

**BIOCHEMIE LAB SRL**  
**Via di Limite 27/G**  
**50013 Campi Bisenzio (FI)**



**Servizio di monitoraggio ambientale della qualità dell'aria, delle acque, dei sedimenti, del clima acustico, di aspetti naturalistici e morfodinamici relativi all'attuazione del PRP 2007-I stralcio del Porto di Ravenna**

**Simulazioni modellistiche del campo idrodinamico tramite codice di calcolo agli elementi finiti (metodica M4)**  
**Parte I - Monitoraggio Ante Operam**

## **REPORT CONCLUSIVO**

**Esecuzione:** Ing. Bruno Matticchio  
Via De Sanctis, 8 – 36100 Vicenza  
e-mail: [matticchio@ipros.it](mailto:matticchio@ipros.it)

**Data:** NOVEMBRE 2021



## **INDICE**

<b>1</b>	<b><i>Premesse</i></b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b><i>Dati mareografici e correntometrici</i></b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Rete di monitoraggio AdSP e stazione mareografica di Ravenna (ISPRA-RMN)</b>	<b>8</b>
2.1.1	Dati mareografici e correntometrici 1/2/2020 – 31/8/2020	10
2.1.2	Dati mareografici e correntometrici 1/1/2021 – 30/9/2021	17
<b>2.2</b>	<b>Monitoraggio dei livelli idrici 22/1/2021 – 27/7/2021</b>	<b>24</b>
<b>2.3</b>	<b>Campagna di misura di velocità e direzione della corrente del 20/10/2021</b>	<b>28</b>
<b>3</b>	<b><i>Implementazione del modello matematico</i></b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Dati topografici e batimetrici</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Griglia di calcolo</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b><i>Calibrazione e verifica del modello</i></b>	<b>47</b>
<b>4.1</b>	<b>Confronto con i dati mareografici e correntometrici di Aprile 2020</b>	<b>48</b>
<b>4.2</b>	<b>Confronto con i dati mareografici e correntometrici di Aprile 2021</b>	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>Confronto con i dati della campagna di misure ADCP del 20 ottobre 2021</b>	<b>56</b>
<b>5</b>	<b><i>Simulazioni del campo idrodinamico</i></b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>Sistema complessivo e bacino portuale</b>	<b>59</b>
<b>5.2</b>	<b>Pialassa Baiona</b>	<b>66</b>
<b>5.3</b>	<b>Pialassa Piombone</b>	<b>70</b>
	<b><i>Riferimenti bibliografici</i></b>	<b>74</b>
	<b><i>APPENDICE – Descrizione del modello matematico 2DEF</i></b>	<b>75</b>

## Indice delle Figure

Figura 2.1 - Stazioni di monitoraggio permanente di AdSP. Sono evidenziate le stazioni delle quali sono stati elaborati i dati dei periodi febbraio-agosto 2020 e gennaio-settembre 2021. Immagine tratta da <a href="https://meteo.port.ravenna.it/Centraline/">https://meteo.port.ravenna.it/Centraline/</a> .....	9
Figura 2.2 - Stazione mareografica di Marina di Ravenna (storicamente denominata mareografo di Porto Corsini). Immagine tratta da <a href="https://www.mareografico.it/">https://www.mareografico.it/</a> .....	9
Figura 2.3 – Livello medio mensile ottenuto dai dati mareografici registrati nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020. ....	11
Figura 2.4 – Livello idrometrico registrato nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020. ....	14
Figura 2.5 – Dati registrati nel mese di Aprile 2020. In alto: livelli idrometrici, in basso: velocità della corrente al Molo Guardiano Sud e marea a Ravenna. ....	15
Figura 2.6 – Dati registrati nel mese di Aprile 2020. velocità della corrente a Punta PIR (in alto) e al Canale Piomboni (in basso) e marea a Ravenna. ....	16
Figura 2.7 – Livello medio mensile ottenuto dai dati mareografici registrati nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021. ....	18
Figura 2.8 – Livello idrometrico registrato nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021. ....	21
Figura 2.9 – Dati registrati nel mese di Aprile 2021. In alto: livelli idrometrici, in basso: velocità della corrente al Molo Guardiano Sud e marea a Ravenna. ....	22
Figura 2.10 – Dati registrati nel mese di Aprile 2021. velocità della corrente a Punta PIR (in alto) e al Canale Piomboni (in basso) e marea a Ravenna.....	23
Figura 2.11 – Posizione dei mareografi installati per il monitoraggio dei livelli idrici nel periodo nell’ambito della metodica M5. ....	24
Figura 2.12 – Livello medio mensile ottenuto dal monitoraggio dei livelli idrici del periodo 22/1/2021-27/7/2021. ....	26
Figura 2.13 – Monitoraggio dei livelli idrici nelle Pialasse Piombone e Baiona nel periodo 22/1/2021- 27/7/2021. In basso particolare del mese di Aprile 2021 con Ravenna RMN. ....	27
Figura 2.14 – Posizione delle sezioni indagate nella campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021. ....	30
Figura 2.15 – Campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021: portate misurate sulla sezione del Canale Baiona sovrapposte all’andamento della marea. ....	31
Figura 2.16 – Campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021: portate misurate sulla sezione del Canale Piombone sovrapposte all’andamento della marea. ....	31
Figura 3.1 – Rilievo Lidar MATTM 2008-2010 nell’area di interesse. In nero è indicato il contorno del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse. Base fotografica Google Earth. ....	33
Figura 3.2 – Rilievi batimetrici forniti del bacino portuale e del mare antistante resi disponibili da AdSP. Nella mappa sono indicate anche le strisciate delle batimetrie effettuate nel 2021 nell’ambito del PMAO (metodica M6) e che sono rappresentate in dettaglio nelle figure seguenti. In rosso è indicato il contorno del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse. Base fotografica Google Earth. ....	34
Figura 3.3 – Particolare del rilievo batimetrico eseguito nel 2021 nella Pialassa Baiona nell’ambito del PMAO (metodica M6). Base: Google Earth. ....	35
Figura 3.4 – Particolare del rilievo batimetrico eseguito nel 2021 nella Pialassa Piombone nell’ambito del PMAO (metodica M6). Base: Google Earth. ....	36
Figura 3.5 – Rilievo aerofotogrammetrico della Pialassa Piombone eseguito con drone nel giugno 2021 in bassa marea nell’ambito del PMAO (metodica M6). Base fotografica Google Earth. ....	37
Figura 3.6 – Modello altimetrico ottenuto dal rilievo aerofotogrammetrico della Pialassa Piombone eseguito con drone nel giugno 2021 in bassa marea nell’ambito del PMAO (metodica M6). Base fotografica Google Earth.....	38
Figura 3.7 – Plalassa Baiona, Chiaro del Paradiso: tubo di collegamento con il canale Baccarini. Foto in data 14/09/2021. ....	39
Figura 3.8 – Pialassa Baiona, Chiaro dell’Inferno: varco sul cordone barenicolo con il canale lagunare. Foto in data 14/09/2021. ....	39
Figura 3.9 – Griglia di calcolo del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse Baiona e Piombone. ....	42

Figura 3.10 – Quote batimetriche del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse Baiona e Piombone. ....	43
Figura 3.11 – Particolare delle quote batimetriche del modello bidimensionale nella Pialassa Baiona. ....	44
Figura 3.12 – Particolare delle quote batimetriche del modello bidimensionale nella Pialassa Piombone. ....	45
Figura 4.1 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2020 al Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni. ....	49
Figura 4.2 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2020 a Ravenna Porto Corsini, Punta PIR e Trattaroli Sx. ....	49
Figura 4.3 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2020 a Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni. ....	50
Figura 4.4 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2020 a Ravenna Porto Corsini, Punta PIR e Trattaroli Sx. ....	51
Figura 4.5 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2021 al Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni. ....	52
Figura 4.6 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2021 ai mareografi installati nelle Pialasse Piombone e Baiona. ....	53
Figura 4.7 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2021 a Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni. ....	54
Figura 4.8 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2021 ai mareografi installati nelle Pialasse Piombone e Baiona. ....	55
Figura 4.9 – Confronto tra livello misurato e calcolato al mareografo Baiona (dati in ora solare). ....	57
Figura 4.10 – Confronto tra livello misurato e calcolato al mareografo Piombone (dati in ora solare). ....	57
Figura 4.11 – Confronto tra portata misurata e calcolata nella sezione Canale Baiona (dati in ora solare). ...	58
Figura 4.12 – Confronto tra portata misurata e calcolata nella sezione Canale Piomboni (dati in ora solare). ...	58
Figura 5.1 – Punti e sezioni di riferimento per l'estrazione dei risultati del modello bidimensionale del sistema portuale di Ravenna. ....	59
Figura 5.2 – Andamento della portata nelle sezioni di riferimento rappresentate in Figura 5.1, calcolato con il modello bidimensionale in un periodo di sizigia (25-29 aprile 2021, luna piena il 27/04/2021). Dati in ora solare. ....	60
Figura 5.3 – Andamento del livello idrometrici nei punti di riferimento rappresentati in Figura 5.1, calcolato con il modello bidimensionale in un periodo di sizigia (25-29 aprile 2021, luna piena il 27/04/2021). ....	63
Figura 5.4 – Campo di velocità in flusso uscente calcolato con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale (28/04/2021 ore 2:00). ....	64
Figura 5.5 – Campo di velocità in flusso entrante calcolato con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale (28/04/2021 ore 9:00). ....	65
Figura 5.6 – Pialassa Baiona: campi di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) ed entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale. ....	67
Figura 5.7 – Pialassa Baiona: particolare del campo di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale. ....	68
Figura 5.8 – Pialassa Baiona: particolare del campo di velocità in flusso entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale. ....	69
Figura 5.9 – Pialassa Piombone: Campo di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) ed entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale. ....	71
Figura 5.10 – Pialassa Piombone: Particolare del campo di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in una condizione di sizigia. ....	72
Figura 5.11 – Pialassa Piombone: particolare del campo di velocità in flusso entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in una condizione di sizigia. ....	73

## **Indice delle Tabelle**

<i>Tabella 2.1 – Statistiche delle serie di dati mareografici registrati nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020. Valori espressi in m s.l.m. ....</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 2.2 – Statistiche delle serie di dati correntometrici registrati nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020.....</i>	<i>12</i>
<i>Tabella 2.3 – Statistiche delle serie di dati mareografici registrati nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021. Valori espressi in m s.l.m. ....</i>	<i>17</i>
<i>Tabella 2.4 – Statistiche delle serie di dati correntometrici registrati nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 2.5 – Statistiche delle serie di dati relative al monitoraggio dei livelli idrici del periodo 22/1/2021 – 27/7/2021. Valori espressi in m s.l.m.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 2.6 – Valori di portata misurati durante la campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021. ....</i>	<i>30</i>
<i>Tabella 3.1 – Coefficienti di scabrezza secondo Strickler (<math>m^{1/3}/s</math>) utilizzati nel modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabella 5.1 – Portate massime (<math>m^3/s</math>) e volumi scambiati (<math>m^3*10^6</math>) nelle sezioni di riferimento rappresentate in Figura 5.1, calcolati con il modello bidimensionale in un periodo di sizigia (25-29 aprile 2021, luna piena il 27/04/2021).....</i>	<i>61</i>

## **1 Premesse**

La presente relazione illustra i risultati delle indagini svolte dallo scrivente nell'ambito della metodica "M4 – Monitoraggio Ante Operam degli scambi idrici fra le Pialasse e il Canale Candiano" prevista dal "Servizio di monitoraggio ambientale della qualità dell'aria, delle acque, dei sedimenti, del clima acustico, di aspetti naturalistici e morfodinamici relative all'attuazione del PRP 2007 – I stralcio" del Porto di Ravenna.

In particolare, il documento illustra le attività svolte e i risultati ottenuti relativamente alla prestazione "BM3: Simulazioni modellistiche del campo idrodinamico tramite codice di calcolo agli elementi finiti", per la fase Ante Operam.

Come previsto dal Progetto di Monitoraggio, ed in particolare dal documento relativo al comparto idrico, biotico e morfodinamico (allegato GEN.B1), nel corso dell'indagine si è provveduto all'implementazione, taratura ed aggiornamento di un modello analogo a quelli impiegati in fase di progetto e di Studio d'Impatto Ambientale, principalmente allo scopo di monitorare lo scambio idrico tra il Canale Candiano e le due Pialasse Baiona e Piombone.

La modellazione è stata basata sugli esiti dei monitoraggi sul comparto morfodinamico, ed in particolare del monitoraggio degli scambi idrici tra Pialasse e canale (metodica M4), al monitoraggio dei livelli idrometrici (metodica M5), e al monitoraggio morfodinamico (metodica M6).

In accordo con le indicazioni del Piano di Monitoraggio l'obiettivo specifico delle indagini è stato, in definitiva, quello di aggiornare il quadro conoscitivo Ante Operam sulla base dei monitoraggi svolti prima dell'avvio dei lavori.

Nella fase di Monitoraggio in Corso d'Opera sarà effettuato un aggiornamento del presente studio modellistico allo scopo di verificare gli effetti delle attività sulla base dei monitoraggi che verranno svolti nel corso della realizzazione dei lavori.

## **2 Dati mareografici e correntometrici**

### **2.1 Rete di monitoraggio AdSP e stazione mareografica di Ravenna (ISPRA-RMN)**

L'Autorità di Sistema Portuale (AdSP) dispone di una propria rete permanente di stazioni mareografiche, meteorologiche e correntometriche installate in punti significativi dell'area portuale. I dati delle stazioni sono disponibili in tempo reale sul sito istituzionale di AdSP (Figura 2.1).

Nel caso in esame sono stati acquisiti presso AdSP i dati di 5 stazioni mareografiche (Punta PIR, Trattaroli, San Vitale, Ponte mobile, Terminal crociere) e di 3 stazioni correntometriche (Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni).

Le prime dispongono di un sensore che misura in continuo le quote idrometriche, riferite al locale zero idrometrico, a scansione temporale di 1 dato ogni 10 minuti.

Le seconde dispongono di un sensore ADCP orizzontale (Acoustic Doppler Current Profiler), collocato sulla sponda del canale, che rileva in continuo il profilo trasversale della velocità della corrente. La misura è ottenuta suddividendo la sezione in una serie di celle, di larghezza pari a circa 4 m. Il dato restituito è la velocità al centro della sezione, indicativamente alla profondità di 1 m dalla superficie. Viene effettuato un campionamento (ping) ogni minuto e ogni 10 minuti viene generato un "insieme" dato dai valori mediati acquisiti nei vari "ping" effettuati.

La Figura 2.1 riporta l'ubicazione delle stazioni di monitoraggio permanente dell'AdSP.

Oltre alle suddette stazioni, sono stati presi in considerazione i dati rilevati dalla Stazione mareografica di Marina di Ravenna (storicamente denominata mareografo di Porto Corsini), che è collocata sul Molo Guardiano Sud, all'ingresso del bacino portuale (Figura 2.1).

La Figura 2.2 riporta le caratteristiche di quest'ultima stazione, i cui dati idrometrici sono scaricabili liberamente, alla scansione temporale di 1 dato ogni 10 minuti, dal sito istituzionale di ISPRA. I dati sono riferiti allo zero idrometrico della rete IGM.

I dati dei sensori della rete AdSP sono stati forniti dalla Committenza per 2 intervalli di tempo. Il primo va dal 1/2/2020 al 31/8/2020 (trasmissione via email in data 22/10/2020) e si riferisce quindi ad un periodo antecedente all'inizio delle attività del Piano di Monitoraggio Ante Operam. Il secondo va dal 1/1/2021 al 30/9/2021 (trasmissione via email in data 05/10/2021) e corrisponde perciò al periodo durante il quale sono stati effettuate le attività del PMAO.

Nell'ambito del PMAO i dati idrometrici sopraccitati (5 stazioni mareografiche AdSP e stazione di Marina di Ravenna) consentono di ampliare la base dati raccolta nell'ambito della metodica M5, che prevede il monitoraggio idrometrico all'interno delle Pialasse (si veda il par. 2.2), e di mettere a confronto e di correlare i dati acquisiti nell'ambito della stessa metodica M5 con altri dati rilevati in continuo nell'ambito portuale.

I dati correntometrici sopraccitati (3 stazioni ADCP), si inseriscono invece nel dataset relativo alla metodica M4, che prevede la misura in continuo della velocità e direzione di corrente all'imboccature delle Pialasse. Queste misure, originariamente previste con nuove installazioni da realizzarsi nell'ambito del PMAO, sono infatti già disponibili in continuo mediante la strumentazione che fa parte della rete permanente di AdSP (Figura 2.1).





Figura 2.1 - Stazioni di monitoraggio permanente di AdSP. Sono evidenziate le stazioni delle quali sono stati elaborati i dati dei periodi febbraio-agosto 2020 e gennaio-settembre 2021. Immagine tratta da <https://meteo.port.ravenna.it/Centrale/>.

#### RAVENNA PORTO CORSINI

LATITUDINE 44° 29' 31,47"  
LONGITUDINE 12° 16' 58,57"

dati rilevati dalla stazione

#### ATTENZIONE

Il caposaldo altimetrico di riferimento al livello medio mare è stato riposizionato e riferito al caposaldo al IGM Cso:16D1/12 c (come per le due livellazioni precedenti del 1998 e 2010). Il caposaldo è stato ricollegato alla Rete IGM nell'inverno 2012. Tale operazione ha evidenziato un delta rispetto alle livellazioni precedenti di 10,84 cm.

Per informazioni dettagliate cliccare [qui](#)

**Il livello del mare misurato dal 12/09/13 tiene conto di questa variazione**

#### Reti a cui appartiene la stazione

Rete mareografica

#### Parametri misurati

Livello idrometrico ogni 10 sec	(trasduttore di livello radar)
Temperatura acqua ogni 1 h	(trasduttore di temperatura acqua)
Temperatura aria ogni 1 h	(trasduttore di temperatura aria e rh%)
Umidità relativa ogni 1 h	(trasduttore di temperatura aria e rh%)
Pressione atmosferica ogni 1 h	(sensore barometrico)
Direzione vento ogni 10 min	(sensore ad ultrasuoni velocità e direzione vento)
Velocità vento ogni 10 min	(sensore ad ultrasuoni velocità e direzione vento)



Figura 2.2 - Stazione mareografica di Marina di Ravenna (storicamente denominata mareografo di Porto Corsini). Immagine tratta da <https://www.mareografico.it/>.

### 2.1.1 Dati mareografici e correntometrici 1/2/2020 – 31/8/2020

Il primo set di dati reso disponibile da AdSP riguarda il periodo 1/2/2020 – 31/8/2020, precedente all’inizio delle attività del Piano di Monitoraggio Ante Operam. Questi dati sono stati comunque ritenuti significativi ai fini dell’analisi modellistica perché si riferiscono ad una configurazione del bacino portuale e delle Pialasse analoga a quella esistente nel corso del PMAO e consentono quindi di ampliare il dataset ai fini della calibrazione e validazione del modello idrodinamico.

L’elaborazione dei dati mareografici, disponibili a frequenza di 1 dato ogni 10 minuti, ha comportato l’implementazione dei dati stessi in un foglio elettronico, l’allineamento delle serie temporali per tenere conto dei dati mancanti e l’eliminazione di alcuni errori (spikes) evidenti.

I dati della rete AdSP sono stati elaborati insieme ai dati del mareografo RMN Marina di Ravenna, la cui serie risulta praticamente completa. Anche in questo caso si è provveduto ad eliminare i (pochi) dati evidentemente anomali.

La Tabella 2.1 riporta alcune semplici valutazioni statistiche sui dati. Si osserva che tutte le serie dispongono di una completezza superiore al 90%. Fa eccezione la stazione di S. Vitale, la cui registrazione è interrotta dal 4/7/2021 e che dispone, nel complesso, di una completezza pari a circa il 70%.

La tabella riporta, inoltre, la altezza media della marea che, per le varie stazioni, si attesta tra 0.04 cm e 0.07 cm. La differenza tra i risultati ottenuti per le diverse stazioni è minima, il che documenta come gli strumenti di AdSP siano correttamente allineati tra di loro e siano allineati anche con il mareografo ISPRA di Marina di Ravenna.

Statistiche	Punta PIR	Trattaroli	San Vitale	Ponte mobile	Terminal crociere	Ravenna RMN
dati registrati	31106	32031	22314	29218	29229	32033
dati serie completa	32037	32037	32037	32037	32037	32037
completezza serie	97.09%	99.98%	69.65%	91.20%	91.24%	99.99%
media globale	0.04	0.04	0.05	0.03	0.07	0.04
dev. standard	0.21	0.23	0.23	0.22	0.23	0.22
media febbraio 2020	-0.03	-0.04	-0.01	-0.04	0.00	-0.03
media marzo 2020	0.03	0.02	0.05	0.02	0.07	0.03
media aprile 2020	-0.01	-0.02	0.01	-0.02	0.02	-0.02
media maggio 2020	0.04	0.03	0.05	0.02	0.07	0.03
media giugno 2020	0.10	0.10	0.13	0.10	0.14	0.11
media luglio 2020	0.06	0.05		0.05	0.09	0.06
media agosto 2020	0.11	0.12		0.10	0.15	0.12

Tabella 2.1 – Statistiche delle serie di dati mareografici registrati nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020. Valori espressi in m s.l.m.

Analoga valutazione si può effettuare per quel che concerne la deviazione standard dei dati, che può essere messa in relazione con l’ampiezza delle oscillazioni della marea. Per tutte stazioni questo valore è praticamente il medesimo, attestandosi tra 0.21 m e 0.23 m.

La stessa tabella riporta, infine, i valori medi mensili della marea calcolati per le diverse stazioni. Il grafico di Figura 2.3 mette a confronto l'andamento di tali valori. Da esso si evince che, anche aggregando i dati su base mensile, le differenze tra i mareografi sono minime. Si evidenzia peraltro che i valori medi mensili delle stazioni di San Vitale e di Terminal crociere risultano mediamente di 2÷4 cm più elevate di quelli delle altre stazioni, il che segnala la sussistenza di un piccolo errore di allineamento di queste due stazioni rispetto alle altre.

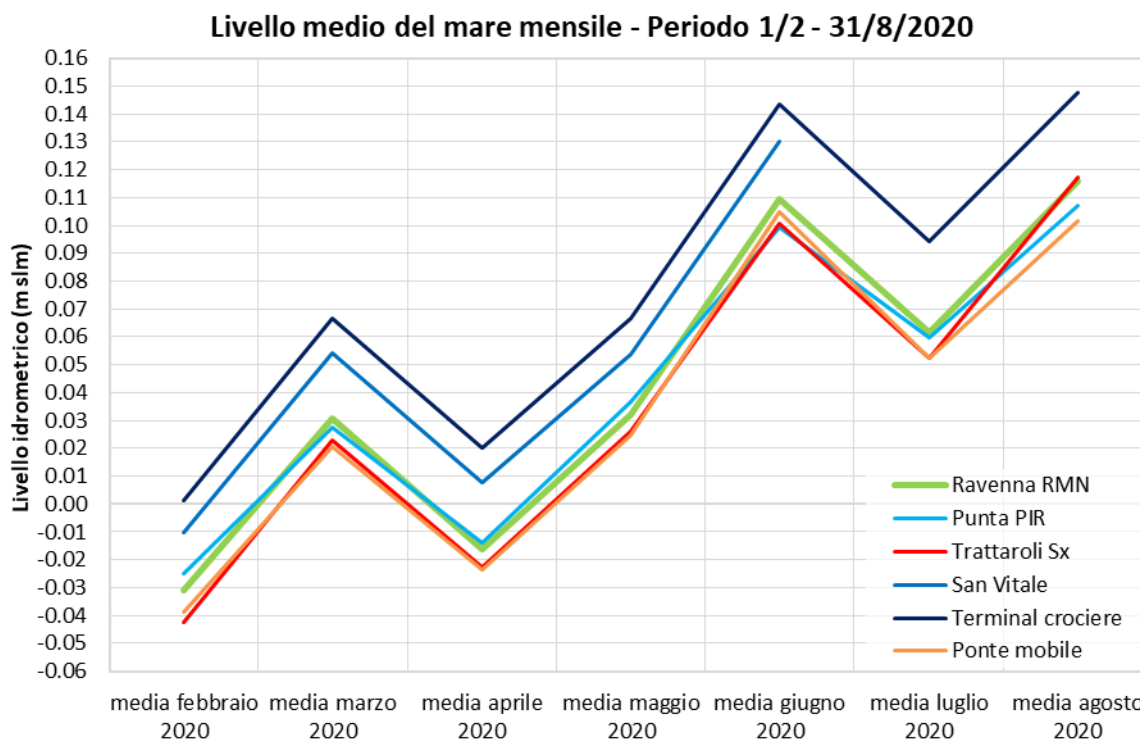


Figura 2.3 – Livello medio mensile ottenuto dai dati mareografici registrati nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020.

L'elaborazione dei dati correntometrici, anch'essi disponibili alla frequenza di 1 dato ogni 10 minuti, ha richiesto un maggiore impegno perché, come generalmente avviene nei canali a marea, le misure di velocità risultano molto meno regolari di quelle di livello. Nel caso in esame, inoltre, il flusso delle correnti mareali risulta spesso disturbato dalle navi di passaggio o in manovra nelle prossimità della sezione di misura. In definitiva, le registrazioni degli strumenti sono fortemente irregolari e caratterizzate da frequenti valori anomali. Per regolarizzare il segnale registrato dagli strumenti, si è provveduto perciò ad applicare alla serie una media mobile su 7 dati.

In Tabella 2.2 sono riportate alcune valutazioni statistiche sui dataset delle tre stazioni. In primo luogo, si evince che la completezza dei dati è risultata molto buona per tutte e tre le stazioni, essendo essa compresa tra 94.36% (Punta PIR) e 99.99% (C. Piomboni).

In secondo luogo, si rileva che per tutte e 3 le stazioni la velocità media è pari a qualche cm/s, ossia molto vicina al valore nullo tipico di una sezione soggetta alla sola corrente di marea.

Nella stessa Tabella 2.2 è riportato anche il valore medio della deviazione standard calcolata per ciascun campione di 7 dati utilizzati per il calcolo della media mobile. Tale parametro è quantitativamente rilevante, soprattutto per il C. Piomboni (122 mm/s), e documenta l'entità delle oscillazioni del segnale all'interno del singolo campione di 7 dati che corrisponde ad un intervallo temporale di 1 ora. L'applicazione della media mobile ha

consentito di ottenere, come è evidenziato più avanti, un significativo miglioramento della regolarità del segnale, per cui si è scelto di utilizzare i dati regolarizzati come termine di confronto con i risultati della modellazione.

Infine, nella Tabella 2.2 è quantificata, in termini percentuali, la permanenza della velocità della corrente (dati non mediati), al di sotto di determinate soglie. Si osserva che per tutte e tre le sezioni circa il 100% delle misure di velocità sta sotto la soglia di 1 m/s (sia per la corrente entrante, rappresentata dai dati positivi, sia per quella uscente, rappresentata dai dati negativi).

Se si considerano i dati compresi tra le soglie di  $\pm 500$  mm/s, queste percentuali si abbassano leggermente, ad indicare che correnti superiori a 0.5 m/s, si verificano solo in corrispondenza delle fasi di massima crescita (flusso entrante) o di massima decrescita (flusso uscente) della marea, oppure possono essere riconducibili a situazioni anomale temporanee o a disturbi del segnale.

Se si considerano le soglie  $\pm 250$  mm/s i risultati per le 3 stazioni si differenziano apprezzabilmente. Per la stazione Molo Guardiano Sud, che si trova all'imboccatura portuale, i valori inferiori a questa soglia sono pari al 63.2%. Questa percentuale si incrementa notevolmente per il canale di imbocco alla Pialassa Baiona (Punta PIR, 79.2%) e per quello di imbocco alla Pialassa del Piombone (C. Piomboni, 90%).

La differenza tra le 3 stazioni è ancora più evidente se si considerano le soglie  $\pm 100$  mm/s, e ciò corrisponde alla significativa diminuzione della velocità delle correnti nelle fasi di flusso e di riflusso della marea, che si riscontra nelle due sezioni più lontane dal mare rispetto a quella posta all'imboccatura.

Statistiche	Molo Guardiano Sud	Punta PIR	Canale Piomboni
dati registrati	31753	29971	31757
dati serie completa	31761	31761	31761
completezza serie	99.97%	94.36%	99.99%
velocità media (mm/s)	38	11	-26
media std dev samples 7 dati(mm/s)	90	72	122
dati compresi tra -100 e +100 mm/s	27.1%	35.9%	60.7%
dati compresi tra -250 e +250 mm/s	63.2%	79.2%	90.0%
dati compresi tra -500 e +500 mm/s	96.1%	99.0%	97.5%
dati compresi tra -1000 e +1000 mm/s	99.9%	100.0%	99.8%
dati esterni a $\pm 1000$ mm/s	0.1%	0.0%	0.2%

*Tabella 2.2 – Statistiche delle serie di dati correntometrici registrati nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020.*

Il grafico di Figura 2.4 rappresenta l'andamento dei livelli di marea nelle 6 stazioni mareografiche per l'intero periodo del 2020 preso in esame.

I grafici successivi di Figura 2.5 e Figura 2.6 riportano sia il dettaglio di questa rappresentazione per il solo mese di aprile 2020, sia l'andamento, nello stesso mese di aprile 2020, della velocità della corrente nelle tre stazioni correntometriche.

In questi ultimi grafici è rappresentata con punti la serie temporale dei dati originari, e con una linea continua la serie dei dati regolarizzati con media mobile. Negli stessi grafici è riportato anche, con linea continua, l'andamento del livello di marea registrato dalla stazione di Narina di Ravenna.

La rappresentazione di dettaglio è stata limitata al mese di aprile 2020 dato che si è scelto di considerare tale mese come intervallo di riferimento per le analisi modellistiche, descritte nei capitoli seguenti. Data la periodicità della forzante mareale e dovendo contenere entro limiti accettabili l'onere computazionale delle simulazioni, si è ritenuto adeguato agli scopi dell'indagine circoscrivere l'analisi ad un mese, ossia ad un periodo sufficientemente lungo da comprendere un intero ciclo lunare. La scelta è caduta sul mese di aprile perché da una parte questo è risultato il mese con livello medio più vicino al livello medio del mare, dall'altro esso è risultato adeguato dal punto di vista della completezza dei dati disponibili.

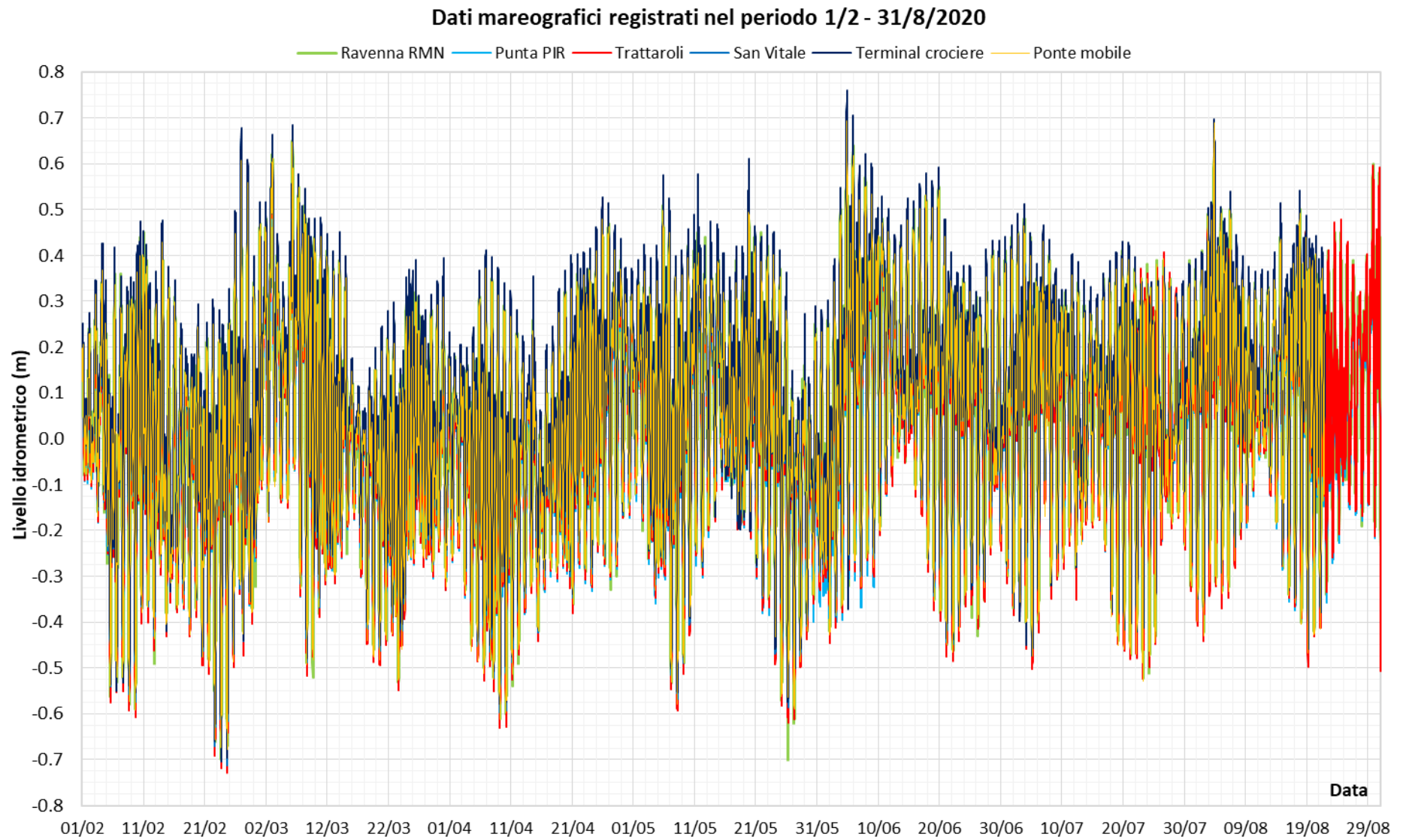


Figura 2.4 – Livello idrometrico registrato nel periodo 1/2/2020 – 31/8/2020.

