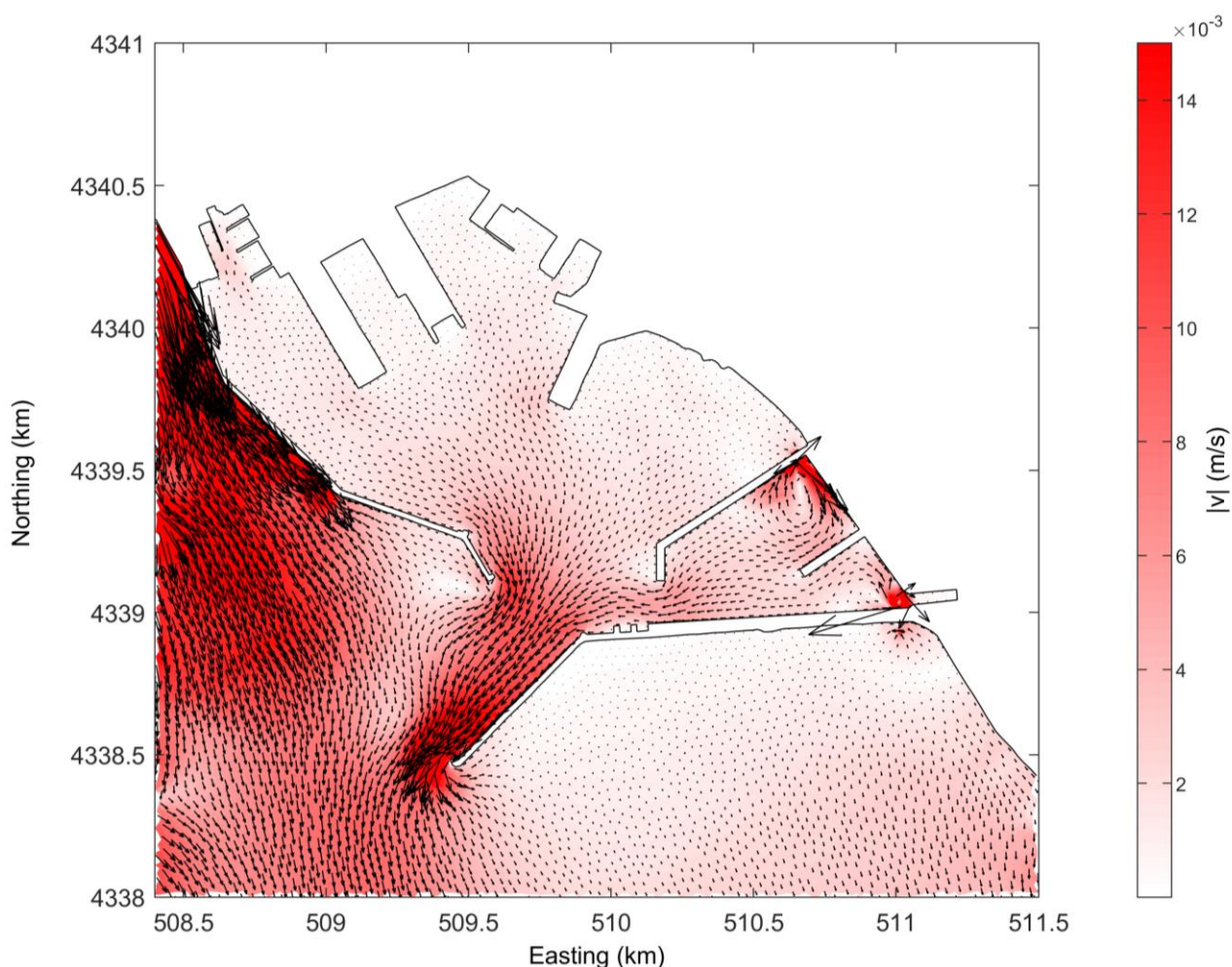


Figura 5.12 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di PRP con due pompe.

Infine la Figura 5.11 e la Figura 5.12 mostrano i risultati della configurazione di PRP utilizzando due pompe come definito nel Piano Regolatore Portuale. Questo permette una maggiore velocità della corrente all'interno del porto turistico promuovendo il ricambio idrico soprattutto nella zona nord che resta la più isolata dopo la costruzione dello stesso.

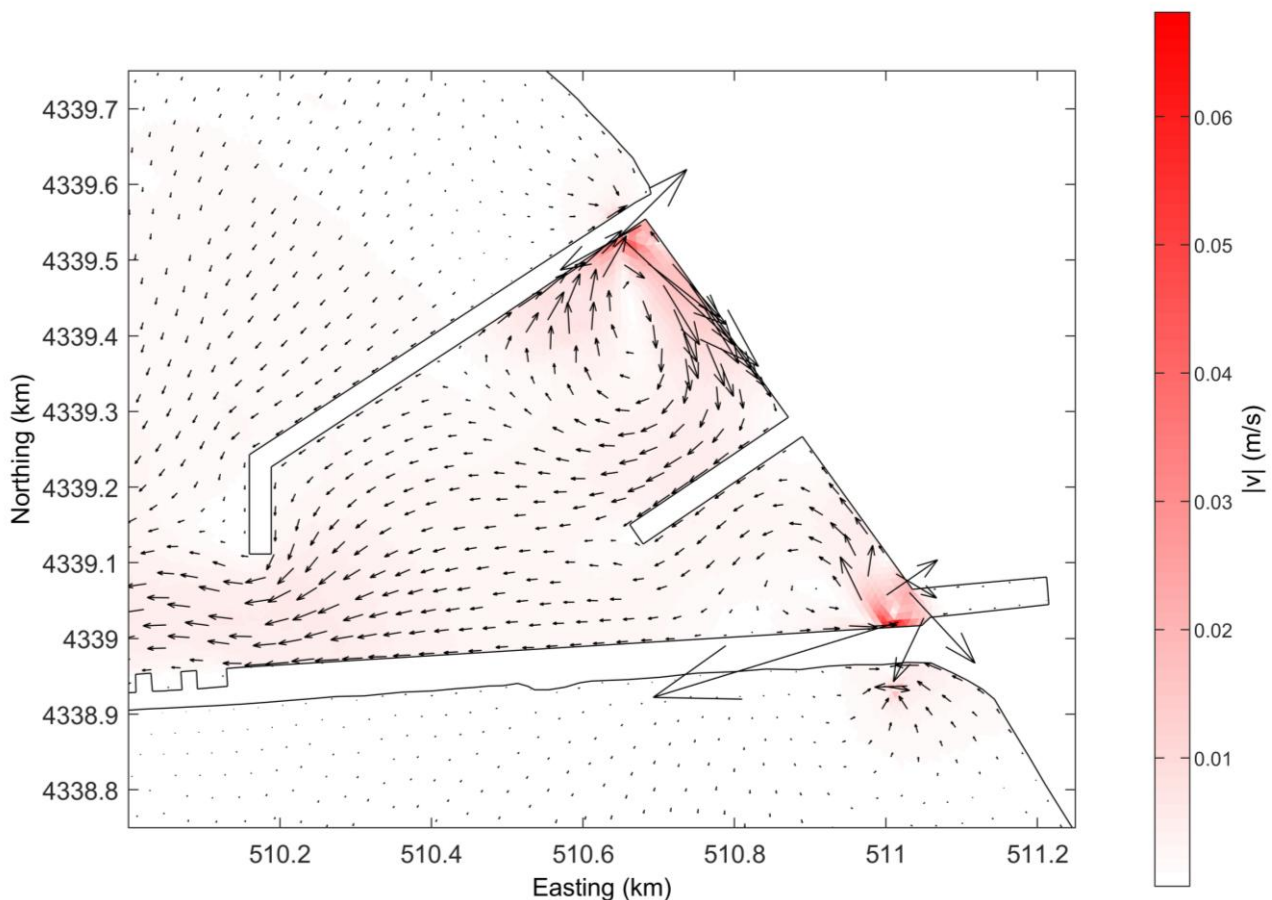


Figura 5.13 - Modulo di velocità omnidirezionale con ingrandimento nella zona del porto turistico per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di PRP con due pompe.

Figura 5.13 mostra un ulteriore ingrandimento all'interno del nuovo porto turistico, con scala di colori modificata in modo da evidenziare le velocità massime generate dal flusso delle pompe, dove si possono notare i due vortici, dovuti alla corrente generata delle pompe, entrambi con una rotazione in senso orario. Si può notare come la pompa a nord produca l'istaurazione di una corrente con valori di circa 0.02 m/s laddove nel caso con una pompa (Figura 5.9) si misuravano velocità quasi nulle.

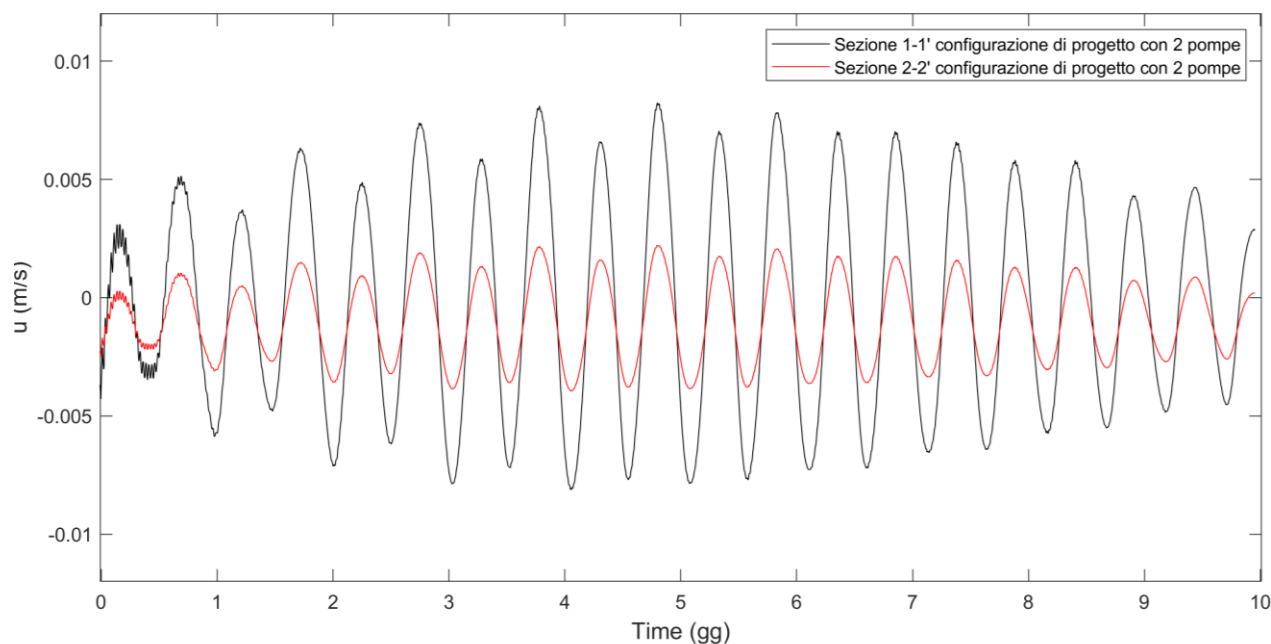


Figura 5.14 - Comparazione velocità medie nelle sezioni 1-1' e 2-2' per la configurazione di PRP con due pompe.

