



REGIONE AUTONOMA  
FRIULI VENEZIA GIULIA



Autorità di Sistema Portuale  
del Mare Adriatico Orientale

---

# Piano Regolatore Portuale del Porto di Monfalcone Variante Localizzata

---

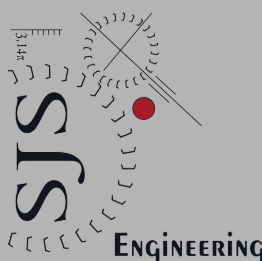
Il Responsabile del  
procedimento

Dott. Marco Padrini

Il Presidente dell'Autorità di  
Sistema Portuale

Dott. Zeno D'Agostino

Progettisti



Archest

Titolo Elaborato

**STUDIO DELLA CIRCOLAZIONE  
IDRICA PORTUALE E DELLA QUALITA'  
DELLE ACQUE**

Codice Elaborato

Elaborato

P.5.1.4

Revisione	Data	Descrizione
1	Novembre 2019	Emissione per Adozione
0	Settembre 2019	Prima emissione

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>DEFINIZIONE DEL CAMPO IDRODINAMICO</b> .....	<b>6</b>
3.1	Applicazione del sistema di modellazione SMS-TABS.....	6
3.2	Discretizzazione dello specchio liquido.....	7
3.2.1	Dati batimetrici e topografici.....	7
3.2.2	Configurazione attuale e di PRP.....	8
3.3	Definizione delle condizioni al contorno.....	10
3.3.1	Oscillazione dei livelli idrici.....	10
3.3.2	Portata idrica.....	11
3.4	Risultati delle simulazioni idrodinamiche.....	12
3.4.1	Scenari senza la portata proveniente dal canale De Dottori.....	12
3.4.2	Scenari con la portata proveniente dal canale De Dottori.....	27
<b>4</b>	<b>VERIFICA DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE INVASATE</b> .....	<b>29</b>
4.1	Verifica del Flushing exchange coefficient –E.....	30
4.1.1	Scenario con la sola escursione di marea.....	30
4.1.2	Scenario con immissione di portata dal canale De Dottori.....	33
4.2	Verifica dell'Ossigeno disciolto (DO - BOD).....	35
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>APPENDICE: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO SMS-TABS</b> .....	<b>40</b>
6.1	Codice RMA-2.....	40
6.1.1	Applicazioni.....	41
6.1.2	Equazioni utilizzate.....	41
6.2	Codice RMA-4.....	43
6.2.1	Equazioni utilizzate.....	43

## 1 PREMESSA

Lo scrivente raggruppamento temporaneo (RT) costituito da MODIMAR s.r.l. (mandatario), SJS Engineering s.r.l. (mandante) e Archest s.r.l. (mandante) è risultato aggiudicatario del servizio tecnico di pianificazione, progettazione e coordinamento tecnico scientifico del Piano Regolatore Portuale (PRP di seguito) del porto di Monfalcone, a seguito di gara indetta dalla Regione Friuli Venezia Giulia – Direzione Centrale Infrastrutture e Territorio (RFVG).

Per i cogenti motivi indicati nella Premessa del documento “*P.2 Relazione generale*”, la RFVG, di concerto con *tutti* i portatori di interesse del Porto, ha scelto di perseguire lo strumento di “Variante Localizzata al PRP” del porto di Monfalcone, quale unico ed efficace strumento per attuare rapidamente un intervento decisivo, fondamentale ed indifferibile per lo sviluppo del porto di Monfalcone.

Il presente Studio Specialistico “*P.5.1.4 Studio della circolazione idrica portuale e della qualità delle acque*” accompagna il progetto di “Piano Regolatore Portuale di Monfalcone - Variante Localizzata”.

La presente relazione è redatta al fine di verificare le variazioni indotte dalla configurazione portuale prevista dalla variante del PRP (di seguito: progetto o PRP) sulla circolazione idrica portuale rispetto alla situazione attuale e più specificatamente sulla qualità delle acque portuali.

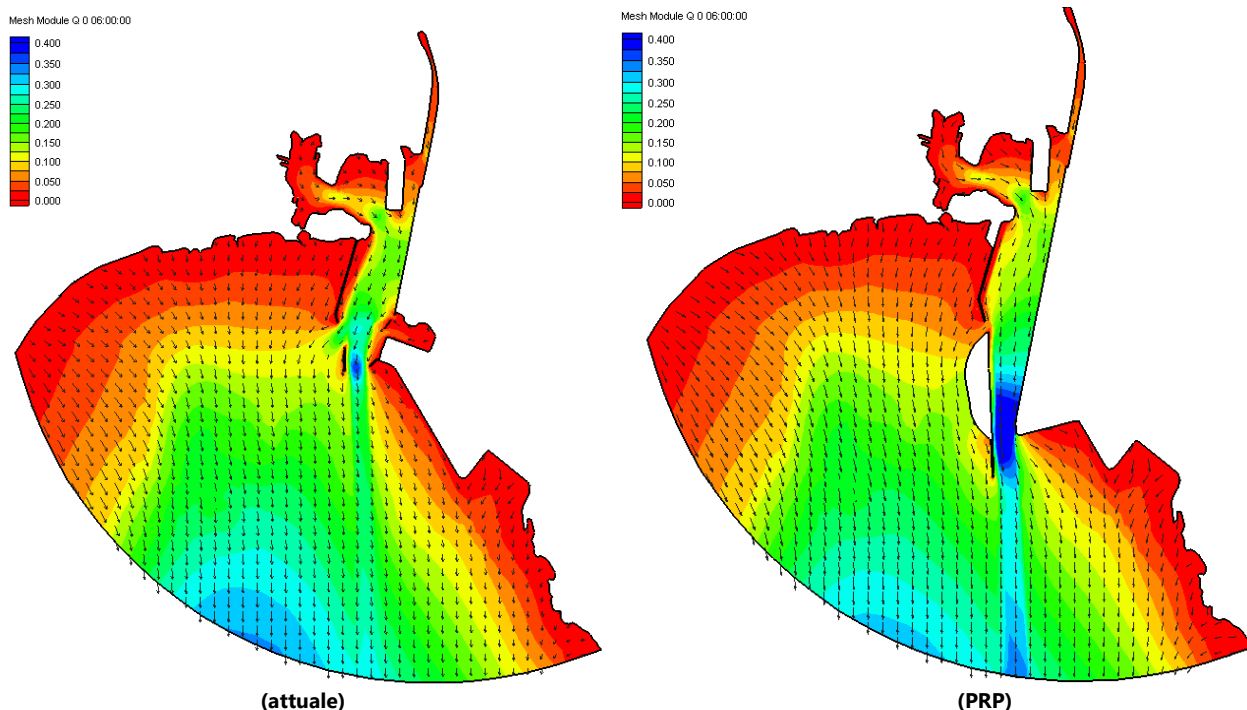
La verifica è stata condotta inizialmente considerando come unica forzante idrodinamica le oscillazioni di marea, trascurando in via cautelativa:

1. gli apporti idrici provenienti dal canale Valentinis, tratto terminale e navigabile del canale De Dottori (canale che devia a scopi prevalentemente idroelettrici una parte della portata del fiume Isonzo); tali apporti stimati in  $21.5 \text{ m}^3/\text{s}$  verranno utilizzati per ulteriori simulazioni.
2. gli apporti di acqua dolce del canale navigabile detto Brancolo (realizzato ad ovest del bacino di Ponzano), che drena anche le abbondanti acque di risorgiva della pianura tra Monfalcone e l’Isonzo;
3. le acque di risorgiva provenienti da altri canali interni.

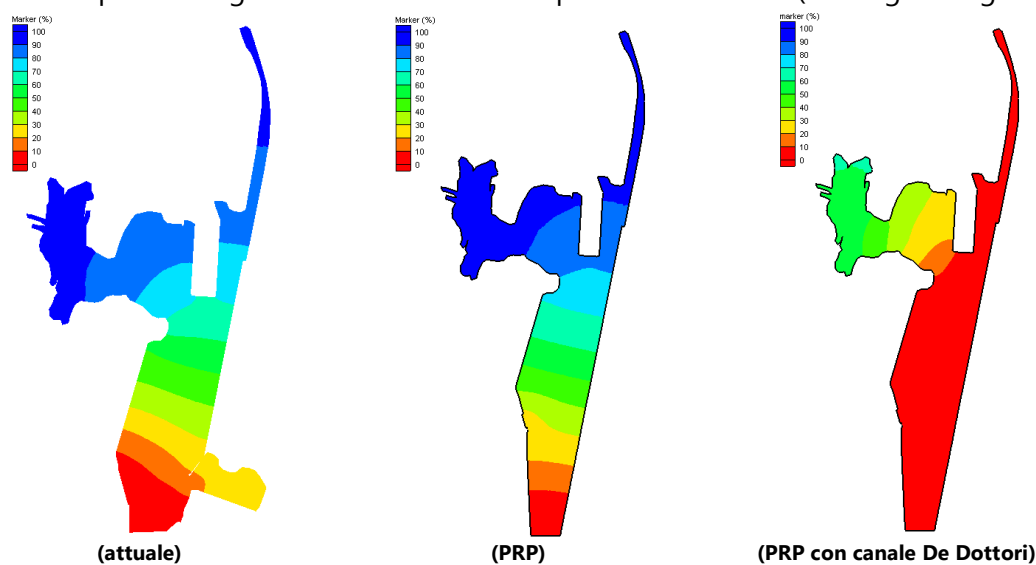
Tali verifiche hanno evidenziato un modesto ricambio idrico ed una insufficiente riossigenazione dello specchio idrico portuale sia nella configurazione attuale che in quella di progetto con modeste differenze evidenti in particolar modo nella zona dell’imboccatura portuale.

La configurazione di progetto, che prevede tra l’altro l’aumento della profondità del canale di accesso (da  $-12.00$  a  $-14.00$  m s.l.m.) e la riduzione della larghezza dell’imboccatura portuale laterale, tende a modificare la circolazione idrodinamica esclusivamente nella zona delle imboccature del porto.

La massima portata che in un ciclo di marea esce o entra dall’imboccatura principale passa da  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  relativa alla configurazione attuale a  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  in quella di PRP (con un aumento del 50%), come si evince dalle figure seguenti (andamento delle portate lineari)

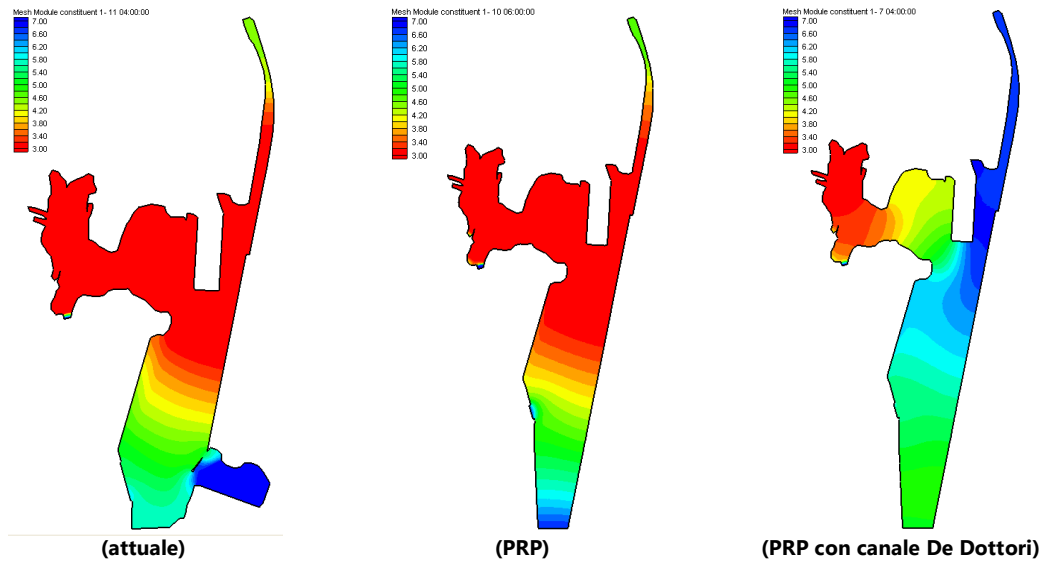


Per la verifica del ricambio idrico portuale, è stata utilizzata la metodologia del Flushing exchange coefficient, ossia si è imposto nell'istante iniziale e sull'intera area portuale un valore del "marker" (inquinante fittizio) pari a 100 e si è verificato dopo 20gg la nuova distribuzione spaziale del marker all'interno del porto a seguito della marea e della portata dal canale (vedi figure seguenti).



Le distribuzioni del marker nella configurazione attuale e in quella di progetto sono pressoché uguali con modeste differenze in prossimità del pontile Fincantieri, comunque per entrambi i casi si ha un ricambio idrico non sufficiente. Differente è la situazione di progetto, con una parte della portata idrica deviata dall'Isonzo nel porto attraverso il canale De Dottori, dove è evidente il completo ricambio idrico per un'ampia area portuale.

Nelle figure seguenti invece sono riportate le distribuzioni spaziali dell'Ossigeno disciolto per le varie configurazioni, nell'istante di minore concentrazione a seguito della metabolizzazione delle sostanze organiche (BOD - DO).



Anche per l'ossigeno disciolto è evidente una carenza per la configurazione attuale e quella di progetto. Invece considerando l'immissione dal canale De Dottori, la sopravvivenza delle specie biologiche è ampiamente garantita. Nelle simulazioni inoltre, non è stato considerato l'effetto benefico del canale Brancolo e delle risorgive in particolar modo per il bacino di Ponzano.

## 2 INTRODUZIONE

Il mantenimento di qualità organolettiche accettabili all'interno di un bacino portuale costituisce un delicato problema spesso imprescindibile per le esigenze operative e funzionali delle aree. Infatti, in periodi di scarse oscillazioni di marea abbinati a condizioni di temperature elevate tipiche dei mesi estivi, possono verificarsi indesiderati fenomeni di ristagno.

Nel capitolo seguente sono riportate le analisi relative all'idrodinamica portuale relative allo scenario attuale e a quello previsto nella variante del PRP.

Per una valutazione critica dei 2 scenari simulati si è fatto riferimento alle metodologie previste in letteratura "PIANC – Report n.98/2008 per un bacino semichiuso:

- flushing time: tempo necessario affinché un inquinante introdotto nel bacino raggiunga un grado di diluizione accettabile (63% di dispersione). In caso di marea semidurna tale tempo è dato da  $t = V_L/v \times t_{m2}$ , ( $t_{m2} = 12.42$  h - durata della componente armonica M2 della marea,  $V_L$  - Volume del bacino,  $v$  - Volume del prisma definito dall'oscillazione di marea). Le raccomandazioni del US EPA considerano buono un valore del tempo di ricambio di circa 4 giorni ed accettabile 10 giorni.

Scenario	Volume del bacino $V_L$ - (m <sup>3</sup> )	Volume del prisma $v$ - (m <sup>3</sup> )	t (h)
Attuale	14.462.340,00	0.8 x 1.920.008,00 = 1.536.006,40	4.87
Variante di PRP			

- Tidal prism ratio (TPR): il rapporto tra il volume entrante durante un ciclo di marea ed il volume totale in alta mare deve essere maggiore di 0.25, preferibile 0.35. Nello scenario attuale tale valore risulta pari a circa 0.10.
- Flushing exchange coefficient (E):  $E = 1 - (C_i/C_o)^{1/n}$  dove  $C_o$  e  $C_i$  sono rispettivamente la concentrazione iniziale e nella posizione ima di un componente "marker",  $n$  è il numero di cicli di marea (almeno 4). Secondo le indicazioni del PIANC, il valore medio di  $E$  necessario a garantire un buon ricambio idrico nel bacino deve essere maggiore di 0.20 e non più del 5% dell'area del bacino dovrà avere un valore di  $E$  (mediato su un ciclo completo di marea) minore di 0.15 "Smith, Nece et al. 2002". Tale metodo verrà sviluppato in dettaglio nei paragrafi seguenti

Nei capitoli seguenti verrà dapprima definito per la situazione attuale e di PRP il campo idrodinamico indotto dalla sola forzante di marea e per la situazione di progetto anche con l'immissione della portata dal canale De Dottori. In una prima fase tale campo dovrà essere sufficientemente ampio per definire l'andamento delle portate in entrata ed in uscita dalle 2 imboccature e definire la circolazione costiera indotta dalla sola marea astronomica. Successivamente l'analisi è ristretta al solo bacino portuale per la verifica del ricambio idrico e dell'andamento del BOD/DO.

### 3 DEFINIZIONE DEL CAMPO IDRODINAMICO

Per la definizione del campo idrodinamico sono stati esaminati due diversi scenari:

- Configurazione attuale
- Variante di Piano Regolatore Portuale (PRP o progetto)

Per ciascun scenario sono stati prodotti i risultati sia su scala ampia fino a comprendere la foce del fiume TIMAVO e sia su scala ridotta al solo bacino portuale.

Nelle simulazioni, in via cautelativa non sono stati considerati gli apporti idrici provenienti dal fiume TIMAVO.

Le simulazioni sono state condotte con il codice di calcolo numerico agli elementi finiti SMS – TABS.

Nei paragrafi successivi vengono descritte le simulazioni condotte ponendo particolare attenzione alle ipotesi di base nonché alle condizioni al contorno cui si è fatto riferimento.

#### 3.1 Applicazione del sistema di modellazione SMS-TABS

I modelli di calcolo impiegati appartengono al sistema di modellazione SMS-TABS che consente di simulare i fenomeni idrodinamici che si verificano nel flusso di masse d'acqua superficiali tramite il codice di calcolo agli elementi finiti RMA-2 (v. Appendice) per una descrizione completa del modello).

Il programma SMS, operativo in ambiente Windows, è stato utilizzato anche per le procedure di post-processor relative alle analisi ed alle realizzazioni dei grafici bidimensionali riproducenti i risultati delle elaborazioni.

Nella fase preliminare dello studio (procedura di pre-processor), è stato utilizzato il codice GFGEN per la costruzione del reticolo geometrico, agli elementi finiti, con cui è stato discretizzato lo specchio liquido.

Successivamente sono state definite le condizioni idrodinamiche al contorno:

- Oscillazioni del livello marino per effetto della marea lungo l'imboccatura;
- eventuale immissione di acqua nel bacino portuale in punti specifici

Il codice di calcolo RMA-2 ha consentito l'analisi del dominio fluido riferito ad un periodo di 24 ore con un passo temporale di 0.20 h.

## 3.2 Discretizzazione dello specchio liquido

Per la corretta applicazione del modello di calcolo idrodinamico è necessario effettuare un'attenta e dettagliata discretizzazione del sistema liquido in esame, considerando la reale batimetria interna ed esterna al porto, la conformazione portuale e della linea di costa.

A tal proposito si è fatto riferimento all'andamento planimetrico del bacino sia nella configurazione attuale che di variante del PRP

### 3.2.1 Dati batimetrici e topografici

Per la definizione della batimetria esterna al porto di Monfalcone si è fatto riferimento al progetto europeo **EMODnet** grazie al quale è stato prodotto il modello digitale del terreno (DTM) armonizzato per le regioni marine europee a partire da una selezione di dati quali: rilievi batimetrici, DTM compositi, rilevazioni satellitari (SDB). Il portale EMODnet mette a disposizione inoltre la linea di costa, in formato vettoriale, rilevata da satellite e relativa all'anno 2018.

Sia il DTM che la linea di costa sono stati acquisiti attraverso il servizio di visualizzazione e download del portale EMODnet.

Il DTM acquisito per l'alto Adriatico è stato generato sulla base dei rilievi batimetrici condotti dall'I.I.M.M. e dal CNR-ISMAR e presenta una passo di discretizzazione di circa 100 m.

