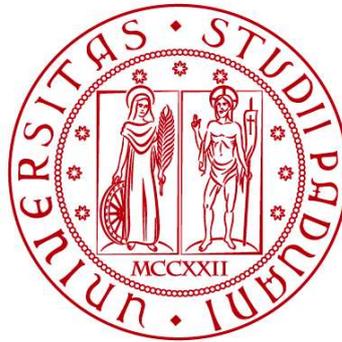


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E  
AMBIENTALE**

*Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering*

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile**



**TESI DI LAUREA**

**Modellazione idrodinamica bidimensionale  
della laguna di Grado-Marano**

Relatore:

**PROF. Luca Carniello**

Correlatore:

**DOTT. Davide Tognin**

Laureanda:

**Angelica Piazza**

1242334

**ANNO ACCADEMICO 2021-2022**



# Sommario

Abstract.....	1
1 Introduzione .....	3
1.1 Formazione ed evoluzione delle lagune.....	3
1.2 Morfologia delle lagune.....	5
1.3 Processi a cui sono soggetti gli ambienti lagunari.....	10
1.4 Le maree .....	13
2 Area di studio .....	17
2.1 La laguna di Grado-Marano.....	17
2.2 Origine ed Evoluzione .....	21
3 Modello bidimensionale idrodinamico.....	25
3.1 Modulo idrodinamico .....	25
3.1.1 Transizione asciutto-bagnato.....	27
3.2 Modulo di generazione e propagazione delle onde.....	29
3.2.1 Generazione da vento .....	32
3.2.2 Attrito al fondo .....	34
3.2.3 Frangimento per raggiungimento della ripidità limite dell'onda.....	35
3.2.4 Frangimento per interazione con il fondale.....	35
3.3 Parametri statistici.....	36
4 File della geometria.....	39
4.1 Individuazione del dominio di calcolo.....	39
4.2 Generazione della mesh .....	40
4.3 Quotatura .....	46
4.4 Assegnazione dei coefficienti di scabrezza secondo Strickler.....	52
5 File di simulazione .....	55

5.1	Condizioni iniziali .....	58
5.2	Condizioni al contorno .....	59
6	Applicazione del modello .....	65
6.1	Analisi di sensibilità sui coefficienti di Strickler .....	67
6.2	Analisi di sensibilità sui parametri del coefficiente di Drag .....	74
6.3	Calibrazione.....	76
7	Analisi idrodinamica.....	91
7.1	Influenza dei fiumi sull'idrodinamica lagunare .....	91
7.2	Partiacque .....	96
7.3	Influenza del vento sull'idrodinamica lagunare .....	103
7.3.1	Vento di Bora.....	104
7.3.2	Vento di Scirocco.....	109
7.3.3	Confronto fra set up della laguna di Grado e Marano e quella di Venezia.....	114
8	Conclusioni e sviluppi futuri .....	121
9	Bibliografia.....	123
10	Sitografia.....	127

## **Abstract**

Il presente lavoro di tesi ha come obiettivo la modellazione bidimensionale idrodinamica della Laguna di Grado e Marano mediante la predisposizione di un reticolo di calcolo e la successiva applicazione di un modello agli elementi finiti.

La modellazione 2D dovrà essere in grado di riprodurre l'idrodinamica interna alla laguna legata alla propagazione della marea e agli effetti del vento.

Il modello verrà calibrato mediante un confronto fra i livelli modellati e quelli effettivamente misurati in corrispondenza di 15 stazioni mareografiche presenti all'interno della laguna.

Una volta calibrato, lo stesso verrà utilizzato per svolgere alcune analisi idrodinamiche.

La prima riguarderà l'influenza dei fiumi sui livelli modellati all'interno della laguna, in relazione alla loro capacità di invaso e alle portate di acqua dolce che essi convogliano in laguna.

La seconda analisi avrà come oggetto la determinazione dei partiacque, che delimitano i bacini corrispondenti ad ogni bocca lagunare, individuando in questo modo le bocche dominanti e gli eventuali effetti legati alle circolazioni interne nel caso di vento forte che spirava sulla superficie lagunare.

L'ultima indagine riguarderà gli effetti idrodinamici dovuti alla presenza di vento sull'area lagunare che influisce sulla stima dei livelli. In questo caso, sarà possibile confrontare le condizioni di assenza e presenza di vento e stimare l'effetto della marea meteorologica rispetto alla sua componente astronomica.

Dai livelli modellati in presenza di vento sarà poi possibile valutare il setup, cioè il dislivello fra parte nord e sud oppure est e ovest della laguna, dovuto rispettivamente dalla presenza di vento di Scirocco proveniente da SE e vento di Bora proveniente da NE. I setup calcolati verranno poi confrontati con quelli che si verificano nella Laguna di Venezia a parità di condizioni meteorologiche.



# 1 Introduzione

## 1.1 Formazione ed evoluzione delle lagune

La laguna rappresenta una porzione di mare semi-chiusa a causa della presenza di penisole o isole barriera, la quale comunica con il mare attraverso le bocche di porto (Figura 1-1).



*Figura 1-1: Immagine satellitare della Laguna di Grado e Marano.*

La formazione e il mantenimento di una laguna è strettamente legato all'azione della marea che è influenzata da fattori astronomici e meteorologici caratteristici del sito analizzato.

Dal punto di vista geologico, questi ambienti si formano in concomitanza a trasgressioni, cioè eventi geologici durante i quali il livello del mare si innalza allagando zone in precedenza asciutte, che possono essere causate da eventi tettonici o da un grande mutamento climatico.

Oltre a questa condizione, affinché vi sia lo sviluppo e il consolidamento dell'ambiente lagunare, vi deve essere un sufficiente apporto solido (di origine fluviale o derivato dall'erosione costiera) e un significativo trasporto di sabbie lungo la riva.

Se il regime è di tipo regressivo invece, cioè vi è la presenza di eventi geologici nel corso dei quali il livello del mare si abbassa facendo emergere superfici che prima erano sommerse, gli ambienti lagunari tendono a estinguersi.

La formazione di una laguna dipende, dunque, dall'equilibrio di diversi fattori: il tasso di innalzamento dei livelli del mare, la quantità di apporto solido, il trasporto lungo riva, la marea e il clima locale.

Se uno di questi fattori prevale sull'altro, la formazione di questi ambienti non è possibile: ad esempio un rapido innalzamento marino con apporto di sedimenti non sufficienti creerà più facilmente degli stagni costieri (bacino costiero chiuso, e quindi non dominato dalle maree) che delle vere e proprie lagune.

Oltre a questi fattori, per la formazione delle lagune, è necessaria la presenza di due sorgenti terrigene puntiformi, di solito rappresentate da due foci fluviali, responsabili della definizione laterale delle lagune stesse e la presenza di una pianura alluvionale nell'immediato retroterra della fascia costiera.

Mediante le foci a delta, i fiumi sfociano in mare e apportano sedimenti oltre alla linea di costa; se vi è la presenza di rilevante trasporto lungo riva, parte dei sedimenti vengono dispersi sulle zone poco profonde antistanti alla costa e vanno a costituire i primi lidi (Figura 1-2).

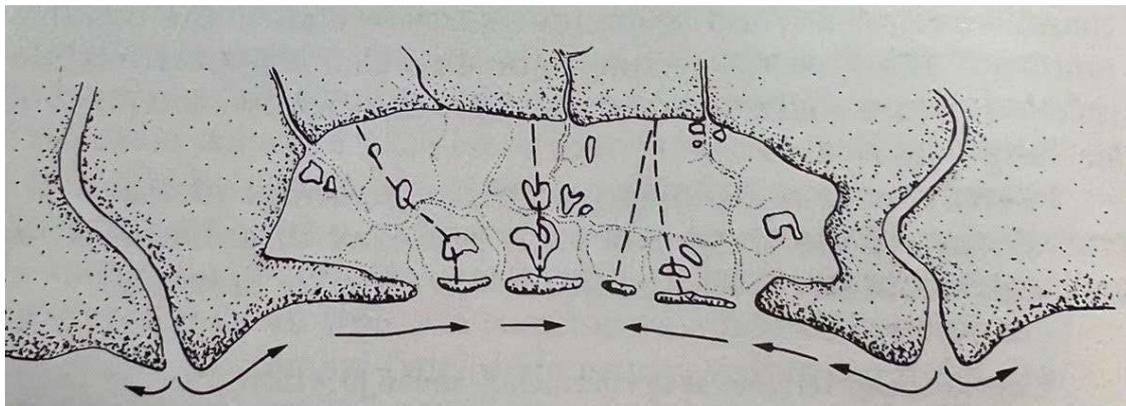


Figura 1-2: Esempio-tipo di formazione di una laguna (le linee tratteggiate indicano i bacini lagunari sottesi da ogni bocca tidale, le frecce indicano la direzione del trasporto solido a causa delle correnti litoranee) ricavata da fonte bibliografica Brambati et al. (1988).

L'ambiente che si realizza non è statico, ma in perenne evoluzione in funzione dei mutamenti delle aste fluviali e degli apparati deltizi. Questi ultimi infatti subiscono nel tempo una variazione della loro mutua distanza, ma anche una variazione di posizione in relazione alla loro maggiore o minore progressione in mare. Anche i lidi, che vanno a costituire l'arco lagunare, a loro volta subiranno delle variazioni geometriche a causa del trasporto longitudinale e trasversale per opera del mare. Queste comporteranno la formazione o l'estinzione delle bocche di porto, attraverso le quali la laguna comunica con il mare.

L'equilibrio del cordone litoraneo assieme alle bocche di porto è inoltre influenzato anche dalla marea. Infatti, lagune caratterizzate da forti escursioni di marea garantiscono una maggiore stabilità delle bocche rispetto ad ambienti dove l'escursione è modesta. In questo secondo caso il trasporto longitudinale ad opera delle correnti prevale sull'azione delle maree e si ha una costante tendenza alla migrazione delle bocche nella direzione del trasporto; questo può comportare l'assottigliamento del cordone litorale, se gli apporti di nuovi sedimenti sono scarsi, con conseguente possibilità di rottura. La comparsa di nuove aperture verso il mare comporta la variazione delle superfici lagunari (bacini) sottese da ogni bocca di porto.

Si può concludere, dunque, che l'entità del trasporto solido lungo riva e l'azione delle maree siano i principali fattori che regolano il regime idraulico e sedimentologico dell'ambiente lagunare, in quanto il numero di bocche e le loro dimensioni possono variare continuamente.

Questo comporta una continua variazione dei volumi d'acqua che ogni bocca scambia con il mare, rimane invece pressoché costante il volume totale scambiato dall'intera laguna.

L'evoluzione di una laguna può essere inoltre condizionata dall'apporto di sedimenti da parte dei corsi d'acqua minori che sfociano direttamente nella stessa. Se il loro contributo è poco rilevante, la loro influenza si limita a fenomeni di interrimento in corrispondenza delle loro foci, che saranno più o meno consolidati a seconda delle velocità di scorrimento delle acque e dall'azione delle maree.

## **1.2 Morfologia delle lagune**

All'interno di una laguna si possono distinguere diverse tipologie morfologiche in funzione alla loro elevazione rispetto al livello medio del mare:

- Insieme di morfologie che stanno al di sopra del livello medio delle alte maree: isole, dune, barene e pseudobarene.
- Insieme di morfologie che stanno al di sotto del livello medio delle basse maree: canali principali e bocche di porto
- Insieme di morfologie che hanno elevazione compresa fra il livello medio delle basse maree e il livello medio delle alte maree: bassifondi e canali secondari.

Le *barene* (Figura 1-3) sono morfologie caratteristiche degli ambienti lagunari e sono prevalentemente costituite da sedimenti limo-argillosi; presentano una vegetazione tipica delle aree lagunari in grado di sopportare la sommersione per alcune ore e in grado di resistere alla salinità dell'acqua.



Figura 1-3: Esempio di barene situate nella Riserva Naturale "Foci dello Stella".

Al loro interno troviamo una serie di piccoli e tortuosi canali chiamati *ghebi* (Figura 1-4), che fungono da via preferenziale per il flusso e il riflusso della marea all'interno delle stesse e delle zone depresse non vegetate chiamate *chiari*.



Figura 1-4: Esempio di ghebi nella barena a nord-est dell'Isola di Bioni.

In particolare, le barene sono morfologie che si sono formate a seguito del deposito dei sedimenti fluviali, dovuto alle basse velocità che caratterizzano le acque con cui vengono parzialmente sommerse durante le fasi di alta marea.

Zone particolarmente adatte alla formazione di barene sono quelle caratterizzate dall'incontro fra masse d'acqua provenienti da due bocche lagunari attigue. In queste zone è possibile individuare una linea immaginaria, detta partiacque, che separa i bacini lagunari sottesi dalle due bocche, lungo la quale la velocità del flusso è quasi nulla, favorendo dunque il deposito dei sedimenti trasportati sospesi nel suo intorno dando origine alle barene. Essendo, però, l'ambiente lagunare in continua evoluzione, le stesse si possono trovare anche distanti dagli attuali partiacque, a causa della variazione di posizione delle bocche di porto (o addirittura estinzione o formazione di una nuova) e dei rispettivi bacini lagunari nel tempo.

Con il termine pseudobarena si fa invece riferimento a zone con elevazione coincidente con il livello medio delle alte maree che sono il residuo della pianura alluvionale sommersa nelle fasi di formazione dell'ambiente lagunare.

Barene e pseudobarene contornano, generalmente, in maniera più o meno estesa tutto il contorno lagunare interno e, in particolare, le foci dei corsi d'acqua tributari.

Fra le morfologie che hanno elevazione media al di sotto del livello medio delle basse maree troviamo invece i *canali principali* e le *bocche di porto*.

I *canali principali* (Figura 1-5) si sviluppano a partire dalle bocche di porto, dove sono ampi e con profondità superiori ai 10 m, verso l'interno della laguna. Essi molte volte coincidono con l'antica idrografia fluviale preesistente all'inondazione della pianura alluvionale e si raccordano infatti ai corsi d'acqua che sfociano nella laguna.



Figura 1-5: Esempio di canale principale proseguimento del Fiume Stella.

I canali principali, oltre al ricambio idrico, provvedono anche all'apporto di sedimenti e nutrienti, tali da garantire la sopravvivenza della laguna e del suo intero ecosistema.

Le *bocche di porto* (Figura 1-6) sono aperture in corrispondenza del cordone litoraneo attraverso le quali la laguna comunica con il mare. Esse sono caratterizzate da una profondità del fondale che aumenta rapidamente procedendo dall'interno della laguna fino all'apertura (pendenze medie del 1.5%) mentre verso il mare le pendenze sono modeste (decimetri/100m) e indicano la presenza del delta sommerso tipico delle bocche lagunari.



Figura 1-6: Bocca di Lignano.

Fra le morfologie che hanno elevazione media compresa fra il livello medio delle basse maree e il livello medio delle alte maree troviamo invece i *canali secondari* e i *bassifondi*.

I *bassifondi* (Figura 1-7) rappresentano aree molto estese a bassa pendenza (dm/km) che possono essere perennemente sommerse o temporaneamente emerse durante la fase di bassa marea sizigiale, in funzione della loro elevazione e dell'escursione locale di marea. Sono generalmente composti da sabbie limo-argillose e da una forte componente organica; possono essere ricoperti da vegetazione bentonica o non essere vegetati. Sono caratterizzati da un sistema di *canali secondari* che insieme ai canali principali costituiscono una rete che funge da via preferenziale lungo la quale si propaga l'onda di marea. Il loro livello di base sul medio mare coincide con il livello medio delle basse maree sizigiali; pertanto, la loro profondità dipende dall'escursione locale di marea.



*Figura 1-7: Esempio di bassifondi e canali secondari presso le Isole della Gran Chiusa.*

All'interno dell'ambiente lagunare troviamo infine le *valli da pesca* (Figura 1-8), cioè aree interne alla laguna che non sono interessate dal flusso e riflusso della marea perché sono separate dal resto della laguna mediante delle arginature artificiali. Esse sono bacini il cui apporto d'acqua è presidiato da chiaviche che regolano il flusso di acqua salata al loro interno; esse vengono utilizzate per l'allevamento e la cattura del pesce.



*Figura 1-8: Esempio di valli da pesca lungo il canale Simuna.*

La *salinità* dell'acqua all'interno delle lagune generalmente si riduce gradualmente dal mare verso l'interno grazie all'apporto di acqua dolce da parte dei corsi d'acqua contribuenti; infatti, la sua riduzione si accentua in prossimità delle foci dei fiumi tributari. Questa condizione si verifica tipicamente durante tutto l'anno salvo nella stagione estiva, dove i fenomeni di forte evaporazione possono portare la salinità dell'acqua lagunare a valori superiori a quelli presenti nel mare antistante.

I *sedimenti* lagunari sono caratterizzati generalmente da una riduzione granulometrica dalle bocche di porto fino alla costa interna. Le sabbie che vengono trasportate dal moto ondoso longitudinalmente a riva e poi trasversalmente a causa del flusso e riflusso delle maree, vengono disperse in laguna per alcuni chilometri a partire dalle bocche lagunari e lungo i canali principali. Si succedono poi le sabbie limose e i limi sabbiosi all'interno dei bassifondi, fino ad arrivare alle argille lungo la fascia più interna della costa e in prossimità delle zone di partiacque. Questa distribuzione può subire delle variazioni in prossimità delle foci dei corsi d'acqua tributari, dove si trovano solitamente ulteriori zone sabbiose. La distribuzione sedimentologica appena descritta è quella tipica, ma la distribuzione di ogni laguna è caratteristica dell'idrodinamica, del regime marino e climatico del sito in esame.

### **1.3 Processi a cui sono soggetti gli ambienti lagunari**

L'ambiente lagunare è soggetto a una serie di processi naturali e antropici, che operano a diverse scale temporali e spaziali.

Durante la fase di marea crescente (vedi Figura 1-9), la massa d'acqua fluisce attraverso le bocche di porto raggiungendo la massima velocità (anche superiore a 2 m/s durante le maree in sizigia) e il massimo sforzo al fondo in corrispondenza delle stesse; la marea così si propaga attraverso il reticolo di canali interni alla laguna che funge da via preferenziale di flusso. Attraverso i canali principali e poi secondari, la marea si espande sui bassifondi dove la velocità del flusso è notevolmente inferiore (cm/s) e se il livello di alta marea è importante anche le barene verranno sommerse dalla massa d'acqua.

Nella fase decrescente di marea (vedi Figura 1-9), il processo si inverte e le acque vengono raccolte dai canali che fungono da collettori che restituiscono attraverso le bocche di porto la massa d'acqua direttamente al mare.

Ad ogni bocca lagunare corrisponde un bacino lagunare retrostante che è separato da quelli attigui da una linea immaginaria di partiacque, dove le masse d'acqua entranti da due bocche di porto vicine si incontrano. Fra due bacini vi sarà mescolamento delle masse d'acqua solo nel caso di forti venti, viceversa il volume d'acqua che fluisce da una bocca di porto verrà restituito al mare durante la fase di riflusso della marea dalla stessa bocca.

In particolare, i fattori idrodinamici che maggiormente influenzano l'erosione, il trasporto e il deposito di sedimenti all'interno della laguna sono le *maree* e le *onde da vento*.

Le onde di marea, che si propagano dalle bocche di porto lungo i canali, sono responsabili della formazione dei canali stessi per mezzo dell'erosione al fondo che esercitano (D'Alpaos et al., 2005). Le stesse trasportano materiale non coesivo sul fondo e materiale fino coesivo in sospensione durante le fasi di flusso e riflusso (Wang, 2012).

Quando la marea si espande lateralmente sui bassifondi rallenta notevolmente (Friedrichs and Madsen, 1992) e il materiale trasportato tende a sedimentare. Il materiale viene mantenuto in sospensione questa volta dalle onde da vento che si creano all'interno della laguna (Anderson, 1972; Le Hir et al., 2000; Green and Coco, 2014).

Esse sono onde di breve periodo, che non son in grado di esercitare uno sforzo al fondo all'interno dei canali dove la profondità è maggiore (D'Alpaos et al., 2013), ma all'interno dei bassifondi dove le quote del fondo sono notevolmente inferiori riescono a mantenere in sospensione il materiale che tenderebbe altrimenti a sedimentare (Fagherazzi and Wiberg, 2009; Carniello et al., 2011; Green and Coco, 2014).

Se il livello di marea è abbastanza elevato, le onde da vento possono propagarsi attraverso i ghebi all'interno delle barene. La massa d'acqua si espande lateralmente sulla barena dove il materiale trasportato tende a sedimentare a causa dell'elevata presenza di vegetazione che dissipa l'energia delle onde (Möller et al., 2002).

La vegetazione, dunque, protegge le barene dal fenomeno di erosione provocando un notevole abbassamento delle velocità di propagazione delle onde e favorisce la sedimentazione del materiale trasportato che porta all'accrescimento della barena stessa (Temmerman et al., 2003).

Le barene operano delle funzioni fondamentali per gli ambienti lagunari: sono, infatti, in grado di ridurre il rischio di inondazione delle aree interne della laguna grazie alla loro capacità di dissipare l'energia per mezzo della vegetazione e operano inoltre una depurazione naturale delle acque, trattenendo fattori inquinanti (Reed, 1995; Allen, 2000).

Esse rappresentano, inoltre, un habitat favorevole per diverse specie animali e vegetali essendo capaci di trattenere molte sostanze nutrienti.

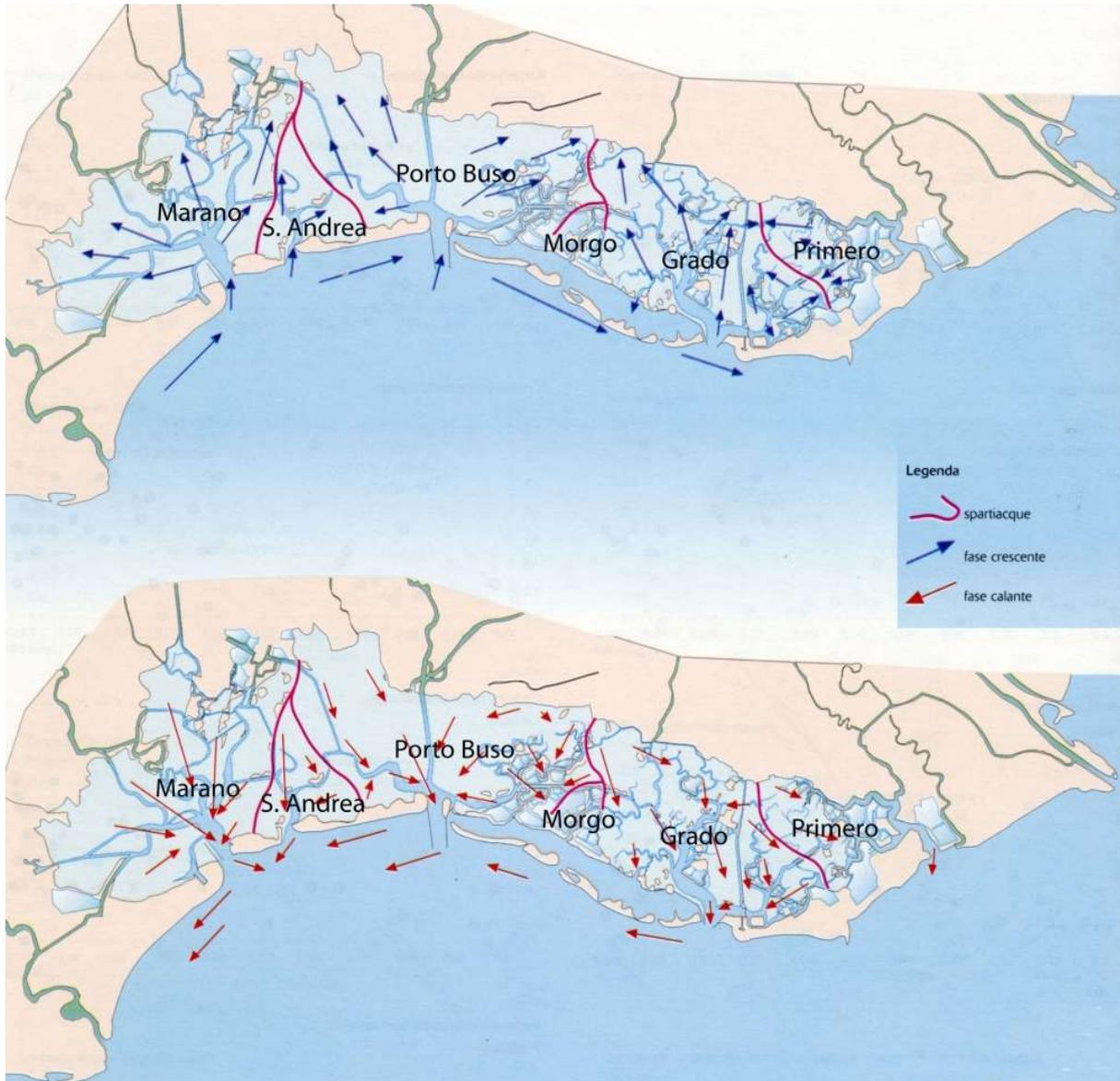


Figura 1-9: Fase di marea crescente e decrescente nella laguna di Grado e Marano e partiacque dei bacini lagunari, ([www.cmsarpa.regione.fvg.it](http://www.cmsarpa.regione.fvg.it))

## 1.4 Le maree

Ciò che contraddistingue l'ambiente lagunare da altri simili, quali ad esempio gli stagni lagunari, è l'effetto che su di esse hanno le maree.

La marea viene descritta come un'onda lunga in acque basse, essendo la loro lunghezza, pari a metà circonferenza terrestre, nettamente superiore alla massima profondità del fondale marino.

La marea è un fenomeno oceanico costituito dall'oscillazione del livello di grandi bacini d'acqua (principalmente oceani e mari) a causa delle forze di attrazione fra il pianeta Terra, il Sole e la Luna. Quest'ultima seppure abbia dimensioni nettamente inferiori rispetto al Sole, è l'astro che più influisce sulla marea terrestre per la sua vicinanza al pianeta.

Quando si ha condizione di Luna nuova e Luna piena, la stessa si allinea sulla congiungente fra Sole e pianeta Terra. Questa fase viene chiamata sizigia e l'escursione di marea si esalta, in quanto le componenti della forza di attrazione Sole-Terra e Luna-Terra presentano la stessa direzione e per tanto si sommano massimizzando la differenza fra alta e bassa marea.

Quando, invece la congiungente Luna-Terra forma un angolo retto con la congiungente Sole-Terra, vi è la cosiddetta fase di quadratura. In questo caso, le forze di attrazione Sole-Terra e Luna-Terra sono fra loro perpendicolari e tendono a lavorare in contrapposizione portando ad una riduzione dell'escursione fra alta marea e bassa marea.

Le fasi di sizigia e quadratura sono schematicamente riassunte nella Figura 1-10:

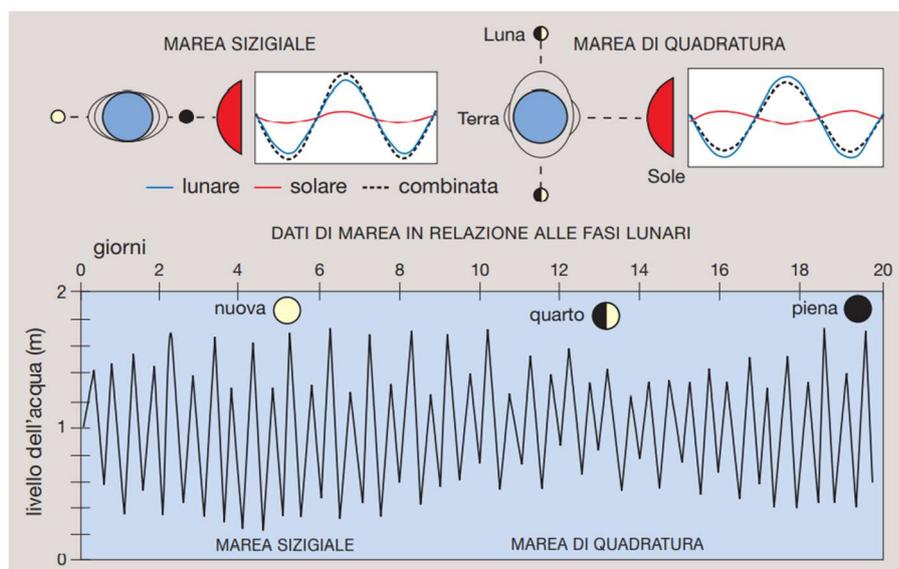


Figura 1-10: Fasi di marea in funzione della posizione della Luna ricavata da fonte bibliografica (*Lagune, estuari e delta. Quaderni Habitat 2009*).

Le maree astronomiche possono essere di tipo semi-diurno, cioè presentare durante il giorno due alte maree e due basse maree con un intervallo di poco più di 6 ore, di tipo diurno, cioè presentare una alta marea e poi una bassa marea con un intervallo di poco più di 12 ore, o di tipo misto (Figura 1-11).

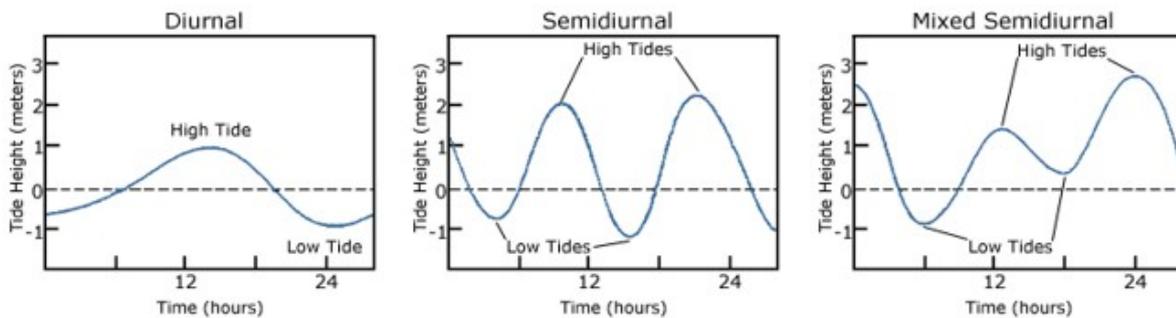


Figura 1-11: Tipologie di marea: diurna, semidiurna e mista, ricavata da fonti bibliografiche ([www.oceanservice.noaa.gov](http://www.oceanservice.noaa.gov)).

Questo accade a causa di fenomeni astronomici complessi, tra i quali l'inclinazione dell'orbita della Luna (circa 5° rispetto a quella della Terra) e le rotazioni simultanee della Terra attorno al Sole e della Luna attorno alla Terra.

Dalla Figura 1-12 si evidenzia la distribuzione nel mondo dei 3 tipi di marea:

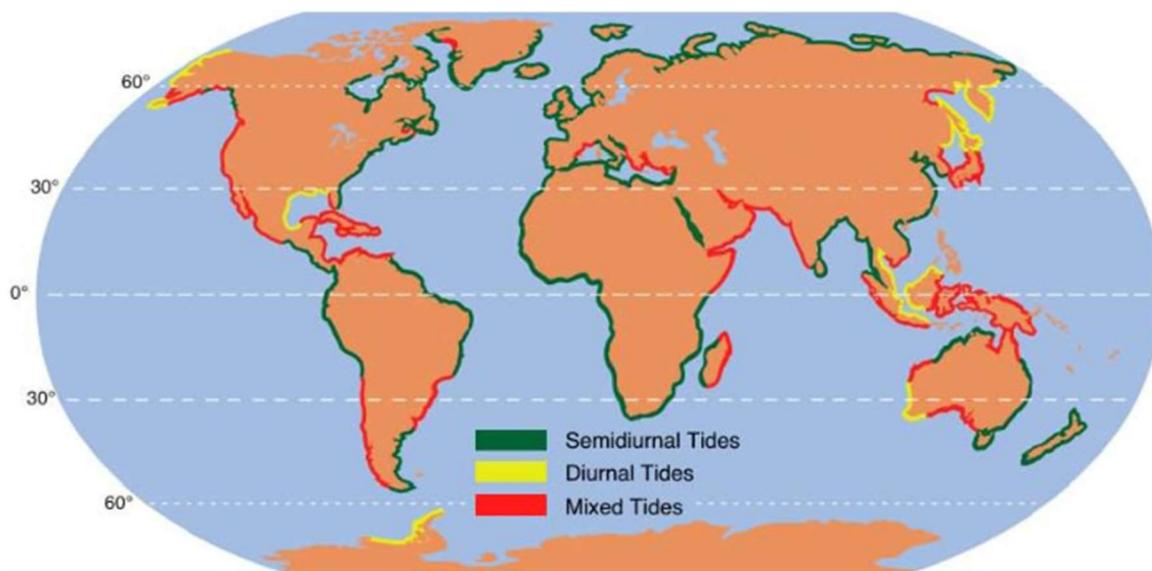


Figura 1-12: Distribuzione globale dei tre tipi di marea astronomica: semidiurna, diurna e mista, ricavata da fonte bibliografica ([www.physicalgeography.net](http://www.physicalgeography.net)).

Le escursioni di marea oltre a variare nel tempo in funzione della posizione relativa del sistema Terra-Sole-Luna variano anche per effetto di caratteristiche morfologiche, quali la profondità dei fondali marini, la forma delle coste e la superficie della massa d'acqua.

In funzione all'escursione di marea si definiscono: maree microtidali (< 2m), maree mesotidali (tra 2 e 4 m), e le maree macrotidali (> 4m); nella Figura 1-13 è indicata la distribuzione nel modo in funzione dell'escursione di marea.

Il bacino dell'Adriatico, per la sua conformazione stretta ed allungata, risulta un bacino semichiuso, e congiuntamente alla presenza di bassi fondali, favorisce la massima esaltazione della marea nella sua parte settentrionale.

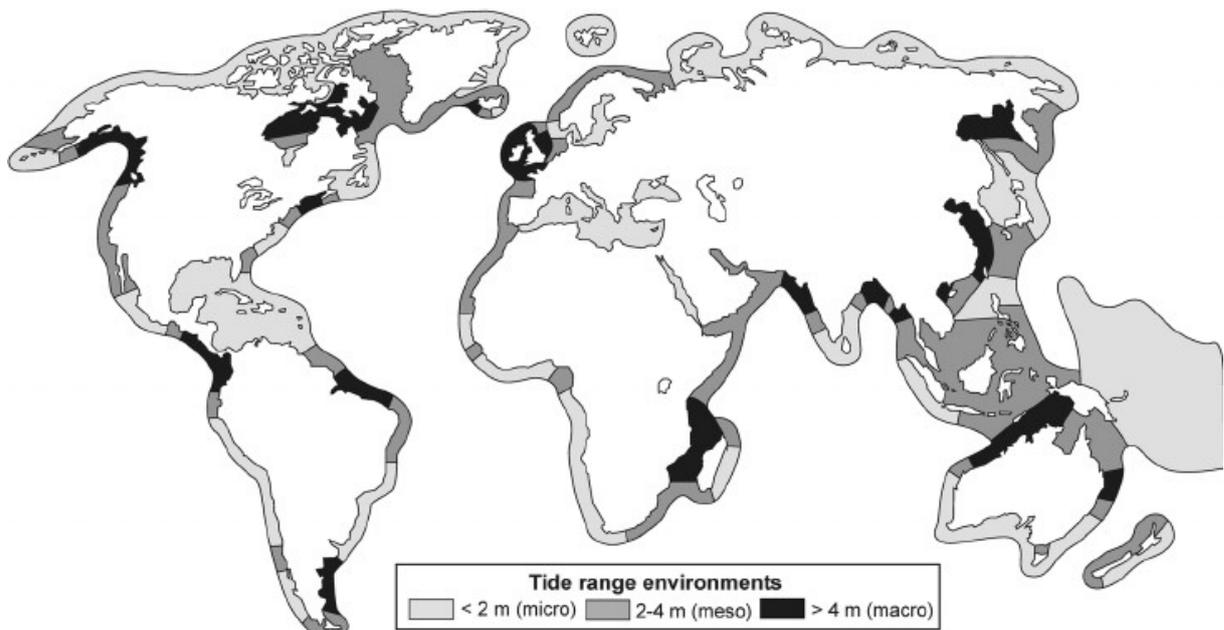


Figura 1-13: Distribuzione globale dei tre tipi di marea: microtidale, mesotidale e macrotidale, ricavata da fonti bibliografiche (Davies 1980 e Masselink-and-Hughes 2003).

Le maree astronomiche sono prevedibili con largo anticipo, note le caratteristiche degli astri (posizione, velocità angolare di rotazione ecc.); al contrario, la componente difficilmente prevedibile della marea è quella meteorologica. Questa comporta delle variazioni del livello marino, con periodi compresi tra pochi giorni e poche ore, causate dal vento e dalle differenze della pressione dell'aria sul mare durante il transito delle perturbazioni atmosferiche.

La pressione atmosferica è data dalla forza che le masse d'aria esercitano sulla superficie terrestre; essa è in grado di comprimere i grandi specchi d'acqua provocando innalzamento/abbassamento di livello. In particolare, a valori di bassa pressione corrispondono valori più elevati dei livelli marini (effetto barometrico inverso).

L'effetto del vento invece dipende dalla sua intensità, direzione, durata e dalla forma e estensione del bacino su cui insiste. In particolare, il vento di Scirocco proveniente da SE e la Bora proveniente da NE sono i venti che generano significativi variazioni di livello marino nell'Adriatico settentrionale.

Inoltre, all'interno dell'Adriatico si sviluppano oscillazioni libere – denominate "sesse" – che rappresentano la risposta del mare ad un cambiamento rapido delle forzanti meteorologiche (vento e pressione). Ad una improvvisa diminuzione dell'intensità del vento, si generano delle oscillazioni periodiche che tendono a riportare l'equilibrio idrostatico.

La somma di questi fenomeni fisici dà luogo a incrementi positivi o negativi che vanno a sommarsi alla componente astronomica della marea (es. Figura 1-14).

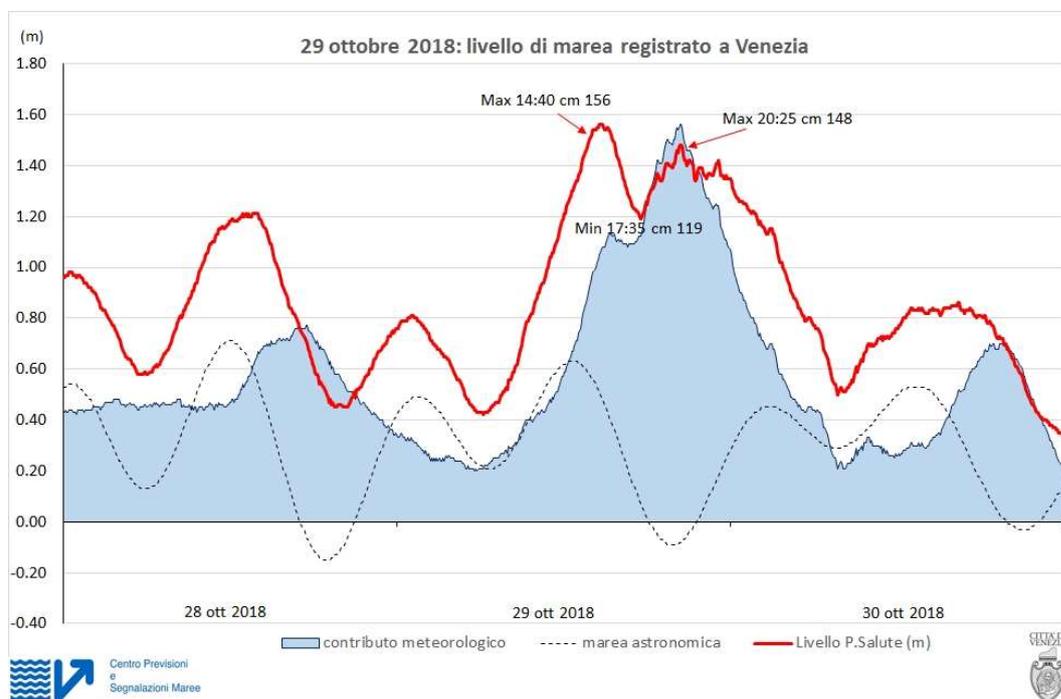


Figura 1-14: Esempio di marea registrata a Punta della Salute (VE) (archivio CPSM) dal 28 al 30 Ottobre 2018, dove si vede il contributo della marea meteorologica rispetto la marea astronomica prevista a causa di forti venti di Scirocco.

## 2 Area di studio

### 2.1 La laguna di Grado-Marano

La laguna di Grado-Marano è compresa fra il delta del fiume Tagliamento a ovest e il delta del fiume Isonzo a est, nella parte nord del Mar Adriatico (Figura 2-1); ricade nelle province di Udine e Gorizia e interessa i comuni di Grado, Aquileia, Carino, Latisana, Lignano Sabbiadoro, Marano Lagunare, Muzzana del Turgnano, Palazzolo dello Stella, Precenicco, San Giorgio di Nogaro, Terzo d'Aquileia, Torviscosa (Figura 2-2).



Figura 2-1: Inquadramento sul suolo italiano della laguna di Grado e Marano.



Figura 2-2: Immagine satellitare della Laguna di Grado e Marano con evidenziati i confini comunali.

Si estende lungo un arco di 32 km per 5 km di larghezza e una superficie complessiva di circa 160 km<sup>2</sup> che la porta ad essere la seconda laguna più estesa d'Italia dopo la laguna di Venezia. Geograficamente, pur formando un unico complesso, la laguna viene divisa amministrativamente in due zone: la laguna di Grado ed est di circa 70 km<sup>2</sup> e la laguna di Marano ad ovest di circa 90 km<sup>2</sup>.