I risultati in Figura 5.14 mostrano come le velocità della sezione 2-2' hanno valori minimi più negativi rispetto a Figura 5.10. Questa differenza è dovuta all'inserimento della seconda pompa che agisce sulla velocità in direzione concorde con il flusso generato dalla marea in fase di ebb.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

6 RISULTATI IDRODINAMICI RELATIVI ALLA FASE 2

In questo capitolo si mostrano i risultati ottenuti dalle simulazioni idrodinamiche effettuate nella FASE 2, ottenuti utilizzando la configurazione di PRP ottimizzata e denominata “ATF2025”.

6.1 Configurazione di ATF2025 con 2 pompe

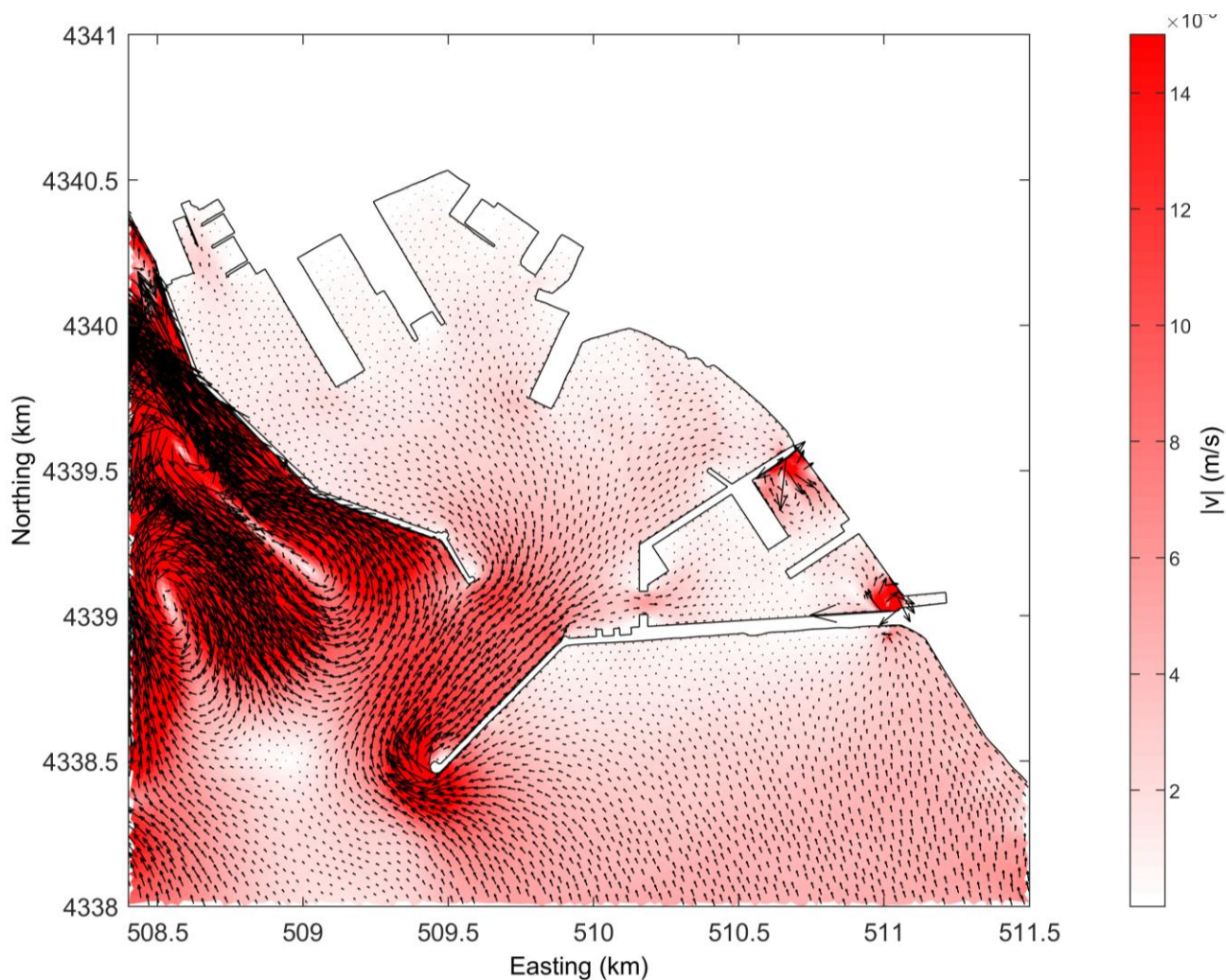


Figura 6.1 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di flood durante la simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

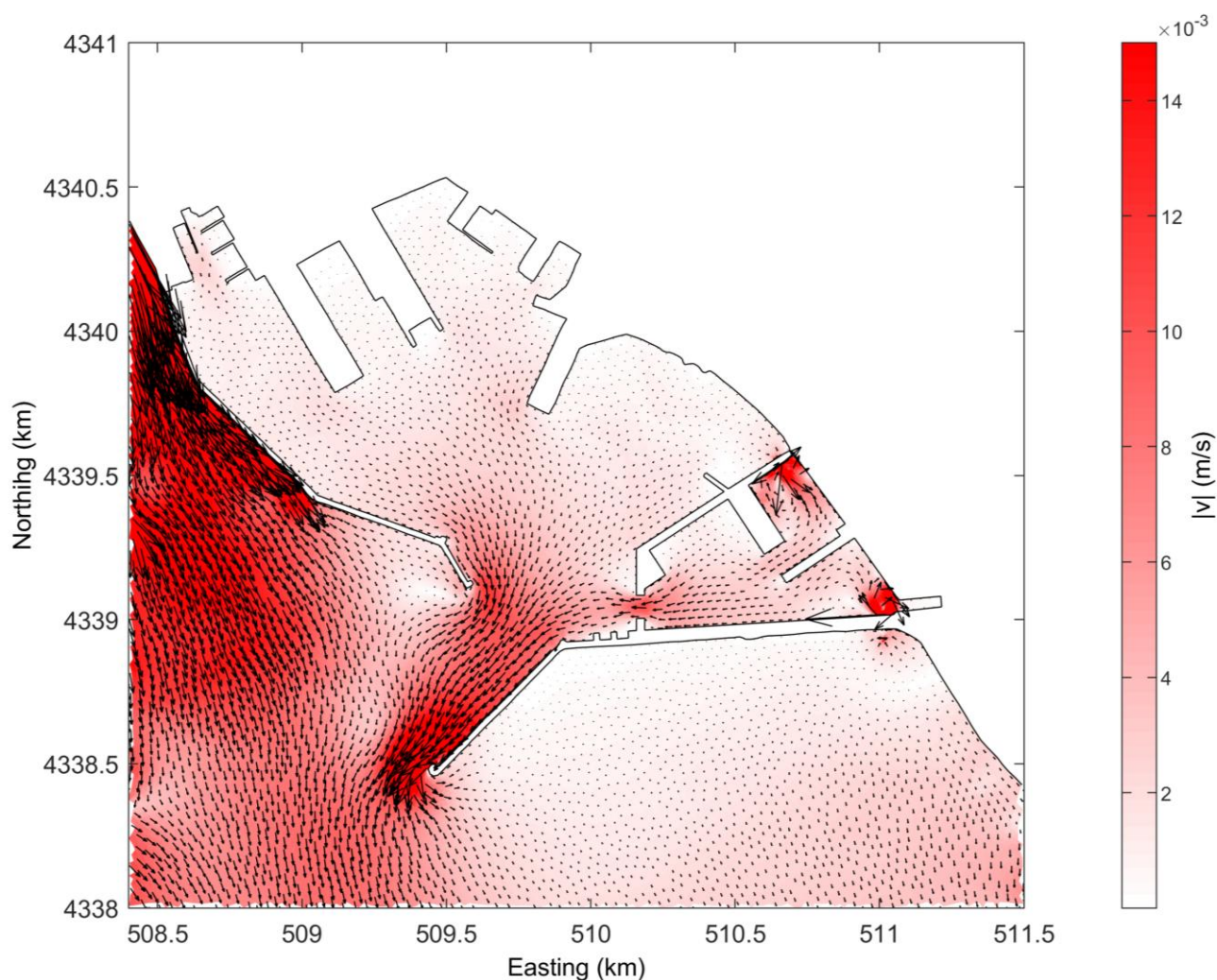


Figura 6.2 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

La Figura 6.1 e la Figura 6.2 mostrano i risultati della configurazione di ATF2025 utilizzando due pompe. La velocità della corrente all'interno del porto turistico nella zona confinata a nord è simile a quella della configurazione di PRP con due pompe. La costruzione del nuovo molo però riduce in modo apprezzabile la corrente nell'angolo di connessione tra il molo Bonaria e la banchina con velocità prossime allo zero come si può vedere da Figura 6.3.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