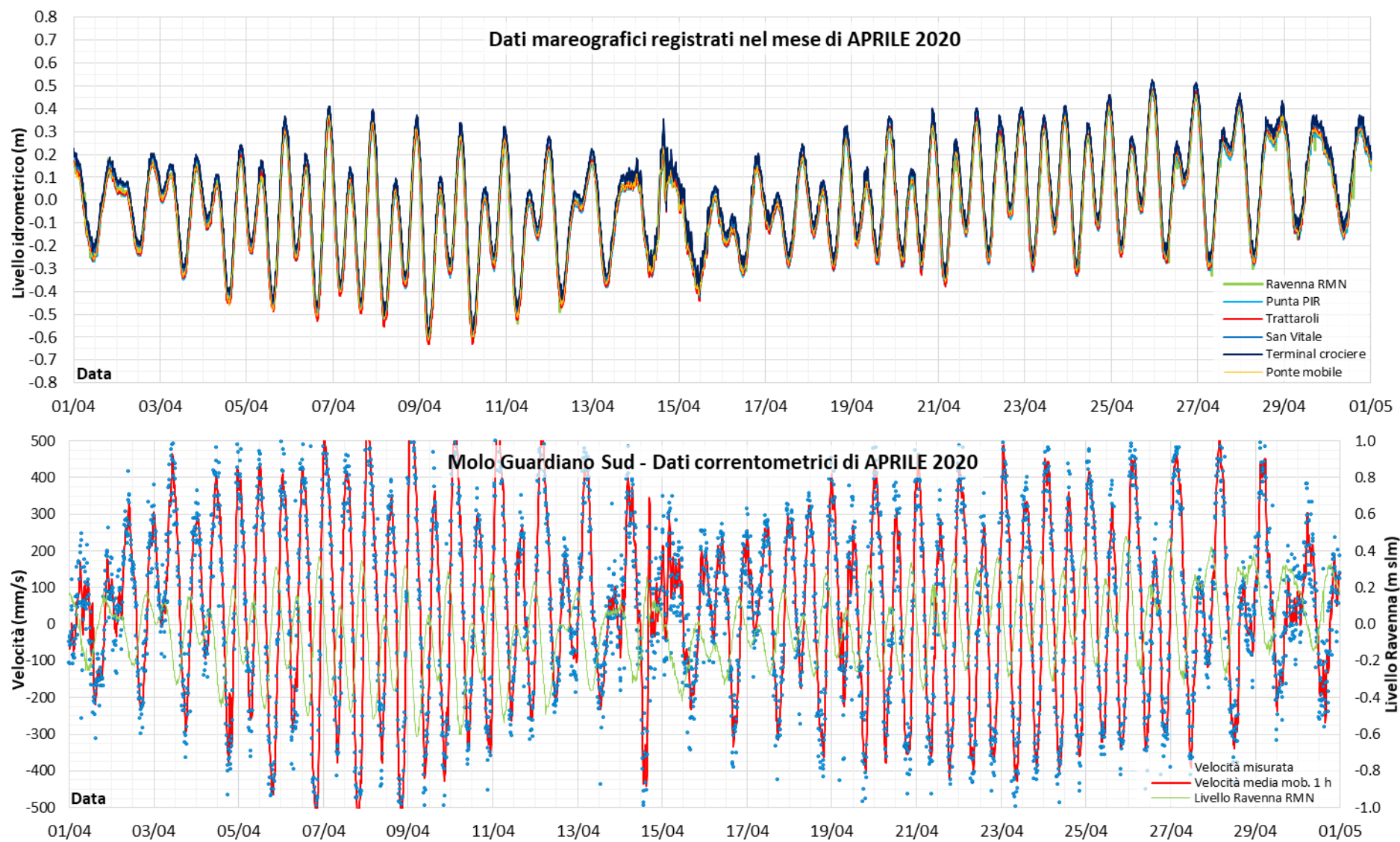


Figura 2.5 – Dati registrati nel mese di Aprile 2020. In alto: livelli idrometrici, in basso: velocità della corrente al Molo Guardiano Sud e marea a Ravenna.

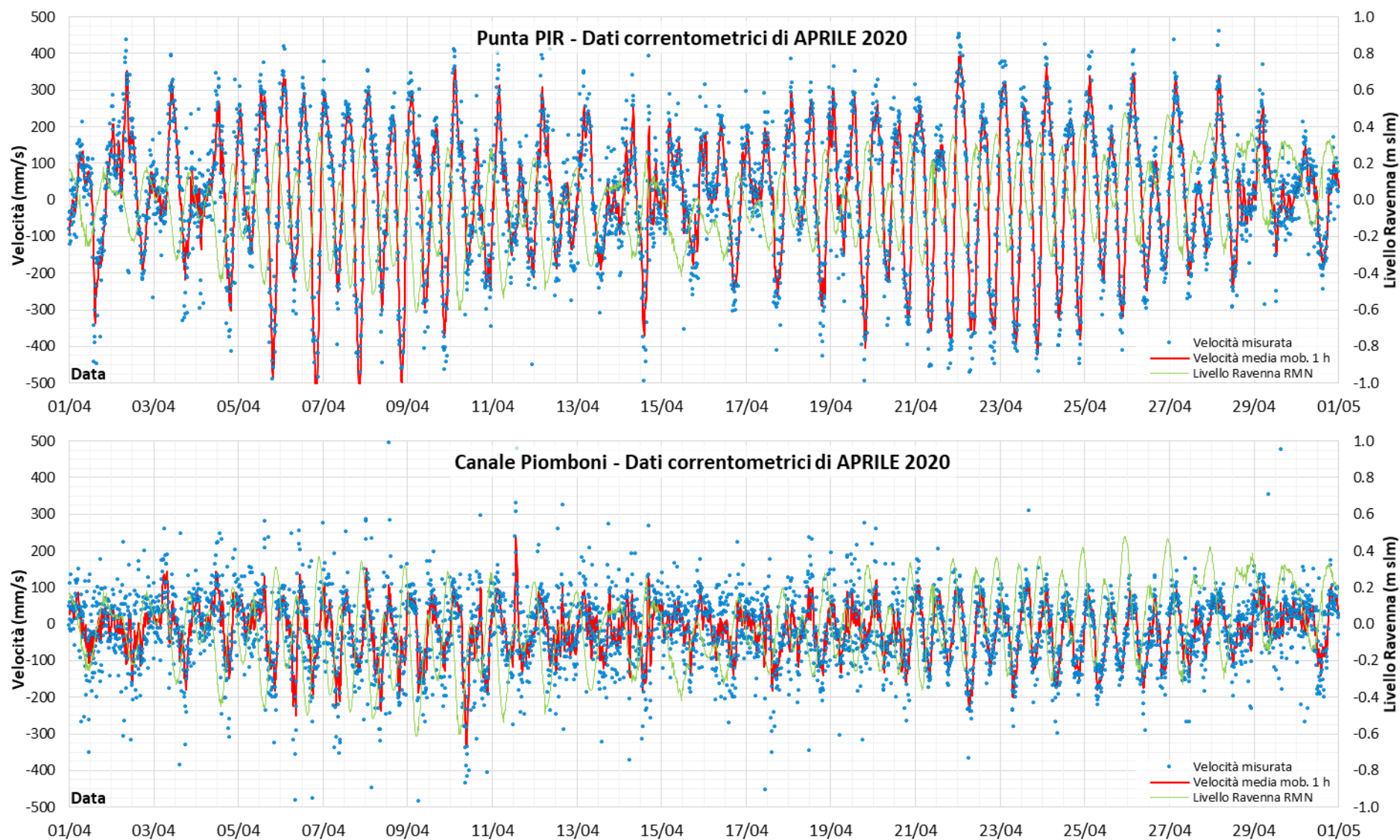


Figura 2.6 – Dati registrati nel mese di Aprile 2020. velocità della corrente a Punta PIR (in alto) e al Canale Piomboni (in basso) e marea a Ravenna.



## 2.1.2 Dati mareografici e correntometrici 1/1/2021 – 30/9/2021

Il secondo set di dati reso disponibile da AdSP riguarda il periodo 1/1/2021 – 30/9/2020 che comprende perciò il periodo in cui si sono svolte le attività del Piano di Monitoraggio Ante Operam. In particolare, l'intervallo di tempo per cui sono disponibili i dati AdSP include il periodo in cui sono stati rilevati i dati mareografici nelle due stazioni all'interno della Pialassa Baiona e della Pialassa Piombone nell'ambito del PMAO, monitoraggio dei livelli idrici (Metodica M5, si veda il par. 2.2).

L'elaborazione dei dati mareografici, disponibili a frequenza di 1 dato ogni 10 minuti, ha comportato la semplice implementazione dei dati stessi in un foglio elettronico, l'allineamento delle serie temporali per tenere conto dei dati mancanti e l'eliminazione di alcuni errori (spikes) evidenti.

I dati della rete AdSP sono stati elaborati insieme ai dati del mareografo RMN Marina di Ravenna, la cui serie risulta praticamente completa. Anche in questo caso si è provveduto ad eliminare i (pochi) dati evidentemente anomali.

La Tabella 2.3 riporta alcune semplici valutazioni statistiche sui dati. Si osserva che la maggior parte delle serie dispongono di una completezza superiore al 95%. Fanno eccezione la stazione S. Vitale, la cui registrazione si interrompe nei mesi di aprile e maggio 2021 e che fornisce, nel complesso, una completezza pari a circa l'80%, e la stazione Ponte mobile, la cui registrazione si interrompe dal mese di luglio 2021 e che dispone di circa il 70% dei dati della serie. La tabella riporta, inoltre, la altezza media della marea che, per le varie stazioni, si attesta tra 0.03 cm e 0.07 cm. Come per i dati del 2020 (par. 2.1.1), le differenze tra le stazioni sono minime, e ciò dimostra che gli strumenti di AdSP sono correttamente allineati tra di loro e sono allineati anche con il mareografo ISPRA di Marina di Ravenna.

Statistiche	Punta PIR	Trattaroli	San Vitale	Ponte mobile	Terminal crociere	Ravenna RMN
dati registrati	37875	39312	32184	27073	39212	39208
dati serie completa	39312	39312	39312	39312	39312	39312
completezza serie	96.34%	100.00%	81.87%	68.87%	99.75%	99.74%
media globale	0.06	0.03	0.07	0.06	0.05	0.05
dev. standard	0.22	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24
media gennaio 2021	0.17	0.17	0.19	0.20	0.18	0.18
media febbraio 2021	0.09	0.06	0.09	0.10	0.07	0.08
media marzo 2021	-0.08	-0.12	-0.11	-0.08	-0.12	-0.11
media aprile 2021	-0.01	-0.01		0.02	-0.01	0.00
media maggio 2021	0.04	0.01		0.06	0.03	0.07
media giugno 2021	0.04	0.01	0.06	0.07	0.03	0.04
media luglio 2021	0.07	0.04	0.09		0.06	0.07
media agosto 2021	0.10	0.07	0.13		0.10	0.11
media settembre 2021	0.06	0.03	0.09		0.06	0.07

Tabella 2.3 – Statistiche delle serie di dati mareografici registrati nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021. Valori espressi in m s.l.m.

Analoga valutazione si può effettuare per quel che concerne la deviazione standard dei dati, che può essere messa in relazione con l'ampiezza delle oscillazioni della marea. Per tutte stazioni questo valore è praticamente il medesimo, attestandosi tra 0.22 m e 0.25 m.

La stessa tabella riporta infine i valori medi mensili della marea calcolati per le diverse stazioni. Il grafico di Figura 2.7 riporta il confronto tra i valori medi mensili calcolati per le diverse stazioni. Da esso si evince che le differenze tra i mareografi sono minime, anche aggregando i dati su base mensile. Si può evidenziare solo che i valori medi mensili delle stazioni di San Vitale e di Trattaroli si discostano leggermente, soprattutto nella seconda parte del periodo, dalle altre stazioni. Si tratta peraltro di differenze dell'ordine di 2÷3 cm, che garantiscono comunque che l'allineamento tra tutte le stazioni sia più che accettabile.

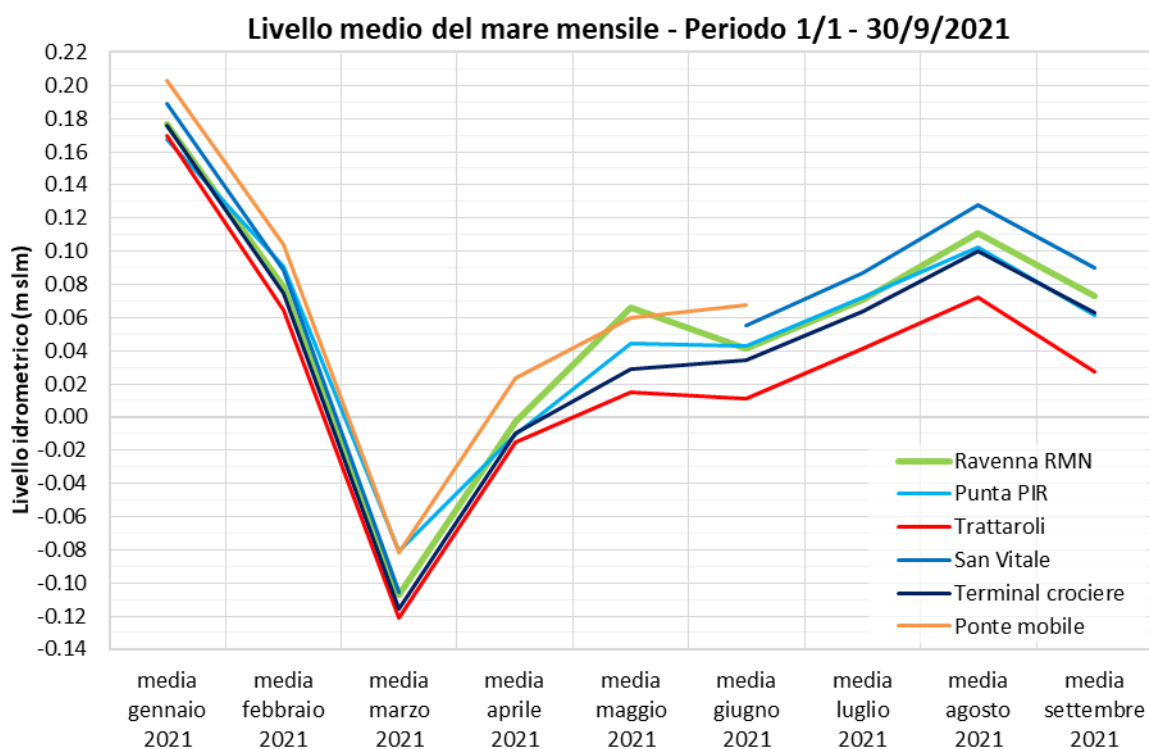


Figura 2.7 – Livello medio mensile ottenuto dai dati mareografici registrati nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021.

L'elaborazione dei dati correntometrici, anch'essi disponibili alla frequenza di 1 dato ogni 10 minuti, ha richiesto un maggiore impegno perché, come generalmente avviene nei canali a marea, le misure di velocità risultano molto meno regolari di quelle di livello. Nel caso in esame, inoltre, il flusso delle correnti mareali risulta spesso disturbato dalle navi di passaggio o in manovra nelle prossimità della sezione di misura. Per regolarizzare il segnale registrato dagli strumenti, si è provveduto perciò ad applicare alla serie una media mobile su 7 dati (1 ora).

In Tabella 2.4 sono riportate alcune valutazioni statistiche sui dataset delle tre stazioni. In primo luogo, si evince che la completezza dei dati è risultata molto buona per le stazioni Punta PIR (99.90%) e C. Piomboni (99.27%). Parziale è risultata, invece, la copertura per la stazione Molo Guardiano Sud (55.06%), la cui trasmissione dati si è interrotta alla fine del mese di maggio 2021.

In secondo luogo, si rileva che per tutte e 3 le stazioni la velocità media è solo di qualche cm/s, ossia molto vicina al valore nullo tipico di una sezione soggetta alla sola corrente di marea.

Nella stessa Tabella 2.4 è riportato anche il valore medio della deviazione standard calcolata per ciascun campione di 7 dati utilizzati per il calcolo della media mobile. Tale parametro è quantitativamente rilevante, soprattutto per il C. Piomboni (152 mm/s), e documenta l'entità delle oscillazioni del segnale all'interno del singolo campione di 7 dati che corrisponde ad un intervallo temporale di 1 ora. L'applicazione della media mobile ha consentito di ottenere, come è evidenziato più avanti, un significativo miglioramento della regolarità del segnale, per cui si è scelto di utilizzare i dati regolarizzati come termine di confronto con i risultati della modellazione.

Infine, nella Tabella 2.4 è quantificata, in termini percentuali, la permanenza della velocità della corrente (dati non mediati), al di sotto di determinate soglie. Analogamente a quanto riscontrato per i dati del 2020 (par. 2.1.1), per tutte e tre le sezioni praticamente tutti i dati stanno sotto la soglia di 1 m/s (sia per la corrente entrante, rappresentata dai dati positivi, sia per quella uscente, rappresentata dai dati negativi).

Anche per le altre soglie i risultati ricavati dai dati del 2021 corrispondono molto bene a quelli ricavati per il 2020 (par. 2.1.1). Se si considerano i dati compresi tra le soglie di  $\pm 500$  mm/s, le percentuali si abbassano leggermente, ad indicare che correnti superiori a 0.5 m/s, si verificano solo in corrispondenza delle fasi di massima crescita (flusso entrante) o di massima decrescita (flusso uscente) della marea, oppure possono essere riconducibili a situazioni anomale temporanee o a disturbi del segnale.

Solo se si considerano le soglie  $\pm 250$  mm/s i risultati per le 3 stazioni si differenziano apprezzabilmente. Per la stazione Molo Guardiano Sud, che si trova all'imboccatura portuale, i valori inferiori a questa soglia sono pari al 69% (37.9% del 55.1%). Questa percentuale si incrementa notevolmente per il canale di imbocco alla Pialassa Baiona (Punta PIR, 80.3%) e per quello di imbocco alla Pialassa del Piombone (C. Piomboni, 91.2%).

La differenza tra le 3 stazioni è ancora più evidente se si considerano le soglie  $\pm 100$  mm/s, e ciò corrisponde alla significativa diminuzione della velocità delle correnti nelle fasi di flusso e di riflusso della marea, che si riscontra nelle due sezioni più lontane dal mare rispetto a quella posta all'imboccatura.

Statistiche	Molo Guardiano Sud	Punta PIR	Canale Piomboni
dati registrati	21644	39274	39024
dati serie completa	39312	39312	39312
completezza serie	55.06%	99.90%	99.27%
velocità media (mm/s)	31	11	-17
media std dev samples 7 dati(mm/s)	97	80	152
dati compresi tra -100 e +100 mm/s	16.8%	37.3%	61.8%
dati compresi tra -250 e +250 mm/s	37.9%	80.3%	91.2%
dati compresi tra -500 e +500 mm/s	53.6%	99.2%	97.5%
dati compresi tra -1000 e +1000 mm/s	55.1%	99.9%	99.3%
dati esterni a $\pm 1000$ mm/s	0.0%	0.1%	0.7%

*Tabella 2.4 – Statistiche delle serie di dati correntometrici registrati nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021.*

Il grafico di Figura 2.8 rappresenta l'andamento dei livelli di marea nelle 6 stazioni mareografiche per l'intero periodo del 2020 preso in esame.

I grafici successivi di Figura 2.9 e Figura 2.10 riportano sia il dettaglio di questa rappresentazione per il solo mese di aprile 2021, sia l'andamento, nello stesso mese di aprile 2021, della velocità della corrente nelle tre stazioni correntometriche. In questi ultimi grafici è rappresentata con punti la serie temporale dei dati originari, e con una linea continua la serie dei dati regolarizzati con media mobile. Negli stessi grafici è riportato anche, con linea continua, l'andamento del livello di marea registrato dalla stazione di Marina di Ravenna.

Analogamente a quanto riportato per il 2020 (par. 2.1.1) anche per il 2021 la rappresentazione di dettaglio è stata limitata al solo mese di aprile, che è stato scelto come intervallo di riferimento per le analisi modellistiche, descritte nei capitoli seguenti. Data la periodicità della forzante mareale e dovendo contenere entro limiti accettabili l'onere computazionale delle simulazioni, si è ritenuto infatti adeguato agli scopi dell'indagine circoscrivere l'analisi ad un mese, ossia ad un periodo sufficientemente lungo da comprendere un intero ciclo lunare. La scelta è caduta sul mese di aprile perché da una parte questo è risultato il mese con livello medio più vicino al livello medio del mare, dall'altro esso è risultato adeguato dal punto di vista della completezza dei dati disponibili.

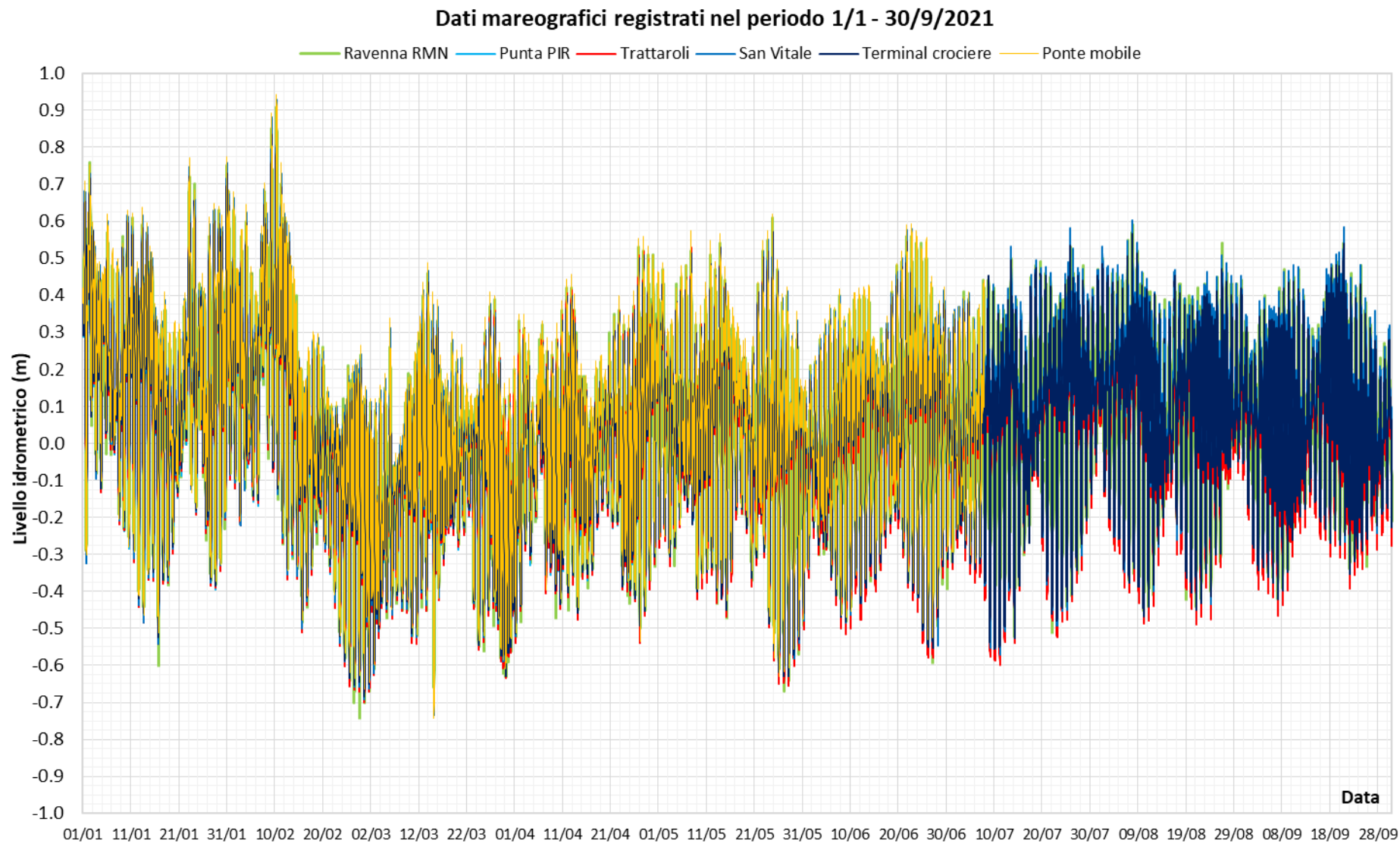


Figura 2.8 – Livello idrometrico registrato nel periodo 1/1/2021 – 30/9/2021.

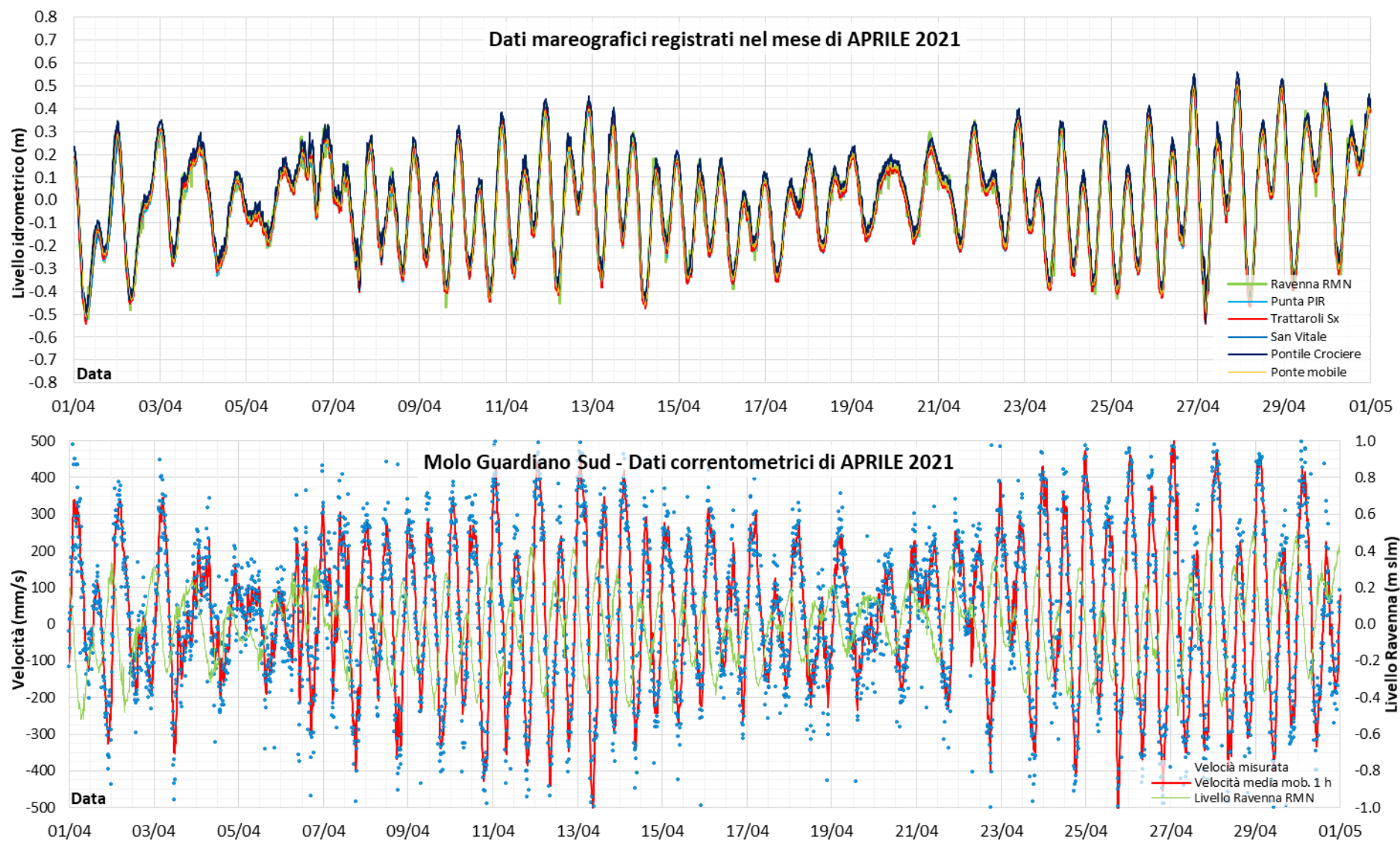


Figura 2.9 – Dati registrati nel mese di Aprile 2021. In alto: livelli idrometrici, in basso: velocità della corrente al Molo Guardiano Sud e marea a Ravenna.

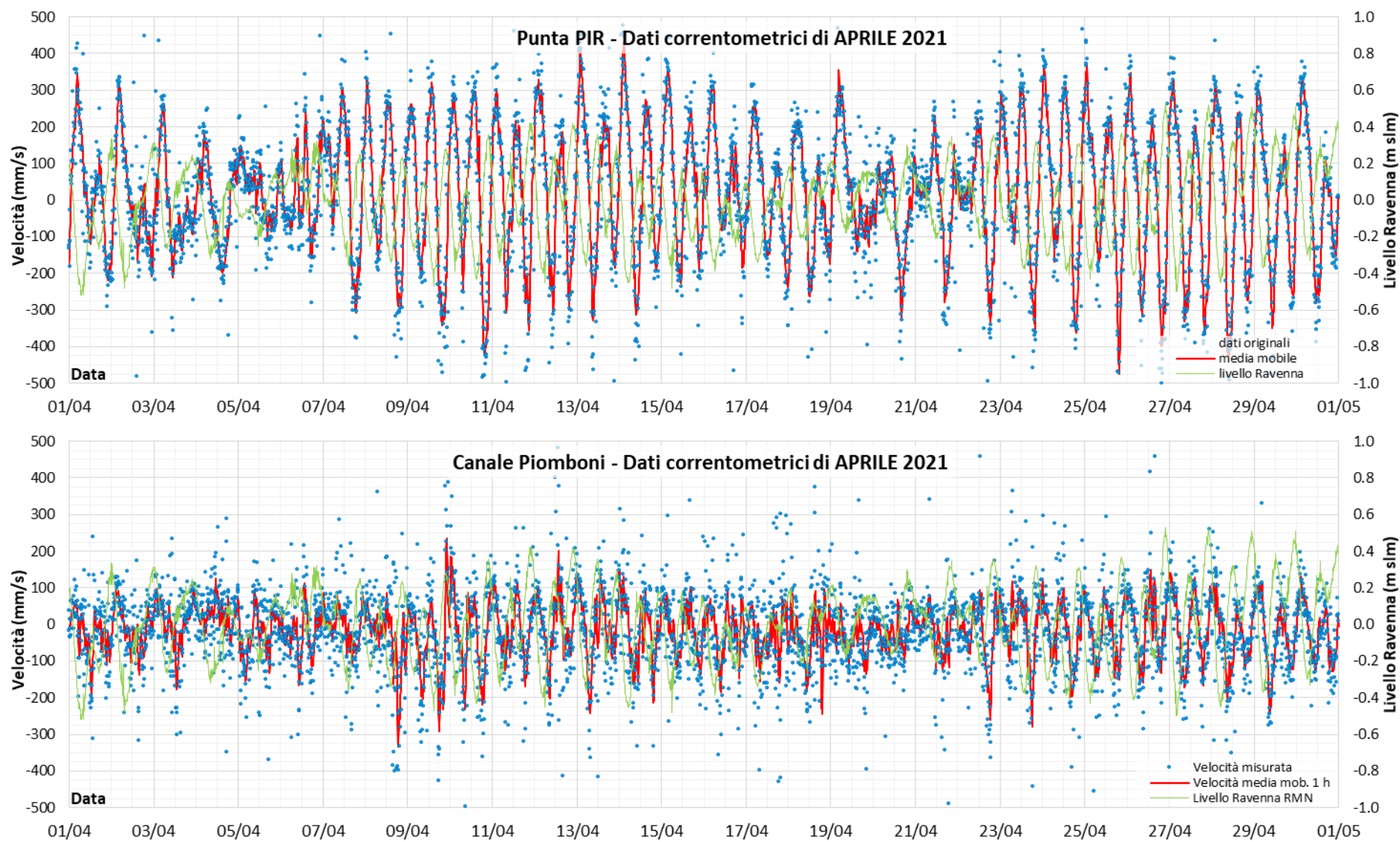


Figura 2.10 – Dati registrati nel mese di Aprile 2021. velocità della corrente a Punta PIR (in alto) e al Canale Piomboni (in basso) e mare a Ravenna

## 2.2 Monitoraggio dei livelli idrici 22/1/2021 – 27/7/2021

Nell'ambito delle attività del Piano di Monitoraggio Ante Operam, ed in particolare di quelle incluse nella Metodica M5, sono stati installati, a cura della ditta Te.Ma snc, due stazioni mareografiche permanenti in grado di rilevare con continuità il livello idrometrico in due punti situati l'uno nella Pialassa Baiona, l'altro nella Pialassa Piombone. Nel primo caso il mareografo è stato installato nella parte centrale della laguna, all'ingresso del C. Fossalone e in corrispondenza dell'inizio del Canale Taglio della Baiona (Figura 2.11). Nel secondo caso esso è stato installato sulla sponda del canale circondariale che si sviluppa lungo il margine orientale della Pialassa Piombone.

Le due stazioni sono state predisposte per acquisire i dati di livello per tutta la durata del Monitoraggio Ante Operam. Ai fini del presente studio sono stati acquisiti i dati relativi al primo semestre di acquisizione, ed in particolare quelli dell'intervallo che va dal 22/1/2021 al 27/7/2022.