La laguna è delimitata verso mare da un cordone litoraneo formato da isole e banchi sabbiosi, che si allungano parallelamente alla costa da Lignano a Grado per circa 20 km; verso la terraferma la delimitazione è costituita dall'argine di delimitazione lagunare

Le isole barriera (Grado, Marina di Marcia e dei Manzi, Buso, S. Andrea, Matignano) sono interrotte da sei bocche a marea che sono rispettivamente da est a ovest: la bocca di Primero, quella di Grado, chiamata localmente "la Fosa", Morgo, Porto Buso, Sant'Andrea e Lignano. Attraverso queste sei bocche la laguna scambia con il mare una quantità di acqua salata pari a circa  $125 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

L'apporto d'acqua dolce è approssimativamente di  $2200-2500 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$  ed è dovuto ai fiumi che sfociano nella laguna stessa che sono rispettivamente da ovest a est i fiumi: Stella, Turgnano, Cormor, Zellina, Corno, Ausa, Natissa, Tiel (Figura 2-3).



Figura 2-3: Immagine satellitare della Laguna di Grado e Marano con evidenziati i corsi d'acqua tributari e le bocche tidali.

Le maree sono semidiurne (con due alte maree e due basse maree nel corso della giornata) con un'escursione media di 65 cm, 1.05 m in sizigia e 0.22 in quadratura.

La *salinità* dell'acqua all'interno della laguna di Grado e Marano, come descritto in generale al capitolo 1.2., si riduce gradualmente dal mare verso l'interno grazie all'apporto di acqua dolce da parte dei corsi d'acqua contribuenti; dalla Figura 2-4, tratta da Ferrarin et al. (2010), si può vedere come la salinità si riduca in prossimità delle foci dei fiumi in laguna.

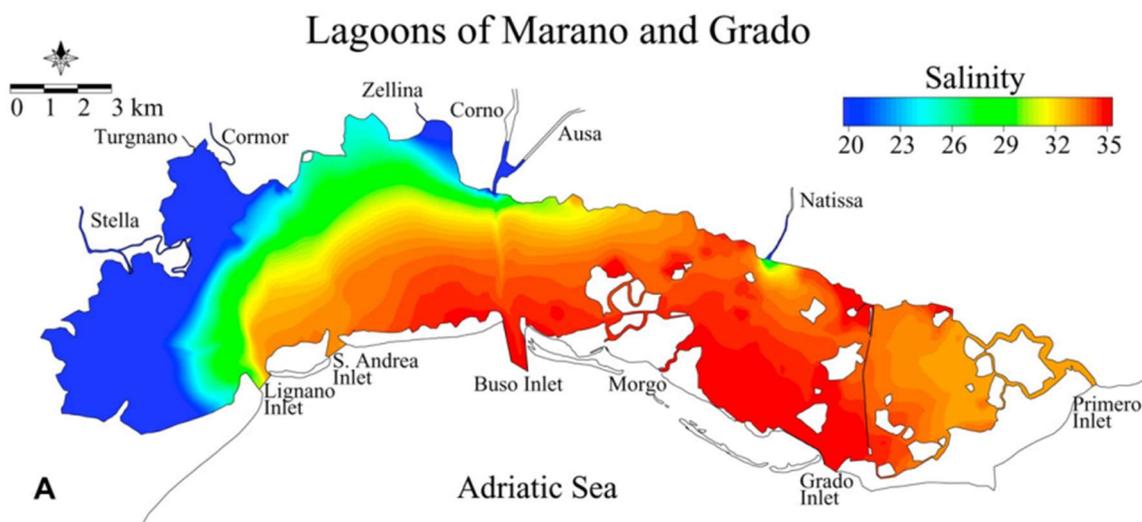


Figura 2-4: Distribuzione media della salinità annua nella laguna di Grado e Marano ricavata da fonte bibliografica Ferrarin et al. (2010).

La salinità media dell'acqua varia da 28.5 ppt, per la laguna di Grado, a 22.2 ppt per la laguna di Marano.

La temperatura dell'acqua mostra un gradiente positivo dallo sbocco dei fiumi alle bocche tidali. In media si registra una temperatura di 15.8°C e 14.8°C rispettivamente per la laguna di Marano e quella di Grado.

Nell'area in cui è localizzata la laguna di Grado-Marano i venti più frequenti sono quelli provenienti da Nord-Est (Bora) e da Sud-Est (Scirocco). I primi hanno maggiore influenza sui livelli a causa dell'ampio fetch a disposizione rispetto i secondi che si trovano a spirare in direzione perpendicolare all'asse principale della laguna.

Dal punto di vista sedimentologico, la distribuzione dei sedimenti segue l'andamento generale tipico delle lagune descritto al capitolo 1.2. La componente fine dei sedimenti (< 63 µm) aumenta dalle bocche verso l'interno della laguna, come mostrato da Acquavita et al. (2012) (vedi Figura 2-5).

Si può notare inoltre che la distribuzione del fango ("mud" in Figura 2-5 da intendersi come frazione coesiva dei sedimenti, somma di limi e argille) all'interno della laguna è disomogenea: in particolare, si evidenzia che nella laguna di Grado il 75% dell'area è ricoperta da sedimenti fini (>80% di mud), mentre nella laguna di Marano solo il 45% delle aree presentano la stessa percentuale di sedimenti fini.

Questa distribuzione deriva dalle minor velocità presenti nella laguna di Grado, dove la circolazione delle acque è più limitata, come sarà evidenziato durante l'analisi idrodinamica nel presente lavoro.

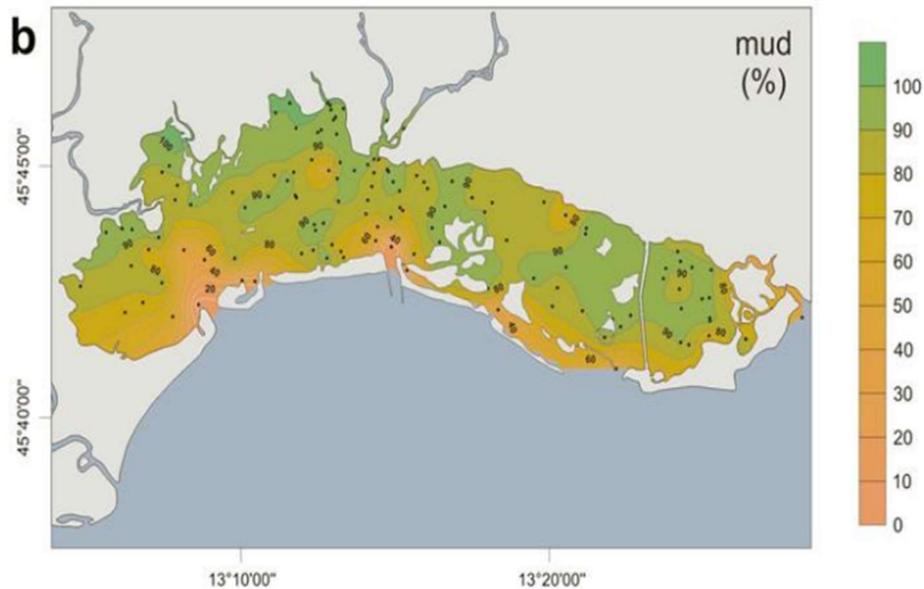


Figura 2-5: Distribuzione della componente fine ( $< 63 \mu\text{m}$ ) nei sedimenti della laguna di Grado e Marano ricavata da fonte bibliografica Acquavita et al. (2012).

Le barene presenti in laguna hanno subito negli anni una netta riduzione a causa dell'erosione dei margini, dell'innalzamento del livello del mare e della riduzione degli apporti di sedimenti all'interno della laguna. Le barene avevano una superficie complessiva pari a 904 ha nel 1954, 801 ha nel 1990 e 761 ha nel 2006. Oggi, le barene con maggiore estensione si trovano principalmente nel bacino di Lignano, in particolare lungo il limite nord della laguna e allo sbocco dei fiumi Stella, Turgnano e Cormor. Nella parte est della laguna troviamo invece barene di piccole dimensioni sui lati dei canali principali e secondari (vedi Figura 2-6).



Figura 2-6: Immagine satellitare della Laguna di Grado e Marano con evidenziati le barene oggi presenti.

## 2.2 Origine ed Evoluzione

Le lagune nord-adriatiche, le cui formazioni risalgono a 6000-5000 anni fa, sono state originate dalle inondazioni da parte del mare delle vaste pianure alluvionali. La laguna di Marano, secondo i sedimenti riscontrati nel sottosuolo, risale a circa 5500-4200 anni fa, mentre la laguna di Grado risulta essere dell'epoca post-romana. Quest'ultima è legata alla migrazione verso est della foce del fiume Isonzo.

La separazione fra la laguna di Grado e Marano e quella attigua di Caorle fu provocata dal progressivo avanzamento del delta del fiume Tagliamento. Nel corso dei secoli la parte inferiore del fiume andò progressivamente a inondare e colmare di sedimenti una vasta zona fra il fiume Lemene e il fiume Stella trasformando in pianura queste zone. La città di Latisana, infatti, che oggi dista dal mare circa 16 km, nei secoli scorsi aveva sede in laguna.

Nei primi secoli d.C. il fiume Isonzo sfociava nel golfo di Monfalcone mentre attualmente sfocia a Punta Sdobba, circa 14 km a est di Grado; questa parte di laguna è stata anticamente invasa dalle acque e sedimenti del Fiume Torre e Isonzo che sono causa anche del più recente avanzamento della linea di costa in prossimità del loro delta a Punta Sdobba.

Il fiume Isonzo e Tagliamento oggi sversano le loro acque direttamente nel mare e non sono dunque più un pericolo per l'interramento della laguna. Essa invece è l'invaso delle acque proveniente dai corsi d'acqua che sfociano all'interno della laguna stessa, avendo origine nella zona delle risorgive (principalmente: Stella, Turgnano, Cormor Zellina, Corno, Aussa, Natissa, Tiel).

L'attuale divisione della laguna, laguna di Marano a est e di Grado a ovest, è marcata dal confine amministrativo tra le province di Udine e Gorizia. Questa è riconducibile al periodo fra il 1866 e il 1917, quando la laguna di Marano apparteneva all'Italia mentre quella di Grado all'Austria.

La Figura 2-7 sotto riportata è relativa a una carta geografica rilevata nel 1822-1824; grazie ad essa si può apprezzare, per confronto con la morfologia attuale, l'evoluzione della laguna nel corso degli ultimi due secoli.



Nel 1822 la parte finale del fiume Tagliamento separava la Valle Pantani in laguna di Marano e la Valle Minotti in Laguna di Caorle. In seguito, queste aree sono state interamente bonificate e trasformate in terreni coltivati, ad eccezione della Valle Baseleghe in prossimità del cordone litoraneo.

Negli stessi anni invece la laguna di Grado presentava ancora diversi specchi d'acqua anche fra la Bocca di Primero e la foce dell'Isonzo. Gli stessi sono attualmente stati bonificati e, in particolare, le opere di arginatura fra Primero e Isonzato hanno comportato la chiusura della Bocca dell'Averto e la trasformazione della palude omonima nell'attuale Valle Cavanata (valle da pesca e riserva naturale regionale), che limita la laguna e est della bocca di Primero.

A nord la laguna è delimitata da arginature erette in seguito all'avanzamento delle aree bonificate intorno al 1925 e aventi una lunghezza pari a 65 km. Gli argini stessi sono stati portati ad una quota di circa 3 m s.l.m. a seguito dell'alluvione del novembre del 1966.

Nella Figura 2-7 si evidenzia poi le numerose interruzioni sul cordone litoraneo in particolare fra Lignano e Sant'Andrea e fra Buso e Grado.

All'epoca il porto principale era quello di Lignano, anche a causa delli banchi di sabbia che si estendevano davanti alle altre bocche e che, emergendo durante le basse maree, rendevano difficoltoso l'accesso agli altri porti di Buso, Grado e Primero.

Proprio al fine di garantire la navigabilità, furono inseriti dei sistemi di dighe nella bocca di Grado nel 1928-1934 e successivamente nel 1964-1969 anche nella Bocca di Buso.

L'attuale conformazione della costa caratterizzata da banchi sabbiosi nata a seguito delle armature delle bocche, che, intercettando le correnti litoranee che trasportano i sedimenti in direzione est-ovest, hanno favorito la loro formazione. Tali banchi sabbiosi si estendono per una lunghezza di 10 km dalla Bocca di Porto Buso alla Bocca di Grado e racchiudono piccoli bacini paralagunari di superficie complessiva di circa 6 km<sup>2</sup> che presentano quote poco elevate e sono soggetti ad evoluzioni rapide e continue per effetto delle correnti di maree.

Le variazioni che si possono individuare fra la carta del 1822 e la configurazione attuale della laguna sono in gran parte dovute all'opera dell'uomo e, in particolare, alla sottrazione di aree lagunari bonificate.

La rete di canali è rimasta pressoché invariata dopo il 1915-1916 con la costruzione della Litoranea Veneta, una complessa rete di canali che collega il fiume Po passando per la laguna di Venezia e la laguna di Grado e Marano fino al fiume Isonzo (vedi Figura 2-8).



Figura 2-8: Litoranea Veneta.

### 3 Modello bidimensionale idrodinamico

In questo studio è stato utilizzato un modello 2D sviluppato dai ricercatori del Gruppo di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale dell'Università di Padova che permette di analizzare il comportamento idrodinamico e la dinamica dei sedimenti negli ambienti lagunari.

Esso si compone di diversi moduli: *modulo idrodinamico* accoppiato al *modulo di generazione e propagazione delle onde da vento* (WWTM) e il *modulo per il trasporto solido ed evoluzione del fondo* (STABEM).

In particolare, questa tesi si concentra sull'analisi dei processi idrodinamici determinati dalla marea e dalle onde da vento andando ad utilizzare, dunque, solo i primi due moduli del modello.

#### 3.1 Modulo idrodinamico

Il *modulo idrodinamico* va a risolvere numericamente le equazioni delle onde lunghe in acque basse integrate sulla verticale (SWEs) e mediate in fase, mediante uno schema semi-implicito agli elementi finiti. Le SWEs proiettate su un sistema cartesiano (x,y) risultano:

$$\frac{D}{Dt} \left( \frac{\mathbf{q}}{Y} \right) + \frac{1}{Y} \nabla \cdot \mathbf{R} \mathbf{e} + \frac{\tau_b}{Y\rho} - \frac{\tau_w}{Y\rho} + g\nabla h \pm f = 0 \quad (3.1.1)$$

$$\eta \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (3.1.2)$$

Dove:

- $t$ : tempo;
- $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$ : velocità in direzione x e y integrate sulla verticale (portate per unità di larghezza);
- $Y$ : volume d'acqua per unità di superficie;
- $h$ : elevazione della superficie libera;
- $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ : gradiente;
- $\nabla \cdot = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \right)$ : divergenza;

- $\boldsymbol{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by})$ : sforzo di attrito al fondo dovuto alle correnti di marea ottenuto per moto turbolento in parete scabra come:

$$\frac{\tau_b}{\rho Y} = g \left( \frac{|q|}{k_s^2 H^{10/3}} \right) q \quad (3.1.3)$$

dove:  $k_s$  è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler e  $H$  è il tirante equivalente approssimato secondo la seguente formula:

$$\frac{H}{a_r} \cong \frac{Y}{a_r} + 0.27 \sqrt{\frac{Y}{a_r}} e^{-\frac{2Y}{a_r}} \quad (3.1.4)$$

- $\boldsymbol{\tau}_w = (\tau_{wx}, \tau_{wy})$ : sforzo di attrito sulla superficie libera dovuto al vento ottenuto come:

$$\tau_w = \rho_a C_d U_w^2 \quad (3.1.5)$$

$$C_d = (C_{d0} + e_w U_w) * 10^{-3} \quad (3.1.6)$$

dove:  $\rho_a$  è la densità dell'aria,  $C_{d0}$  e  $e_w$  sono parametri che definiscono il coefficiente di drag che verranno successivamente calibrati,  $U_w$  è la velocità del vento.

- $\rho$ : densità dell'acqua;
- $g$ : accelerazione di gravità;
- $f$ : forze di Coriolis, cioè forze apparenti dovute al sistema Terra non inerziale perché in rotazione attorno al proprio asse:

$$f = 2\omega \sin \Phi \quad (3.1.7)$$

dove:  $\omega = \frac{2\pi}{84600} = 7.27 * 10^{-5} s^{-1}$  è la velocità di rotazione della Terra e  $\Phi$  è la latitudine del sito su cui si stanno applicando le equazioni;

- $\eta$ : porzione di area bagnata all'interno dell'elemento di calcolo che dipende dal tirante d'acqua e dalle irregolarità superficiali locali;

- **Re**: sforzi di Reynolds, cioè tensioni per l'interazione del fluido con se stesso e alla viscosità del fluido stesso a causa dello scambio di quantità di moto associato alla fluttuazione turbolenta. Essi sono descritti secondo il modello di Smagorinsky:

$$\mathbf{Re} = R_{ij} = \nu_t Y(u_{ij} + u_{ji}) \quad (3.1.8)$$

$$\nu_t = 2C_s^2 A_e \sqrt{2(u_{xx})^2 + (u_{xy} + u_{yx})^2 + 2(u_{yy})^2} \quad (3.1.9)$$

dove: gli indici i e j nell'Eq. 3.1.8 indicano la coordinata x o y,  $\mathbf{u} = \mathbf{q}/Y$ ,  $A_e$  è l'area dell'elemento di calcolo e  $C_s = 0.2$  è il coefficiente di Smagorinsky.

### 3.1.1 Transizione asciutto-bagnato

Le equazioni 3.1.1 e 3.1.2 prima di essere integrate sulla verticale, sono state opportunamente mediate in fase, per tenere conto della reale quota di ogni punto all'interno dell'elemento di calcolo di cui si va a indicare sono la quota media.

Questa operazione viene effettuata in quanto le irregolarità presenti nell'area rappresentata dall'elemento di calcolo comportano l'esistenza di una fase transitoria in cui l'elemento è solo parzialmente bagnato. Queste irregolarità, quando il tirante d'acqua ha dimensioni comparabili con le stesse, offrono una resistenza diversa al moto e comportano diversi volumi invasati dall'elemento stesso rispetto a quelli che si avrebbero nel caso di un elemento perfettamente piano. Nel caso di elementi perfettamente piani, inoltre, si avrebbe una transizione istantanea tra asciutto e bagnato che comporterebbe numerosi problemi numerici.

Si utilizza, dunque, un modello di sottogriglia in grado di riprodurre la transizione asciutto-bagnato all'interno di ogni elemento di calcolo. La superficie bagnata rispetto all'area totale dell'elemento viene fatta variare da un valore nullo, se la quota idrometrica è inferiore alla quota minima delle irregolarità, a un valore unitario se la quota idrometrica è superiore alla quota massima (vedi Figura 3-1).

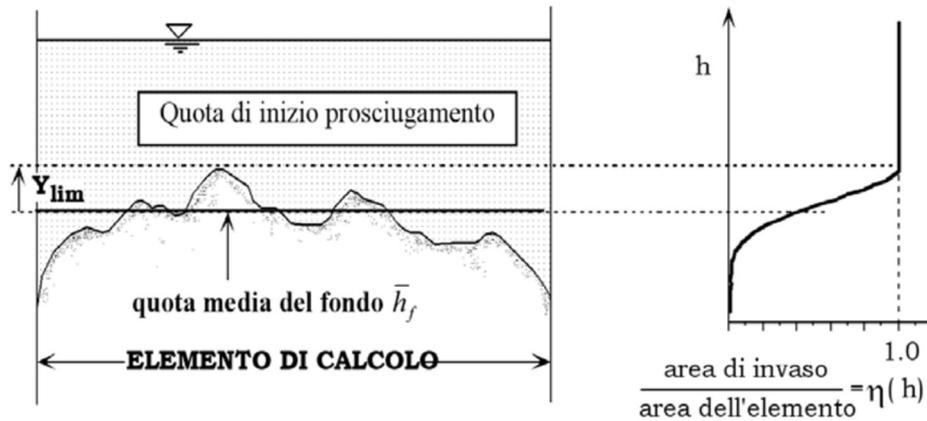


Figura 3-1: Modello di sottogriglia utilizzato per la transizione asciutto- bagnato ( $Y_{lim}=a_r$ ).

Si introduce, dunque, il parametro  $a_r$  che rappresenta la differenza fra la quota massima delle irregolarità presenti nell'elemento e la quota media dello stesso  $\bar{h}_f$ .

Assumendo una distribuzione di tipo gaussiano delle quote all'interno dell'elemento,  $a_r$  rappresenta di fatto la dispersione delle quote all'interno dello stesso rispetto alla quota media e può dunque essere valutato come il doppio della varianza della distribuzione, in assenza di stime specifiche.

Dal punto di vista matematico l'operazione di media viene effettuata utilizzando la funzione di fase:

$$\varphi(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{se } z > h_f \\ 0 & \text{se } z \leq h_f \end{cases} \quad (3.1.1.1)$$

dove:  $h_f$  è la quota del fondo e  $\mathbf{x}$  è il vettore posizione  $\mathbf{x} = (x, y, z)$ .

La generica variabile del campo di moto che dipende sia dallo spazio che dal tempo  $f(\mathbf{x}, t)$  dopo l'operazione di media di fase diventa:

$$F(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{A} \int \varphi(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}, t) dA \quad (3.1.1.2)$$

dove: A è l'area dell'elemento di calcolo.

Questa operazione applicata alle equazioni del moto e all'equazione di continuità 3.1.1 e 3.1.2 comporta la nascita di alcuni parametri che dipendono dal valore di  $a_r$ :

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[ \frac{2D}{a_r} \right] \right\} \quad (3.1.1.3)$$

$$Y = a_r \left\{ \eta \left( \frac{D}{a_r} \right) + \frac{1}{4\sqrt{\pi}} \exp \left[ -4 \left( \frac{D}{a_r} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.1.1.4)$$

dove:  $\operatorname{erf} [ ]$  è la funzione errore e  $D$  è la profondità media data dalla differenza fra la quota idrometrica e quella del fondo.

### 3.2 Modulo di generazione e propagazione delle onde

Il *modulo di generazione e propagazione delle onde da vento* va a risolvere l'equazione di conservazione dell'azione dell'onda (3.2.1) (Hesselmann et al., 1973), utilizzando i dati di livello generati dal *modulo idrodinamico* per valutare le celerità di gruppo e l'influenza del fondale nel processo di propagazione delle onde.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_{gx} N + \frac{\partial}{\partial y} c_{gy} N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_{\sigma} N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_{\theta} N = S \quad (3.2.1)$$

Dove:

- $t$ : tempo;
- $E$ : energia d'onda;
- $\sigma$ : frequenza d'onda;
- $c_{gx}$  e  $c_{gy}$  : componenti x e y della celerità di gruppo;
- $\theta$ : direzione di propagazione dell'onda;
- $N = E/\sigma$ : densità d'azione dell'onda;
- $S$ : termine che contiene tutti i fenomeni esterni che contribuiscono all'energia d'onda.

Nell'equazione la densità d'azione dell'onda  $N$ , definita come rapporto fra l'energia dell'onda e la relativa frequenza d'onda, è una funzione dello spazio  $(x, y)$ , del tempo  $(t)$ , della frequenza d'onda  $(\sigma)$  e della direzione di propagazione dell'onda  $(\theta)$ :  $N = N(x, y, t, \sigma, \theta)$ .

Tale equazione consente di valutare la variazione locale nel tempo della densità d'azione dell'onda  $N$  (primo termine a sinistra nell' Eq. 3.2.1), la sua propagazione nello spazio  $(x, y)$  attraverso le due componenti della celerità di gruppo (secondo e terzo termine a sinistra nell'Eq. 3.2.1), la sua propagazione nel dominio delle frequenze  $(\sigma)$  e la sua variazione di direzione  $(\theta)$  (rispettivamente quarto e quinto termine a sinistra nell'Eq. 3.2.1).

La generazione e la propagazione delle onde da vento è particolarmente importante, in quanto sono le principali responsabili della sospensione dei sedimenti sui bassifondi; esse, infatti non sono in grado di esercitare uno sforzo al fondo all'interno dei canali dove la profondità è maggiore, ma sui bassifondi, dove le quote del fondo sono notevolmente inferiori, riescono ad esercitare uno sforzo di attrito al fondo tale da risospingere i sedimenti che costituiscono il fondale stesso (Cap. 1.2).

L'equazione (3.2.1) viene inoltre semplificata mediante ulteriori ipotesi (Carniello et al., 2011) valide nel caso di domini molto irregolari e poco profondi.

Il modello assume, in particolare, che la direzione di propagazione dell'onda corrisponda alla direzione del vento in ogni istante, trascurando dunque la rifrazione. Questa ipotesi può essere assunta nel caso di bacini chiusi dove si può assumere che la direzione media delle onde sia molto simile alla direzione del vento (es. Lin et al. 2002) ed è, inoltre, supportata dallo studio numerico sul decadimento dell'energia delle onde in bacini poco profondi (Carniello et al., 2005) che mostra una decrescita molto rapida dell'altezza d'onda nel caso in cui il vento si venga a smorzare.

Queste ipotesi permettono di trascurare il quarto e quinto termine dell'equazione 3.2.1. che, parametrizzata secondo l'approccio di Holthuijsen et al. (1989) e scegliendo il momento di ordine zero (Eq. 3.2.3) nello spettro d'azione delle onde nel dominio delle frequenze, diventa l'Eq. 3.2.2:

$$\frac{\partial N_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c'_{gx} N_0 + \frac{\partial}{\partial y} c'_{gy} N_0 = S_0 \quad (3.2.2)$$

$$N_0(x, y, t) = m_0 = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} N(x, y, t, \sigma, \theta) d\theta d\sigma \quad (3.2.3)$$

Dove:  $c'_{gx}$  e  $c'_{gy}$  sono rispettivamente le celerità di propagazione di  $N_0$  nelle direzioni x e y che si assumono uguali alle celerità di gruppo  $c_{gx}$  e  $c_{gy}$  (Carniello et al. 2005).

La frequenza d'onda media  $\sigma_0$  è definita considerando il periodo di picco  $T_p$  secondo lo spettro JONSWAP:

$$\sigma_0 \approx 1.1 \left( \frac{2\pi}{T_p} \right) \quad (3.2.4)$$

Nota la frequenza d'onda media  $\sigma_0$  e utilizzando la relazione di dispersione che mette in relazione il numero d'onda medio  $k_0$  (Eq. 3.2.6) e la profondità locale del fondo  $Y$ , possiamo calcolare la celerità di gruppo mediante l'espressione definita dalla teoria lineare:

$$c_g = \frac{1}{2} c \left( 1 + \frac{2k_0 Y}{\sinh k_0 Y} \right) \quad (3.2.5)$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda_0 \quad (3.2.6)$$

Dove  $\lambda_0$  è la lunghezza d'onda media.

Il termine  $S_0$  (Eq. 3.2.7) a destra dell'equazione 3.2.2 contiene tutti i contributi esterni che fanno variare l'energia dell'onda: contributo positivo per la generazione da vento (wind generation), contributo negativo per l'attrito con il fondo (bottom friction) e il frangimento per raggiungimento della ripidità limite (whitecapping) o per interazione con il fondale (breaking).

$$S_0(x, y, t) = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} S(x, y, t, \sigma, \theta) d\theta d\sigma \quad (3.2.7)$$

Nel modello ogni contributo al termine  $S$  è implementato come definito nei paragrafi seguenti: wind generation 3.2.1, bottom friction 3.2.2, whitecapping 3.2.3, breaking 3.2.4.

L'equazione 3.2.2 deve essere accoppiata all'equazione 3.2.4 in modo da ottenere la frequenza media d'onda  $\sigma_0$ , necessaria per calcolare il termine  $S_0$  e la celerità di gruppo  $c_g$ .

L'equazione 3.2.4 è nota una volta stimato il valore del periodo di picco,  $T_p$ , delle onde.

Nel modello in esame,  $T_p$  è calcolato mediante una relazione semi-empirica in funzione della velocità del vento locale e della profondità dell'acqua, in ogni fase temporale e in ogni punto del dominio (Young e Verhagern, 1996; Breugem e Holthuijsen, 2007):

$$\tilde{T} = a \tilde{D}^b \quad (3.2.8)$$

Dove:

- $\tilde{T} = g T_p / U_{wind}$ : periodo d'onda adimensionale;
- $\tilde{D} = gY / U_{wind}^2$ : tirante d'acqua adimensionale
- $U_{wind}$ : velocità del vento misurata a 10 m sul livello del mare
- $Y$ : tirante d'acqua;
- $g$ : gravità;
- $a = 3.5$  e  $b = 0.35$ .

Il *modulo di generazione e propagazione delle onde* fornisce, dunque, in ogni elemento della griglia di calcolo e ad ogni passo temporale, il momento di ordine zero dell'azione dell'onda  $N_0$  e attraverso la teoria lineare delle onde fornisce l'energia media delle onde  $E$  e, da essa, l'altezza significativa d'onda  $H$ .

Si mette in evidenza che, nello studio in esame, il vento viene considerato uniforme su tutto il dominio di calcolo, sia in velocità che in direzione.

### 3.2.1 Generazione da vento

Il trasferimento di energia eolica considera due meccanismi nella generazione delle onde.

Il primo è il fenomeno di risonanza tra superficie libera e fluttuazioni di pressione turbolenta dovute al campo di vento locale (Philips, 1966; Willmarth e Wooldridge, 1962):

$$\alpha = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{80 \rho_a^2 \sigma}{\rho_w^2 g^2 k^2} c_d^2 U^4 \quad (3.2.1.1)$$

Dove:  $\rho_a$ :

- densità dell'aria;
- $\rho_w$ : densità dell'acqua;
- $c_d = 0.001$ : coefficiente di resistenza aerodinamica;
- $U$ : velocità del vento in m/s.

L'equazione 3.2.1.1 descrive il trasferimento di energia al mare anche quando la condizione iniziale è una superficie piana caratterizzata da energia nulla.

Dopo la produzione di moto ondoso dovuto al primo processo, il trasferimento di energia dal vento alle onde aumenta esponenzialmente grazie alla maggiore scabrezza della superficie del mare che presenta delle increspature (Barnett e Wilkerson, 1967):

$$\beta = \frac{1}{E} \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{5\rho_a}{\rho_w} \frac{\sigma}{2\pi} \left( \frac{U \cos \delta}{c} - 0.90 \right) \quad (3.2.1.2)$$

Dove:

- $\rho_a$ : densità dell'aria;
- $\rho_w$ : densità dell'acqua;
- $U$ : velocità del vento in m/s;
- $\delta=0$ : angolo compreso fra la direzione del vento e la direzione di propagazione dell'onda che per ipotesi semplificative sono uguali.

Noti i due contributi positivi dovuti alla generazione dell'onda possiamo considerare il contributo globale:

$$S_{wg} = \alpha + \beta E \quad (3.2.1.3)$$

### 3.2.2 Attrito al fondo

La dissipazione di energia dell'onda dovuta al fondo è dovuta a diversi meccanismi: percolazione attraverso il mezzo poroso, attrito con il fondale, movimento del fondale morbido dovuto al passaggio dell'onda e dispersione dello stesso.

Il meccanismo più dissipativo, in assenza di frangimento dell'onda, risulta essere l'attrito al fondo che può essere determinato dalla seguente espressione (Collins (1972)):

$$S_{bf} = -4c \frac{\pi H}{T} \frac{k}{\sinh(kY) \sinh(2kY)} E \quad (3.2.2.1)$$

Dove:

- $H$ : altezza d'onda;
- $T$ : periodo d'onda;
- $C = 0.015$  : coefficiente secondo Collins (1972).

Il contributo di dissipazione per attrito con il fondo risulta poco rilevante se, al contrario, vi è la possibilità di frangimento dell'onda. In questo caso, la rottura dell'onda risulta essere il fenomeno più dissipativo. Per tenere conto di questa possibilità, dunque, il contributo dissipativo per attrito al fondo viene moltiplicato per un fattore  $Q_b$ , in modo tale da rendere irrilevante il suo contributo nel caso in cui si verifichi il frangimento ( $Q_b = 1$ ).

L'espressione implicita del fattore complementare alla probabilità di rottura  $Q_b$  implementata nel modello in esame è la seguente (Battjes e Janssen, 1978):

$$\frac{1 - Q_b}{\ln Q_b} = - \left( \frac{H_{rms}}{H_{max}} \right)^2 \quad (3.2.2.2)$$

Dove:

- $H_{rms}$ : è l'altezza d'onda media quadratica (parametro della distribuzione di Rayleigh) che si assume sia uguale all'altezza d'onda calcolata dal modello in ciascun elemento della griglia;
- $H_{max} = 0.78h$ : altezza massima delle onde sul fondale profondo  $h$  (criterio di rottura di McCowan, 1891).

### 3.2.3 Frangimento per raggiungimento della ripidità limite dell'onda

Il fenomeno dissipativo più importante nel caso di velocità del vento moderate e elevate risulta essere il whitecapping, cioè il frangimento per raggiungimento della ripidità limite dell'onda durante la sua propagazione.

Questo fenomeno risulta difficile da modellare in dettaglio e molte volte viene derivato empiricamente.

Nel modello in esame viene implementata la seguente espressione (Hasselmann, 1974; Komen et al., 1984):

$$S_{wc} = -c\sigma \left( \frac{\gamma}{\gamma_{PM}} \right)^m E \quad (3.2.3.1)$$

Dove:

- $\gamma = E\sigma^4 / g^2$  : parametro di ripidità dell'onda;
- $\gamma_{PM} = 4.57 * 10^{-3}$ : valore di ripidità per uno spettro di Pearson- Moskowitz;
- $m = 2$ : parametro secondo Komen et al. (1984);
- $c = 3.33 * 10^{-5}$ : parametro secondo Komen et al. (1984).

### 3.2.4 Frangimento per interazione con il fondale

La dissipazione di energia generata dal frangimento dell'onda per interazione con il fondo nel caso di discontinuità del fondale, tipica dell'ambiente lagunare dove si va ad applicare il modello, viene scomposta in due contributi: la rottura “al confine”, che si realizza sul fronte fra due elementi di calcolo con diversa quota batimetrica, e la rottura “di elemento”, che si realizza gradualmente all'interno dell'elemento di calcolo a valle del salto di fondo.

Il primo contributo viene implementato nel modello andando a valutare l'energia delle onde che viene convogliata fra l'elemento più profondo a quello meno profondo. Se questa energia risulta maggiore alla massima energia consentita per l'elemento meno profondo, il modello assume che la maggiore dissipazione avvenga in prossimità del confine fra gli elementi.

Il secondo contributo viene, invece calcolato mediante il metodo di LeMéhauté (1962):

$$S_{brk} = \frac{2}{T} Q_b \left( \frac{H_{max}}{H_{rms}} \right)^2 E \quad (3.2.4.1)$$

Dove:

- $H_{rms}$ : è l'altezza d'onda media quadratica (parametro della distribuzione di Rayleigh) che si assume sia uguale all'altezza d'onda calcolata dal modello in ciascun elemento della griglia;
- $H_{max} = 0.78h$ : altezza massima delle onde sul fondale profondo  $h$  (criterio di rottura di McCowan, 1891);
- $Q_b$ : fattore complementare alla probabilità di rottura descritta al paragrafo 3.2.2.

La suddivisione del processo di frangimento per interazione con il fondale rende il modello più stabile e accurato e permette di separare la dissipazione locale dovuta a discontinuità repentine della batimetria e le dissipazioni continue su fondo orizzontale o leggermente inclinato.

### 3.3 Parametri statistici

Nelle successive fasi di applicazione del modello e, in particolare, durante la fase di calibrazione dello stesso, è stato necessario confrontare i livelli modellati con una serie di misure di campo.

Al fine di valutare la bontà dell'accordo fra essi, sono stati usati tre parametri statistici: Mean Absolute Error (*MAE*), Root Mean Square Error (*RMSE*) e Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (*NSE*).

Il primo parametro utilizzato, *MAE*, indica l'errore assoluto medio fra i livelli modellati e i livelli misurati in corrispondenza di una stazione mareografica ed è calcolato secondo l'equazione 3.3.1.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |l_{mod} - l_{mis}|}{n} \quad (3.3.1)$$

Dove:

- $l_{mod}$ : livello modellato;
- $l_{mis}$ : livello misurato;
- $n$  : numero totale di misure di livello confrontate.

Si evidenzia che il parametro  $MAE$  è un parametro di tipo lineare, cioè tutte le differenze fra modellato e misurato sono ponderate equamente nell'operazione di media.

Si ha un buon accordo fra i dati modellati e quelli misurati quando il parametro statistico  $MAE$  si avvicina al valore nullo.

Il secondo parametro utilizzato,  $RMSE$ , indica la radice dell'errore quadratico medio fra i livelli modellati e i livelli misurati in corrispondenza di una stazione mareografica ed è calcolato secondo l'equazione 3.3.2.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{mod} - l_{mis})^2}{n}} \quad (3.3.2)$$

Dove:

- $l_{mod}$ : livello modellato;
- $l_{mis}$ : livello misurato;
- $n$  : numero totale di misure di livello confrontate.

Si evidenzia che il parametro  $RMSE$  dà un peso più elevato agli errori di grandi dimensioni, in quanto gli stessi vengono elevati al quadrato prima di essere mediati. Il valore di  $RMSE$  sarà uguale o maggiore del valore  $MAE$  riferito allo stesso campione di dati; tanto più i due parametri assumono valori diversi e tanto maggiore è la varianza degli errori del campione di dati.

Si ha un buon accordo fra i dati modellati e quelli misurati quando il parametro statistico  $RMSE$  si avvicina al valore nullo.

Il terzo parametro utilizzato,  $NSE$ , indica l'efficienza del modello ed è calcolato secondo l'equazione 3.3.3.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (l_{mis} - l_{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (l_{mis} - \bar{l}_{mis})^2} \quad (3.3.3)$$

Dove:

- $l_{mod}$ : livello modellato;
- $l_{mis}$ : livello misurato;
- $\overline{l_{mis}} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{mis}}{n}$ : livello medio misurato all'interno del campione confrontato;
- $n$ : numero totale di misure di livello confrontate.

Il parametro  $NSE$  varia tra 0 e 1, dove 1 indica un'efficienza del 100% del modello, che si verifica quanto il numeratore del secondo termine (varianza dell'errore di stima) dell'equazione 3.3.3 è nullo, cioè quando si ottiene un perfetto accordo fra livello modellato e livello misurato.

Si evidenzia che, come precedentemente descritto per il parametro  $RMSE$ , anche il parametro  $NSE$  è sensibile ai valori estremi, in quanto gli stessi vengono elevati al quadrato prima di essere mediati.

Nell'ultima fase di applicazione del modello per le analisi idrodinamiche della laguna, è stato, inoltre, utilizzato il parametro  $E_{max}$ , che rappresenta il massimo errore assoluto fra i livelli modellati in due diverse condizioni di simulazione o in corrispondenza di due stazioni di misura distinte, definito dall'equazione 3.3.4.

$$E_{max} = \max |(l_{sim1} - l_{sim2})| \quad (3.3.4)$$

Dove:  $l_{sim1}$  e  $l_{sim2}$  sono i livelli modellati in due simulazioni con diverse condizioni o in corrispondenza di due stazioni di misura distinte.

L'errore massimo viene utilizzato, ad esempio, per quantificare l'influenza del vento sulla stima dei livelli all'interno della laguna nel caso di forti venti, andando a confrontare i risultati di una simulazione senza l'applicazione di vento e una con l'applicazione del vento a parità di condizioni al contorno di livello (vedi capitolo 7.3).

Allo stesso modo,  $E_{max}$  viene utilizzato anche per valutare il setup all'interno della laguna andando a confrontare i livelli modellati in due stazioni distinte durante la stessa simulazione (vedi paragrafo 7.3.3).

## **4 File della geometria**

Il modello verrà applicato su una griglia di calcolo costituita da elementi triangolari che verranno quotati e a cui verrà assegnato il coefficiente di scabrezza secondo Strickler  $K_s$  e il parametro  $a_r$ , definito al paragrafo 3.1.1.

L'obiettivo della predisposizione del suddetto reticolo è quello di riprodurre in maniera efficace i fenomeni idrodinamici che avvengono all'interno della laguna. Nello specifico il modello, dopo essere stato creato sulla base dei dati topografici e batimetrici disponibili, verrà calibrato utilizzando una serie di misure di campo.

Il reticolo di calcolo e il modello di cui al capitolo 3, potranno, in seguito alla fase di calibrazione, essere utilizzati per svolgere delle analisi idrodinamiche all'interno della laguna.

### **4.1 Individuazione del dominio di calcolo**

Il dominio schematizzato dalla griglia di calcolo è stato definito a partire dal limite lagunare nell'entroterra che è individuabile grazie alla presenza di argini lungo tutto il perimetro interno della laguna (vedi Figura 4-1).

Il reticolo non comprende le aree che non sono soggette ad allagamento durante le fasi di marea (isole completamente emerse) e le zone la cui sommersione è regolata da attività antropologiche (valli da pesca).

È stata inoltre schematizzata una fascia di mare larga circa 6 km antistante al bacino lagunare.

Si è scelto, poi, di non schematizzare i fiumi che sfociano in laguna, ipotizzando che il contributo d'acqua dolce che apportano in laguna e la loro capacità di invaso non sia considerevole al fine della stima dei livelli. Questa assunzione è stata poi confermata analizzando i risultati delle simulazioni che utilizzano una griglia che comprende le zone fluviali sino alla linea ferroviaria retrostante alla laguna.

Il fiume Corno, invece, è stato schematizzato fino alla zona industriale Aussa-Corno in quanto in prossimità del Porto Margherita vi è la presenza di un mareografo i cui dati saranno utilizzati per la calibrazione e validazione del modello.