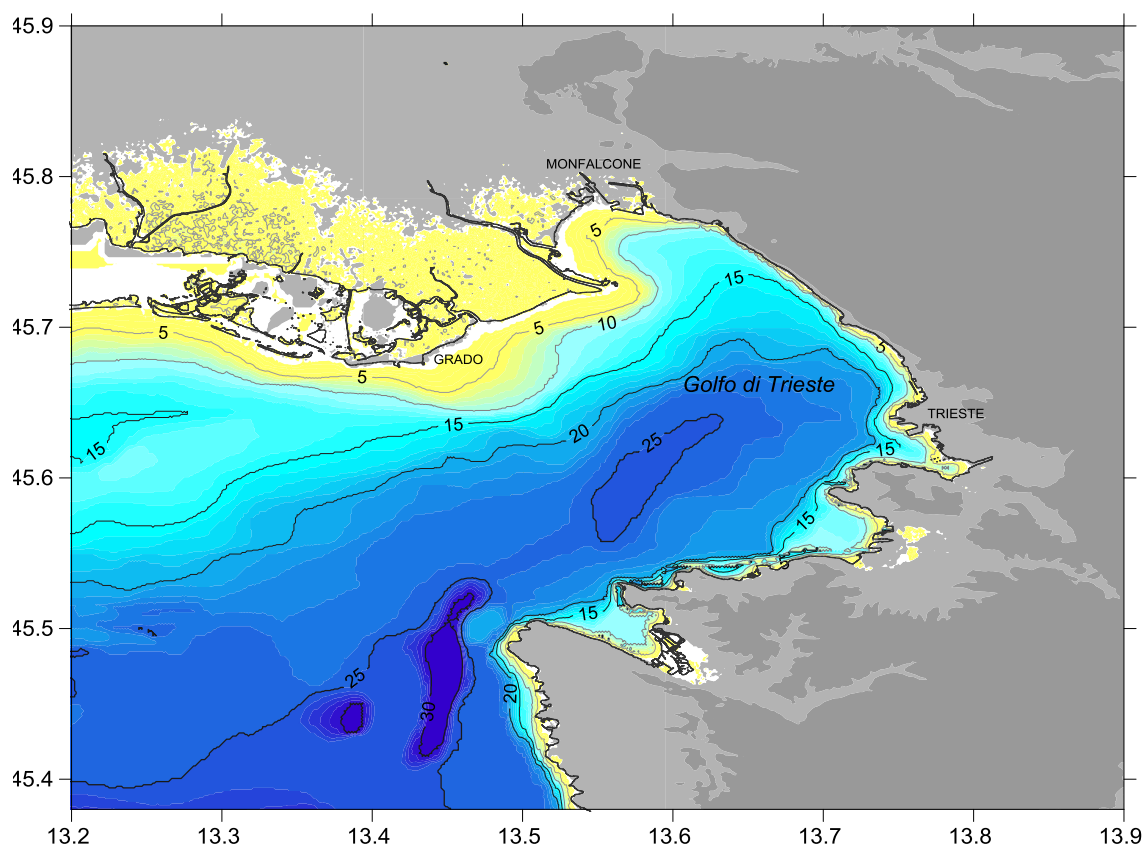


Figura 3.1 - DTM dell'Alto Adriatico fornito dal sito EMODnet



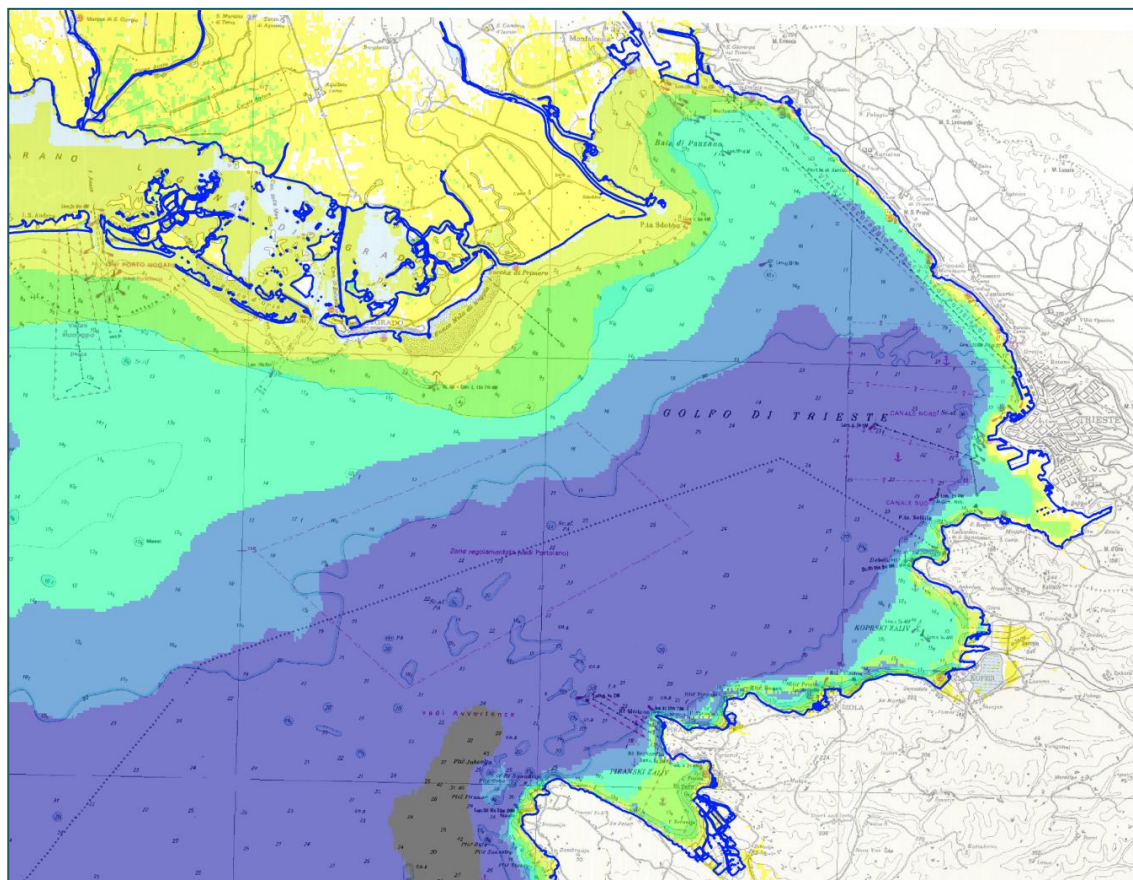


Figura 3.2-Sovrapposizione del DTM alla Carta Nautica 039

Per la configurazione attuale la batimetria interna e la conformazione portuale sono state fornite dall'ex Autorità Portuale di Monfalcone, mentre la batimetria esterna al porto e la linea di costa sono state dedotte dalla carta nautica. Si evidenzia la presenza del canale di accesso al porto su fondali di -12.00 m s.l.m. con una larghezza dello stesso di circa 140 m.

Per la configurazione di variante al PRP, si è fatto riferimento agli elaborati progettuali ad esso allegati.

### 3.2.2 Configurazione attuale e di variante al PRP

Come già evidenziato precedentemente, per la configurazione attuale e per quella di PRP sono state eseguite complessivamente 4 diverse simulazioni con 4 griglie di calcolo diverse (n.2 per la configurazione attuale e n.2 per quella di PRP) (Figura 3.3 e Figura 3.4):

1. scenario esteso attuale e di PRP: oltre al porto e alla parte finale del canale De' Dottori (canale Valentinis) comprende il tratto di costa fino al fiume Timavo verso est per una estensione lineare di circa 3000 m dall'imboccatura portuale.
2. scenario ristretto attuale e di PRP: comprende il porto, le 2 imboccature portuali ed il canale Valentinis

L'area da simulare è stata suddivisa in n.4 mesh di calcolo, n.2 relative allo scenario esteso (attuale e di PRP) e n.2 a quello ristretto (attuale e di PRP) ed è costituita da:

Scenario	N. Elementi		Numero nodi
	Quadrangolari	Triangolari	
Attuale - Esteso	5218	1956	20263
Attuale - Ristretto	1379	661	5872
PRP - Esteso	4906	1666	18808
PRp - Ristretto	1604	637	6580

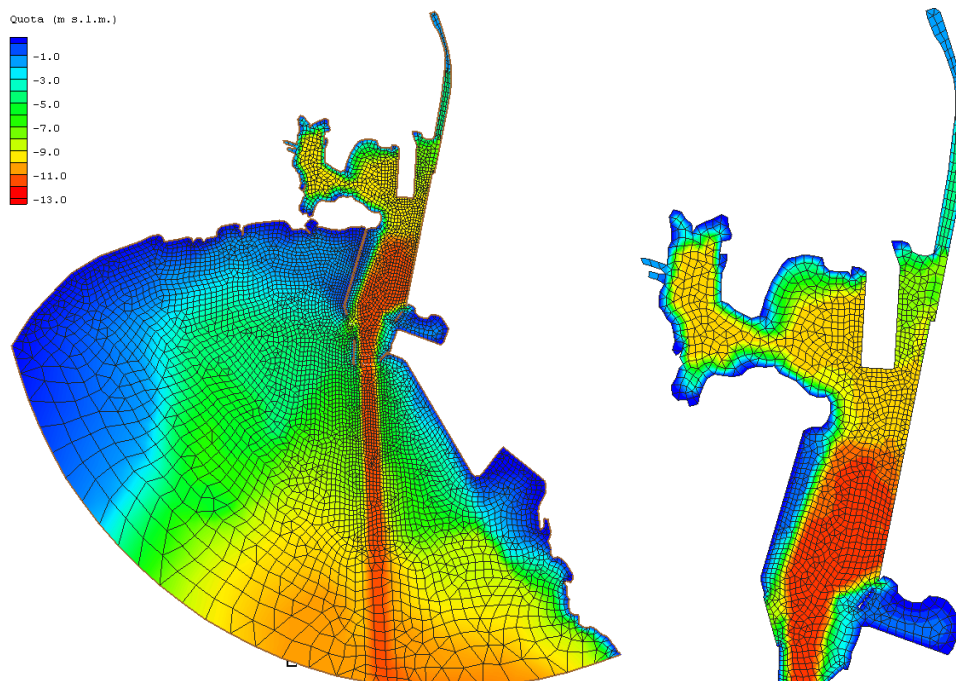


Figura 3.3 - Griglia di calcolo e batimetria di riferimento - Situazione attuale

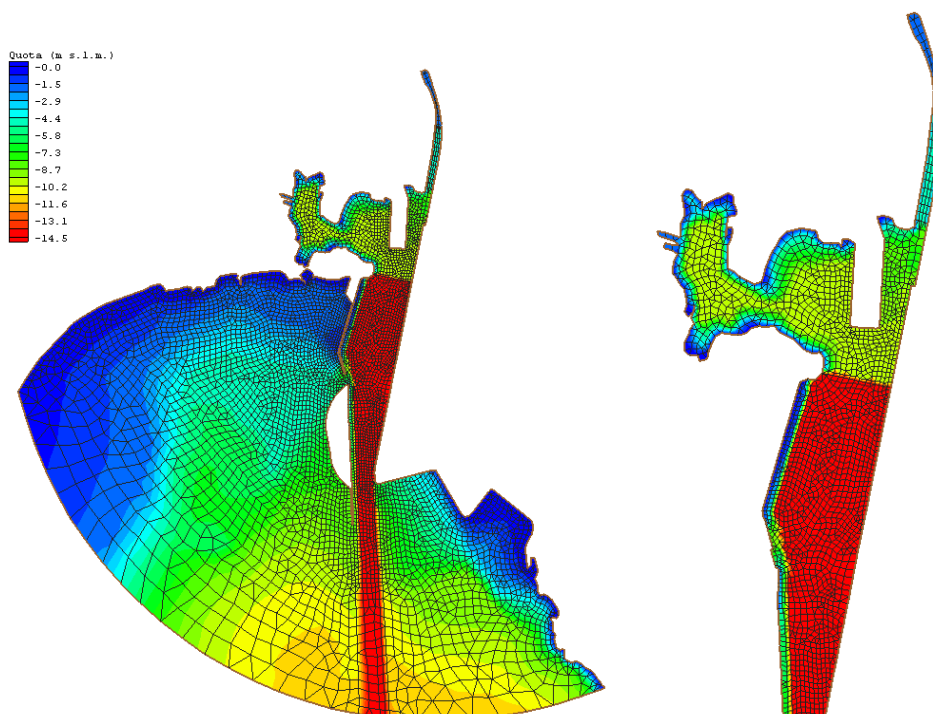


Figura 3.4 - Griglia di calcolo e batimetria di riferimento - Situazione di PRP

### 3.3 Definizione delle condizioni al contorno

Per il sistema liquido così discretizzato sono state definite le condizioni al contorno in termini di:

- oscillazione dei livelli idrici lungo il confine lato mare per la situazione estesa e lungo le 2 imboccature portuali per lo scenario ridotto.
- portata idrica lungo il canale De Dottori.

#### 3.3.1 Oscillazione dei livelli idrici

Per le condizioni di livello idrico si è fatto riferimento a 2 cicli di marea (24 ore) assumendo cautelativamente un dislivello di  $\pm 0.40$  m s.l.m.m. (Figura 3.5) rappresentativo delle condizioni medie di oscillazione di marea astronomica (MHHW e MLLW - media delle più alte e delle più basse maree giornaliere). Si riporta di seguito la tabella rappresentativa delle maree astronomiche per Monfalcone (vedasi tabella 16 dello studio meteomarinario).

<b>Highest Astronomical Tide</b>	HAT	0.76 m
<b>Mean High Water Spring</b>	MHWS	0.59 m
<b>Mean Higher High Water</b>	MHHW	0.40 m
<b>Mean Sea Level</b>	MSL	0.00 m
<b>Mean Lower Low Water</b>	MLLW	-0.39 m
<b>Mean Low Water Spring</b>	MLWS	-0.60 m
<b>Lowest Astronomical Tide</b>	LAT	-0.76 m

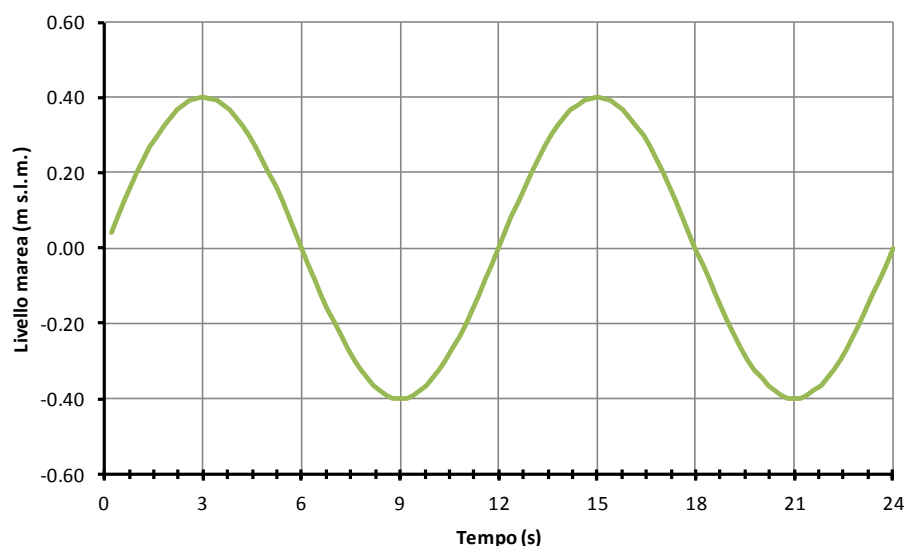


Figura 3.5 - Andamento dei livelli idrici in corrispondenza del contorno lato mare o delle imboccature



### 3.3.2 Portata idrica del canale De Dottori

Il canale De Dottori devia una parte della portata del fiume Isonzo (sbarramento di Sagrado - Figura 3.6) per scopi irriguo-idroelettrici e sfocia all'interno del porto (Fig. 3.7) attraverso il tratto terminale e navigabile Valentinis.

Lungo il canale sono presenti 5 centrali ad acqua fluente in cascata per una potenza complessiva di 2364 kW:

- Fogliano
- Redipuglia
- Ronchi dei Legionari
- Monfalcone Anconetta
- Monfalcone Porto (quest'ultima risente dell'oscillazione dei livelli a valle a causa della marea)

La portata di concessione è fissata in 21.5 m<sup>3</sup>/s sia in condizioni di magra che di piena.

Le simulazioni seguenti relative alla configurazione ristretta riportano sia lo scenario (estremamente cautelativo) senza gli afflussi provenienti dal canale e sia quella più realistica con la portata in concessione.



Figura 3.6 - opera di presa sull'Isonzo



Figura 3.7 - opera di foce nel Porto - canale Valentinis

## 3.4 Risultati delle simulazioni idrodinamiche

### 3.4.1 Scenari senza la portata proveniente dal canale De Dottori

Le simulazioni idrodinamiche riguardano la configurazione portuale attuale e di variante di PRP con il campo indotto dalla sola componente di marea.

Dalle simulazioni effettuate si evidenziano generalmente bassi valori delle velocità idriche per tutti scenari (dell'ordine di qualche millimetro/centimetro al secondo) sia nella fase di deflusso che in quella di riflusso.

Nelle figure seguenti sono riportati i campi di velocità (a) e della portata unitaria (b) per le due configurazioni simulate sia per lo scenario esteso e sia per quello ridotto fotografati nelle varie fasi di marea (ogni 1.5 h per ciclo di marea).

Le massime velocità in entrata e in uscita dal bacino portuale si registrano negli istanti in cui il livello idrico nelle due imboccature è nullo, mentre quelle minime nelle condizioni di alta e bassa marea. L'effetto di vivificazione dovuto alla sola marea risulta scarso (registrandosi velocità medie inferiori ad 0,002 m/s). Tale carenza è maggiormente evidente nella darsena più interna, mentre in prossimità dell'imboccature delle darsene e del porto le velocità sono dell'ordine di 0.03 m/s

Nelle Figura 3.8 e 3.10 (a e b) sono riportati gli andamenti delle portate idriche in corrispondenza delle due imboccature (Q1 - principale con canale dragato, Q2 - laterale) per gli scenari estesi (a) e ridotti (b) e per le due configurazioni portuali (attuale e di PRP).

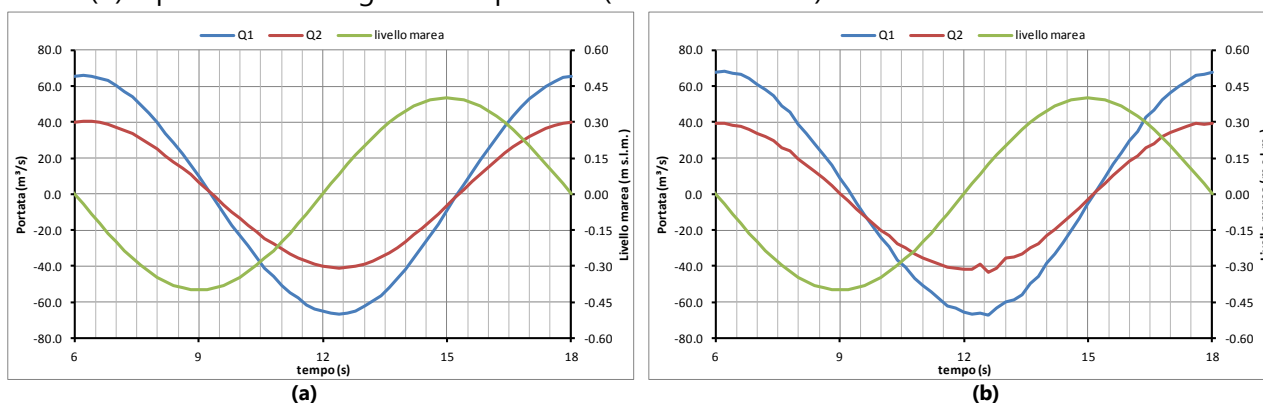


Figura 3.8 - Configurazione attuale - scenario esteso (a) e ridotto (b) - Andamento temporale delle portate dalle 2 imboccature

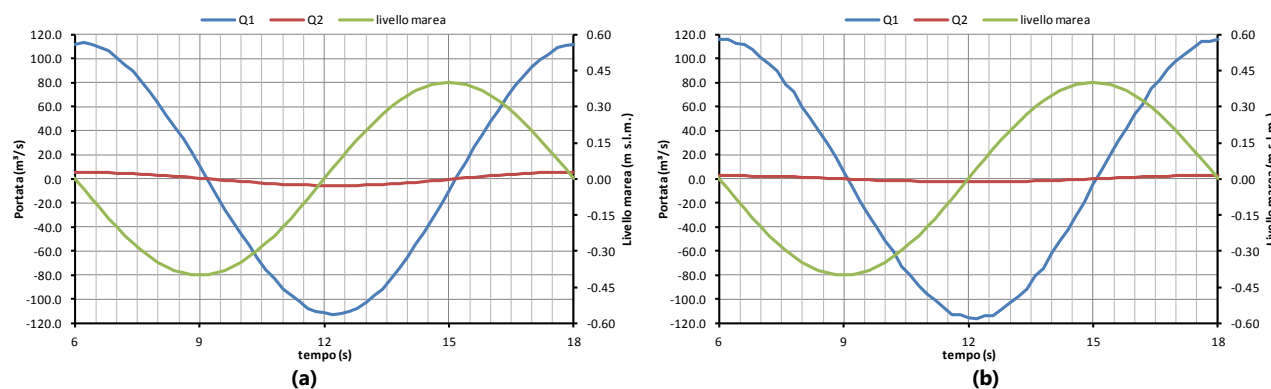


Figura 3.9 - Configurazione di PRP - scenario esteso (a) e ridotto (b) - Andamento temporale delle portate dalle 2 imboccature

L'esame delle figure ci permette di evidenziare che:

1. tra gli scenari estesi ed i relativi ridotti le differenze in termini di portata risultano minime
2. la portata massima che defluisce o che entra dall'imboccatura centrale è sempre nettamente superiore a quella relativa all'imboccatura laterale con il 60% nella configurazione attuale ed il 97% nella configurazione di progetto.