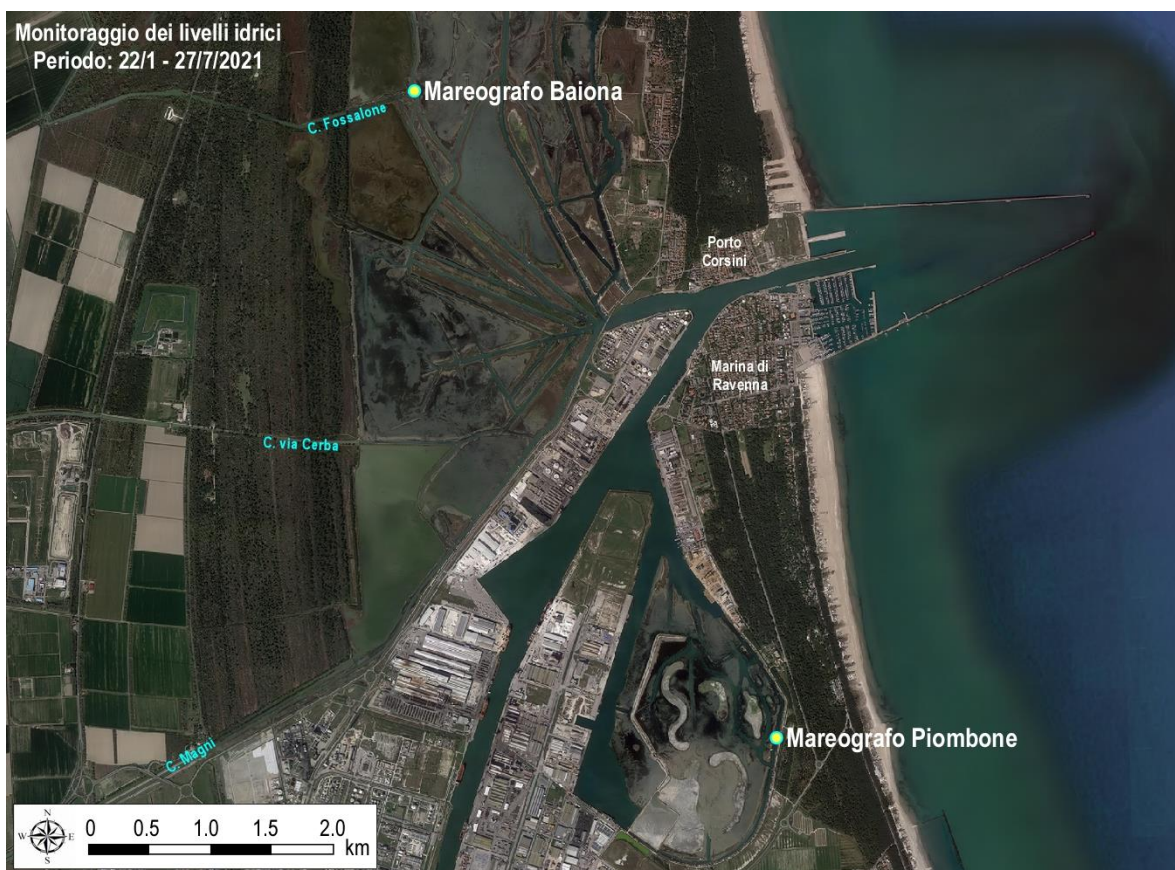


Figura 2.11 – Posizione dei mareografi installati per il monitoraggio dei livelli idrici nel periodo nell'ambito della metodica M5.

La Tabella 2.5 riporta, in modo analogo a quanto riportato per i dati di AdSP illustrati nei paragrafi precedenti, una semplice statistica sui dati stessi, a confronto con i dati della stazione mareografica di Marina di Ravenna (ISPRA-RMN). Dalla tabella si evince in primo luogo che la serie dei dati rilevati è completa, e che il valore medio di entrambe le serie (0.03 m per Piombone e 0.02 m per Baiona) è perfettamente in linea con il dato della stazione RMN (0.04 m). Perfettamente in linea è anche il dato della deviazione standard, che varia tra 0.24 m per il Piombone (valore coincidente con quello di Marina di Ravenna) e 0.21 m per la Baiona. In quest'ultimo caso il valore inferiore della deviazione standard può



probabilmente essere messo in relazione con l'ampiezza inferiore dell'oscillazione della marea che si registra all'interno della laguna rispetto all'oscillazione nel bacino portuale, anche se quantitativamente la minima differenza che si riscontra è poco significativa rispetto alle differenze macroscopiche che invece si osservano mettendo a confronto le oscillazioni dei livelli (Figura 2.13).

Infine, in Tabella 2.5 sono riportati i valori medi mensili della marea. Gli stessi dati sono riportati graficamente in Figura 2.12. Dal grafico si evince che i dati delle due nuove stazioni mareografiche sono ben allineati con quelli della stazione di Marina di Ravenna. Infatti, le differenze sui valori medi mensili sono dell'ordine, al massimo, di 2÷3 cm.

La successiva Figura 2.13 riporta le serie complete dei dati misurati dalle due stazioni. La stessa figura riporta anche il confronto tra le misure delle due stazioni e la misura della stazione di Marina di Ravenna, limitatamente al mese di Aprile 2021 che, come si è detto, è il mese di riferimento per le simulazioni modellistiche.

Da quest'ultimo grafico si evince in particolare che, mentre il segnale della stazione del Piombone è abbastanza ben allineato con quello di Marina di Ravenna, il segnale della stazione della Baiona risulta apprezzabilmente attenuato in quanto ad ampiezza dell'oscillazione e caratterizzato da un non trascurabile ritardo di fase.

Questo risultato, che sarà meglio esaminato mediante le simulazioni modellistiche, documenta come gli effetti propagatori di attenuazione della marea risultino molto più accentuati per la Pialassa Baiona rispetto a quello che si osserva per la Pialassa del Piombone.

Statistiche	Piombone	Baiona	Ravenna RMN
dati registrati	27061	27061	30426
dati serie completa	27061	27061	30529
completezza serie	100.00%	100.00%	99.66%
media globale	0.03	0.02	0.04
dev. standard	0.24	0.21	0.24
media gennaio 2021	0.18	0.17	0.18
media febbraio 2021	0.08	0.05	0.08
media marzo 2021	-0.09	-0.12	-0.11
media aprile 2021	0.03	0.02	0.00
media maggio 2021	0.06	0.05	0.03
media giugno 2021	0.03	0.03	0.04
media luglio 2021	0.06	0.04	0.07

Tabella 2.5 – Statistiche delle serie di dati relative al monitoraggio dei livelli idrici del periodo 22/1/2021 – 27/7/2021. Valori espressi in m s.l.m.

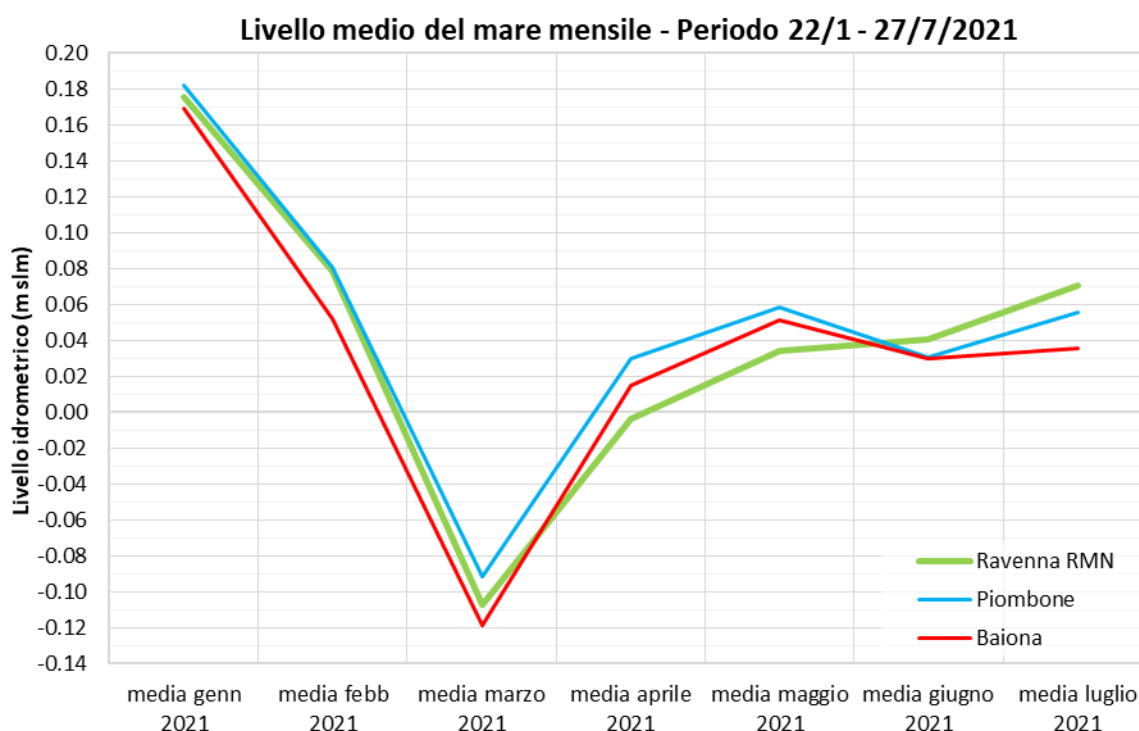


Figura 2.12 – Livello medio mensile ottenuto dal monitoraggio dei livelli idrici del periodo 22/1/2021-27/7/2021.

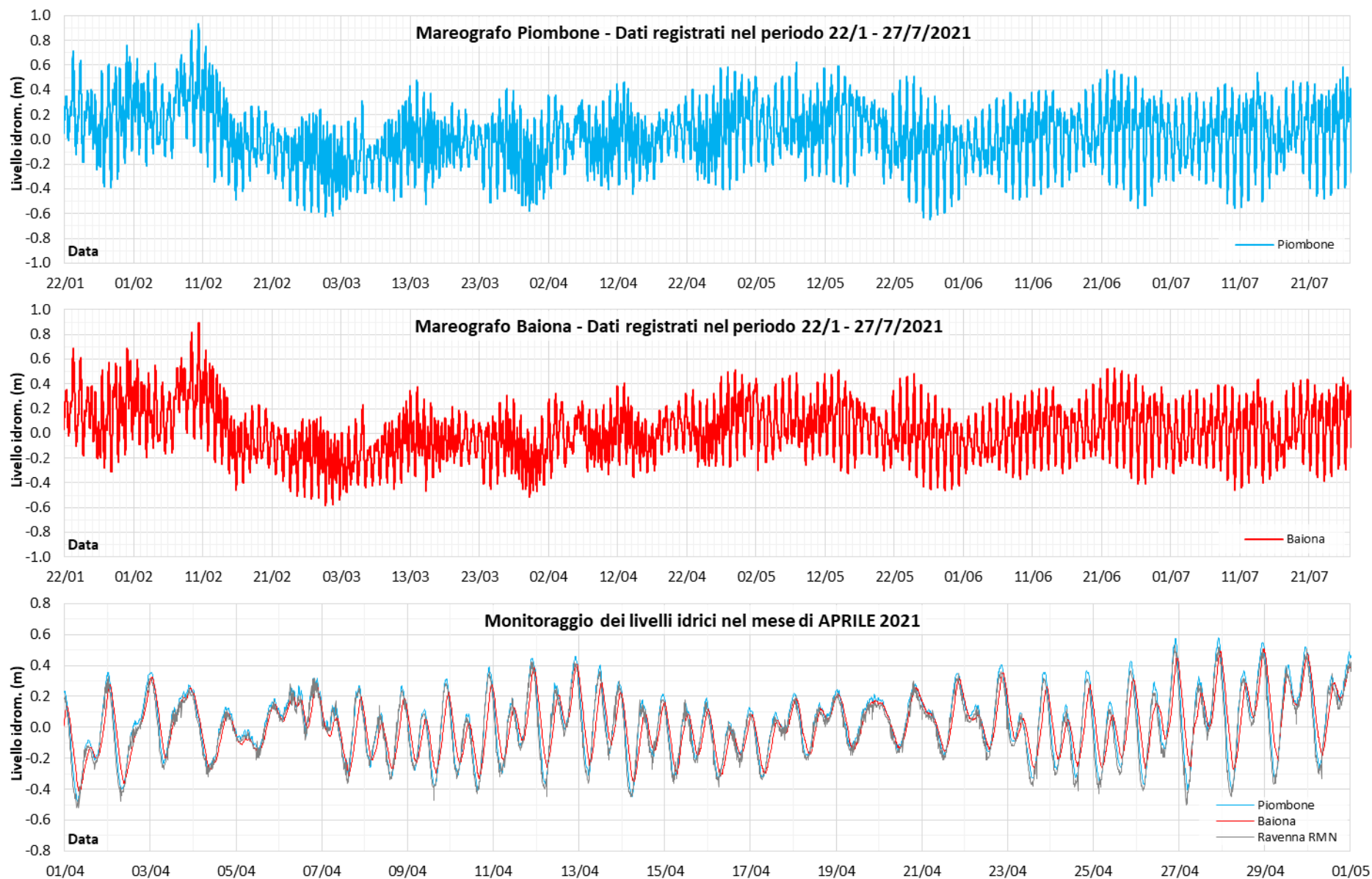


Figura 2.13 – Monitoraggio dei livelli idrici nelle Pialasse Piombone e Baiona nel periodo 22/1/2021- 27/7/2021. In basso particolare del mese di Aprile 2021 con Ravenna RMN.

## **2.3 Campagna di misura di velocità e direzione della corrente del 20/10/2021**

Nell'ambito della metodica M4 del PMAO è prevista una campagna di misura dei campi di velocità nella sezione di imboccatura delle Pialasse. Questa misura era originariamente prevista con l'impiego di correntometro single point da imbarcazione ancorata in diverse stazioni lungo la sezione dell'imboccatura. Le misure sono state, invece, effettuate con un profilatore ADCP manovrato da imbarcazione che consente, rispetto alle misure single point, il rilievo di un campo di velocità molto più dettagliato ed accurato e soprattutto consente una misura molto più rapida e quindi più significativa ai fini delle analisi sugli scambi mareali tra il Canale Candiano e le Pialasse.

Come è illustrato nel seguito della presente relazione (capitolo 4) questi dati costituiscono, insieme ai dati mareografici e correntometrici, l'indispensabile base di riferimento per la verifica e la calibrazione del modello idrodinamico.

In Figura 2.14 è rappresentata la posizione dei transetti correntometrici che sono stati effettuati in corrispondenza delle sezioni di imboccatura delle due Pialasse, in modo da rilevare i flussi mareali che vengono scambiati tra le Pialasse stesse e il C. Candiano per azione della marea. I transetti si trovano, inoltre, a poca distanza dalle sezioni in cui sono collocati i correntometri fissi dell'AdSP (C. Piomboni e P. PIR, si veda la Figura 2.1), rendendo possibile la verifica e la calibrazione delle misure di velocità effettuate dai correntometri fissi con i dati rilevati mediante i transetti ADCP.

I dati del rilievo sono stati forniti allo scrivente dalla ditta esecutrice Te.Ma. snc. In questo paragrafo si riassumono sinteticamente i risultati della campagna di misure, rimandando alla relazione tecnica predisposta dalla stessa ditta esecutrice per tutte le specifiche sulla strumentazione impiegata e sulla metodologia di rilievo, così come per le valutazioni di dettaglio sui dati acquisiti.

Le misure sono state effettuate nella giornata del 20 ottobre 2021, che è stata scelta perché caratterizzata, oltre che da condizioni meteo non perturbate, per le condizioni di marea sizigiale, cioè caratterizzate dalle più ampie escursioni della marea e quindi dalle correnti mareali più intense e significative.

In base ai dati acquisiti dal mareografo di Marina di Ravenna (ISPRA-RMN) la marea nel corso della giornata di misure ha avuto un'escursione di circa 63 cm nella fase crescente (tra le 4:20 e le 10:50) e di circa 71 cm nella fase decrescente (tra le 10:50 e le 17:20).

In Tabella 2.6 sono riportati i valori di portata ottenuti dall'elaborazione dei dati correntometrici. Le portate sono ottenute, in pratica, operando l'integrale delle misure di corrente effettuate durante ciascun transetto. I dati riportati in tabella costituiscono la media delle misure effettuate per ciascuna sezione, che sono ottenute generalmente effettuando 2 transetti per ogni misura (uno in andata e uno in ritorno). L'orario indicato in tabella si riferisce all'ora centrale per ciascuna misura.

I successivi grafici di Figura 2.15 e Figura 2.16 riportano l'andamento nel tempo delle stesse misure di portata, in sovrapposizione con l'andamento della marea nella giornata di misure. Quest'ultimo dato è stato ottenuto dalla serie fornita dal mareografo RMN di Marina di Ravenna, opportunamente regolarizzata (si veda la parte iniziale del cap. 4).

Dai grafici si evince in primo luogo che esiste una buona correlazione tra l'andamento della marea e l'andamento delle portate misurate, che corrispondono ai flussi scambiati tra il Canale Candiano e Le Pialasse. Si osserva infatti che i valori massimi del flusso entrante dal Canale Candiano nelle Pialasse (portate positive) si verificano in corrispondenza o poco dopo la fase in cui la velocità di crescita della marea è massima (tra le 7:30 e le 8:30 del mattino). Viceversa, i valori massimi del flusso uscente dalle Pialasse verso il C. Candiano (portate negative) si verificano in corrispondenza o poco dopo la fase in cui la velocità di decrescita della marea è massima (tra le 13:30 e le 14:30).

In termini quantitativi, i dati riportati in Tabella 2.6 indicano portate massime in flusso entrante pari a circa 262 m<sup>3</sup>/s nel C. Baiona e a circa 139 m<sup>3</sup>/s nel C. Piombone, mentre le portate massime in flusso uscente valgono circa 287 m<sup>3</sup>/s nel C. Baiona e circa 117 m<sup>3</sup>/s nel C. Piombone. Questi valori non sono esattamente corrispondenti ai valori massimi delle portate scambiate nel corso della giornata, dal momento che, necessariamente, le misure sono state effettuate ad orari prestabiliti e non rappresentano con continuità l'andamento delle portate stesse. Le analisi modellistiche riportate nel seguito, che sono "tarate" anche sulla base delle misure qui riportate (par. 4.3) forniscono perciò un utile complemento per supportare e integrare queste valutazioni.

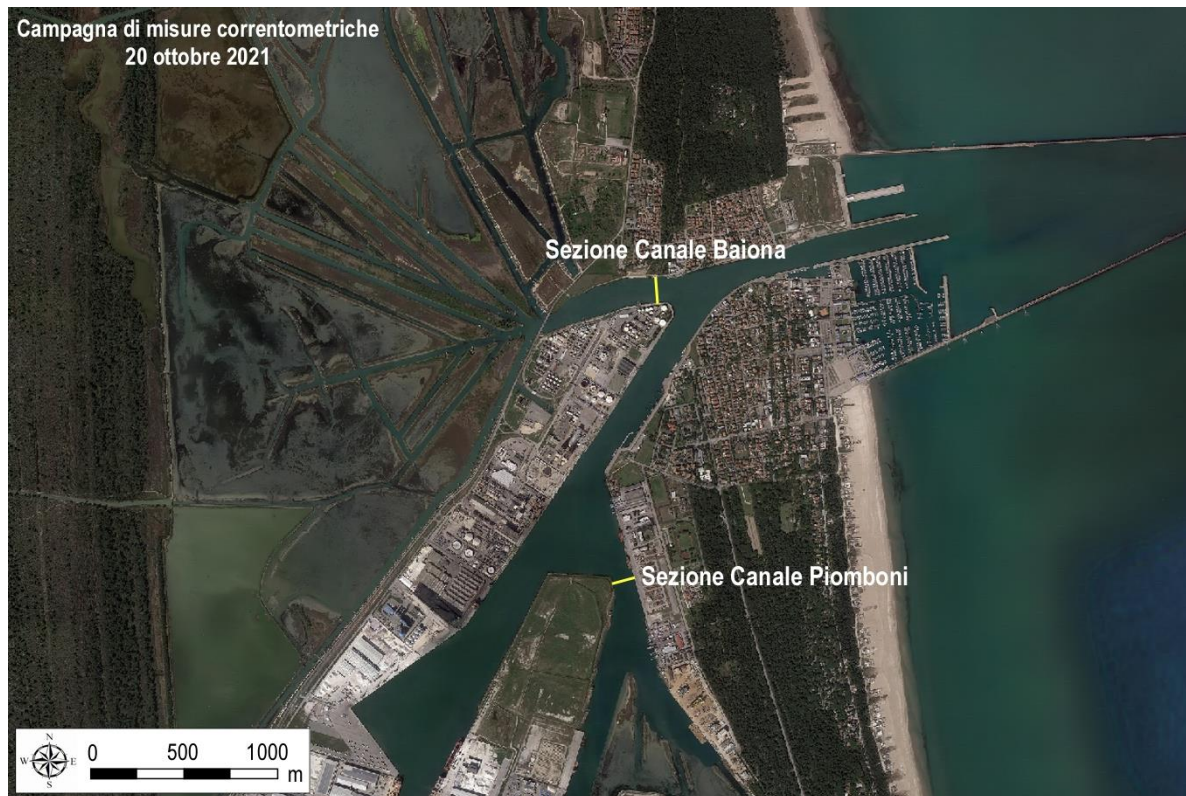


Figura 2.14 – Posizione delle sezioni indagate nella campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021.

Sezione Canale Baiona		Sezione Canale Piomboni	
Orario	Q (m <sup>3</sup> /s)	Orario	Q (m <sup>3</sup> /s)
<b>8:24</b>	<b>261.7</b>	<b>7:53</b>	<b>139.1</b>
10:14	205.4	9:55	68.9
12:38	-212.5	12:14	-100.2
<b>14:28</b>	<b>-286.6</b>	<b>14:04</b>	<b>-116.8</b>
15:14	-273.7	14:54	-107.5
15:33	-261.9	15:54	-78.7

Tabella 2.6 – Valori di portata misurati durante la campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021.

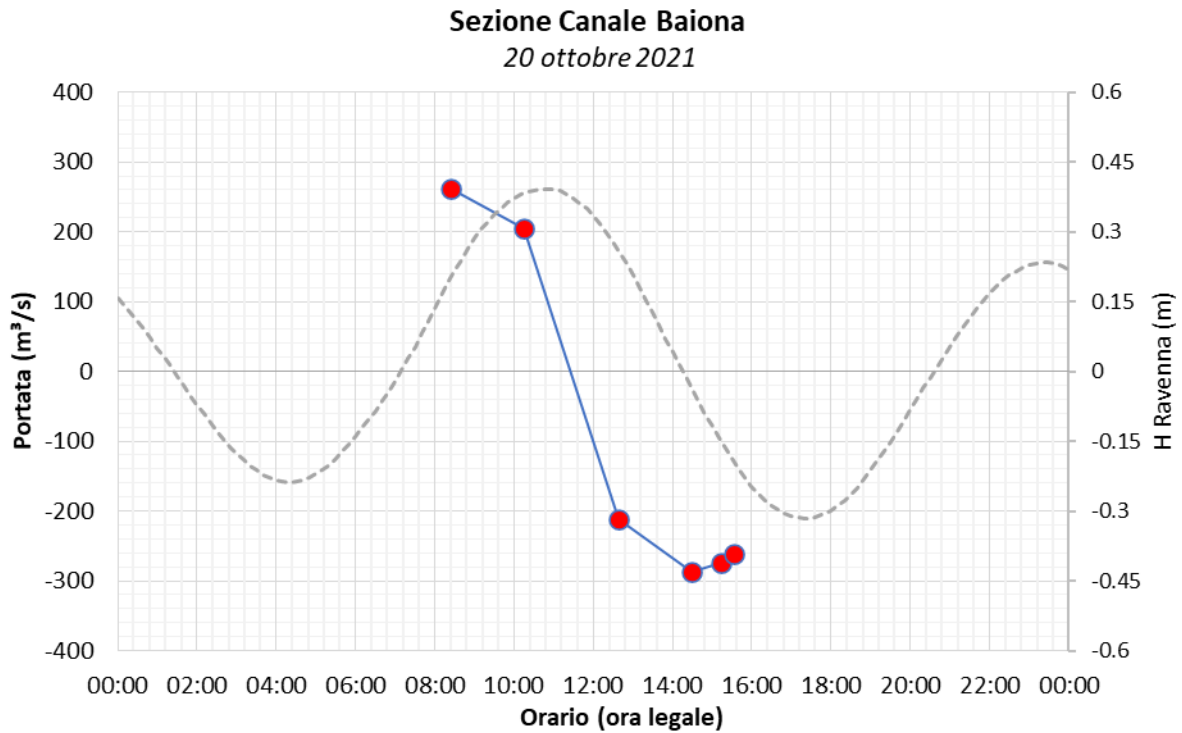


Figura 2.15 – Campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021: portate misurate sulla sezione del Canale Baiona sovrapposte all'andamento della marea.

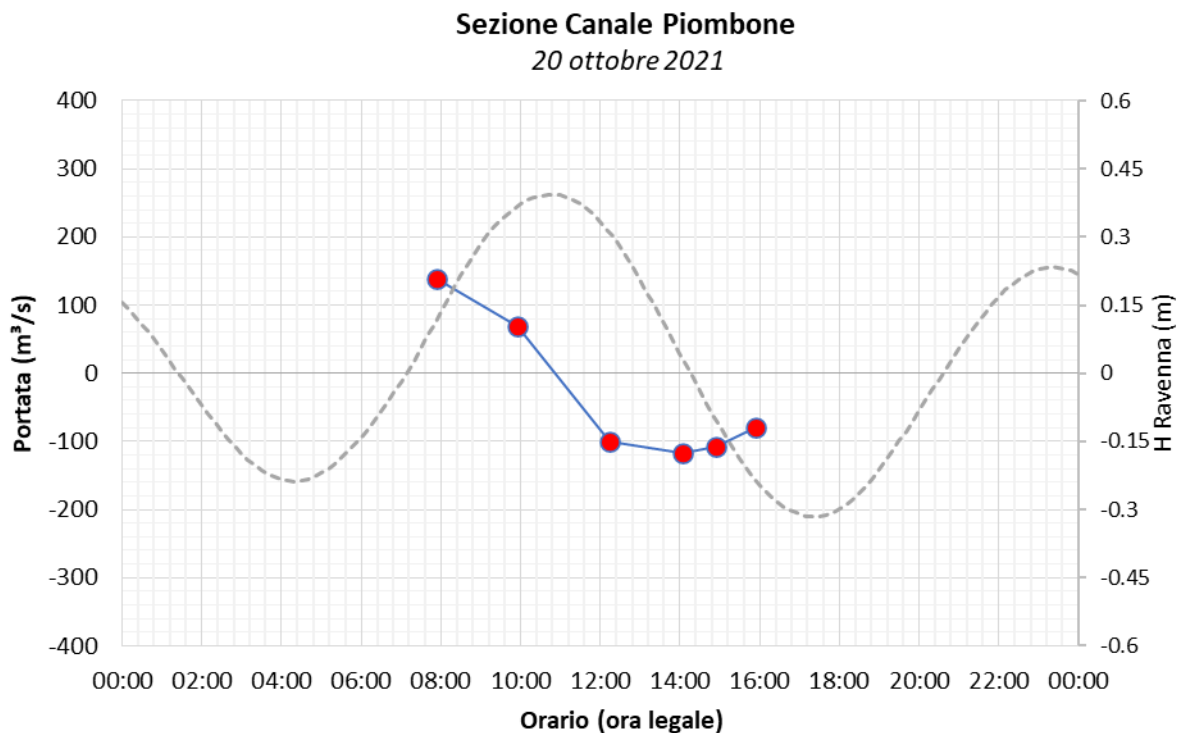


Figura 2.16 – Campagna di misure correntometriche del 20 ottobre 2021: portate misurate sulla sezione del Canale Piombone sovrapposte all'andamento della marea.

### 3 Implementazione del modello matematico

#### 3.1 Dati topografici e batimetrici

Le simulazioni modellistiche utilizzate per la rappresentazione del campo idrodinamico sono principalmente basate sulla schematizzazione dei fondali e delle aree semi-emerse del sistema portuale costituito dal Canale Candiano e dalle due Pialasse (Baiona e Piombone) ad esso idraulicamente collegate.

I dati geometrici disponibili, che sono stati impiegati per la costruzione del modello bidimensionale, sono stati i seguenti:

- Rilievo eseguito con tecnica laser scanner (volo LIDAR) nell'ambito del Piano Straordinario di Telerilevamento dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, fornito sotto forma di quadri con risoluzione 1x1 m e 2x2 m di tipo DTM (Digital Terrain Model) e DSM (Digital Surface Model). L'intervallo temporale di acquisizione dei dati va dal 2008 al 2010. Si tratta di dati topografici che consentono di descrivere con notevole dettaglio l'altimetria delle aree rilevate ma i dati raccolti sono validi solo per le aree emerse, non essendo possibile acquisire alcun dato al di sotto della superficie dell'acqua. Fortunatamente, in questo caso i dati LIDAR sono stati rilevati in condizioni di marea relativamente bassa per cui i dati stessi sono validi all'incirca fino alla quota 0.0 m s.l.m..

In Figura 3.1 è riportato il dataset relativo al volo Lidar MATTM per la zona del sistema portuale di Ravenna. Questi dati sono stati utilizzati per la quotatura altimetrica dei cordoni barenicoli presenti nella Pialassa Baiona.

- Rilievi batimetrici eseguiti dall'Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico centro settentrionale – Porto di Ravenna e trasmessi agli scriventi con lettera n. protocollo 0002044 del 15/03/2021 sotto forma di tabella excel contenente un foglio che rappresenta un campionamento estratto da rilievi batimetrici, riguardanti tutta l'area portuale e le aree limitrofe, quali le Pialasse.

In Figura 3.2 è riportata una parte del dataset complessivo relativa ai dati raccolti esternamente ai moli foranei, utilizzata per definire la batimetria in mare del modello. I dati relativi al Canale Candiano e alle Pialasse non sono stati utilizzati in quanto superati dai rilievi che si descriveranno nel seguito.

- Rilievi batimetrici recenti del Canale Candiano e delle Pialasse Baiona e Piombone. Per il Canale Candiano i rilievi sono stati eseguiti dalla Direzione Tecnica dell'AdSP per la redazione della Carta dei fondali del Porto di Ravenna e trasmessi agli scriventi con lettera n. protocollo 0002044 del 15/03/2021 sotto forma di tavole dwg georeferenziate. I rilievi batimetrici sono stati realizzati tra il 2011 e il 2020, anche se in massima parte sono stati raccolti dopo gennaio 2019.
- Rilievo batimetrico di dettaglio dei canali e dei bassifondi delle Pialasse Baiona e Piombone eseguito nell'ambito del PMAO (Monitoraggio morfodinamico, metodica M6). Questo rilievo è stato eseguito nella primavera 2021. I dati sono stati raccolti tramite ecoscandaglio single-beam e sono stati restituiti come triplette di punti recanti le coordinate planimetriche e la relativa quota.

In Figura 3.2 è riportato il dataset complessivo costituito dai rilievi del Canale Candiano 2011-2020 e da quelli delle Pialasse eseguiti nel 2021. I dati sono stati utilizzati per definire le quote batimetriche del modello nelle aree coperte da tali rilievi.



- Rilievo aerofotogrammetrico della Pialassa Piombone eseguito mediante volo con drone nella primavera del 2021 nell'ambito del PMAO (Monitoraggio morfodinamico, metodica M6). Si tratta di dati topografici che consentono di descrivere in modo molto dettagliato l'altimetria delle aree emerse delle zone rilevate. Il dataset è inoltre completato da una ortofoto ad alta risoluzione (5 cm al suolo) scattata contestualmente al rilievo altimetrico. Il rilievo altimetrico è stato fornito come nuvola di punti in formato "las" mentre l'ortofoto come una serie di quadri in formato "tiff" georeferenziati.

In Figura 3.4 è riportato il dataset complessivo composto dal rilievo altimetrico e dall'ortofoto. Questi dati sono stati utilizzati per definire le quote delle aree emerse e semi-emerse della Pialassa Piombone e, per quanto riguarda l'ortofoto, per schematizzare in modo corretto i varchi e le aperture (ad esempio sui palancolati) attualmente presenti nella Pialassa suddetta.

Nella giornata del 14 settembre 2021 è stato effettuato un sopralluogo con imbarcazione alla Pialassa Baiona per valutare alcuni punti di collegamento tra il sistema dei canali e i chiari del Paradiso e dell'Inferno, informazioni altrimenti non reperibili dai precedenti dataset. In Figura 3.7 e Figura 3.8 sono riportate due foto di tali collegamenti scattate durante il sopralluogo.

Tutti i dati topografici e batimetrici utilizzati sono stati assemblati in modo da rendere coerente il sistema di riferimento utilizzato per i dati stessi e per la modellazione, che nello specifico è il sistema RDN2008-UTM32N.