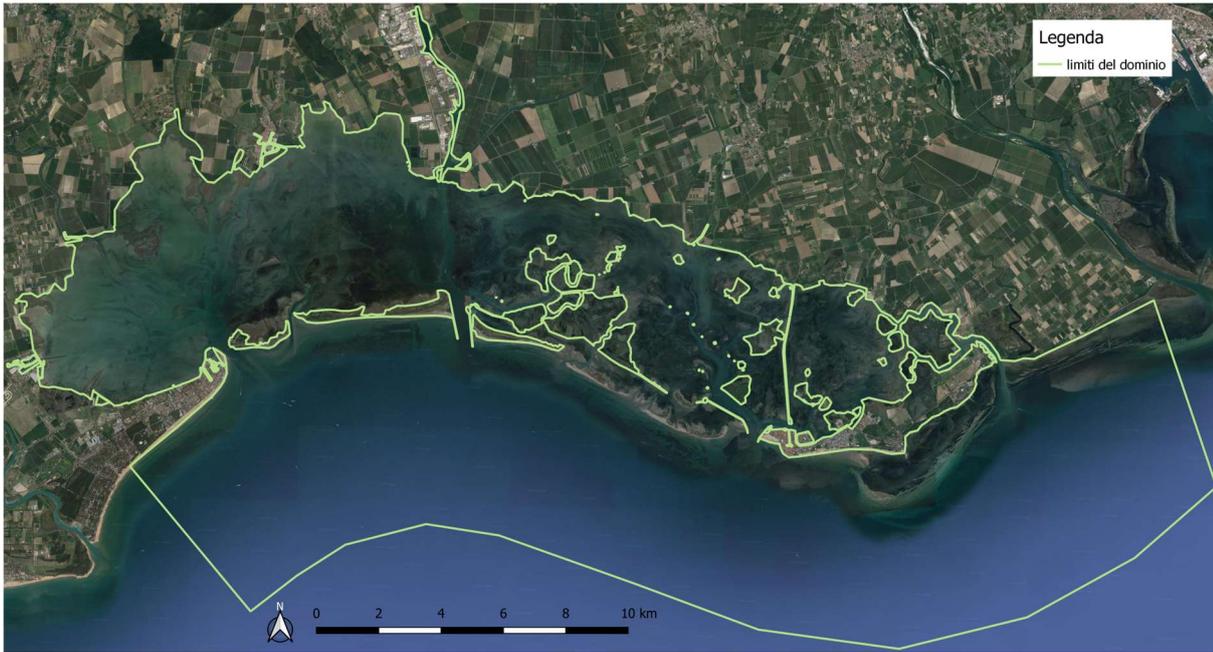


Figura 4-1: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con indicazione del limite del dominio di calcolo.

## 4.2 Generazione della mesh

Dopo aver definito il dominio, si procede, mediante il software Autocad, al tracciamento delle polilinee per rappresentare le diverse morfologie che compongono l'ambiente lagunare.

Per effettuare questa operazione si sono utilizzate le tavolette in scala 1:5000 della Carta Tecnica Regionale del Friuli-Venezia Giulia fornite in formato vettoriale georeferenziato secondo il sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est (Figura 4-2).

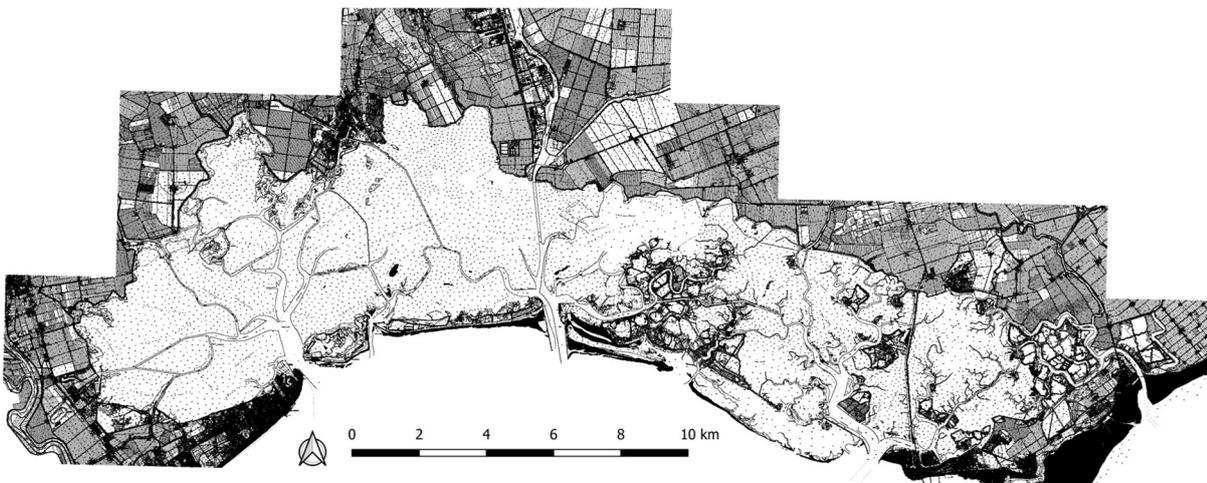


Figura 4-2: Insieme di tavolette della Carta Tecnica Regionale del Friuli-Venezia Giulia.

Inoltre, si sono utilizzate 10 foto satellitari del 2017 estratte dal portale della regione Friuli-Venezia Giulia per avere un riscontro fotografico degli elementi da rappresentare. I vari elementi morfologici, infatti, presentano delle colorazioni diverse secondo le quali si è in grado di distinguerle all'interno dell'ambiente lagunare.

L'ortofoto ci permette, ad esempio di distinguere le dune dalle barene in quanto, essendo caratterizzate da quote diverse, in particolare una quota più alta per le dune e più bassa per le barene rispetto il livello medio del mare, esse sono ricoperte da diversa vegetazione in grado di resistere o meno alla sommersione durante le fasi di marea. La vegetazione presente sui vari elementi ci permette, dunque, attraverso il suo colore caratteristico, di capire di che entità morfologica si tratta (vedi Figura 4-3).



*Figura 4-3: Limite fra barena e duna evidenziato dal cambiamento di vegetazione presente sul suolo.*

Le foto satellitari sono state georeferenziate mediante il software Qgis nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est e mosaicate per generare un'unica ortofoto in formato .ecw (Figura 4-4).



*Figura 4-4: Ortofoto della laguna di Grado e Marano del 2017.*

Nel tracciare le polilinee, rappresentate in Figura 4-5, è stato necessario seguire alcune regole tali da garantire una buona rappresentazione degli elementi presenti in laguna, ma al contempo, tali da non appesantire la griglia di calcolo dal punto di vista computazionale:

- Le polilinee sono state tracciate su layer diversi a seconda dell'elemento che vanno a rappresentare, in modo tale da rendere più semplici le successive fasi di quotatura e assegnazione del coefficiente di scabrezza: barene, bassifondi non vegetati, bassifondi vegetati, canali, isole e dune.
- I vertici delle polilinee sono posti a una distanza uguale o superiore della dimensione del lato della maglia triangolare che si vuole ottenere nel reticolo di calcolo; nel caso in esame si sono scelte delle maglie di lato minimo pari a 50 m in corrispondenza delle bocche di porto e fino a 300 m all'interno dei bassifondi; la dimensione delle maglie è stata fissata mediante delle etichette poste sui vertici delle polilinee stesse;
- I vertici lungo i canali sono stati allineati fra loro e sono state inoltre inserite delle polilinee interne ai canali stessi in modo da ottenere delle maglie allungate nella direzione del moto.

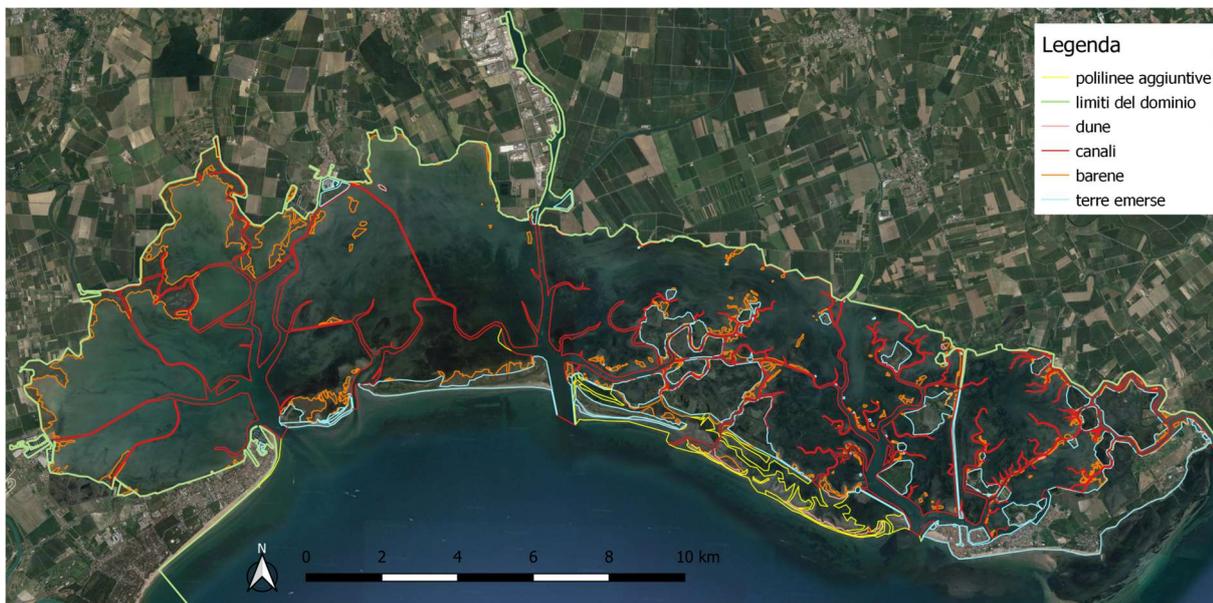
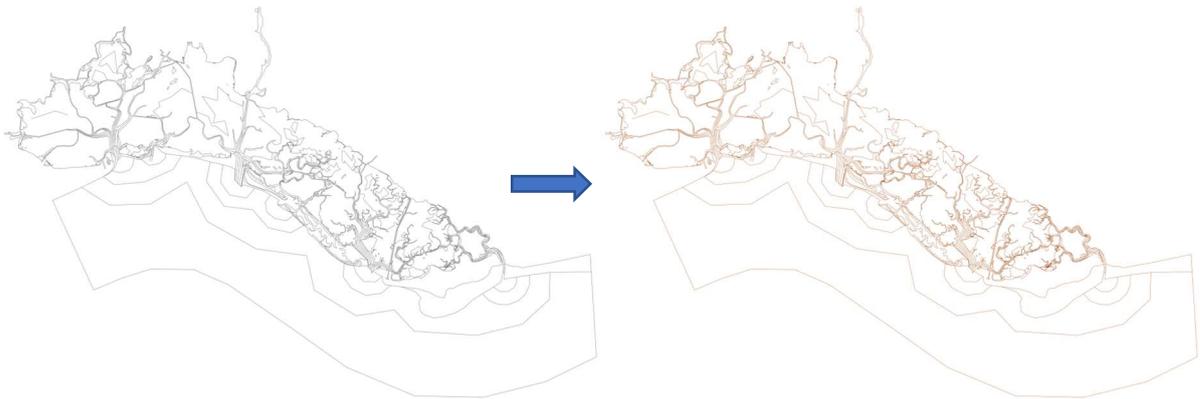


Figura 4-5: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con indicazione delle polilinee utilizzate su cui si appoggerà il software Incidenze per realizzare il reticolo di calcolo a maglie triangolari.

Una volta definita la geometria sulla base della carta tecnica e dell'ortofoto si è potuto procedere alla generazione in automatico della mesh mediante il software Incidenze.

Questo programma permette di svolgere le fasi di pre-processing (es. costruzione del reticolo di calcolo, visualizzazione delle condizioni al contorno) e, successivamente, anche di post-processing (visualizzazione e in parte rielaborazione dei risultati ottenuti dal modello).

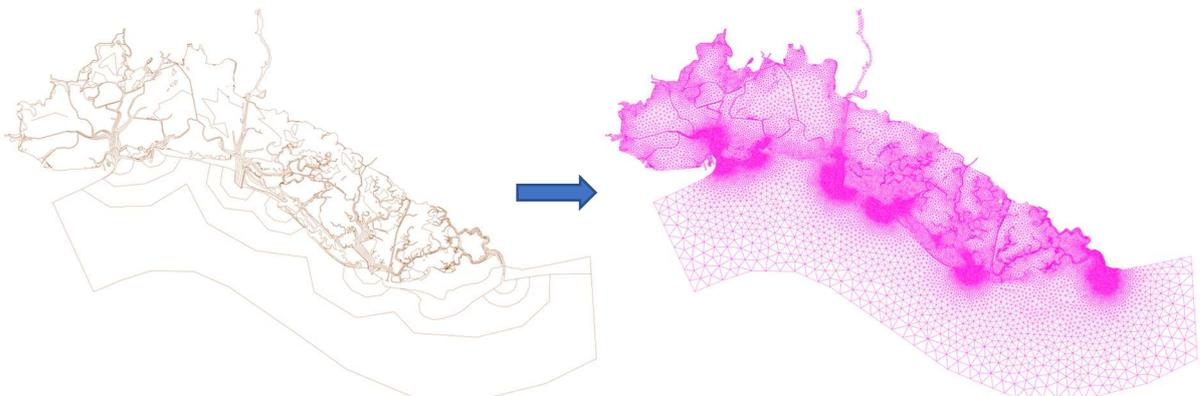
Il reticolo di calcolo viene realizzato sulla base delle polilinee ed etichette associate importate nel software in formato DXF12, che devono essere trasformate in un file CNT (Figura 4-6).



*Figura 4-6: Passaggio da file DXF a file CNT mediante il software Incidenze.*

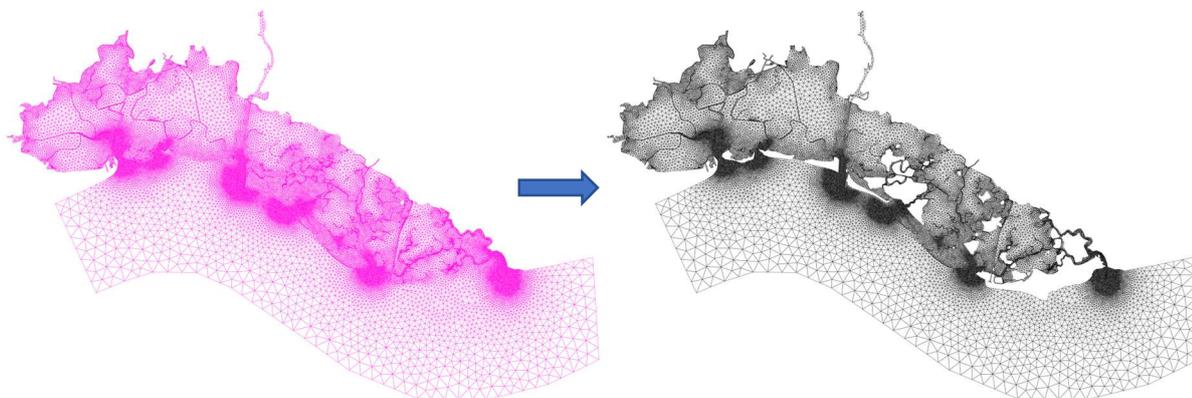
Successivamente si procede alla triangolazione con lo stesso programma che seguirà le seguenti regole per generare il file TIN partendo dal file CNT (Figura 4-7):

- Inserisce un nodo in ogni vertice delle polilinee;
- Suddivide i tratti di polilinea inserendo un numero di nodi tali da rispettare la distanza imposta dalle etichette presenti;
- Cerca di inserire triangoli che siano il più possibile equilateri.



*Figura 4-7: Passaggio da file CNT a file TIN mediante il software Incidenze.*

Se la triangolazione non è soddisfacente si procede inserendo delle ulteriori polilinee o modificando le etichette presenti nel file DXF; quando la triangolazione è ottimale, cioè rappresenta al meglio le morfologie interne alla laguna, si procede a trasformare il file TIN in un file GEO che rappresenta il dominio mediante nodi e maglie (Figura 4-8).



*Figura 4-8: Passaggio da file TIN a file GEO mediante il software Incidenze*

In Figura 4-9 è rappresentato il reticolo di calcolo della laguna di Grado e Marano che risulta costituito da:

- 29348 nodi
- 55580 maglie



Figura 4-9: Reticolo di calcolo generato dal software Incidenze.

### 4.3 Quotatura

Il reticolo di calcolo generato è stato quotato assegnando ad ogni maglia una quota media del fondo in funzione del modello digitale batimetrico che ha portato alla realizzazione della Carta Batimetrica della laguna di Grado e Marano del 2011.

La stessa è costituita da un quadro sinottico in scala 1:25.000 e quattro tavole particolareggiate in scala 1:10.000, che contengono i rilievi batimetrici effettuati fra il 2009 e il 2011 dall'Autorità di bacino regionale del Friuli-Venezia Giulia, dal Gruppo di Ricerca Costiera del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Trieste, dall'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste e dallo Staff del Commissario Delegato per l'Emergenza Socio-Economico Ambientale determinatasi nella Laguna di Marano e Grado.

Le tavole di dettaglio in scala 1:10.000 suddividono il territorio lagunare nel modo seguente: la tavola 1 copre il bacino di Lignano, la tavola 2 copre la porzione ricompresa tra la bocca di Sant'Andrea e Porto Buso, la tavola 3 quella tra Morgo e la bocca di Grado, la tavola 4 la porzione tra la bocca di Grado e Primero.

Esse riportano il perimetro delle barene ricavato dalle ortofoto digitali a colori del 2006 dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Trieste e alcune quote delle stesse ottenute da dati LIDAR di proprietà della Protezione Civile della Regione Friuli-Venezia Giulia.

I rilievi effettuati fra il 2009 e il 2011 riguardano i bassifondi dove sono stati realizzati circa 700 km di profili batimetrici in modalità singlebeam, acquisiti in transetti nord-sud (circa 900.000 punti), con passo di centocinquanta metri, per mezzo di ecoscandagli idrografici e apparecchiature GPS differenziali, dai quali è stato ricavato un modello digitale batimetrico (DBM - Digital Bathymetric Model)

Questo è stato poi ingrato con circa 120 km di rilievi multibeam ad alta risoluzione di tutti i principali canali navigabili presenti nella laguna (vedi Modello Batimetrico Digitale completo in Figura 4-10).

Le quote sono riferite allo zero IGM e in planimetria sono fornite le coordinate nel sistema di riferimento Gauss-Boaga Fuso Est.



Figura 4-10: Modello Digitale Batimetrico 2009-2011.

La quotatura del reticolo di calcolo è stata effettuata, mediante il software Incidenze, in diverse fasi:

1. Quotatura dei canali principali mediante file .xyz, i cui punti sono stati estratti con un intervallo di 5 m dal DBM mediante il software QGis;
2. Quotatura dei bassifondi mediante file .xyz, i cui punti sono stati estratti con un intervallo di 20 m dal DBM mediante il software QGis;
3. Quotatura manuale delle barene mediante i punti forniti dalle tavole di precisione della Carta Batimetrica del 2011 (estratto della prima tavola di dettagli nella Figura 4-11);

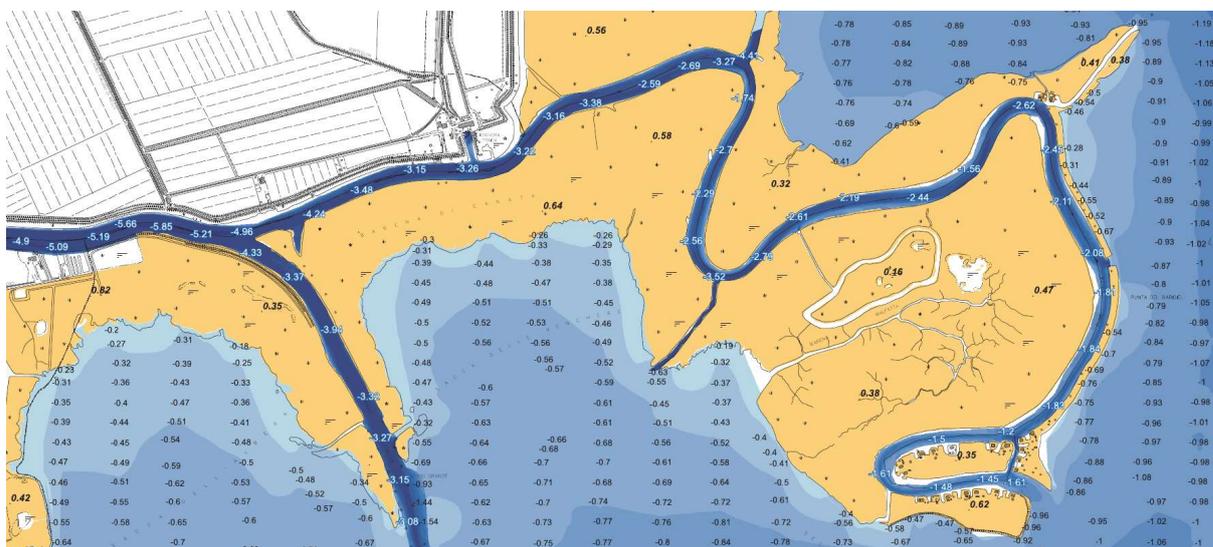


Figura 4-11: Particolare della prima tavola di dettaglio della Carta Batimetrica 2009-2011, dove si vedono alcune quote altimetriche che sono state assegnate alle barene.

4. Quotatura del mare antistante alla laguna mediante la batimetria dell'Alto Adriatico del 2015 (Figura 4-12 sottostante).

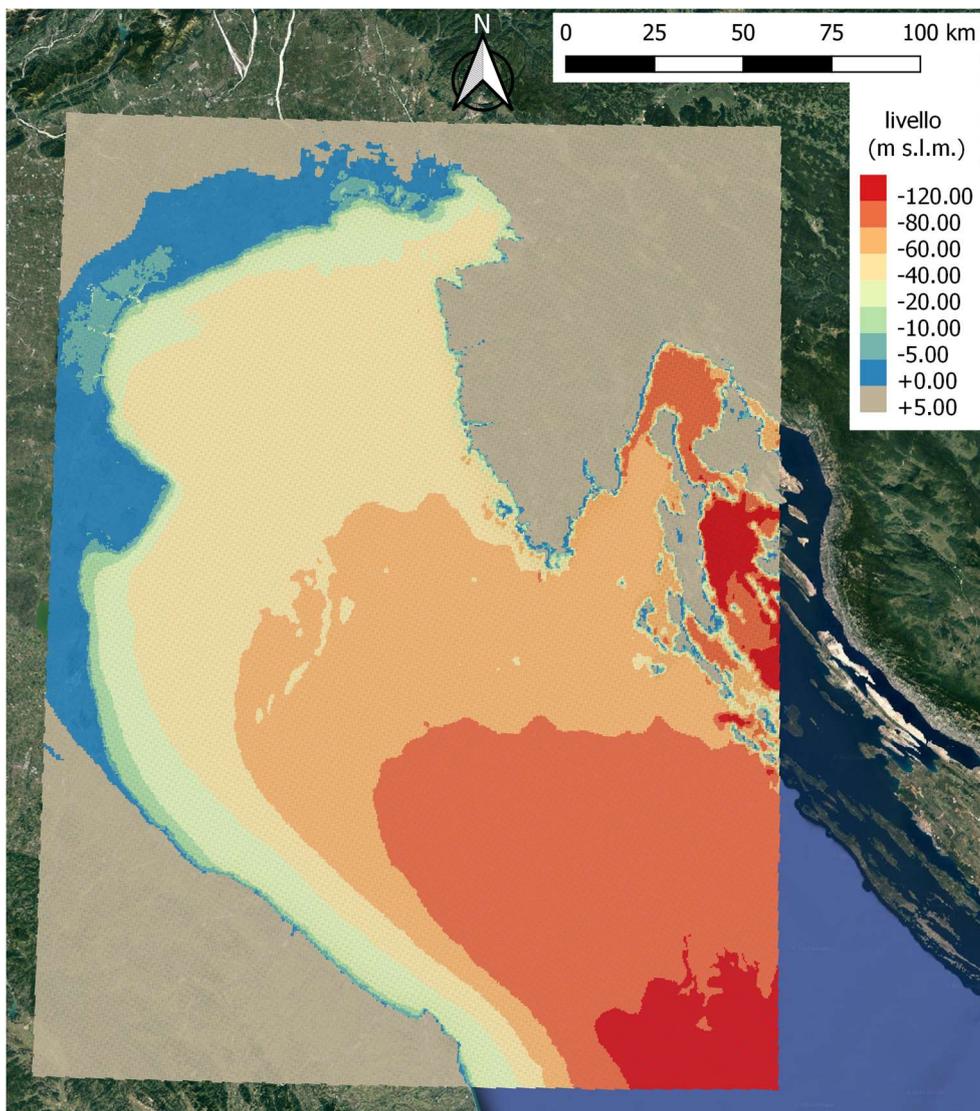


Figura 4-12: Batimetria dell'Alto Adriatico del 2015.

È poi seguita una fase di controllo della quotatura automatica, eseguita sempre mediante la visualizzazione offerta dal software Incidenze, in particolare in prossimità degli argini che delimitano l'ambiente lagunare e in prossimità dei canali principali dove vi è un cambio repentino delle quote del fondo. In questo modo, sono state corrette tutte le maglie che presentavano una quota del fondo troppo alta o troppo bassa e sono state quotate mediante interpolazione lineare le maglie a cui non era ancora stata assegnata una quota perché non rientravano nell'area ricoperta dai precedenti rilievi.

In particolare, le maglie che schematizzano i piccoli bacini paralagunari antistanti le isole di Buso e Morgo, sono state quotate in funzione delle indicazioni fornite dall'ortofoto e dall'articolo Petti et al. (2018), in quanto non rientrano nelle aree rilevate della Carta Batimetrica del 2011.

Alcune quote relative alle barene sono state, inoltre, verificate con un rilievo GPS (strumento utilizzato Figura 4-14) effettuato dalla sottoscritta in collaborazione con i ricercatori dall'Università di Padova durante un'uscita in capo in data 28 Giugno 2022 (zone di rilievo evidenziate nella Figura 4-13).



*Figura 4-13: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con indicazione delle zone di rilievo nella giornata del 28 Giugno 2022; gli ingrandimenti delle aree 1,2,3,4 sono riportati rispettivamente nelle Figura 4-15, Figura 4-16, Figura 4-17 e Figura 4-18.*



*Figura 4-14: Strumentazione GPS per il rilievo delle quote altimetriche delle barene.*



Figura 4-15: riquadro 1 in Figura 4-13.



Figura 4-16: riquadro 2 in Figura 4-13.

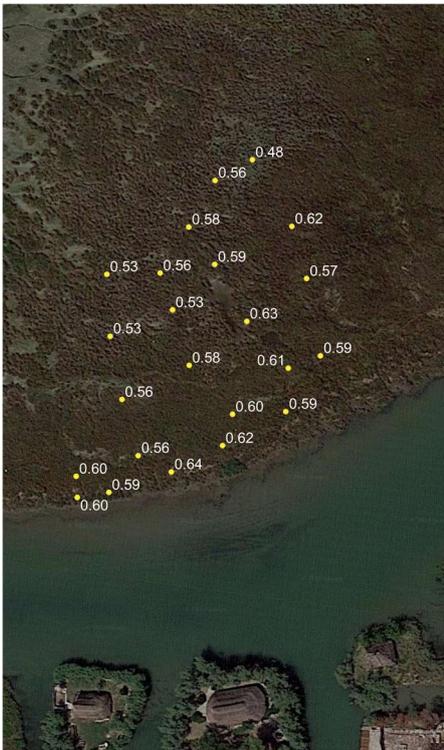


Figura 4-17: riquadro 3 in Figura 4-13.



Figura 4-18: riquadro 4 in Figura 4-13.

Il reticolo di calcolo quotato a seguito di tutte le operazioni descritte è rappresentato nella Figura 4-19 sottostante.

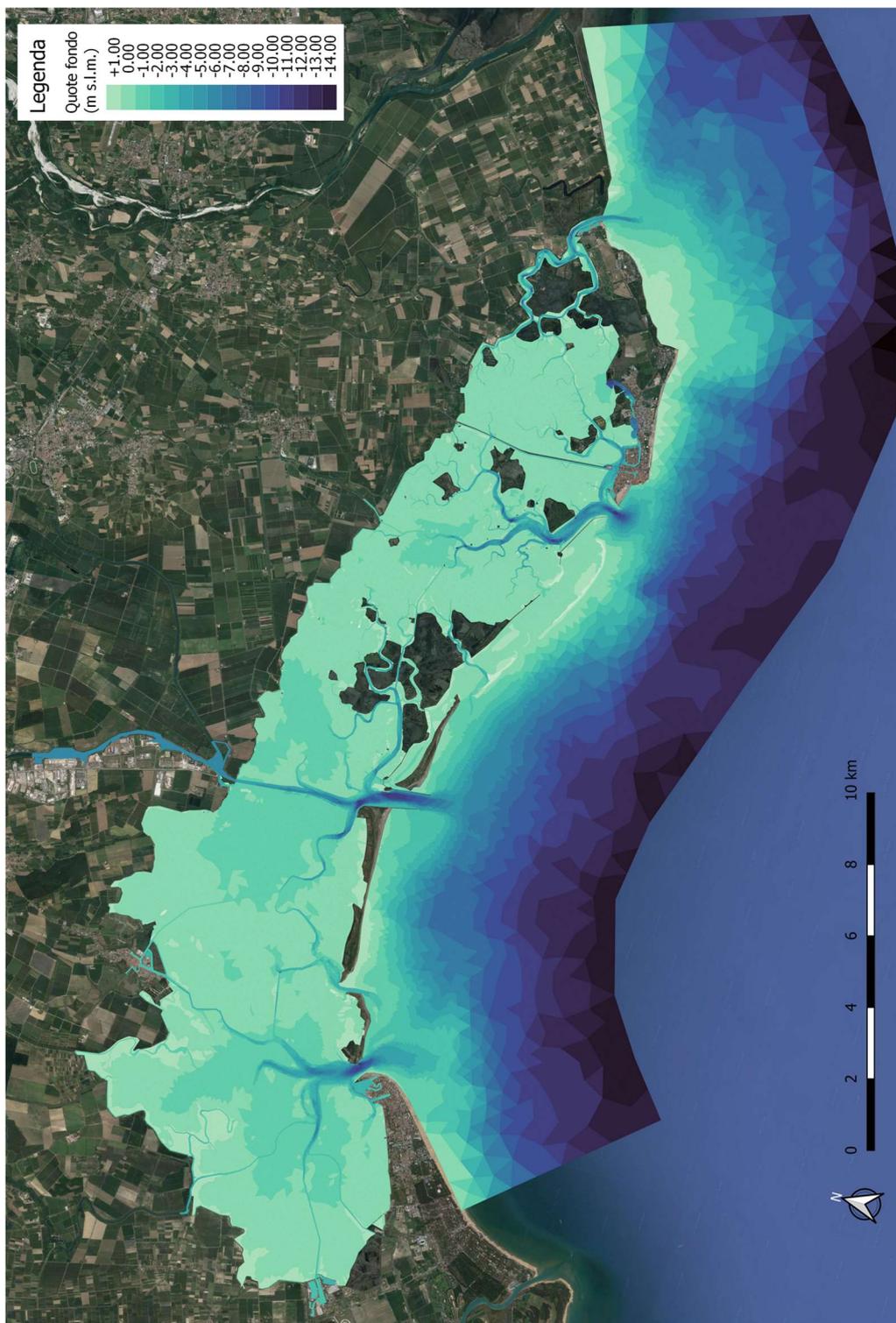


Figura 4-19:Reticolo di calcolo quotato.

#### 4.4 Assegnazione dei coefficienti di scabrezza secondo Strickler

Il secondo parametro essenziale da assegnare ad ogni elemento del dominio è il coefficiente di scabrezza secondo Strickler,  $k_s$ .

Esso rappresenta la resistenza al fondo che l'elemento oppone alla propagazione del flusso d'acqua e deve dunque tenere conto delle diverse tipologie di materiale di cui è costituito il fondo e della presenza o meno di ostacoli tra cui, ad esempio, la vegetazione.

Per questo motivo si sono identificate 7 classi per l'assegnazione del coefficiente di scabrezza riassunte nella Tabella 4.1.

CLASSE	$k_s (m^{\frac{1}{3}}/s)$
(1) barene	15
(2) bassifondi non vegetati	35
(3) canali	40
(4) bocche tidali	40
(5) mare aperto	40
(6) fiumi	35
(7) dune	15
(8) bassifondi vegetati	20

Tabella 4.1: Valori  $K_s$  definiti dalla calibrazione.

L'assegnazione dei coefficienti è stata eseguita mediante il software Incidenze, utilizzando le polilinee tracciate in Autocad per individuare le zone contenenti tutti gli elementi appartenenti alla stessa classe in modo da facilitare l'operazione stessa.

I valori riportati nella Tabella 4.1 sono direttamente i coefficienti di scabrezza finali risultanti dalla fase di calibrazione del modello che verrà descritta al capitolo 6.2.

In Figura 4-20 è riportata una mappa in scala a colori che descrive la distribuzione spaziale dei valori selezionati del coefficiente di scabrezza,  $k_s$ , all'interno del reticolo di calcolo:

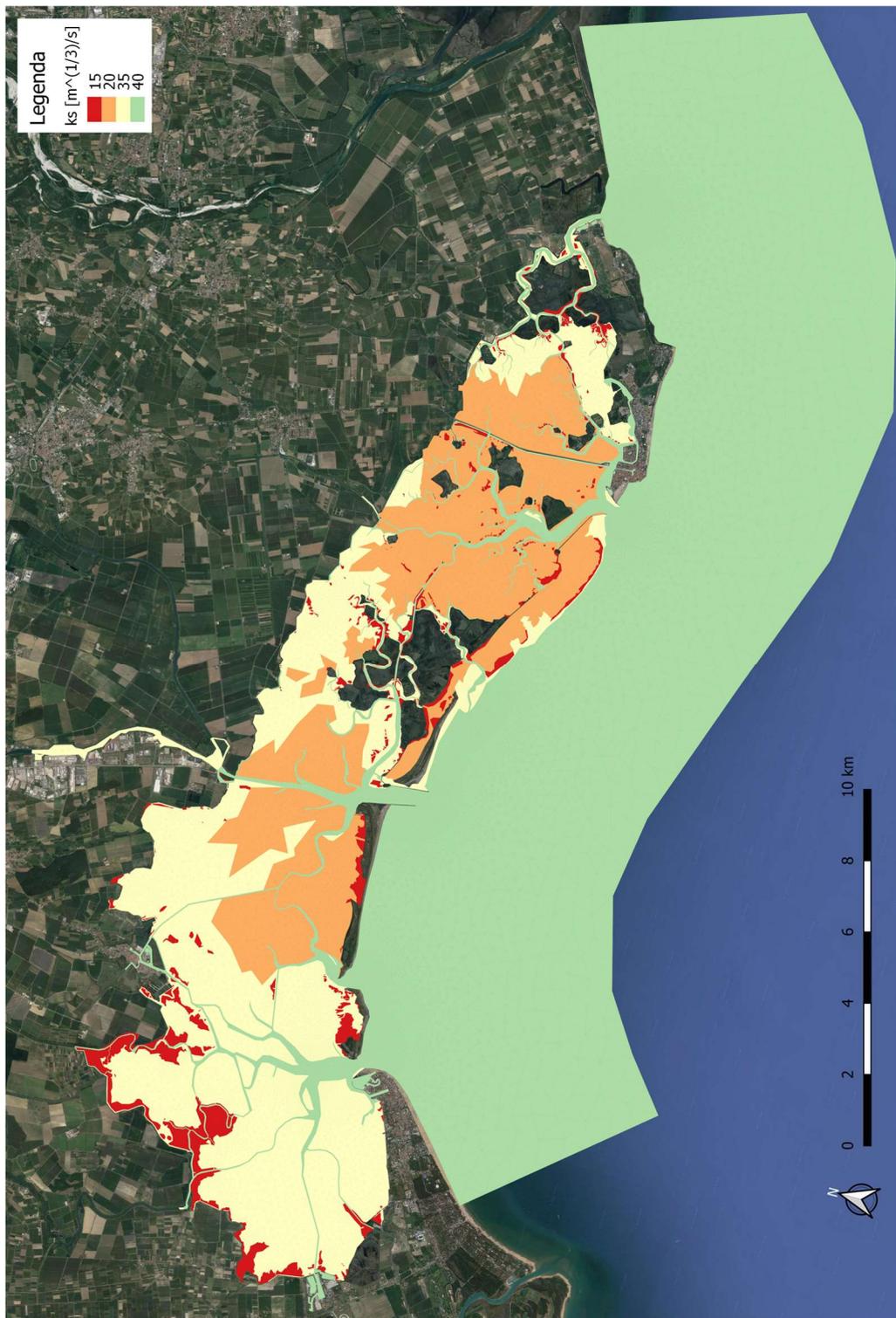


Figura 4-20: Reticolo di calcolo con assegnazione dei coefficienti di scabrezza secondo Strickler.



## 5 File di simulazione

Una volta definito il file della geometria si passa alla creazione del file della simulazione. Esso deve contenere tutte le informazioni necessarie al modello WWTM descritto al capitolo 3, al fine di poter eseguire la simulazione stessa.

Il file di simulazione è strutturato in modo tale che il modello lo possa leggere correttamente, cioè possa riconoscere le informazioni in esso contenute, fra le quali: durata della simulazione,  $\Delta t$  di calcolo,  $\Delta t$  di stampa, tabelle per l'assegnazione dei livelli, nodi a cui viene assegnato il livello ecc.

La Tabella 5.1 sottostante mostra la struttura del file SIM per quanto riguarda il *modulo idrodinamico* e il *modulo di generazione e propagazione delle onde*:

<b>STRUTTURA FILE SIM</b>	
Stringa di commento dei termini di cui alla riga successiva	
dtprt, stampa a video (1/0), convet, (1/0), dtconvet, Rey (1/0), dtRey, Coriolis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dtprt: passo temporale di stampa dei risultati (s);</li> <li>• stampa a video: 1 (attiva), 0 (disattiva);</li> <li>• attivazione termini convettivi: 1 (attivi), 0 (disattivi);</li> <li>• dtconvet: tempo di attivazione dei termini convettivi (s);</li> <li>• attivazione termini di Reynolds: 1 (attivi), 0 (disattivi);</li> <li>• dtRey: tempo di attivazione dei termini di Reynolds (s);</li> <li>• Coriolis: termine di Coriolis;</li> </ul>
nomefile.geo	Nome del file della geometria
nomefile_IDRO.out	Nome del file dei risultati dell'idrodinamica
nomefile_MO.out	Nome del file dei risultati del moto ondoso
Stringa di commento: data della simulazione	
TT, dt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TT: durata totale della simulazione (s);</li> <li>• dt: passo temporale di calcolo (s);</li> </ul>
Condizioni iniziali (1/0)	0 = condizione iniziale di livello costante 1 = condizione iniziale con file di restart

$H_0$		Condizione iniziale di livello costante (solo se C.I. = 0)
nomefile.rts		Nome del file di restart (solo se C.I. = 1)
ntab		Numero di tabelle per l'assegnazione di livelli, portate, vento, filtrazione e concentrazione
Da ripetere per ogni tabella:	Dtab, nvaltab, Tabella_jtab	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dtab: passo temporale con cui vengono definiti i valori (s) (ATT: il primo valore si riferisce a t=0);</li> <li>• nvaltab: numero di valori compresi nella tabella;</li> <li>• jtab: numero della tabella;</li> </ul>
	$X_0, X_1 \dots X_{nvaltab}$	Nvaltab dati della variabile X;
nh		Numero di nodi con livello assegnato
Da ripetere per ogni nodo:	nodo, jtab, xcost	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nodo: indice identificativo del nodo con livello assegnato (estratto dal file .geo);</li> <li>• jtab: numero della tabella contenente i valori di livello che il nodo assume nel tempo;</li> <li>• xcost: costante moltiplicativa dei livelli (percentuale di livello che si intende affidare al nodo in esame);</li> </ul>
nq		Numero di nodi con portate assegnate
Da ripetere per ogni nodo:	nodo, jtab, xcost	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nodo: indice identificativo del nodo con portata assegnata (estratto dal file .geo);</li> <li>• jtab: numero della tabella contenente i valori di portata che il nodo assume nel tempo;</li> <li>• xcost: costante moltiplicativa delle portate (percentuale di portata che si intende affidare al nodo in esame);</li> </ul>
Tipo di vento (0, 1, 2)		0 = no vento; 1 = vento esponenziale; 2 = vento lineare;
$\rho_a, Cd_0, e_a$		<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\rho_a</math>:</li> <li>• <math>Cd_0</math>:</li> <li>• <math>e_a</math>:</li> </ul>

Distribuzione del vento (0, 1)		0 = vento uniforme sul dominio; 1 = vento distribuito sul dominio (secondo un file tin );
solo se tipo di vento 0:	jtab_velocità, jtab_direzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• jtab_velocità: numero della tabella in cui sono assegnate le velocità del vento nel tempo;</li> <li>• jtab_direzione: numero della tabella in cui sono assegnate le direzioni del vento nel tempo (angolo che il vettore velocità forma con l'asse x);</li> </ul>
solo se tipo di vento 1:	nstaz	Numero di stazioni con velocità del vento e direzione assegnata
	X, Y, jtab_velocità, jtab_direzione	<ul style="list-style-type: none"> <li>• X, Y : coordinate geografiche della stazione di misura del vento;</li> <li>• jtab_velocità: numero della tabella in cui sono assegnate le velocità del vento nel tempo;</li> <li>• jtab_direzione: numero della tabella in cui sono assegnate le direzioni del vento nel tempo (angolo che il vettore velocità forma con l'asse x);</li> </ul>
	nomefile.tin	Nome del file TIN su cui calcolare il vento distribuito
	rmax, rmin, nstep	<ul style="list-style-type: none"> <li>• rmax: raggio massimo di interpolazione;</li> <li>• rmin: raggio minimo di interpolazione;</li> <li>• nstep: numero di steps per l'interpolazione;</li> </ul>
	Stampa_vento (1/0), nomefile_Wind.out	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stampa_vento: 1 (si), 0 (no);</li> <li>• nomefile_WIND.out: nome del file dei risultati del vento distribuito;</li> </ul>
moto ondoso (0, 1)		0 = non calcola il moto ondoso; 1 = calcola il moto ondoso;
solo se moto ondoso = 1:	$\alpha$ , $\beta$	Parametri per il calcolo del periodo d'onda

Tabella 5.1: Struttura del file SIM.