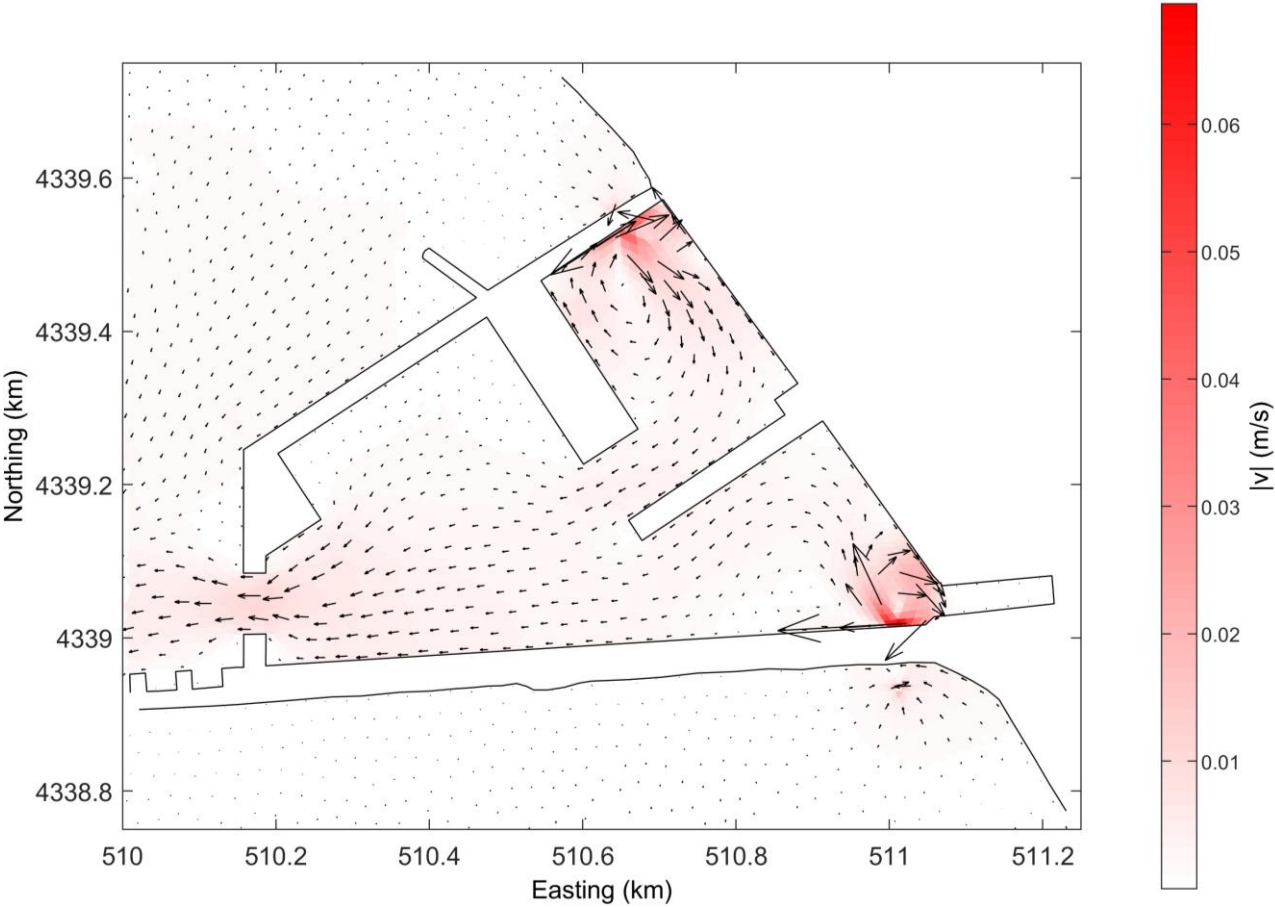


Figura 6.3 - Modulo di velocità omnidirezionale con ingrandimento nella zona del porto turistico per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

6.1.1 Configurazione di ATF2025 con 3 pompe

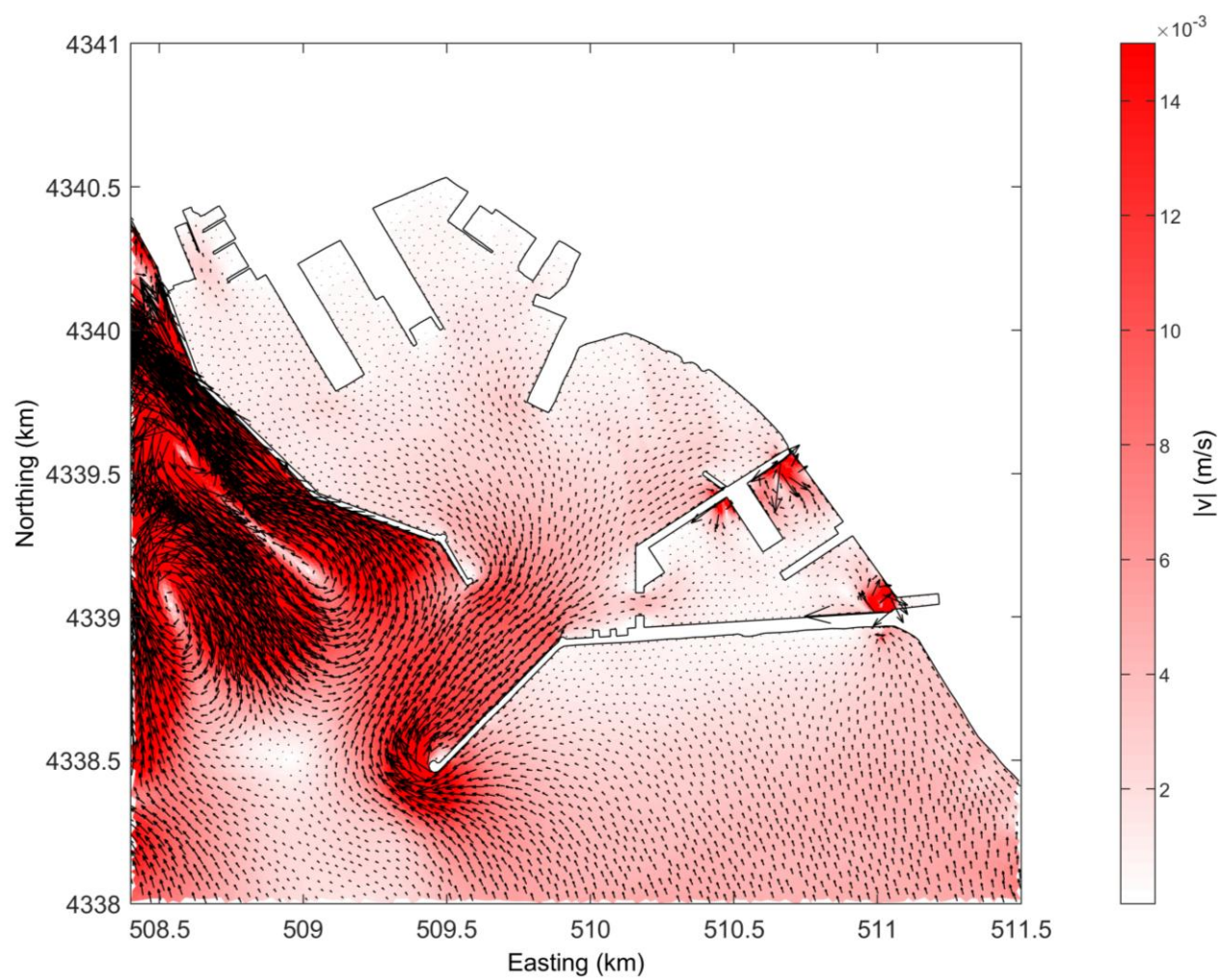


Figura 6.4 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di flood durante la simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

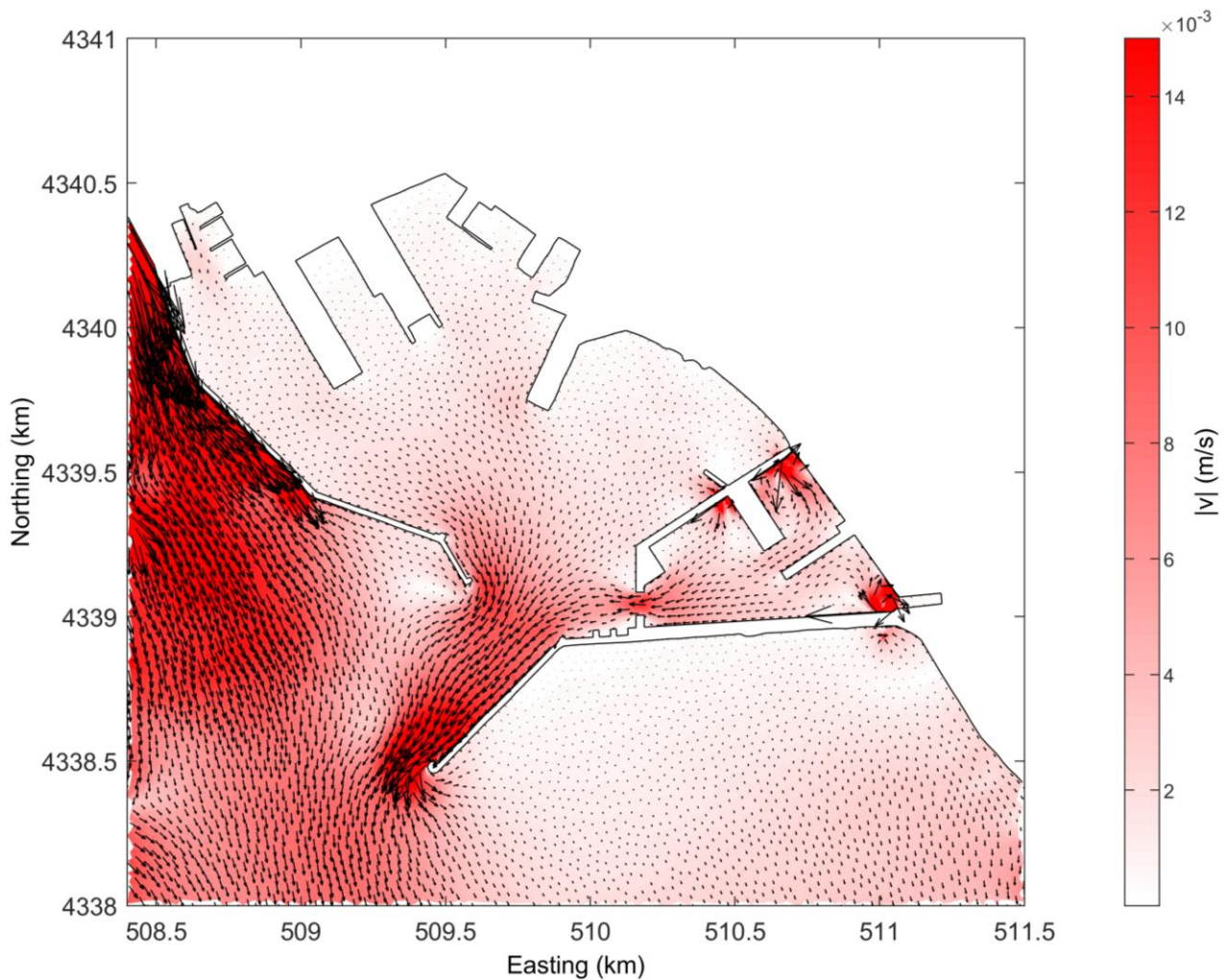


Figura 6.5 - Mappa dei moduli della velocità omnidirezionale e direzioni di velocità per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

Infine, la Figura 6.4 e la Figura 6.5 mostrano i risultati della configurazione di ATF2025 utilizzando tre pompe. Questo permette una maggiore velocità della corrente nella zona dove le velocità erano prossime allo zero nella configurazione di ATF2025 ma con due pompe. Questo effetto si può evincere chiaramente dalla Figura 6.6.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