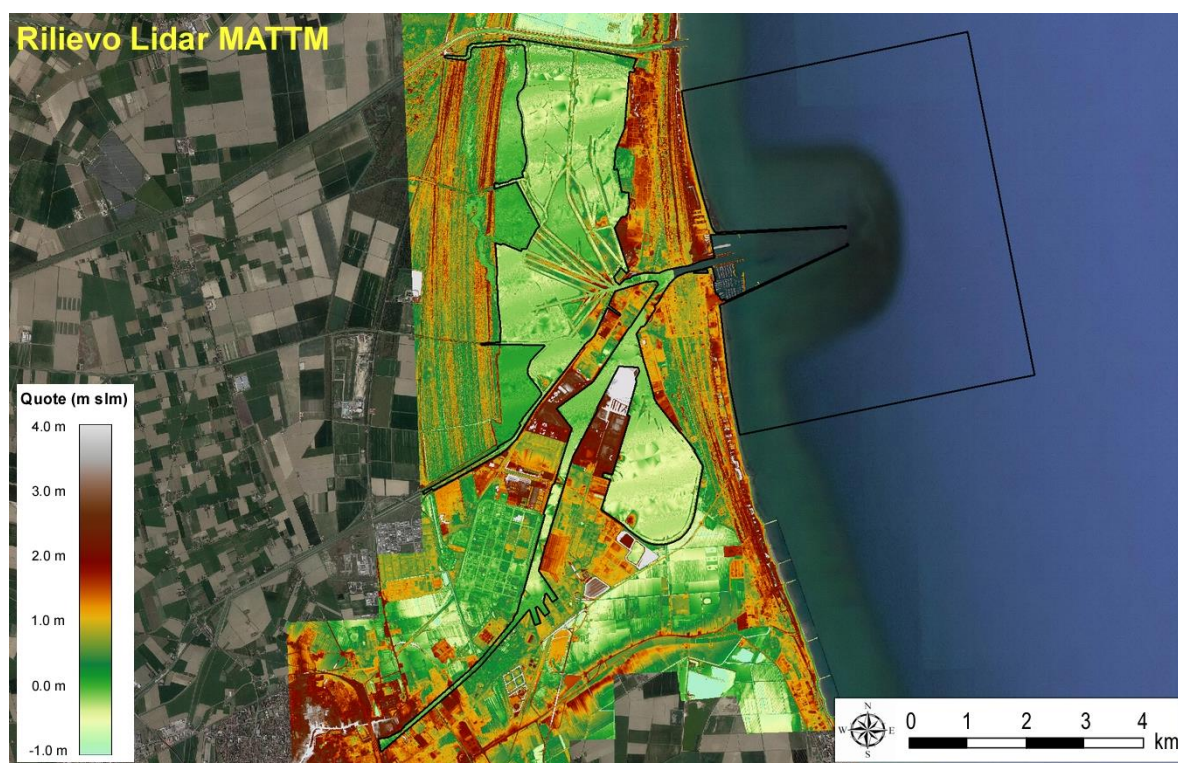


Figura 3.1 – Rilievo Lidar MATTM 2008-2010 nell'area di interesse. In nero è indicato il contorno del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse. Base fotografica Google Earth.

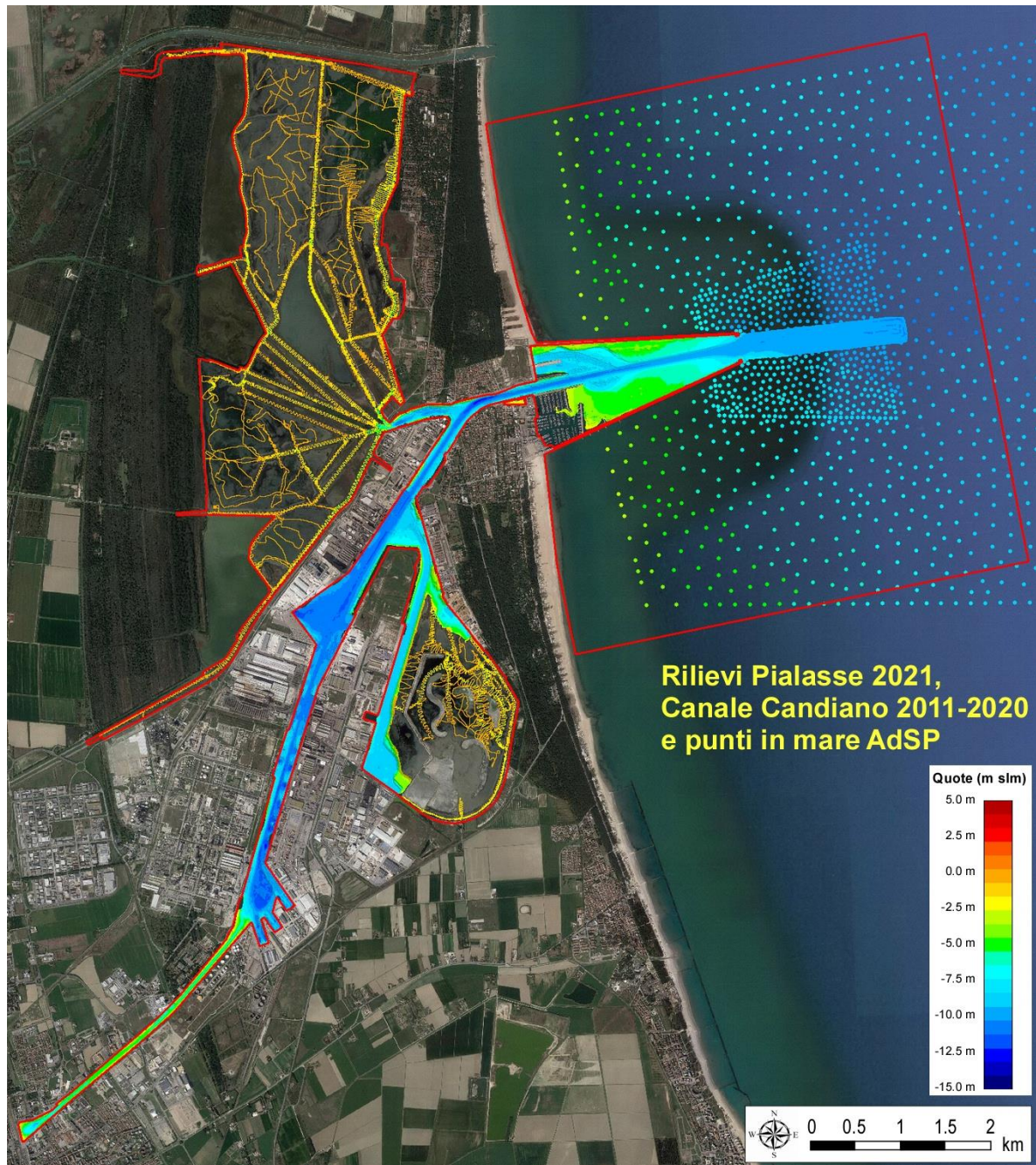


Figura 3.2 – Rilievi batimetrici forniti del bacino portuale e del mare antistante resi disponibili da AdSP. Nella mappa sono indicate anche le strisciate delle batimetrie effettuate nel 2021 nell'ambito del PMAO (metodica M6) e che sono rappresentate in dettaglio nelle figure seguenti. In rosso è indicato il contorno del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse. Base fotografica Google Earth.

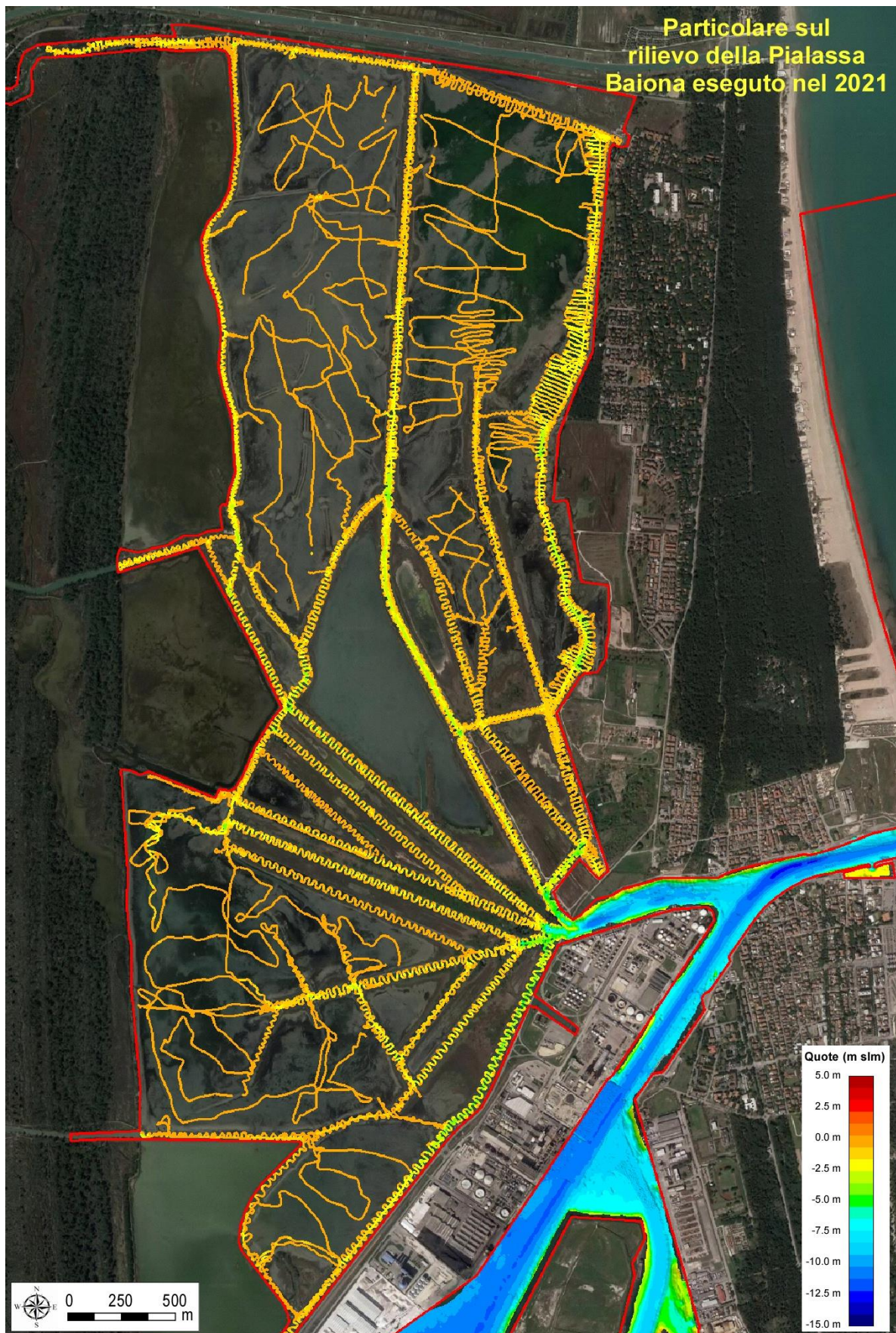


Figura 3.3 – Particolare del rilievo batimetrico eseguito nel 2021 nella Pialassa Baiona nell'ambito del PMAO (metodica M6). Base: Google Earth.

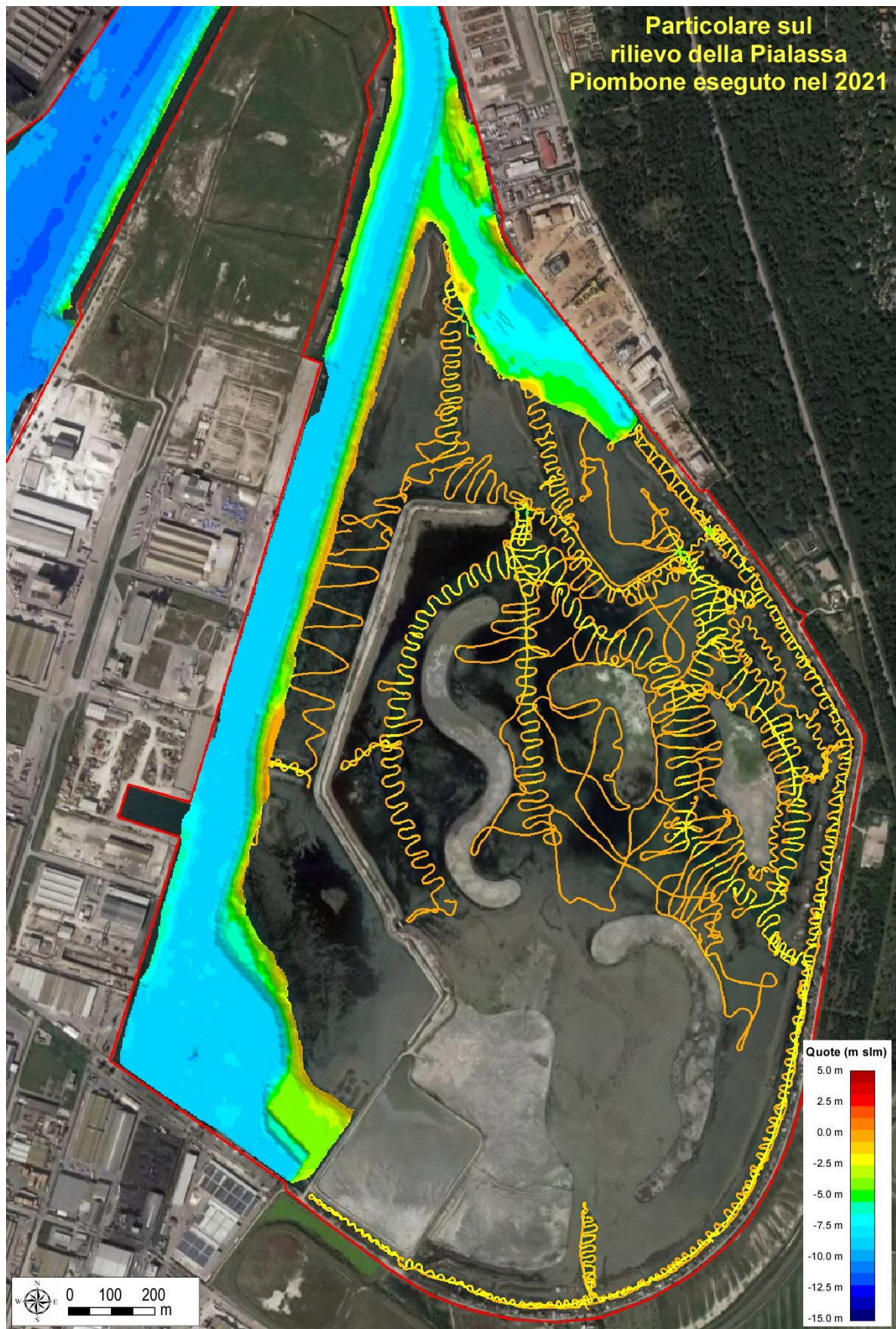


Figura 3.4 – Particolare del rilievo batimetrico eseguito nel 2021 nella Pialassa Piombone nell'ambito del PMAO (metodica M6). Base: Google Earth.



Figura 3.5 – Rilievo aerofotogrammetrico della Pialassa Piombone eseguito con drone nel giugno 2021 in bassa marea nell'ambito del PMAO (metodica M6). Base fotografica Google Earth.

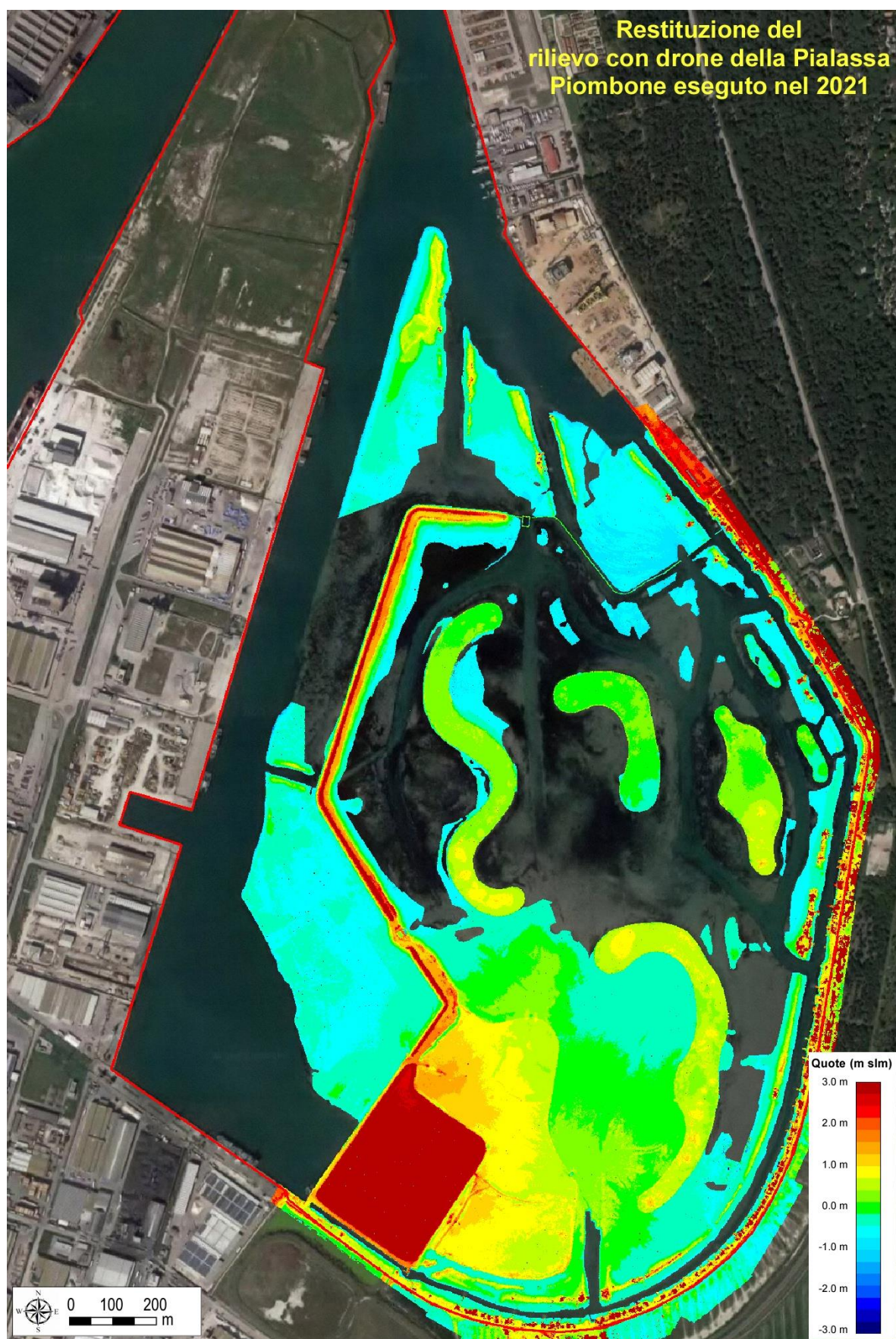


Figura 3.6 – Modello altimetrico ottenuto dal rilievo aerofotogrammetrico della Pialassa Piombone eseguito con drone nel giugno 2021 in bassa marea nell'ambito del PMAO (metodica M6). Base fotografica Google Earth.



*Figura 3.7 – Palassa Baiona, Chiaro del Paradiso: tubo di collegamento con il canale Baccarini. Foto in data 14/09/2021.*



*Figura 3.8 – Palassa Baiona, Chiaro dell'Inferno: varco sul cordone barenicolo con il canale lagunare. Foto in data 14/09/2021.*

## **3.2 Griglia di calcolo**

La griglia di calcolo del modello è stata costruita ex-novo a partire dai dati descritti nel paragrafo 3.1, in particolare i più recenti rilievi batimetrici del Canale Candiano, resi disponibili dall’Autorità di Sistema Portuale, e i rilievi delle due Pialasse effettuati nell’ambito del PMAO (Monitoraggio morfodinamico, metodica M6)

La griglia ad elementi finiti del modello bidimensionale è di tipo non strutturato con maglie triangolari di dimensione variabile, per cui la schematizzazione può essere ottenuta con triangoli di piccole dimensioni (qualche metro) nelle zone di maggior interesse per lo studio, e triangoli molto più grandi (qualche centinaio di metri) nelle aree a morfologia più regolare o dove l’accuratezza necessaria è inferiore

Nel caso in esame, gli specchi d’acqua del canale di accesso tra i moli foranei, il Canale Candiano e il Canale Piomboni, sono stati schematizzati con maglie da 20 m di lato mentre in mare aperto sono stati utilizzati elementi di dimensioni maggiori, con lunghezze dei lati fino a 400 m.

Più complessa è risultata l’attività di schematizzazione delle due Pialasse. Per quanto riguarda la Baiona, oltre ai rilievi batimetrici sopraccitati, corredati dalle informazioni fornite dagli esecutori dei rilievi stessi, sono stati utilizzati i dati LIDAR del Ministero dell’Ambiente (si veda il par. 3.1) e le foto aeree più recenti disponibili in rete, per ricostruire dettagliatamente la mappatura degli arginelli e dei rilevati presenti nella laguna, e di attribuire ad essi quote sommitali corrette. È stato comunque necessario effettuare specifici sopralluoghi (Figura 3.7 e Figura 3.8) per verificare puntualmente la consistenza di alcuni rilevati arginali e soprattutto per verificare l’esistenza e il funzionamento di alcuni manufatti di collegamento che consentono di scambiare acqua tra i canali e alcune valli interne (i cosiddetti “chiari”).

Per quanto riguarda la Pialasse del Piombone, non è stato possibile utilizzare i dati LIDAR perché essi sono antecedenti ai recenti lavori eseguiti nell’ambito del progetto: “Intervento di Risanamento della Pialassa del Piombone e di separazione fisica delle zone vallive dalle zone portuali mediante arginatura artificiale” che è, ad oggi, solo parzialmente completato. Sono risultati fondamentali allo scopo i dati rilevati con il drone in bassa marea nell’ambito della metodica M6 del presente PMAO, ossia l’ortofoto ad alta risoluzione (pixel 5 cm) e il DEM ottenuto con la restituzione aerofotogrammetrica, perché essi hanno consentito di identificare nel dettaglio l’attuale configurazione della Pialassa (3.1). Grazie al rilievo effettuato con il drone, infatti, è stato possibile valutare le quote di tutte le aree semi-emerse ed emerse presenti nella Pialassa, e soprattutto verificare la consistenza delle opere parzialmente eseguite e dei varchi esistenti allo stato di fatto che consentono il passaggio delle correnti.

In definitiva, nelle due Pialasse è stato possibile costruire una griglia molto dettagliata con maglie di dimensioni variabili che hanno lati che vanno da un minimo di 5÷10 m nelle canalizzazioni a dimensioni molto più grandi (fino a 35 m) nei chiari e negli specchi d’acqua più estesi.

Elementi di molto più piccole dimensioni, con lato del triangolo dell’ordine di 2 m, sono stati utilizzati per schematizzare le aperture sui palancolati presenti nei canali della Pialassa Piombone. Maglie dell’ordine dei 5 m sono state utilizzate per rappresentare il nodo in



prossimità del ponte di via Baiona, dove il canale omonimo si divide nei canali che si aprono a raggiera verso la Pialassa.

Per la schematizzazione dei tubi di collegamento del Chiaro del Paradiso con il Canale Baccarini e il Canale Fossatone sono stati utilizzati degli elementi unidimensionali (canali 1D) a sezione circolare.

Complessivamente il dominio di calcolo si estende su una superficie di circa 44 km<sup>2</sup>, ed è costituito da 36744 nodi, 69004 maglie triangolari e 2 tronchi unidimensionali di tipo canale. Esso comprende le Pialasse Baiona e Piombone, il Canale Candiano e la bocca di porto con i moli foranei. Il dominio di calcolo si estende anche ad una porzione di mare antistante estesa fino a circa 5 km dalla linea di costa, necessaria per poter imporre nel modo corretto le principali condizioni al contorno del modello, che sono rappresentate dall'andamento dei livelli in mare.

In Figura 3.9 è rappresentata la griglia ad elementi finiti risultante, mentre in Figura 3.10 è rappresentata la batimetria implementata nel modello bidimensionale.

In Figura 3.10 e Figura 3.11 sono riportati due particolari della batimetria nella Pialassa Baiona e Piombone, raffigurati in modo da evidenziare la complessa morfologia dei fondali lagunari che è stata inserita nella schematizzazione modellistica.

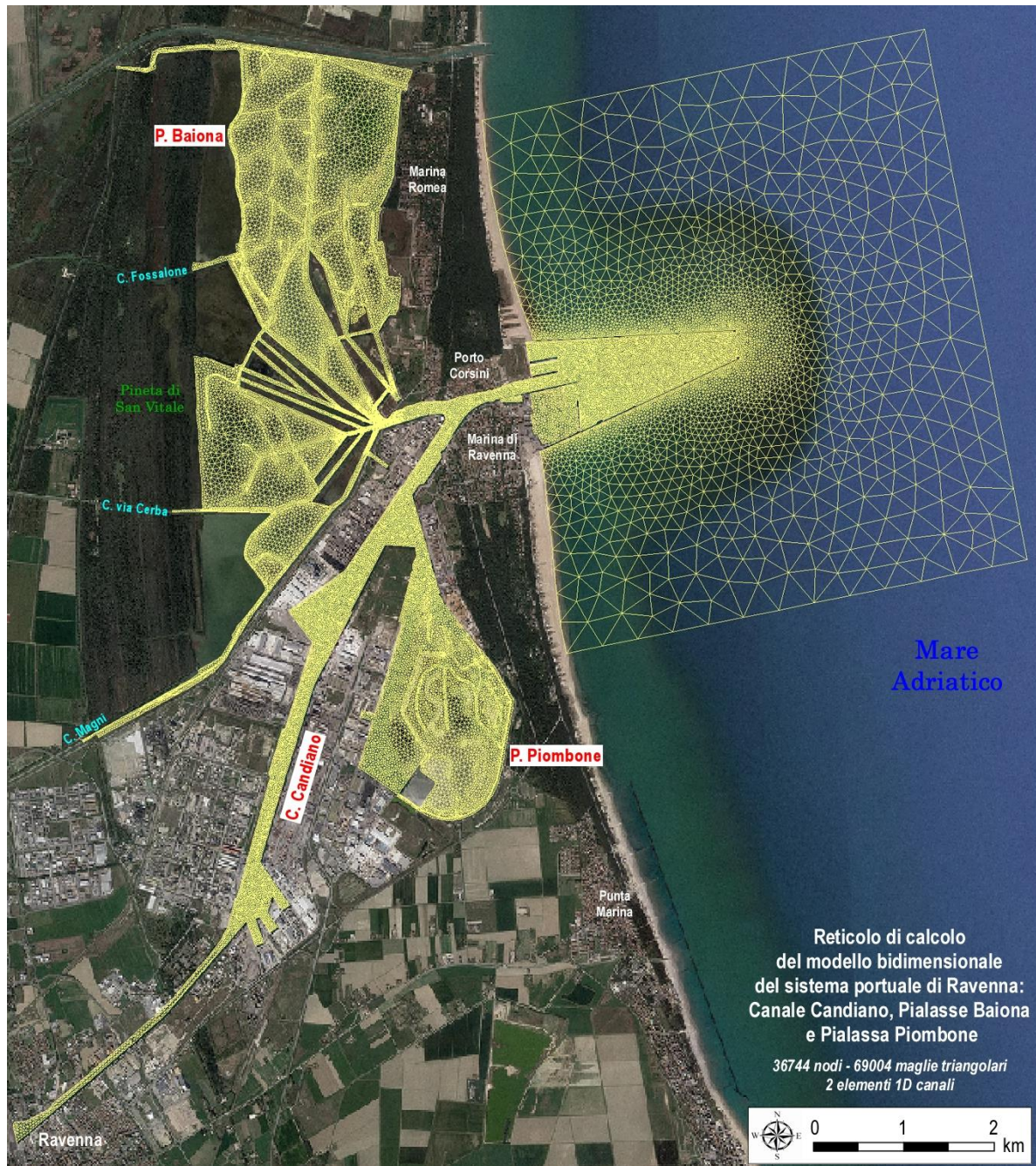


Figura 3.9 – Griglia di calcolo del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Pialasse Baiona e Piombone.

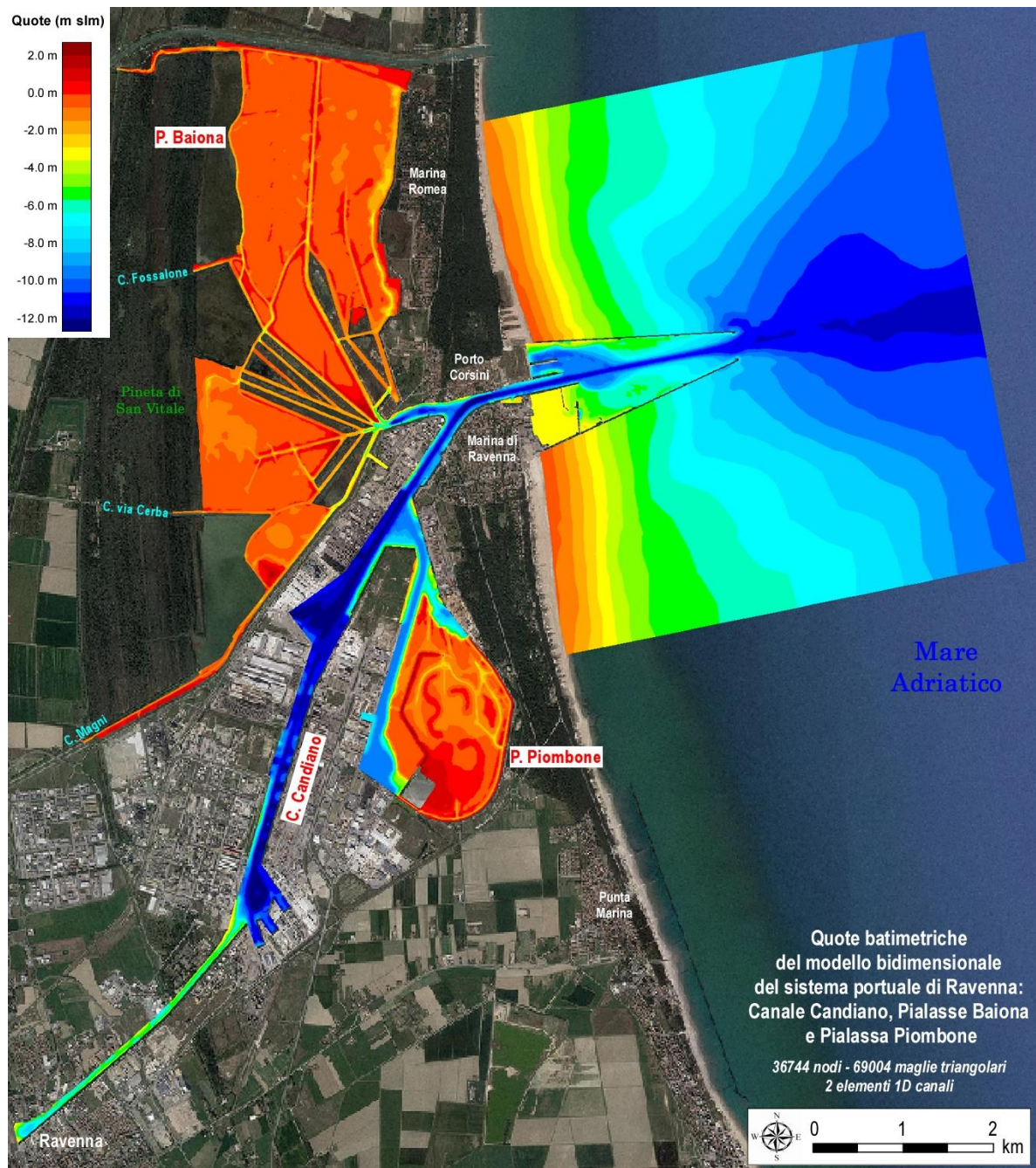


Figura 3.10 – Quote batimetriche del modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna e delle Piasse Baiona e Piombone.

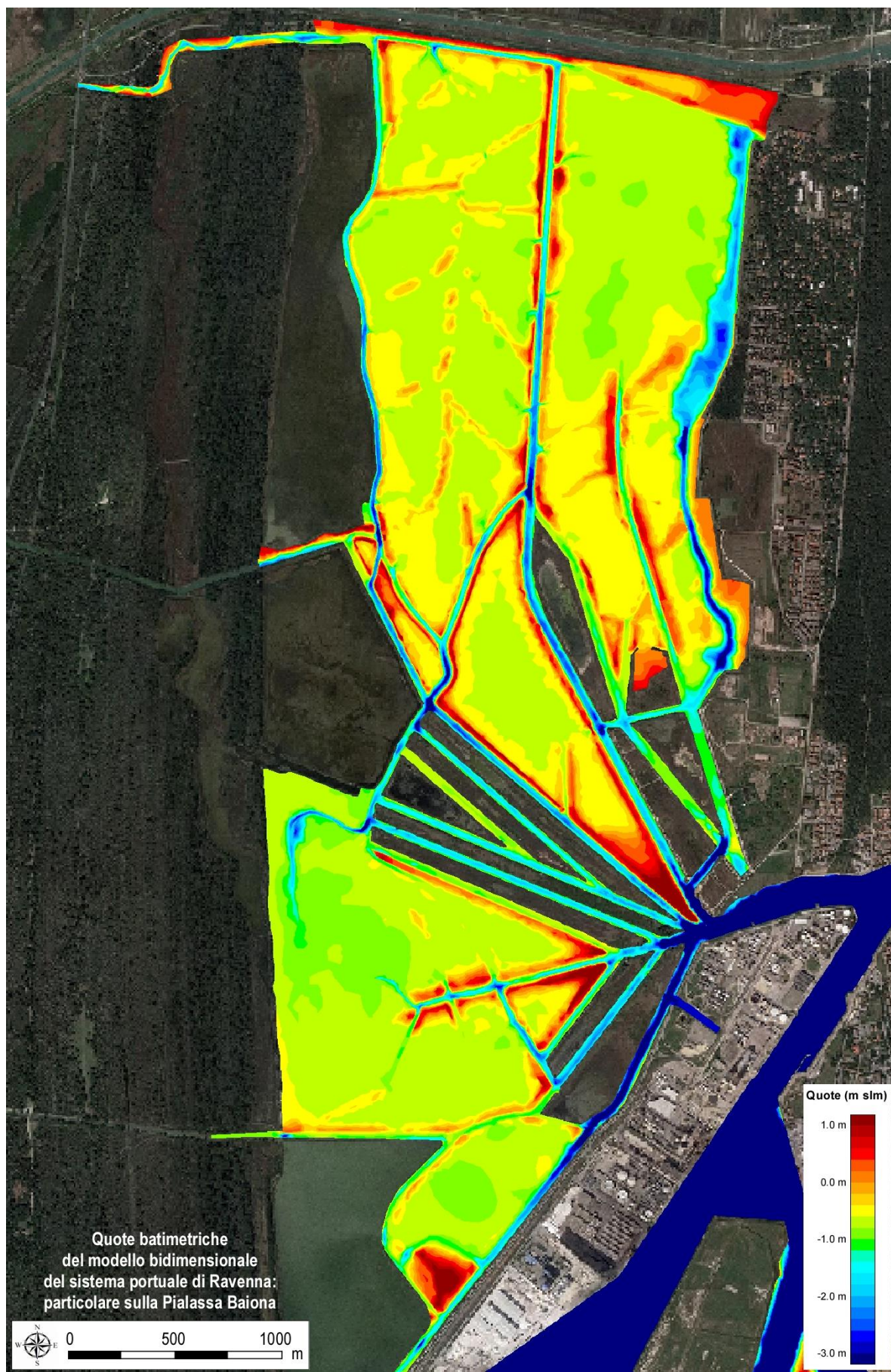


Figura 3.11 – Particolare delle quote batimetriche del modello bidimensionale nella Piasassa Baiona.