Un esempio di file SIM è riportato in Figura 5-1:

```

dt stampa,stampa video(1/0),term convettivi(1/0),ritardo Convettivi,term Reynolds(1/0),ritardo Reynolds,Coriolis Par (2wsinLAT)
600. 1 1 1800. 1 1800. 0.00010415 (coriolis a GRADO-MARANO)
laguna_G-M_31.08.22_NO_fiumi.geo nome file geo
20220901_Prova1_IDRO.out nome file out IDRODINAMICO
20220901_Prova1_MO.out nome file out MOTO ONDOSO
simulazione Laguna 2022 giornata del 01 SETTEMBRE 2022
626400. 4.0 durata,timestep
0 condizioni iniziali IDRODINAMICA (0=livello_costante; 1=file_restart)
-0.048 valore iniziale delle quote nodali
xxxIDRO.rts file di restart
3, numero tabelle per l'assegnazione di livelli, portate, vento, filtrazione e concentrazione
600. 1045 Tabella_1_livelli_marea(mslm)
-0.048 -0.051 -0.055 -0.059 -0.066 -0.069 -0.072 -0.069 -0.070 -0.072
-0.072 -0.065 -0.059 -0.052 -0.038 -0.026 -0.015 -0.002 0.012 0.024
0.034 0.044 0.057 0.073 0.092 0.111 0.129 0.147 0.163 0.180

3600. 175 Tabella_2_velocita_Vento(m/s) Grado
1.700 0.900 1.400 0.900 2.200 2.500 2.700 2.300 1.900 1.300
2.600 1.300 1.800 2.400 2.200 1.600 1.100 1.100 1.500 2.400
2.700 3.400 3.800 2.800 2.600 1.900 2.100 2.400 1.100 1.800

3600. 175 Tabella_3_direzione_VentoX(°) Grado
180.000 162.000 25.000 32.000 39.000 26.000 34.000 40.000 65.000 86.000
61.000 45.000 71.000 57.000 60.000 55.000 68.000 260.000 222.000 215.000
216.000 220.000 220.000 215.000 220.000 245.000 270.000 341.000 27.000 19.000

59 N nodi con livelli assegnati
28378 1 1. Mare
28379 1 1. Mare
28382 1 1. Mare
28387 1 1. Mare
28395 1 1. Mare

0 Nodi con portate assegnate
2,vento assegnato (0, no vento, 1, vento esponenziale, 2, vento lineare)
1.0 0.63 0.105 RoAir, Cd0 Wind, e Wind (lineare con Cd0 alla Smith&Banke)
0, tipo vento (0=vento uniforme; 1=vento distribuito)
2 3 tabella Uwind tabella TETAwind(°rispetto a x) (solo se tipo vento=0)
1,moto ondoso
3.5 0.35 ,parametri per calcolo Periodo Onda(alfaT, betaT) (solo se Moto Ondoso =1)
0 Nele barriera del moto ondoso
0 Nele Hf variabile

```

Figura 5-1: Esempio di file SIM.

## 5.1 Condizioni iniziali

Per avviare la simulazione è necessario fornire al modello una descrizione dello stato idrodinamico della laguna all'inizio della simulazione in termini di livello e velocità della corrente.

Questo può essere fatto mediante un file di restart, risultato di una simulazione precedente, che specifica il livello in ogni nodo del reticolo di calcolo e le velocità in ogni elemento, oppure può essere stabilito un livello costante su tutta la laguna come livello iniziale da cui far partire la simulazione assumendo uno stato di quiete per quanto riguarda la velocità.

Quest'ultima configurazione è, ovviamente, non particolarmente realistica ma sicuramente equilibrata dal punto di vista idrodinamico. È chiaro che, partendo da quest'ultimo stato di quiete, sarà necessario fornire un certo tempo al sistema per "avviarsi" perdendo memoria della suddetta condizione iniziale sintetica.

Nello specifico quando si opta per utilizzare come condizione iniziale lo stato di quiete il livello sarà imposto pari al primo valore di livello delle condizioni al contorno imposte in mare aperto secondo la prima tabella che si trova nel file SIM (vedi Figura 5-1).

## **5.2 Condizioni al contorno**

Un'altra informazione necessaria per l'avvio della simulazione sono le condizioni al contorno. Nel caso in esame, le stesse saranno condizioni di livello che verranno applicate su tutti i nodi che delimitano il reticolo di calcolo lato mare, evidenziati nella Figura 5-2.

Non essendo in possesso di misure di livello in mare aperto, i livelli (prima tabella del file SIM Figura 5-1) che verranno imposti in tali nodi sono quelli registrati dal mareografo posto a Faro Porto Buso (FPB) e gestito dall'Ufficio Idrografico del Magistrato delle Acque di Venezia. Essi sono registrati con un intervallo di 10 minuti sono disponibili per l'intero periodo 2014-2017.

Come verrà descritto in seguito i suddetti dati vengono opportunamente corretti prima di imporli al limite esterno del reticolo con lo scopo di tener conto del ritardo di propagazione.

Questa stazione è una delle 12 presenti all'interno della laguna gestite dall'Ufficio Idrografico; a queste si aggiungono altre 3 stazioni gestite dall' dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, i cui dati verranno utilizzati durante la fase di calibrazione del modello (vedi Figura 6-1).

Verranno inoltre inserite nel file SIM altre 2 tabelle per definire le caratteristiche del vento assunto uniforme al di sopra dell'intera laguna; in particolare, nella prima tabella verrà definita la velocità del vento in m/s e nella seconda la direzione dello stesso in gradi rispetto all'asse x.

Le caratteristiche del vento assegnate sull'intero reticolo di calcolo sono quelle registrate nella stazione meteo di Grado gestita dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, indicata nella Figura 5-2.

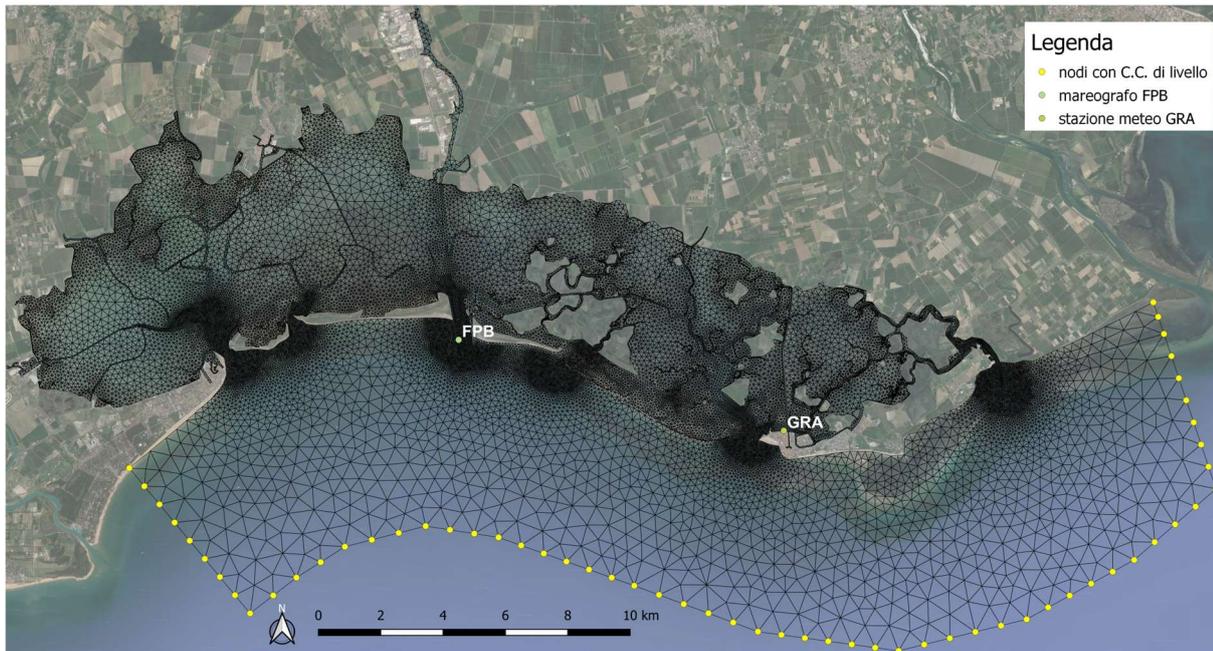


Figura 5-2: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con indicazione dei nodi a cui verrà assegnata la condizione al contorno di livello e le stazioni mareografiche di Faro Porto Buso (FPB) e Grado (GRA).

È stato, innanzitutto, necessario verificare l'attendibilità dello zero idrometrico del mareografo posto a Faro Porto Buso di cui si utilizzano le misure di livello come condizione al contorno. Lo stesso non viene infatti indicato in modo ufficiale dall'Ufficio Idrografico ed è quindi stato necessario ricavarlo per poter confrontare i livelli modellati e i livelli misurati agli altri idrometri tutti riferiti allo zero IGM (convenzionalmente definito come livello medio del mare Genova 1942).

Per definirlo si sono confrontati i livelli misurati nel mareografo posto a Faro Porto Buso con quelli misurati nella stazione di Grado e gestiti dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, che sono noti dal 1991 al 2020.

Di quest'ultimo, infatti, è noto lo zero idrometrico, in quanto le misure in esso sono riferite allo zero di Punta della Salute a Venezia che si trova 0.235 m più in basso dello zero IGM 1942.

A partire dalle registrazioni di Grado si può risalire allo zero idrometrico della stazione di FPB sovrapponendo i livelli delle due stazioni e assumendo che, in condizioni di vento debole e in condizioni di marea di quadratura, il livello all'interno della laguna debba essere all'incirca lo stesso in ogni stazione.

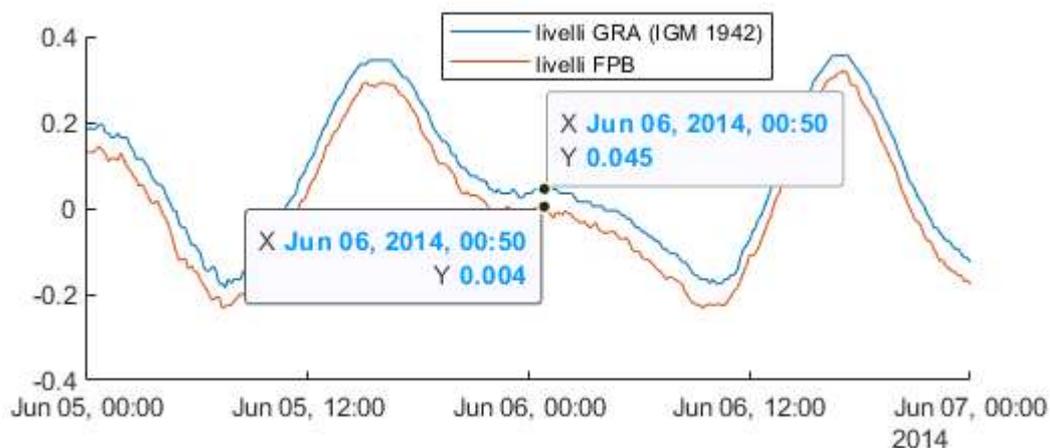


Figura 5-3: Confronto fra i livelli misurati a Grado (GRA) e a Faro Porto Buso (FPB) in condizioni di vento debole.

Nella Figura 5-3 è riportato un esempio di come è possibile identificare la differenza di livello fra le due stazioni. Questa misurazione è stata eseguita molte volte all'interno del periodo 2014-2017 ed è stato quindi possibile definire una differenza media di 4 cm.

I livelli di FPB sono stati, dunque, alzati di 4 cm per poter essere riferiti anch'essi allo zero IGM 1942.

Inoltre, gli stessi sono stati filtrati mediante una media mobile applicata ai dati misurati con l'utilizzo del software Matlab, affinché non vi siano bruschi cambiamenti di livello che potrebbero dare problemi di instabilità numerica nell'applicazione del modello.

Per tenere conto del fatto che i livelli di marea verranno applicati a 6 km dalla costa rispetto alla posizione in cui sono stati misurati, si procede poi a anticipare gli stessi, in modo tale che i livelli che verranno estratti dopo la simulazione in corrispondenza di Faro Porto Buso riproducano al meglio quelli misurati dal mareografo nella stessa posizione.

Per verificare di quanto sia necessario anticipare le condizioni al contorno, si è proceduto ad una simulazione preventiva con vento debole ( $< 5/8$  m/s) in modo tale che i livelli registrati non subiscano particolari variazioni a causa della forzante esterna.

Si è, dunque, scelto come periodo di simulazione quello dal 07 al 14 Settembre 2014, che corrisponde ad un periodo di sizigia con presenza di vento a velocità inferiore dei 6 m/s. In Figura 5-4 sono riportati i livelli misurati a Faro Porto Buso (FPB) usati come condizione al contorno, le velocità e le direzioni del vento nel periodo di simulazione scelto.

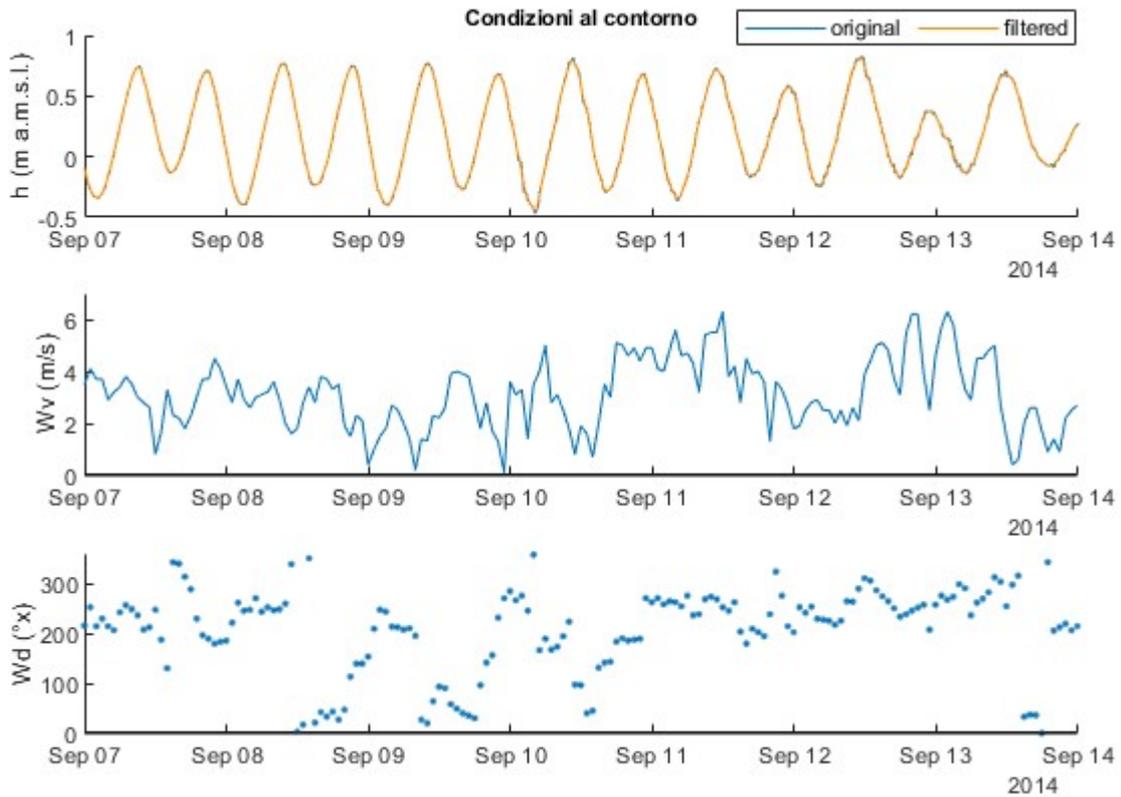


Figura 5-4: Condizioni al contorno relative alla simulazione dal 07 al 14 Settembre 2014.

Si sono effettuate 2 prove: la prima con un anticipo di 20 minuti dei livelli imposti come condizione al contorno e la seconda con un anticipo di 10 minuti.

Nella seguente Figura 5-5 è riportato un ingrandimento del confronto fra i livelli misurati e i livelli modellati in corrispondenza della stazione FPB nelle due simulazioni nel giorno 07 Settembre 2014.

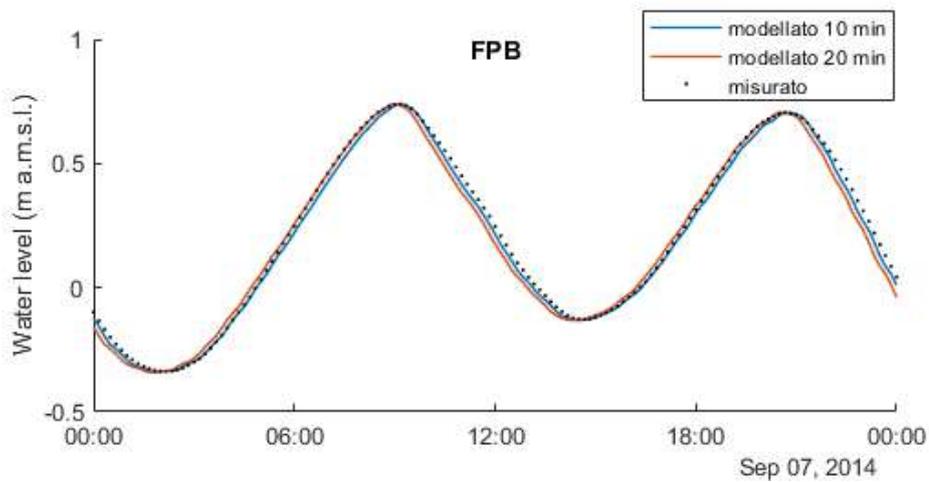


Figura 5-5: Confronto fra livelli misurati, modellati con anticipo di 10 min sulle C.C. (blu) e modellati con anticipo sulle C.C. di 20 min (rosso).

Per identificare quale sia la miglior soluzione, sono stati calcolati gli errori commessi nella modellazione dei livelli rispetto a quelli misurati dal mareografo posto a FPB definiti al paragrafo 3.3 (Tabella 5.2).

<b>Errori stazione FPB</b>	$MAE$ (m) $\frac{\sum_{i=1}^n  l_{mod} - l_{mis} }{n}$	$RMSE$ (m) $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{mod} - l_{mis})^2}{n}}$	$NSE$ (%) $1 - \frac{\sum_{i=1}^n (l_{mis} - l_{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (l_{mis} - \overline{l_{mis}})^2}$
Sim 10 min di ritardo sulle C.C.	0.019	0.024	99.5
Sim 20 min di ritardo sulle C.C.	0.030	0.040	98.6

Tabella 5.2: Errori fra i livelli modellati e i livelli misurati nella simulazione del 7-14 Settembre 2014 nella stazione FPB.

Dai risultati ottenuti si è scelto di utilizzare come condizioni al contorno quelle caratterizzate da un anticipo di 10 minuti, in quanto gli errori (valutati utilizzando gli indici MAE e RMSE descritti nella tabella Tabella 5.2) sulla stima dei livelli in corrispondenza della stazione di Faro Porto Buso sono minori e l'efficienza del modello (NSE) risulta migliore.



## 6 Applicazione del modello

Dopo aver definito la geometria e i parametri di simulazione si procede all'applicazione del modello al fine di calibrarlo e poter dunque apprezzarne la capacità di riprodurre i fenomeni fisici che di intende studiare.

I risultati delle simulazioni in termini di livello idrometrico vengono estratti mediante il software Incidenze in corrispondenza delle 12 stazioni di rilevamento del livello presenti in laguna gestite dall'Ufficio Idrografico del Magistrato delle Acque di Venezia di cui si conoscono i dati misurati nei periodi fra il 2014 e il 2017 e dalle 3 stazioni di rilevamento del livello gestite dall'Istituto Superiore per la Portezione e la Ricerca Ambientale, ISPRA.

Nello specifico le 15 stazioni considerate sono: Aprilia (APR), Lignano (LIG), Bivio Lovato (BLV), Tre Canai (TCN), Fraida (FRA), Marano (MAR), Bivio Taglio (BTG), Faro Porto Buso (FPB), Porto Margherita (PMA), Sdrettolo (SDR), Bivio Morgo (BMO), Natissa (NAT), Grado (GRA), Grado Belvedere (GRB) e Grado Primo (GPR).

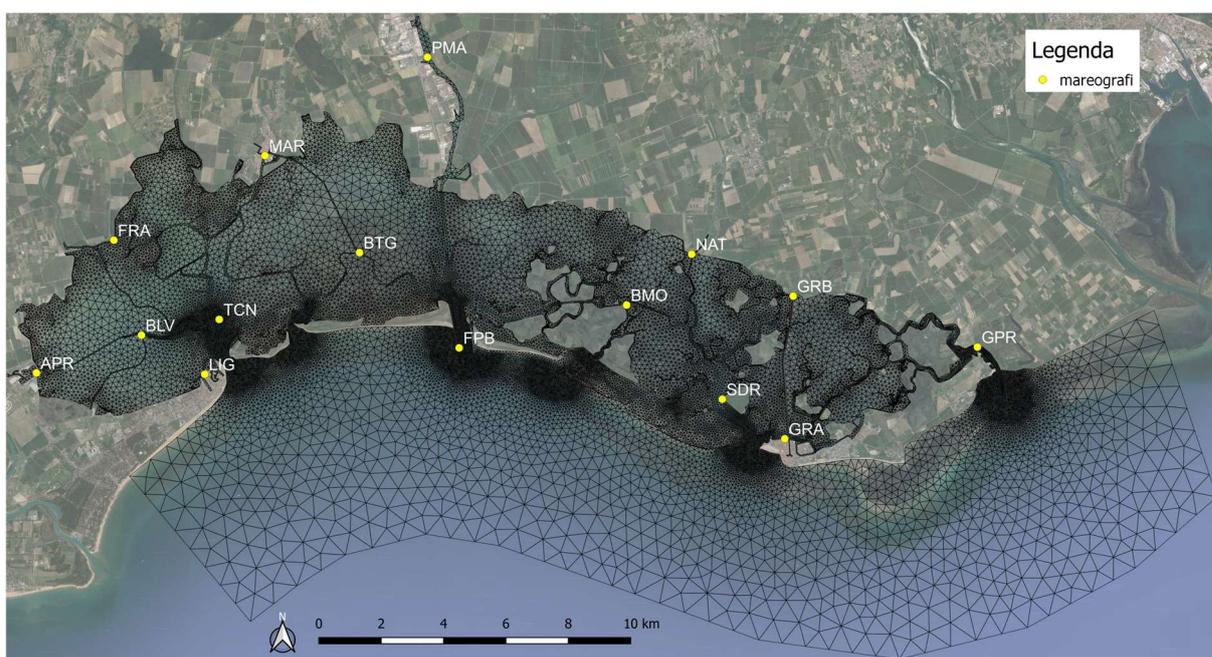


Figura 6-1: Immagina satellitare della laguna di Grado e Marnò con indicazione delle stazioni mareografiche su cui verrà fatto il confronto fra i livelli modellati e i livelli misurati.

I livelli misurati dalle stazioni gestite dall'ISPRA (Grado, Grado Belvedere e Marano) sono riferiti a Punta della Salute (VE) e sono stati, dunque, abbassati di 0.235 m perché fossero congruenti con le quote batimetriche del reticolo di calcolo che sono, invece, riferite allo zero IGM 1942.

Per le 12 stazioni gestite dall'Ufficio Idrografico di Venezia è stato, invece, necessario individuare lo zero idrometrico. Gli stessi sono stati quantificati mediante il confronto con i livelli misurati a Grado come fatto in precedenza per la stazione di Faro Porto Buso (vedi capitolo 5.2), per ogni periodo di simulazione utilizzato per la calibrazione, in quanto le registrazioni nelle diverse stazioni non sono continue negli anni 2014-2017 e non è possibile assumere che il riposizionamento dei mareografi sia stato eseguito rispetto lo stesso zero idrometrico.

Dopo questa procedura, le misure di livello nelle varie stazioni sono state modificate secondo le indicazioni riassunte in Tabella 6.1 per poter essere congruenti con i livelli modellati (riferiti allo zero IGM 1942).

Modifiche ai Livelli (m)	07-14.11.2014	04-11.06.2014	15-22.12.2015	02-09.02.2015	21-28.11.2015	11-18.03.2016	11-18.09.2015	23-30.04.2016	13-20.11.2014
APR	-	-	+0.00	-	+0.00	+0.00	-	+0.00	-
LIG	+0.04	+0.04	+0.00	-	+0.00	+0.00	+0.00	+0.00	+0.04
BLV	-	-0.03	-	-	-	-	-	-	-
TCN	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.02	-	-	-	-0.03
FRA	-	-	-0.02	-	-	-0.02	-	-0.02	-
MAR	-0.235	-0.235	-0.235	-	-	-	-	-	-
BTG	+0.10	-	-	+0.10	+0.10	-	+0.10	-	+0.10
FPB	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04	+0.04
PMA	-0.02	-0.02	-0.05	-0.05	-0.05	-	-0.05	-0.07	-0.02
SDR	+0.00	-	-0.05	-0.03	-0.05	-	-	-	-0.03
BMO	+0.00	+0.00	-	+0.00	-	+0.00	+0.00	+0.00	+0.00
NAT	+0.00	-	-	+0.00	+0.00	-	+0.00	-	+0.00
GRA	-0.235	-0.235	-0.235	-0.235	-0.235	-0.235	-0.235	-0.235	-0.235
GRB	-0.235	-0.235	-0.235	-	-	-	-	-	-
GPR	+0.00	-	-0.03	-	-	-0.03	-	-0.03	-

Tabella 6.1: Modifiche apportate alle misure nelle 12 stazioni interne alla laguna di Grado e Marano gestite dall'Ufficio Idrografico di Venezia.

Sistemati i dati si è proceduto dapprima ad effettuare una analisi di sensibilità, in modo da quantificare in che modo i parametri di Strickler e i parametri che definiscono il coefficiente di Drag del vento sulla superficie libera, per determinare lo sforzo di attrito dovuto al vento nella generazione e propagazione delle onde, possano influenzare i livelli modellati; successivamente, si è passati alla calibrazione vera e propria in modo da ottimizzare i risultati in termini di errore rispetto ai livelli misurati in loco dai mareografi.

## 6.1 Analisi di sensibilità sui coefficienti di Strickler

Per capire quanto la scelta dei coefficienti di scabrezza secondo Strickler influenzi i livelli modellati nelle simulazioni, si procede con l'analisi di sensibilità, cioè si fa variare gli stessi e si analizzano i risultati ottenuti. Si sono scelti due periodi di simulazione: il primo dal 07 al 14 Settembre 2014, caratterizzato da marea di sizigia e con la presenza di vento debole (<5 m/s), e il secondo dal 13 al 20 Novembre 2014, caratterizzato da marea di fine quadratura/ inizio sizigia e con la presenza di vento forte proveniente da Sud. Si sono, dunque, effettuate una serie di prove per entrambi i periodi di simulazione facendo variare un singolo valore del parametro di scabrezza scelto per riprodurre le diverse classi morfologiche individuate come indicato nella Tabella 6.2.

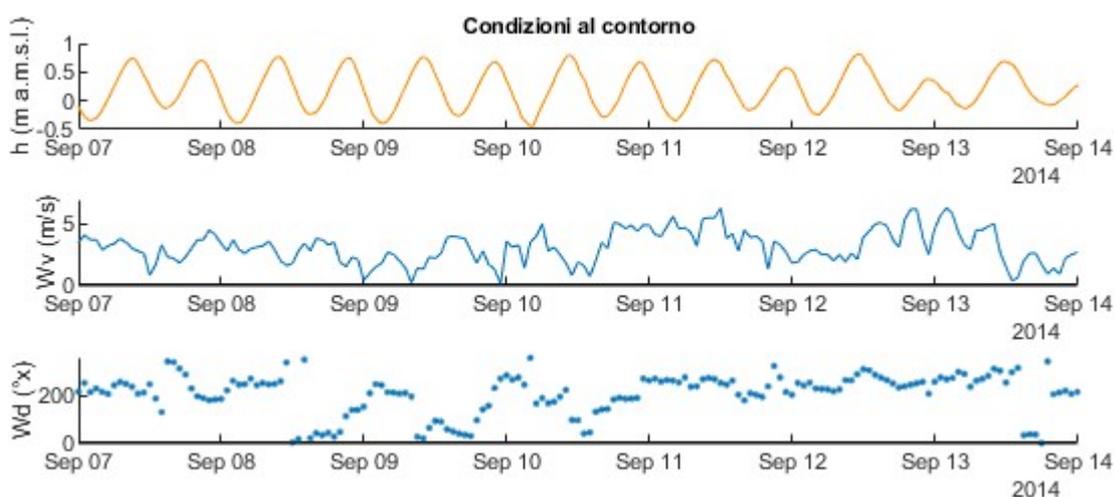
Prova	CLASSI $k_s$ ( $m^{1/3}/s$ )							
	barene	Bassifondi non vegetati	canali	bocche	mare	fiumi	dune	Bassifondi vegetati
0	15	35	40	40	40	35	15	20
1	25	35	40	40	40	35	15	20
2	5	35	40	40	40	35	15	20
3	15	45	40	40	40	35	15	20
4	15	25	40	40	40	35	15	20
5	15	35	50	50	40	35	15	20
6	15	35	30	30	40	35	15	20
7	15	35	40	40	50	35	15	20
8	15	35	40	40	30	35	15	20
9	15	35	40	40	40	35	15	30
10	15	35	40	40	40	35	15	10

Tabella 6.2: Prove con variazione dei Coefficienti di scabrezza del fondo.

Si fa notare che non sono state effettuate prove facendo variare il coefficiente di scabrezza dei fiumi perché gli stessi non sono stati presi in considerazione durante la schematizzazione del dominio, se non per quanto riguarda un tratto del fiume Corno dove troviamo la stazione di misura PMA; anche il coefficiente di scabrezza delle dune è stato mantenuto costante, in quanto le aree che rientrano in questa classe hanno un'estensione molto piccola e hanno quote altimetriche tali da non essere sommerse se non per eventi del tutto eccezionali.

### **Simulazione con vento debole: 07 -14 Settembre 2014**

In Figura 6-2 sono riportati i livelli misurati a Faro Porto Buso (FPB) usati come condizione al contorno dopo averli anticipati di 10 minuti per poterli imporre sul lato mare del reticolo di calcolo (vedi Capitolo 5.2), le velocità e le direzioni del vento nel periodo di simulazione dal 07 al 14 Settembre 2014.



*Figura 6-2: Condizioni al contorno relative alla simulazione dal 7 al 14 Settembre 2014.*

Le prime 2 prove consistono nella variazione del coefficiente di scabrezza delle barene; le stesse non comportano variazioni di livelli significative in nessuna delle stazioni rappresentate in Figura 6-1. La massima differenza in modulo fra i livelli nelle Prove 1 e 2 e i livelli della Prova 0 non superano, infatti, i 5 mm.

Questo è legato alla presenza di barene poco estese all'interno della laguna; le barene con maggiori dimensioni si trovano lungo il profilo interno della laguna di Marano, mentre nella laguna di Grado sono di ridotte dimensioni e frammentate lungo i canali secondari (vedi Figura 2-6).

Un'ulteriore motivazione è legata al fatto che non si dispone di livelli misurati da stazioni poste in corrispondenza delle barene ma solo ad una certa distanza delle stesse, il che rende difficile poter apprezzare dai dati gli effetti legati ad una variazione di scabrezza associata alle aree barenali.

Le Prove 3 e 4 riguardano la variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati. Questi occupano aree molto estese della laguna di Marano, mentre nella laguna di Grado si trovano principalmente bassifondi vegetati. Per questo motivo, l'influenza del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati sui livelli interni alla laguna viene mostrata in corrispondenza della stazione di Aprilia (APR), che si trova ad estremo ovest all'interno della laguna di Marano (vedi Figura 6-1), nel giorno 09 Settembre 2014.

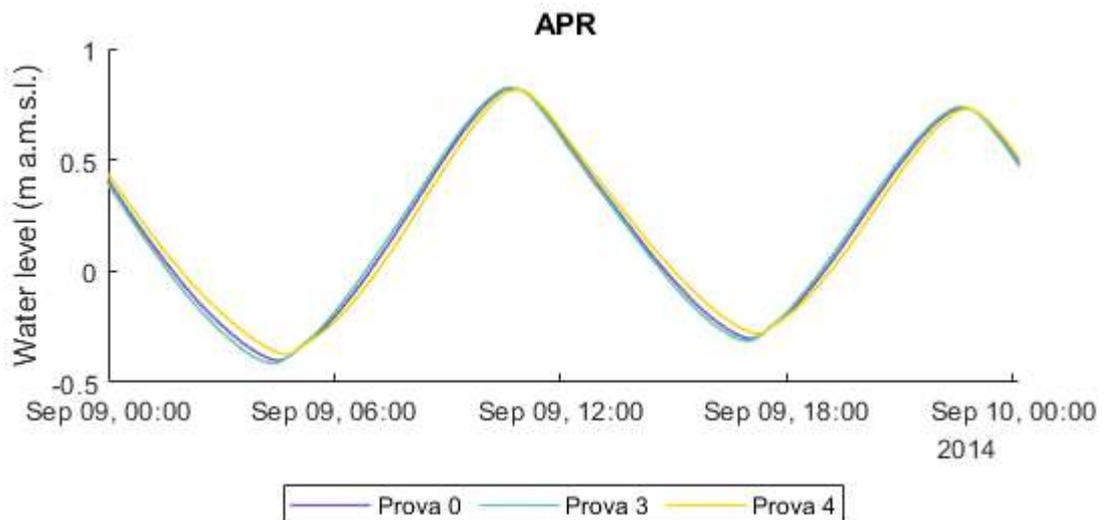


Figura 6-3: Confronto fra Prova 0, Prova 3 e Prova 4 (variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati).

Si nota dalla Figura 6-3, che all'aumentare del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati (Prova 3), l'aumento dei livelli in fase di marea crescente e la riduzione dei livelli in fase di marea decrescente è più rapida. Inoltre, il picco di alta marea e il cavo di bassa marea sono in modulo più elevati e anticipati nella Prova 3 rispetto alla Prova 0.

Questo avviene a causa del minor sforzo di attrito al fondo che l'acqua incontra nell'avanzare in laguna nella fase di flusso e nell'arretrare verso il mare nella fase di riflusso, che di conseguenza comporta una minor dissipazione dell'energia.

Viceversa, accade nella Prova 4, dove il coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati viene ridotto. In questo caso l'aumento e la riduzione dei livelli rispettivamente nella fase crescente e decrescente di marea è più lenta; i picchi di alta marea e i cavi di bassa marea sono in modulo minori e ritardati nel tempo rispetto a quelli modellati nella Prova 0.

Questo avviene a causa del maggior sforzo di attrito al fondo che l'acqua incontra nell'avanzare in laguna nella fase di flusso e nell'arretrare verso il mare nella fase di riflusso, che di conseguenza comporta una maggiore dissipazione dell'energia.

Le massime differenze in modulo fra i livelli modellati nella Prova 0 rispetto alle Prove 3 e 4 sono rispettivamente di 3 cm per l'aumento del coefficiente di scabrezza e di 5 cm per la riduzione dello stesso.

Nelle Prove 5 e 6 si applica una variazione del coefficiente di scabrezza dei canali e delle bocche lagunari. I canali, principali e secondari, si sviluppano su tutta la laguna e, dunque, l'influenza della variazione del coefficiente di scabrezza degli stessi riguarda i livelli modellati in corrispondenza di tutte le stazioni all'interno della laguna, fatto salvo per la stazione di Faro Porto Buso che trovandosi in prossimità del mare, risente in modo trascurabile delle diverse scabrezze associate ai canali e alle bocche.

Per confrontare le Prove 5 e 6 rispetto alla Prova 0 vengono analizzati i livelli modellati in corrispondenza della stazione di Marano (MAR) (vedi Figura 6-1) nel giorno 09 Settembre 2014.

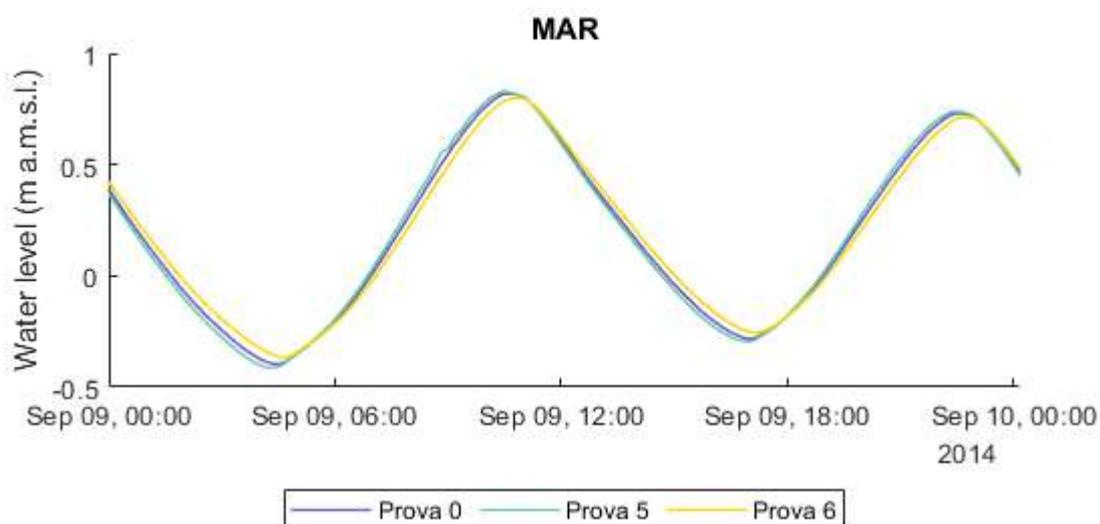


Figura 6-4: Confronto fra Prova 0, Prova 5 e Prova 6 (variazione del coefficiente di scabrezza dei canali e delle bocche).

Si nota dalla Figura 6-4 che le variazioni dell'andamento dei livelli nelle 3 prove sono congruenti con quanto descritto precedentemente per la variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati. In questo caso, le massime differenze in modulo fra i livelli modellati nella Prova 0 rispetto alle Prove 5 e 6 sono rispettivamente di 5 cm circa per l'aumento del coefficiente di scabrezza dei canali e delle bocche e di 7 cm per la loro riduzione. Nelle Prove 7 e 8 sono state applicate delle variazioni del coefficiente di scabrezza associato alla porzione di mare antistante alla laguna e compresa nel reticolo di calcolo. Dall'analisi dei livelli modellati da queste due prove rispetto alla Prova 0 si nota che il coefficiente di scabrezza del mare non influenza significativamente i livelli modellati all'interno della laguna, in quanto le variazioni fra i livelli nelle 3 prove confrontate non sono al massimo di 1/2 mm.

Le Prove 9 e 10 riguardano, invece, la variazione del coefficiente di scabrezza associato ai bassifondi vegetati che si occupano gran parte della laguna di Grado. Per questo motivo, la loro influenza sui livelli interni alla laguna viene mostrata in corrispondenza della stazione di Natissa (NAT), che si trova a nord-est all'interno della laguna di Grado (vedi Figura 6-1), nel giorno 09 Settembre 2014.

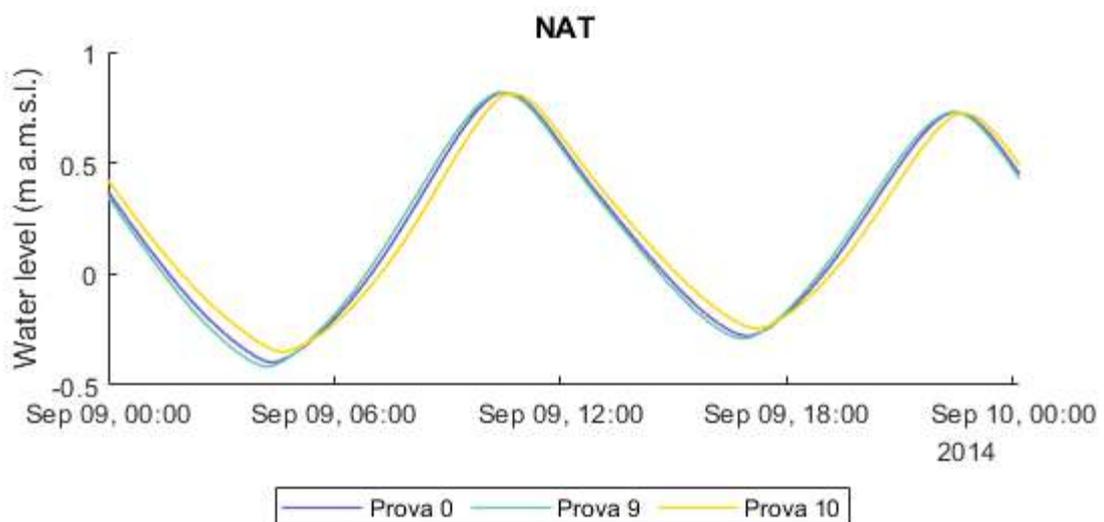


Figura 6-5: Confronto fra Prova 0, Prova 9 e Prova 10 (variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi vegetati).

Si nota dalla Figura 6-5, che le variazioni dell'andamento dei livelli nelle 3 prove sono, anche in questo caso, congruenti con quanto descritto precedentemente per la variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati.