Nelle successive elaborazioni relative al calcolo del ricambio idrico e del BOD/DO verrà utilizzato lo scenario ridotto.

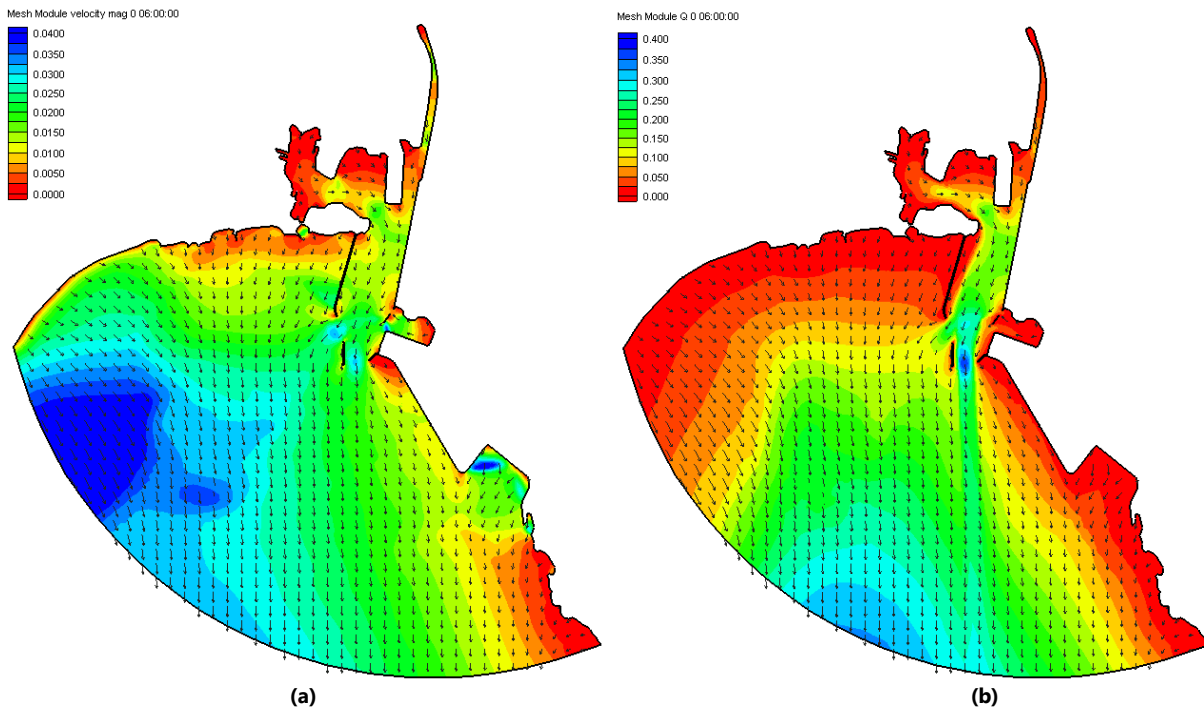


Figura 3.10 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 6.0$  h (massimo deflusso)

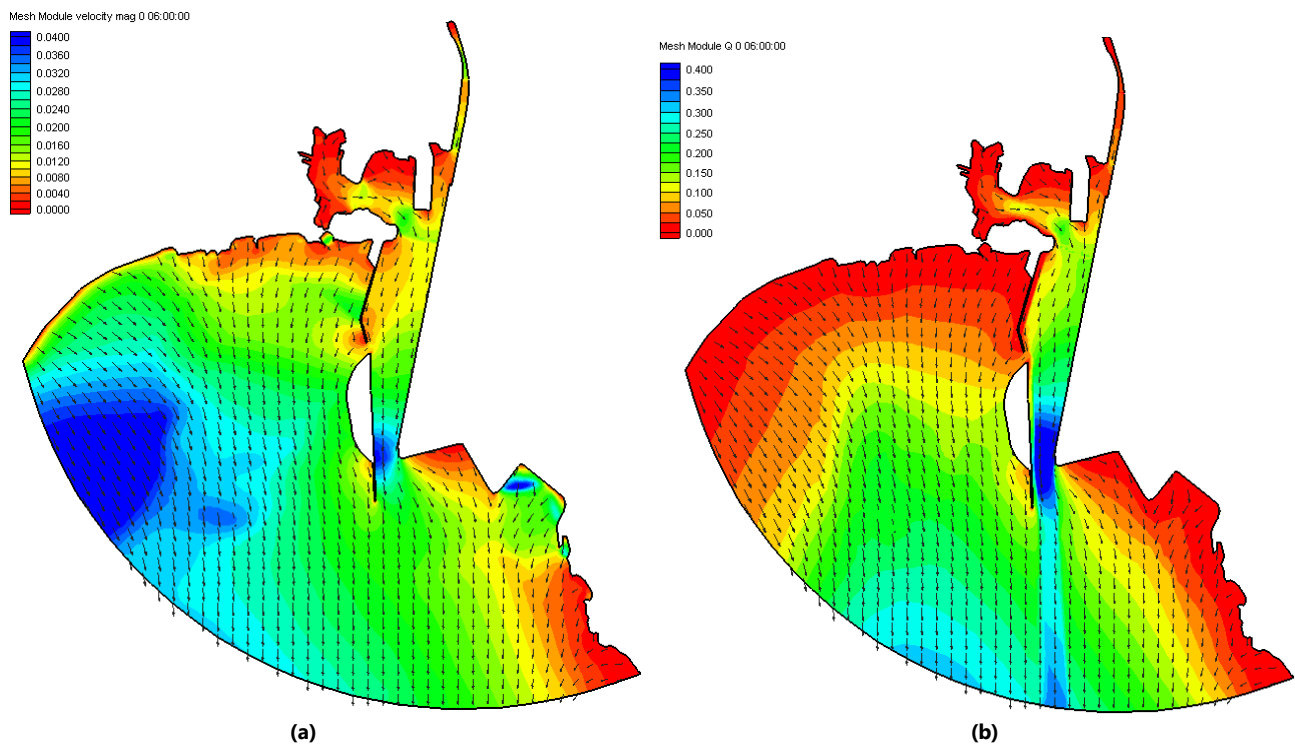


Figura 3.11 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 6.0$  h (massimo deflusso)

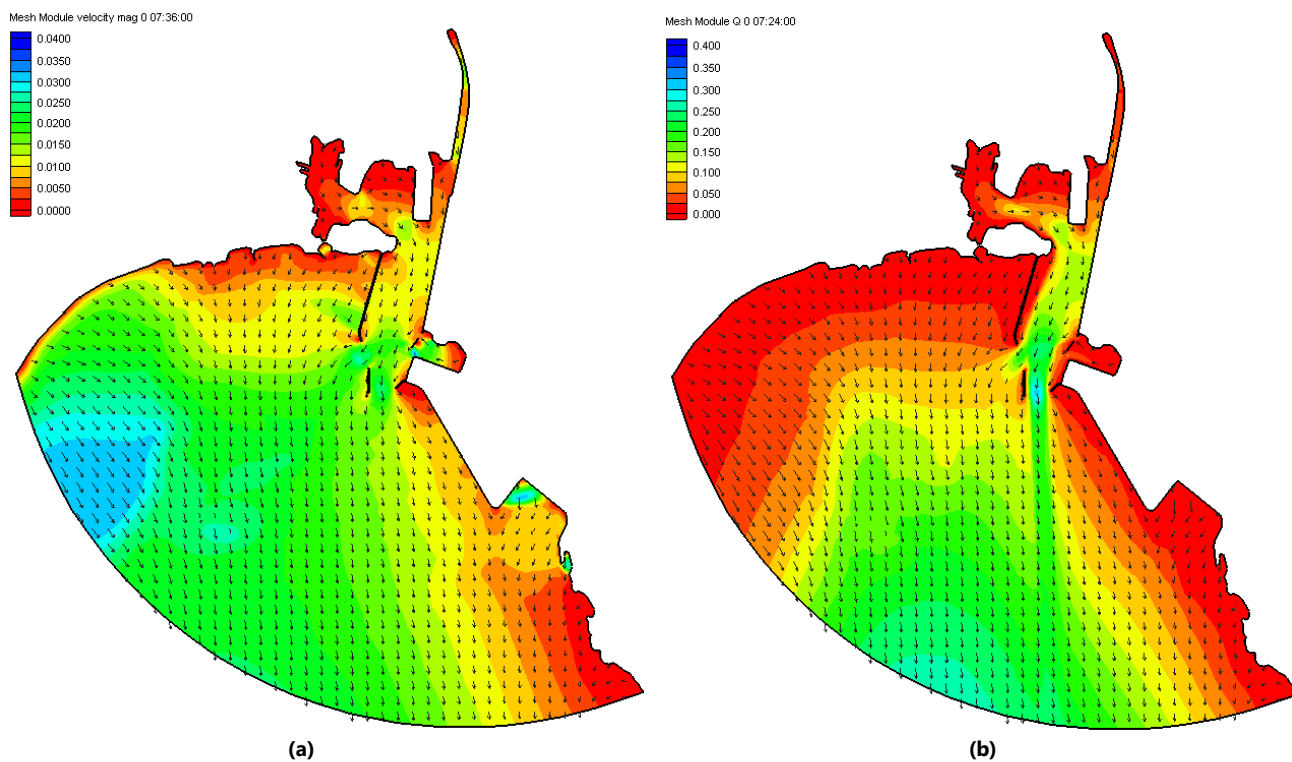


Figura 3.12 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 7.5$  h (deflusso)

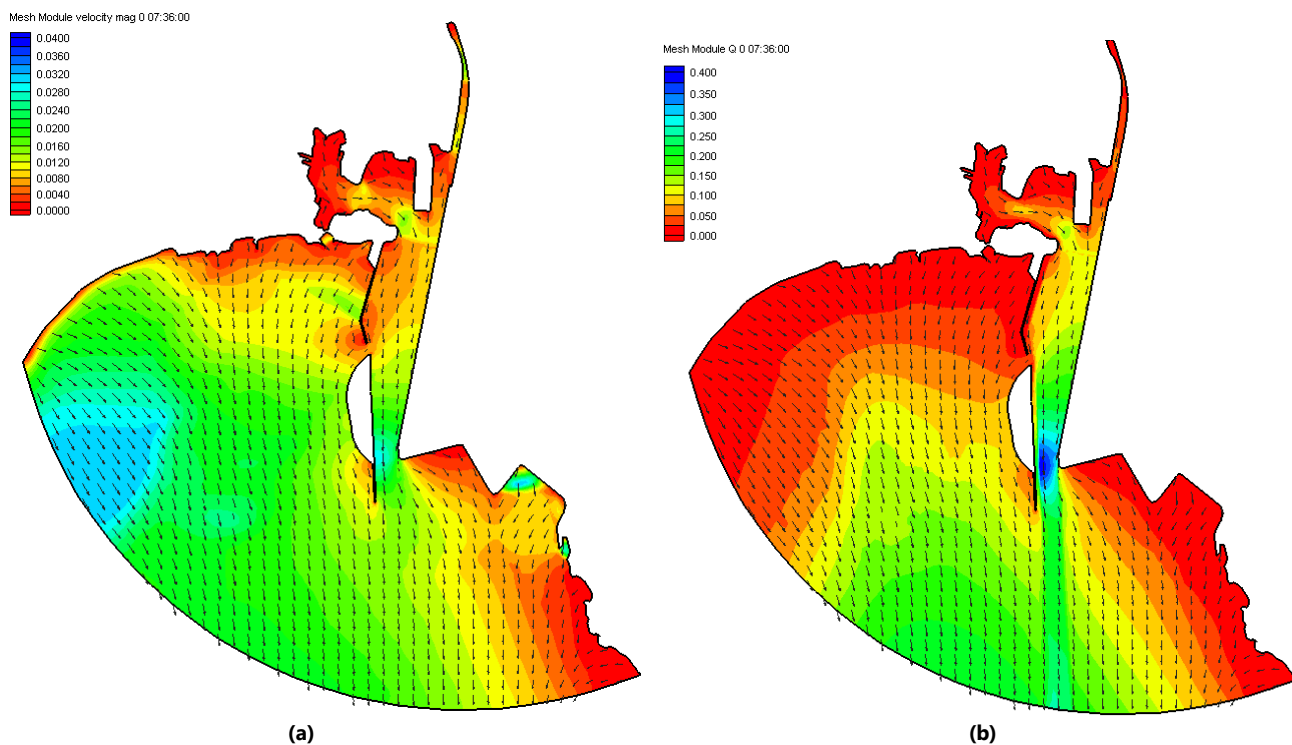


Figura 3.13 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 7.5$  h (deflusso)

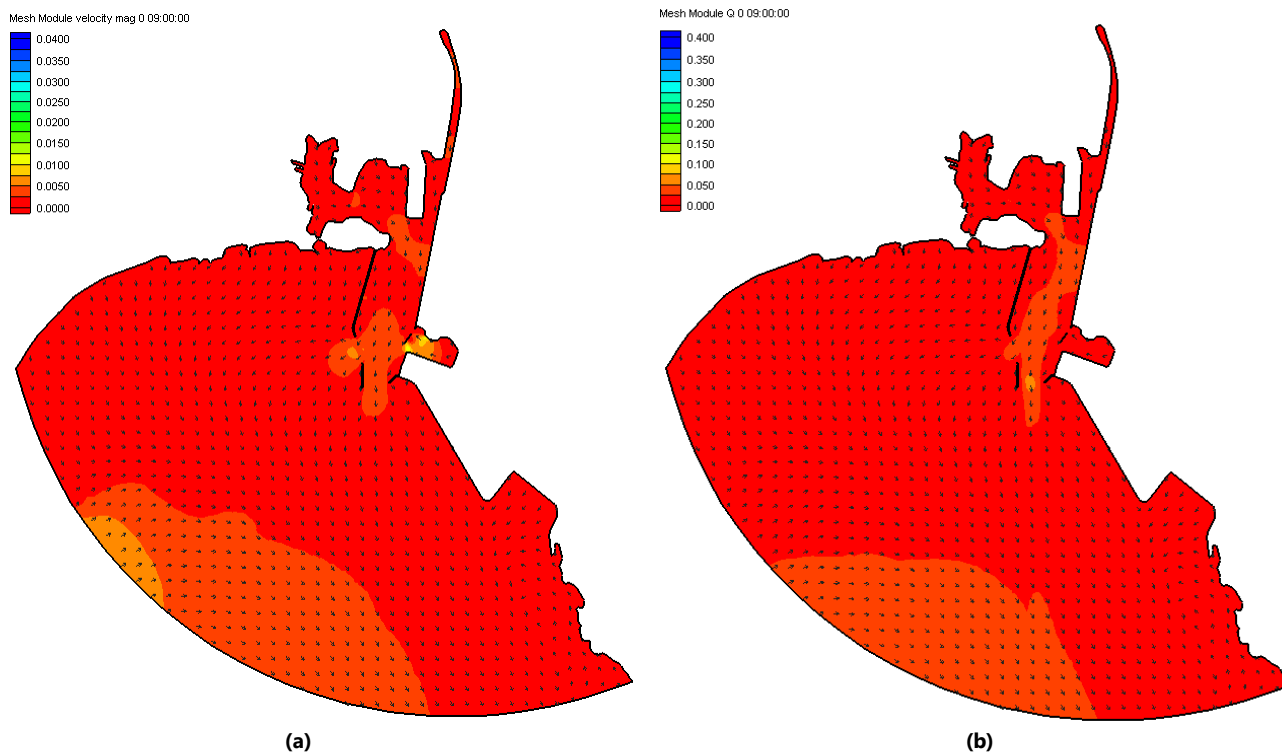


Figura 3.14 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 9.0 h (minimo di marea)

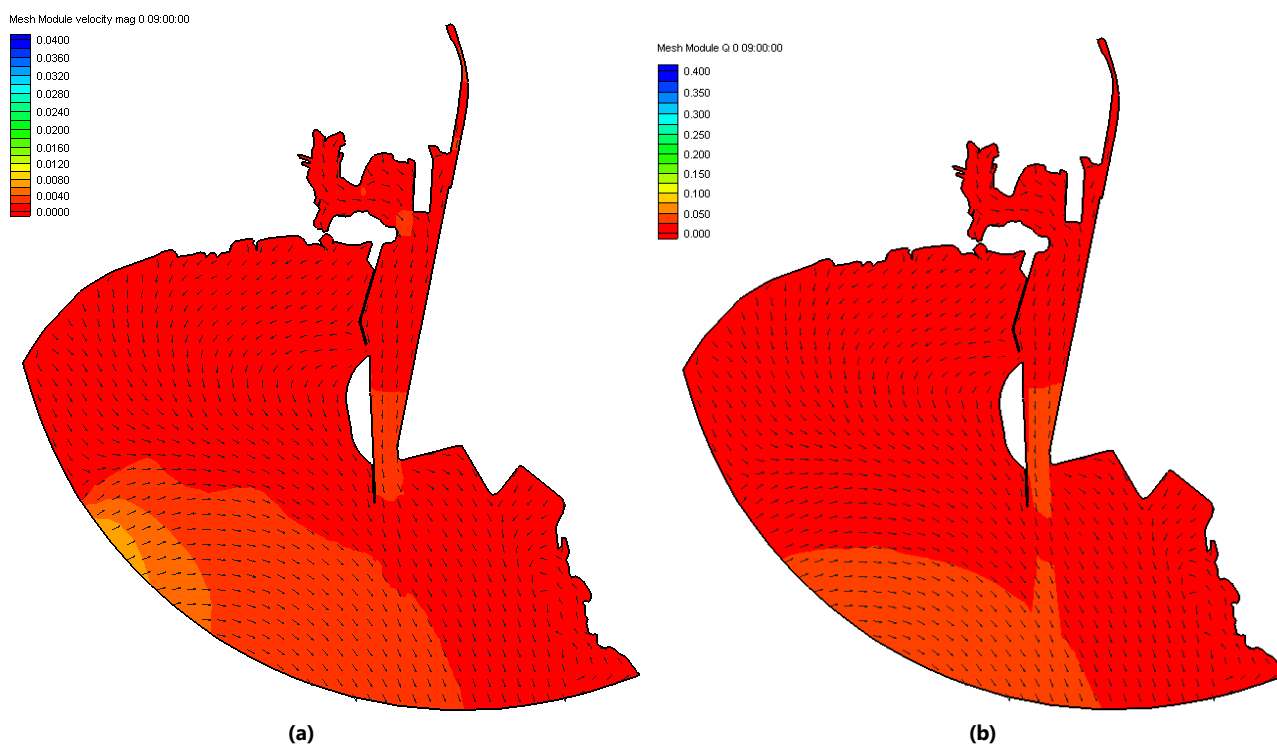


Figura 3.15 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 9.0 h (minimo di marea)