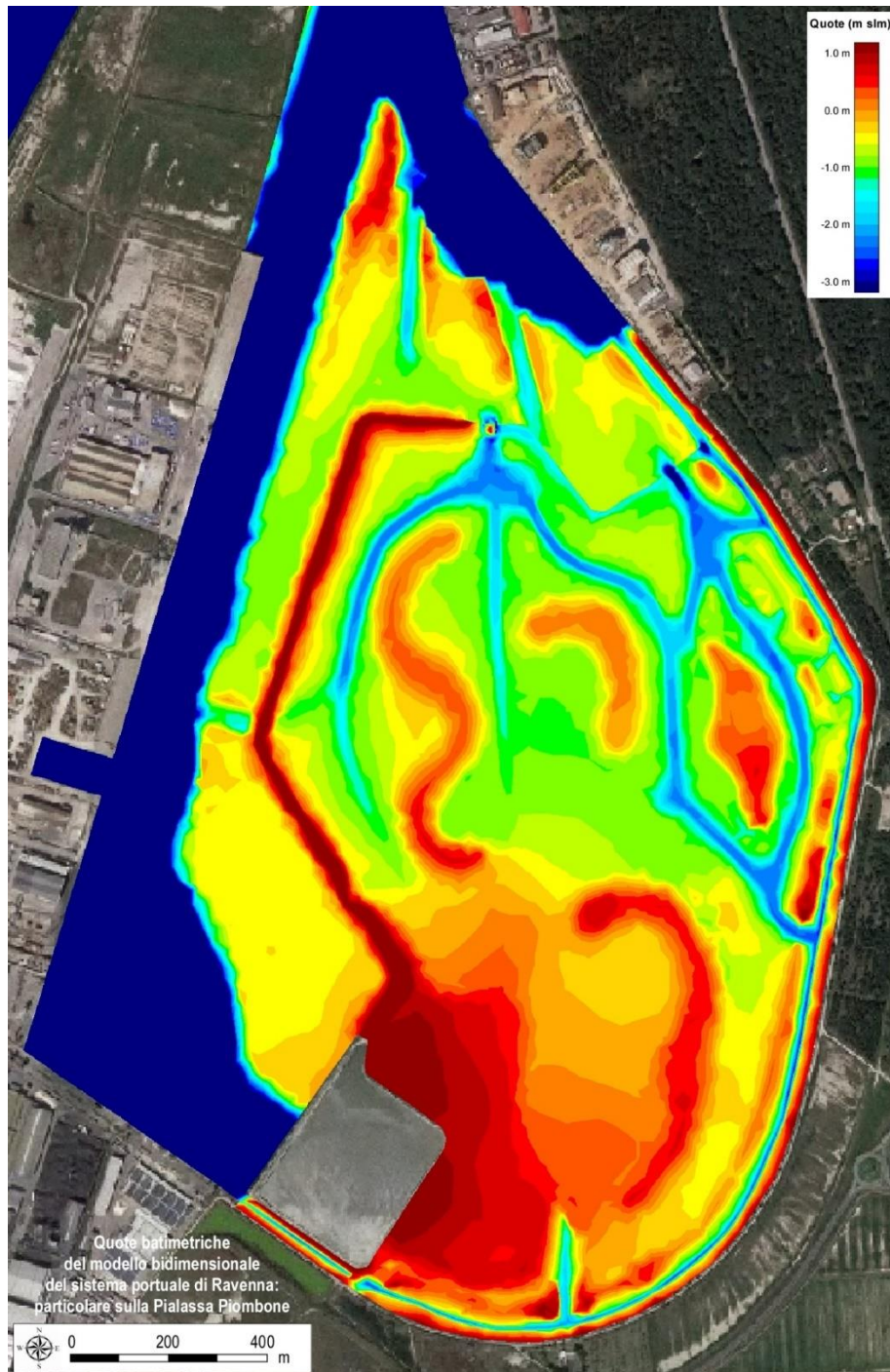


Figura 3.12 – Particolare delle quote batimetriche del modello bidimensionale nella Pialassa Piombone.

La scelta dei coefficienti di scabrezza, che nel modello descrivono i fenomeni di resistenza al moto e che dipendono generalmente dalla morfologia lagunare e dalla granulometria del materiale di fondo, è avvenuta sulla base di alcune simulazioni di taratura per le quali esistono misurazioni e riscontri sui parametri idraulici (registrazioni di livello idrometrico, registrazioni di velocità in punti specifici e campagne di misura della portata).

A partire da altre esperienze e studi redatti dagli scriventi in ambiti lagunari simili a quello analizzato, il set di coefficienti di scabrezza più opportuno da attribuire agli elementi bidimensionali e unidimensionali del modello è stato calibrato in modo tale che la risposta del modello in termini di quote idrometriche, velocità e di portata fosse il più possibile

conforme a quanto misurato nella realtà. I risultati di questa procedura di calibrazione sono riportati nel successivo paragrafo 4.

In Tabella 3.1 sono elencati in sintesi i valori dei coefficienti di scabrezza adottati nel modello bidimensionale, e che sono espressi secondo la formulazione di Strickler.

Zona	Ks
Mare	40
Canale Candiano, Canale Piomboni	40
Canali interni pialasse	27
Bassifondi pialasse	20
Cordoni barenicoli	15
Ponte via Baiona	25
Tubi in calcestruzzo	60
Varchi barene Chiaro dell'Inferno	10

*Tabella 3.1 – Coefficienti di scabrezza secondo Strickler ( $m^{1/3}/s$ ) utilizzati nel modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna.*

## **4 Calibrazione e verifica del modello**

La calibrazione e verifica del modello è stata effettuata mettendo a confronto i risultati del calcolo con i dati sperimentali di livello velocità e portata disponibili, che sono descritti nel precedente capitolo 2. Si tratta sia di dati messi a disposizione dalla Committenza, relativi alla rete di monitoraggio di AdSP, sia di dati appositamente rilevati nell'ambito del Piano di Monitoraggio Ante Operam (metodiche M4 e M5).

I risultati ottenuti sono illustrati nei paragrafi che seguono. Si è fatto in primo luogo riferimento ai dati mareografici e correntometrici disponibili relativi al 2020, descritti nel precedente par. 2.1.1.

Di tale dataset si è considerato il sottoinsieme relativo al mese di aprile 2020, ed è stata effettuata una simulazione per riprodurre l'idrodinamica del sistema per tutto il mese. La scelta di circoscrivere l'analisi ad un solo mese è stata operata per la necessità di contenere entro limiti accettabili l'onere computazionale. Come si è detto, nel periodo disponibile, che va dal 1/2/2020 al 31/8/2020 il mese di aprile è stato ritenuto il più adatto sia perché esso è stato caratterizzato dal livello medio più vicino al livello medio del mare, sia per la completezza delle serie dei dati di tutte le stazioni.

La simulazione è stata effettuata assegnando sui nodi del contorno aperto del dominio di calcolo posti in mare aperto l'andamento, istante per istante, del livello di marea. Il segnale in mare è stato ricostruito sulla base della registrazione della stazione mareografica di Porto Corsini (RMN- ISPRA), mediante una procedura di regolarizzazione. Questa procedura consiste, in primo luogo, nel calcolo della marea astronomica della stazione, che è stato effettuato utilizzando uno specifico codice [13]. In secondo luogo, essa prevede la scomposizione del segnale nella componente astronomica, così calcolata, e nella parte residua (surge), e nella regolarizzazione di quest'ultima componente mediante un'operazione di media mobile. Infine, la procedura prevede che la parte residua regolarizzata sia nuovamente sommata alla componente astronomica per ottenere il segnale finale.

Dato che la stazione di Porto Corsini si trova all'interno della bocca portuale, si era inizialmente ipotizzato di completare la procedura applicando al segnale in mare anche un anticipo temporale. Tuttavia, le simulazioni preliminari hanno messo in evidenza che il ritardo di propagazione tra il segnale in mare e la stazione di Porto Corsini è minimo, per cui la correzione temporale non è stata applicata.

Oltre al livello in mare, la simulazione richiede che sia applicato, come forzante, l'andamento del vento. Nel caso in esame è stata utilizzata la registrazione di intensità e direzione del vento operata dagli strumenti della stessa stazione di Porto Corsini, che è stata applicata come forzante in modo uniforme su tutto il dominio di calcolo.

Il calcolo è stato effettuato con un passo di integrazione costante pari a 4 s, e con un passo di stampa di 1800 s.

La simulazione relativa al mese di aprile 2020 ha consentito di operare la calibrazione dei coefficienti di scabrezza, che sono sostanzialmente i medesimi già adottati dagli scriventi per simulazioni in ambienti lagunari analoghi [1], [2], e che sono differenziati tra l'ambito lagunare, dove le irregolarità morfologiche, i bassi fondali e la presenza di zone parzialmente emerse indicano forti resistenze al moto dell'acqua, e l'ambito marittimo e portuale, dove le profondità sono maggiori e le correnti mareali incontrano minori resistenze al moto

Il confronto con i dati misurati è stato operato sia rispetto ai livelli idrometrici, sia rispetto alla velocità della corrente. Nel primo caso l'accordo tra le misure e il calcolo è risultato molto buono. Tuttavia questo risultato è poco significativo perché le differenze sull'andamento del livello di marea all'interno del bacino portuale sono minime, date le modeste resistenze che l'onda di marea incontra nella sua propagazione dal mare verso l'interno del bacino.

Nel caso delle velocità nelle sezioni del C. Piomboni e del C. Baiona (Punta PIR) il confronto è invece molto significativo ed ha dimostrato che il modello riproduce con buona approssimazione l'andamento delle velocità misurate. È da tenere presente, al riguardo che, per poter confrontare il valore della velocità misurata, che è stata rilevata alla profondità di circa 1 m dalla superficie, il valore della velocità calcolata dal modello bidimensionale, che rappresenta invece la velocità media su tutta la verticale, è stato incrementato del 12% in accordo con la classica ipotesi che il profilo di velocità segua un andamento logaritmico lungo la verticale e tenendo conto della profondità delle sezioni in cui sono posizionati i correntometri, che è dell'ordine di 10 m.

#### **4.1 Confronto con i dati mareografici e correntometrici di Aprile 2020**

I grafici di Figura 4.1 mettono a confronto le velocità calcolate e misurate nel corso della simulazione in corrispondenza delle 3 stazioni di misura considerate. I grafici riportano le coppie di valori del modulo della velocità selezionate a passo di ½ ora per tutto il mese di aprile 2020. I dati di velocità misurata considerati per il confronto non sono quelli grezzi forniti dagli strumenti, ma sono quelli regolarizzati con media mobile (si veda il par. 2.1.1).

Dai grafici emerge che la correlazione tra le misure e il calcolo è molto buona per la stazione Molo Guardiano Sud ( $R^2=0.9394$ ), degrada leggermente per la stazione Punta PIR ( $R^2=0.8606$ ) ed è meno buona per Canale Piomboni ( $R^2=0.5958$ ). Si ottiene cioè che l'accuratezza del modello risulta massima nel canale portuale, dove le correnti sono più intense e il segnale fornito dallo strumento di misura è molto più regolare (si veda il par. 2.1.1).

Per valutare la bontà dell'adattamento tra le misure e il calcolo è stato valutato anche l'indice ME (Nash-Sutcliffe Model Efficiency), che si calcola con la formula seguente:

$$ME = 1 - \frac{\sum_i (d - m)^2}{\sum_i (d - D)^2}$$

dove  $d$  sono i dati misurati,  $m$  sono i corrispondenti dati calcolati dal modello e  $D$  è la media dei dati misurati. Un indice  $ME = 1$  si riferisce ad una perfetta corrispondenza tra i dati osservati e quelli modellati. Tipicamente la corrispondenza si considera:

- $ME > 0.65$  : eccellente
- $ME = 0.65 \div 0.50$  : molto buona
- $ME = 0.50 \div 0.20$  : buona
- $ME \leq 0.20$  : scarsa

Nel caso delle tre stazioni considerate, l'adattamento risulta "eccellente" per Molo Guardiano e Punta PIR, e "molto buono" per Canale Piomboni.

Pur potendosi ritenere i risultati più che accettabili, nel dettaglio si osserva che per tutti e tre i grafici gli scostamenti maggiori si rilevano sulla punta e sulla coda della nuvola di punti, ossia sui valori dei colmi e cavi di marea. Inoltre, per C. Piomboni lo scostamento tra le



misure e il calcolo è più evidente nel quadrante delle velocità negative, il che indica che il modello generalmente sottostima il valore della massima velocità negativa (in flusso uscente).

Si deve tenere presente, al riguardo, la già evidenziata irregolarità dei dati forniti dagli strumenti di misura che, pur trattati con un'operazione di media mobile, forniscono spesso valori anomali molto elevati di velocità soprattutto nelle fasi di massimo flusso e riflusso della marea (si veda il par. 2.1.1). Oltre agli inevitabili errori del modello, ed al fatto che la schematizzazione modellistica non è sempre in grado di descrivere accuratamente eventuali anomalie locali del campo di moto, non si può escludere che queste discrepanze possano essere ricondotte almeno in parte ad errori strumentali.

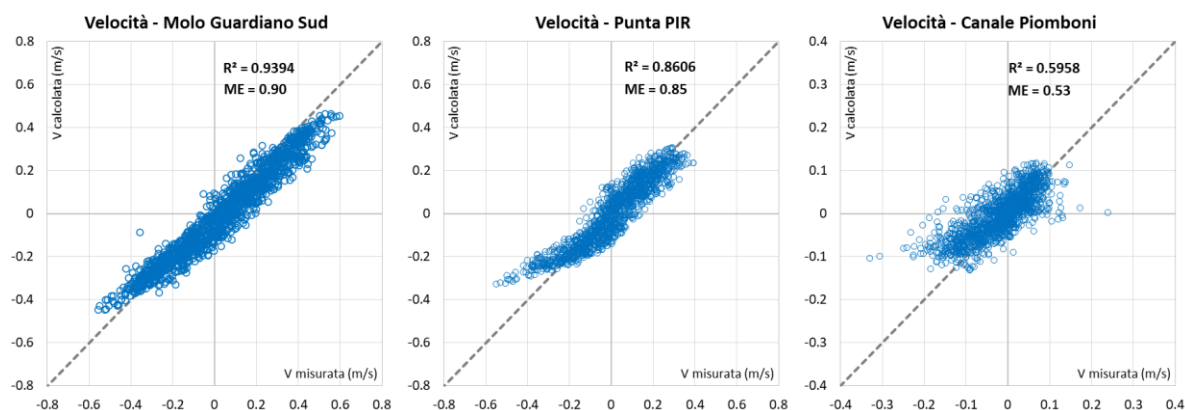


Figura 4.1 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2020 al Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni.

Molto buona è invece la corrispondenza tra le misure e il calcolo per quel che riguarda i livelli di marea (Figura 4.2). Per tutti e tre gli strumenti considerati, infatti, sia l'indice  $R^2$  che l'indice ME sono assai prossimi all'unità. In effetti, come si è detto, gli effetti propagatori nella dinamica mareale all'interno del canale portuale sono molto modesti, in virtù dei fondali profondi e delle velocità modeste delle correnti di marea, per cui il livello di marea tra un punto e l'altro del bacino varia di poco. Il modello riproduce bene questa circostanza per cui gli errori rispetto alle misure sono minimi.

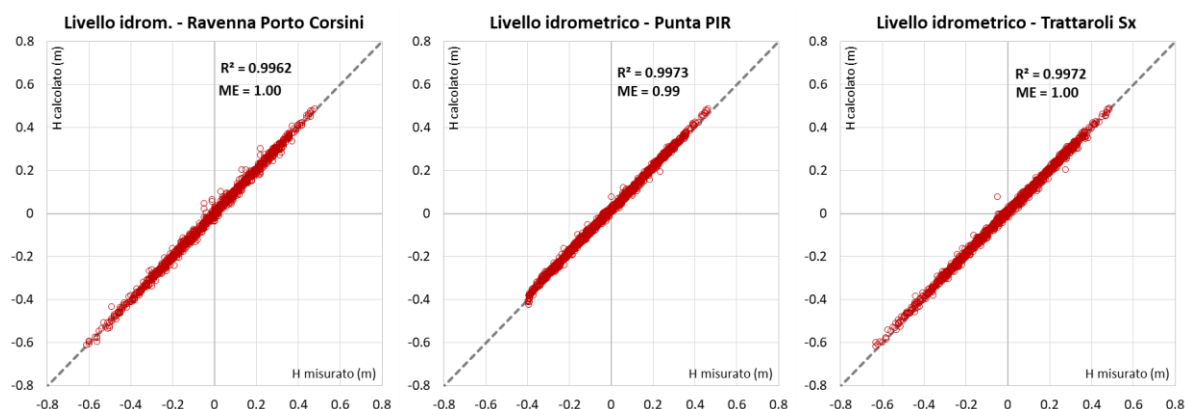


Figura 4.2 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2020 a Ravenna Porto Corsini, Punta PIR e Trattaroli Sx.

I successivi grafici di Figura 4.3 riportano in forma estesa il confronto tra le velocità e misurate e calcolate nelle 3 stazioni per tutto il mese di aprile 2020.

Analogamente, i grafici di Figura 4.4 riportano il confronto per i livelli di marea.



Figura 4.3 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2020 a Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni.



Figura 4.4 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2020 a Ravenna Porto Corsini, Punta PIR e Trattaroli Sx.

## 4.2 Confronto con i dati mareografici e correntometricri di Aprile 2021

I grafici di Figura 4.5 mettono a confronto le velocità calcolate e misurate nel corso della simulazione in corrispondenza delle 3 stazioni di misura considerate. I grafici riportano le coppie di valori del modulo della velocità selezionate a passo di ½ ora per tutto il mese di aprile 2021. I dati di velocità misurata considerati per il confronto non sono quelli grezzi forniti dagli strumenti, ma sono regolarizzati mediante media mobile (si veda il par. 2.1.2).

Come nel caso precedente, relativo al mese di aprile 2020, anche in questo caso dai grafici emerge che la correlazione tra le misure e il calcolo è molto buona per la stazione Molo Guardiano Sud ( $R^2=0.9318$ ), degrada leggermente per le stazioni Punta PIR ( $R^2=0.8389$ ) ed è meno buona per Canale Piomboni ( $R^2=0.5536$ ). Il risultato è sostanzialmente il medesimo che si è ottenuto per aprile 2020 e conferma che l'accuratezza del modello risulta massima nel canale portuale, dove le correnti sono più intense e il segnale fornito dallo strumento di misura è molto più regolare (si veda il par. 2.1.1).

Con riferimento all'indice ME precedentemente descritto, l'adattamento tra valori simulati e dati misurati risulta "eccellente" per Molo Guardiano e Punta PIR, e "molto buono" per Canale Piomboni.

Pur potendosi ritenere i risultati più che accettabili, nel dettaglio si osserva che per tutti e tre i grafici gli scostamenti maggiori si rilevano sulla punta e sulla coda della nuvola di punti, ossia sui valori dei colmi e cavi di marea. Inoltre, per C. Piomboni è lo scostamento tra le misure e il calcolo è più evidente nel quadrante delle velocità negative, il che indica che il modello generalmente sottostima il valore della massima velocità negativa (in flusso uscente).

Si deve tenere presente, al riguardo, la già evidenziata irregolarità dei dati forniti dagli strumenti di misura che, pur trattati con media mobile, forniscono spesso valori molto elevati di velocità soprattutto nelle fasi di massimo flusso e riflusso della marea (si veda il par. 2.1.2). Oltre agli inevitabili errori del modello, ed al fatto che la schematizzazione modellistica non è sempre in grado di descrivere accuratamente eventuali anomalie locali del campo di moto, non si può escludere che queste discrepanze possano essere ricondotte almeno in parte ad errori strumentali.

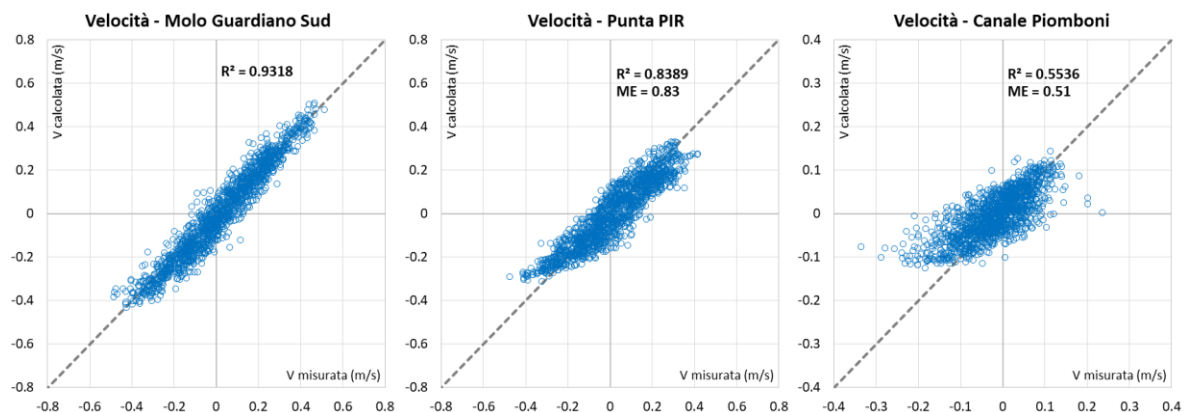
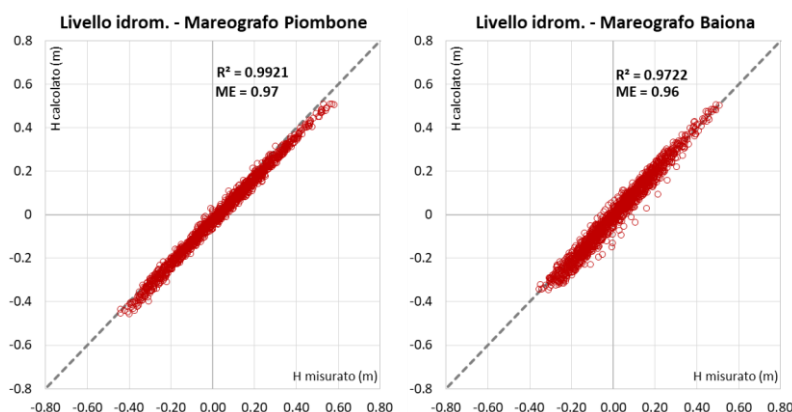


Figura 4.5 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2021 al Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni.

Per quanto riguarda i livelli di marea, non si riportano qui per brevità i risultati ottenuti per le stazioni ubicate nel bacino portuale le quali, analogamente al caso precedente di aprile 2020, indicano una corrispondenza quasi perfetta tra le misure e il calcolo. In Figura 4.6 si

riporta, invece, il confronto ottenuto sulle stazioni ubicate all'interno delle Pialasse Baiona e Piombone, installate nell'ambito del presente PMAO a partire dal 22/1/2021 (si veda il par. 2.2). Dai grafici si evince che per entrambe queste stazioni la corrispondenza tra le misure e il calcolo è molto buona. Per entrambi gli strumenti considerati, infatti, sia l'indice  $R^2$  che l'indice ME sono assai prossimi all'unità. Questo risultato indica che il modello simula correttamente la propagazione della marea all'interno delle due Pialasse. Anche dal calcolo modellistico si riscontra infatti che, mentre nella Pialassa del Piombone l'attenuazione dell'ampiezza dell'oscillazione di marea e il ritardo di fase rispetto al segnale nel canale portuale (e al mare) sono molto contenuti, nella Pialassa Baiona queste differenze sono molto rilevanti, e dipendono dagli effetti propagatori e dalle dissipazioni che si realizzano nella penetrazione dell'onda di marea verso l'interno della Baiona attraverso la rete di canali che la innervano.



*Figura 4.6 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2021 ai mareografi installati nelle Pialasse Piombone e Baiona.*

I successivi grafici di Figura 4.7 riportano in forma estesa il confronto tra le velocità e misurate e calcolate nelle 3 stazioni per tutto il mese di aprile 2020.

Analogamente, i grafici di Figura 4.8 riportano il confronto per i livelli di marea.



Figura 4.7 – Confronto tra velocità calcolate e misurate nel mese di Aprile 2021 a Molo Guardiano Sud, Punta PIR e Canale Piomboni.

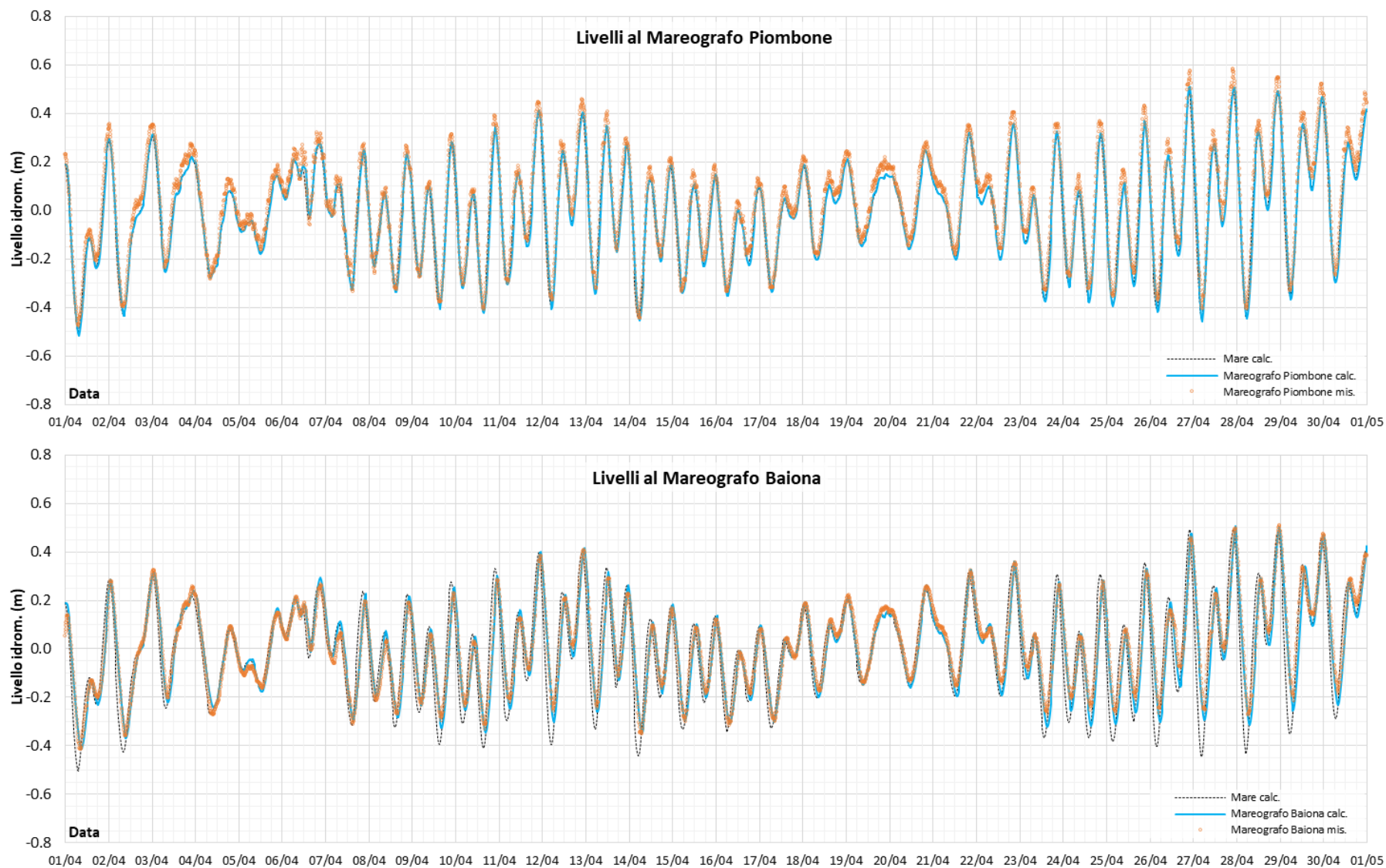


Figura 4.8 – Confronto tra livelli idrici calcolati e misurati nel mese di Aprile 2021 ai mareografi installati nelle Pialasse Piombone e Baiona.

### **4.3 Confronto con i dati della campagna di misure ADCP del 20 ottobre 2021**

Nel corso della campagna di misure del 20 ottobre 2021, condotta dalla ditta Te.Ma. snc nell'ambito delle attività previste dalla metodica M4 del Piano di Monitoraggio Ante Operam, sono state effettuate delle misure correntometriche con profilatore ADCP sulle sezioni di imbocco delle Pialasse Baiona e Piombone (si veda per maggiori dettagli il par. 2.3).

Allo scopo di confrontare i risultati modellistici con le misure è stata effettuata una simulazione del periodo che va dal 18/10/2021 12:00 al 21/10/2021 0:00. Analogamente ai casi precedenti il modello è stato forzato applicando il segnale di marea del mareografo di Porto Corsini, regolarizzato, e il vento registrato dalla stessa stazione di Porto Corsini distribuito uniformemente su tutto il dominio di calcolo.

I grafici di Figura 4.9 e Figura 4.10 mettono a confronto i livelli calcolati con quelli misurati nelle due stazioni mareografiche installate nelle Pialasse. Dai grafici si evince che il modello riproduce in modo più che accettabile lo sfasamento e l'attenuazione dell'onda di marea in corrispondenza del mareografo Baiona rispetto al segnale in mare (Figura 4.9). In particolare, è ben riprodotto l'innalzamento dei minimi di marea, che è legato agli effetti dissipativi che si verificano nella propagazione della marea sui bassifondi e sulle zone semi-emerse della laguna.

Per quanto riguarda il mareografo Piombone, l'accordo tra il calcolo e la misura è, in generale, altrettanto soddisfacente. Si osserva solo qualche discrepanza in corrispondenza dei colmi e dei cavi di marea, dove il segnale misurato evidenzia qualche dato anomalo. Queste anomalie possono essere probabilmente legate a locali fenomeni di prosciugamento ed allagamento dei bassifondi della Pialassa Piombone che il modello non riesce a riprodurre esattamente. Si osserva, inoltre, che il segnale misurato è leggermente in ritardo rispetto a quello simulato, il che significa che, probabilmente, il modello sottostima leggermente le resistenze idrauliche che la corrente di marea incontra nella sua propagazione dalla sezione di ingresso nella Pialassa lungo il canale circondariale che porta alla sezione in cui è installato il mareografo.

I grafici di Figura 4.11 e Figura 4.12 mettono a confronto l'andamento delle portate calcolate dal modello nelle sezioni Canale Baiona e Canale Piomboni con le misure di portata effettuate con il profilatore ADCP (si veda il par. 2.3).

Dai grafici si evince che il modello riproduce in modo più che accettabile i dati misurati, dal momento che la curva dell'andamento della portata calcolata si discosta molto poco dai punti delle misure. Questo accade soprattutto per la sezione Canale Baiona (Figura 4.11), dove le differenze nella fase di flusso entrante (portate positive) sono minime, mentre nella fase di flusso uscente (portate negative) il modello tende a sottostimare leggermente le portate misurate. Un po' meno accurati sono i risultati per la sezione Canale Piombone (Figura 4.11) dove il modello tende a sottostimare leggermente le portate fluenti soprattutto nella fase di flusso entrante (portate positive).

Nel complesso, si ritiene che il confronto tra le misure e il calcolo sia più che accettabile, soprattutto tenendo conto sia della complessità della dinamica dei flussi mareali nel sistema portuale e nelle Pialasse, ed anche dei non trascurabili errori che normalmente si possono attendere dalle misure di portata in casi come quello in esame.



In definitiva, pertanto, sulla base dei risultati della simulazione si può concludere che il modello consente di riprodurre i flussi scambiati tra il C. Candiano e le due Pialasse in modo più che accettabile

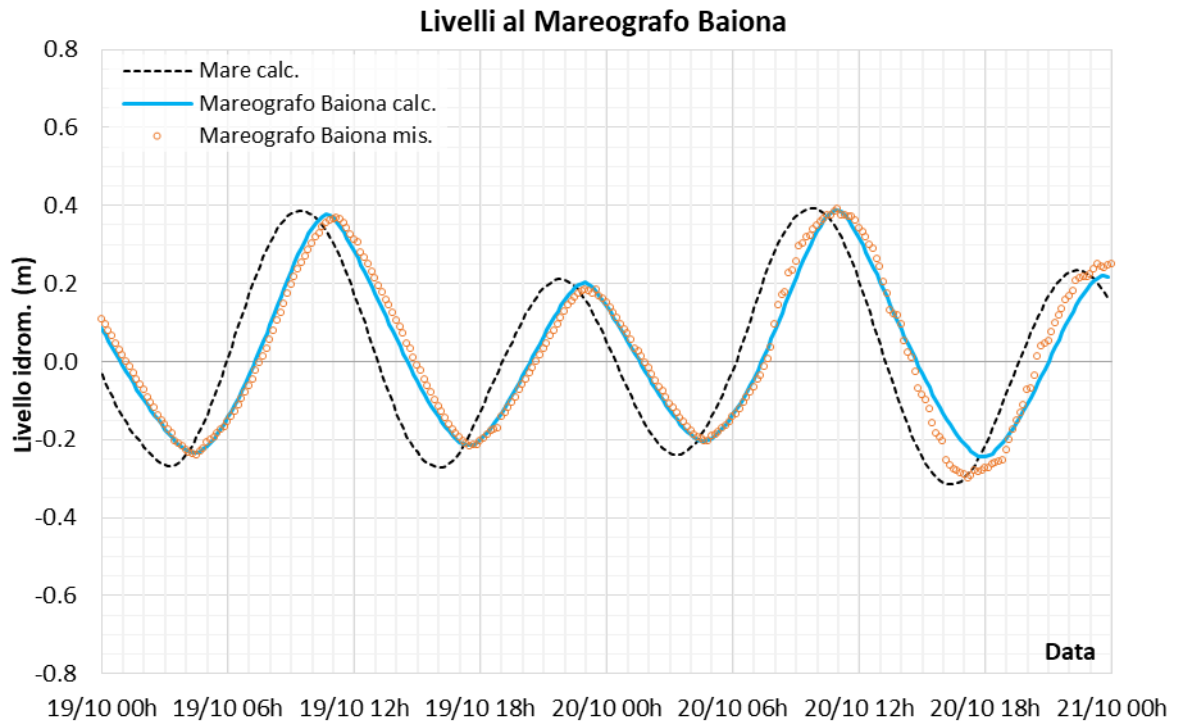


Figura 4.9 – Confronto tra livello misurato e calcolato al mareografo Baiona (dati in ora solare).