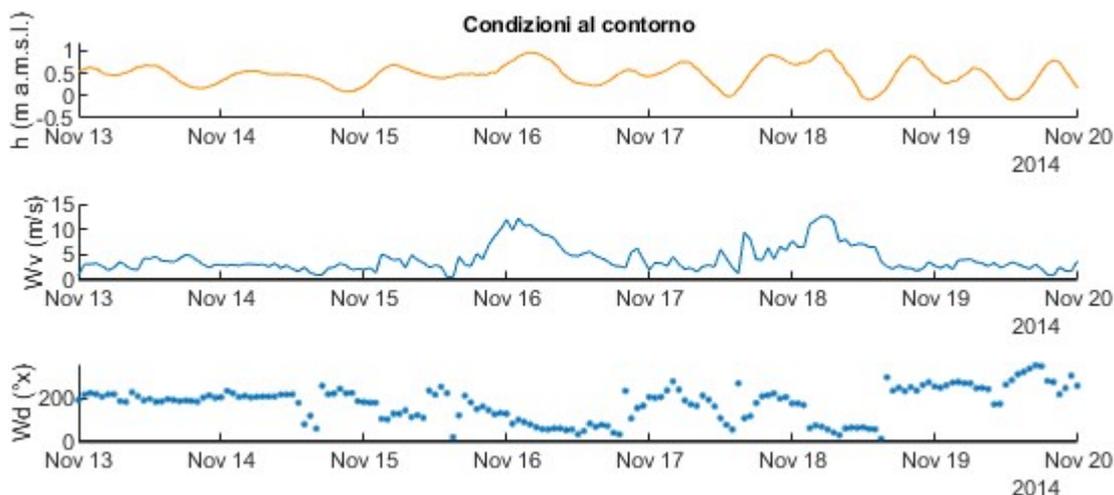
Le massime differenze in modulo fra i livelli modellati nella Prova 0 rispetto alle Prove 9 sono rispettivamente di 5 cm per l'aumento del coefficiente di scabrezza dei bassifondi vegetati e di 10 cm per la riduzione dello stesso.

In tutte le prove effettuate si evidenzia che la riduzione dei coefficienti di scabrezza comporta maggiori variazioni sui livelli modellati rispetto all'aumento dei coefficienti di scabrezza stessi.

Allo stesso modo, in seguito alla riduzione del coefficiente di scabrezza di una delle classi definite nella Tabella 6.2, il ritardo temporale (fino a 30 min) associato, per esempio, al picco di marea è maggiore rispetto all'anticipo (fino a 10 min) causato da un aumento dello stesso coefficiente di scabrezza preso in considerazione.

### **Simulazione con forte: 13-20 Novembre 2014**

Le stesse 10 prove elencate nella Tabella 6.2 sono state eseguite anche per il periodo di simulazione che va dal 13 al 20 Novembre 2014. In Figura 6-6 sono riportati i livelli misurati a Faro Porto Buso (FPB) usati come condizione al contorno, la velocità e la direzione del vento.



*Figura 6-6: Condizioni al contorno relative alla simulazione dal 13 al 20 Novembre 2014.*

Di seguito vengono mostrati i confronti fra i livelli modellati dal 17 Novembre 2014 alle ore 18:00 al 18 Novembre 2014 alle ore 18:00, periodo caratterizzato da vento da sud con velocità fino a 12.60 m/s: per Prove 3 e 4 in corrispondenza della stazione di Aprilia (APR) (vedi Figura 6-7), per le Prove 5 e 6 in corrispondenza della stazione di Marano (MAR) (vedi Figura 6-8) e per le Prove 9 e 10 in corrispondenza della stazione di Natissa (NAT) (vedi Figura 6-9).

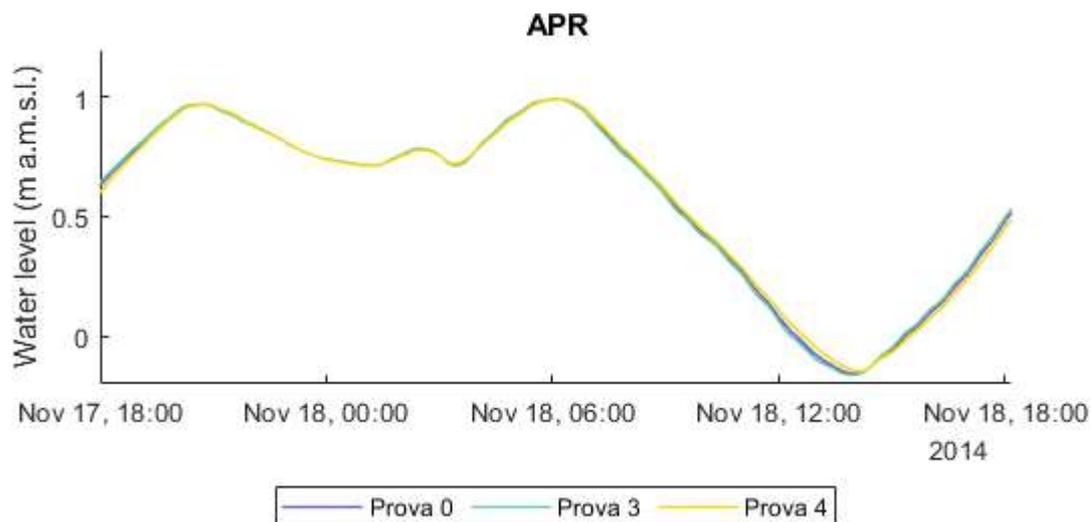


Figura 6-7: Confronto fra Prova 0, Prova 3 e Prova 4 (variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi non vegetati).

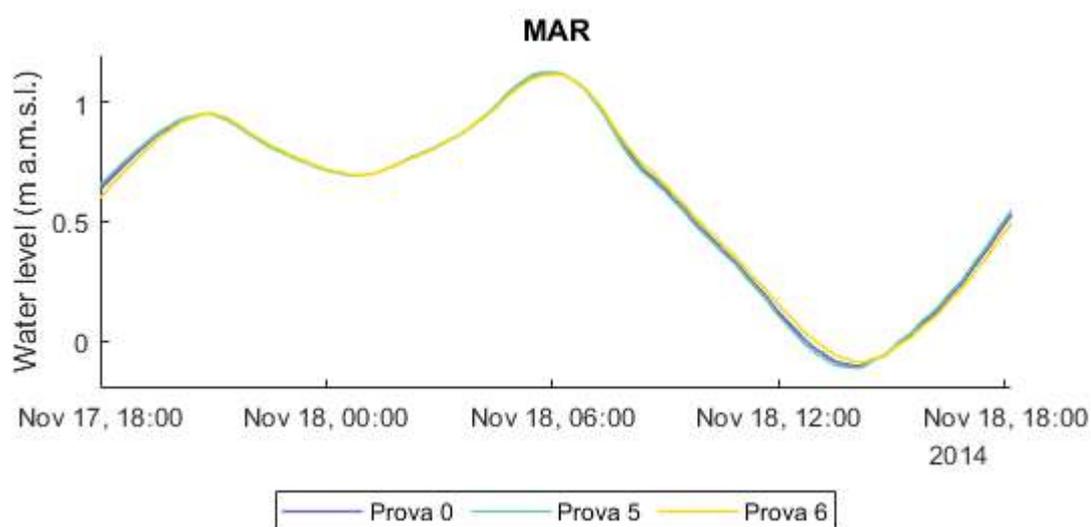


Figura 6-8: Confronto fra Prova 0, Prova 5 e Prova 6 (variazione del coefficiente di scabrezza dei canali e delle bocche).

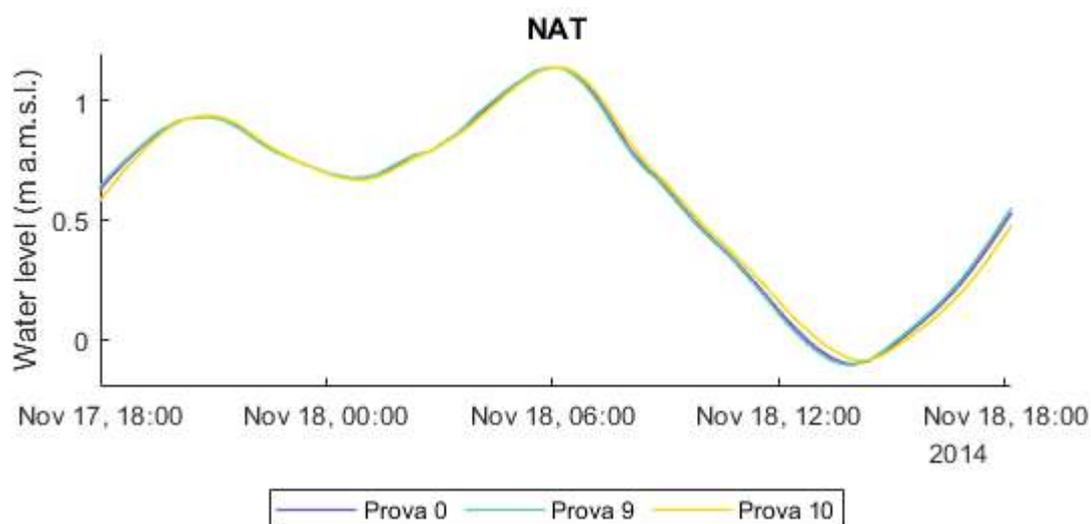


Figura 6-9: Confronto fra Prova 0, Prova 9 e Prova 10 (variazione del coefficiente di scabrezza dei bassifondi vegetati).

Le considerazioni fatte precedentemente per la simulazione dal 07 al 14 Settembre 2014 rimangono valide anche in queste condizioni di vento particolarmente intenso.

Si evidenzia però, che nelle ore in cui il vento spira con velocità elevate la differenza fra i livelli nelle diverse simulazioni diminuisce rispetto a quella che si può calcolare nelle ore in cui il vento ha velocità inferiori ai 5 m/s. Ciò suggerisce come l'idrodinamica interna alla laguna sia influenzata in modo non trascurabile dal setup prodotto da condizioni di vento intenso.

## 6.2 Analisi di sensibilità sui parametri del coefficiente di Drag

Per capire quanto la scelta dei parametri  $C_{d0}$  e  $e_w$ , che caratterizzano il coefficiente di Drag per il calcolo dello sforzo di attrito dovuto al vento sulla superficie libera (vedi Capitolo 3), influenzino i livelli modellati nelle simulazioni, si procede con un'ulteriore analisi di sensibilità relativa a questi due parametri, cioè si fa variare gli stessi e si analizzano i risultati ottenuti.

Si è scelto come periodo di simulazione quello dal 02 al 09 Febbraio 2015, dove la marea è di sizigia e vi è la presenza di vento forte proveniente da NE (Bora). In Figura 6-10 sono riportati i livelli misurati a Faro Porto Buso (FPB) usati come condizione al contorno, la velocità e la direzione del vento nel periodo di simulazione.

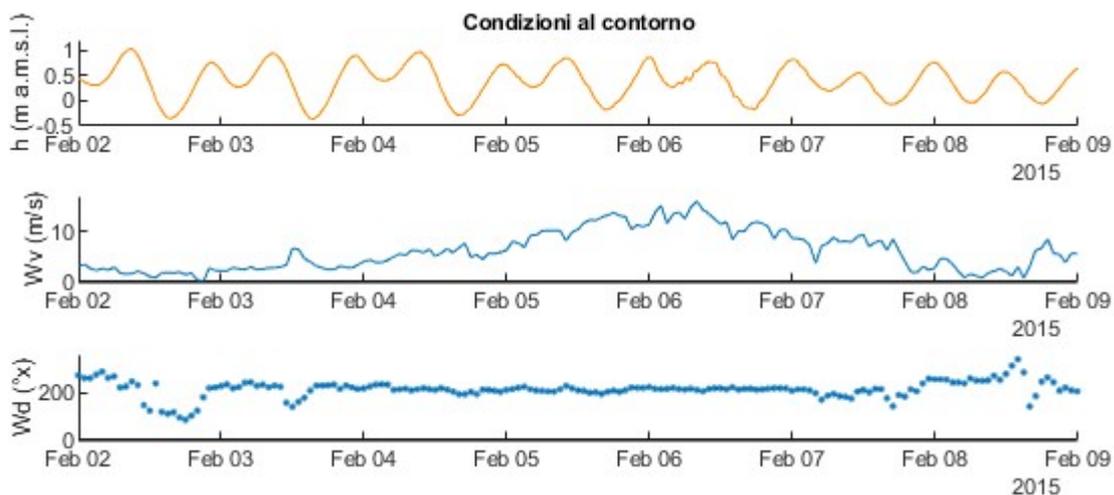


Figura 6-10: Condizioni al contorno relative alla simulazione dal 02 al 09 Febbraio 2015.

Si sono, dunque, effettuate una serie di prove facendo variare un singolo parametro (secondo la Tabella 6.3), all'interno dei seguenti range di valori:  $C_{d0} = 0.49 \div 0.61$  e  $e_w = 0.063 \div 0.12$ , già individuati come intervalli ottimali a seguito di analisi svolte per la vicina Laguna di Venezia.

Prova	1	2	3	4
$C_{d0}$	0.49	0.61	0.61	0.49
$e_w$	0.063	0.063	0.12	0.12

Tabella 6.3 Prove con variazione dei parametri che compongono il coefficiente di Drag.

Nella Figura 6-11 si mostrano i risultati per la stazione di Aprilia (APR) con un ingrandimento tra il 05 e l'08 Febbraio 2015 nel periodo di simulazione in esame:

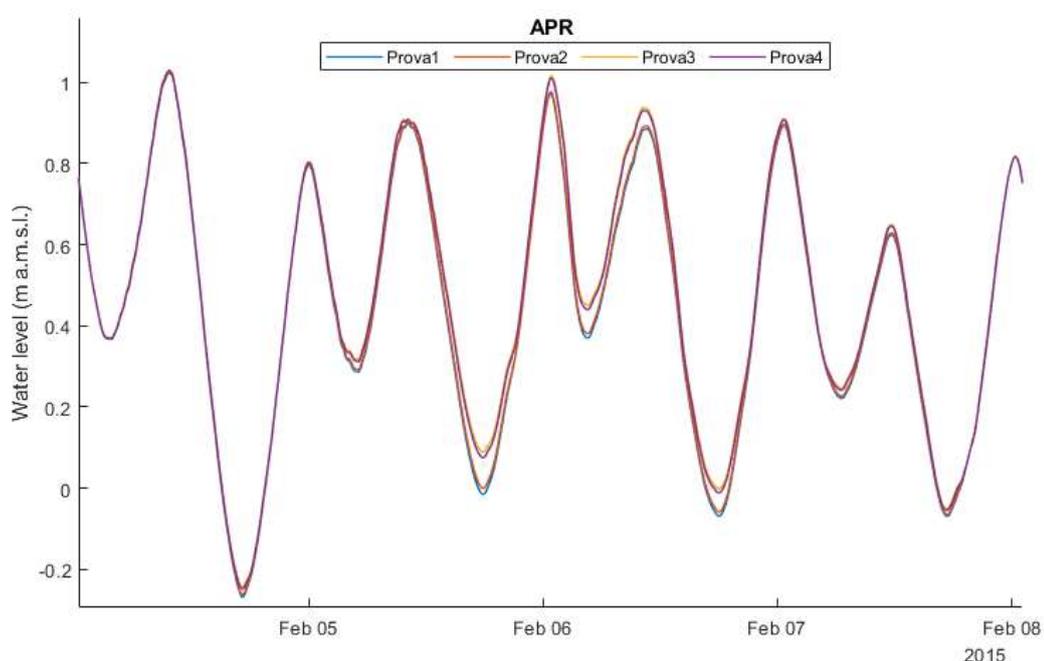


Figura 6-11: Livelli modellati in corrispondenza della stazione di Aprilia nelle diverse prove elencate nella Tabella 6.3.

Si nota come all'aumentare di entrambi i parametri, il livello modellato aumenti a causa del maggiore coefficiente di Drag calcolato con la formula 3.1.6 e di conseguenza del maggiore sforzo di attrito sulla superficie dell'acqua dovuta al vento calcolato con la 3.1.5, in quanto un maggiore valore del coefficiente di Drag comporta una maggiore capacità del vento di trasferire la sua energia alla massa liquida su cui spira.

Come si può notare dai grafici, la differenza fra i livelli modellati nelle diverse prove si esalta nei giorni e nelle ore in cui il vento ha una velocità elevata (vedi eq. 3.1.5), mentre dove il vento diventa debole (velocità < 5 m/s circa) le prove portano agli stessi risultati.

### 6.3 Calibrazione

Dopo aver investigato la sensibilità dei risultati delle simulazioni numeriche a modifiche dei parametri del modello (coefficiente di scabrezza e coefficiente di Drag), si procede ora alla calibrazione dei parametri stessi in modo da ottimizzare i risultati in termini di errore rispetto ai livelli misurati in loco nelle stazioni mareografiche riportate in Figura 6-1.

Nella fase di calibrazione si sono scelti diversi periodi di simulazione al fine di avere per ogni stazione almeno un confronto con i dati misurati, non essendo le registrazioni sempre disponibili per l'intero periodo dal 2014 al 2017.

Si è dunque scelto di effettuare le seguenti simulazioni:

- Dal 7 al 14 Settembre 2014, dove la marea è di sizigia con la presenza di vento debole ( $< 5$  m/s), (C.C. nella Figura 6-12 e livelli modellati nella Figura 6-13);
- Dal 4 al 11 Giugno 2014, dove la marea è di quadratura con la presenza di vento debole ( $< 5$  m/s), (C.C. nella Figura 6-14 e livelli modellati nella Figura 6-15);
- Dal 15 al 22 Dicembre 2015, dove la marea è di quadratura con la presenza di vento debole ( $< 5$  m/s), (C.C. nella Figura 6-16 e livelli modellati nella Figura 6-17);
- Dal 2 al 9 Febbraio 2015, dove la marea è di sizigia con la presenza di vento forte proveniente da NE (Bora), (C.C. nella Figura 6-18 e livelli modellati nella Figura 6-19);
- Dal 21 al 28 Novembre 2015, dove la marea è di sizigia con la presenza di vento forte proveniente da NE (Bora), (C.C. nella Figura 6-20 e livelli modellati nella Figura 6-21);
- Dal 11 al 18 Marzo 2016, dove la marea è di quadratura con la presenza di vento forte proveniente da NE (Bora), (C.C. nella Figura 6-22 e livelli modellati nella Figura 6-23);
- Dal 11 al 18 Settembre 2015, dove la marea è di sizigia con la presenza di vento forte proveniente da SE (Scirocco), (C.C. nella Figura 6-24 e livelli modellati nella Figura 6-25);
- Dal 23 al 30 Aprile 2016, dove la marea è di fine sizigia e inizio quadratura con la presenza di vento forte proveniente da SE (Scirocco), (C.C. nella Figura 6-26 e livelli modellati nella Figura 6-27);
- Dal 13 al 20 Novembre 2014, dove la marea è di fine quadratura e inizio sizigia con la presenza di vento forte proveniente da S (Libeccio/Ostro), (C.C. nella Figura 6-28 e livelli modellati nella Figura 6-29);

Dopo una serie di prove con diversi coefficienti di scabrezza secondo Strickler e diversi valori dei parametri che caratterizzano il coefficiente di Drag, il set di coefficienti di scabrezza che ottimizzano i risultati sono quelli riportati nella Tabella 6.4 sottostante:

CLASSE	$k_s (m^{3/2}/s)$
(1) barene	15
(2) bassifondi non vegetati	35
(3) canali	40
(4) bocche tidali	40
(5) mare aperto	40
(6) fiumi	35
(7) dune	15
(8) bassifondi vegetati	20

Tabella 6.4: Valori dei coefficienti di scabrezza scelti a seguito della calibrazione.

Mentre, per quanto riguarda lo sforzo d'attrito dovuto al vento, si sono scelti i seguenti parametri:  $C_{d0} = 0.61$  e  $e_w = 0.12$ .

Per ogni periodo di simulazione vengono allegati, nelle pagine seguenti, le condizioni al contorno di livello applicate sui nodi in mare aperto (vedi Figura 5-2) e il confronto fra i livelli modellati e i misurati nelle 15 stazioni presenti all'interno della laguna (vedi Figura 6-1).

Per ogni prova vengono, inoltre, calcolati gli errori commessi dal modello nella stima dei livelli rispetto ai dati realmente registrati dai mareografi mediante il calcolo dei tre parametri statistici già descritti in precedenza (vedi paragrafo 3.3): Mean Absolute Error (Tabella 6.5), Root Mean Square Error (Tabella 6.6) e Nash-Sutcliffe model Efficiency coefficient (Tabella 6.7).

Questi permettono di definire la bontà dei risultati ottenuti e di conseguenza di stimare la capacità del modello di descrivere il comportamento idrodinamico della laguna consentendo, altresì, di evidenziare eventuali criticità.

**Simulazione con vento debole: 07-14 Settembre 2014**

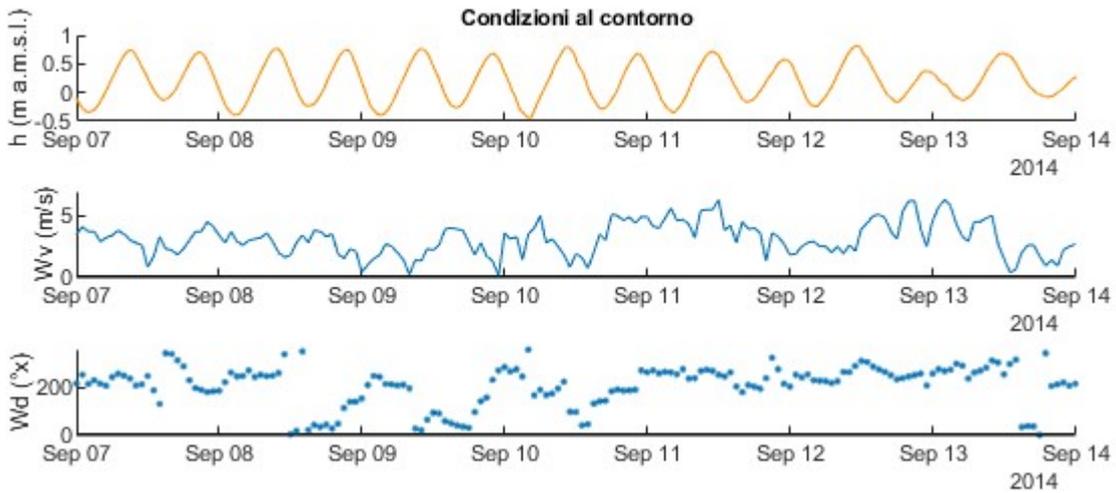


Figura 6-12: Condizioni al contorno relative alla simulazione 07-14 Settembre 2014.

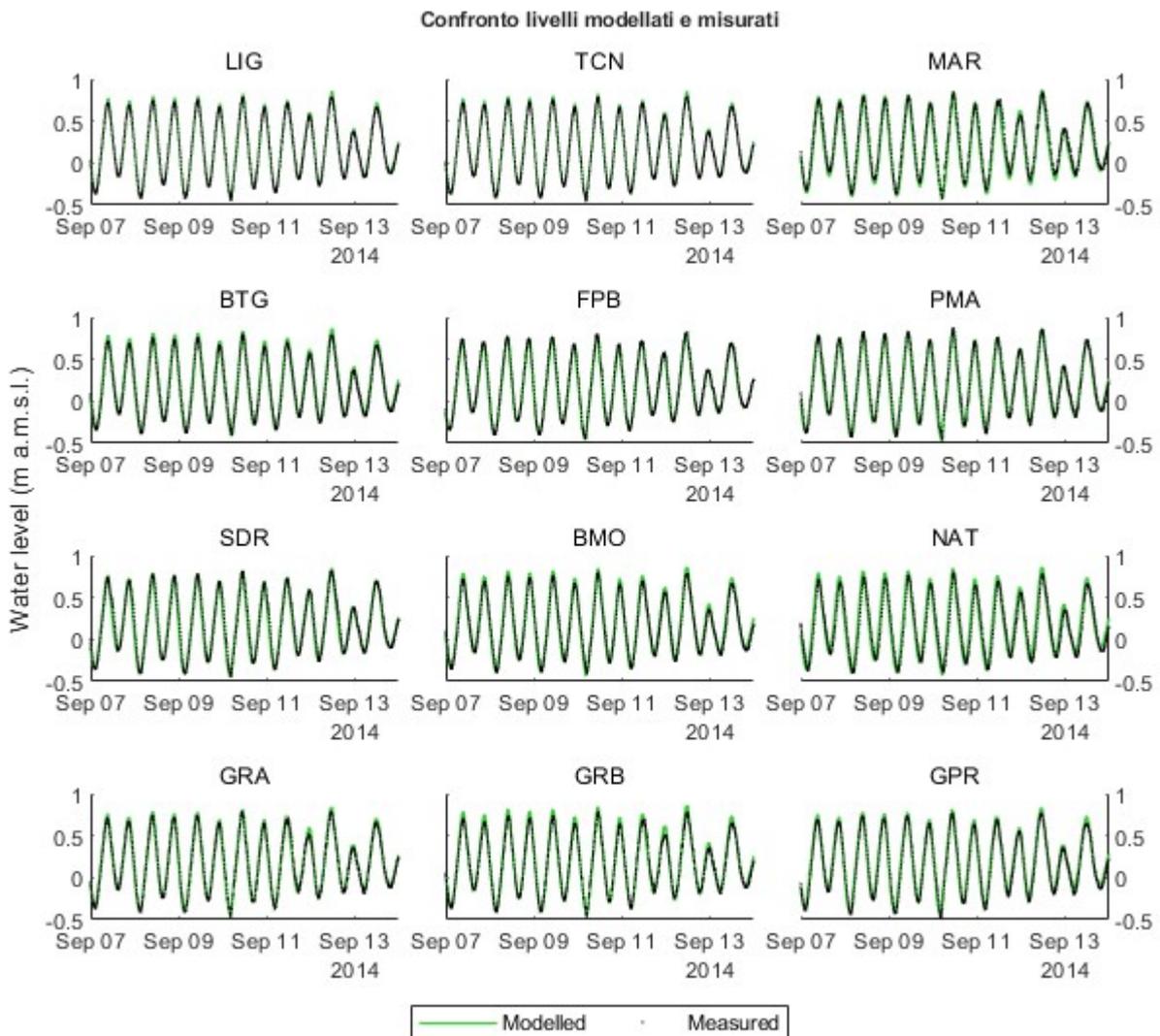


Figura 6-13: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 07-14 Settembre 2014.

### Simulazione con vento debole: 04-11 Giugno 2014

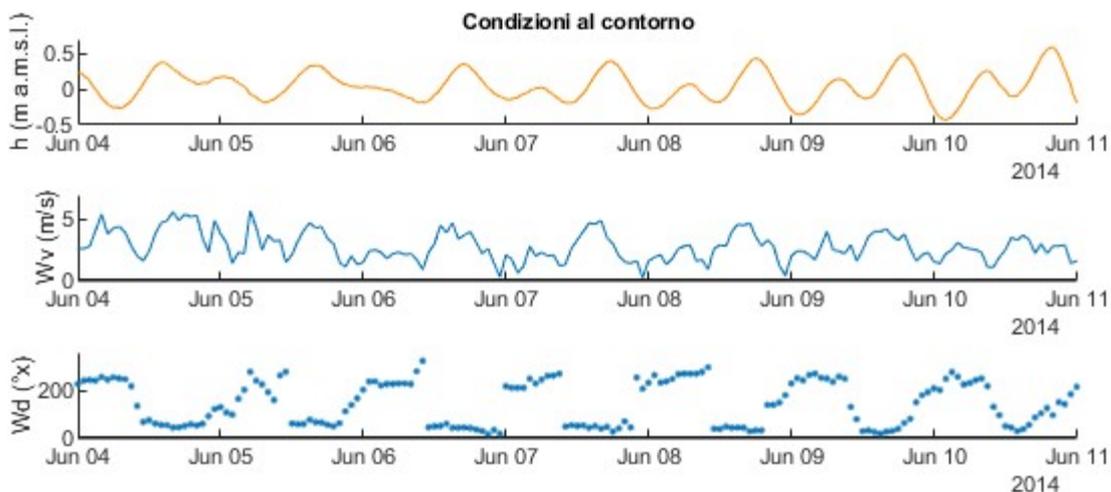


Figura 6-14: Condizioni al contorno relative alla simulazione 04-11 Giugno 2014.

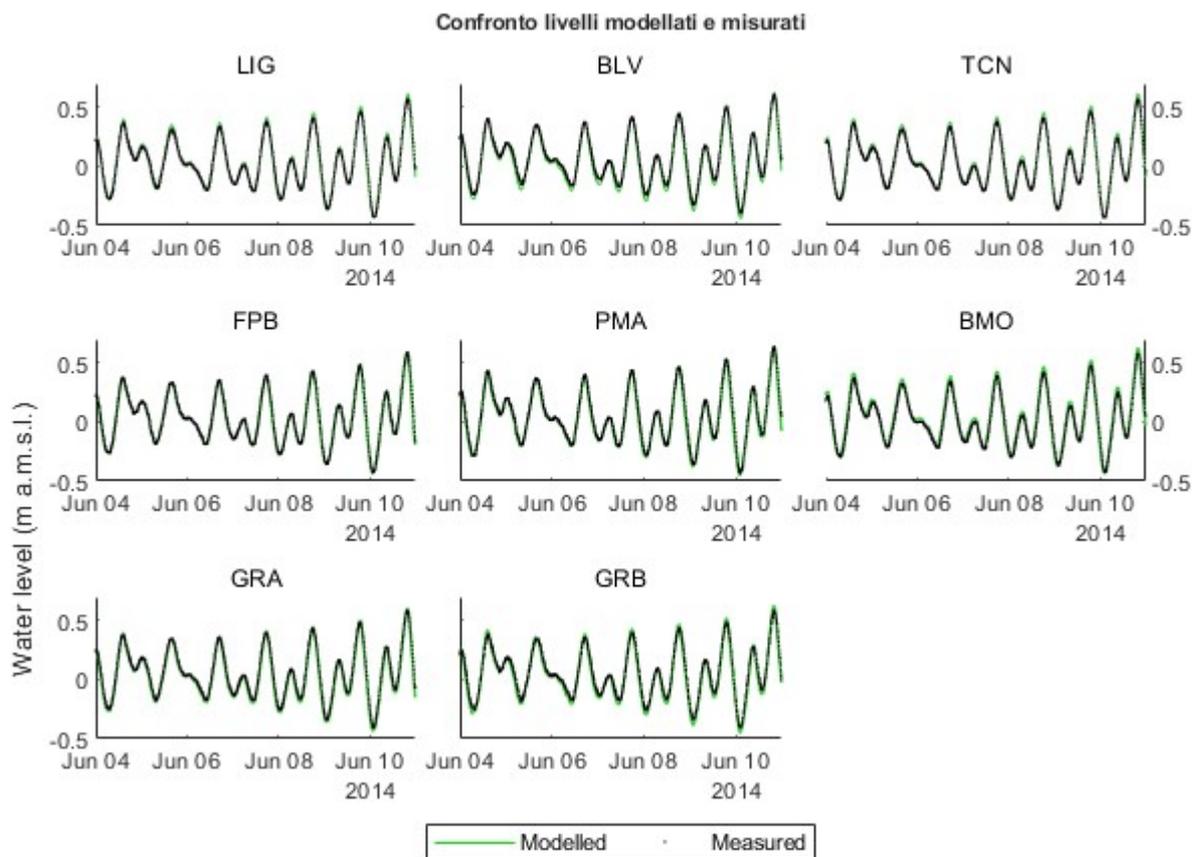


Figura 6-15: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 04-11 Giugno 2014.

**Simulazione con vento debole: 15-22 Dicembre 2015**

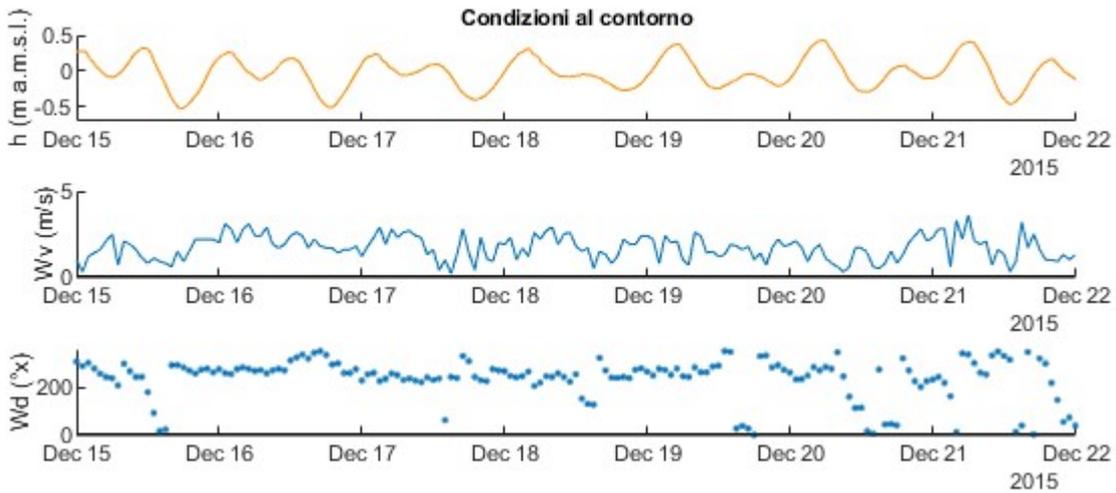


Figura 6-16: Condizioni al contorno relative alla simulazione 15-22 Dicembre 2015.

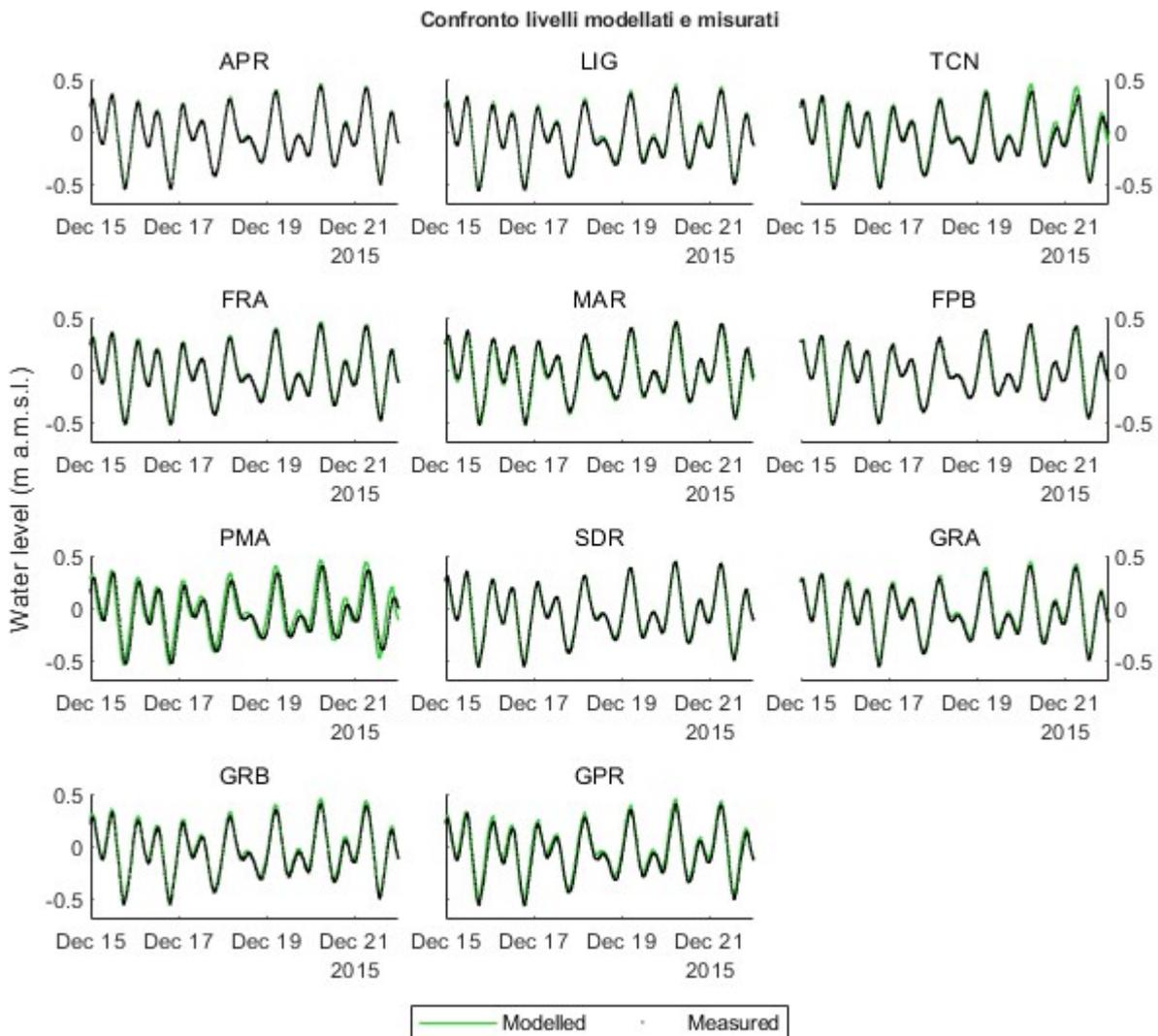


Figura 6-17: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 15-22 Dicembre 2015.

## Simulazione con forte da NE (Bora): 02-09 Febbraio 2015

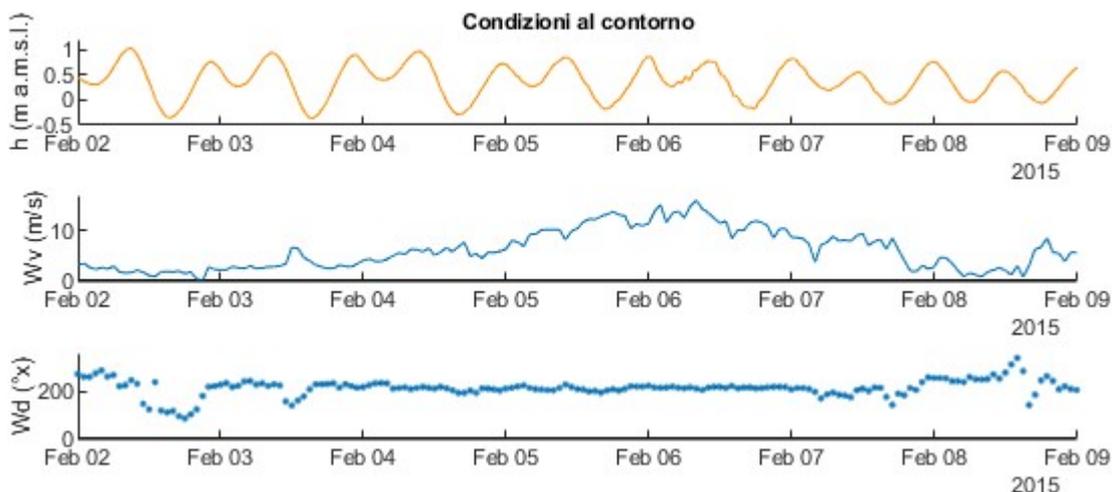


Figura 6-18: Condizioni al contorno relative alla simulazione 02-09 Febbraio 2015.

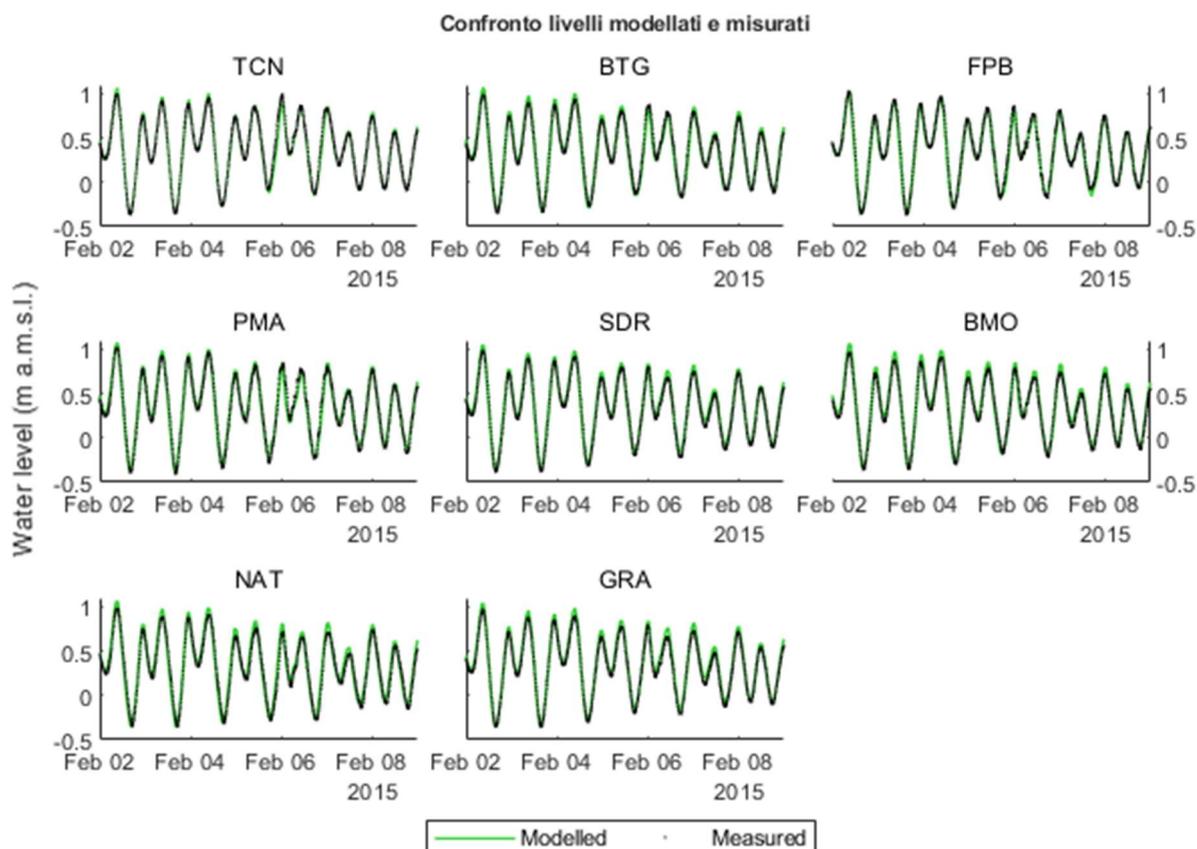


Figura 6-19: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 02-09 Febbraio 2015.