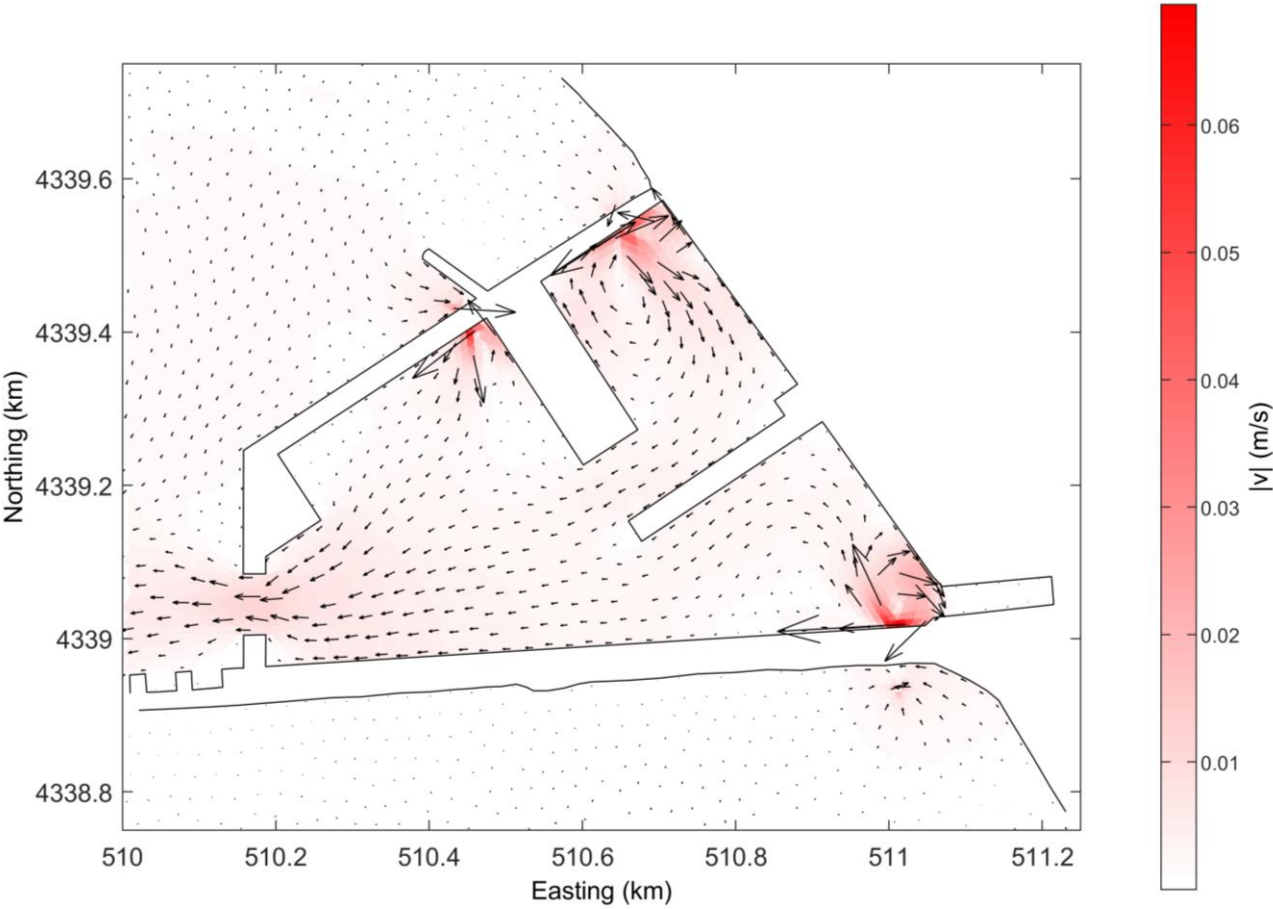


Figura 6.6 - Modulo di velocità omnidirezionale con ingrandimento nella zona del porto turistico per l'istante di massima velocità in fase di ebb durante la simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

6.1.2 Comparazione idrodinamica nelle sezioni tra configurazione di ATF2025 con 2 e 3 pompe

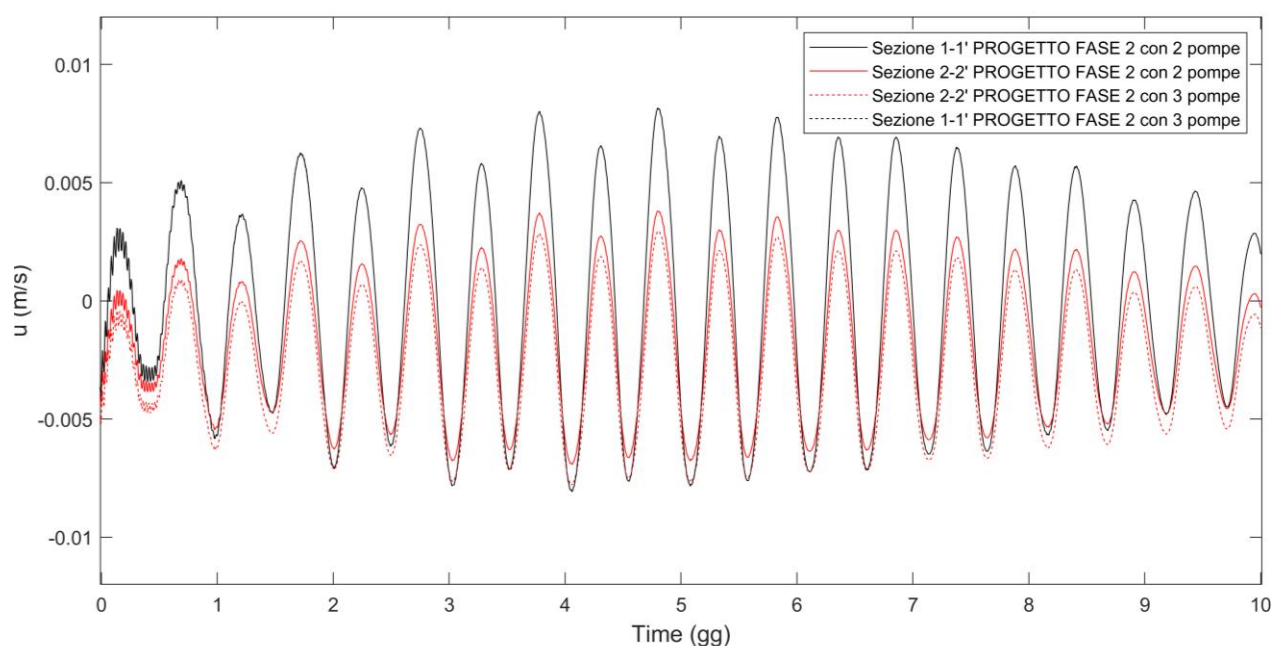


Figura 6.7 - Comparazione velocità medie nelle sezioni 1-1' e 2-2' per le configurazioni di PROGETTO in FASE 2 con due e tre pompe.

Figura 5.10 mostra risultati identiche a quanto visto per la configurazione di PRP2025 per la sezione 1-1'. Si sono osservate invece velocità maggiori in uscita nella sezione 2-2' dovute al maggiore restringimento generato dalla costruzione della nuova imboccatura del molo Bonaria nel porto turistico con una differenza ancora più evidente nel caso con tre pompe.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

7 RICAMBIO IDRICO PORTUALE

In questo paragrafo sono rappresentati i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il modello di dispersione "Water Quality" utilizzando come dati di ingresso i risultati idrodinamici ottenuti con il codice FLOW-FM illustrati in precedenza.

Di seguito sono mostrati i risultati "areali" di concentrazione del soluto passivo ottenuti all'interno del porto ed espressi in termini percentuali.

Nella Figura 7.1 sono mostrate le concentrazioni iniziali unitarie assunte all'inizio delle simulazioni relative alla configurazione Attuale, della configurazione di PRP che, come detto, include la nuova diga di delimitazione del Porto Turistico prevista dal PRP e dall'ATF e della configurazione di ATF2025, ottenuta nella FASE 2 dello studio, ottimizzando la configurazione di PRP.

Nella Figura 7.2, nella Figura 7.3, nella Figura 7.4, nella Figura 7.5, nella Figura 7.6 e nella Figura 7.7 sono riportati i risultati areali di concentrazione ottenuti alla fine dei 10 gg oggetto delle simulazioni.

Per calcolare il tempo di lavaggio (FT) e l'efficienza di ricambio idrico (E) è risultato necessario calcolare la variazione della concentrazione del soluto passivo nel tempo. A tal fine per ogni simulazione e configurazione si è analizzata una stessa area di controllo (coincidente con la superficie dello specchio d'acqua del porto turistico riportata nella Figura 7.1) dove si è calcolata, istante per istante, la concentrazione media del soluto passivo.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

7.1 Risultati areali

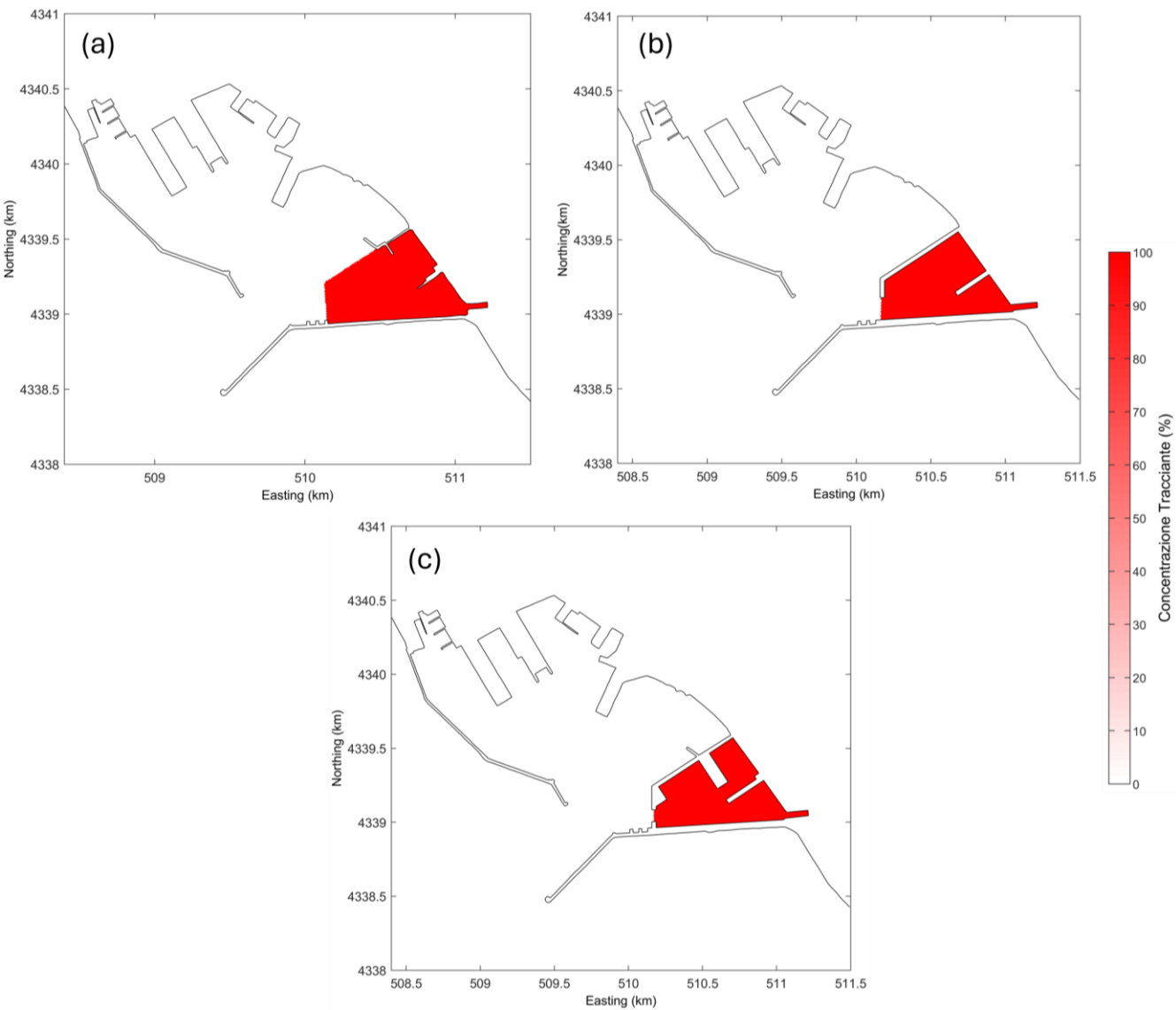


Figura 7.1 - Mappa della concentrazione tracciante iniziale per la configurazione (a) ATTUALE e (b) di PRP e (c) di ATF2025.