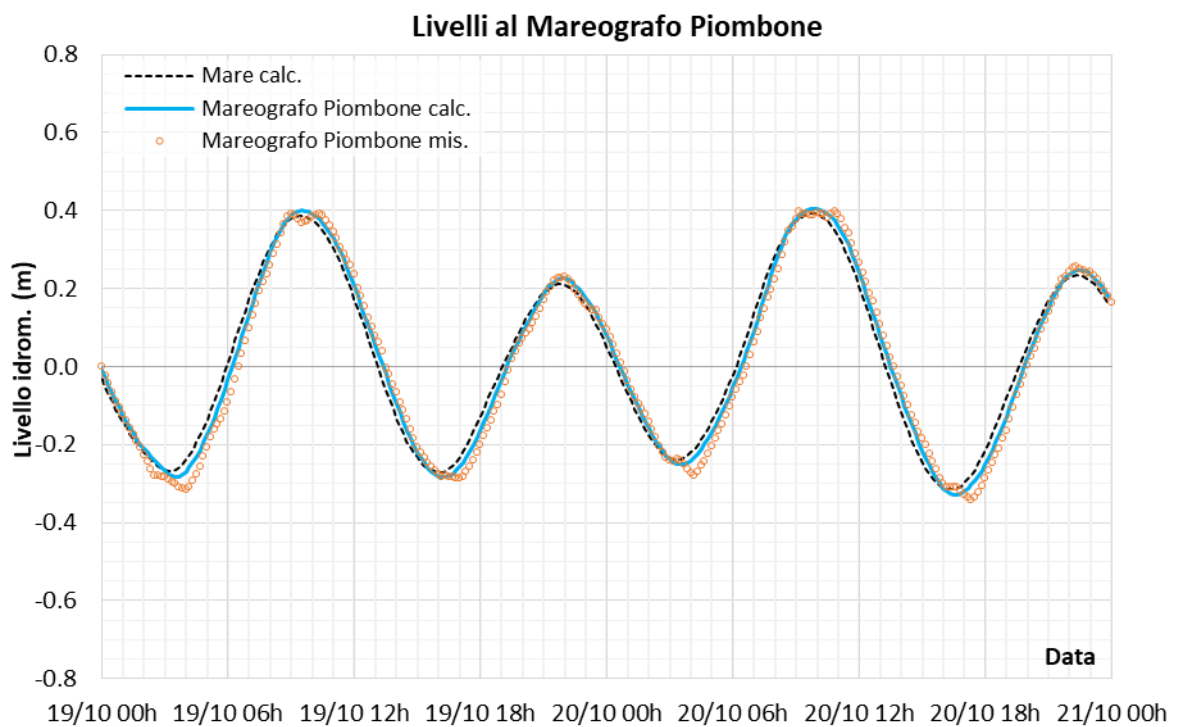


Figura 4.10 – Confronto tra livello misurato e calcolato al mareografo Piombone (dati in ora solare).

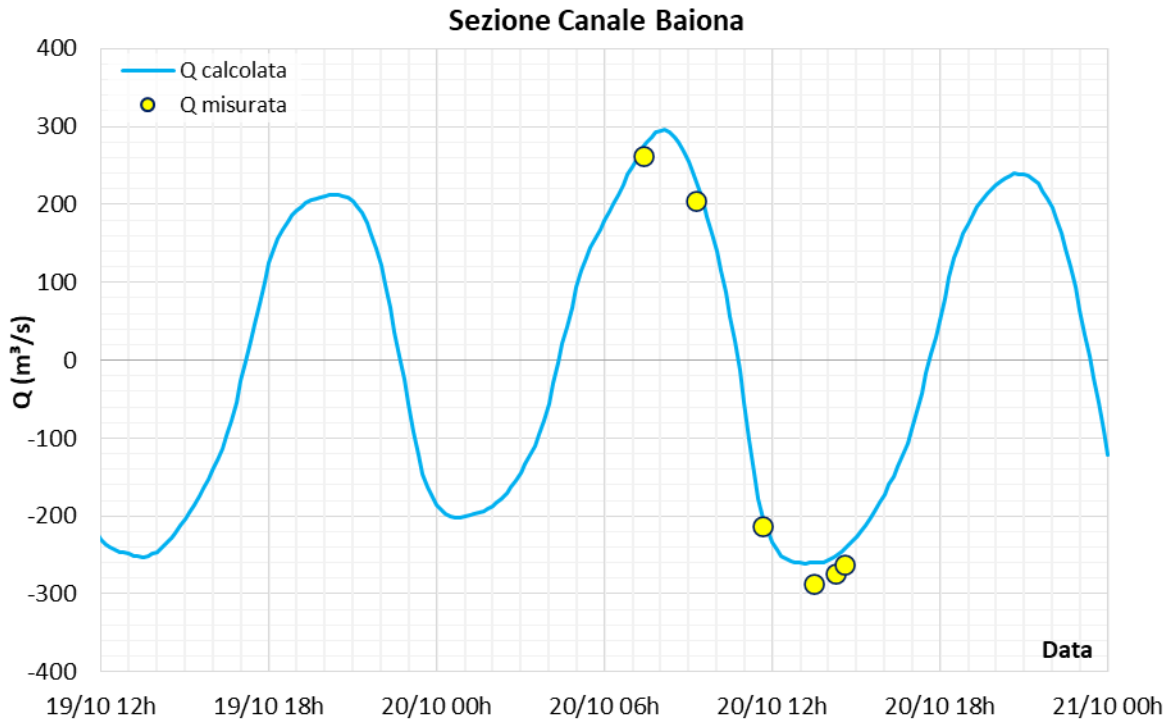


Figura 4.11 – Confronto tra portata misurata e calcolata nella sezione Canale Baiona (dati in ora solare).

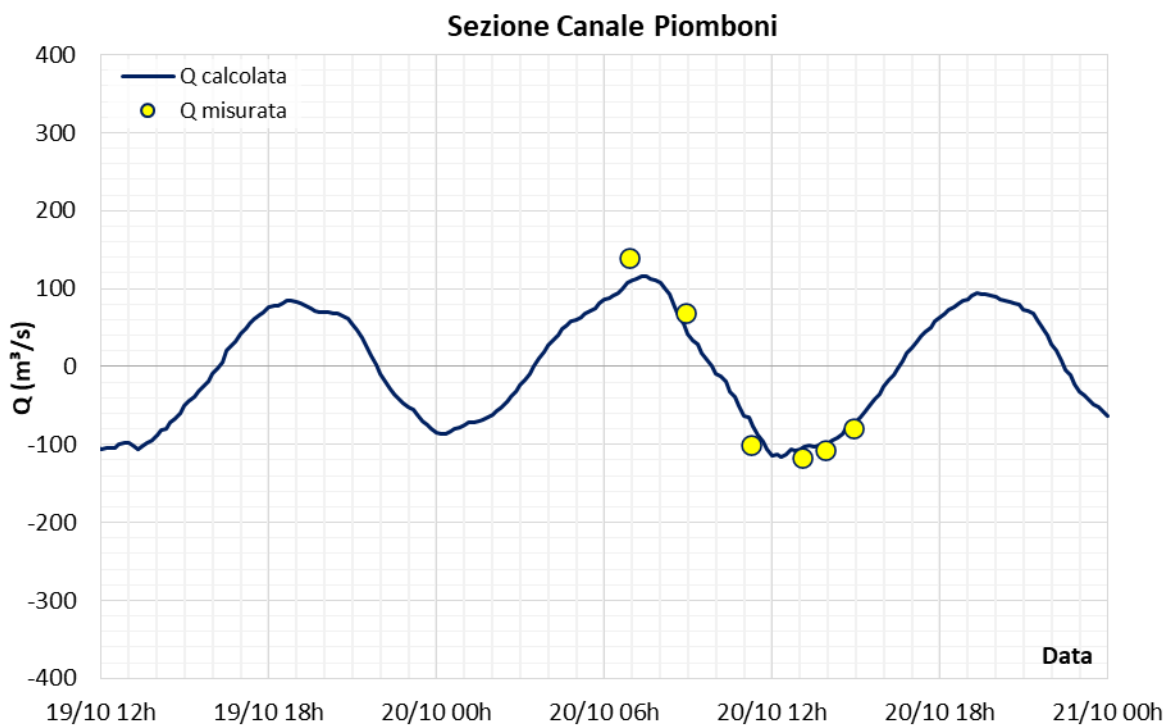


Figura 4.12 – Confronto tra portata misurata e calcolata nella sezione Canale Piomboni (dati in ora solare).

## 5 Simulazioni del campo idrodinamico

La simulazione relativa al mese di aprile 2021 è stata utilizzata per l'analisi del campo idrodinamico in tutto il sistema portuale. Essa consente di verificare il comportamento dell'intero sistema in diverse condizioni di marea, che comprendono sia le fasi di sizigia (massime escursioni di marea e quindi massimi flussi scambiati), sia quelle di quadratura (minime escursioni di marea e quindi minimi flussi scambiati), sia tutte le fasi intermedie. In particolare, la seconda parte del mese, caratterizzata da buone condizioni meteo e bassa intensità del vento, risulta particolarmente favorevole all'analisi della circolazione delle correnti mareali nel bacino portuale e nelle Pialasse.

Nei paragrafi che seguono sono presentati i risultati della simulazione limitatamente al periodo che va dal 25 al 30 aprile 2021. Si tratta di un periodo di maree di sizigia, incentrato sulla fase di plenilunio del 27/4/2021, che è stato caratterizzato da venti di debole intensità e che risulta particolarmente adatto per valutare sia l'entità degli scambi idrici tra le diverse parti del bacino, sia la distribuzione del campo di velocità nelle fasi di flusso e di riflusso di marea. I risultati relativi agli altri periodi del mese, pur disponibili, non sono qui presentati per brevità di esposizione.

### 5.1 Sistema complessivo e bacino portuale

In Figura 5.1 è rappresentata un'immagine del dominio di calcolo del modello, che evidenzia la posizione dei punti e delle sezioni in corrispondenza dei quali sono stati estratti i risultati delle simulazioni modellistiche in termini di andamento nel tempo di livello e portata.

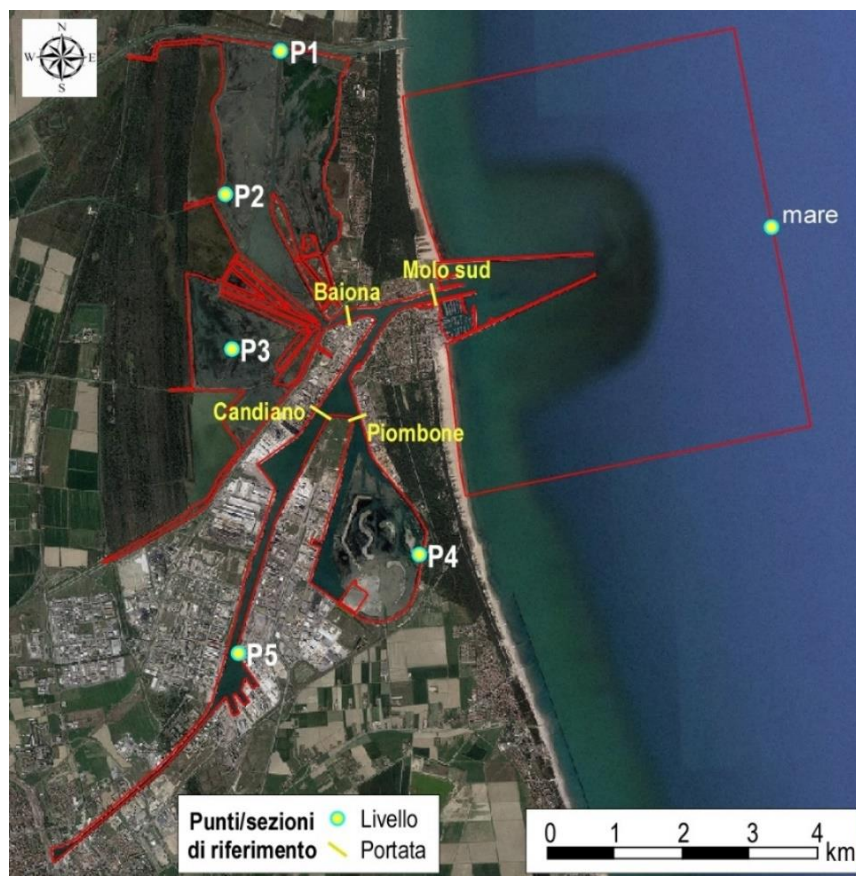


Figura 5.1 – Punti e sezioni di riferimento per l'estrazione dei risultati del modello bidimensionale del sistema portuale di Ravenna.

La Figura 5.2 riporta graficamente l'andamento della portata fluente nelle sezioni indicate in Figura 5.1. Si tratta delle sezioni che intercettano, rispettivamente, i flussi mareali scambiati all'imboccatura del C. Candiano (Molo Sud), all'ingresso della Pialassa Baiona, all'ingresso della Pialassa Piombone e lungo il C. Candiano a monte delle due Pialasse.

Il grafico di Figura 5.2 mostra l'andamento delle portate che vanno ad alimentare le porzioni di bacino che, progressivamente, sono interessate dalla propagazione dell'onda di marea. La successiva Tabella 5.1 quantifica i valori delle portate massime che transitano attraverso le suddette sezioni, valutandole per ciascuno dei 5 giorni che compongono il periodo considerato.

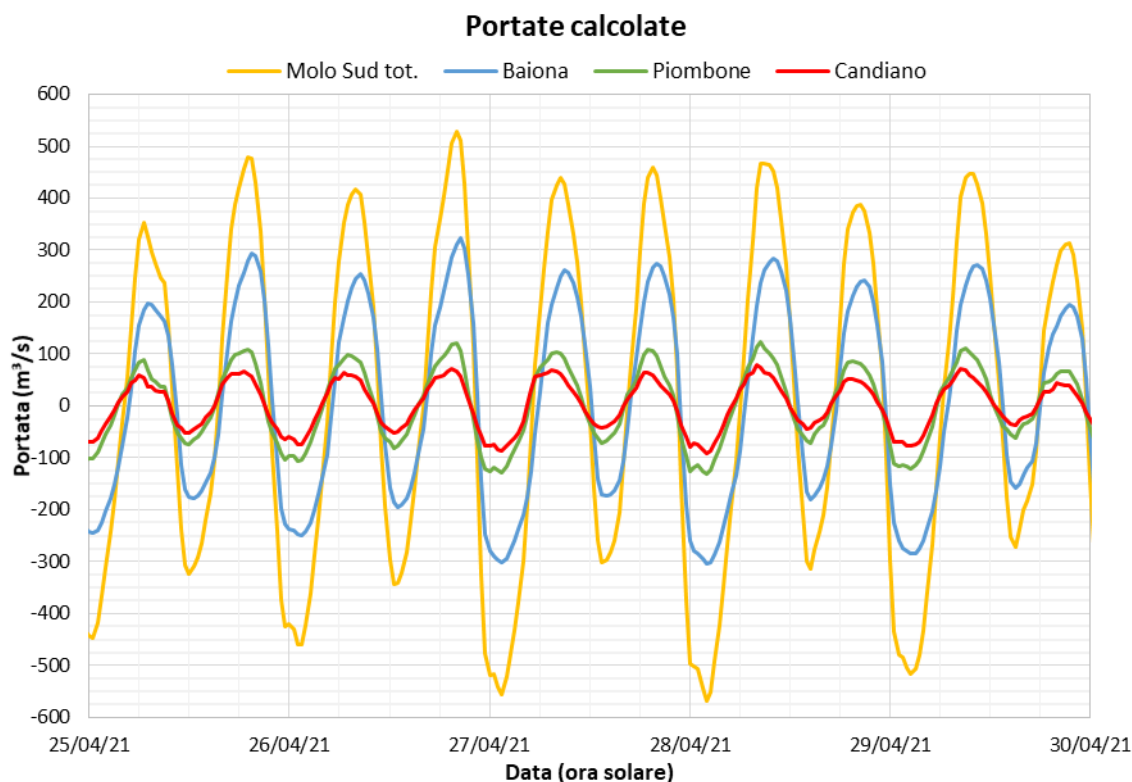


Figura 5.2 – Andamento della portata nelle sezioni di riferimento rappresentate in Figura 5.1, calcolato con il modello bidimensionale in un periodo di sizigia (25-29 aprile 2021, luna piena il 27/04/2021). Dati in ora solare.

Dai valori numerici riportati in Tabella 5.1 si evince che, mediamente, nel periodo di marea sizigiale considerato, la portata massima all'imboccatura del C. Candiano è pari a  $476 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso entrante e a circa  $513 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso uscente. Le portate massime scambiate tra il C. Candiano e la Pialassa Baiona valgono  $289 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso entrante e  $277 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso uscente. Le portate massime scambiate con il C. Piombone valgono  $114 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso entrante e  $121 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso uscente. Infine, le portate massime che fluiscono attraverso la sezione del C. Candiano sono pari a circa  $72 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso entrante e a circa  $81 \text{ m}^3/\text{s}$  in flusso uscente.

Nella stessa Tabella 5.1 è anche riportata l'entità degli scambi mareali attraverso le stesse sezioni in termini di volume. Il dato riportato in tabella è ottenuto, giorno per giorno, operando la media tra il volume "entrante" ossia quello generato da portate di segno positivo, e volume "uscente", cioè generato da portate di segno negativo. Si ottiene che il volume scambiato mediamente in un semi-ciclo di marea nella fase sizigiale considerata è

pari a  $12.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  per la sezione Molo Sud, a  $7.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  per la sezione Baiona, a  $2.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  per la sezione Piombone e a  $1.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  per la sezione Candiano.

Dalla tabella si evince che, considerato pari al 100% il volume scambiato attraverso la sezione Molo Sud all'imboccatura del C. Candiano, i volumi scambiati con la Pialassa Baiona sono pari a circa il 61% mentre i volumi scambiati con la Pialassa Piombone sono pari a circa il 22% e quelli scambiati con la parte interna del bacino portuale (C. Candiano) sono pari a circa il 14%. La parte rimanente rispetto al totale (circa il 3%) compete agli specchi d'acqua del C. Candiano delimitati dalle 4 sezioni considerate.

Dalla stessa tabella si evince che, pur al variare giornaliero delle portate massime entranti ed uscenti, la ripartizione percentuale dei volumi scambiati non varia apprezzabilmente. I calcoli modellistici hanno dimostrato, inoltre, che tale ripartizione si mantiene praticamente anche per le altre fasi di marea che si possono presentare (maree di quadratura) per cui si può ritenere che questo parametro costituisca una significativa quantificazione dell'entità degli scambi mareali che si verificano tra le diverse parti del bacino sottese dalle sezioni considerate.

<b>Portate massime e volumi scambiati nelle sezioni di riferimento durante la fase mareale di sizigia del 25-29 aprile 2021</b>					
<b>Data</b>	<b>Quantità</b>	<b>Molo Sud</b>	<b>Baiona</b>	<b>Piombone</b>	<b>Candiano</b>
25/04/2021	Qmax flusso entr.	479.6	293.2	108.5	65.7
	Qmax flusso usc.	-448.3	-245.1	-103.9	-69.9
	Vol. scambiato	11.4	6.9	2.6	1.7
	Ripart. Vol. scambiato	100.0%	60.4%	22.4%	14.6%
26/04/2021	Qmax flusso entr.	528.6	322.5	120.3	71.5
	Qmax flusso usc.	-476.5	-250.7	-121.1	-75.9
	Vol. scambiato	12.7	7.6	2.9	1.8
	Ripart. Vol. scambiato	100.0%	60.0%	22.8%	14.4%
27/04/2021	Qmax flusso entr.	458.4	274.7	108.5	69.5
	Qmax flusso usc.	-555.7	-300.9	-127.8	-87.8
	Vol. scambiato	13.0	7.8	2.9	1.9
	Ripart. Vol. scambiato	100.0%	60.5%	22.5%	14.3%
28/04/2021	Qmax flusso entr.	466.2	283.7	122.1	78.8
	Qmax flusso usc.	-568.1	-303.9	-131.7	-92.2
	Vol. scambiato	12.9	7.8	2.8	1.8
	Ripart. Vol. scambiato	100.0%	60.9%	22.1%	14.0%
29/04/2021	Qmax flusso entr.	447.0	272.5	111.7	72.6
	Qmax flusso usc.	-516.8	-285.6	-120.1	-78.0
	Vol. scambiato	11.8	7.2	2.6	1.6
	Ripart. Vol. scambiato	100.0%	61.0%	22.2%	13.7%
<b>media 25-29 aprile 2021</b>	<b>Qmax flusso entr.</b>	<b>476.0</b>	<b>289.3</b>	<b>114.2</b>	<b>71.6</b>
	<b>Qmax flusso usc.</b>	<b>-513.1</b>	<b>-277.3</b>	<b>-120.9</b>	<b>-80.8</b>
	<b>Vol. scambiato</b>	<b>12.4</b>	<b>7.5</b>	<b>2.8</b>	<b>1.8</b>
	<b>Ripart. Vol. scambiato</b>	<b>100.0%</b>	<b>60.5%</b>	<b>22.4%</b>	<b>14.2%</b>

Tabella 5.1 – Portate massime ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e volumi scambiati ( $\text{m}^3 \cdot 10^6$ ) nelle sezioni di riferimento rappresentate in Figura 5.1, calcolati con il modello bidimensionale in un periodo di sizigia (25-29 aprile 2021, luna piena il 27/04/2021).

Infine, il grafico di Figura 5.3 mette a confronto i livelli idrometrici che, nel periodo sizigiale considerato, si stabiliscono nei punti significativi indicati in Figura 5.1.

Il grafico conferma le considerazioni già precedentemente riportate, ossia che:

- all'interno del bacino portuale (punto P5) l'oscillazione della marea si discosta solo di poco dall'oscillazione della marea in mare, in ragione delle minime resistenze che la propagazione della marea incontra nella propagazione lungo gli ampi e profondi canali portuali. Nel dettaglio si osserva che lo sfasamento temporale è quasi trascurabile, mentre le ampiezze tendono ad amplificarsi leggermente.
- Poco rilevanti sono anche le differenze tra il segnale in mare e il segnale all'interno della Pialassa Piombone. Anche in questo caso l'ampiezza dell'oscillazione non è attenuata ma anzi risulta leggermente amplificata rispetto al mare. Il ritardo di fase è valutato dal modello nell'ordine di 10÷15 minuti. Considerato che, come si è visto in precedenza, il modello tende a sottostimare leggermente tale valore, si può valutare che il ritardo di fase possa comunque essere mediamente anche dell'ordine di 20÷30 minuti.
- Più rilevante (circa 30÷40 minuti) risulta essere il ritardo di fase dell'oscillazione della marea nella parte più occidentale della Pialassa Baiona (punto P3). In questo punto si osserva anche che il segnale risulta essere apprezzabilmente attenuato in corrispondenza dei minimi di marea, il che indica la presenza di rilevanti fenomeni di resistenza al moto nella fase di svuotamento della laguna, quando non trascurabili porzioni del bacino tendono anche a prosciugarsi.
- Molto più rilevanti sono il ritardo di fase (circa 1.5 ore) e l'attenuazione dell'ampiezza di marea che si osservano nel punto P2 all'interno della Baiona. In questo caso gli effetti propagatori della marea nella rete di canali e nei bassifondi del bacino smorzano apprezzabilmente l'oscillazione del livello, soprattutto in corrispondenza dei cavi di marea quando, come si è detto, maggiore è l'effetto dissipativo dei bassi fondali e delle aree che tendono a scoprirsi.
- Questi effetti si amplificano ulteriormente in corrispondenza del margine settentrionale della Pialassa Baiona (punto P1). In questo caso il ritardo di fase rispetto al mare è valutabile in circa 1.5 ore sui colmi e in circa 2 ore sui cavi di marea.

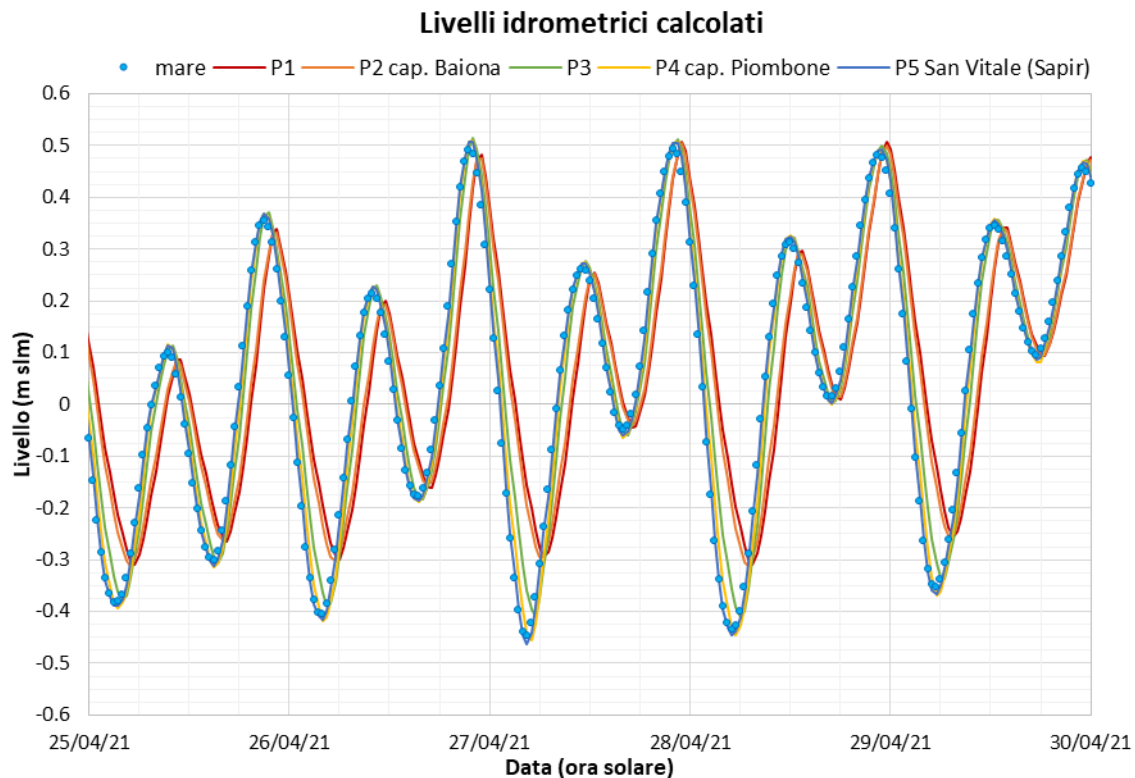


Figura 5.3 – Andamento del livello idrometrici nei punti di riferimento rappresentati in Figura 5.1, calcolato con il modello bidimensionale in un periodo di sizigia (25-29 aprile 2021, luna piena il 27/04/2021).

Le successive immagini di Figura 5.4 e Figura 5.5 riportano le mappe dei campi di velocità nelle fasi di massimo flusso entrante e massimo flusso uscente in tutto il dominio di calcolo del modello.

Le mappe rappresentano con una scala di colori la distribuzione del modulo della velocità della corrente e con vettori di lunghezza unitaria la direzione della corrente stessa. Si fa presente che la velocità calcolata dal modello bidimensionale rappresenta la velocità media sulla verticale che è, in generale, leggermente inferiore rispetto alla velocità della corrente negli strati superficiali della colonna d'acqua (si vedano al riguardo le considerazioni esposte all'inizio del capitolo 4).

Da entrambe le mappe si evince in primo luogo che negli specchi d'acqua periferici di tutti e tre i bacini di cui si compone il sistema (P. Baiona, P. Piombone e C. Candiano) la velocità delle correnti di marea è molto debole o nulla. In particolare, nel C. Candiano la velocità resta sostenuta fino a valle del collegamento con la P. Piombone. A monte di questa sezione, in ragione delle grandi dimensioni della sezione del canale stesso e delle modeste portate che, come si è visto, lo percorrono, la velocità delle correnti di marea tende ad annullarsi rapidamente.

In definitiva, in base alle mappe, le correnti di marea sono sostenute (dell'ordine o maggiori di 0.5 m/s) solo nel primo tratto del canale di accesso al porto e nei primi tratti dei canali a raggiera che si immettono nella Pialassa Baiona. In tutto il resto del dominio le correnti mareali sono deboli o molto deboli.

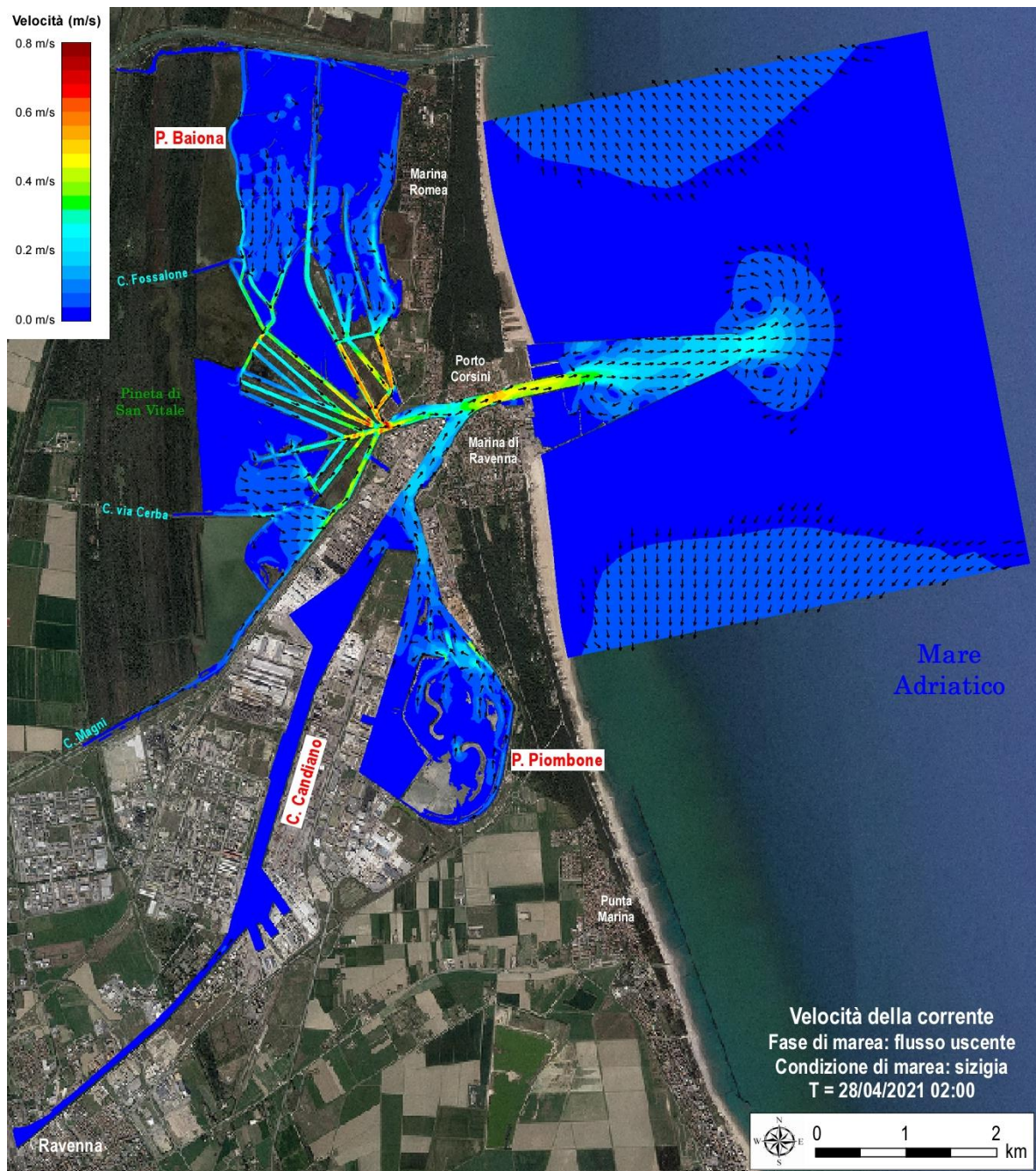


Figura 5.4 – Campo di velocità in flusso uscente calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale (28/04/2021 ore 2:00).

Nei paragrafi che seguono sono riportati i campi di velocità di dettaglio nelle due Pialasse. Tali elaborati grafici rispondono alle specifiche del Capitolato Speciale d’Appalto del Servizio di monitoraggio ambientale della qualità dell’aria, delle acque, dei sedimenti, del clima acustico, di aspetti naturalistici e morfodinamici relativo all’attuazione del PRP 2007 – I stralcio”, che richiedono: “la modellazione dovrà restituire mappe relative al campo di moto delle correnti in uscita/ingresso dalle Pialasse, che dovranno essere confrontate con quelle contenute nel suddetto documento al fine di aggiornare (eventualmente) il quadro conoscitivo ante operam sulla base dei monitoraggi che verranno svolti appunto prima dell’avvio dei lavori e monitorare l’effetto delle attività sulla base dei monitoraggi che verranno svolti nel corso di realizzazione dei lavori”.