**Simulazione con forte da NE (Bora): 21-28 Novembre 2015**

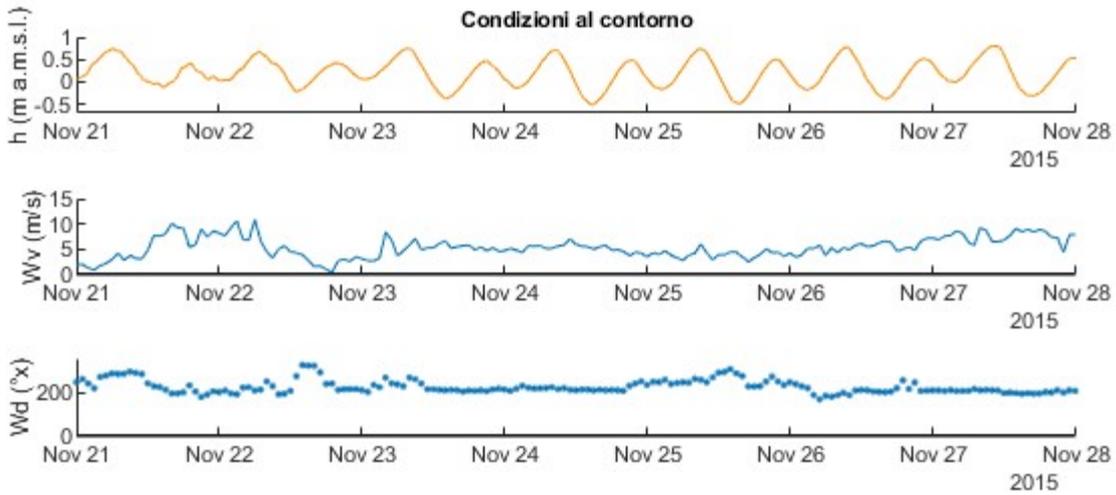


Figura 6-20: Condizioni al contorno relative alla simulazione 21-28 Novembre 2015.

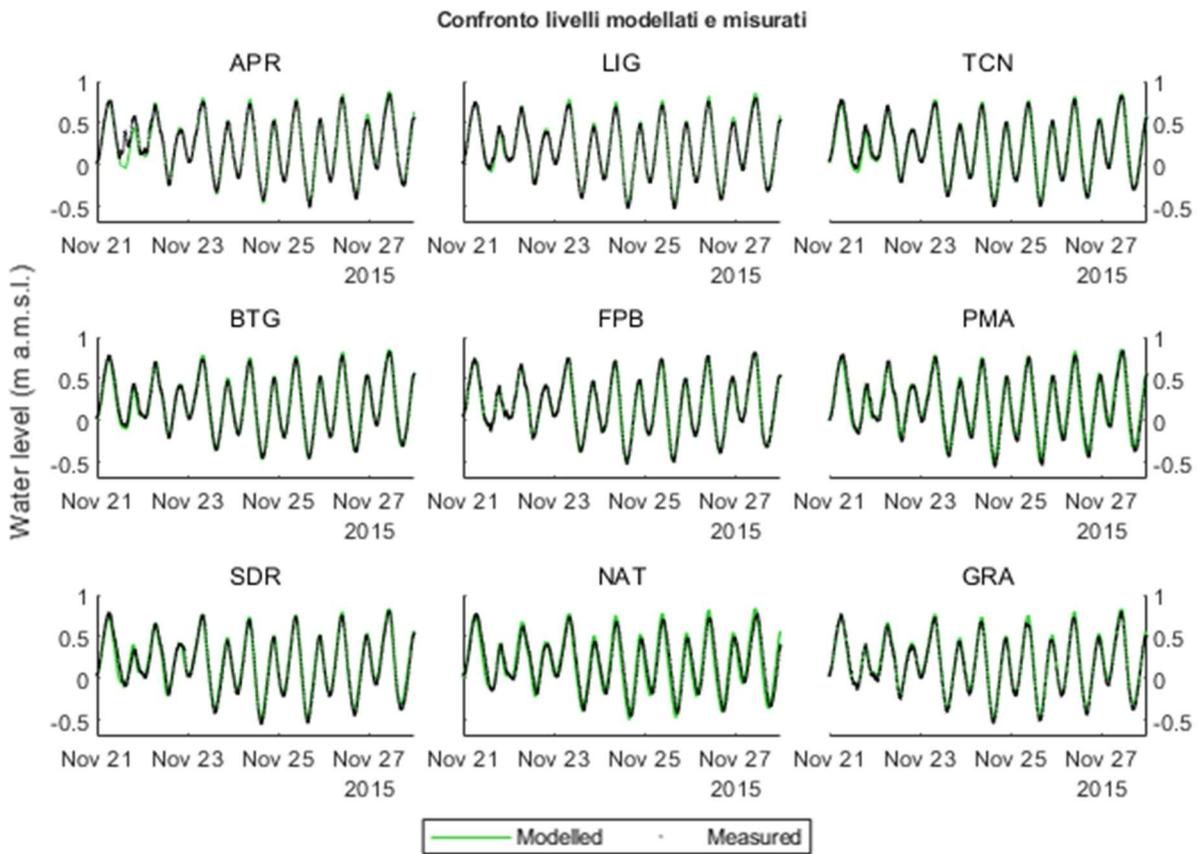


Figura 6-21: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 21-28 Novembre 2015.

### Simulazione con forte da NE (Bora): 11-18 Marzo 2016

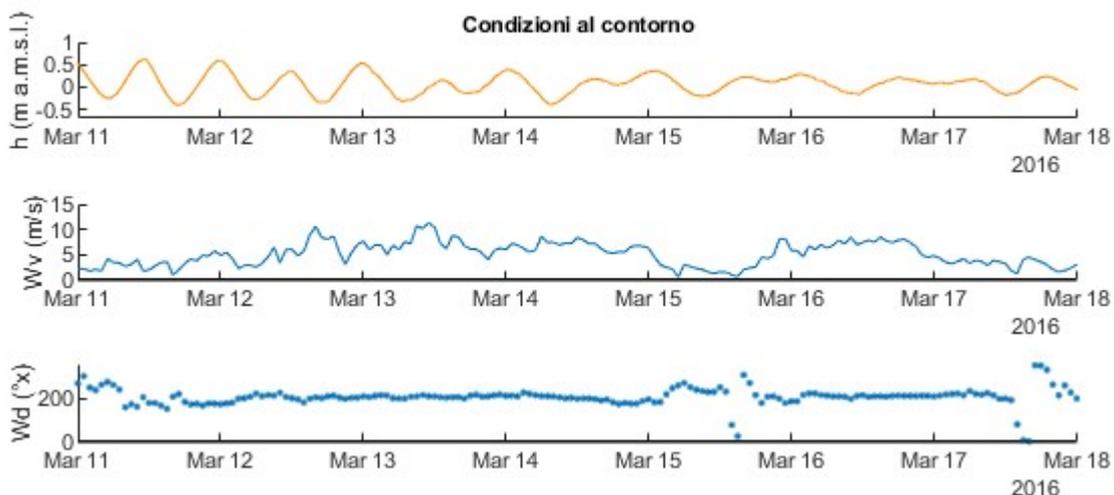


Figura 6-22: Condizioni al contorno relative alla simulazione 11-18 Marzo 2016.

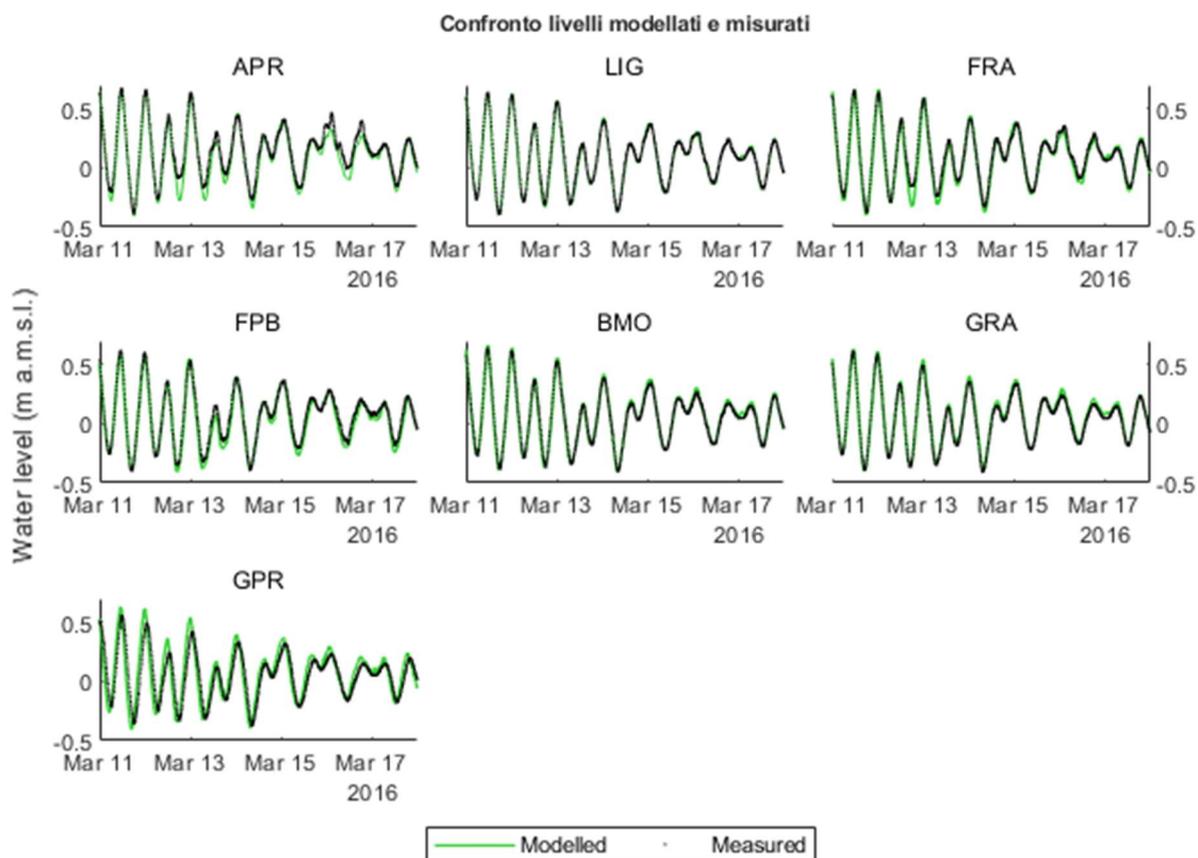


Figura 6-23: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 11-18 Marzo 2016.

**Simulazione con forte da SE (Scirocco) : 11-18 Settembre 2015**

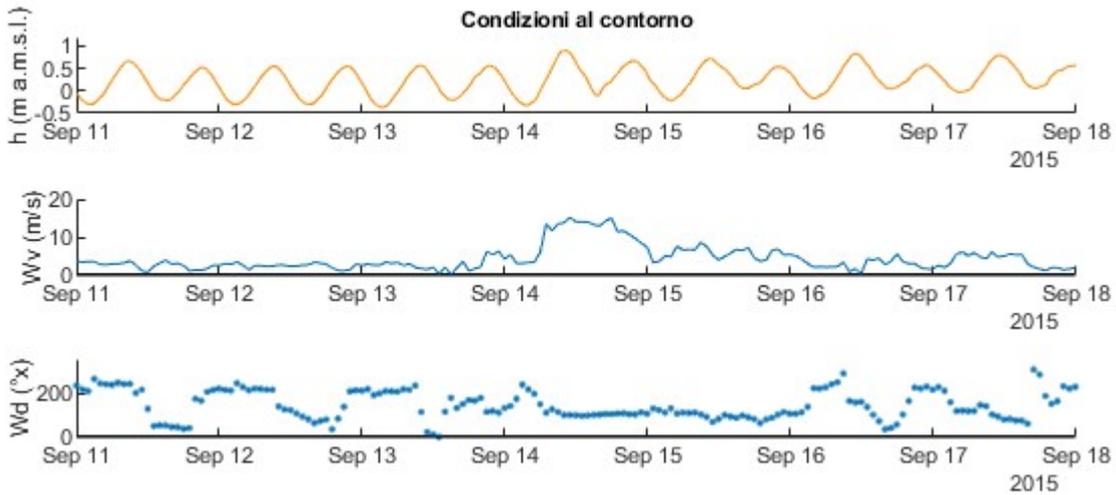


Figura 6-24: Condizioni al contorno relative alla simulazione 11-18 Settembre 2015.

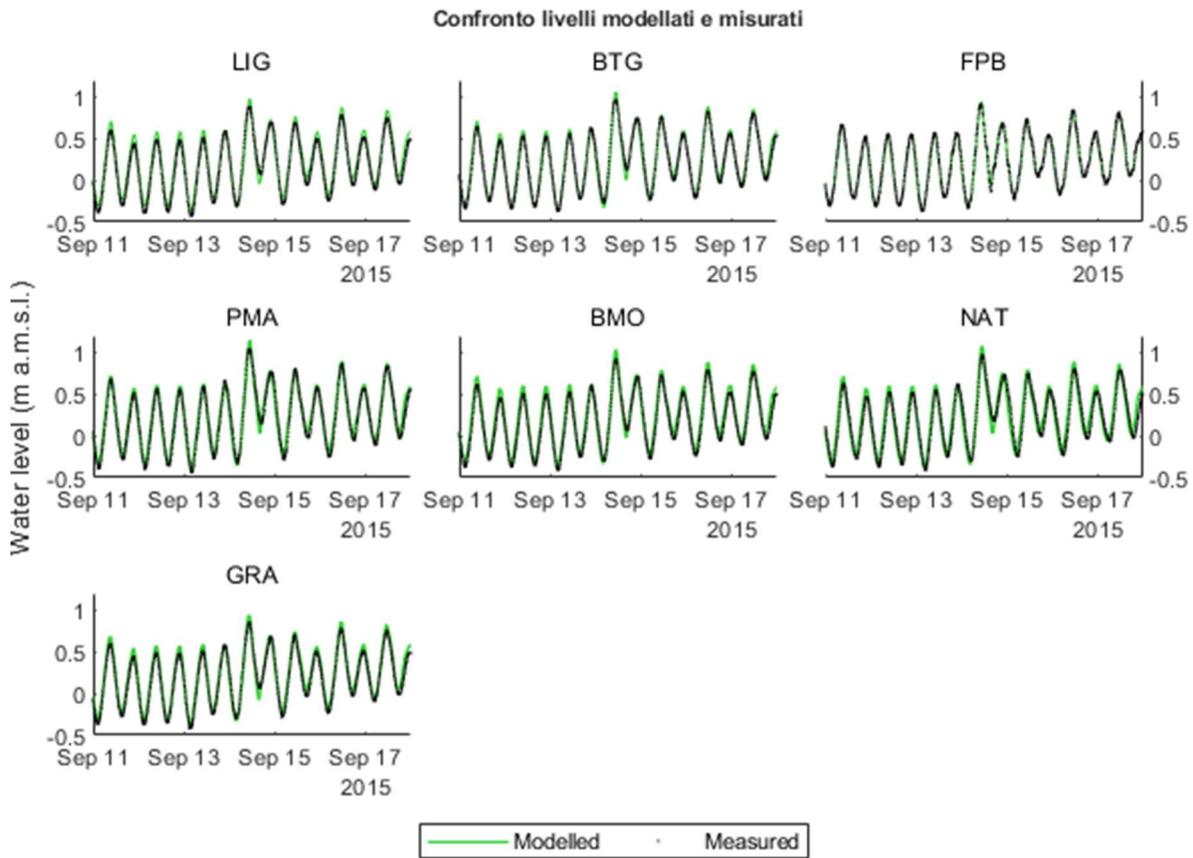


Figura 6-25: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 11-18 Settembre 2015.

**Simulazione con forte da SE (Scirocco): 23-30 Aprile 2016**

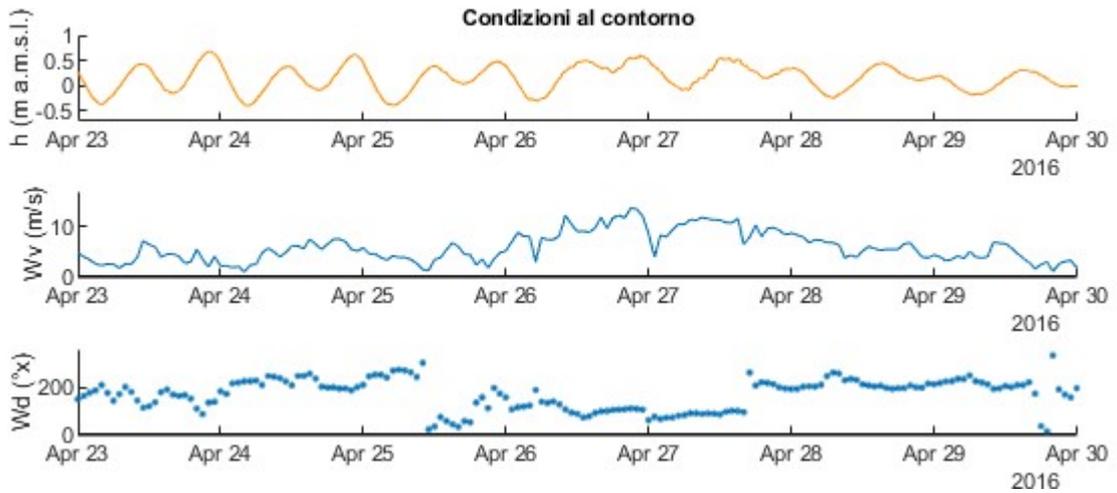


Figura 6-26: Condizioni al contorno relative alla simulazione 23-30 Aprile 2016.

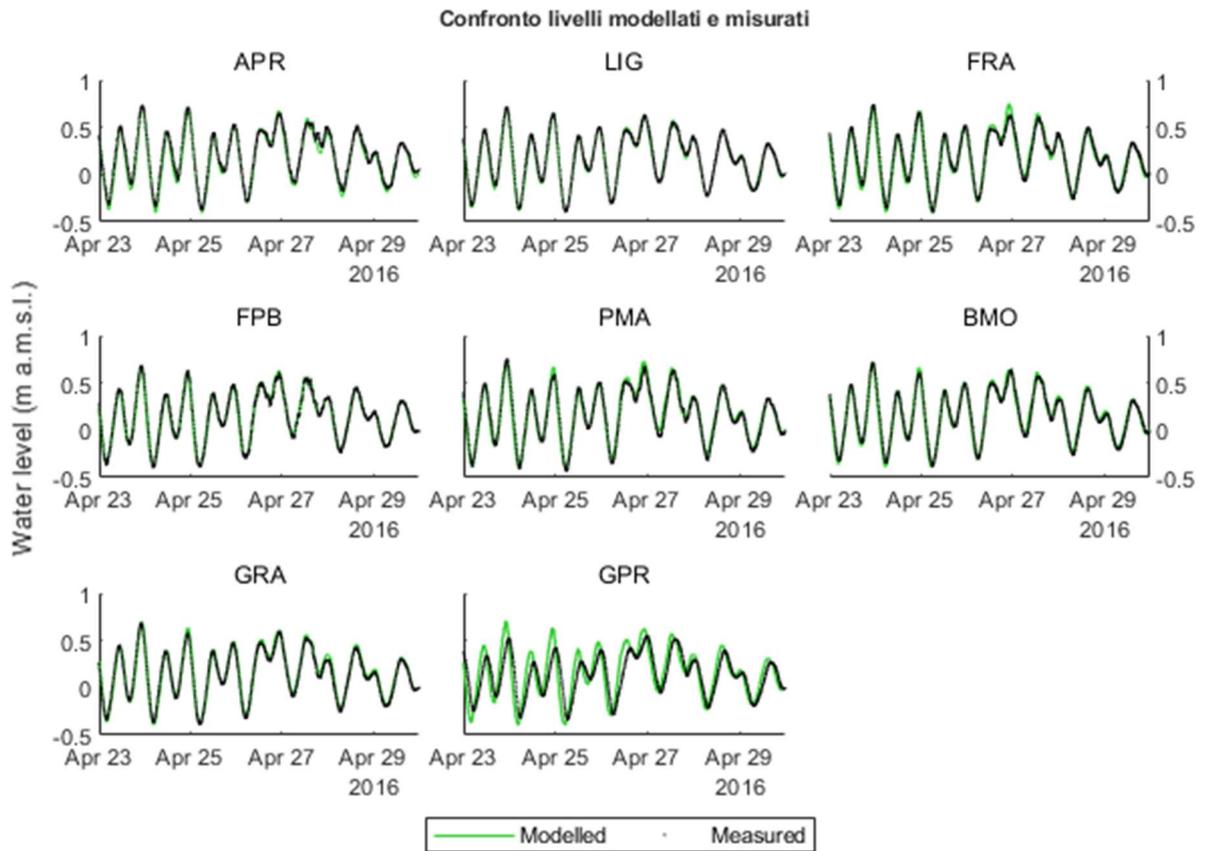


Figura 6-27: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 23-30 Aprile 2016.

**Simulazione con forte da S (Libeccio/Ostro): 13-20 Novembre 2014**

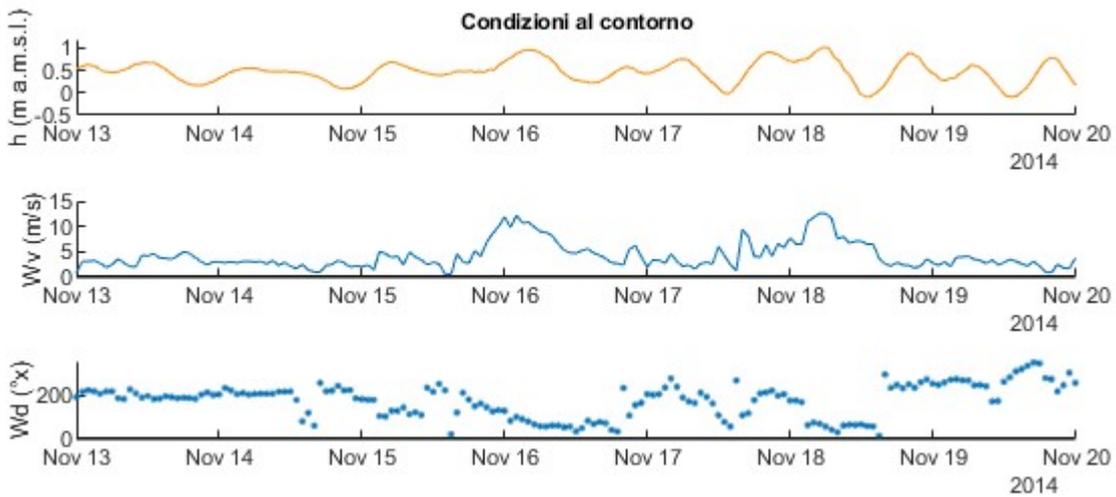


Figura 6-28: Condizioni al contorno relative alla simulazione 13-20 Novembre 2014.

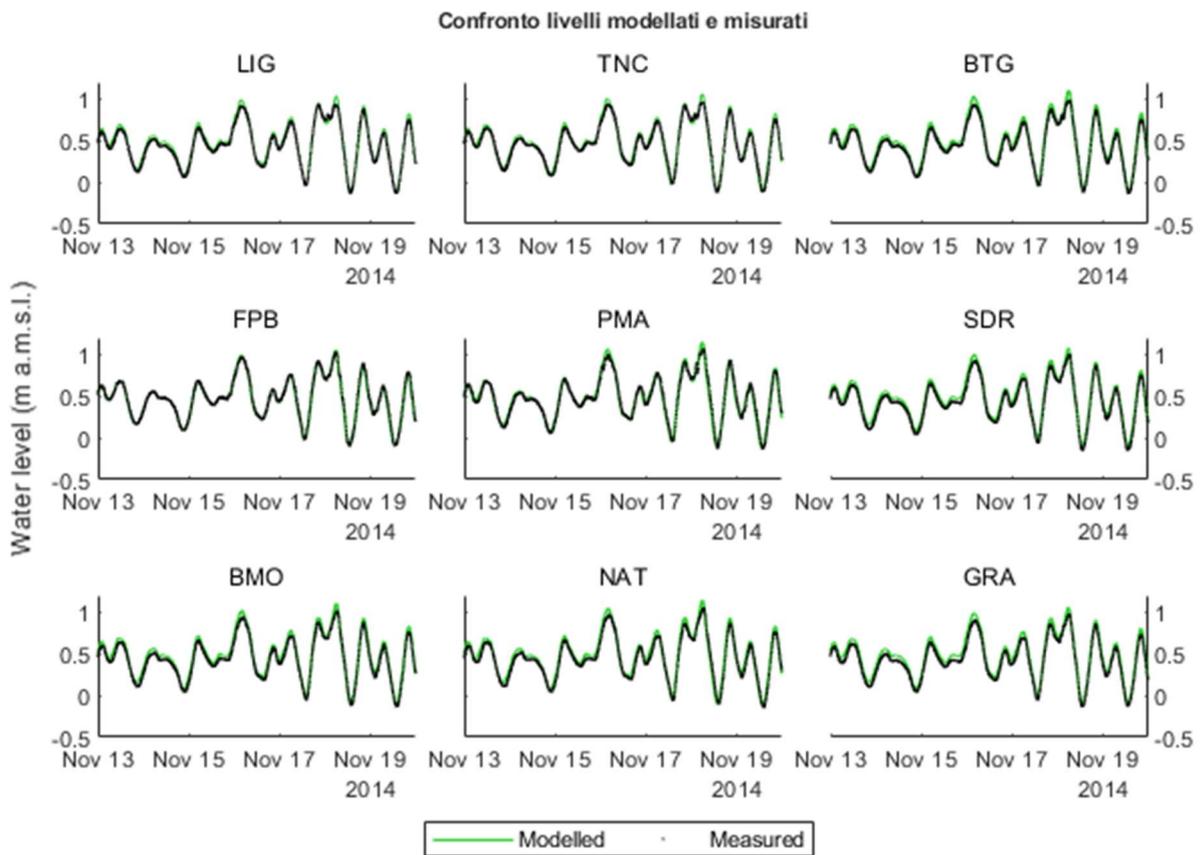


Figura 6-29: Confronto fra i livelli modellati e quelli misurati dai mareografi nel periodo 13-20 Novembre 2014.

Per verificare la bontà dei risultati sono stati calcolati per ogni stazione e per ogni simulazione:

- Mean Absolute Error:  $MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |l_{mod} - l_{mis}|}{n}$  ;

Stazioni	Periodo di simulazione								
	07-14.11.2014	04-11.06.2014	15-22.12.2015	02-09.02.2015	21-28.11.2015	11-18.03.2016	11-18.09.2015	23-30.04.2016	13-20.11.2014
APR	-	-	0.014	-	0.039	0.048	-	0.038	-
LIG	0.023	0.015	0.025	-	0.026	0.018	0.060	0.021	0.032
BLV	-	0.031	-	-	-	-	-	-	-
TCN	0.021	0.017	0.031	0.029	0.020	-	-	-	0.034
FRA	-	-	0.013	-	-	0.029	-	0.029	-
MAR	0.047	-	0.025	-	-	-	-	-	-
BTG	0.029	-	-	0.030	0.023	-	0.037	-	0.035
FPB	0.019	0.008	0.009	0.020	0.026	0.033	0.017	0.012	0.010
PMA	0.034	0.019	0.095	0.033	0.064	-	0.048	0.028	0.026
SDR	0.036	-	0.015	0.033	0.039	-	-	-	0.042
BMO	0.043	0.024	-	0.038	-	0.018	0.056	0.025	0.038
NAT	0.089	-	-	0.055	0.097	-	0.083	-	0.042
GRA	0.024	0.023	0.024	0.038	0.029	0.023	0.048	0.022	0.049
GRB	0.032	0.028	0.026	-	-	-	-	-	-
GPR	0.043	-	0.045	-	-	0.089	-	0.125	-

Tabella 6.5: MAE.

- Root Mean Square Error:  $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_{mod} - l_{mis})^2}{n}}$ .

Stazioni	Periodi di simulazione								
	07-14.11.2014	04-11.06.2014	15-22.12.2015	02-09.02.2015	21-28.11.2015	11-18.03.2016	11-18.09.2015	23-30.04.2016	13-20.11.2014
APR	-	-	0.017	-	0.062	0.061	-	0.047	-
LIG	0.029	0.018	0.023	-	0.033	0.022	0.067	0.026	0.037
BLV	-	0.036	-	-	-	-	-	-	-
TCN	0.027	0.020	0.043	0.042	0.029	-	-	-	0.040
FRA	-	-	0.017	-	-	0.039	-	0.038	-
MAR	0.057	-	0.032	-	-	-	-	-	-
BTG	0.034	-	-	0.037	0.029	-	0.048	-	0.043
FPB	0.024	0.011	0.012	0.027	0.020	0.042	0.021	0.017	0.014
PMA	0.044	0.025	0.110	0.042	0.073	-	0.059	0.036	0.034
SDR	0.047	-	0.018	0.038	0.051	-	-	-	0.046
BMO	0.049	0.028	-	0.046	-	0.023	0.067	0.031	0.044
NAT	0.099	-	-	0.063	0.111	-	0.096	-	0.049
GRA	0.031	0.025	0.027	0.045	0.035	0.027	0.056	0.027	0.053
GRB	0.044	0.033	0.031	-	-	-	-	-	-
GPR	0.049	-	0.052	-	-	0.111	-	0.153	-

Tabella 6.6: RMSE.

- Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (%):  $NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (l_{mis} - l_{mod})^2}{\sum_{i=1}^n (l_{mis} - \bar{l}_{mis})^2}$ .

Stazioni	Periodi di simulazione								
	07-14.11.2014	04-11.06.2014	15-22.12.2015	02-09.02.2015	21-28.11.2015	11-18.03.2016	11-18.09.2015	23-30.04.2016	13-20.11.2014
APR	-	-	0.994	-	0.0961	0.917	-	0.965	-
LIG	0.993	0.992	0.985	-	0.989	0.990	0.956	0.989	0.0977
BLV	-	0.969	-	-	-	-	-	-	-
TCN	0.994	0.991	0.961	0.0984	0.992	-	-	-	0.973
FRA	-	-	0.994	-	-	0.966	-	0.978	-
MAR	0.971	-	0.979	-	-	-	-	-	-
BTG	0.989	-	0.723	0.987	0.992	-	0.978	-	0.969
FPB	0.995	0.997	0.997	0.993	0.996	0.963	0.995	0.995	0.997
PMA	0.984	0.987	0.736	0.985	0.951	-	0.970	0.981	0.982
SDR	0.981	-	0.994	0.987	0.976	-	-	-	0.966
BMO	0.977	0.982	-	0.979	-	0.989	0.955	0.985	0.968
NAT	0.909	-	-	0.963	0.867	-	0.910	-	0.961
GRA	0.991	0.985	0.985	0.980	0.988	0.984	0.967	0.988	0.950
GRB	0.982	0.973	0.980	-	-	-	-	-	-
GPR	0.979	-	0.943	-	-	0.674	-	0.466	-

Tabella 6.7: NSE.

Dagli errori precedentemente calcolati si può concludere che i livelli modellati costituiscano una buona rappresentazione dei livelli realmente registrati dai mareografi interni alla laguna.

Infatti, l'errore assoluto medio (MAE) e l'errore quadratico medio (RMSE) risultano per la maggior parte delle stazioni inferiori ai 6 cm e l'efficienza del modello superiore al 95%.

Date le informazioni a disposizione e tutte le ipotesi fatte, tra cui l'utilizzo dei livelli di Faro Porto Buso come condizioni al contorno, la stima degli zeri idrometrici delle stazioni di misura, la non completezza delle quote batimetriche della laguna e l'imposizione delle misure di velocità e direzione del vento registrate a Grado sull'intera laguna, si può ritenere che i risultati del modello siano più che soddisfacenti.

In particolare, si pone l'attenzione sulla stazione di Grado Primero, dove si stimano errori di 4/5 cm nei periodi di vento debole, mentre nel caso di vento forte fino di 12/15 cm. Questo è probabilmente legato alla scelta delle condizioni al contorno utilizzate; infatti, la stazione si trova molto più ad est della stazione di Faro Porto Buso di cui si utilizzano i dati come condizioni al contorno comuni a tutto il mare. Una scelta diversa si potrebbe fare nella definizione del dominio di calcolo andando a definire una porzione di mare separata per la bocca di Grado Primero rispetto alle altre 5 bocche. Per effettuare questa operazione sarebbe necessario, però, scegliere delle diverse condizioni al contorno per quanto riguarda la porzione di mare antistante la Bocca di Grado Primero; al momento non si dispone di ulteriori misure di livello, ma si potrebbe pensare di utilizzare i dati della stazione GPR anticipandoli con la stessa procedura utilizzata per quelli di FPB attualmente utilizzati.

## 7 Analisi idrodinamica

### 7.1 Influenza dei fiumi sull'idrodinamica lagunare

Nella costruzione del reticolo di calcolo si è scelto di non schematizzare i fiumi che sfociano in laguna, ipotizzando che il loro contributo d'acqua dolce e la loro capacità di invaso non siano considerevoli e che, di conseguenza, gli stessi non influenzino i livelli presenti in laguna.

Al fine di poter giustificare questa scelta, sono state effettuate delle simulazioni su una griglia di calcolo che comprende le zone fluviali sino alla linea ferroviaria retrostante alla laguna. In particolare, sono state messe a confronto tre simulazioni effettuate nello stesso periodo, dal 07 al 14 Settembre 2014, dove la marea è di sizigia e il vento è debole (velocità < 5 m/s), ma con diverse geometrie di calcolo e diverse condizioni al contorno.

La prima simulazione è stata eseguita sul reticolo di calcolo descritto al Capitolo 4 senza la presenza di fiumi se non per quanto riguarda il fiume Corno, che è stato rappresentato fino al Porto Margherita, in quanto in questa zona si trova uno dei 12 mareografi utilizzati per i confronti; le condizioni al contorno sono solo quelle di livello imposte sui nodi in mare aperto (vedi seguente Figura 7-1).

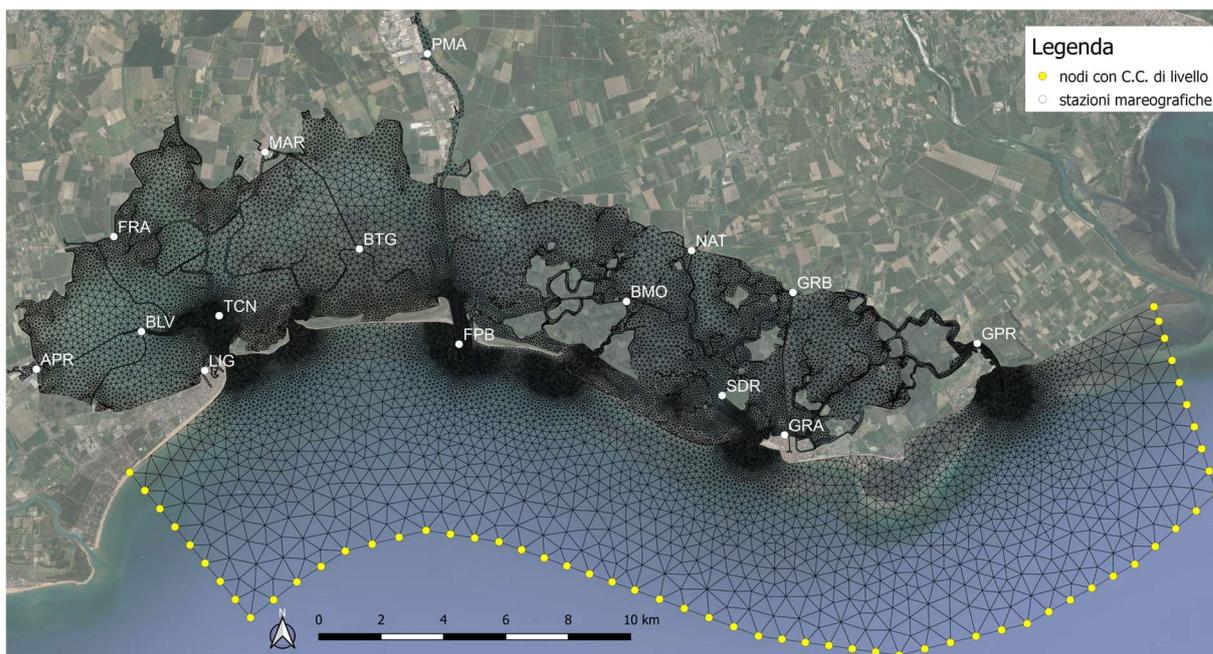


Figura 7-1: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con reticolo di calcolo senza le aree fluviali, indicazione dei nodi a cui verrà assegnata la condizione al contorno di livello (giallo) e delle stazioni mareografiche utilizzate per il confronto dei livelli (bianco).

La seconda simulazione è stata eseguita sul reticolo di calcolo comprensivo delle aree fluviali sino alla linea ferroviaria retrostante alla laguna; le condizioni al contorno sono solo quelle di livello imposte sui nodi in mare aperto (vedi Figura 7-2);

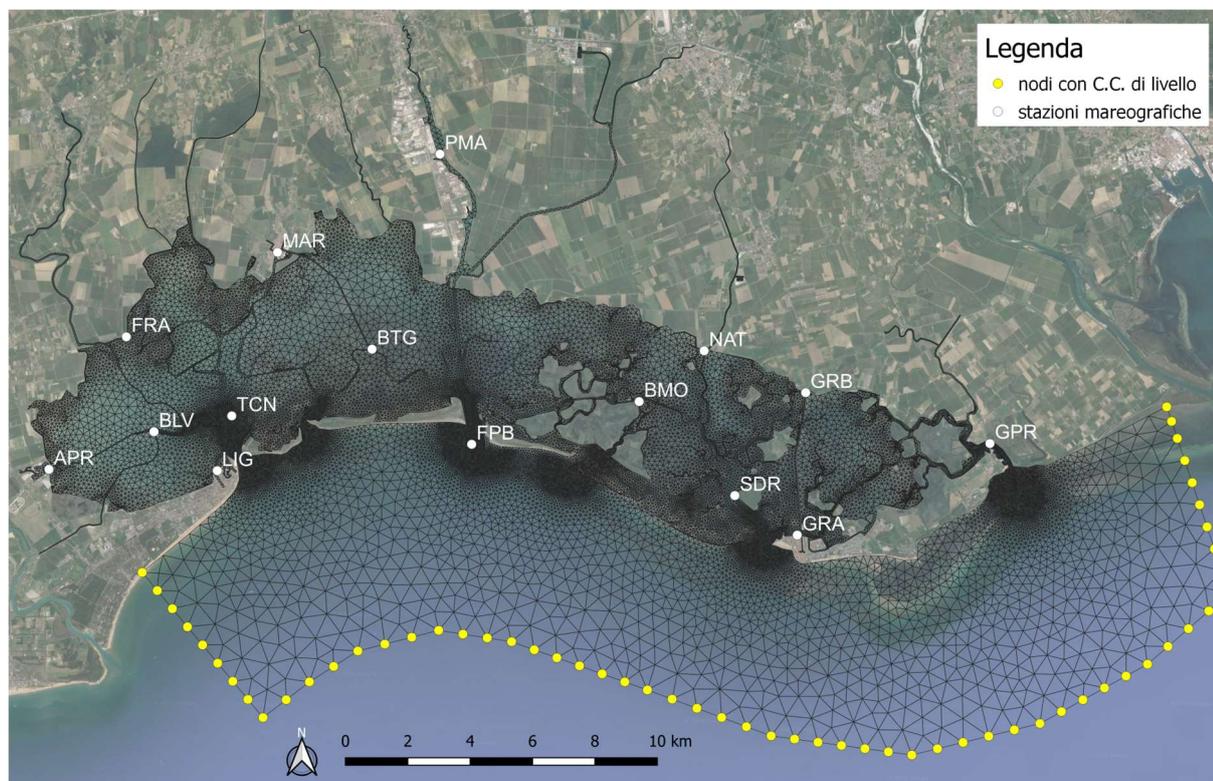


Figura 7-2: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con reticolo di calcolo con le aree fluviali, indicazione dei nodi a cui verrà assegnata la condizione al contorno di livello (giallo) e delle stazioni mareografiche utilizzate per il confronto dei livelli (bianco).

La terza simulazione è stata eseguita sul reticolo di calcolo comprensivo delle aree fluviali sino alla linea ferroviaria retrostante alla laguna; le condizioni al contorno sono quelle di livello imposte sui nodi in mare aperto (vedi Figura 7-3) a cui sono aggiunte condizioni al contorno di portata costante sui nodi in testa ai fiumi secondo la Tabella 7.1. Le portate assegnate sono state assunte pari alle medie misurate fra il 2010 e il 2012 dall’Autorità di Bacino:

Fiume	Portata	Fiume	Portata
Stella	46.00 $m^3/s$	Corno	8.90 $m^3/s$
Turgnano	0.50 $m^3/s$	Aussa	8.10 $m^3/s$
Cormor	11.40 $m^3/s$	Natissa	4.60 $m^3/s$
Zellina	1.00 $m^3/s$	Tiel	0.50 $m^3/s$

Tabella 7.1: Portate costanti imposte come condizioni al contorno in testa ai fiumi nella terza simulazione.