Nella Figura 7.2 e nella Figura 7.3 sono riportati per la configurazione Attuale i risultati areali di concentrazione ottenuti alla fine dei 10 gg oggetto delle simulazioni.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

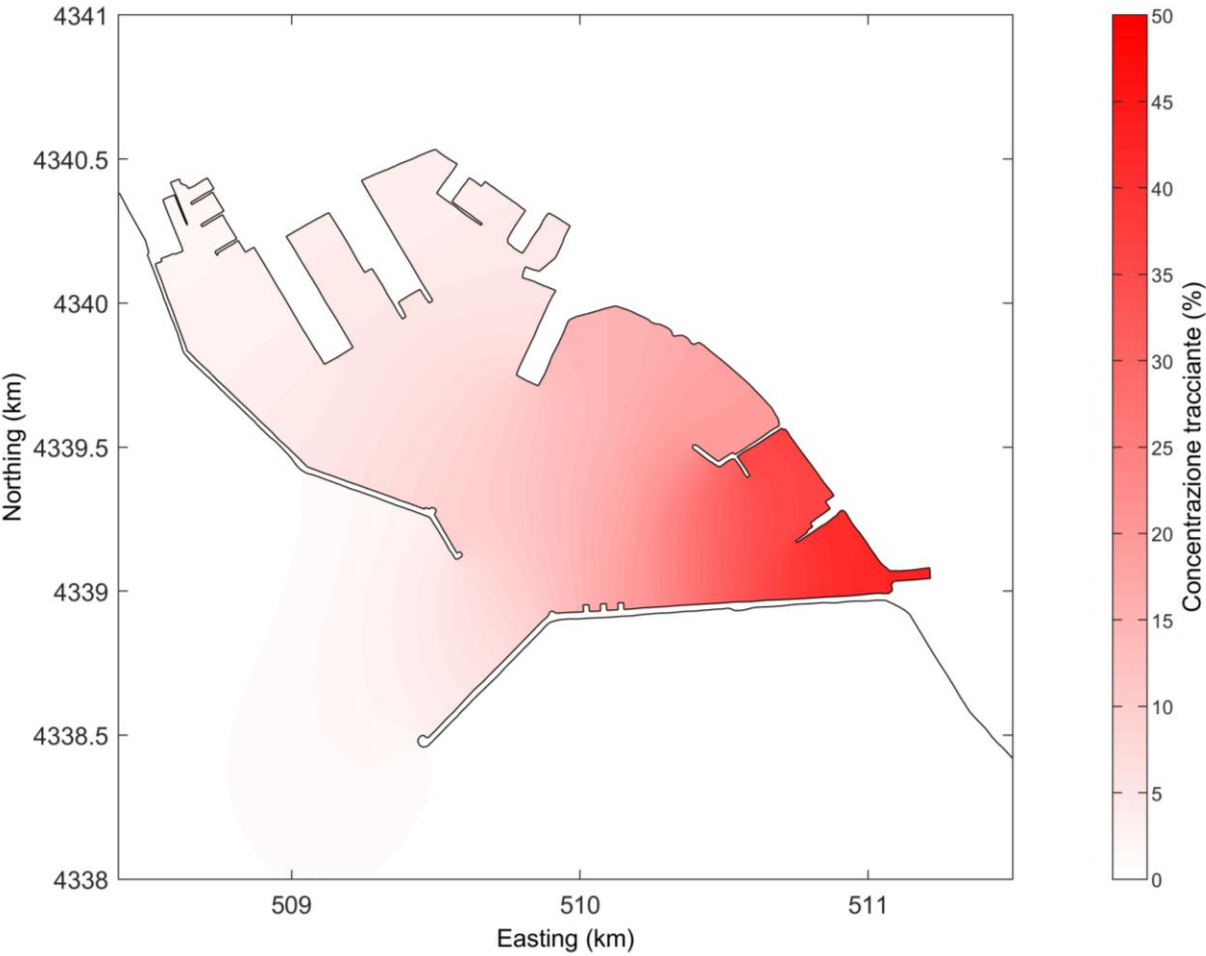


Figura 7.2 - Mappa della concentrazione tracciante al termine dei 10 gg di simulazione per la configurazione ATTUALE.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

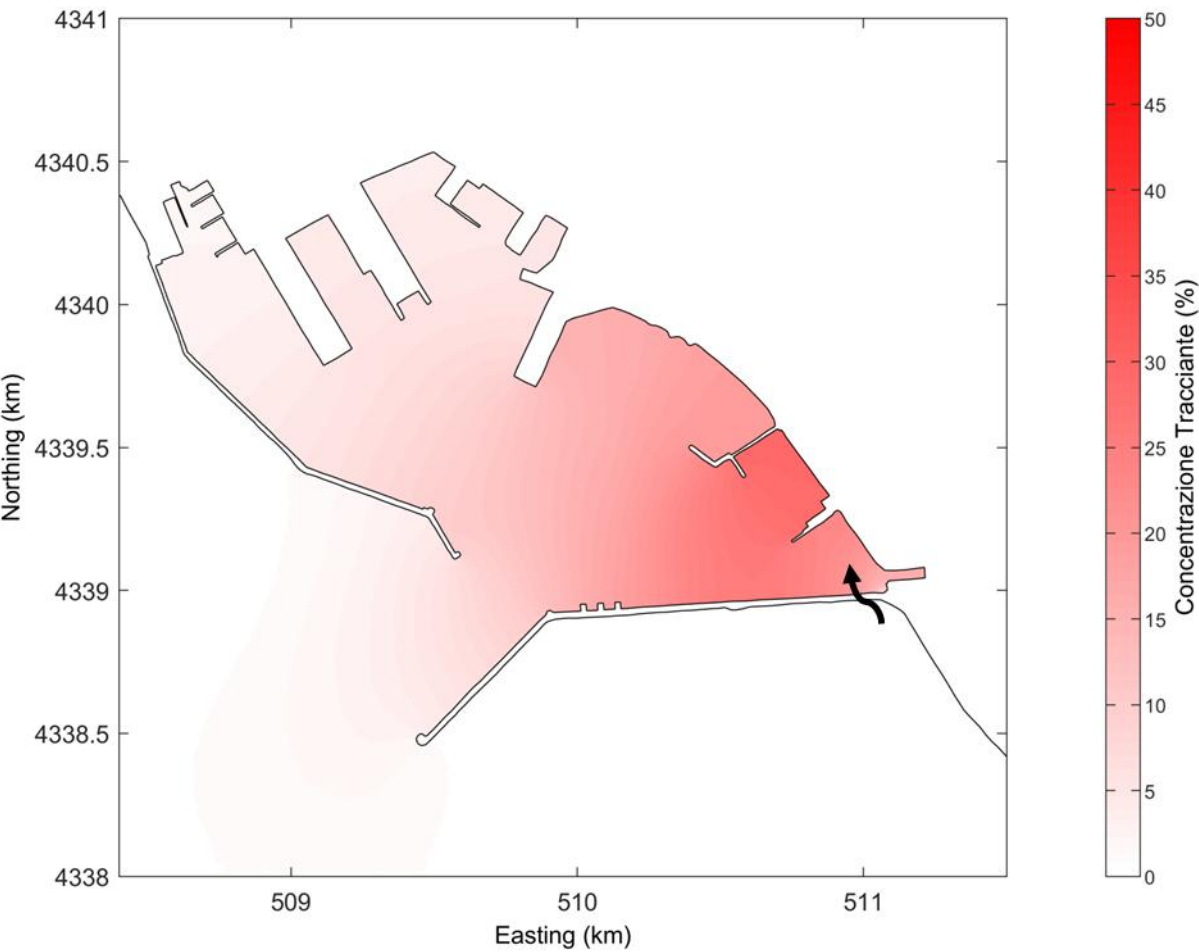


Figura 7.3 - Mappa della concentrazione tracciante al termine dei 10 gg di simulazione per la configurazione ATTUALE con pompa.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

Nella Figura 7.4 e nella Figura 7.5 sono riportati i risultati areali per la configurazione di PRP di concentrazione ottenuti alla fine dei 10 gg oggetto delle simulazioni.