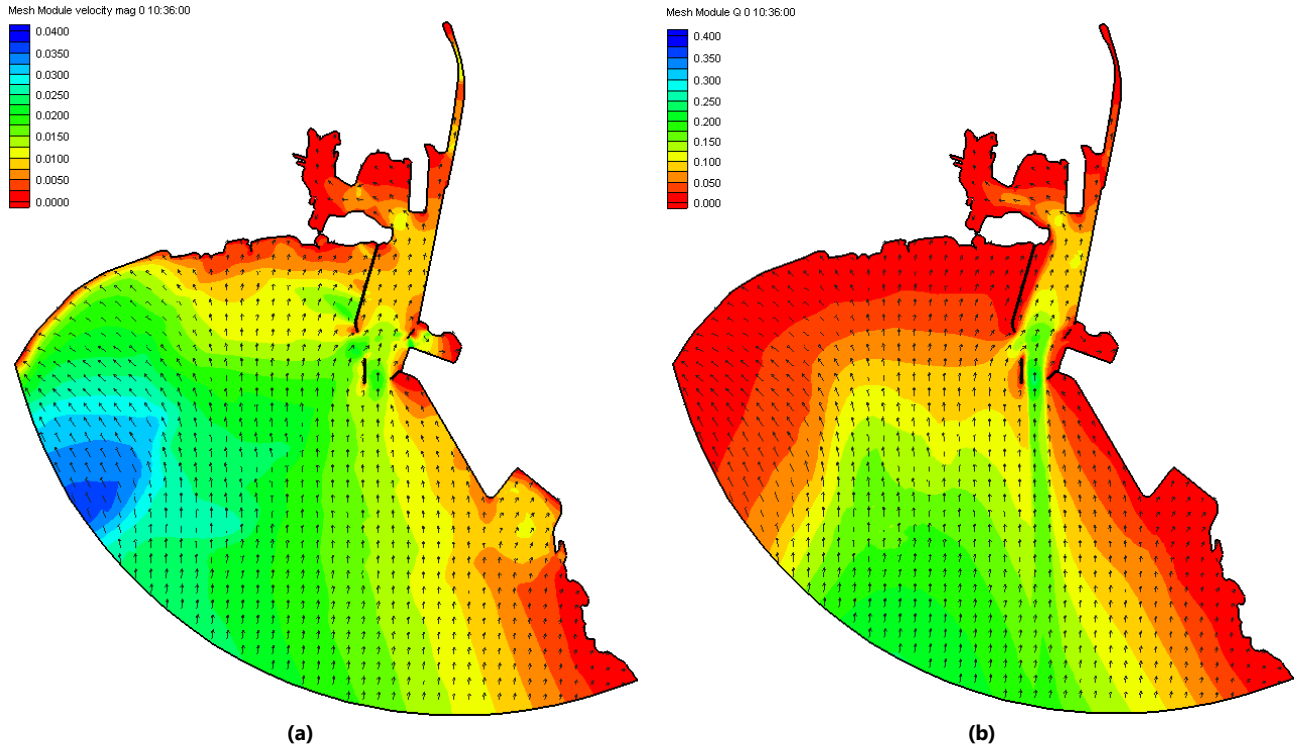


Figura 3.16 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 10.5 h (afflusso)

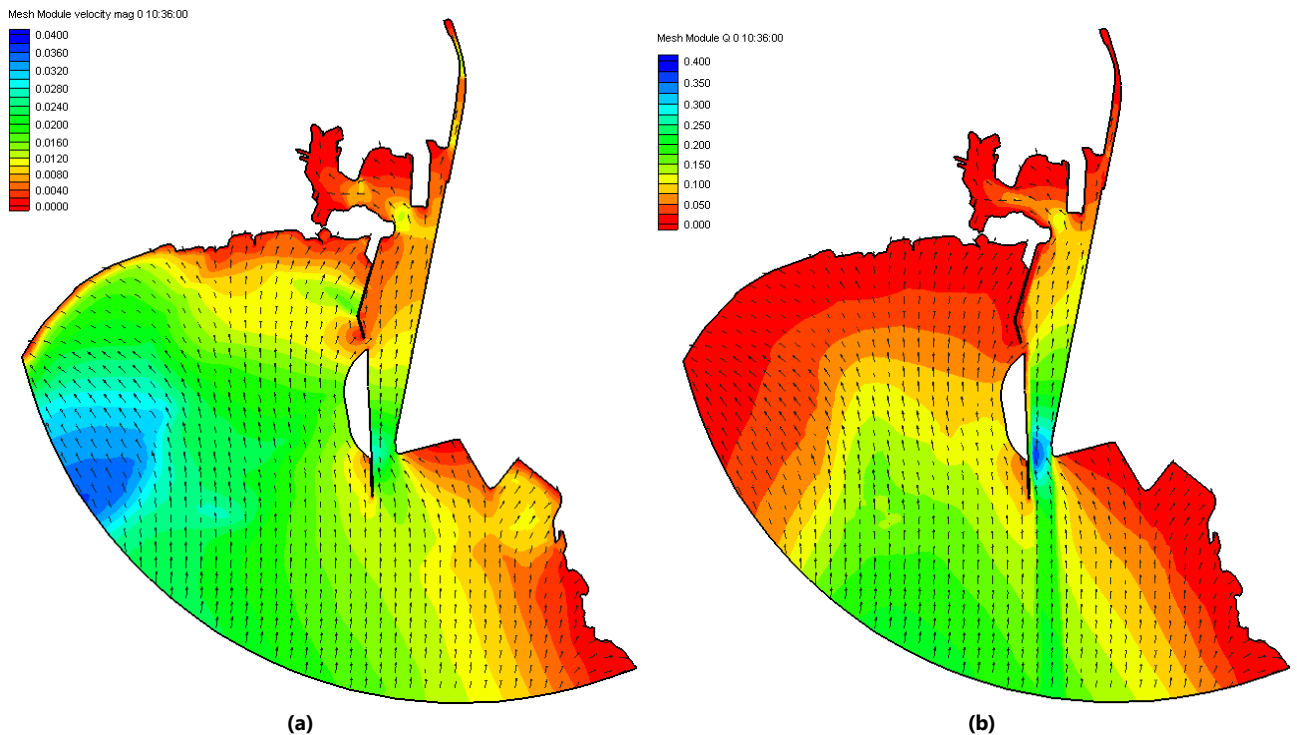


Figura 3.17 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 10.5 h (afflusso)

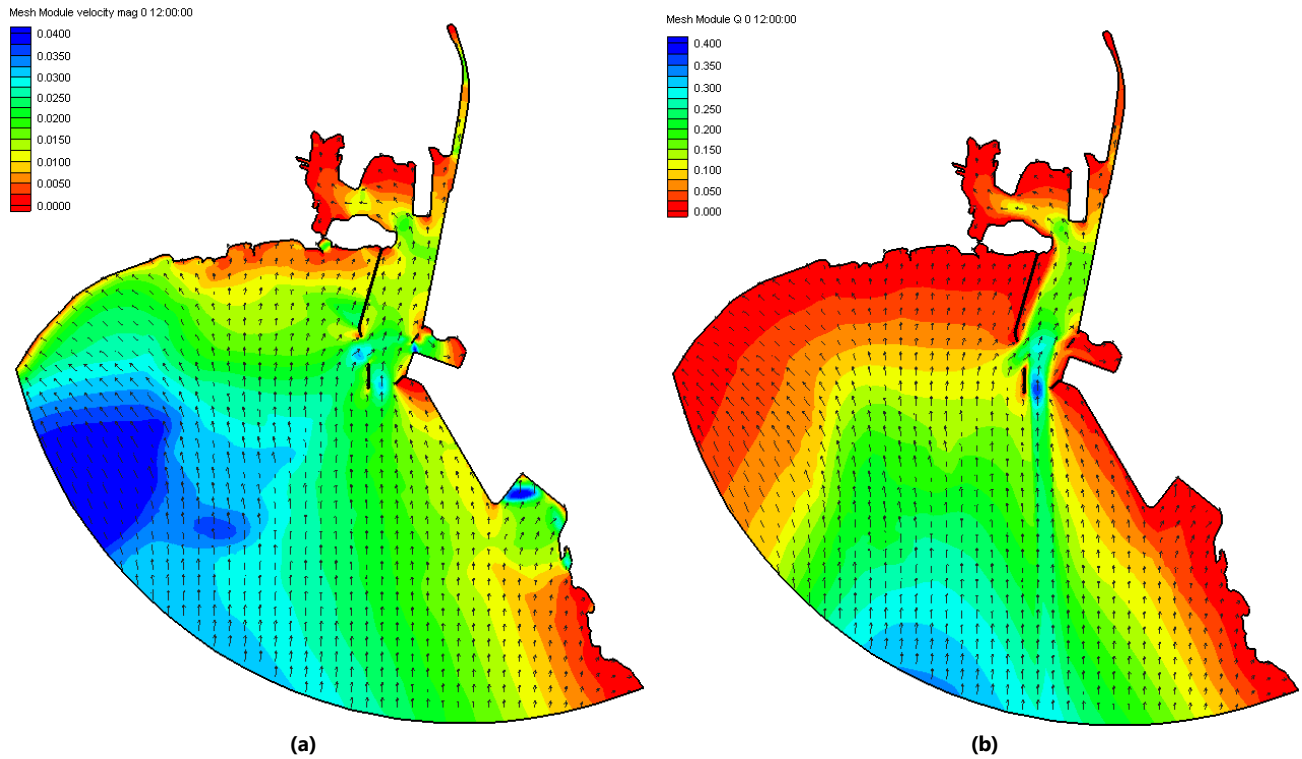


Figura 3.18 - Situazione estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 12.0$  h (massimo afflusso)

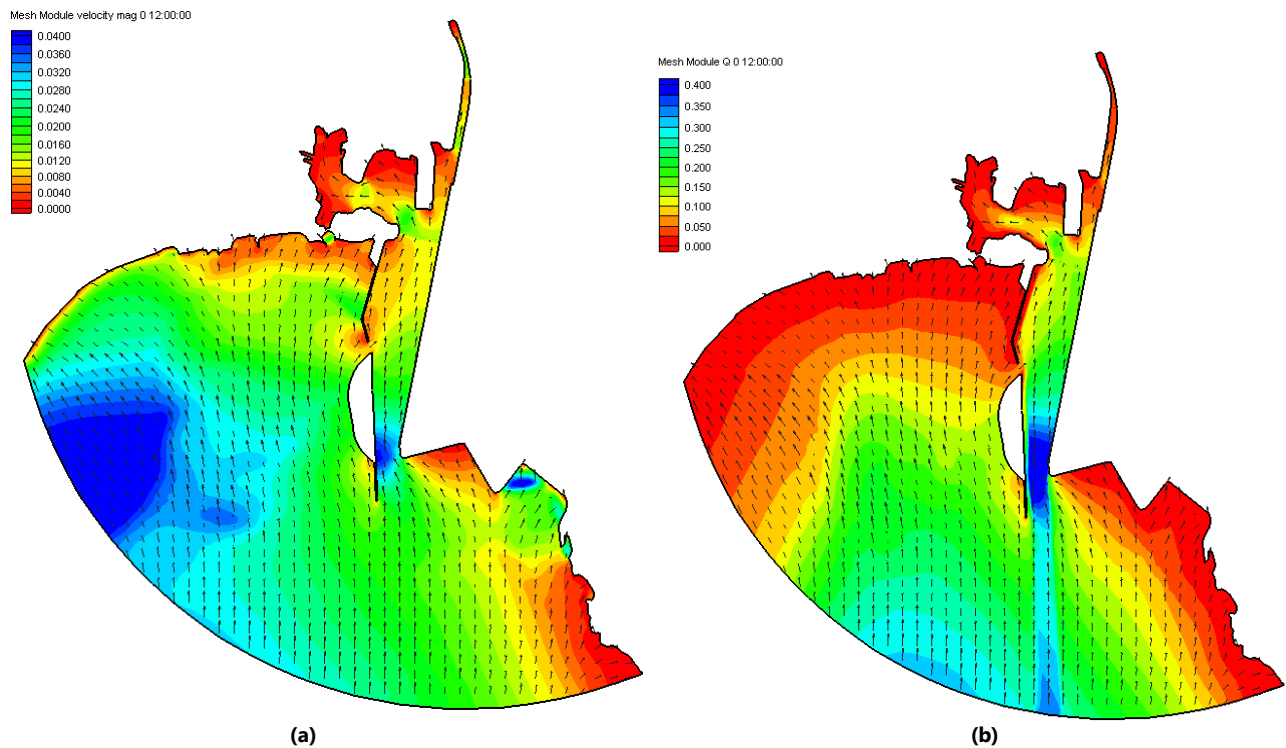


Figura 3.19 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 12.0$  h (massimo afflusso)

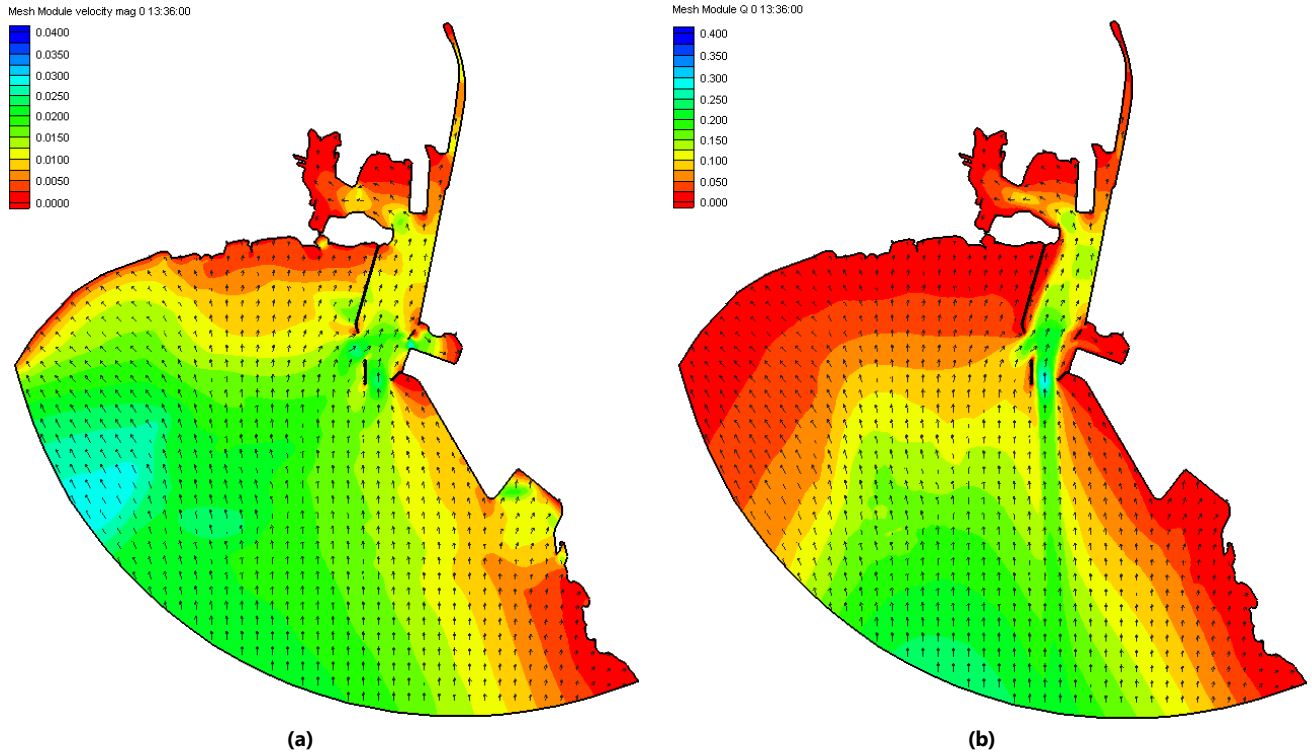


Figura 3.20 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 13.5 h (afflusso)

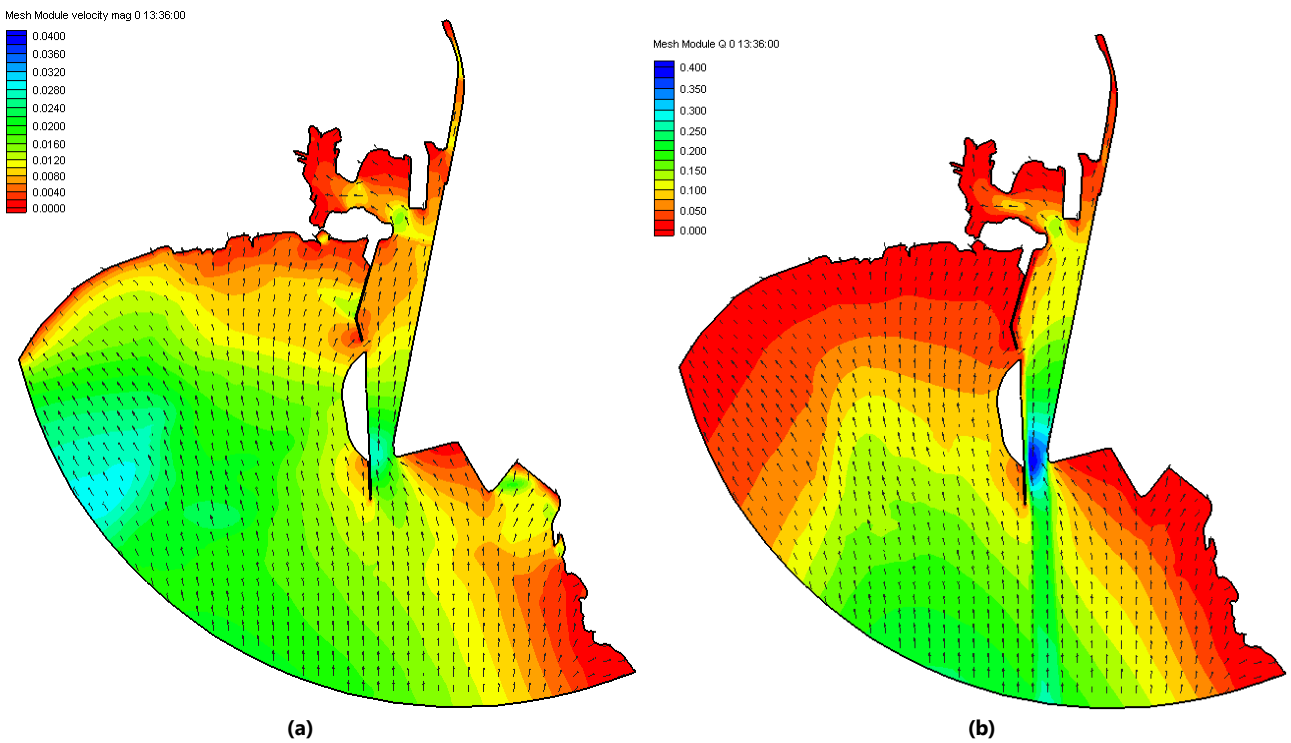


Figura 3.21 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 13.5 h (afflusso)

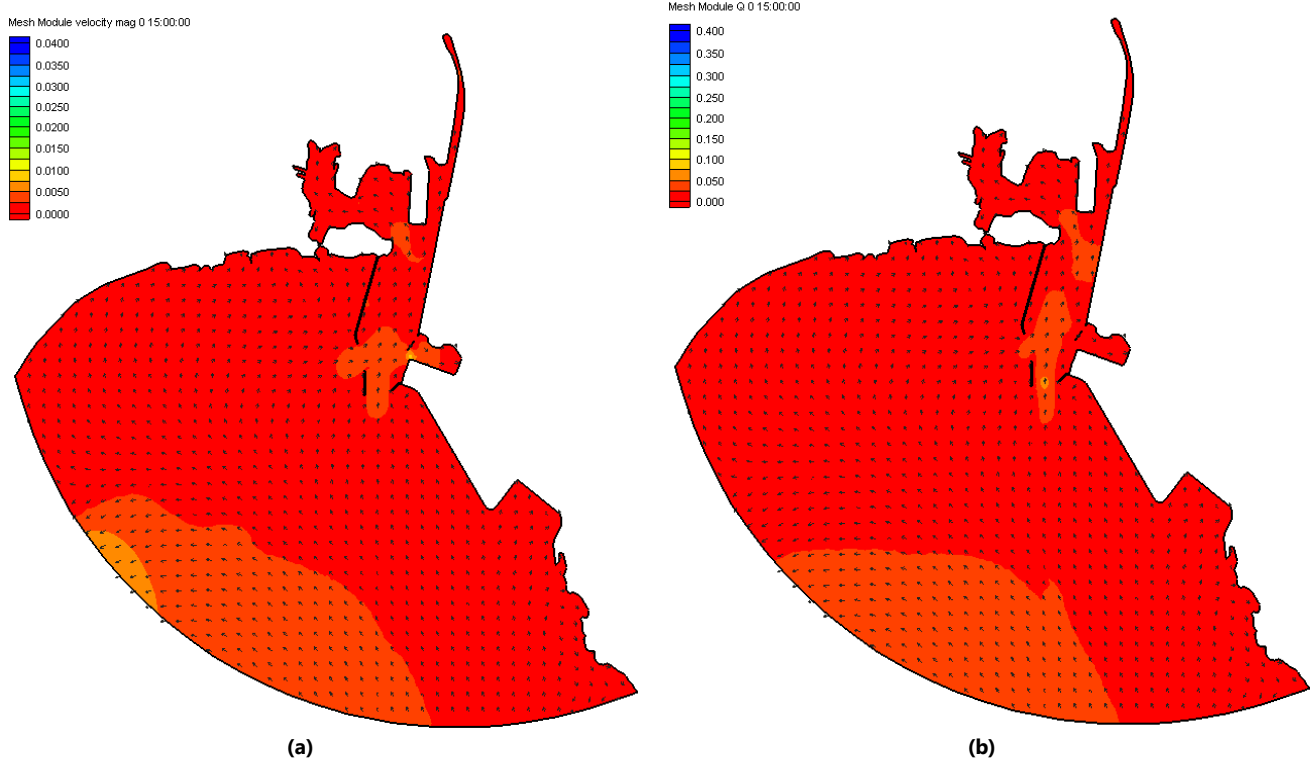


Figura 3.22 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 15.0 h (massima marea)