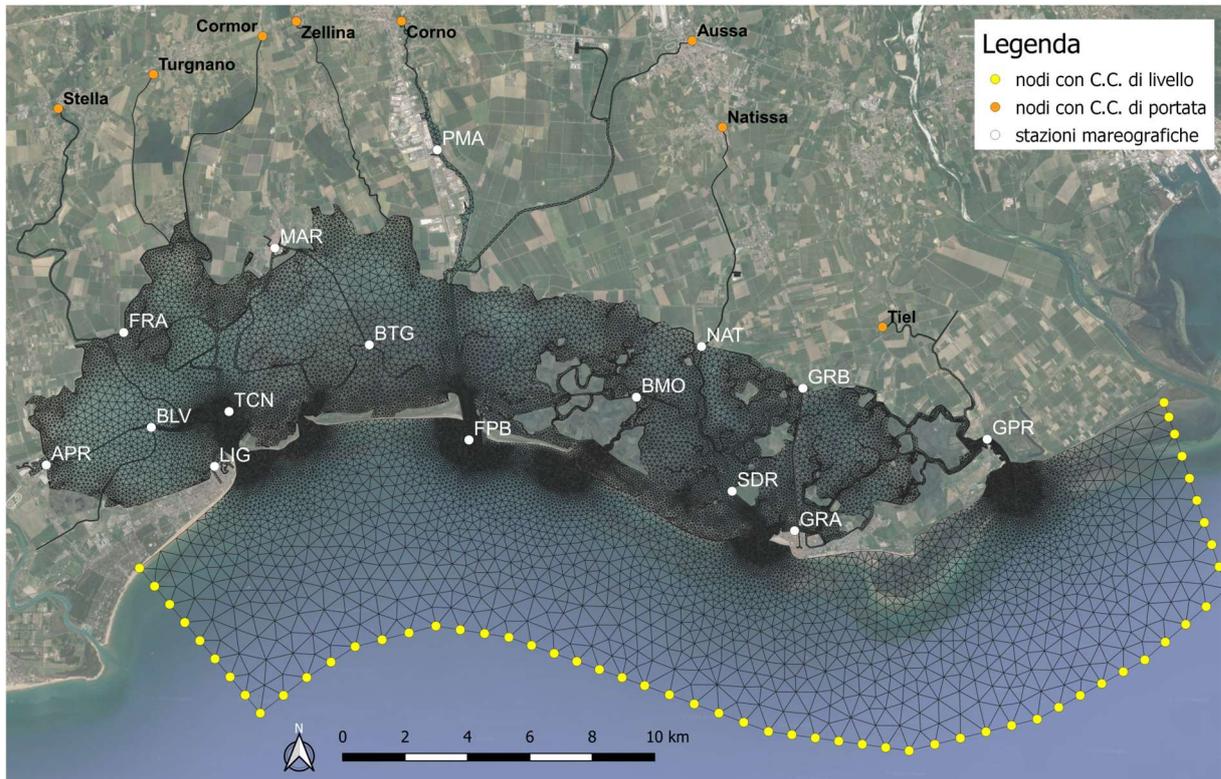


Figura 7-3: Immagine satellitare della laguna di Grado e Marano con reticolo di calcolo con le aree fluviali, indicazione dei nodi a cui verrà assegnata la condizione al contorno di livello (giallo) e di portata (arancio) e indicazione delle stazioni mareografiche utilizzate per il confronto dei livelli (bianco).

Il confronto fra le tre simulazioni permette di quantificare se le aree fluviali comportino una significativa capacità di invaso e se le portate degli stessi contribuiscano alla variazione dei livelli all'interno della laguna; o se, invece, come ipotizzato a causa delle piccole dimensioni dei fiumi e delle loro ridotte portate prevale il contributo legato alla marea.

Sono stati, dunque, messi a confronto i livelli modellati in corrispondenza delle 15 stazioni interne alla laguna nelle 3 simulazioni per verificare l'ipotesi assunta inizialmente.

Di seguito si riporta il confronto dei livelli nella stazione Fraida (FRA) in prossimità della foce del fiume Stella (ingrandimento sul giorno 10 Settembre 2014 nella Figura 7-4). La stessa, infatti è l'unica stazione dove la variazione di livello fra le tre simulazioni supera il cm. Tutte le altre stazioni riportano variazioni di livello inferiori (Tabella 7.2).

stazione	$ \Delta L_{med} $ (cm)		stazione	$ \Delta L_{med} $ (cm)		stazione	$ \Delta L_{med} $ (cm)	
	Griglia con fiumi	Griglia con fiumi e C.C di portata		Griglia con fiumi	Griglia con fiumi e C.C di portata		Griglia con fiumi	Griglia con fiumi e C.C di portata
APR	0.47	0.62	MAR	0.47	0.45	BMO	0.29	0.26
LIG	0.32	0.35	BTG	0.44	0.39	NAT	0.60	0.59
BLV	0.41	0.50	FPB	0.40	0.07	GRA	0.07	0.07
TCN	0.30	0.33	PMA	0.97	0.96	GRB	0.18	0.18
FRA	1.02	1.83	SDR	0.08	0.09	GPR	0.20	0.20

Tabella 7.2: Confronto fra i livelli modellati con la griglia senza le aree fluviali e i livelli modellati con la griglia con la presenza delle aree fluviali e le portate costanti in testa ai fiumi come condizioni al contorno.

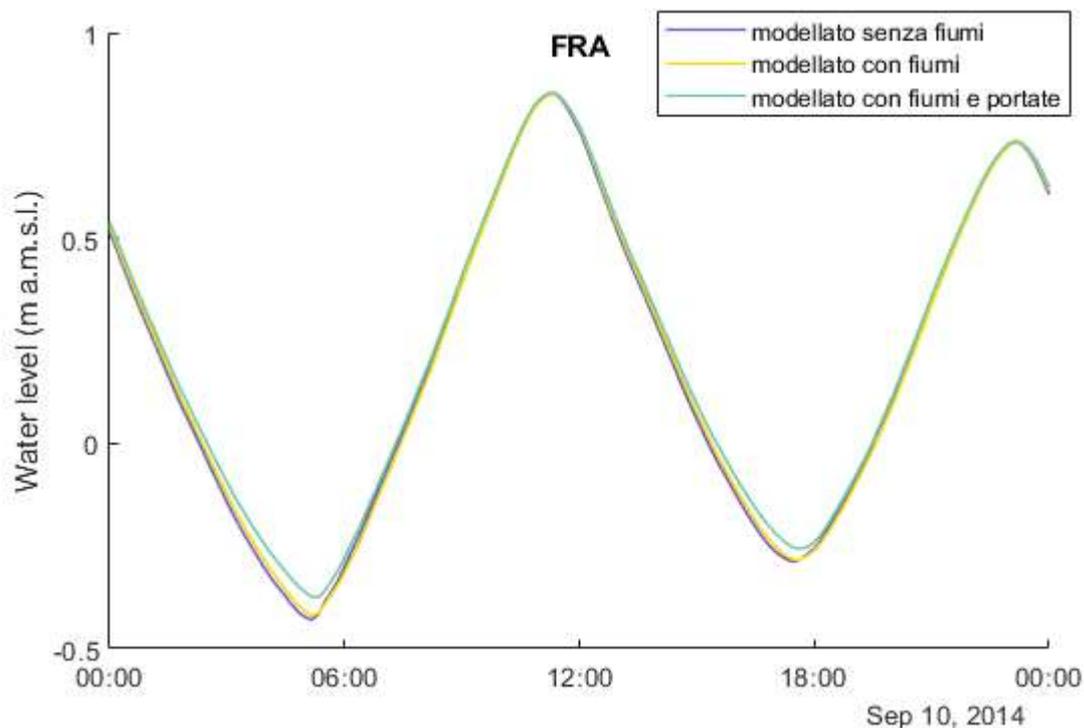


Figura 7-4: Confronto fra i livelli modellati con la griglia senza le aree fluviali e i livelli modellati con la griglia con la presenza delle aree fluviali e le portate costanti in testa ai fiumi come condizioni al contorno in corrispondenza della stazione di Fraida (FRA).

La variazione di livello nella stazione di Fraida è più significativa (mediamente 1.8 cm) se vengono inserite le condizioni al contorno di portata sul fiume Stella, come si vede nella Figura 7-4 e, in particolare, la massima variazione che si verifica nell'intero periodo di simulazione è di 6 cm in corrispondenza di un cavo di bassa marea.

Si può, dunque concludere che nella stazione di Fraida, il fiume Stella con la sua portata costante di  $46.00 \text{ m}^3/\text{s}$  comporta delle variazioni di livello, in particolare nella fase decrescente della marea, cioè quando i livelli all'interno della laguna stanno diminuendo. Non vi sono, al contrario, variazioni di livello apprezzabili nella fase di alta marea.

Le variazioni sono, comunque, minori dell'errore commesso dal modello nella stima dei livelli rispetto a quelli misurati nelle stazioni mareografiche interne alla laguna. Si può, dunque, ritenere valida l'ipotesi iniziale per cui i fiumi, a causa delle loro piccole capacità di invaso e delle portate non elevate, non influenzano sensibilmente i livelli all'interno della laguna.

Si sottolinea che l'ipotesi è stata validata mediante l'aggiunta di condizioni al contorno di portata costante sui fiumi, misurate fra il 2010 e il 2012 dall'Autorità di Bacino, in assenza di informazioni sui possibili idrogrammi di piena dei fiumi contribuenti. Nel caso in cui si rendessero disponibili dati sugli stessi, sarebbe utile testare il modello su eventi meteorologici particolarmente intensi che potrebbero portare a conclusioni diverse consentendo di investigare gli effetti idrodinamici legati a immissioni di portata più consistenti andando a stimare l'eventuale estensione delle aree lagunari interessate da questo fenomeno.

## 7.2 Partiacque

Come descritto inizialmente al Paragrafo 1.3, ad ogni bocca lagunare corrisponde un bacino retrostante che è idraulicamente separato da quelli attigui da una linea di partiacque, dove le masse d'acqua entranti da due bocche vicine si incontrano. Fra due bacini vi sarà mescolamento delle masse d'acqua solo nel caso di forti venti, viceversa il volume d'acqua che fluisce da una bocca verrà restituito al mare durante la fase di riflusso della marea dalla stessa bocca.

Per verificarlo è stata analizzata la simulazione, già precedentemente usata in fase di calibrazione, dal 07 al 14 Settembre 2014, dove la marea è di sizigia e il vento è debole (<5 m/s), (Condizioni al contorno Figura 6-12, Livelli modellati Figura 6-13).

Utilizzando il software Incidenze è possibile estrarre delle mappe a colori in cui si evidenzia l'andamento dei livelli all'interno della laguna (Figura 7-5) nelle varie fasi della marea ed è inoltre, possibile stampare le direzioni del flusso relative ad ogni maglia presente nel reticolo. In questo modo, è possibile tracciare i partiacque, noto che da un lato e dall'altro di queste linee immaginarie le direzioni del flusso saranno sensibilmente diverse, ovvero a divergere in fase di marea uscente e a convergere in fase di marea entrante (Figura 7-6, Figura 7-7 e Figura 7-8).

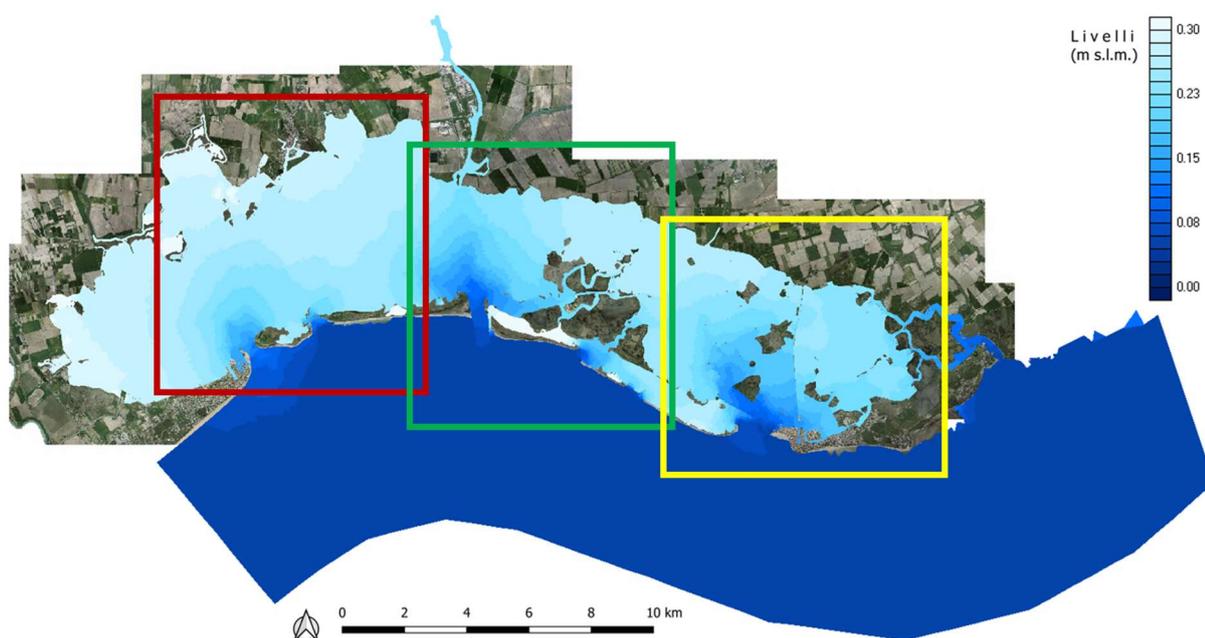


Figura 7-5: Simulazione del 10 Settembre 2014 ore 01:00, fase di riflusso della marea con indicazione dei livelli presenti in laguna. Con i tre riquadri sono evidenziate rispettivamente la Figura 7-6 (rosso), la Figura 7-7 (verde) e la Figura 7-8 (giallo).

Nella Figura 7-6 sottostante si mettono in evidenza i partiacque tracciati fra la Bocca di Lignano, la bocca di Sant'Andrea e quella di Porto Buso considerando le direzioni di riflusso di marea calcolate con il modello durante una delle fasi di marea calante. In particolare, i due bacini di maggiori dimensioni risultano proprio quello di Lignano, circa 47 km<sup>2</sup> e quello di Porto Buso, circa 42 km<sup>2</sup>, mentre il bacino interposto fra questi due, cioè quello afferente alla bocca di Sant'Andrea risulta di circa 9 km<sup>2</sup>.

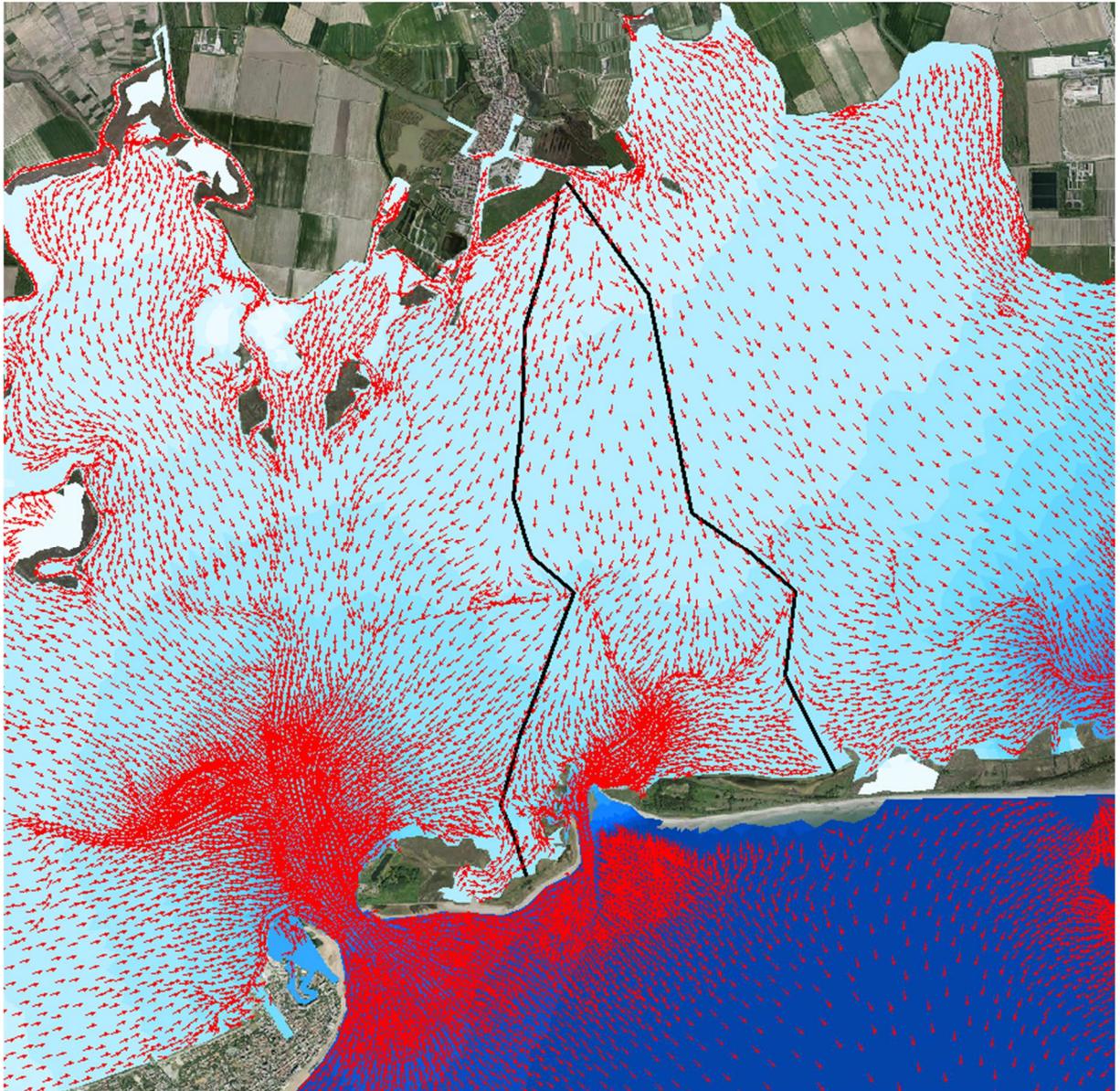
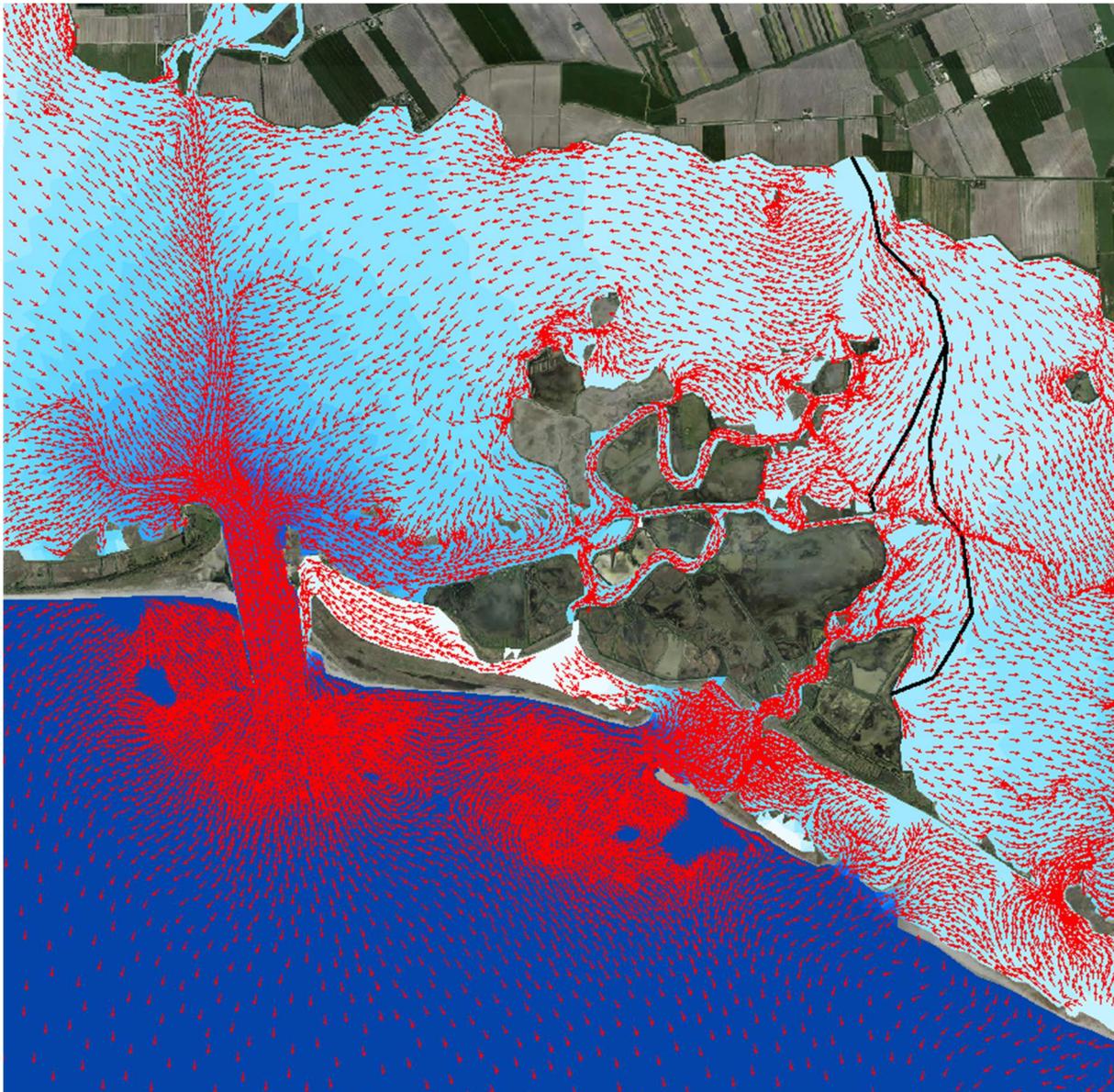


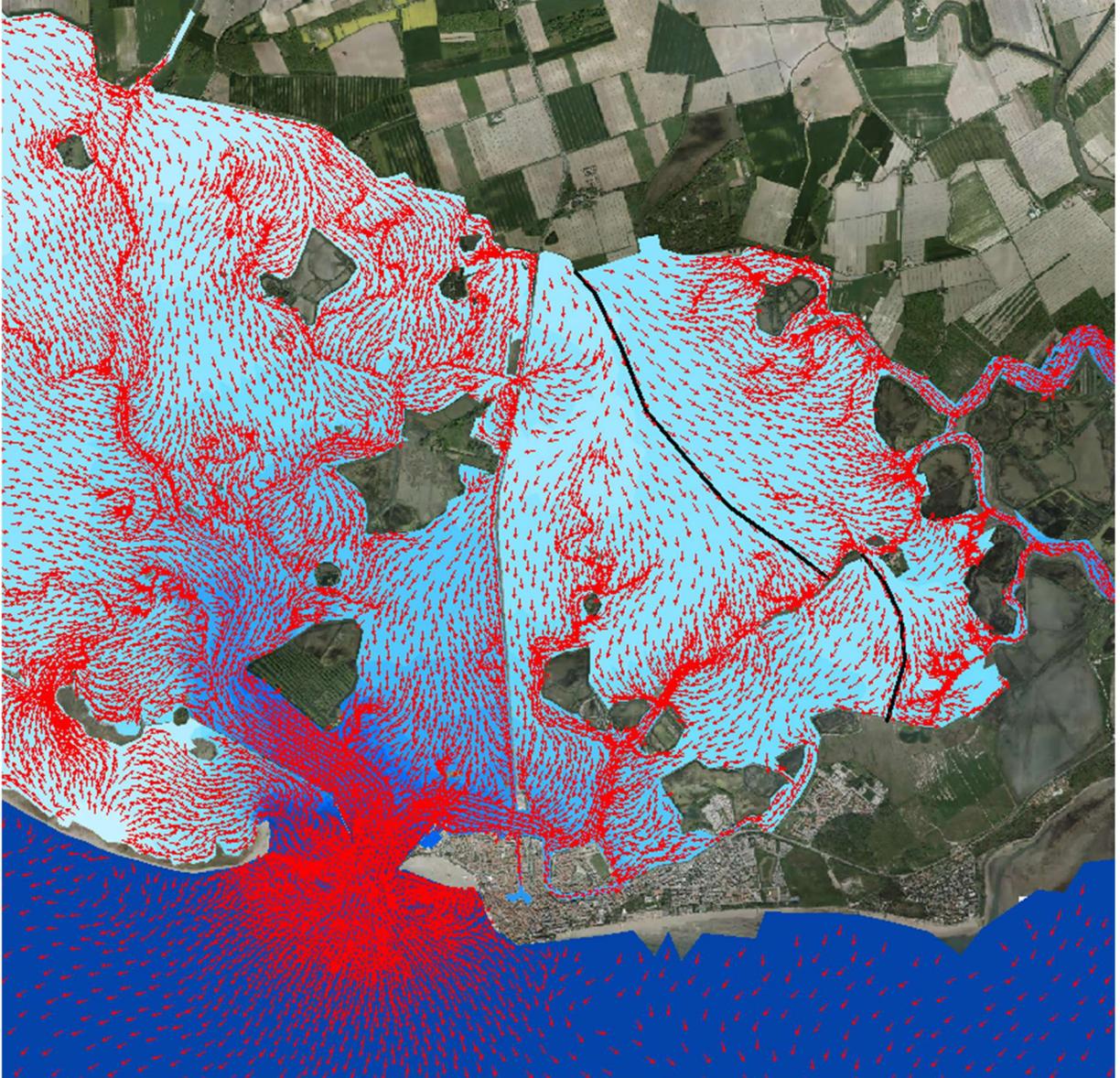
Figura 7-6: Ingrandimento della Figura 7-5 (riquadro rosso) con indicazione dei livelli presenti nella laguna; i vettori rappresentati in rosso indicano le direzioni del flusso; le linee nere indicano i partiacque.

Nella Figura 7-7 si mettono in evidenza i partiacque tracciati fra la Bocca di Porto Buso, la bocca Morgo e quella di Grado. Quest'ultima sottende un bacino di circa 32.5 km<sup>2</sup>, mentre il bacino di Morgo un'area di appena 1.5 km<sup>2</sup>.



*Figura 7-7: Ingrandimento della Figura 7-5 (riquadro verde) con indicazione dei livelli presenti nella laguna; i vettori rappresentati in rosso indicano le direzioni del flusso; le linee nere indicano i partiacque.*

Nella Figura 7-8 si mettono infine in evidenza i partiacque tracciati fra la Bocca di Grado e la bocca Grado Primoero. La stessa drena un bacino antistante di soli 7 km<sup>2</sup>, in quanto vi è la presenza di molte valli da pesca la cui sommersione è regolata da opere idrauliche.



*Figura 7-8: Ingrandimento della Figura 7-5 (riquadro giallo) con indicazione dei livelli presenti nella laguna; i vettori rappresentati in rosso indicano le direzioni del flusso; le linee nere indicano i partiacque.*

In Figura 7-9 sono evidenziati i sotto-bacini lagunari associati ad ogni bocca, in seguito al tracciamento dei partiacque nel periodo di simulazione 07-14 Settembre 2014.

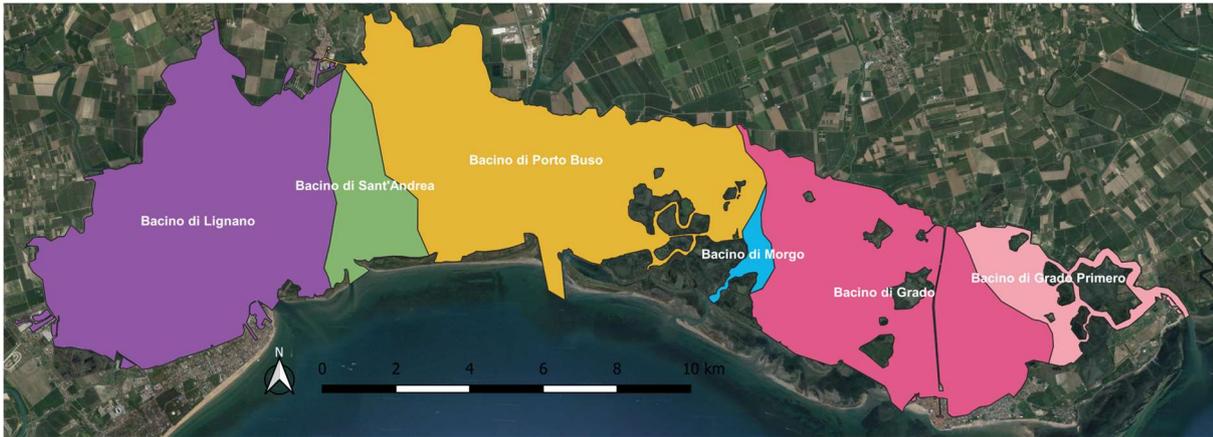


Figura 7-9: Bacini lagunari derivanti dal tracciamento dei partiacque nella simulazione 7-14 Settembre 2014.

Nel caso in cui, invece, vi sia una condizione di vento forte non è possibile tracciare i partiacque, in quanto vi è il mescolamento delle masse d'acqua fra bacini lagunari attigui. Anche questa condizione è stata verificata analizzando una simulazione, già precedentemente usata in fase di calibrazione, dal 02 al 09 Febbraio 2015, dove la marea è di sizigia e vi è la presenza di vento forte fino a 16 m/s proveniente da NE (Bora).

**Simulazione: 02 - 09 Febbraio 2015 – vento da NE (Bora)**

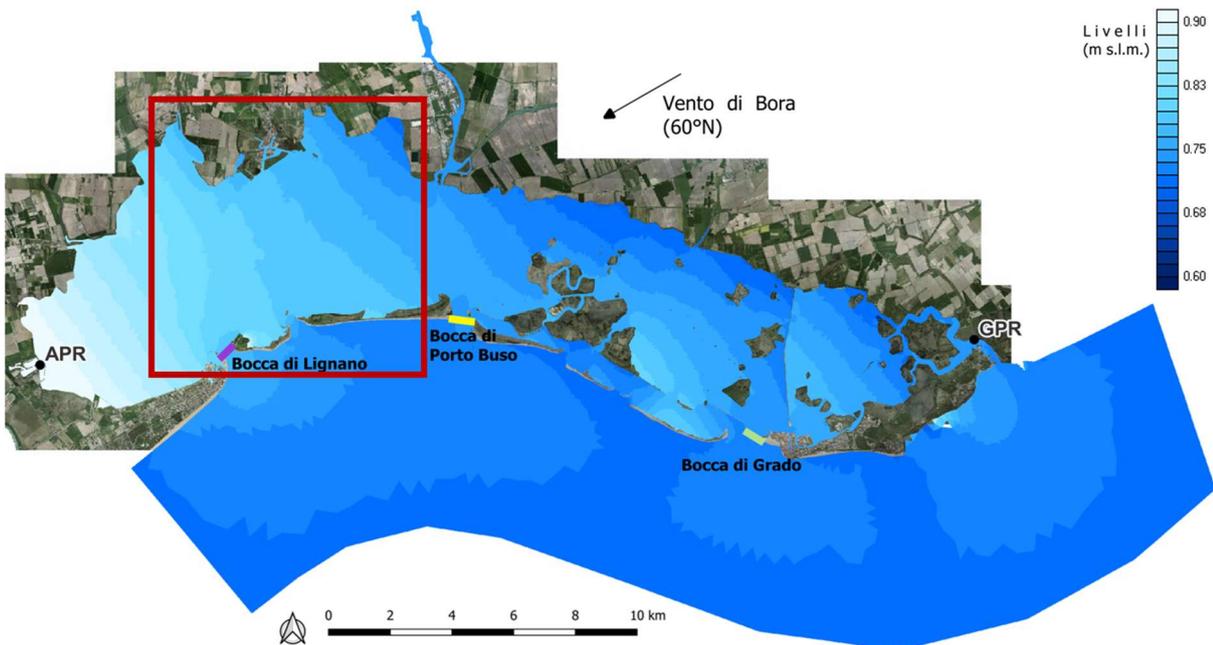


Figura 7-10: Simulazione 06 Febbraio 2015 ore 11:00 con vento forte di Bora, fase di riflusso della marea con indicazione dei livelli presenti in laguna; il riquadro rosso indica l'ingrandimento riportato in Figura 7-12; sono indicate le sezioni su cui si sono calcolate le portate in ingresso/uscita alle bocche rispettivamente di: Lignano (viola), Porto Buso (giallo) e Grado (verde).

Il periodo scelto per la simulazione è caratterizzato da vento di Bora proveniente da NE che raggiunge velocità fino ai 16 m/s nel giorno 06 Febbraio 2015 (Figura 7-11).

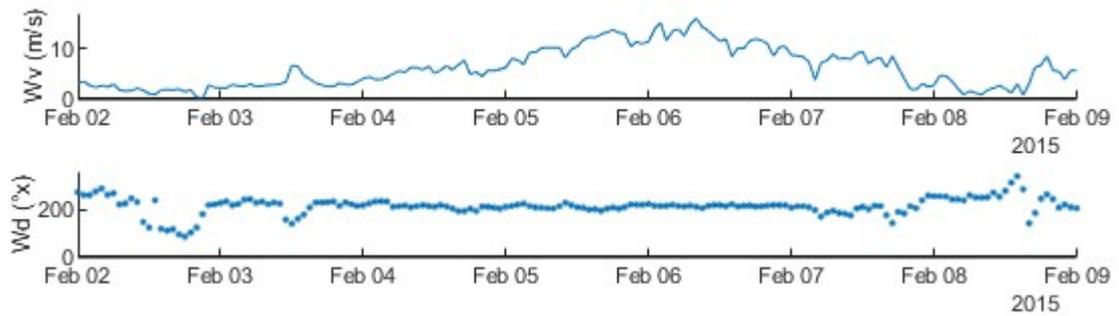


Figura 7-11: Velocità e direzione del vento nella simulazione 02-09 Febbraio 2015.

Un esempio di come non sia possibile tracciare i partiacque nel caso di forti venti è dato dalla Figura 7-12.

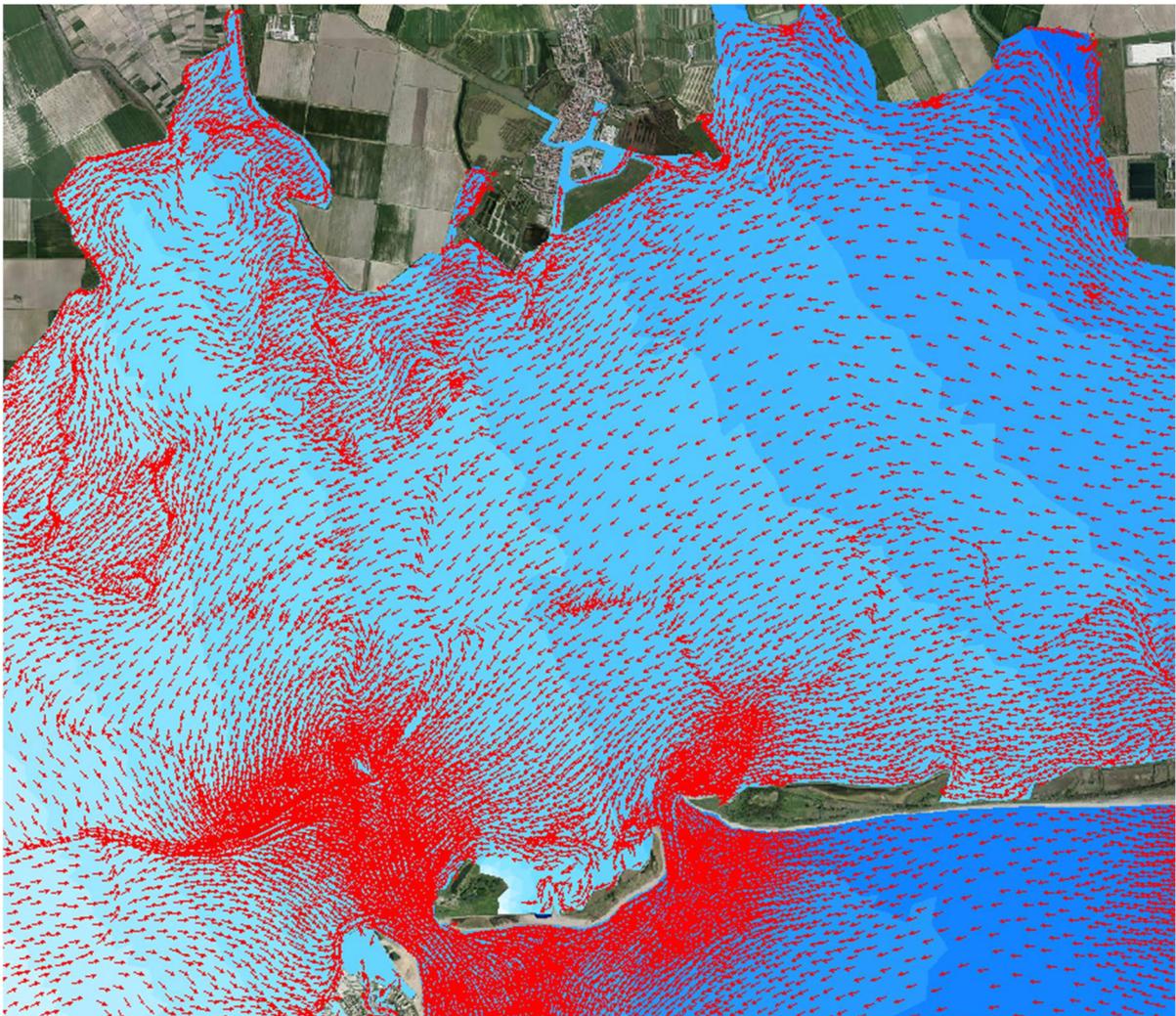


Figura 7-12: Ingrandimento della Figura 7-10 (riquadro rosso) con indicazione dei livelli presenti nella laguna; i vettori rappresentati in rosso indicano le direzioni del flusso.

Rispetto alla Figura 7-6, nella condizione individuata nella Figura 7-12 non è possibile tracciare i partiacque fra la Bocca di Lignano, di Porto Buso e di Sant'Andrea e quindi di individuare i corrispondenti sotto-bacini lagunari, in quanto il vento di Bora da luogo al setup, cioè un dislivello fra la parte est (< livello m s.l.m.) e la parte ovest (> livello m s.l.m.) della laguna; nei giorni di simulazione in cui vi è la presenza di vento forte (05 e 06 Febbraio 2015), si nota, infatti, un aumento dei livelli nella parte ovest della laguna (vedi Figura 7-10).

Mediante il software Incidenze si riesce, inoltre, ad apprezzare la presenza di una circolazione interna alla laguna, che comporta lo spostamento delle masse d'acqua dalla Bocca di Grado Primero alla Bocca di Lignano proprio per la presenza di vento di Bora.

A causa di questo mescolamento delle masse d'acqua, il flusso che entra in fase di marea crescente attraverso una bocca lagunare non è pari a quello che verrà restituito dalla medesima bocca nella fase di riflusso della marea, se il vento spira con intensità elevata.

Questo è stato verificato analizzando i risultati del modello e andando a stampare, a titolo di esempio, l'andamento temporale delle portate fluenti attraverso le tre bocche di porto di Lignano, Porto Buso e Grado e valutando i volumi d'acqua in ingresso e in uscita come area sottesa dai rispettivi grafici.

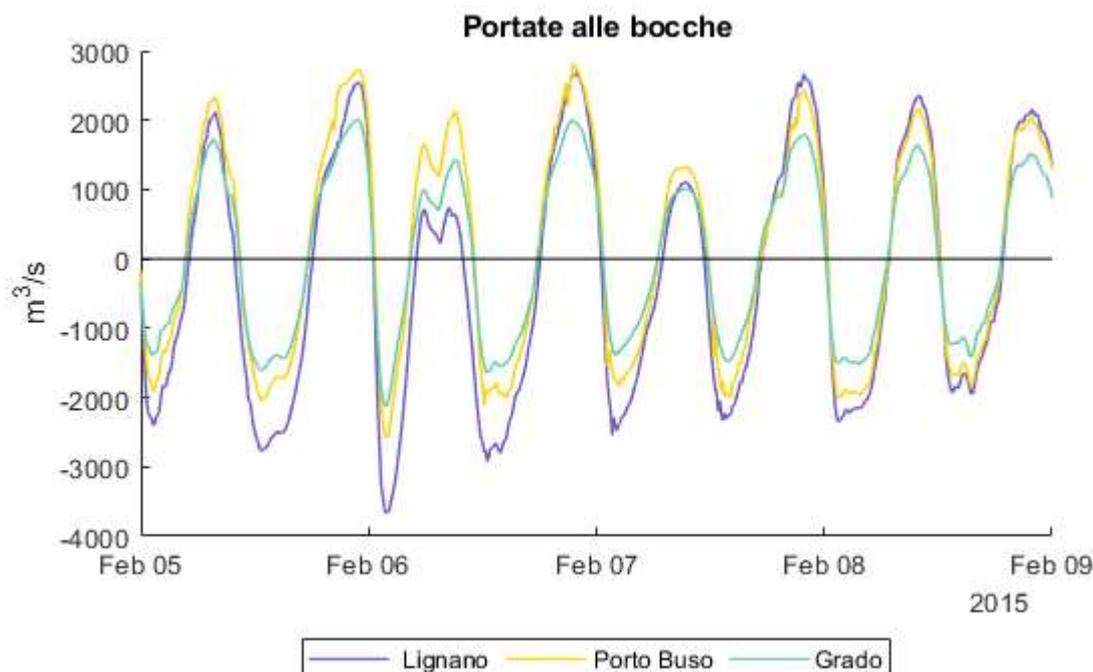


Figura 7-13: Confronto fra le portate estratte dalla simulazione del 02-09 Febbraio 2015 nelle bocche di Lignano, Porto Buso, e Grado indicate graficamente nella Figura 7-10.

Si nota dalla Figura 7-13 che in particolare nei giorni 05 e 06 Febbraio 2015, quando si raggiungono velocità del vento fino a 16 m/s, il volume d'acqua in ingresso alla Bocca di Lignano sia molto più piccolo del volume in uscita, in quanto la stessa restituisce l'acqua proveniente dai bacini attigui che si accumula nella fase di marea crescente nel bacino di Lignano per effetto del vento di Bora. Viceversa, nel giorno 08 Febbraio in cui il vento spira a velocità inferiori ai 5 m/s, le portate in ingresso e in uscita sono pressoché le stesse.

### **7.3 Influenza del vento sull'idrodinamica lagunare**

Al fine di verificare quanto l'effetto del vento influenzi l'andamento dei livelli all'interno della laguna, è stato preso in considerazione il periodo dal 02 al 09 Febbraio 2015 (Condizioni al contorno Figura 6-12), caratterizzato da marea di sizigia e vento forte proveniente da NE (Bora) e il periodo dal 23 al 30 Aprile 2016 (Condizioni al contorno Figura 6-26), caratterizzato da marea di fine sizigia/inizio quadratura e vento forte proveniente da SE (Scirocco).

Sono state svolte due simulazioni per entrambi i periodi scelti: nella prima simulazione sono state applicate le condizioni al contorno di livello sui nodi in mare aperto e le condizioni di vento uniforme su tutta la laguna, mentre nella seconda simulazione, mantenendo invariate le condizioni al contorno di livello non è stata applicata nessuna condizione di vento sull'area lagunare.