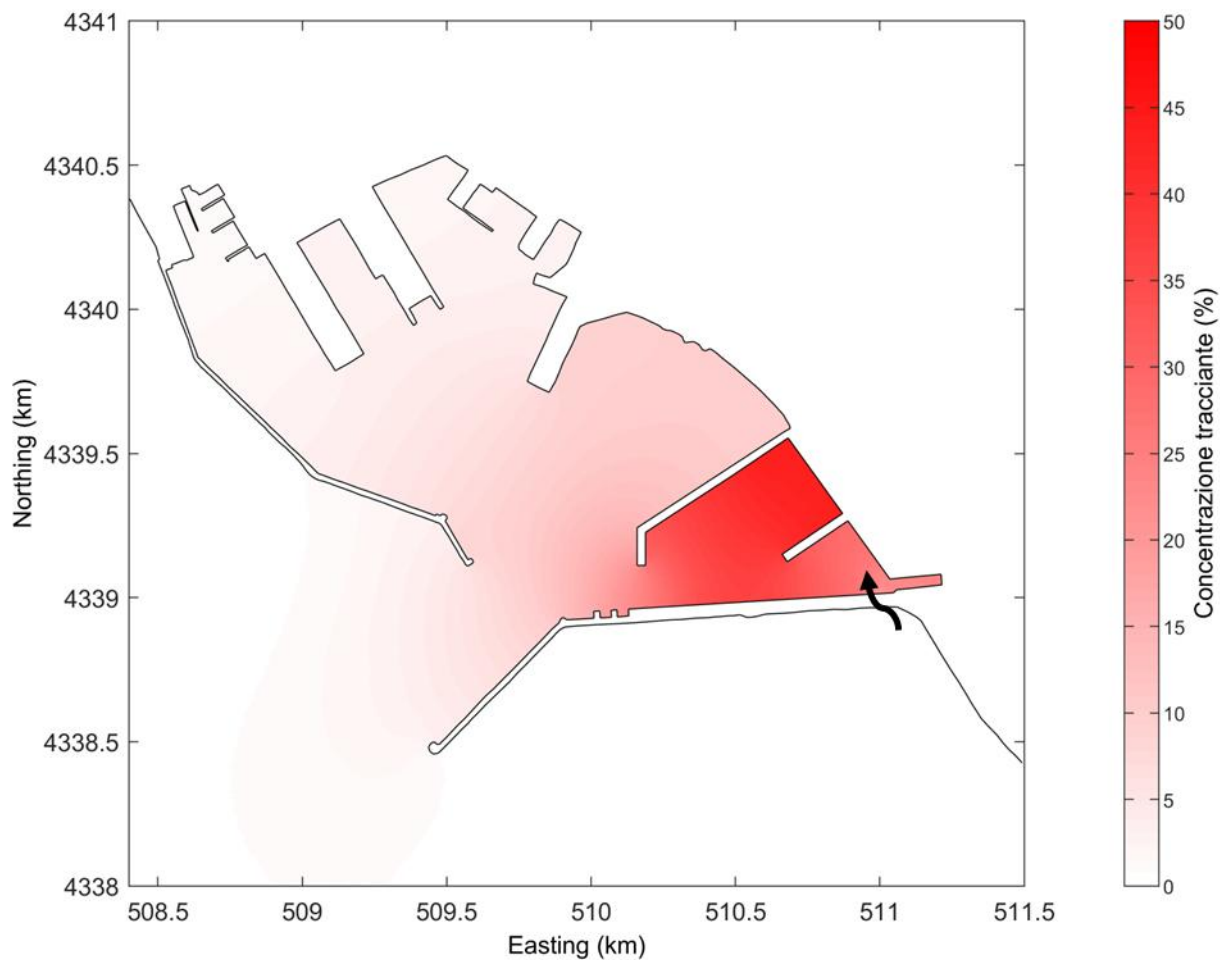


Figura 7.4 - Mappa della concentrazione tracciante al termine dei 10 gg di simulazione per la configurazione di PRP con pompa.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

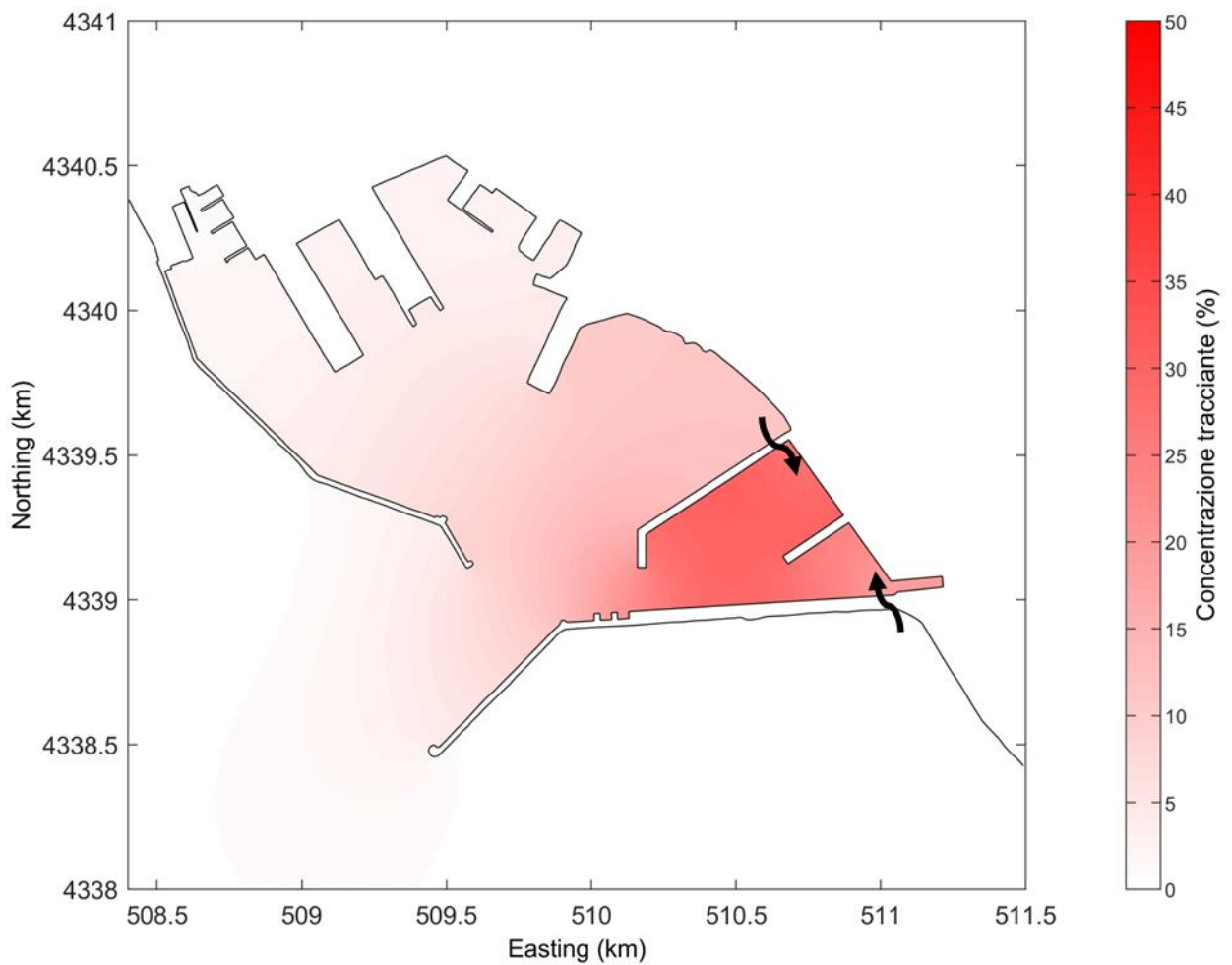


Figura 7.5 - Mappa della concentrazione tracciante al termine dei 10 gg di simulazione per la configurazione di PRP con due pompe.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

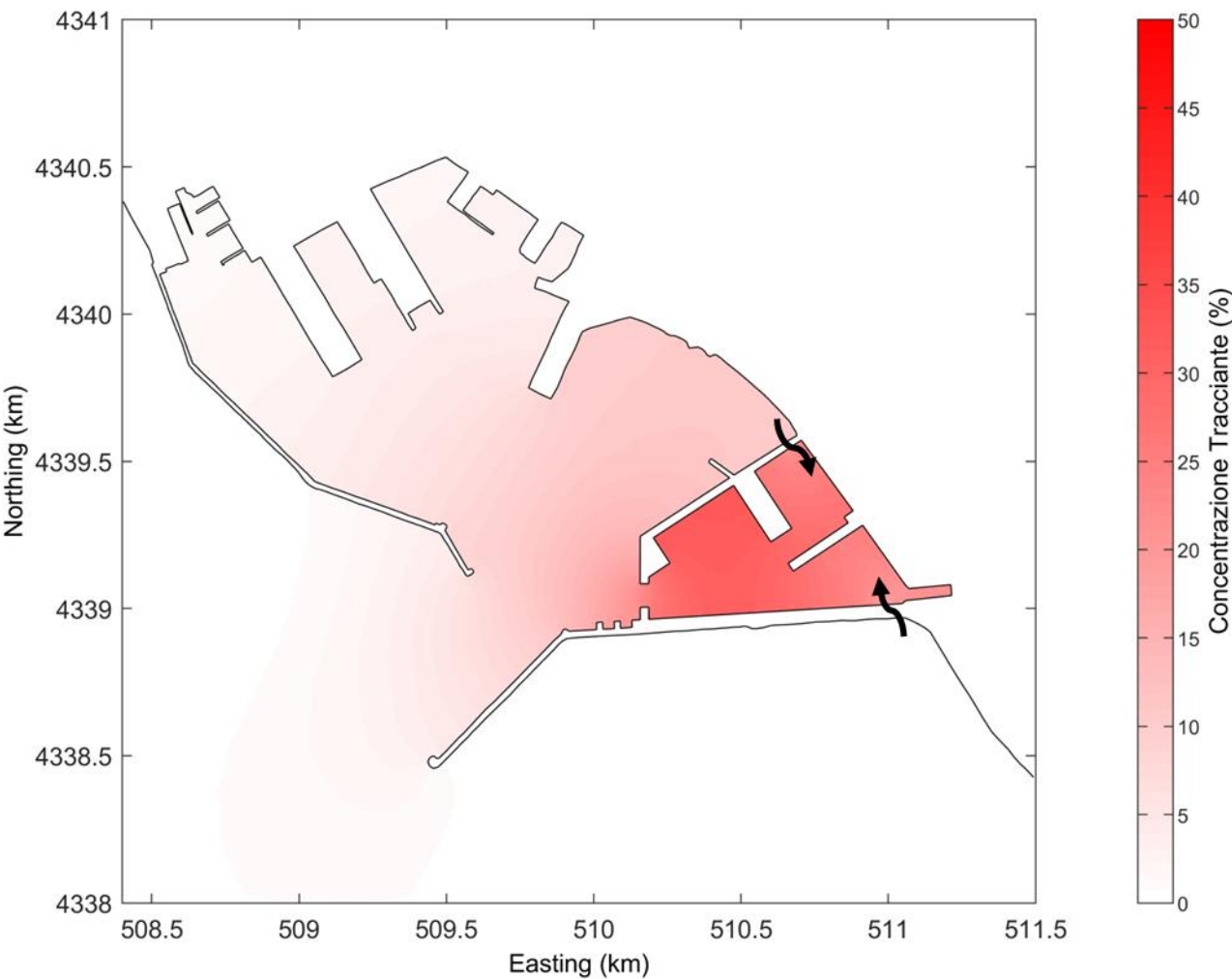


Figura 7.6 - Mappa della concentrazione tracciante al termine dei 10 gg di simulazione per la configurazione di ATF2025 con due pompe.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