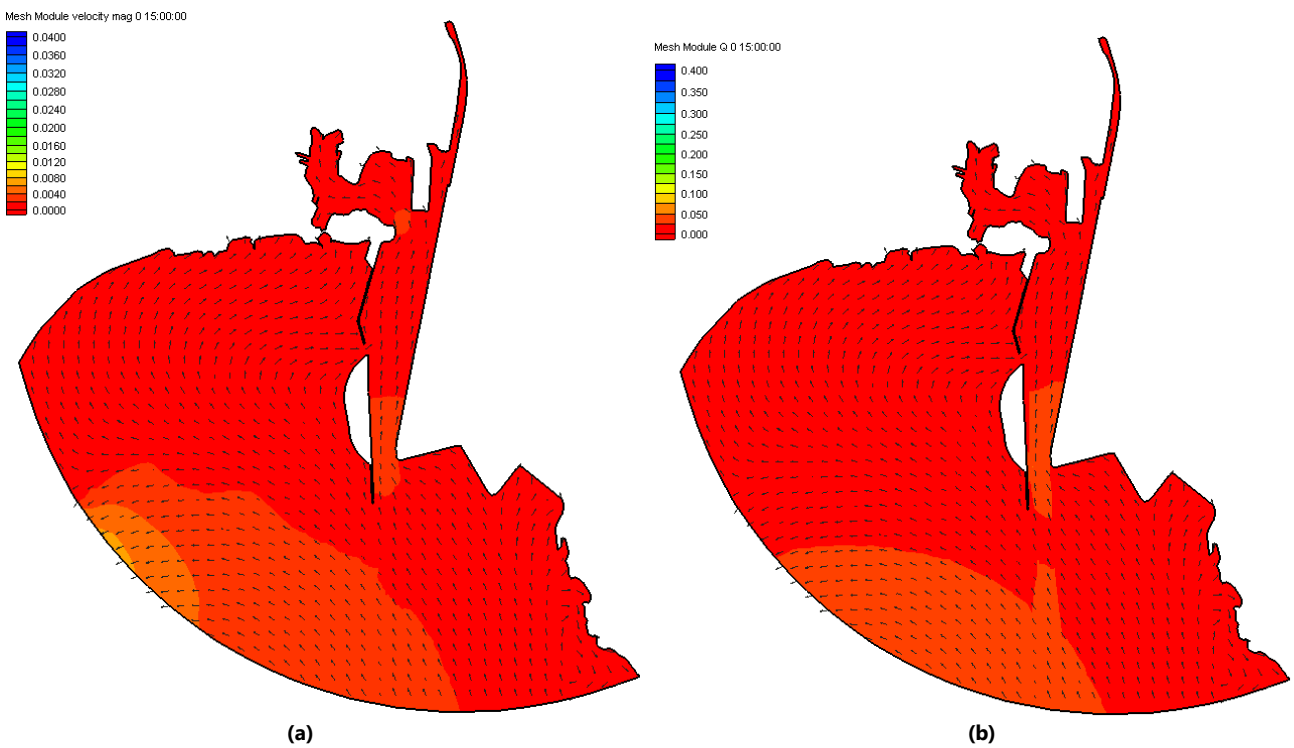


Figura 3.23 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) - t = 15.0 h (massima marea)

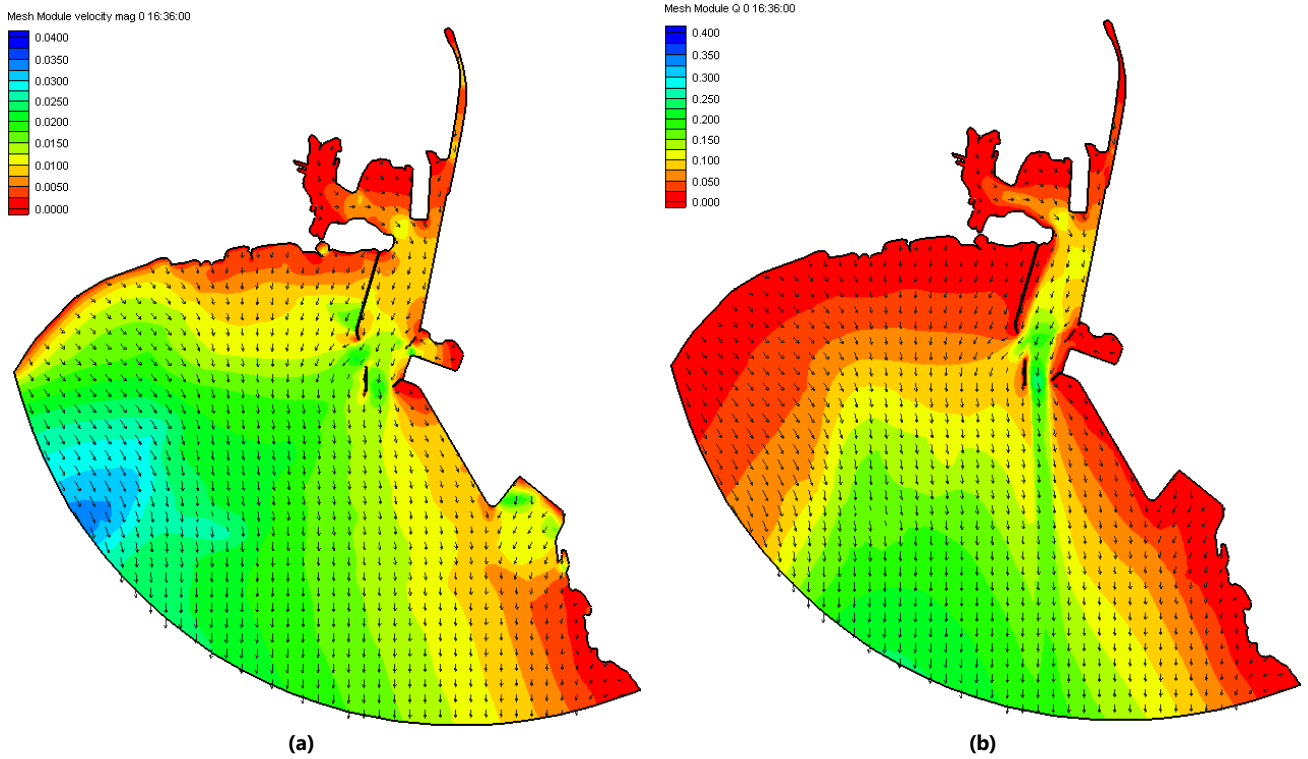


Figura 3.24 - Attuale estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 16.5$  h (inizio deflusso)

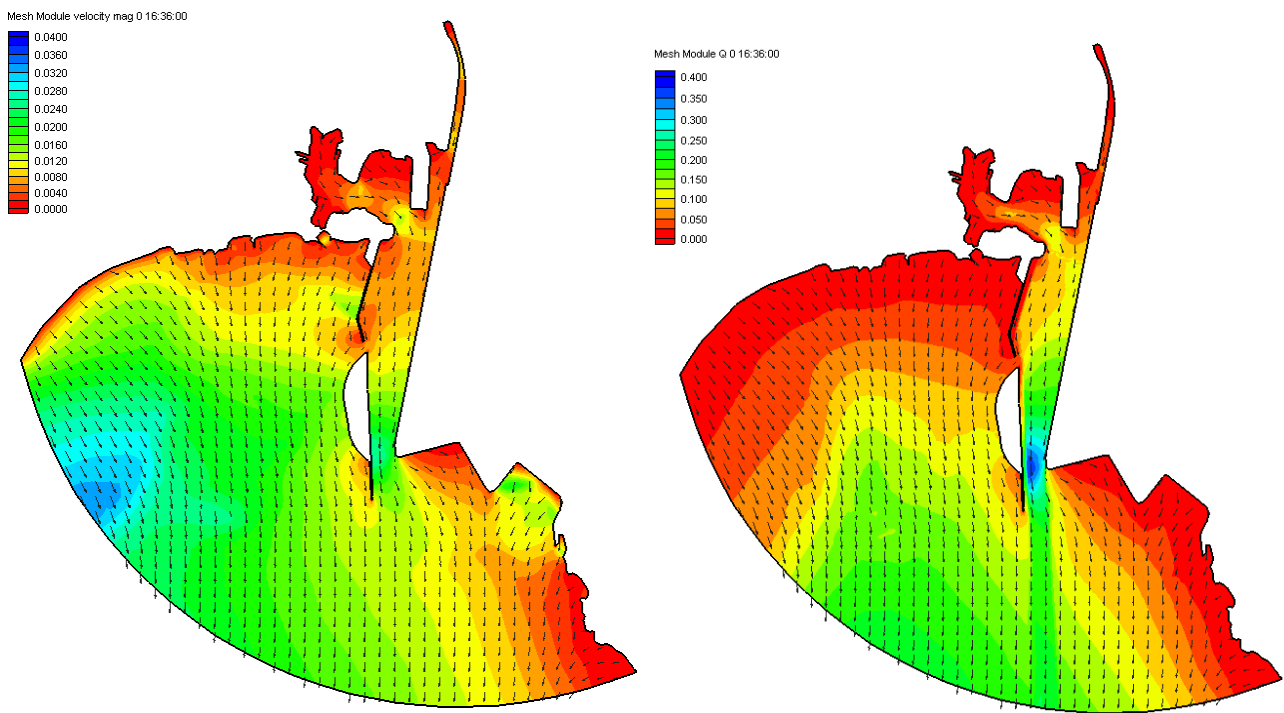


Figura 3.25 - Progetto estesa - campo della velocità (a) e della portata unitaria (b) -  $t = 16.5$  h (inizio deflusso)

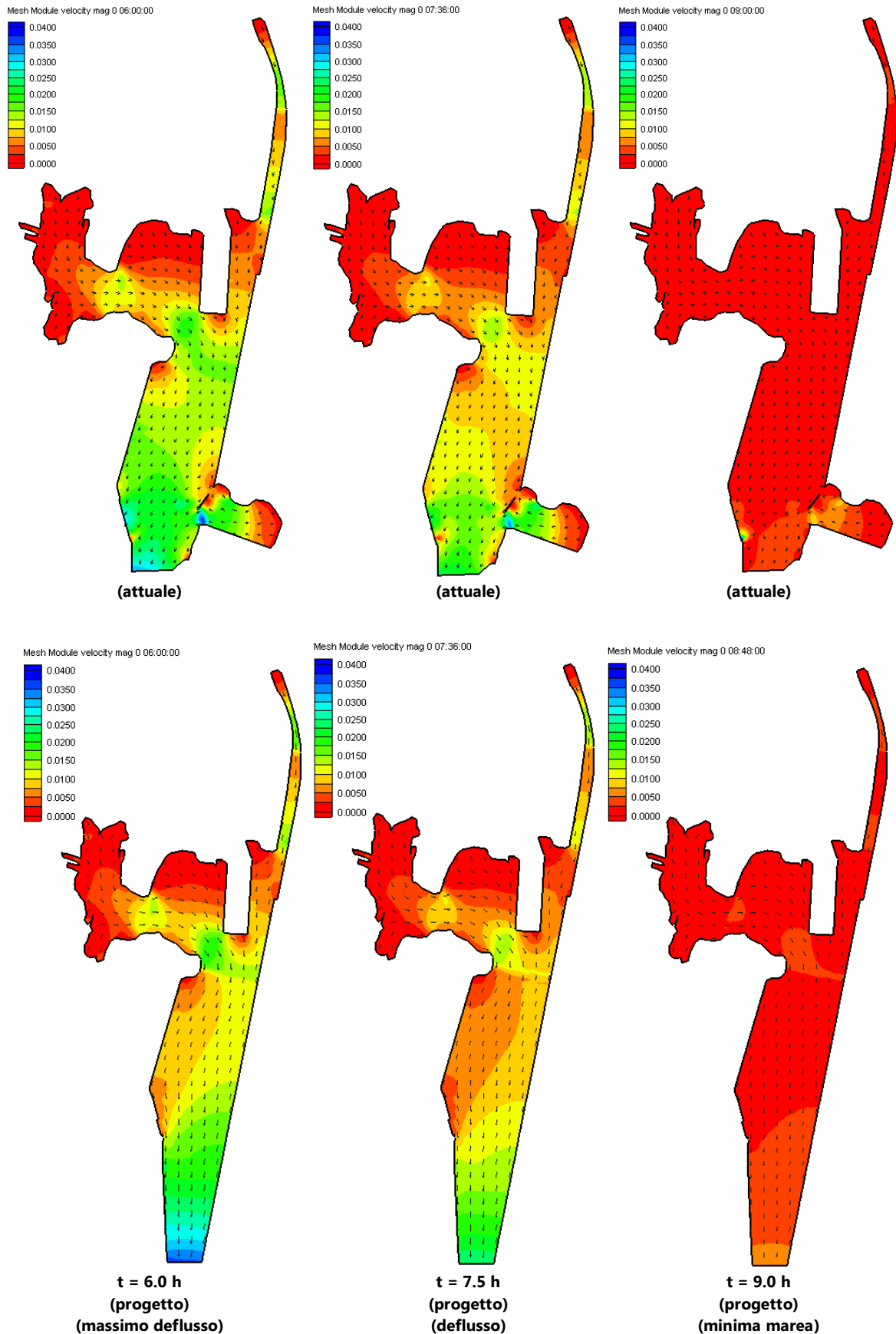


Figura 3.26 - Attuale e progetto - ridotta - campo della velocità

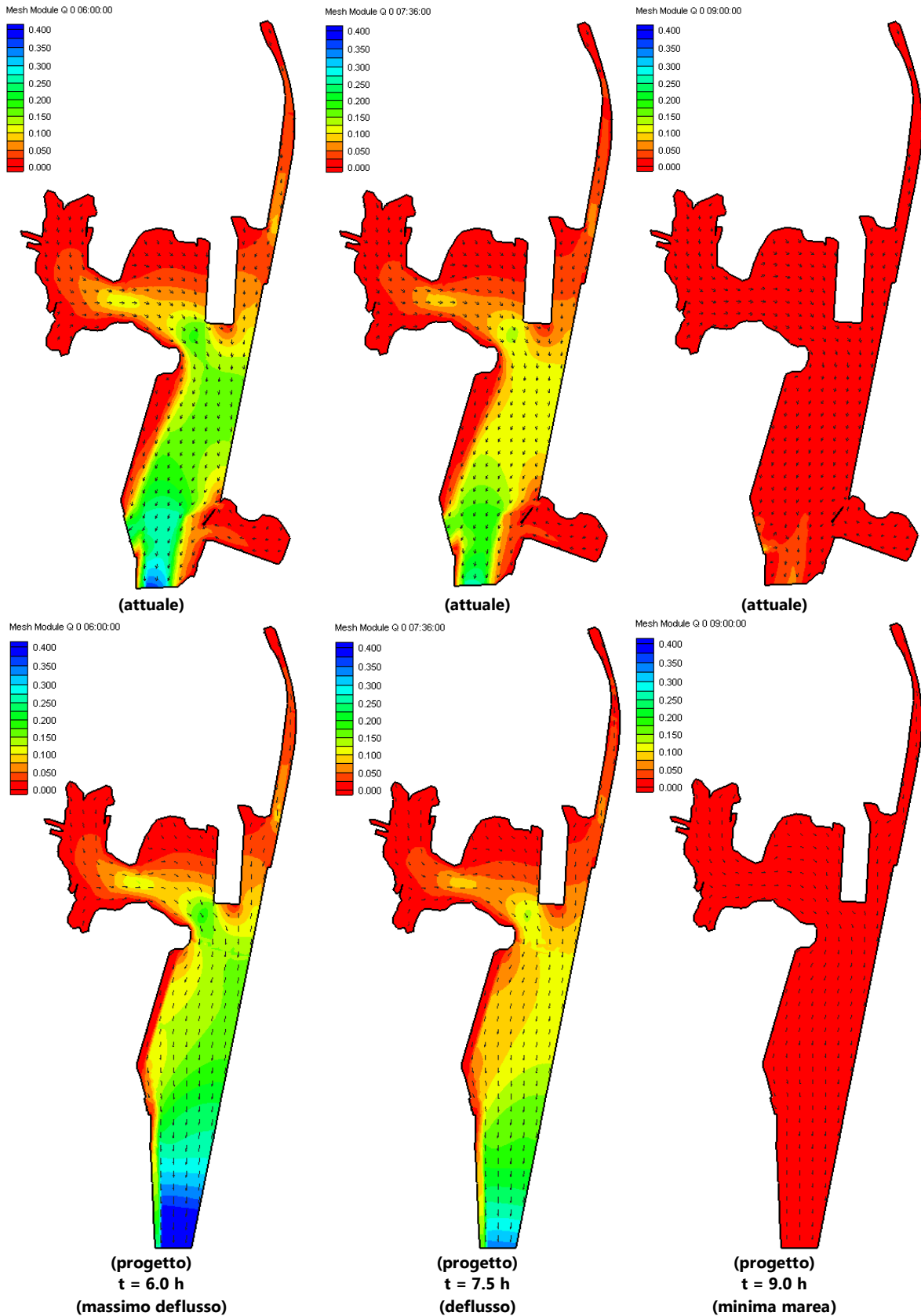


Figura 3.27 - Attuale e progetto - ridotta - campo della portata unitaria ( $m^3/s$  per m)