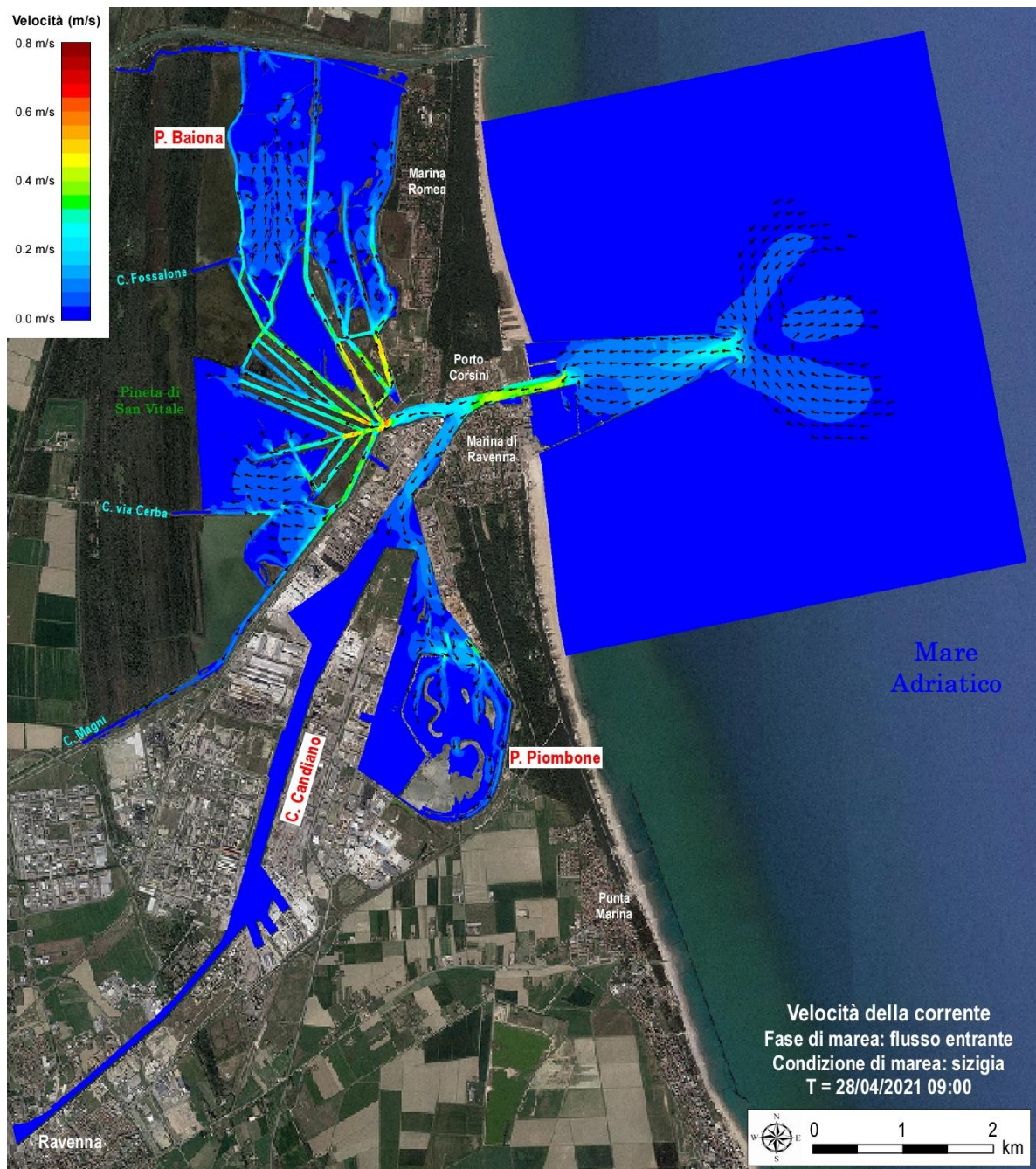


Figura 5.5 – Campo di velocità in flusso entrante calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale (28/04/2021 ore 9:00).

Il documento a cui si fa riferimento nelle suddette specifiche del Capitolato Speciale d’Appalto è: “ALLEGATO D.01 SINTESI STUDI E MODELLAZIONE IDRODINAMICA PIALASSE”, allegato al PMA (elaborato GEN.B.1), il quale riporta a sua volta come allegato lo studio idrodinamico relativo all’ “Intervento di Risanamento della Pialassa del Piombone e di separazione fisica delle zone vallive dalle zone portuali mediante arginatura artificiale”, del luglio 2008. Quest’ultimo documento riporta una modellazione idrodinamica di dettaglio di tutto il sistema portuale e delle due Pialasse riferita ad un dominio di calcolo analogo a quello considerato nel presente studio.

## **5.2 Pialassa Baiona**

Le mappe che seguono rappresentano i campi di velocità nelle fasi di flusso entrante ed uscente nella Pialassa Baiona. Esse si riferiscono ai medesimi istanti di massimo flusso e di massimo riflusso presi in considerazione per le mappe illustrate nel paragrafo 5.1, relative all'intero dominio di calcolo del modello. In questo modo, in accordo con quanto riportato nel menzionato ALLEGATO D.01 - SINTESI STUDI E MODELLAZIONE IDRODINAMICA PIALASSE, si considera una situazione di "massima marea sizigiale" in cui sono massimi sia la velocità delle correnti mareali che l'entità degli scambi tra il C. Candiano e le due Pialasse.

La Figura 5.6 mostra i campi di velocità in flusso entrante e in flusso uscente in tutta la Pialassa Baiona. La scala di colori evidenzia che le correnti, in entrambe le fasi di marea, hanno intensità apprezzabile solo nei canali confinati, e soprattutto nella parte meridionale del bacino, in prossimità del collegamento con il canale portuale. Nei bassifondi che affiancano i canali stessi, ed in particolare in tutta la parte settentrionale del bacino, la colorazione della mappa è ovunque quella della prima classe della tabella dei colori, che corrisponde a velocità inferiori a 4 cm/s. Ciò significa che in tali ambiti le correnti sono praticamente assenti.

I campi di velocità forniti dal modello, peraltro, sembrano essere in buon accordo con quelli ottenuti nello studio di riferimento indicato dal PMA. Le differenze che si osservano sembrano potersi ricondurre principalmente al diverso grado di dettaglio della schematizzazione che in questo caso, grazie alla più ampia disponibilità di dati topografici e batimetrici, è maggiore rispetto allo studio di riferimento.

Come è evidenziato dalle successive mappe di Figura 5.7 e Figura 5.8, la distribuzione delle correnti nei canali della parte meridionale della laguna segue un pattern piuttosto complesso che dipende sia dai modesti sfasamenti che, istante per istante, si stabiliscono alle estremità dei diversi rami tra loro collegati, sia dalla batimetria del fondo dei canali che può indurre resistenze idrauliche addizionali nei canali maggiormente interrati o caratterizzati dalla presenza di dossi. In particolare, le zone in cui le mappe evidenziano una marcata concentrazione della velocità (aree di colore rosso) corrispondono a tratti di canale in cui la profondità del fondale si riduce per la presenza di dossi. Si fa presente al riguardo che, in queste aree, il modello è stato costruito utilizzando i rilievi batimetrici appositamente rilevati nel corso del PMAO (metodica M6, si veda il par. 3.1), che sono particolarmente dettagliati, e che quindi, per questi aspetti, consentono di ottenere risultati affidabili.

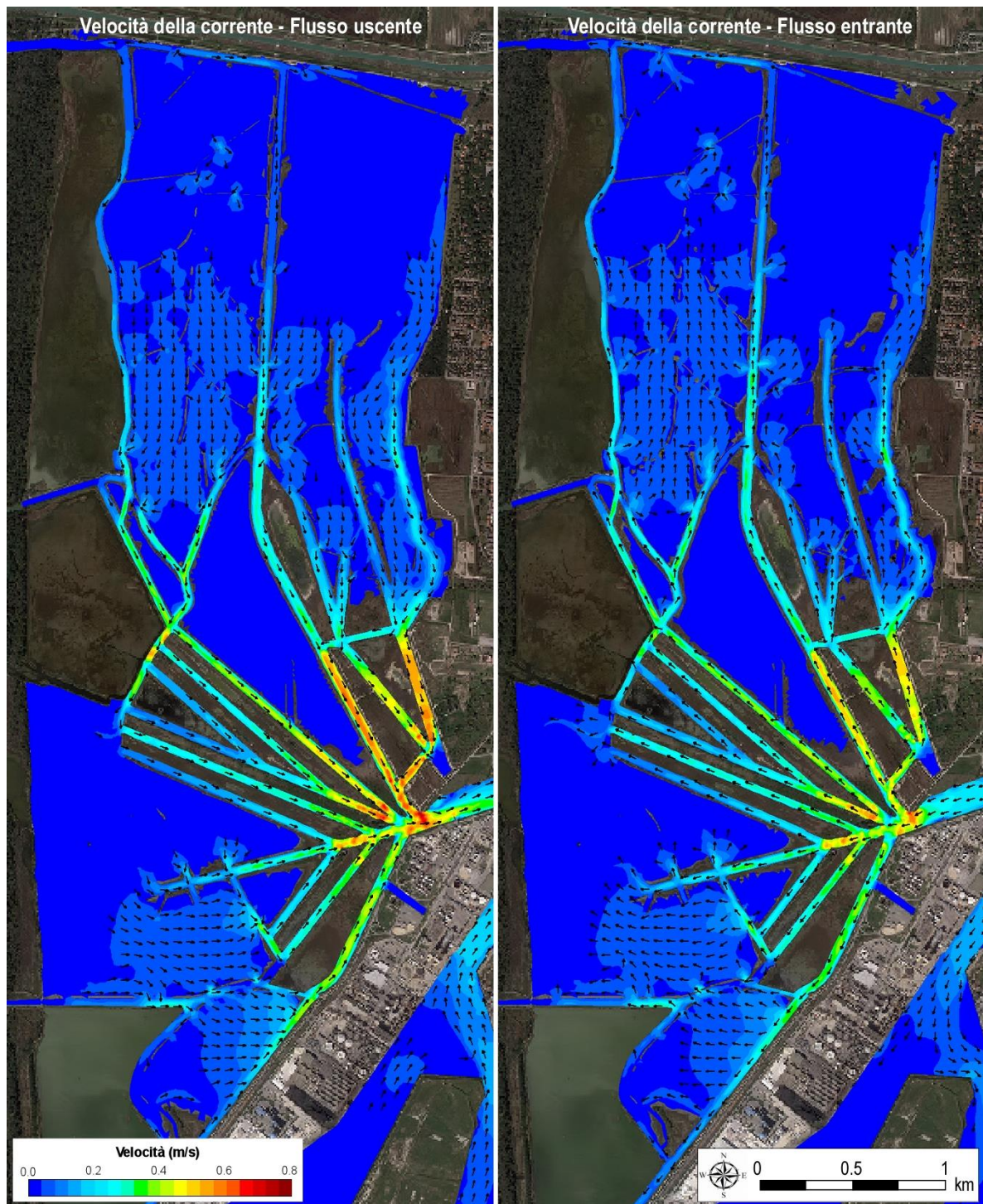
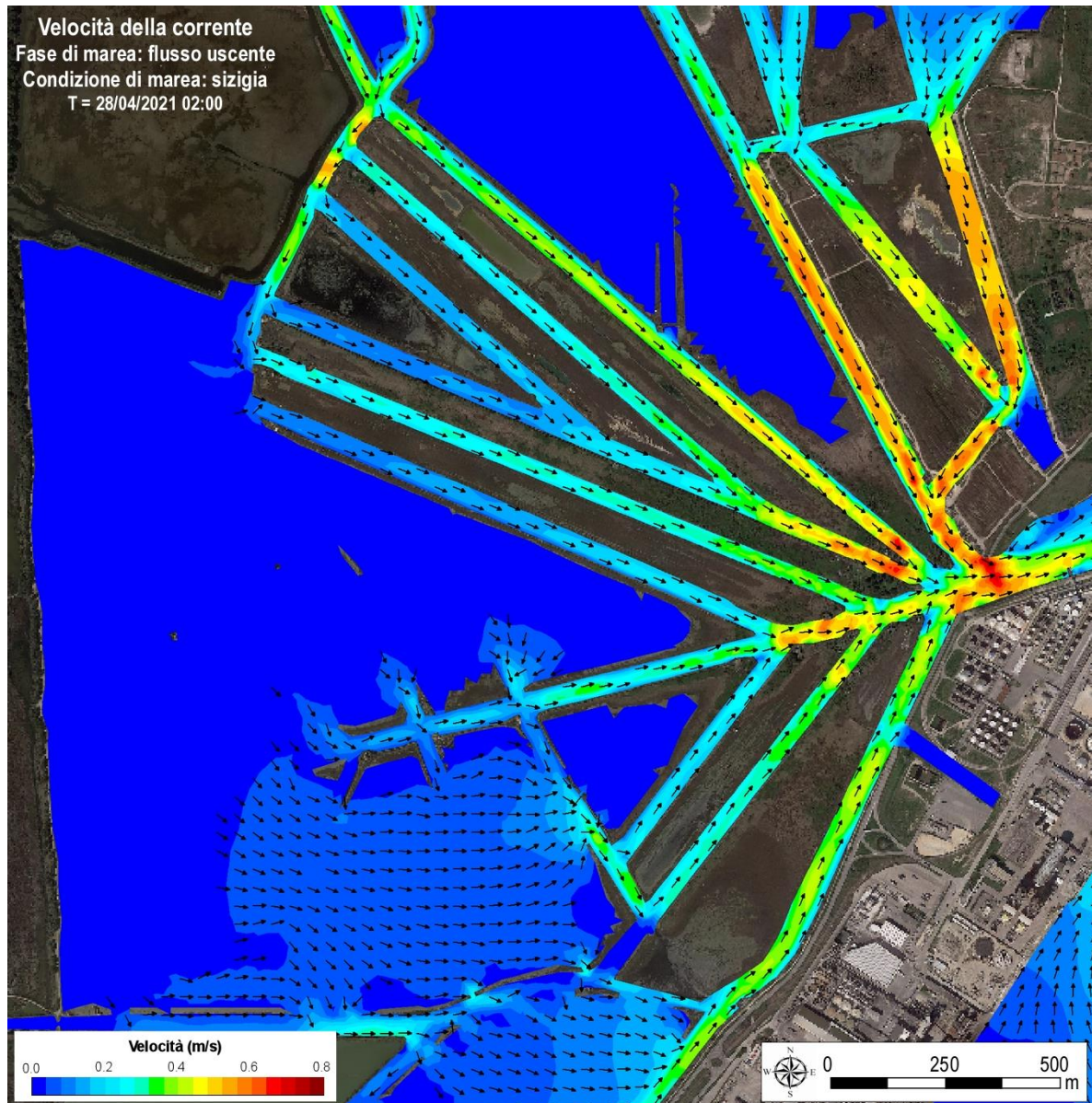


Figura 5.6 – Pialassa Baiona: campi di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) ed entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale.



*Figura 5.7 – Pialassa Baiona: particolare del campo di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale.*

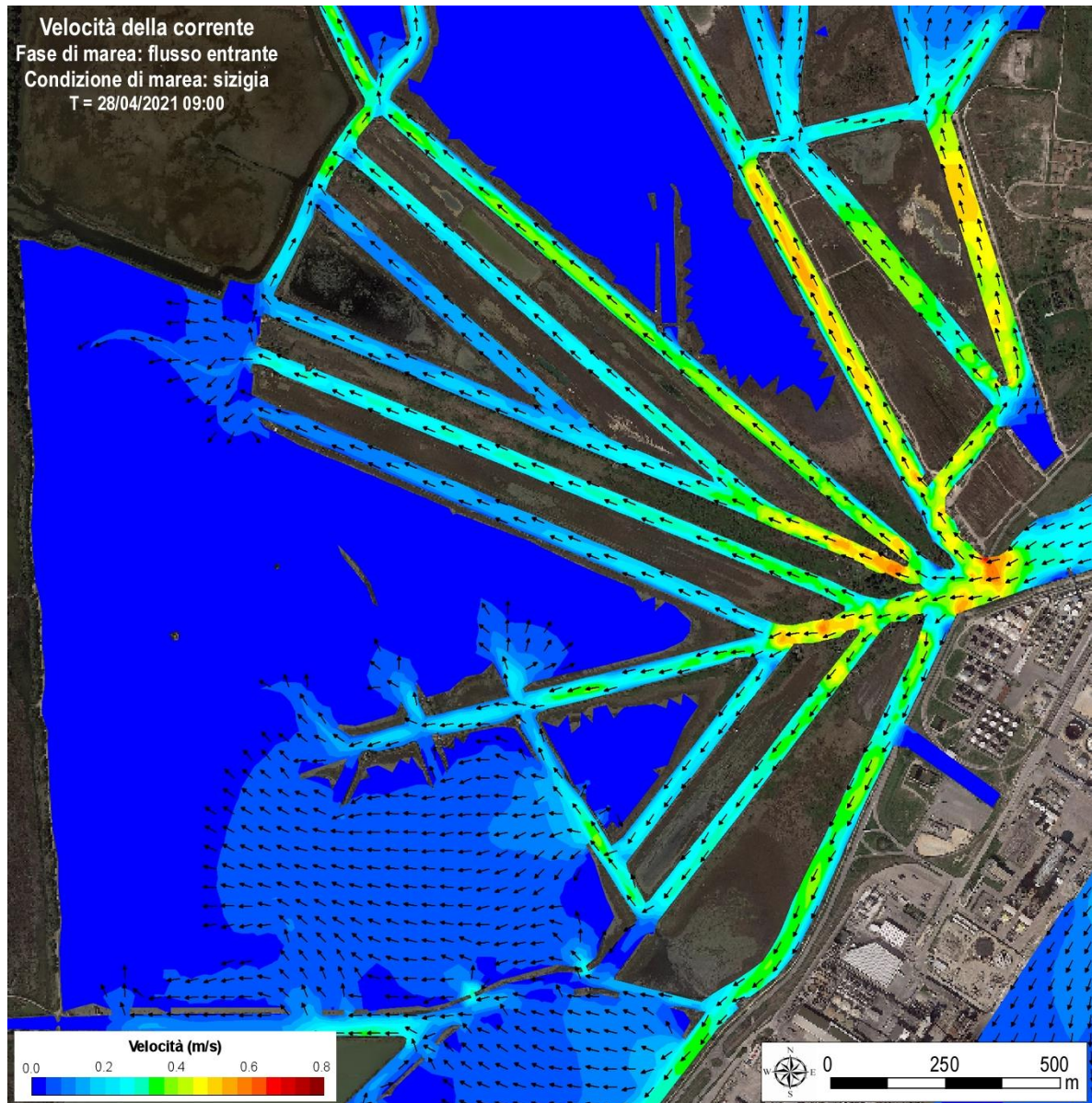


Figura 5.8 – Pialassa Baiona: particolare del campo di velocità in flusso entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale.

### **5.3 Pialassa Piombone**

Le mappe che seguono rappresentano i campi di velocità nelle fasi di flusso entrante ed uscente nella Pialassa Piombone. Esse si riferiscono ai medesimi istanti di massimo flusso e di massimo riflusso presi in considerazione per le mappe illustrate nel paragrafo 5.1, relative all'intero dominio di calcolo del modello.

La Figura 5.6 mostra i campi di velocità in flusso entrante e in flusso uscente in tutta la Pialassa Piombone. La scala di colori evidenzia che le correnti, in entrambe le fasi di marea, hanno intensità apprezzabile solo nella parte orientale del bacino, dove sono stati realizzati gli interventi del già menzionato progetto: "Intervento di Risanamento della Pialassa del Piombone e di separazione fisica delle zone vallive dalle zone portuali mediante arginatura artificiale". In questo caso i campi di velocità si differenziano apprezzabilmente da quelli riportati nel menzionato studio che si trova nell'ALLEGATO D.01 - SINTESI STUDI E MODELLAZIONE IDRODINAMICA PIALASSE, poiché questi ultimi fanno riferimento alla situazione antecedente alla realizzazione degli interventi.

Dalle mappe si evince che l'intervento di separazione degli specchi d'acqua portuali dai bassifondi della laguna ha sortito l'effetto di concentrare le correnti di marea più intense in quest'ultima zona, dove le correnti stesse si incanalano lungo i canaletti e i bassifondi che si frappongono tra isole artificiali (barene) che sono state realizzate nell'ambito del suddetto progetto.

Si osserva in particolare che le correnti, sia in fase di flusso che di riflusso, hanno intensità non trascurabili anche lungo quasi tutto il canale circondariale che percorre il margine orientale della laguna.

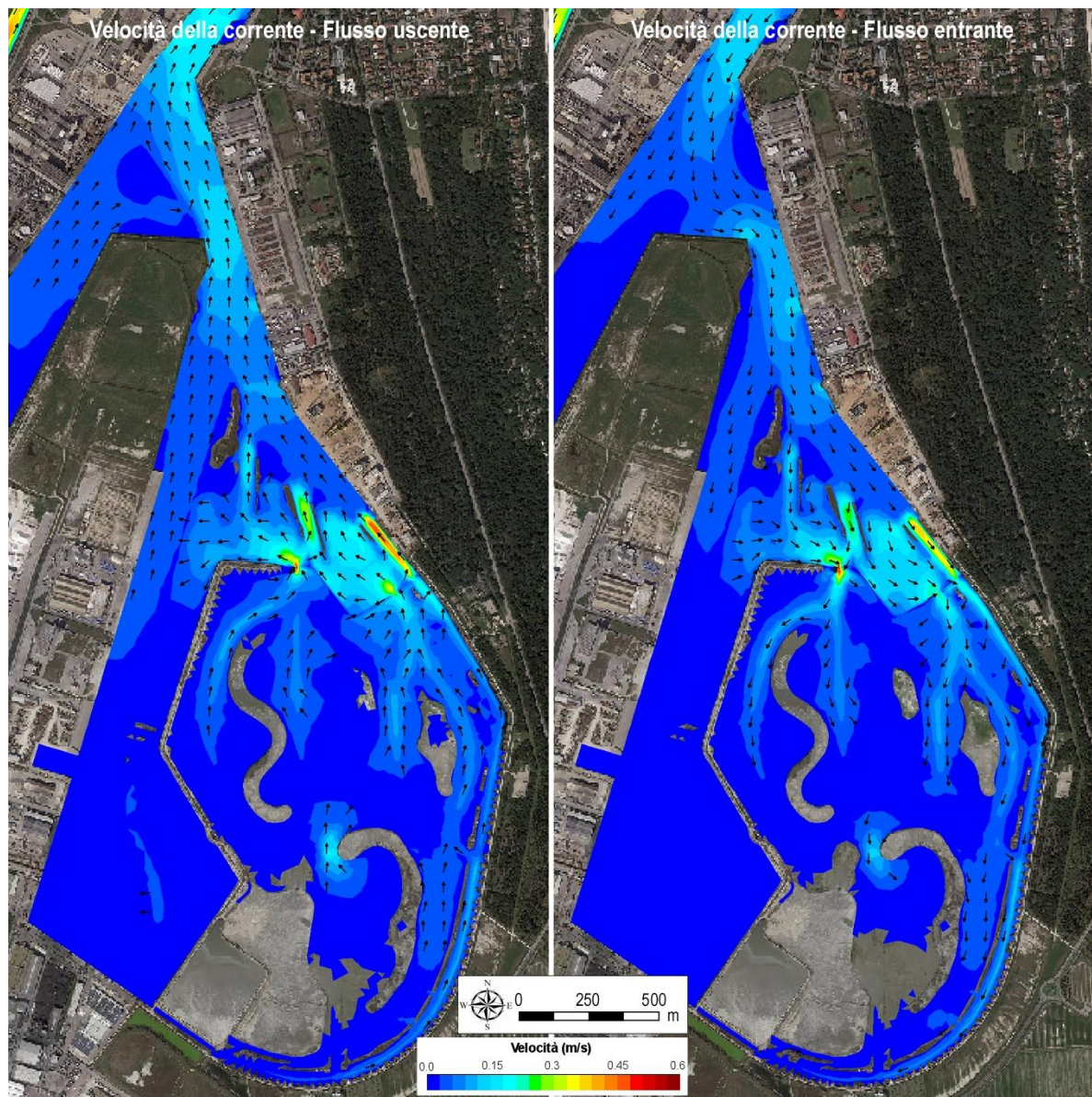
Viceversa, in ragione della profondità dei fondali e dell'ampiezza della sezione liquida, tutto l'ambito portuale che è stato realizzato sul lato occidentale del Piombone è caratterizzato da velocità della corrente pressoché nulle.

Le successive Figura 5.10 e Figura 5.11 mostrano il dettaglio dei campi di velocità in corrispondenza dell'imboccatura del C. Piombone. In base alla scala dei colori delle mappe si evince che le velocità massime nella stretta dell'imboccatura stessa sono dell'ordine di 15 cm/s sia in flusso entrante che uscente. Si fa presente che le velocità calcolate dal modello bidimensionale sono equivalenti alla "velocità media sulla verticale". Per tale ragione i valori indicati potrebbero essere inferiori di circa il 10-15% rispetto alle velocità che si verificano negli strati superficiali della colonna d'acqua (si veda al riguardo la parte iniziale del cap. 4).

È peraltro interessante osservare il diverso assetto del campo di moto nella fase di flusso uscente (Figura 5.10) e in quella di flusso entrante (Figura 5.11). In quest'ultimo caso, infatti, per effetto delle componenti inerziali del moto, il getto in entrata al Piombone descrive una doppia curva per staccarsi dalla corrente che percorre il C. Candiano ed entrare nella Pialassa. Viceversa, nella fase di flusso uscente il getto in uscita dalla Pialassa resta aderente al margine orientale, dove si collocano le banchine, per poi confluire più regolarmente nella corrente che percorre il C. Candiano.

Questa asimmetria di comportamento tra le due fasi mareali potrebbe forse essere all'origine delle irregolarità riscontrate nelle serie temporali dei dati correntometrici acquisiti dallo strumento dell'Autorità Portuale che è installato proprio in questa sezione (si veda il par. 2.1) come anche forse della non perfetta corrispondenza tra i risultati del calcolo

modellistico e le misure di portata effettuate con sonda ADCP montata su imbarcazione nella campagna del 20/10/2021 (par. 4.3).



*Figura 5.9 – Piolassa Piombone: Campo di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) ed entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in condizioni di marea sizigiale.*

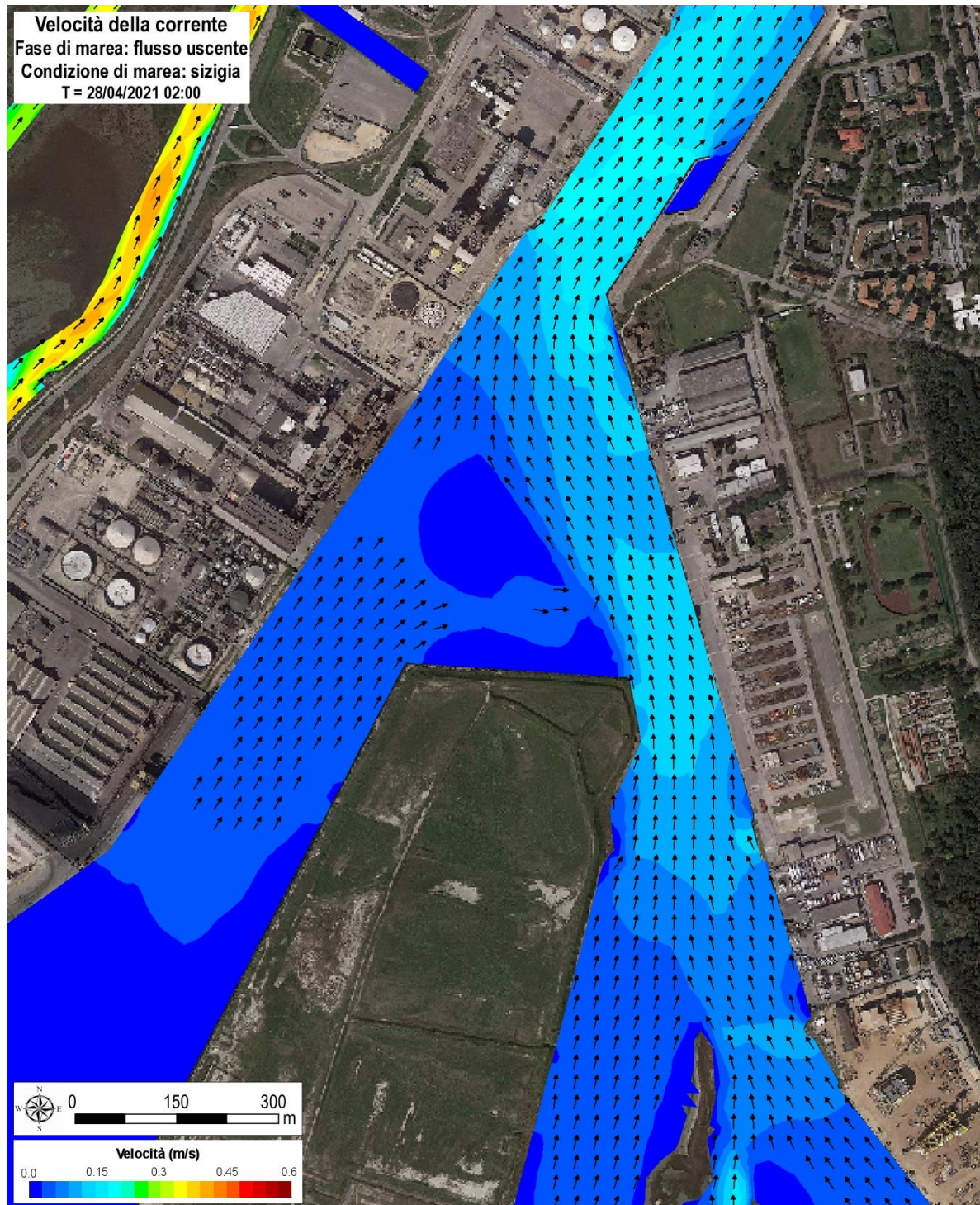


Figura 5.10 – Pialassa Piombone: Particolare del campo di velocità in flusso uscente (28/04/2021 ore 2:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in una condizione di sizigia.



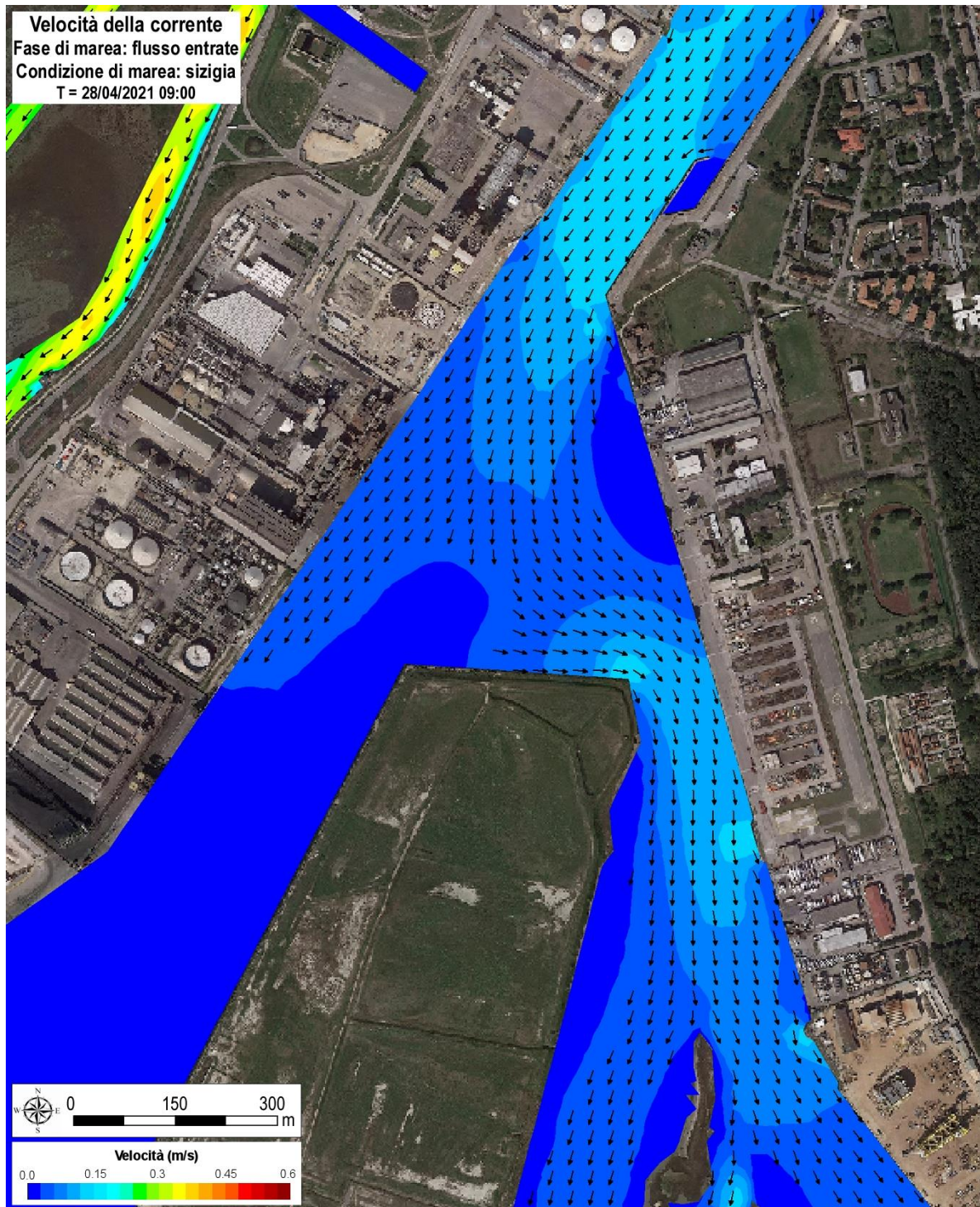


Figura 5.11 – Pialassa Piombone: particolare del campo di velocità in flusso entrante (28/04/2021 ore 9:00) calcolata con il modello matematico bidimensionale del sistema portuale di Ravenna in una condizione di sizigia.