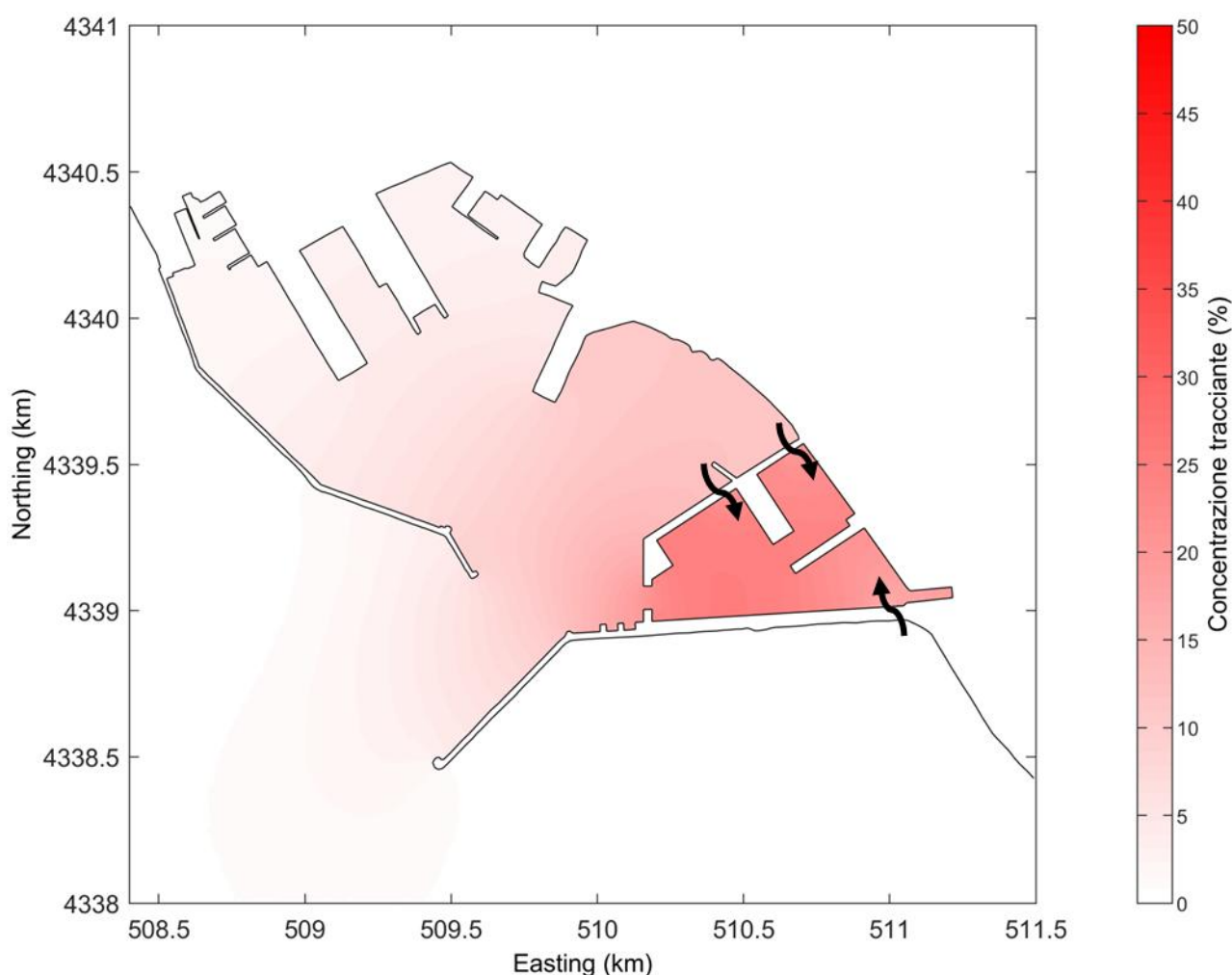


Figura 7.7 - Mappa della concentrazione tracciante al termine dei 10 gg di simulazione per la configurazione di ATF2025 con tre pompe.

Con riferimento alla configurazione Attuale i risultati mostrano che al termine delle simulazioni la concentrazione di soluto che si osserva in prossimità della foce del Canale San Bartolomeo in assenza della pompa (vedi Figura 7.2) risulta sensibilmente ridotta quando si considera operativa la pompa (Figura 7.3).

Per contro nella situazione di PRP con una sola pompa (vedi Figura 7.4) l'effetto di diluizione si riduce rispetto alla situazione Attuale e nella zona nord la concentrazione a fine simulazione rimane nell'ordine del 50 %.

L'effetto della seconda pompa nella configurazione di PRP riesce a ridurre sensibilmente la concentrazione di soluto nell'intero porto turistico e si ottengono risultati simili anche in FASE 2, nella configurazione di ATF2025 (Figura 7.6).

Infine, per quanto riguarda la configurazione di ATF2025 si può notare come l'aggiunta della terza pompa (Figura 7.7) aumenta in modo apprezzabile il ricambio idrico nella zona a ridosso del nuovo molo dove con due pompe (Figura 7.6) la concentrazione rimane più elevata.

7.2 Tempo di Lavaggio ed Efficienza del ricambio idrico

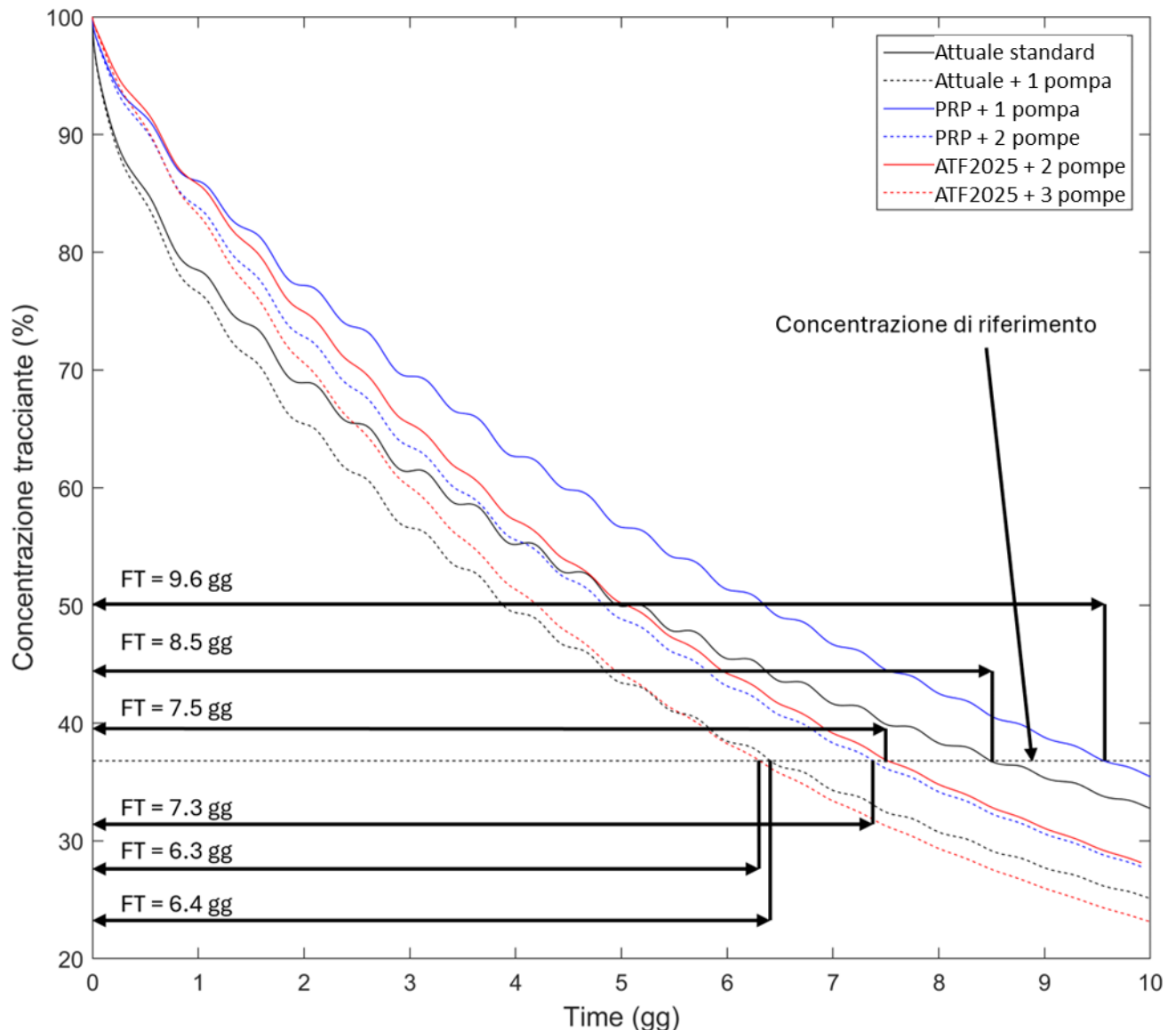


Figura 7.8 - Curve di variazione nel tempo della concentrazione del soluto passivo (tracciante) espresse in percentuale rispetto alla concentrazione iniziale, valutate all'interno del bacino portuale in relazione ai sei scenari esaminati.

Come riportato al Capitolo 3, il tempo di lavaggio (FT) viene definito come il tempo necessario per ridurre la concentrazione di un soluto passivo dal suo valore iniziale, assunto pari al 100 %, al 36,8%.

Il diagramma riportato nella Figura 7.8 mostra la riduzione nel tempo della concentrazione media del soluto valutata all'interno dello specchio d'acqua del porto turistico. Ciascuna curva del diagramma si riferisce ad uno dei sei scenari esaminati. La retta orizzontale puntinata del diagramma indica la concentrazione di soluto pari al 36,8 %, di conseguenza l'intersezione tra la retta puntinata e le varie curve relative ai diversi scenari, identifica i tempi di lavaggio di ciascuno scenario.

Come si evince dalla figura i risultati ottenuti per il tempo di lavaggio sono i seguenti:

- Configurazione Attuale senza pompa: FT = 8,5 gg;
- Configurazione Attuale con una pompa: FT = 6,4 gg;
- Configurazione di PRP con una pompa: FT = 9,6 gg;

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

- Configurazione di PRP con due pompe: FT = 7,3 gg.
- Configurazione di ATF2025 con due pompe: FT = 7.5 gg;
- Configurazione di ATF2025 con tre pompe: FT = 6,3 gg.

Come era lecito prevedere, i risultati delle simulazioni mostrano chiaramente come l'inserimento della nuova diga di delimitazione del porto turistico riduca, rispetto alla situazione attuale, il ricambio idrico del porto turistico, infatti mentre il ricambio idrico della configurazione attuale risulta di 8,5 gg, quello relativo alla configurazione di PRP dove comunque si è inserita una pompa è risultato maggiore e pari a 9,6 gg.

Si osserva inoltre che l'inserimento nella configurazione attuale di una pompa genera un beneficio sensibile rispetto alla situazione attuale, riducendo il tempo di ricambio da 8,5 gg a 6,4 gg.

Si evidenzia dai risultati ottenuti che adottando per la configurazione di PRP due pompe, si ottiene un tempo di lavaggio pari a 7,3 gg che risulta essere inferiore rispetto a quello relativo alla configurazione ATTUALE (senza pompe) pari a 8,5 giorni.

Infine, i risultati per la configurazione di ATF2025 mostrano come utilizzando due pompe si riscontrino risultati simili a quanto visto nella FASE 1 utilizzando lo stesso numero di pompe con un tempo di lavaggio pari a 7,5 gg invece di 7.3 gg. Invece, si riscontra un sostanziale miglioramento fino a 6.3 gg introducendo una terza pompa con un tempo di lavaggio molto simile alla configurazione attuale con una pompa.