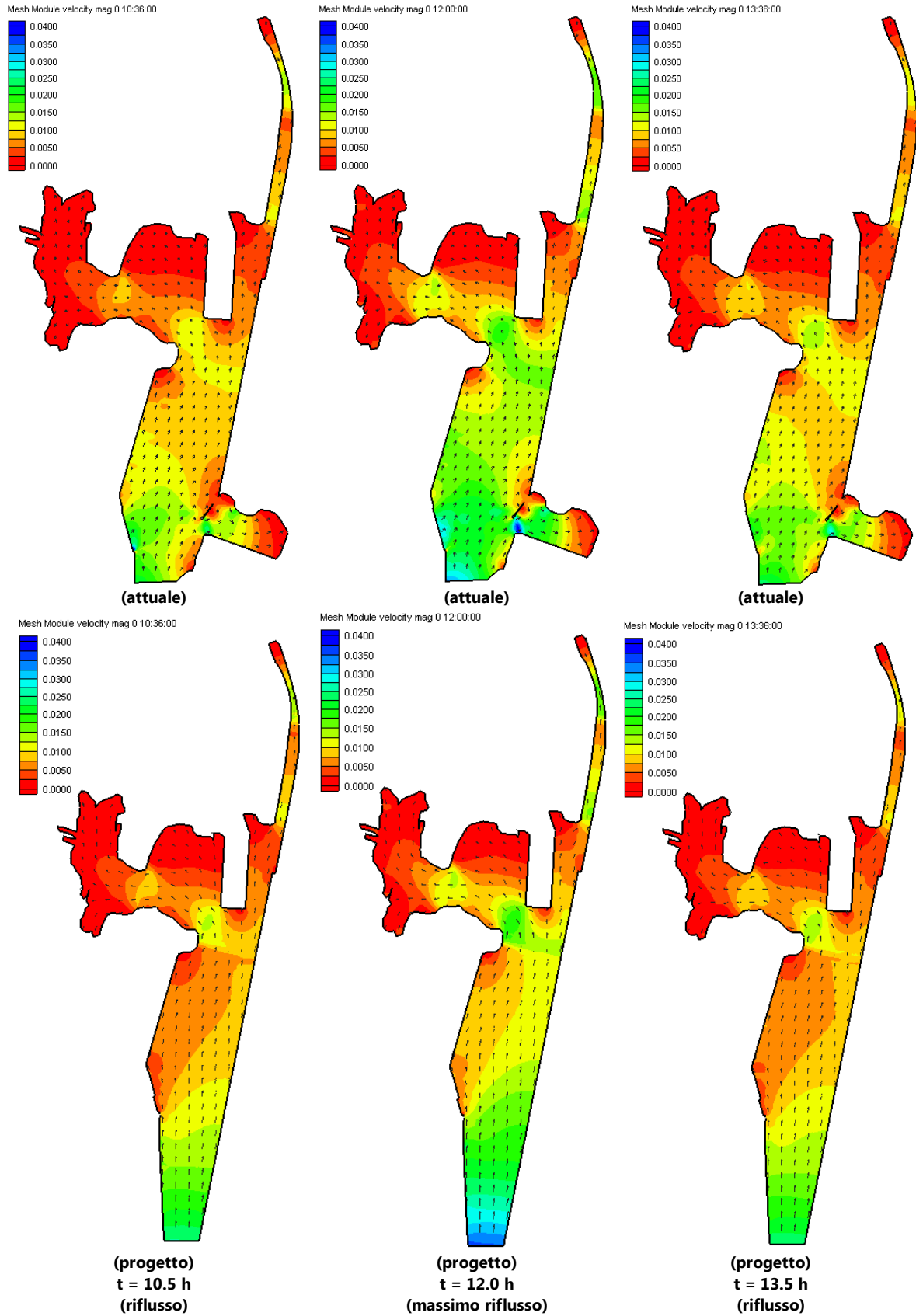


Figura 3.28 - Attuale e progetto - campo della velocità



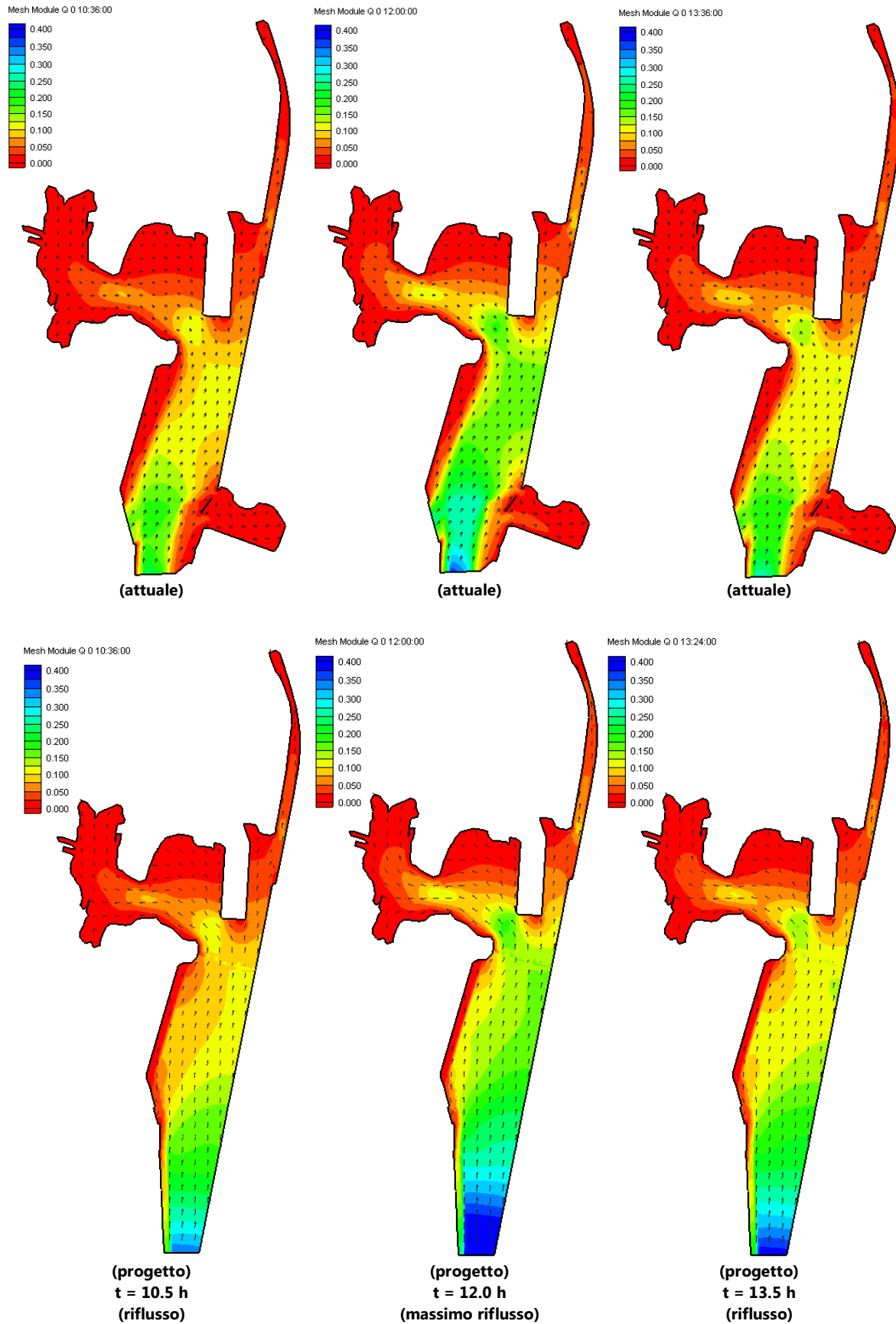
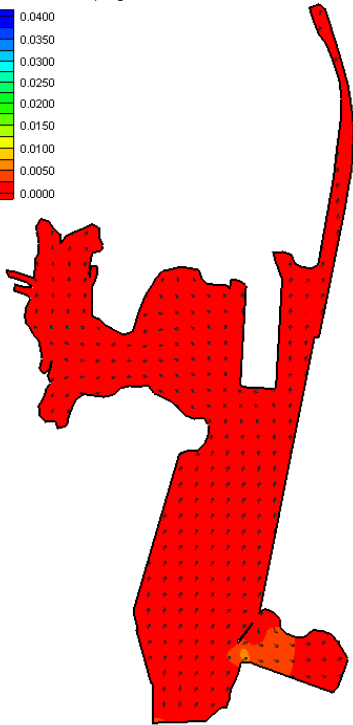
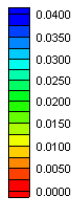


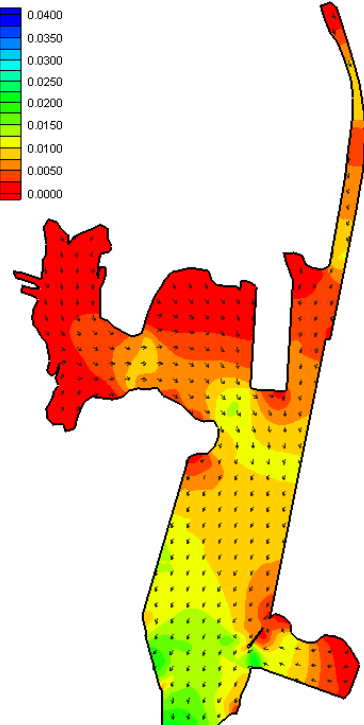
Figura 3.29 - Attuale e Progetto - ridotta - campo della portata unitaria ( $m^3/s/m$ )

Mesh Module velocity mag 0 15:00:00



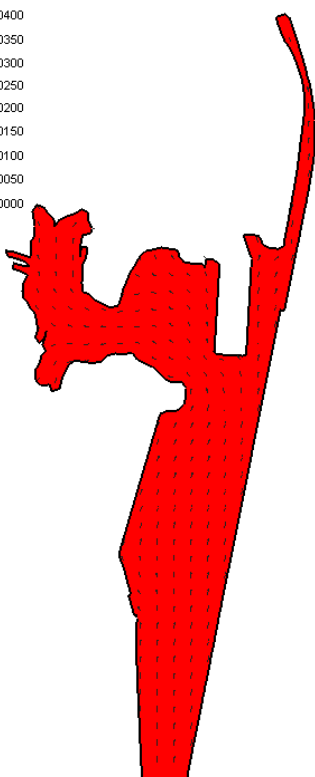
(attuale)

Mesh Module velocity mag 0 16:36:00



(attuale)

Mesh Module velocity mag 0 15:00:00

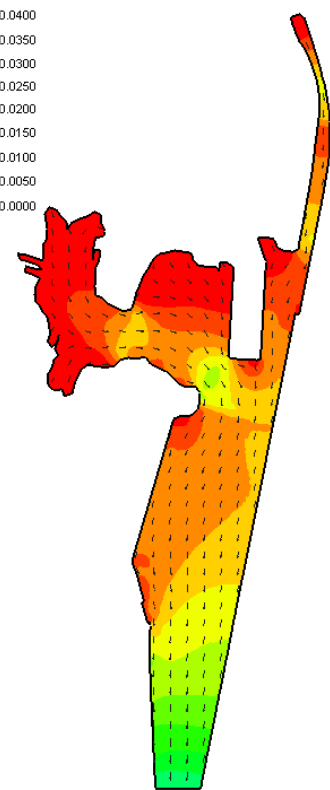


(progetto)

t = 15.0 h

(massima marea)

Mesh Module velocity mag 0 16:36:00



(progetto)

t = 16.5 h

(deflusso)

Figura 3.30 - Attuale e progetto ridotto - campo della velocità

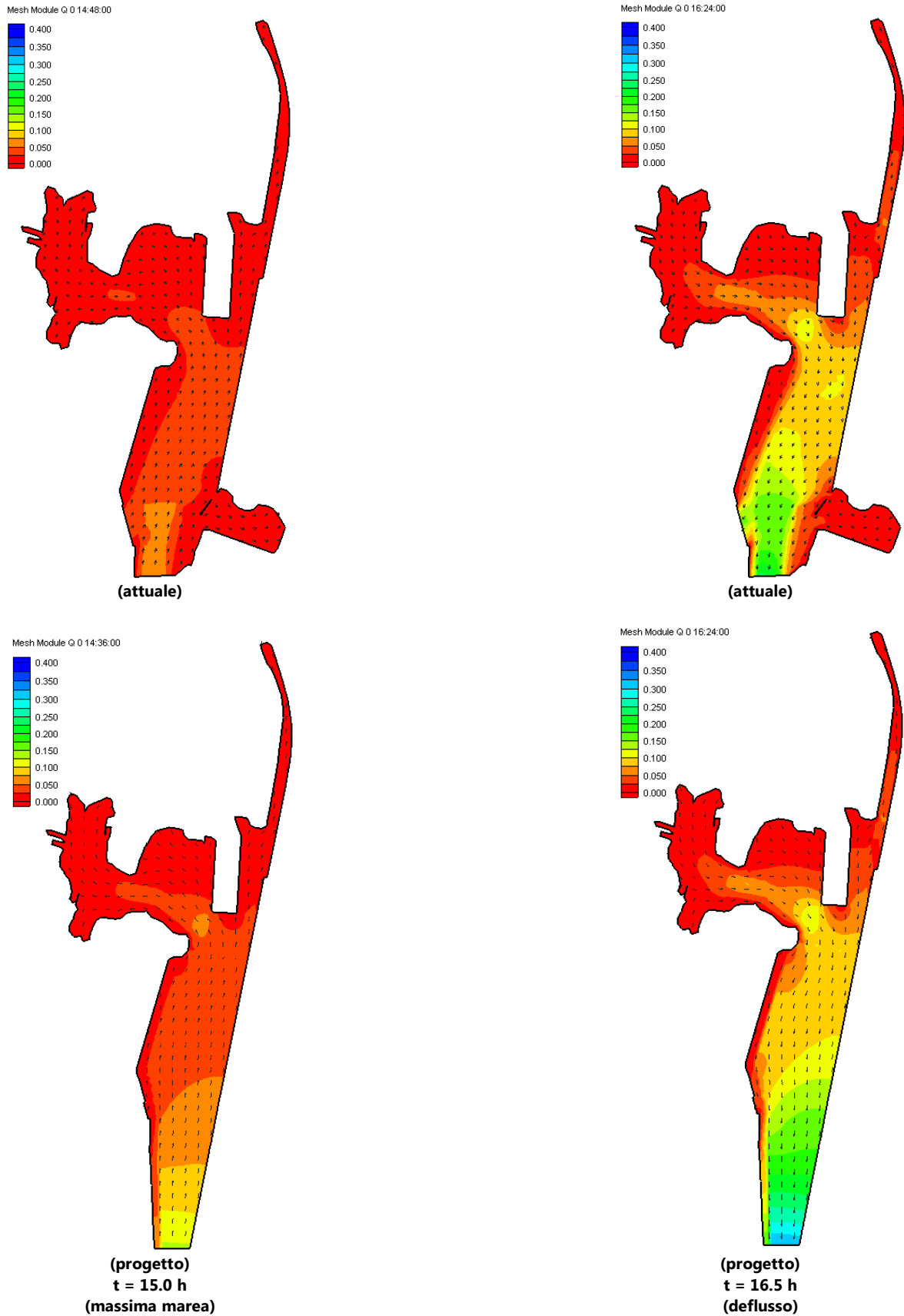


Figura 3.31 - Situazione ridotta - campo della portata unitaria ( $m^3/s$  per m)

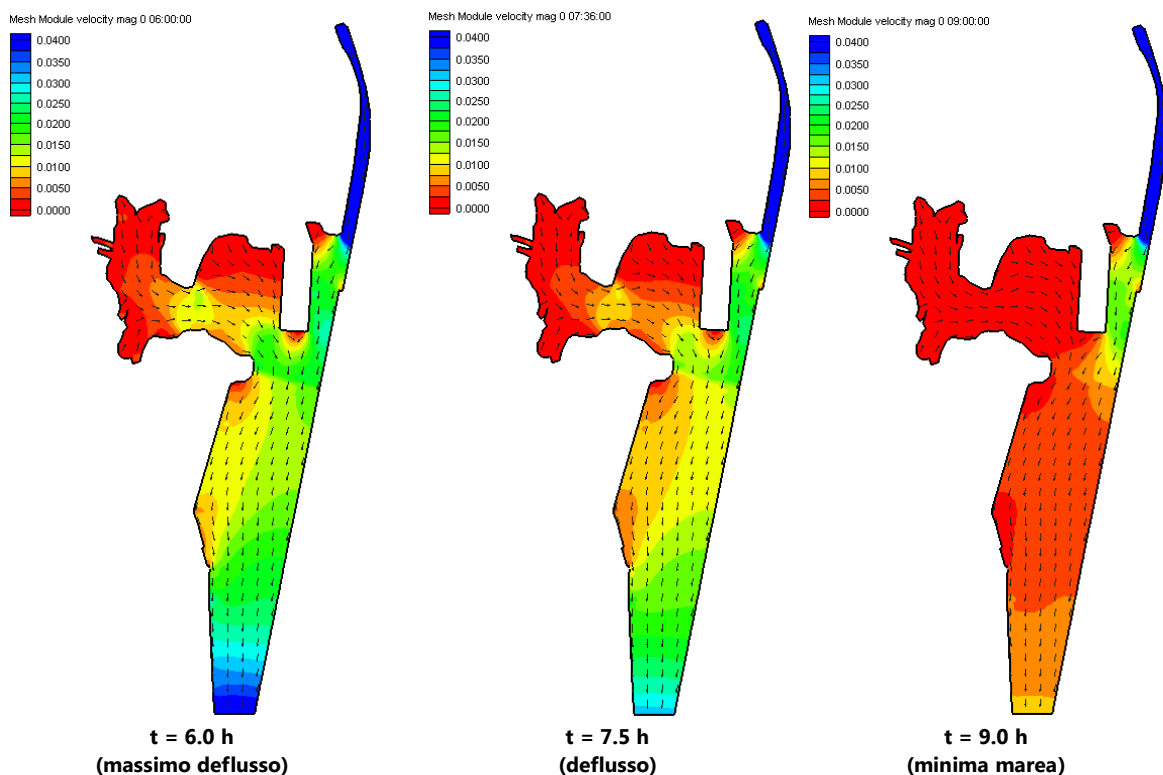
### 3.4.2 Scenari con la portata proveniente dal canale De Dottori

Nei scenari seguenti vengono riportati i risultati delle simulazioni idrodinamiche che riguardano la configurazione portuale di PRP con il campo indotto dalla componente di marea e dall'immissione della portata idrica proveniente dal canale De Dottori nella configurazione ridotta.

Dalle simulazioni effettuate si evidenzia che:

1. Le velocità idriche risultano generalmente superiori a quelle relative alla situazione senza immissione di portata in particolar modo nella fase di reflusso (dell'ordine di qualche centimetro al secondo).
2. la darsena interna che prosegue il canale è discretamente vivicata, mentre quella interna sembra non risentire dell'effetto benefico dovuto all'immissione di portata.

Nelle figure seguenti sono riportati i campi di velocità fotografati nelle varie fasi di marea (ogni 1.5 h per ciclo di marea).



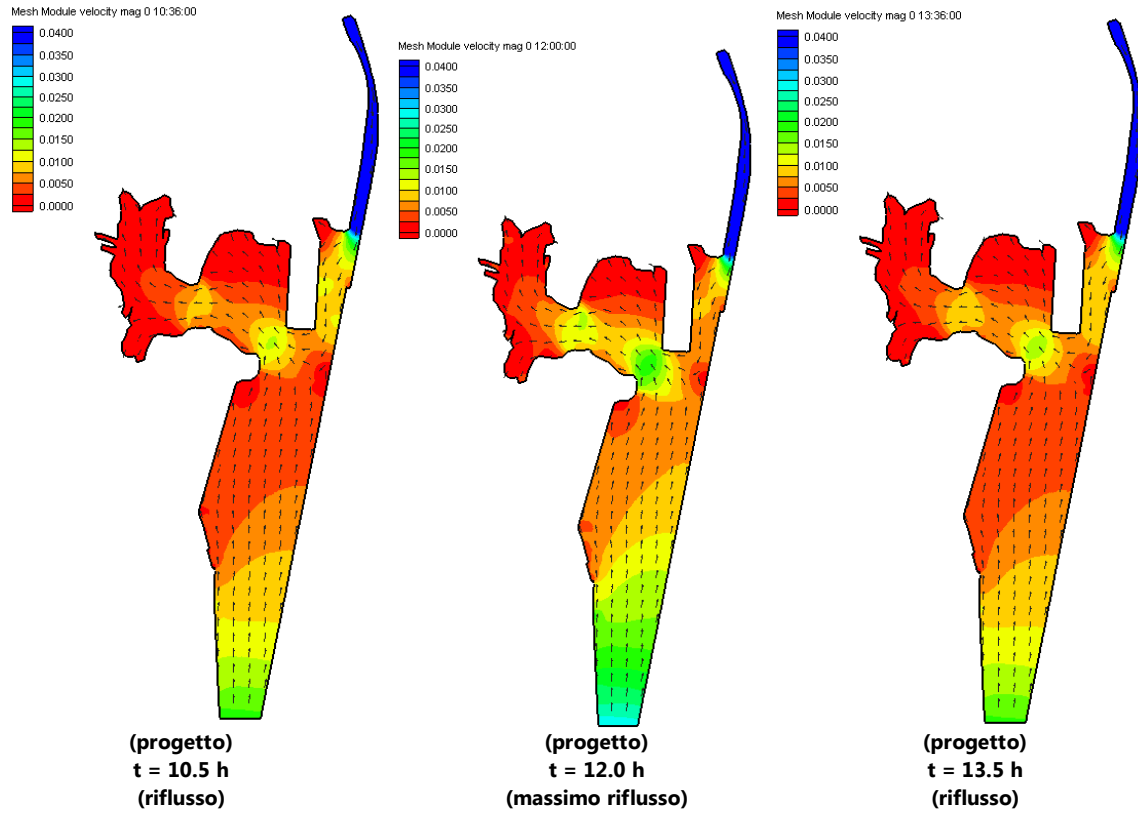


Figura 3.32 - Progetto - ridotta - campo delle velocità (m/s)

## 4 VERIFICA DELLA QUALITÀ DELLE ACQUE INVASATE

La qualità delle acque invasate nel bacino portuale può deteriorarsi per molteplici ragioni. In particolare lo stato di relativa quiete in cui si trova l'acqua all'interno di un bacino chiuso favorisce i processi di sedimentazione anche di sostanze organiche con accumuli di fango che, diventando in fasi successive più leggero per effetto delle fermentazioni anaerobiche, è spesso trascinato in superficie con conseguenze sgradevoli.