## Riferimenti bibliografici

- [1] Parco Regionale Veneto del Delta del Po. Modellazione numerica a supporto delle attività di monitoraggio e della progettazione e realizzazione degli interventi nella Laguna di Caleri e nella Laguna di Barbamarco sul Delta del Po. Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l., 2018
- [2] Regione Veneto – U. O. Genio Civile di Rovigo - Interventi di ripristino e protezione della linea di costa nei paraggi dei litorali del Delta del Po tra la Foce del Po di Levante e la Foce del Po di Goro a seguito dell'erosione delle spiagge nei comuni di Porto Viro, Porto Tolle e Ariano Polesine - Modellazione delle forzanti relative all'idrodinamica e al moto ondoso, 2021.
- [3] D'Alpaos, L. and A. Defina, Venice Lagoon hydrodynamics simulation by coupling 2D and 1D finite element models. Procs. VIII International Conference on Finite Elements in Fluids - New trends and applications. Barcellona 20-24 sett. 1993, 917-926
- [4] Defina, A., L. D'Alpaos, and B. Matticchio, A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models, in Proceedings of the Specialty Conference on "Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas", Milan (Italy) 29 June -1 July 1994, edited by P. Molinaro and L. Natale, 72-81.
- [5] D'Alpaos, L. and A. Defina. Modellazione matematica del comportamento idrodinamico di zone a barena solcate da una rete di canali minori. Estratto da Rapporti e Studi, Ist. Veneto di Scienze, Lettere ed Arti, 1995.
- [6] D'Alpaos, L., A. Defina, B. Matticchio, 1996. A multi-layer model for shallow water flows and density currents applied to a lagoon in the Po river delta, 11th Int. Conf. on Comp. Methods in Water Resources, Cancun, Mexico, 1996. Ed. Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston.
- [7] Defina A., Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas. *Water Resour Res* 2000;36:3251. doi:10.1029/2000WR900167.
- [8] Defina, A., Numerical experiments on bar growth, *Water Resources Research*, vol.39, 4, 1092, 2003.
- [9] Carniello, L., L. D'Alpaos, A. Defina, S. Fagherazzi, A combined Wind Wave-Tidal Model for the Venice Lagoon, Italy, *J. Geophys. Res.*, vol. 110 pp. 1-15 ISSN: 0148-0227, 2005.
- [10] Viero, D.P. and A. Defina. Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. *Journal of Marine Systems*, 156 (April 2016), 16–29, doi:10.1016/j.jmarsys.2015.11.006.
- [11] Mel, R., Carniello, L., and D'Alpaos, L.: Addressing the effect of the Mo.S.E. barriers closure on wind setup within the Venice lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 225, 106249. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106249>, 2019a.
- [12] Mel, R., Carniello, L., Viero, D. P., Defina, A., and D'Alpaos, L.: The first operations of the Mo.S.E. system to prevent the flooding of Venice: insights on the hydrodynamics of a regulated lagoon. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 2021b.
- [13] Tomasin A. (2005), *The software Polifemo for tidal analysis*, Technical Note 202, ISMAR-CNR, Venezia

## **APPENDICE – Descrizione del modello matematico 2DEF**

### **NOTE GENERALI**

Le modellazioni esposte nel presente studio sono state effettuate utilizzando il codice di calcolo 2DEF, originariamente messo a punto dai proff. L. D'Alpaos e A. Defina dell'Università di Padova, e attualmente in uso presso il dipartimento DICEA dell'Università di Padova dove viene continuamente sviluppato ed utilizzato sia per scopi ingegneristici che di ricerca [7],[8],[9],[10],[11],[12].

Il codice 2DEF è stato appositamente sviluppato per le indagini sull'idrodinamica e sulla morfologia di lagune microtidali, come quelle che si trovano lungo il litorale Adriatico. È stato ed è diffusamente impiegato per indagini e studi sulla Laguna di Venezia, nonché sulla Laguna di Marano Grado, la Laguna di Caorle e le lagune del Delta del Po. Per queste ultime, in particolare, esso costituisce fino dagli anni '90 un ormai ampiamente collaudato strumento di indagine a supporto del monitoraggio e della progettazione degli interventi finalizzati alla salvaguardia e alla gestione delle lagune stesse.

Va ricordato, infine, che esso è stato ed è impiegato diffusamente anche per svolgere indagini sulle condizioni idrauliche dei più importanti corsi d'acqua della pianura veneta a supporto degli interventi ingegneristici finalizzati al controllo del regime idrodinamico dei corsi d'acqua, e per la valutazione degli effetti di opere che possono interferire con il sistema idrografico in particolare in presenza di situazioni di rischio idraulico.

Il codice 2DEF è basato su di uno schema numerico ad elementi finiti, che risolve le equazioni differenziali che governano il moto bidimensionale di una corrente a superficie libera su bassi fondali, formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno indagato. Esso consente, tra l'altro, l'accoppiamento di elementi bidimensionali e unidimensionali (schema 2D-1D), utilizzando gli uni nelle zone in cui la direzione della velocità nel piano orizzontale non è a priori individuabile, gli altri per descrivere il funzionamento dei canali e dei corsi d'acqua minori presenti nel dominio di calcolo. È possibile, infine, inserire nella schematizzazione anche speciali elementi unidimensionali in grado di descrivere localmente il funzionamento idraulico di manufatti come soglie, traverse, botti a sifone, dispositivi controllati da paratoie, impianti idrovori, ecc..

Il modello matematico dispone di una serie di moduli aggiuntivi. Con essi è possibile simulare la propagazione del moto ondoso e le correnti da esso indotte, il trasporto di sedimenti al fondo e in sospensione, e l'evoluzione dei fondali indotta dalle correnti di marea e da quelle generate dal moto ondoso, il trasporto e la diffusione di sostanze rilasciate in acqua, e quindi i tempi di residenza, con approccio sia euleriano che lagrangiano.

È disponibile anche una versione 3D del modello (denominata 3DEF), che consente di simulare la circolazione delle correnti di marea anche in presenza di variazioni di densità valutando il trasporto della salinità e quindi descrivendo il fenomeno del contatto e del mescolamento tra le acque salate di origine marina e quelle dolci fluviali. Questa versione è stata sviluppata a partire dal modello 2DEF e condivide con questo gran parte dell'impostazione del codice e degli algoritmi risolutivi. Il modello 3DEF adotta, in particolare, la medesima griglia di calcolo del modello 2DEF e può quindi condividere con quest'ultimo la schematizzazione del dominio di calcolo.

### **LE EQUAZIONI DEL MOTO**

Per quanto riguarda gli aspetti idrodinamici, le equazioni che governano il moto in ipotesi di fondali lentamente erodibili sono formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno ([5], [7], [8]).

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{d(q_x / Y)}{dt} + \frac{q_x |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wx}}{\gamma Y} - Re_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{1}{g} \frac{d(q_y / Y)}{dt} + \frac{q_y |\mathbf{q}|}{K_s^2 \cdot H^{10/3}} - \frac{\tau_{wy}}{\gamma Y} - Re_y = 0 \quad (2)$$

$$\eta(h) \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \mathbf{q} = 0 \quad (3)$$

Nelle equazioni precedenti,  $h$  indica la quota idrometrica,  $x, y$  sono le ascisse spaziali orizzontali correnti,  $g$  è l'accelerazione di gravità,  $K_s$  è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler,  $t$  è il tempo,  $\mathbf{q}=(q_x, q_y)$  è la velocità integrata sulla verticale,  $\tau_{wx}$  e  $\tau_{wy}$  sono i termini che descrivono l'effetto sulla circolazione delle eventuali azioni del vento e/o del moto ondoso,  $Re_x$  e  $Re_y$  sono gli sforzi adimensionali di Reynolds nel piano orizzontale, calcolati mediante le seguenti relazioni:

$$Re_x = \frac{v_T}{g} \left( \frac{\partial^2 (\frac{q_x}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\frac{q_x}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad Re_y = \frac{v_T}{g} \left( \frac{\partial^2 (\frac{q_y}{Y})}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (\frac{q_y}{Y})}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Il coefficiente di viscosità cinematica turbolenta  $v_T$  che compare nelle precedenti relazioni, è determinato utilizzando come schema di chiusura il modello suggerito da *Smagorinsky* successivamente perfezionato da *Stansby*.

Nelle equazioni precedenti compaiono inoltre i termini  $\eta, Y$  e  $H$  i quali, nell'istante generico, indicano, rispettivamente, la frazione locale di dominio allagato, il volume d'acqua per unità di superficie ed un'altezza d'acqua equivalente introdotta per descrivere correttamente l'effetto dei termini dissipativi. Tali termini sono dati dalle espressioni seguenti:

$$\eta(h) = \frac{1}{2} [1 - \text{erf}(2Y_a / a_r)] \quad (5)$$

$$Y = \int_{-\infty}^h \eta \cdot dz = a_r \left\{ \eta \frac{Y_a}{a_r} + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} e^{-4(Y_a/a_r)^2} \right\} \quad (6)$$

$$H \cong Y + 0.27 \sqrt{Y \cdot a_r} \cdot e^{-2Y/a_r} \quad (7)$$

in cui  $\text{erf}()$  è la funzione errore,  $Y_a = h - h_f$ , essendo  $h_f$  l'altezza media locale del fondo e  $a_r$  indica la ampiezza massima delle ondulazioni locali del terreno.

I termini  $\tau_{wx}$  e  $\tau_{wy}$  che compaiono nelle equazioni precedenti descrivono, come si è detto, l'effetto delle eventuali azioni del vento e/o del moto ondoso. L'azione del vento è valutata mediante le seguenti relazioni

$$\begin{aligned} \tau_{wx} &= \tau_w \cos(\vartheta_w) & \tau_{wy} &= \tau_w \sin(\vartheta_w) \\ \tau_w &= c_w \rho_a w_w^2 & c_w &= 0.0015(1 - e^{-0.1w_w}) \end{aligned} \quad (8)$$

in cui  $w_w$  e  $\vartheta_w$  sono la velocità e la direzione del vento e  $\rho_a$  è la densità dell'aria.

Al contributo dovuto al vento può essere sommato quello prodotto dal moto ondoso, determinato dalle variazioni spaziali dei radiation stress:

$$\tau_{wx} = -\left(\frac{\partial R_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial R_{xy}}{\partial y}\right) \quad \tau_{wy} = -\left(\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial R_{yy}}{\partial y}\right) \quad (9)$$

in cui le componenti  $R_{xx}$ ,  $R_{xy}$  e  $R_{yy}$  dei radiation stress sono eventualmente valutate tramite un modulo che risolve l'equazione differenziale che governa la conservazione dell'azione d'onda nell'ipotesi di onda monocromatica, tramite la formulazione di *Longuet-Higgins e Stewart*.

### **LO SCHEMA NUMERICO**

Si osserva, nelle equazioni precedenti, che l'accelerazione convettiva è, di fatto, considerata in modo lagrangiano, dato che la variazione nel tempo delle velocità mediate lungo la verticale è rappresentata da una derivata totale.

Per la discretizzazione di questo termine si è adottata una tecnica alle differenze finite trascurando, perché piccola, la variazione temporale dell'altezza d'acqua  $Y$ . In queste ipotesi, ad esempio, la derivata totale della velocità nella direzione  $x$ , è calcolata come segue:

$$\frac{d(q_x/Y)}{dt} \cong \frac{(q_x/Y)' - (q_x/Y)'_0}{\Delta t} \quad (10)$$

essendo le grandezze con apice riferite all'istante di calcolo precedente. Conseguentemente la derivata totale delle velocità, calcolata nel generico punto  $P$  del campo di moto, si scrive come differenza tra la velocità  $(q_x/Y)'$  calcolata nello stesso punto  $P$  e la velocità  $(q_x/Y)'_0$  calcolata, invece, nel punto  $P_0$  che si determina per integrazione a ritroso nel tempo lungo la "linea di fumo" passante per  $P$ .

Senza entrare nel merito della soluzione numerica adottata, ci si limita a ricordare che il sistema delle equazioni, nelle incognite  $h$  e  $q$ , è risolto con il metodo degli elementi finiti, adottando una soluzione secondo uno schema alle differenze finite semi-implicito per le derivate temporali. Poiché nella discretizzazione spaziale del campo di moto si sono utilizzati elementi finiti di forma triangolare, la soluzione per i livelli prevede una variazione lineare delle quote idrometriche all'interno di ciascun elemento, mentre le velocità (integrate sulla verticale) sono considerate costanti sull'elemento.

### **ELEMENTI 2D SPECIALI**

Nei sistemi idrografici naturali sono spesso presenti elementi il cui comportamento non può essere descritto in modo semplice e diretto mediante le equazioni appena descritte. Per le resistenze prodotte dalla presenza di vegetazione, ad esempio, che si vanno a sovrapporre a quelle dell'attrito sul fondo, è necessario introdurre una formulazione apposita. Così come, per gli effetti idrodinamici prodotti dalla presenza di pile e altre forme di ostruzione dell'alveo, qualora il grado di dettaglio della griglia di calcolo non sia sufficientemente spinto per poter correttamente descrivere l'idrodinamica locale a piccola scala, è necessario introdurre opportune relazioni addizionali che ne tengano conto in modo complessivo. Altri effetti non considerati nelle equazioni presentate nel precedente paragrafo sono, ad esempio, la perdita di volume per infiltrazione o la presenza di piccole porzioni di dominio dove il moto può avvenire in pressione. Si pensi, a tale proposito, al funzionamento di un ponte quando il livello dell'acqua raggiunge la quota dell'impalcato.

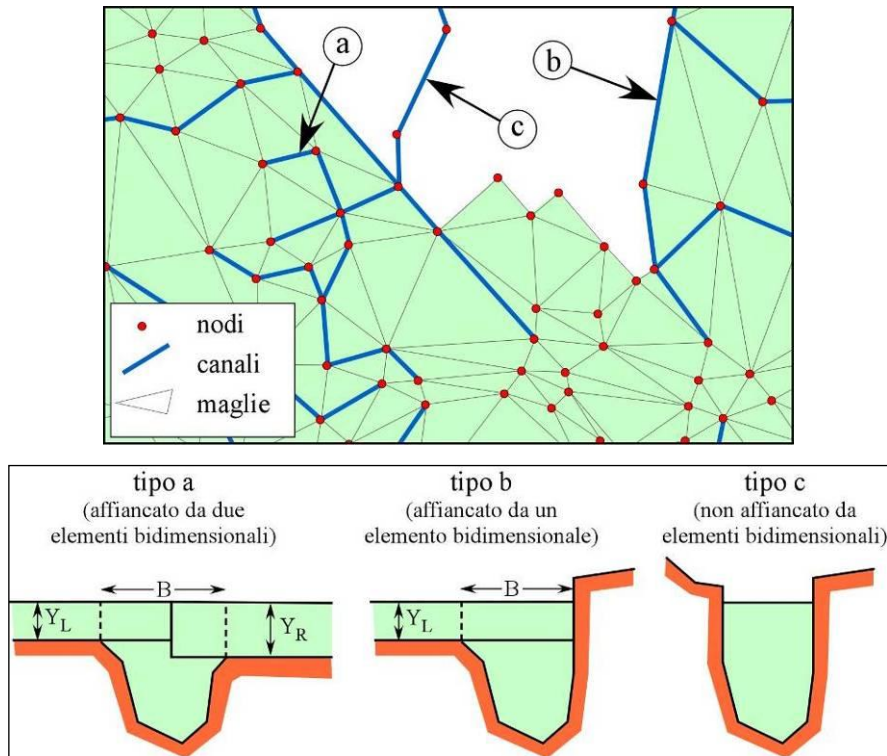
Per descrivere queste situazioni, per le quali il moto mantiene ancora carattere bidimensionale, sono introdotti alcuni elementi speciali per i quali, nella fase di costruzione del reticolo di calcolo, è necessario specificare alcuni specifici parametri.

### **ELEMENTI UNIDIMENSIONALI**

La schematizzazione con elementi bidimensionali della rete idrografica minore presenterebbe non poche difficoltà, poiché da una parte essa porterebbe all'utilizzo di elementi di dimensioni così piccole da rendere assai onerosa la fase di costruzione del reticolo, dall'altra potrebbe generare l'insorgere di problemi nella soluzione numerica, a meno di non adottare passi di integrazione temporale particolarmente ridotti. Inoltre, la schematizzazione di tratti di condotte a sezione chiusa mediante elementi bidimensionali risulta proibitiva. Per questa ragione il modello consente l'impiego accoppiato di elementi bidimensionali ed unidimensionali, utilizzando questi ultimi per descrivere il funzionamento dei canali della rete minore, che drena porzioni di territorio soggette a prosciugamento, per simulare piccole incisioni profonde in un dominio sostanzialmente bidimensionale o per includere nella schematizzazione tratti di condotte di sezione chiusa.

In pratica, nello schema adottato, gli elementi unidimensionali funzionano come canali "in pressione" a sezione costante, fino a quando le zone laterali che li fiancheggiano sono ricoperte dalle acque, e come canali a pelo libero quando il livello scende al di sotto della quota delle zone laterali.

Il comportamento idraulico di un sistema idrografico articolato e complesso può essere quindi descritto in modo efficace con un reticolo di elementi bidimensionali i cui lati seguono, nelle zone in cui ciò è necessario, il tracciato degli eventuali canali minori presenti. I canali unidimensionali, a loro volta, possono essere comunque connessi fra loro, purché siano disposti lungo i lati del reticolo bidimensionale e si appoggino agli stessi nodi. L'accorgimento consente operativamente che essi possano essere inseriti o disinseriti dal reticolo di calcolo senza dover modificare la struttura del reticolo formato dagli elementi bidimensionali [5].



Esempio schematico di elementi unidimensionali e bidimensionali combinati: pianta (sopra) e sezione (sotto).

Può accadere che il canale definito tra due nodi non sia affiancato da elementi bidimensionali o che durante l'evolversi del fenomeno gli elementi bidimensionali che lo fiancheggiano siano prosciugati. In queste condizioni, come si è detto, il canale funziona a superficie libera. Le possibili situazioni che si possono presentare sono tre, vale a dire il generico tronco di canale è affiancato da due elementi bidimensionali, da un solo elemento bidimensionale o da nessun elemento bidimensionale, come illustrato in pianta e in sezione in figura.

Nel modello, l'equazione dinamica contiene alcune semplificazioni. Si assume innanzitutto trascurabile l'inerzia convettiva. Il modello poi considera solo sezioni trasversali compatte, per quali sia possibile assumere una distribuzione di velocità sensibilmente uniforme. In queste ipotesi, le equazioni dinamica e di continuità sono:

$$\frac{\partial h}{\partial s} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q|Q|}{K_s^2 R_H^{4/3} A^2} = 0 \quad (11)$$

$$\eta(h) \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (12)$$

nelle quali A è l'area della sezione trasversale,  $R_H$  è il raggio idraulico, Q la portata e s l'ascissa curvilinea che descrive planimetricamente l'andamento dell'asse del canale.

Come per le equazioni dinamiche bidimensionali, il primo passo consiste nel discretizzare la derivata temporale che compare nella (11) alle differenze finite, ottenendo:

$$Q = - \left( \frac{1}{gA\Delta t} + \frac{|Q|}{k_s^2 R_H^{4/3} A^2} \right)^{-1} \left[ \frac{\partial h}{\partial s} - \left( \frac{Q}{gA\Delta t} \right) \right] \quad (13)$$

nella quale i termini tra parentesi rotonde sono calcolati al passo temporale precedente.

Nel modello, in particolare, sono implementate specifiche procedure per considerare che, per effetto della sovrapposizione tra elementi unidimensionali e bidimensionali (vedi figura) una frazione della portata che fluisce lungo i canali unidimensionali è già considerata nel calcolo attraverso gli elementi bidimensionali.

### **ELEMENTI 1D SPECIALI**

Nei sistemi idrografici complessi, sono spesso presenti elementi morfologici naturali o artificiali che fungono da strutture di contenimento delle acque fino a quando le quote idrometriche non superano un certo livello. Tipica in tal senso è la funzione delle arginature le quali difendono inizialmente dalle acque il territorio adiacente, che è però soggetto ad allagamento una volta che localmente o in modo diffuso le quote idrometriche superino le quote delle sommità arginali.

Per simulare allora con buona approssimazione la presenza di elementi morfologici particolari (quali argini, rilevati stradali o manufatti che possono modificare apprezzabilmente l'evoluzione del fenomeno) il modello uni-bidimensionale descritto nei paragrafi precedenti è stato modificato prevedendo l'inserimento di una serie di elementi unidimensionali (tronchi) speciali, che consentono di descrivere correttamente le conseguenze di una manovra di regolazione o di eventuale cedimento del sistema delle numerose opere di difesa longitudinale presenti.

Mediante l'inserimento di tali elementi è possibile simulare, in particolare, il funzionamento delle arginature, che non potrebbero diversamente essere descritte correttamente utilizzando soli elementi bidimensionali. I rilevati arginali sono perciò schematizzati come soglie sfioranti, per le quali è sufficiente assegnare le caratteristiche geometriche e il valore del coefficiente di portata perché il modello determini, al variare delle quote idrometriche, l'andamento della portata che eventualmente tracima la soglia, considerando sia condizioni di efflusso libero che di efflusso rigurgitato.

Altri tronchi speciali inseriti nello schema di calcolo consentono di simulare il funzionamento di soglie o salti di fondo, di brevi tratti di canale in pressione, come sottopassi o botti a sifone; altri elementi ancora permettono di simulare il funzionamento di paratoie, che possono operare automaticamente comandate dai livelli o dalla direzione del flusso (porte vinciane), oppure riprodurre una scala di deflusso (legame tra livello di monte e portata) assegnata per punti.

### **MODULO 3D MULTISTRATO A DENSITA' VARIABILE**

Il modello 2DEF può essere impiegato anche in configurazione 3D. In questo caso si assume un'ipotesi generalmente adottabile per lo studio della circolazione in presenza di gradienti di salinità. Si tratta dell'ipotesi che consente di simulare le cosiddette "correnti di densità", e che considera in direzione verticale distribuzione idrostatica delle pressioni. Sulla base di tale ipotesi le equazioni che descrivono il moto bidimensionale di una corrente possono essere scritte come segue [6]:



$$\begin{aligned}
 \frac{dU_i}{dt} + g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\Delta z_i \cdot \rho_0} (T_{zx_{i+1}} - T_{zx_i}) &= -g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial S_i}{\partial x} \\
 \frac{dV_i}{dt} + g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\Delta z_i \cdot \rho_0} (T_{zy_{i+1}} - T_{zy_i}) &= -g \frac{\Delta_i}{\Delta z_i} \frac{\partial S_i}{\partial y} \\
 \theta(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \sum_i \Delta z_i U_i + \frac{\partial}{\partial y} \sum_i \Delta z_i V_i &= 0 \\
 \frac{\partial \Delta_i}{\partial t} + \frac{\partial \Delta z_i U_i}{\partial x} + \frac{\partial \Delta z_i V_i}{\partial y} + \Omega_{i+1} - \Omega_i &= 0 \\
 \frac{\partial \Delta_i C_{\Delta i}}{\partial t} + \frac{\partial \Delta z_i U_i C_{\Delta i}}{\partial x} + \frac{\partial \Delta z_i V_i C_{\Delta i}}{\partial y} + F_{C_{i+1}} - F_{C_i} - \nabla \mathbf{D} \nabla \Delta_i C_{\Delta i} &= 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

essendo  $i=1, N$  con  $N$  numero degli strati in cui è suddiviso il campo di moto lungo la verticale.

Le variabili nelle equazioni (14) sono mediate in fase all'interno dell'area elementare e integrate lungo la verticale dal limite inferiore  $\zeta_i$  al limite superiore  $\zeta_{i+1}$  del singolo strato il cui spessore è, pertanto,  $\Delta z_i = \zeta_{i+1} - \zeta_i$ .

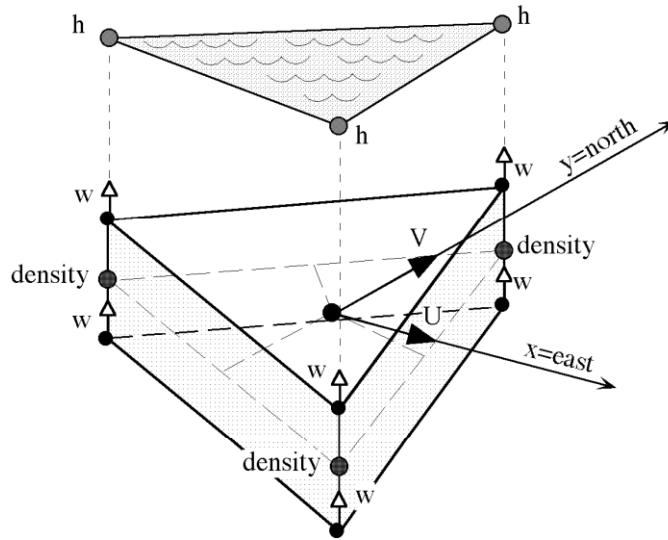
Definito con  $\theta$  la porzione di area occupata dalla fase fluida per unità di superficie, le variabili contenute in (14) sono definite come segue:

$$\begin{aligned}
 \Delta_i &= \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} \theta(z) dz & S_i &= \frac{1}{\rho_0 \Delta z_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} \int_z^h \theta(\rho - \rho_0) d\zeta dz \\
 U_i &= \frac{1}{\Delta z_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} U(z) dz & V_i &= \frac{1}{\Delta z_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} V(z) dz & C_{\Delta i} &= \frac{1}{\Delta_i} \int_{\zeta_i}^{\zeta_{i+1}} C(z) dz
 \end{aligned} \tag{15}$$

dove  $U(z)$  e  $V(z)$  sono le componenti della velocità lungo gli assi coordinati  $x$  e  $y$ ;  $z$  è la coordinata verticale;  $\rho, \rho_0$  sono, rispettivamente, la densità attuale e media;  $t$  è il tempo;  $h$  è l'elevazione della superficie libera;  $\mathbf{D}$  il tensore della diffusione e  $C(z)$  denota alternativamente la salinità o la temperatura.  $\Omega_i$  e  $F_{C_i}$  sono i flussi verticali per unità di superficie che attraversano l'interfaccia di separazione tra lo strato  $i-1$  e lo strato  $i$ , mentre gli sforzi di attrito  $T_{zx_i}$  e  $T_{zy_i}$  sono valutati come:

$$\begin{aligned}
 T_{zx_i} &= \rho_0 \mathfrak{R} \Xi_i |\Delta \mathbf{V}_i| (U_i - U_{i-1}) \\
 T_{zy_i} &= \rho_0 \mathfrak{R} \Xi_i |\Delta \mathbf{V}_i| (V_i - V_{i-1})
 \end{aligned} \tag{16}$$

in cui  $|\Delta \mathbf{V}_i| = [(U_i - U_{i-1})^2 + (V_i - V_{i-1})^2]^{1/2}$ ,  $\sqrt{\Xi}$  è la lunghezza adimensionale di mescolamento e  $\mathfrak{R} = (1 - Ri)^{1/6}$  tiene conto dello smorzamento della turbolenza dovuto alla stratificazione, essendo  $Ri$  il numero di Richardson. La definizione delle variabili è riprodotta schematicamente anche nella figura seguente.



*Variabili del campo di moto di una corrente stratificata tridimensionale*

Le equazioni (14) sono risolte utilizzando uno schema standard agli elementi finiti seguendo un approccio di tipo Lagrangiano per valutare le derivate totali presenti, mentre i termini a destra del segno di uguaglianza sono assunti costanti all'interno del generico passo di calcolo temporale (approssimazione Barotropica). In questo modo le prime due delle equazioni (14) possono essere scritte in forma matriciale come

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}][\mathbf{U}] &= [\mathbf{B}] \frac{\partial h}{\partial x} + [\mathbf{B}_x] \\ [\mathbf{A}][\mathbf{V}] &= [\mathbf{B}] \frac{\partial h}{\partial y} + [\mathbf{B}_y] \end{aligned} \quad (17)$$

Le equazioni (17) risolte danno:

$$U_i = \psi_i \frac{\partial h}{\partial x} + \varphi_{xi} \quad V_i = \psi_i \frac{\partial h}{\partial y} + \varphi_{yi} \quad i = 1, N \quad (18)$$

mentre la terza delle equazioni (14), tenendo conto delle (18), diventa:

$$\theta(h) \cdot \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \psi \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \psi \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

dove:

$$\psi = \sum_i \Delta z_i \cdot \psi_i ; \quad \varphi_x = \sum_i \Delta z_i \cdot \varphi_{xi} ; \quad \varphi_y = \sum_i \Delta z_i \cdot \varphi_{yi} \quad (20)$$

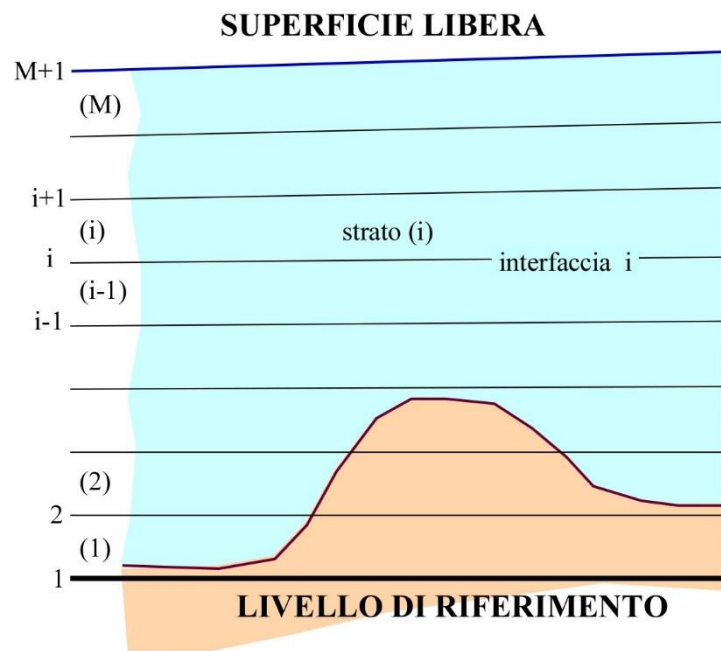
Si noti che l'equazione (19), contenendo la sola incognita h, è formalmente identica all'equazione che descrive l'andamento della superficie libera per il moto bidimensionale di una corrente omogenea. Ciò consente di utilizzare la medesima procedura numerica per ottenere la soluzione utilizzata per il modello 2D.

Una volta valutata l'elevazione della superficie libera in ogni nodo del reticolo di calcolo, sostituendo a ritroso h in (18), si ottiene il campo orizzontale di velocità. I flussi verticali sono valutati, infine, attraverso la quarta delle equazioni (14). A questo punto la quinta delle (14) è risolta per ottenere la concentrazione C utilizzando uno schema alle differenze in avanti (schema upwind).

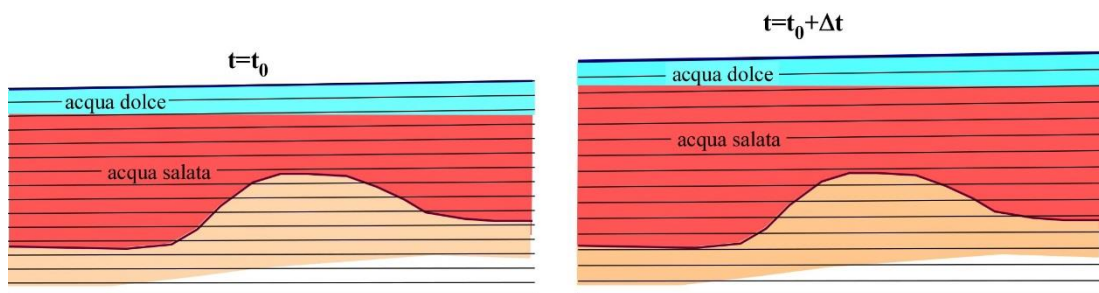
Nelle simulazioni condotte si è assunto che la concentrazione  $C$  possa essere direttamente sostituita con la densità del fluido, variabile per effetto della salinità.

Per quanto riguarda la discretizzazione in direzione verticale, due sono sostanzialmente le tecniche normalmente utilizzate nei modelli tridimensionali. La prima prevede uno schema a griglia fissa, sezionando il dominio mediante una successione di piani orizzontali. La seconda, prevede una discretizzazione verticale variabile nello spazio e nel tempo. In pratica, per ogni verticale, il dominio fluido compreso tra il fondo e la superficie libera si suddivide in un certo numero di tratti verticali. Questa discretizzazione, quindi, si adatta istante per istante al valore attuale della quota della superficie libera.

Entrambi questi metodi, però, non sono molto adatti in situazioni di acque molto basse e fondali ad andamento irregolare in quanto introducono una notevole diffusione di tipo numerico. Nel presente modello è stata preferita una discretizzazione diversa dalle due precedenti, la quale in qualche modo include i pregi di entrambe cercando di limitarne i difetti. Si tratta di una discretizzazione verticale simile a quella di secondo tipo ma che assume come limite, verso il basso, non la quota del fondo ma una quota fissa, di riferimento, in modo analogo alla discretizzazione di primo tipo (vedi figure seguenti). Si è verificato che in tal modo si riduce sensibilmente la diffusione verticale di tipo numerico.



*Discretizzazione adottata nel modello 3D*



*Effetto della discretizzazione in presenza di stratificazione della colonna d'acqua*