Si ritiene che la soluzione con due pompe possa essere considerata una soluzione accettabile poiché, nonostante la limitazione introdotta dalla nuova diga del porto turistico, dà luogo ad un miglioramento della capacità di ricambio idrico rispetto alla situazione attuale. Se invece si vuole ridurre il più possibile la zona di ristagno presente in corrispondenza della connessione tra il nuovo molo e la diga NORD dove le velocità sono quasi nulle nella FASE 2 con due pompe la configurazione con 3 pompe può essere considerata ottimale.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

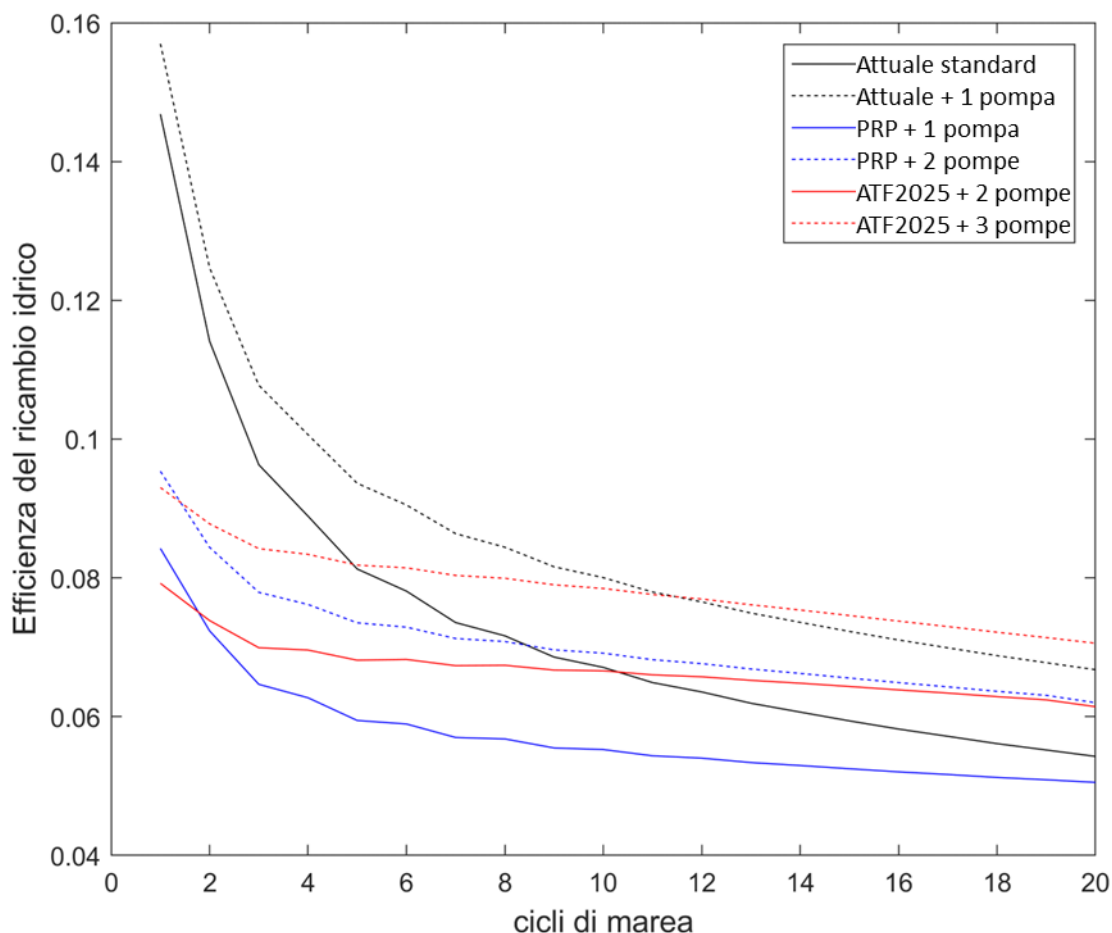


Figura 7.9 - Curve di efficienza del ricambio idrico nel tempo del tracciante all'interno del bacino portuale con l'aumento di cicli di marea.

Nel diagramma di Figura 7.9 sono mostrate le curve di efficienza del ricambio idrico ottenute, in relazione ai sei scenari analizzati, calcolando questo parametro (definito al Capitolo 3) sull'intera superficie del porto turistico.

Si osserva che l'efficienza del ricambio idrico esprime una grandezza adimensionale (inferiore o al massimo uguale ad 1) che valuta alla fine di ogni ciclo di marea di quanto la concentrazione si sia ridotta rispetto alla concentrazione iniziale. Pertanto, il diagramma di Figura 7.9 riporta in ascissa un numero che rappresenta quanti cicli di marea sono trascorsi dall'inizio della simulazione. Nel caso di Cagliari, essendo le maree semidiurne, in 10 giorni si verificano circa 20 cicli di marea.

Ovviamente le curve riportate nella Figura 7.9 sono di tipo decrescente perché all'inizio quando la concentrazione di soluto è elevata si ottiene sempre il massimo dell'efficienza, la quale al passare del tempo (cicli di marea) tende a ridursi.

Dalla lettura del diagramma di Figura 7.9 si vede chiaramente che nella configurazione ATTUALE "standard" (assenza della diga) o "con una1 pompa", l'efficienza all'inizio delle simulazioni assume valori maggiori rispetto ai due casi esaminati di PRP e ATF2025 (presenza della diga).

Si osserva inoltre che lo scenario di ATF2025 con 3 pompe, a partire dal dodicesimo ciclo di marea, ovvero dopo circa 6 gg, dà luogo ad una situazione lievemente migliore rispetto a quella che si verifica nella situazione ATTUALE con una pompa.

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

8 CONCLUSIONI

Lo studio ha preso in esame la capacità di ricambio idrico dell'area che il PRP destina al nuovo Porto Turistico del Porto Vecchio di Cagliari.

La capacità di ricambio idrico di un bacino portuale contribuisce in modo rilevante a determinare le condizioni di qualità delle acque del bacino stesso specialmente in relazione ai fenomeni di anossia (carenza dell'ossigeno disciolto nelle acque di fondo) che si possono verificare quando le acque tendono a ristagnare a causa della mancanza di forzanti idrodinamiche che favoriscano il ricambio delle acque come ad esempio il vento, il moto ondoso e possibili apporti idrici di origine fluviale.

A scopo cautelativo lo studio è stato eseguito prendendo in esame quale forzante idrodinamica la sola marea astronomica, trascurando quindi le altre forzanti idrodinamiche (come ad esempio il vento) che comunque a Cagliari sono di solito presenti.

Lo studio è stato condotto utilizzando una modellistica numerica che costituisce lo stato dell'arte nel settore, ovvero i moduli FLOW-FM e il modulo Water Quality facenti parte della suite DELFT3D-FM (FM = Flexible Mesh) sviluppata dal laboratorio olandese Deltares.

Lo studio ha preso in esame: (FASE 1) sia la configurazione ATTUALE (assenza della diga di delimitazione del Porto Turistico "Zona A") che quella prevista dal Piano Regolatore Portuale (prolungamento dell'attuale Molo Bonaria a costituire la diga di delimitazione con gli altri specchi liquidi del Porto Vecchio); (FASE 2) configurazione contemplata dall'Adeguamento Tecnico Funzionale 2025 al fine di ottimizzare la conformazione e dimensioni delle darsene di ormeggio nonché la funzionalità anche per gli aspetti di ricambio e qualità delle acque interne portuali contemplando anche la necessità di utilizzare sistemi di pompaggio al fine di introdurre cicli di corrente forzata per migliorare delle acque.

I risultati hanno mostrato che inserendo nella Configurazione di ATF2025 due pompe con una portata di circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ciascuna posizionata in prossimità dei radicamenti a riva molo di Levante esistente del porto Vecchio, del nuovo molo Bonaria di delimitazione del porto turistico e in prossimità della congiunzione tra il nuovo molo di Bonaria e lo sporgente Bonaria, si ottiene un sensibile miglioramento della capacità del ricambio idrico rispetto alla situazione attuale riducendo il tempo di "lavaggio" dello specchio d'acqua da circa 8,5 gg a circa 7,5 gg e con risultati molto simili alla configurazione di PRP con due pompe (7,3 gg). Il miglioramento che si ottiene rispetto alla situazione attuale diventa sensibile a partire dal quarto giorno, ovvero dopo circa 8 cicli di marea. La configurazione di ATF2025 con 3 pompe invece migliora ulteriormente la capacità di ricambio idrico del nuovo Porto Turistico con il quale si ottiene un tempo di lavaggio di 6,3 gg. L'utilizzo della terza pompa permetterebbe inoltre la riduzione di zone di ristagno presenti nella nuova configurazione di ATF2025 utilizzando ad esempio un'attivazione pianificata e non costante.

In conclusione, si ritiene che questi benefici possano essere considerati più che soddisfacenti per garantire una buona qualità delle acque nel nuovo porto turistico anche durante il periodo estivo.

Per quanto riguarda il sistema di pompaggio, si evidenzia che i parametri principali da rispettare sono costituiti dalla portata di ciascuna delle due pompe stimata in circa $1 \text{ m}^3/\text{s}$ e dal loro posizionamento che è stato previsto in prossimità del radicamento a riva delle due dighe e tra lo sporgente Bonaria e il nuovo molo di Bonaria.

Tuttavia, si deve evidenziare che, in una fase più avanzata della progettazione, si potrà prevedere la possibilità di frazionare ciascuna pompa in più pompe, le quali comunque dovranno essere in grado di garantire complessivamente le stesse portate previste nel presente studio. Il frazionamento

Adeguamento Tecnico Funzionale - 2025	Titolo elaborato: S3 - Studio di circolazione idrica.					
	Data: 03.04.2025					
	24	010	PR	003	4	MAR

in più pompe potrà risultare necessario sia in relazione al problema di mantenere le velocità di presa e di restituzione dell'acqua entro valori non pericolosi (al più pari a 1 m/s), sia in relazione alla posizione delle imbarcazioni, dei pontili e più in generale delle opere che verranno previste. Anche per quanto riguarda la posizione delle pompe ci sarà la possibilità di prevedere modeste variazioni nella loro posizione media, tenendo conto che la loro efficienza tende ad aumentare in maniera diretta con la distanza dall'imboccatura portuale.

Si ricorda infine che i requisiti individuati nel presente studio per garantire una buona qualità delle acque non possono essere considerati sufficienti in quanto sarà necessario prevedere tutti gli accorgimenti stabiliti dalla normativa vigente per evitare di immettere acque inquinate nello specchio d'acqua portuale.

Nel caso in cui durante la fase di gestione del porto dovesse risultare necessario, si potrà prevedere anche l'impiego di ossigenatori dell'acqua marina da mettere in funzione nei periodi in cui l'acqua tende a ristagnare.