Anche la presenza di sostanze oleose e/o schiume in sospensione, oltre a dare un aspetto antiestetico allo specchio liquido, limita alquanto gli scambi di ossigeno con l'atmosfera. L'insieme di questi fattori può comportare in condizioni estreme, l'alterazione dell'equilibrio biologico naturale e chimico-fisico dell'acqua, e può causare inconvenienti non trascurabili per i fruitori del marina (cattivi odori, posa di schiume, micro alghe ed oli lungo le fasce di galleggiamento dei natanti, aspetto sgradevole dello specchio acqueo).

Il problema della qualità dell'acqua invasata in un bacino chiuso si può ricondurre a verificare :

- il grado di ricambio idrico con il mare aperto, utilizzando il metodo del Flushing exchange coefficient - E
- che la concentrazione dell'ossigeno disciolto DO (mg/l) assuma valori al di sopra di opportuni valori limite.

## 4.1 Verifica del Flushing exchange coefficient –E

Per verificare il grado di ricambio idrico in un bacino, occorre fare riferimento al parametro “Flushing exchange coefficient – E”, definito come:

$$E = 1 - \left( \frac{C_i}{C_o} \right)^{1/n}$$

dove, immaginando di riempire il bacino con un inquinante “marker” avente una concentrazione iniziale pari a  $C_o$ , si verifica dopo  $n$  cicli di marea (almeno quattro e nel caso in esame 20) l’entità e la distribuzione della concentrazione ( $C_i$ ) del “marker” rimanente nel bacino e quindi di  $E$  (mediata in un ciclo completo di marea). La letteratura scientifica ritiene che per garantire un buon ricambio idrico il valore di  $E$  dovrebbe essere maggiore di 0.20.

Per effettuare tale simulazione è stato utilizzato il programma agli elementi finiti di trasporto dei costituenti, mediato sulla profondità, RMA4, imponendo come concentrazione iniziale  $C_o = 100$ . I risultati delle condizioni idrodinamiche definiti con la serie di simulazioni condotte tramite il modello RMA2 sono stati utilizzati per simulare la variazione della concentrazione del “marker”.

### 4.1.1 Scenario con la sola escursione di marea

Le simulazioni condotte riferendosi ai due distinti scenari (situazione attuale e di PRP) confermano che la concentrazione media del marker:

1. nell'intera area portuale in 240 h raggiunge il 65% ( $E = 2.0\%$ ) per la configurazione attuale e il 63% per quella di PRP ( $E = 2.2\%$ ).
2. nella area compresa tra l'imboccatura principale e le darsene in 48 h è dell'ordine del 79% ( $E = 5.7\%$ ) per la situazione attuale e del 72% ( $E=7.9\%$ ) per quella di PRP
3. nelle due darsene separate dal pontile .... in 240h siamo sull'ordine del 80% ( $E = 1.0\%$ ) nella situazione attuale e del 85% ( $E = 0.9\%$ )
4. in 240h nella darsena intera è dell'ordine del 95% e del 96% rispettivamente nella situazione attuale ed in quella di PRP.

Dall'analisi del ricambio idrico emerge che l'effetto della marea si esaurisce a breve distanza dalle imboccature portuali e non vi è sostanziale differenza tra la situazione attuale e quella di PRP.

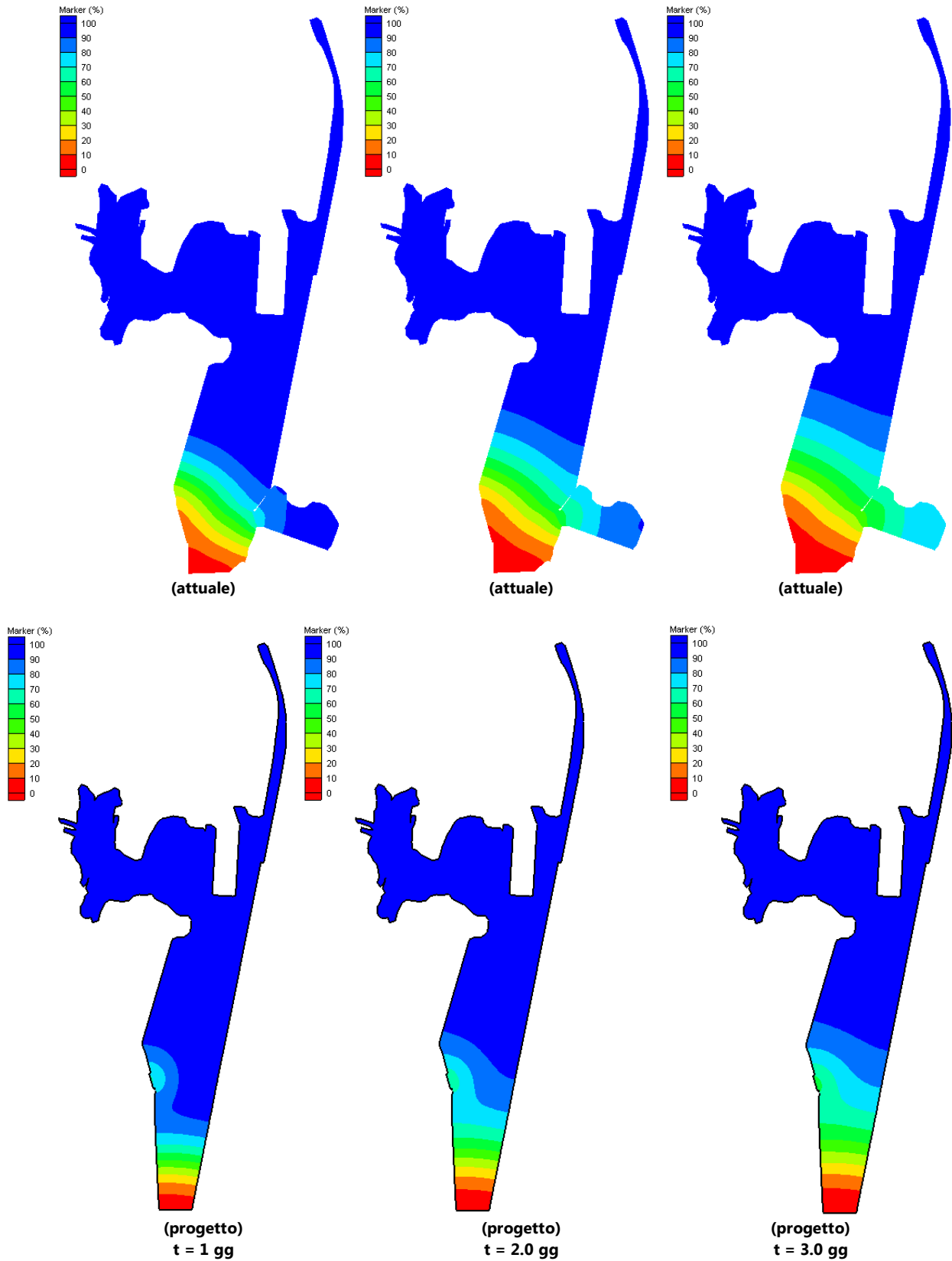


Figura 4.1 - Attuale e progetto - Concentrazione del "marker" nei vari giorni



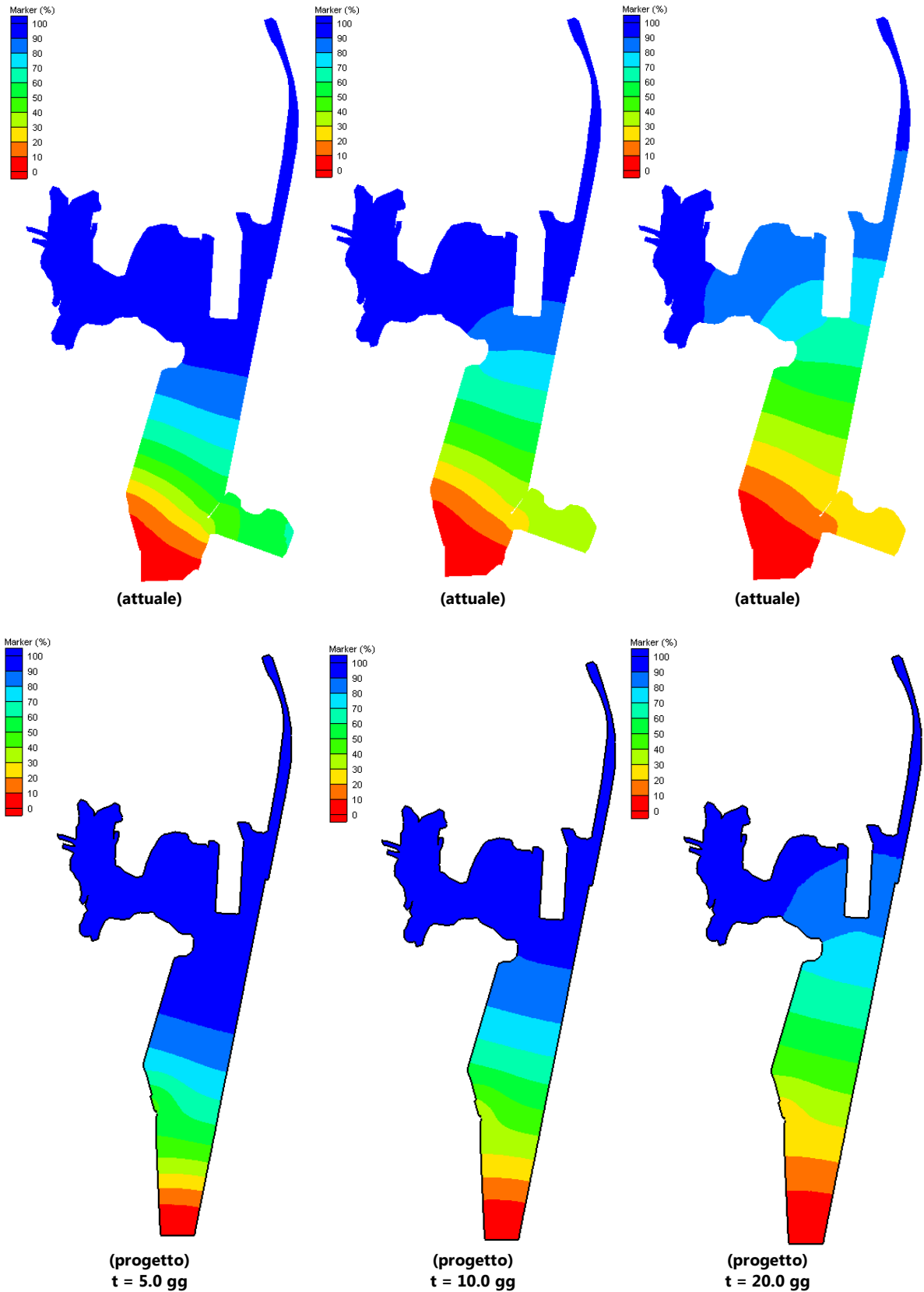


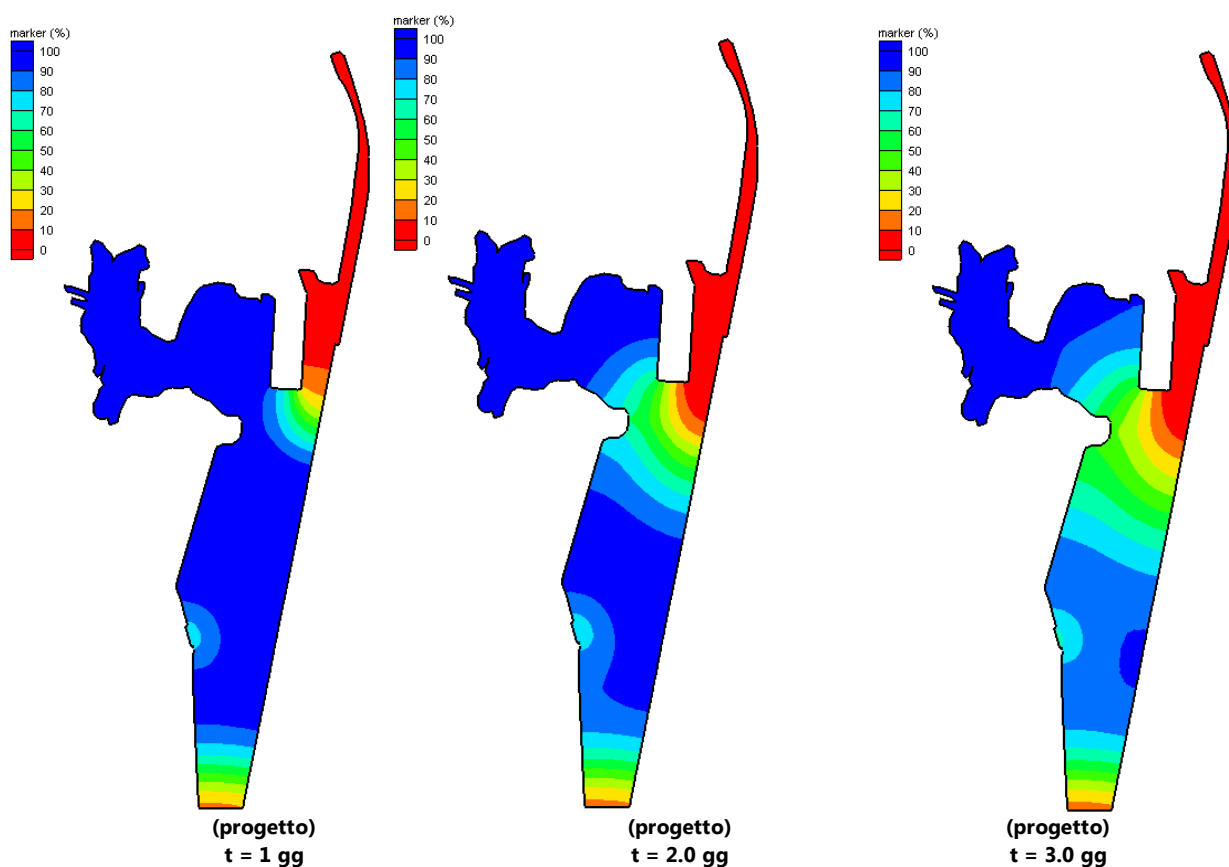
Figura 4.2 - Attuale e progetto - Concentrazione del "marker" nei vari giorni

#### 4.1.2 Scenario con immissione di portata dal canale De Dottori

Le simulazioni condotte riferendosi al solo scenario di PRP con l'immissione continua di 21.5 m<sup>3</sup>/s di acqua proveniente dal canale DE Dottori mostrano che la concentrazione media del marker:

1. nell'intera area portuale in 48 h raggiunge il 70% (E = 9.0%) in 240 h il 24% ed in 480 h il 13%.
2. nella area compresa tra l'imboccatura principale e le darsene in 240 h è dell'ordine del 15% (E = 9.0%)
3. nelle due darsene separate dal pontile Fincantieri in 240h siamo sull'ordine del 25% (E = 7.0 %
4. in 240h nella darsena intera è dell'ordine del 82%.

Dall'analisi del ricambio idrico emerge che l'immissione del canale, anche se non garantisce i buoni livelli di confort previsti in letteratura, sicuramente permette un ricambio idrico accettabile



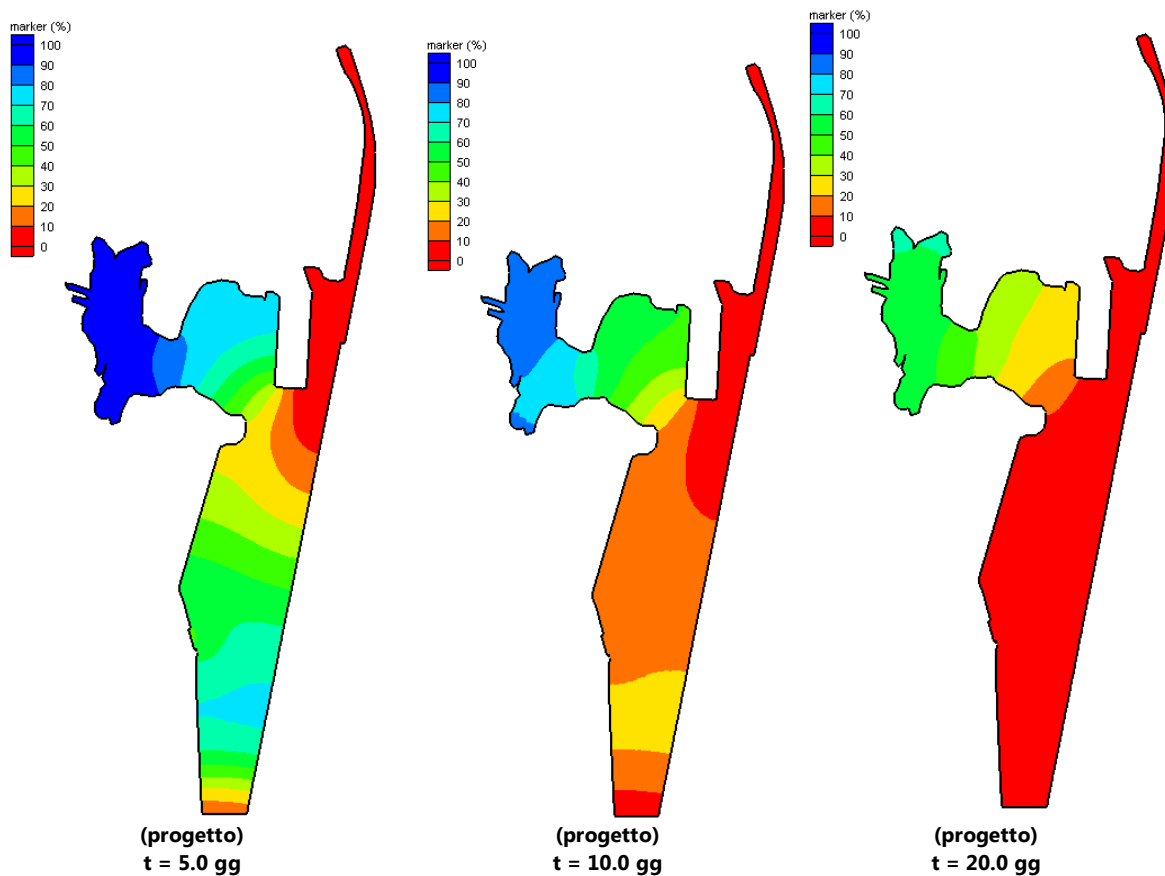


Figura 4.3 - Progetto - Concentrazione del "marker" nei vari giorni

## 4.2 Verifica dell'Ossigeno disciolto (DO - BOD)

La determinazione della concentrazione dell'Ossigeno Disciolto (DO) e contemporaneamente del BOD (Richiesta biochimica di Ossigeno) consente una valida caratterizzazione qualitativa dello "stato di salute" delle acque invasate, anche se non è certo in grado di esprimere i complessi rapporti biologici, chimici e fisici che si instaurano all'interno del corpo d'acqua, per l'analisi dei quali si renderebbe necessario definire altri parametri quali la temperatura, il pH, la carica batterica, le sostanze disciolte e quelle in sospensione.

In generale infatti si osserva che il corpo d'acqua permane in uno stato di "salute", fintanto che in esso si mantiene una concentrazione di ossigeno tale da assicurare la vita e lo sviluppo degli organismi più elevati e più sensibili a carenze di ossigeno (Masotti, 1978). In assenza di fenomeni di inquinamenti significativi, il mare risulta ben ossigenato con valori prossimi alla saturazione. In tale situazione la concentrazione dell'ossigeno dipende dalla temperatura, dalla pressione parziale dell'ossigeno nell'aria e dalla salinità dell'acqua. Considerando una concentrazione dei cloruri di 20 g/l (corrispondente ad una salinità di 35g/l – tipica del mar Mediterraneo), il valore della concentrazione dell'Ossigeno varia tra 6.1 e 11,3 mg/l con temperatura variabile tra 30° C e 0°C ("Wastewater Engineering – Metcalf and Eddy" – 1979).

Studi più specifici condotti sulla qualità delle acque in un bacino portuale indicano come non sia sufficiente garantire elevate concentrazioni di ossigeno ma sia comunque necessario contenere la concentrazione di sostanze inquinanti (organiche e/o minerali) entro opportuni valori di sicurezza.

In particolare in un bacino portuale, l'ossigeno viene consumato dalla attività della flora batterica per metabolizzare la sostanza organica (BOD - Biochemical Oxygen Demand) presente nell'acqua.

La riossigenazione avviene invece sia con lo scambio di Ox con l'atmosfera e sia attraverso l'immissione di acqua carica di Ox attraverso l'imboccatura portuale e/o l'immissione di acqua nel bacino.

Una riduzione della concentrazione di ossigeno sotto valori di 3 mg/l può provocare la morte ed il decadimento delle specie di macro invertebrati e fitoplankton più sensibili incrementando la massa dei fanghi organici ed innescando fenomeni di deterioramento della qualità della massa idrica invasata.

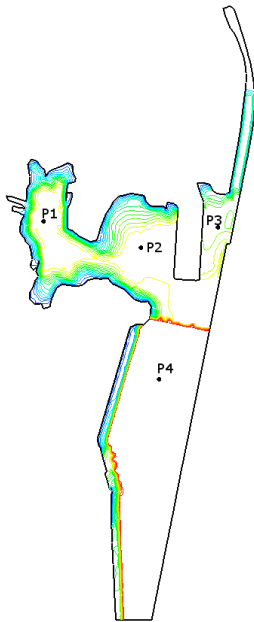
I risultati delle condizioni idrodinamiche definiti con la serie di simulazioni condotte tramite il modello RMA2 sono stati utilizzati per simulare la variazione della concentrazione di ossigeno disciolto e del BOD con il programma RMA4, in grado di simulare l'iterazione del BOD con il DO.

A tal proposito è stata posta una concentrazione dell'Ox iniziale su tutto il bacino pari alla condizione di saturazione in acqua di mare: 6.7 mg/l associata ad una temperatura dell'acqua di 25°C (condizione estremamente cautelativa).

Analogamente si è imposto che l'acqua immessa nel bacino (attraverso le imboccature o il canale) abbia una concentrazione di ossigeno disciolto pari a 6.7 mg/l.

Si è assunto invece un valore iniziale di concentrazione del BOD pari a 5 mg/l diffuso su tutto il bacino portuale, corrispondente alla condizione di un corpo idrico moderatamente inquinato.

Le simulazioni condotte riferendosi ai vari scenari confermano un andamento del DO ed del BOD nel tempo tipico di un processo di metabolizzazione delle sostanze organiche (Streeter e Phelps, 1925). Nelle figure è riportato l'andamento nel tempo del Ox, in punti caratteristici del porto di Monfalcone:



1. Punto P1: darsena interna dove è presente la banchina de Franceschi;
2. Punto P2: darsena esterna presente nel bacino di Ponzano e delimitata ad est dalla banchina Fincantieri
3. Punto P3: darsena esterna, realizzata in prosecuzione del canale De Dottori e delimitata ad Ovest dalla banchina Fincantieri.
4. Punto P4: rappresentativo del canale di accesso alle Darsene.

Dalle figure emerge che:

- Scenario attuale: la concentrazione dell'ossigeno scende al disotto del valore di 3.0 mg/l, in tutte le darsene ad eccezione nella zona del canale di accesso alle banchine Fincantieri.
- Scenario di progetto: non vi sono evidenti variazioni rispetto alla situazione attuale, con bassi livelli di Ossigeno Disciolto nella zona delle darsene.

Figura 4.4 - Ubicazione dei punti rappresentativi

- Scenario di progetto con immissione idrica proveniente dal canale De Dottori: il canale, immettendo acqua nel porto proveniente dall'Isonzo, fornisce l'Ossigeno necessario per la metabolizzazione infatti tutte le darsene presentano valori di DO superiori a 3.0 mg/l anche nelle zone più interne. Nella darsena che prosegue il canale i valori di DO rimane prossimi alla saturazione.

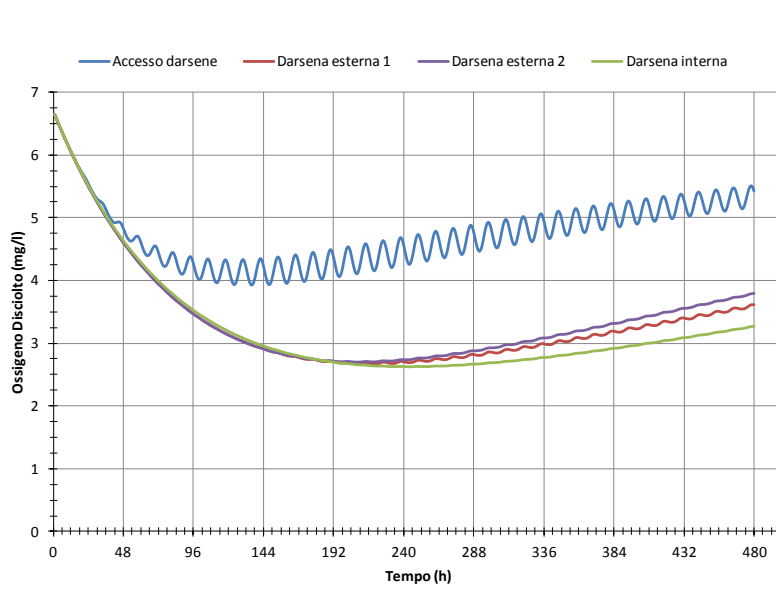


Figura 4.5 - Scenario attuale – Andamento del Ossigeno disciolto con il tempo in 4 punti caratteristici del porto

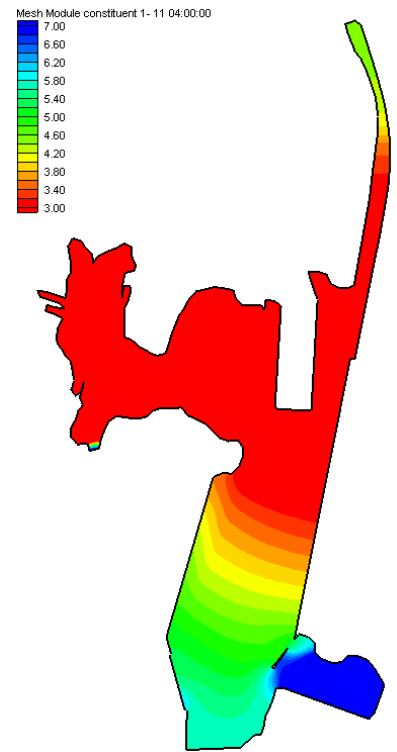


Figura 4.6 - Scenario attuale - Concentrazione Ox Istante con minore valore di Ox

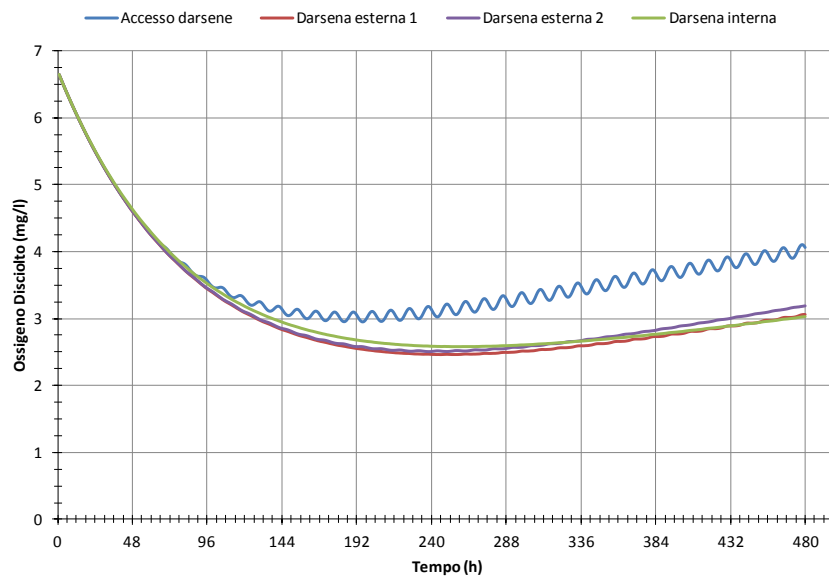


Figura 4.7 - Scenario di progetto – Andamento del Ossigeno disciolto con il tempo in 4 punti caratteristici del porto

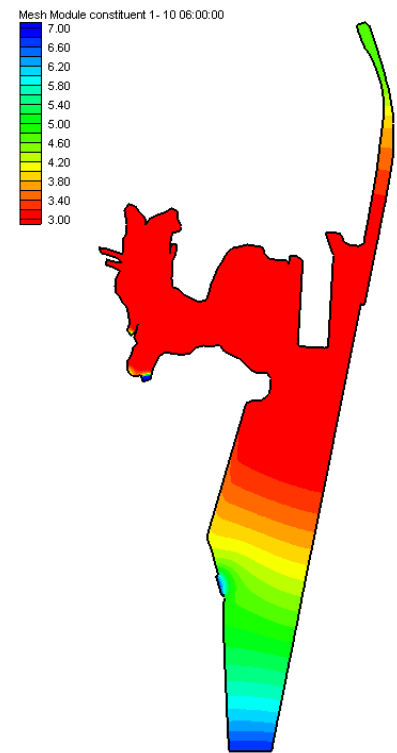


Figura 4.8 - Scenario di progetto - Concentrazione Ox Istante con minore valore di Ox

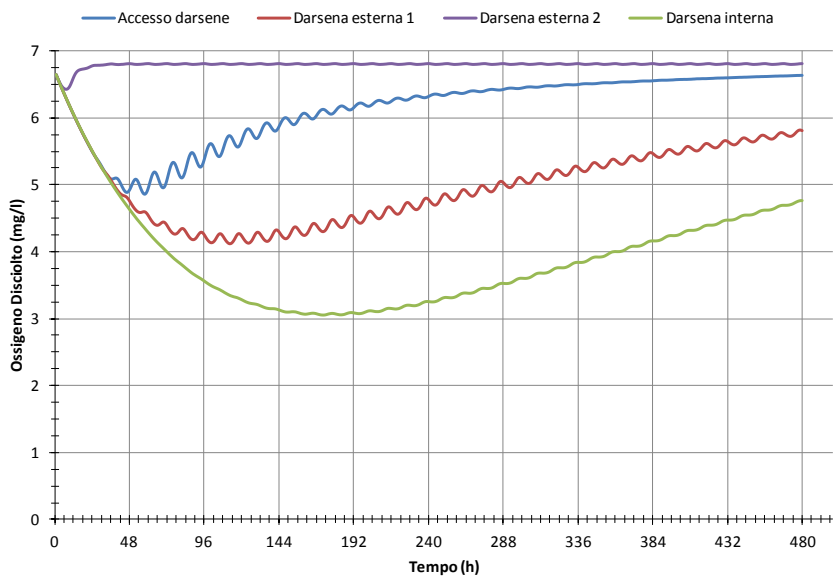


Figura 4.9 - Scenario di progetto con portata dal canale– Andamento del Ossigeno disciolto con il tempo in 4 punti caratteristici del porto

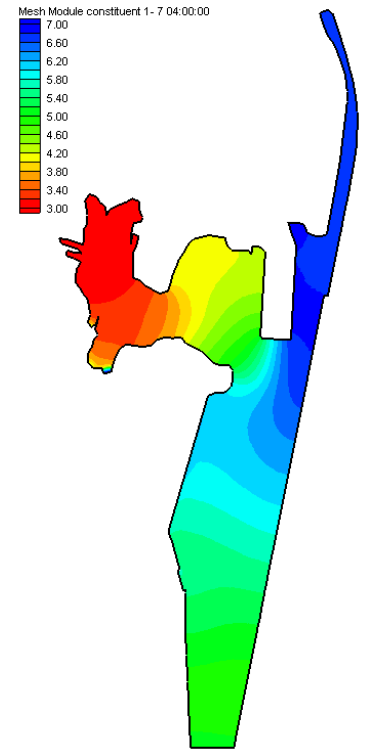


Figura 4.10 - Scenario di progetto - Concentrazione Ox Istante con minore valore di Ox

## 5 CONCLUSIONI

Dall'analisi delle simulazioni effettuate emerge che:

1. nella configurazione di PRP, aumentando la profondità del canale di accesso e riducendo la larghezza dell'imboccatura portuale laterale, si viene a modificare la circolazione idrodinamica nella zona iniziale del porto. La portata massima che un ciclo di marea esce o entra dall'imboccatura principale passa da  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  relativa alla configurazione attuale a  $120 \text{ m}^3/\text{s}$  in quella di PRP (un aumento del 50%).
2. nello scenario estremamente cautelativo in cui agisce la sola forzante di marea, sia nella configurazione attuale che in quella di progetto, vi è l'impossibilità di garantire un sufficiente grado di vivificazione del porto, in particolar modo nella darsena più interna.
3. il canale De Dottori, che deriva dall'Isonzo una portata di  $21.5 \text{ m}^3/\text{s}$  e la immette nel bacino portuale, garantisce un ricambio idrico accettabile e la sopravvivenza delle specie biologiche.



## 6 APPENDICE: DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO SMS-TABS

Il sistema TABS è stato sviluppato dalla United States Army Engineering Waterways Experiment Station per simulare numerosi problemi idrodinamici in acque basse. Il modello SMS-TABS è provvisto di pre-post processore grafico per programmi che richiedono griglie 2D agli elementi finiti sviluppato dall'Engineering Computer Graphics Laboratory a Brigham.

I programmi contenuti nel pacchetto TABS possono essere usati per analizzare le variazioni di livello ed il campo di velocità per problemi idrodinamici in acque basse. Il TABS fornisce sia soluzioni in moto permanente che in moto vario, in altre parole la soluzione può trovarsi sia per istanti di tempo che per una serie di passi temporali.

I programmi del pacchetto TABS contengono, inoltre, un codice per la simulazione della diffusione di inquinanti, dell'erosione e del trasporto solido. In una tipica applicazione, SMS 9.2.1 viene utilizzato per costruire un reticolo agli elementi finiti della regione simulata e per applicare condizioni al contorno. Le informazioni che descrivono le griglie vengono quindi salvate in un file geometrico ed in uno o più file in cui sono contenute le condizioni al contorno.

Il software TABS è quindi utilizzato per eseguire analisi idrodinamiche attraverso simulazioni numeriche. Le soluzioni creano uno o più file contenenti, tra le altre cose, i livelli di superficie idrica e il campo di velocità in ciascun nodo della griglia presa in esame. Questi file soluzione possono essere introdotti nel modello SMS-TABS che consente una loro visualizzazione sotto forma di grafici vettoriali a colori, corredati se necessario dell'andamento temporale delle differenti grandezze di interesse.

Il modello SMS 9.2.1 può essere utilizzato, anche, come un pre e post processore per altri programmi agli elementi finiti, purché questi programmi siano compatibili con i formati utilizzati. Il modello SMS 9.2.1 è idoneo per la costruzione di griglie grandi e complesse (potendo raggiungere anche centinaia di elementi) di forma arbitraria.

L'intero pacchetto software è disponibile a livello commerciale ed è provvisto del manuale per l'utente. I due componenti principali del sistema TABS, il codice RMA-2 per la determinazione del campo idrodinamico ed il codice RMA-4 per l'individuazione della concentrazione dell'ossigeno disciolto, vengono descritte di seguito.

### 6.1 Codice RMA-2

Il cuore del sistema TABS è rappresentato dal programma RMA-2 per la simulazione di moti a superficie libera in corrente lenta. L'RMA-2 è un programma bidimensionale agli elementi finiti per la soluzione di problemi idrodinamici, che fornisce risultati mediati sulla verticale.

Originariamente, l'RMA-2 è stato sviluppato da Norton ed altri (1973) della Resource Management Associates, Inc. di Davis, in California. Diverse modifiche al codice originale sono state fatte da alcuni ricercatori della Waterway Experiment Station (Thomas e McAnally, 1991).

## 6.1.1 Applicazioni

L'RMA-2 può essere utilizzato per calcolare i livelli di superficie idrica e il campo di velocità nei punti nodali di una griglia agli elementi finiti che rappresenta un corpo d'acqua come ad esempio un fiume, un porto o un estuario.

L'RMA-2 può fornire soluzioni sia in moto permanente che in moto vario. In altre parole, le condizioni al contorno (portata entrante, livelli di superficie idrica) variano nel tempo e la soluzione si può trovare per un determinato numero di passi temporali. Ciò rende possibile la simulazione di condizioni dinamiche per le correnti causate da portate variabili o cicli mareali. L'RMA-2 non è applicabile a problemi con correnti supercritiche.

L'output dell'RMA-2 viene registrato in un file soluzione binario. Il file può contenere la soluzione di uno o più passi temporali, in funzione del fatto che sia stata eseguita un'analisi stazionaria o transitoria. Il file soluzione può essere introdotto nel processore grafico SMS 9.2.1 per una rappresentazione grafica dei risultati.

## 6.1.2 Equazioni utilizzate

Le equazioni che governano il moto delle acque poco profonde, risolte dall'RMA-2, sono le seguenti:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - \frac{\varepsilon_{yx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

dove

x = distanza nella direzione x (longitudinale alla direzione della corrente) [L]

u = velocità orizzontale della corrente nella direzione x [LT<sup>-1</sup>]

y = distanza nella direzione y (laterale alla direzione della corrente) [L]

v = velocità orizzontale della corrente nella direzione y [LT<sup>-1</sup>]

t = tempo [T]

g = accelerazione dovuta alla gravità [LT<sup>-2</sup>]

h = profondità dell'acqua [L]

a<sub>0</sub> = quota del fondo [L]

ρ = densità del fluido [ML<sup>-3</sup>]

$\varepsilon_{xx}$  = coefficiente di scambio turbolento normale nella direzione x [ $MT^{-1}L^{-1}$ ]

$\varepsilon_{xy}$  = coefficiente di scambio turbolento tangenziale nella direzione x [ $MT^{-1}L^{-1}$ ]

$\varepsilon_{yx}$  = coefficiente di scambio turbolento tangenziale nella direzione y [ $MT^{-1}L^{-1}$ ]

$\varepsilon_{yy}$  = coefficiente di scambio turbolento normale nella direzione y [ $MT^{-1}L^{-1}$ ]

C = coefficiente di scabrezza di Chezy (derivato dal coefficiente di Manning n) [ $L^{2/3}T^{-1}$ ]

## 6.2 Codice RMA-4

L'RMA-4 è la parte del sistema TABS utilizzata per la simulazione della diffusione dell'ossigeno disciolto e per il trasporto di inquinanti. Utilizza la soluzione idrodinamica dell'RMA-2 per definire un campo di velocità per una data griglia. Inoltre legge un insieme di condizioni specificati dall'utente come input. Tali condizioni sono specificati come valori di massa o concentrazione e da tassi di decadimento per ciascun componente. L'RMA-4 quindi simula la diffusione e/o dissipazione del costituente per un dato numero di passi temporali.

L'output dell'RMA-4 è registrato in un file soluzione binario. Il file soluzione può essere introdotto nel SMS 9.2.1 per una rappresentazione grafica dei risultati.

### 6.2.1 Equazioni utilizzate

L'equazione che governa la convezione-diffusione risolta dall'RMA-4 è la seguente:

$$h \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - D_x \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - D_y \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - \sigma + kc \right) = 0$$

dove

$x$  = distanza nella direzione  $x$  (longitudinale alla direzione della corrente) [L]

$u$  = velocità orizzontale della corrente nella direzione  $x$  [ $LT^{-1}$ ]

$y$  = distanza nella direzione  $y$  (laterale alla direzione della corrente) [L]

$v$  = velocità orizzontale della corrente nella direzione  $y$  [ $LT^{-1}$ ]

$t$  = tempo [T]

$c$  = concentrazione del costituente [ $ML^{-3}$ ]

$D_x$  = coefficiente di diffusione turbolento nella direzione  $x$  [ $L^2T^{-1}$ ]

$D_y$  = coefficiente di diffusione turbolento nella direzione  $y$  [ $L^2T^{-1}$ ]

$\sigma$  = sorgente o uscita locale del costituente [ $MT^{-1}L^{-2}$ ]

$k$  = tasso di decadimento del costituente [ $T^{-1}$ ]