Questa operazione permette di verificare l'errore che si commette non andando a specificare le condizioni di vento sulla laguna e quindi di quantificare, in qualche misura, l'influenza della componente meteorologica della marea.

Successivamente è stato calcolato il setup, cioè la differenza fra i livelli in diversi punti all'interno della laguna considerando la direzione lungo cui spira il vento. In particolare, fra la parte est e ovest della laguna per il vento di Bora e fra la parte nord e sud della laguna per il vento di Scirocco.

I setup modellati nella laguna di Grado e Marano sono stati, infine, confrontati con quelli modellati nella laguna di Venezia facendo riferimento alla trattazione di R. Mel et al. (2019) a parità di intensità e direzione del vento, in modo da operare un confronto tra i due bacini lagunari e verificare, in particolare, l'influenza delle dimensioni delle lagune essendo la laguna di Venezia apprezzabilmente più grande di quella di Grado-Marano.

### 7.3.1 Vento di Bora

#### **Simulazione 1: 02 - 09 Febbraio 2015 – con applicazione di vento da NE (Bora)**

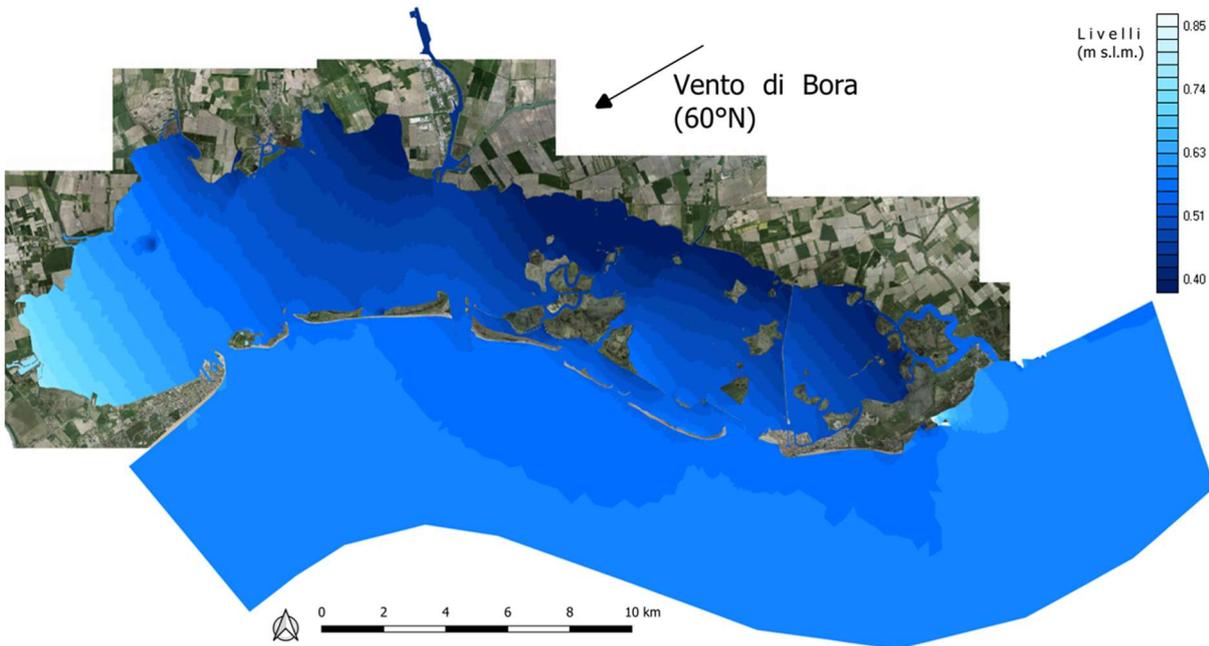


Figura 7-14: Simulazione 06 Febbraio 2015 ore 08:00 con vento forte di Bora, fase di marea crescente con indicazione dei livelli presenti in laguna.

Mediante il software incidenze, utilizzato nella fase di post-processing è stato possibile stampare una mappa a colori contenente l'andamento dei livelli nel giorno 06 Febbraio 2015 alle ore 08:00 (Figura 7-14). È stato scelto di mostrare questo istante di simulazione in quanto, il vento raggiunge la sua velocità massima di 16 m/s con una direzione di 59°N (vedi Figura 7-15).

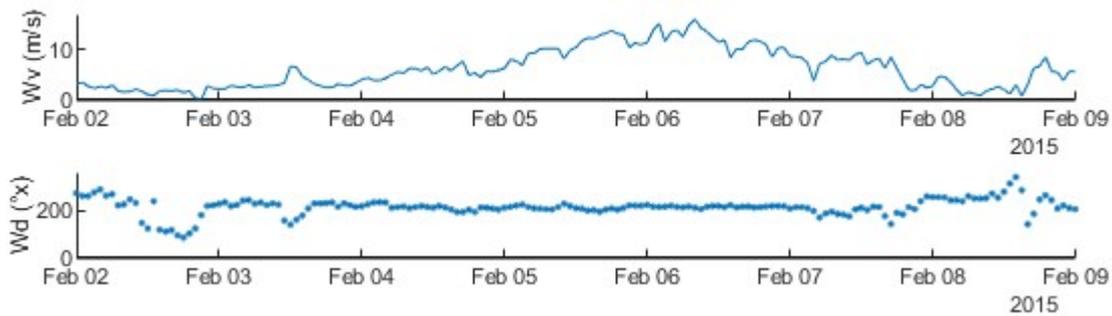


Figura 7-15: Velocità e direzione del vento nella simulazione 02-09 Febbraio 2015.

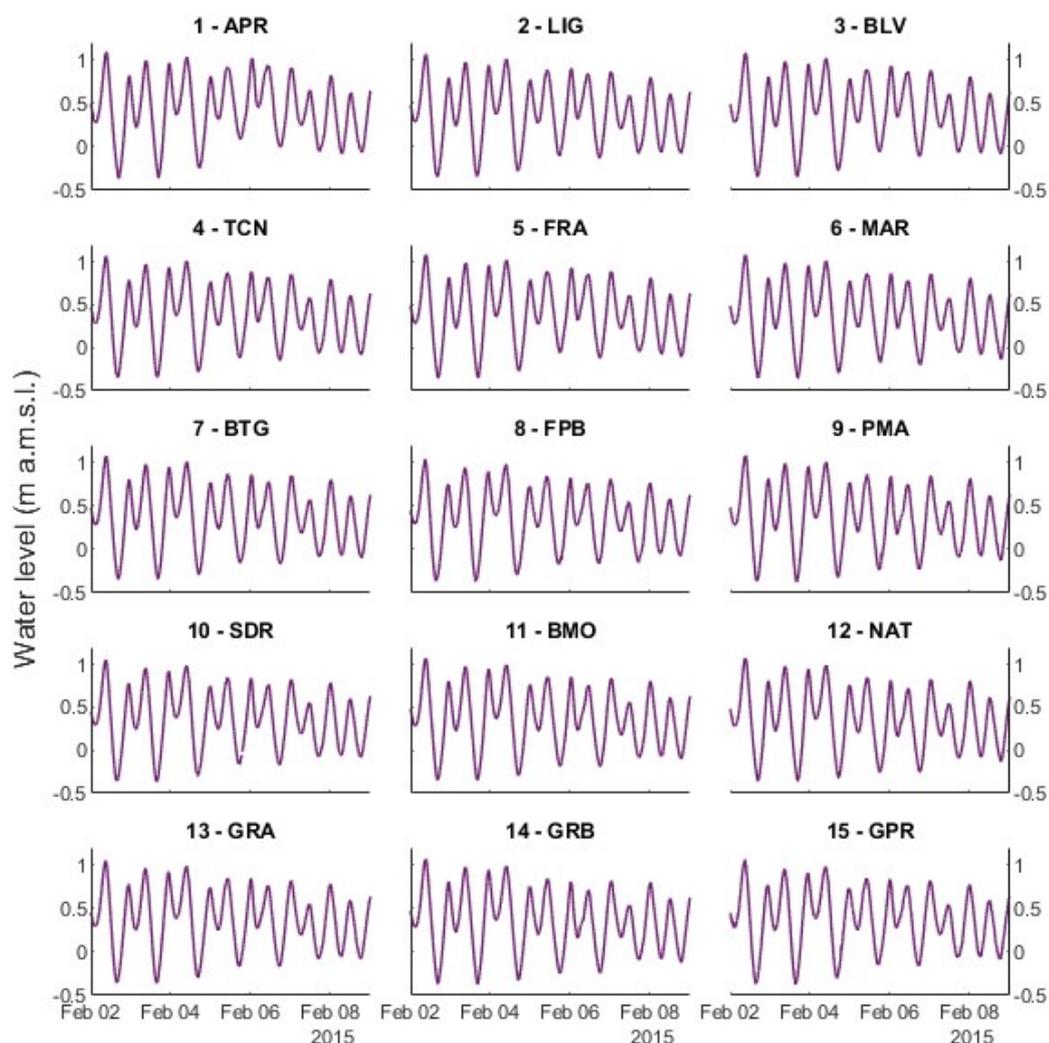


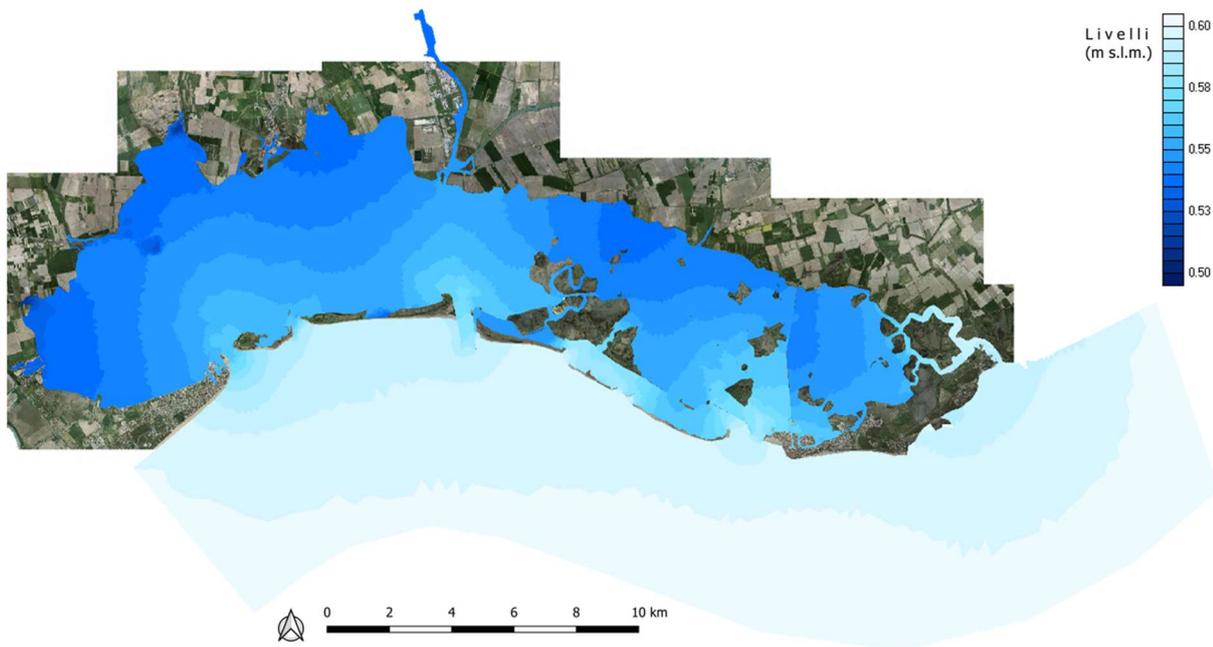
Figura 7-16: Livelli modellati nella simulazione 02-09 Febbraio 2015 in condizione di vento di Bora.

Dalla Figura 7-14 si può già comprendere come il vento di Bora comporti un sovrizzo dei livelli nella parte ovest della laguna a causa dello spostamento delle masse d'acqua spinte dal vento stesso verso SO.

Per quantificare il set up dovuto all'azione del vento si sono confrontati i livelli estratti in corrispondenza delle 15 stazioni interne alla laguna (Figura 6-1).

Andando a confrontare, in particolare, i livelli modellati nella simulazione 1, caratterizzata da vento forte di Bora con intensità fino a 16 m/s, della stazione di Aprilia (APR), che si trova ad ovest all'interno dell'area lagunare, con la stazione di Grado Primo (GPR), posizionata ad est all'interno della laguna, si può apprezzare un setup pari a circa 40 cm (vedi Figura 7-16). Questo è stato calcolato andando a valutare la massima differenza fra i livelli nelle due stazioni nel periodo di simulazione (vedi paragrafo 7.3.3.1).

## Simulazione 2: 02 - 09 Febbraio 2015 – senza applicazione di vento



*Figura 7-17: Simulazione 06 Febbraio 2015 ore 08:00 senza vento, fase di marea crescente con indicazione dei livelli presenti in laguna.*

Sempre mediante l'utilizzo del software Incidenze è stata realizzata la mappa a colori che individua l'andamento dei livelli all'interno della laguna trascurando gli effetti dovuti al vento (Figura 7-17).

Per poter confrontare al meglio i livelli nelle due simulazioni è stato stampato il medesimo istante di simulazione, 6 Febbraio 2015 alle ore 08:00.

Come si può osservare dalla Figura 7-17, l'andamento dei livelli è completamente diverso dalla precedente simulazione nello stesso istante, in quanto l'assenza di vento fa sì che gli stessi siano comandati solo dall'azione della marea.

In particolare, in questa simulazione si può vedere come i livelli in fase di flusso diminuiscono proseguendo verso l'interno della laguna e con l'avanzare dell'onda di marea le masse d'acqua si espandono all'interno dei bacini lagunari, corrispondenti alle bocche lagunari, lateralmente ai canali principali che collegano le bocche con l'interno della laguna. Non vi è dunque uno spostamento di masse d'acqua fra bacini attigui perché non vi è una forzante esterna di vento.

I livelli modellati nella simulazione dal 02 al 09 Febbraio 2015 nella condizione senza vento applicato come condizione al contorno sono rappresentati in Figura 7-18.

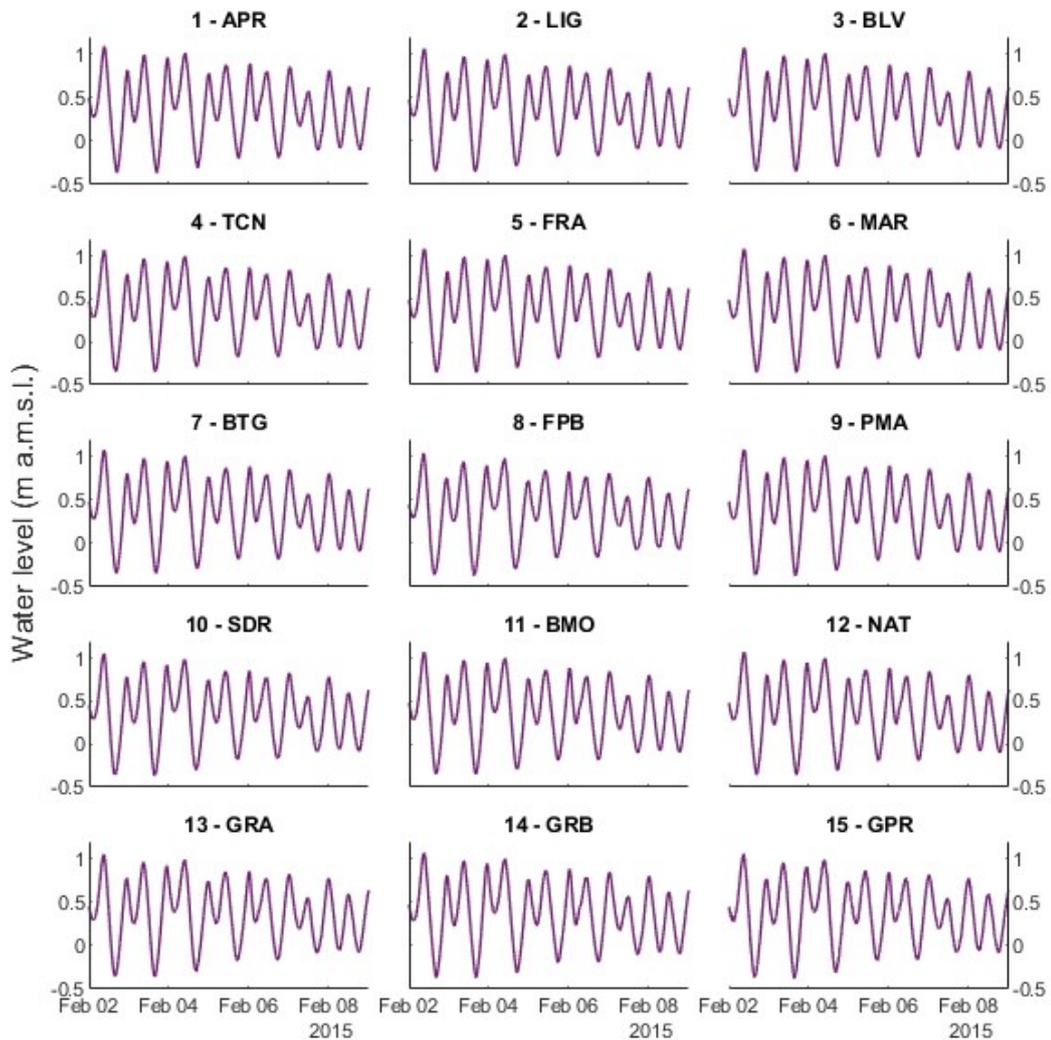


Figura 7-18: Livelli modellati nella simulazione 02-09 Febbraio 2015 senza condizioni al contorno di vento.

### **Confronto fra le simulazioni: 02 - 09 Febbraio 2015**

Per quantificare quanto sia l'errore sulla stima dei livelli nel caso in cui non venga applicato il vento sul reticolo di calcolo si è proceduto ad un confronto fra i livelli modellati nelle due simulazioni.

Si riportano, in particolare, le immagini relative alle stazioni che subiscono una maggiore influenza del vento che comporta variazioni dell'andamento dei livelli fra le due simulazioni.

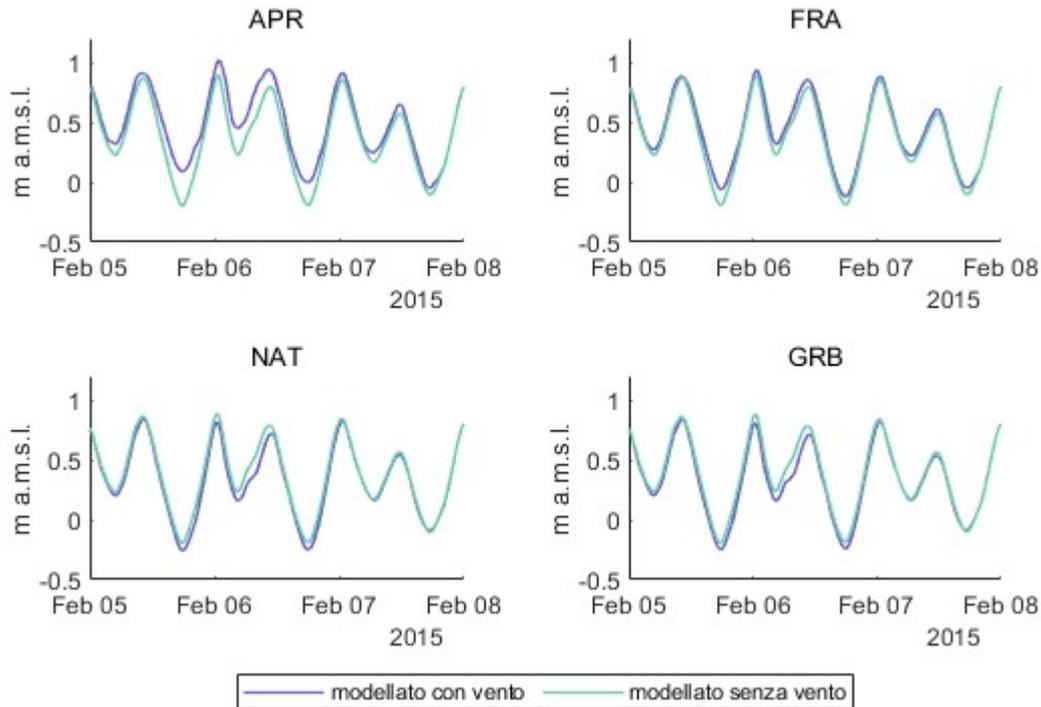


Figura 7-19: Andamento dei livelli nelle due simulazioni 2-9 Febbraio 2015.

Del confronto con i livelli misurati nelle due simulazioni (Figura 7-19), si nota che fra il 5 e l'8 Febbraio 2015, quando la velocità del vento supera i 5 m/s fino ad arrivare a circa 16 m/s, nella seconda simulazione, in cui non viene applicata la forzante esterna di vento sull'intera laguna, i livelli vengono sottostimati, rispetto a quelli che invece si realizzano per la presenza dell'evento meteorologico (prima simulazione), nelle stazioni che si trovano ad Ovest nella laguna (in particolare: APR e FRA); vengono invece sovrastimati quelli che si trovano ad Est nella laguna (in particolare: GRB e NAT).

Una stima dell'errore massimo,  $E_{max} = \max(l_{nowind} - l_{wind})$ , che si commette in ogni stazione nella sottostima/sovrastima dei livelli è data dalla massima differenza fra i livelli modellati nella simulazione 2, trascurando gli effetti dovuti al vento, e i livelli modellati nella simulazione 1, caratterizzata da vento forte di Bora con intensità fino a 16 m/s (vedi Tabella 7.3).

stazione	Errore max (m)	stazione	Errore max (m)	stazione	Errore max (m)
APR	-0.29	MAR	-0.07	BMO	+0.10
LIG	-0.11	BTG	+0.06	NAT	+0.16
BLV	-0.14	FPB	+0.11	GRA	+0.03
TCN	-0.08	PMA	+0.11	GRB	+0.017
FRA	-0.14	SDR	+0.04	GPR	+0.07

Tabella 7.3: Errore massimo di livello commesso fra le simulazioni: Sim.1 con vento di Bora e Sim.2 senza vento.

### 7.3.2 Vento di Scirocco

#### Simulazione 1: 23-30 Aprile 2016– con applicazione di vento proveniente da SE (Scirocco)

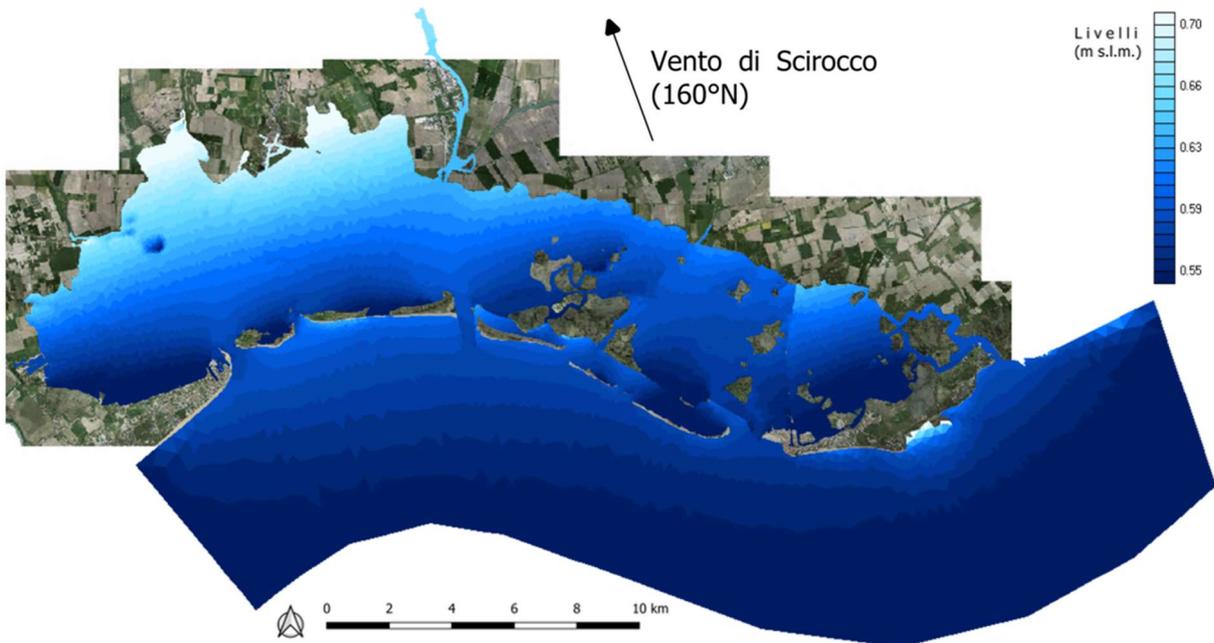


Figura 7-20: Simulazione 26 Aprile 2016 ore 21:00 con vento forte di Scirocco, fase di marea crescente con indicazione dei livelli presenti in laguna.

Anche in questo caso mediante l'utilizzo del software incidence, è stato possibile stampare una mappa a colori contenente le indicazioni sull'andamento dei livelli nel giorno 26 Aprile 2016 alle ore 21:00 (Figura 7-20). È stato scelto questo istante particolare della simulazione in quanto il vento raggiunge la sua velocità massima di 13.70 m/s con una direzione di 159°N.

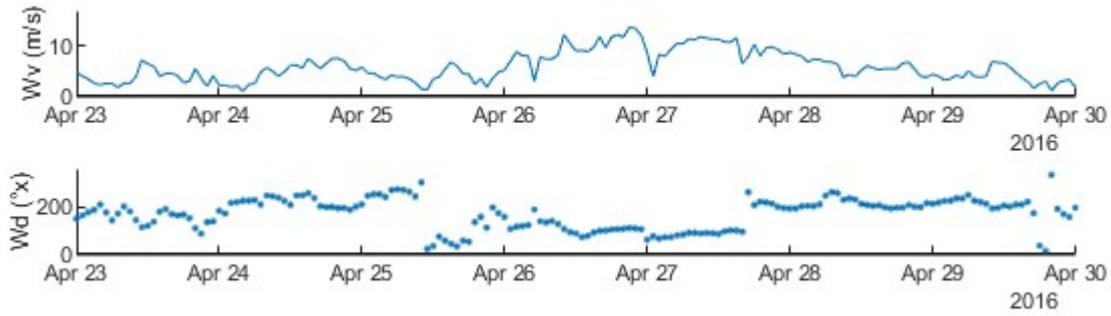


Figura 7-21: Velocità e direzione del vento nella simulazione 23-30 Aprile 2016.

Dalla Figura 7-20 si può già comprendere come il vento di Scirocco comporti un sovralzato (setup) dei livelli nella parte nord della laguna a causa dello spostamento delle masse d'acqua spinte dal vento stesso verso NO.

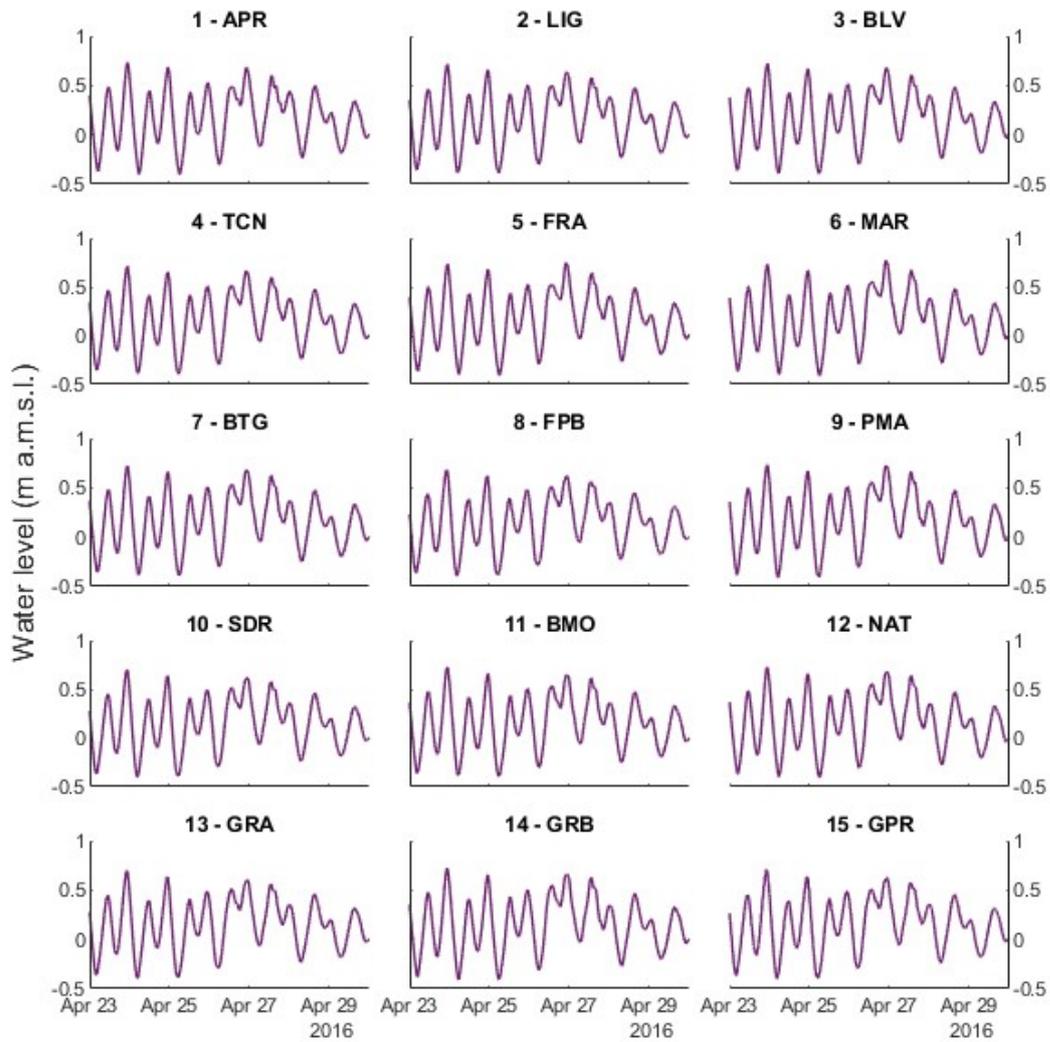


Figura 7-22: Livelli modellati nella simulazione 23-30 Aprile 2016 in condizione di vento di Scirocco.

Per quantificare il set up dovuto all'azione del vento si sono confrontati i livelli estratti in corrispondenza delle 15 stazioni interne alla laguna (Figura 6-1).

Andando a confrontare, in particolare, i livelli modellati nella simulazione 1, caratterizzata da vento forte di Scirocco con intensità fino a 13.70 m/s, della stazione di Marano (MAR), che si trova a nord all'interno dell'area lagunare, con la stazione di Lignano (LIG), posizionata vicino alla prima bocca ad ovest della laguna, si può apprezzare un setup pari a circa 16 cm (vedi Figura 7-22). Questo è stato calcolato andando a valutare la massima differenza fra i livelli nelle due stazioni nel periodo di simulazione (vedi paragrafo 7.3.3.2).

### **Simulazione 1: 23-30 Aprile 2016 – senza applicazione di vento**



*Figura 7-23: Simulazione 26 Aprile 2016 ore 21:00 senza vento, fase di marea crescente con indicazione dei livelli presenti in laguna.*

Sempre mediante l'utilizzo del software Incidenze è stata realizzata la mappa a colori che individua l'andamento dei livelli all'interno della laguna in assenza di condizioni al contorno di vento (Figura 7-23).

Per poter confrontare al meglio i livelli nelle due simulazioni è stato stampato il medesimo istante di simulazione, 26 Aprile 2016 ore 21:00.

Come si può osservare dalla Figura 7-23, l'andamento dei livelli è completamente diverso dalla precedente simulazione nello stesso istante, in quanto l'assenza di vento fa sì che gli stessi siano comandati solo dall'azione della marea.

In particolare, in questa simulazione si può vedere che i livelli, in questo istante, variano di pochi cm (al massimo 2/3 cm) all'interno della laguna, tranne per qualche piccola zona che è naturalmente depressa, coincidente spesso ai chiari presenti all'interno delle barene.

I livelli modellati nella simulazione dal 23 al 30 Aprile 2016 nella condizione senza vento applicato come condizione al contorno sono rappresentati in Figura 7-24.

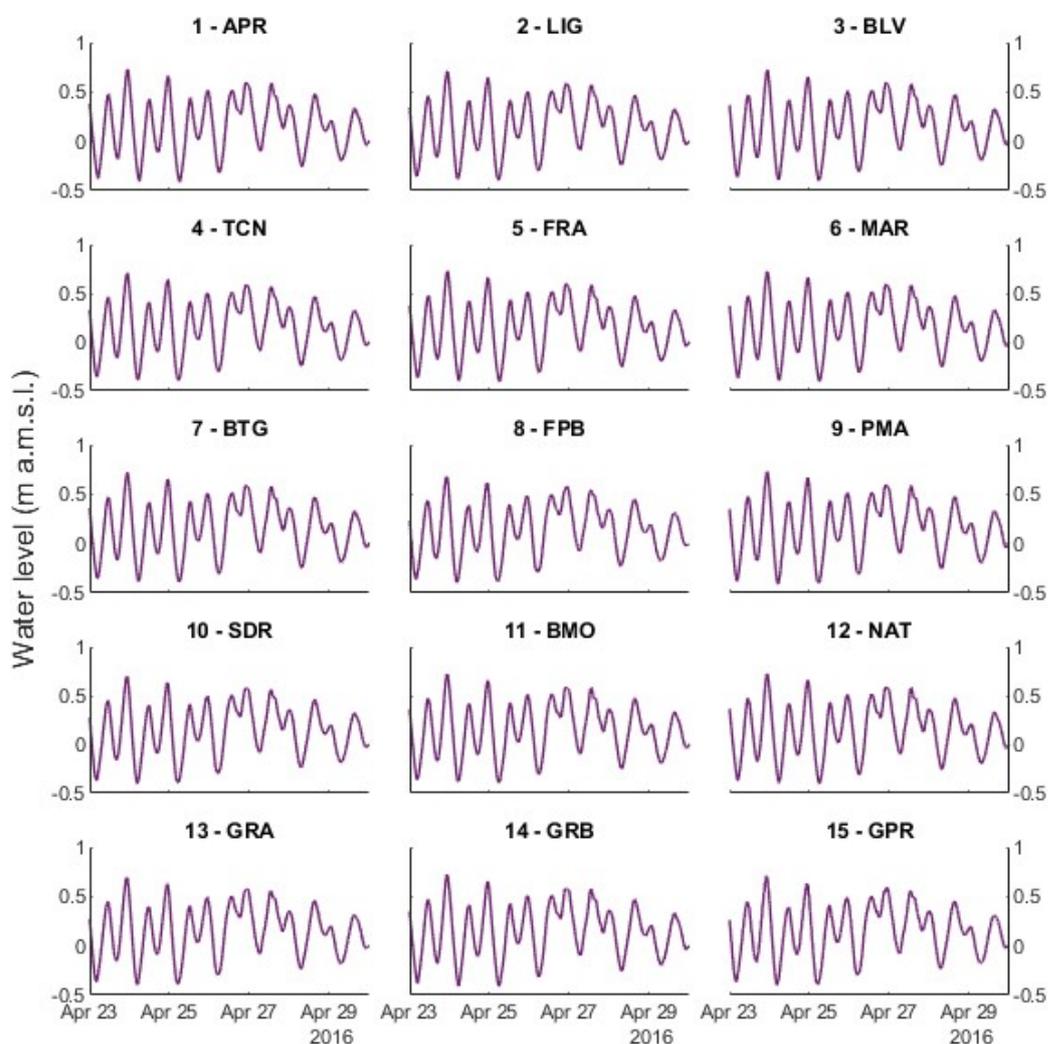


Figura 7-24: Livelli modellati nella simulazione 23-30 Aprile 2016 senza condizioni al contorno di vento.

### Confronto fra le simulazioni: 23-30 Aprile 2016

Per quantificare quanto sia l'errore sulla stima dei livelli nel caso in cui non venga applicato il vento sul reticolo di calcolo si è proceduto ad un confronto fra i livelli modellati nelle due simulazioni.

Si riportano, in particolare, le immagini relative alle stazioni che subiscono una maggiore influenza del vento che comportata variazioni dell'andamento dei livelli fra le due simulazioni.

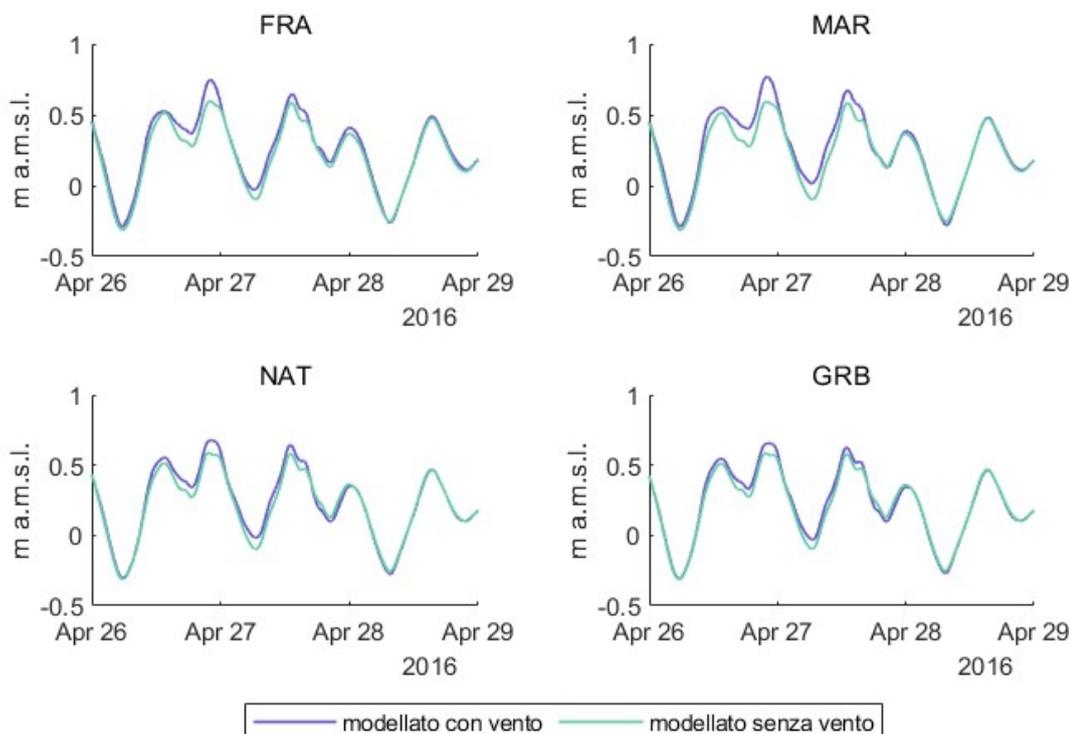


Figura 7-25: Andamento dei livelli nelle due simulazioni 23-30 Aprile 2016.

Del confronto con i livelli misurati nelle due simulazioni (Figura 7-25), si nota che fra il 26 e l'28 Aprile 2016, quando la velocità del vento supera i 5 m/s fino ad arrivare a circa 13.7 m/s, nella seconda simulazione, in cui non viene applicata la forzante esterna di vento sull'intera laguna, i livelli vengono sottostimati, rispetto a quelli che invece si realizzano per la presenza dell'evento meteorologico (prima simulazione), nelle stazioni che si trovano a Nord nella laguna.

In particolare, l'errore è più considerevole per le stazioni che si trovano a NO nella laguna (FRA, MAR), in quanto vi è minore presenza di valli da pesca che interrompono la laguna ed, inoltre, la stessa presenta una maggiore estensione ad ovest.

Una stima dell'errore massimo,  $E_{max} = \max (l_{nowind} - l_{wind})$ , che si commette in ogni stazione nella sottostima/sovrastima dei livelli è data dalla massima differenza fra i livelli modellati nella simulazione 2 trascurando gli effetti dovuti al vento e i livelli modellati nella simulazione 1, caratterizzata da vento forte di Scirocco con intensità fino a 13.70 m/s (vedi Tabella 7.4).

stazione	Errore max (m)	stazione	Errore max (m)	stazione	Errore max (m)
APR	-0.10	MAR	-0.18	BMO	-0.07
LIG	-0.05	BTG	-0.09	NAT	-0.10
BLV	-0.09	FPB	-0.04	GRA	-0.03
TCN	-0.08	PMA	-0.14	GRB	-0.09
FRA	-0.15	SDR	-0.04	GPR	-0.05

Tabella 7.4: Errore massimo di livello commesso fra le simulazioni: Sim.1 con vento di Bora e Sim.2 senza vento.

### 7.3.3 Confronto fra set up della laguna di Grado e Marano e quella di Venezia

Il set up dovuto al vento calcolato nella laguna di Grado e Marano in condizioni di vento di Bora e di Scirocco è stato confrontato con il setup calcolato nella laguna di Venezia, tratto dagli studi presentati nell'articolo Mel et al. (2019).

Il confronto viene svolto a parità di velocità e direzione del vento, cioè pari a circa 60°N per vento di Bora, in modo da poter confrontare il set up calcolato nella laguna di Grado e Marano nella simulazione del 02-09 Febbraio 2015, e circa 160°N per vento di Scirocco, in modo da poter confrontare il set up calcolato nella laguna di Grado e Marano nella simulazione del 23-30 Aprile 2016.

Si evidenzia in particolare, che nella trattazione dell'articolo R.Mel et al. (2019) il vento viene applicato con intensità e direzione costante per tutta la durata della simulazione, mentre nelle simulazioni realizzate sulla laguna di Grado e Marano la velocità e la direzione del vento sono variabili in funzione di quanto registrato nel periodo utilizzato per la simulazione nella stazione meteorologica di Grado.

Le Figura 7-26 e Figura 7-27 rappresentano rispettivamente la Laguna di Grado-Marano e la Laguna di Venezia, con indicazione delle stazioni interne in corrispondenza delle quali sono stati modellati i livelli e la direzioni del vento che sono state imposte nelle simulazioni che hanno generato il setup all'interno della laguna

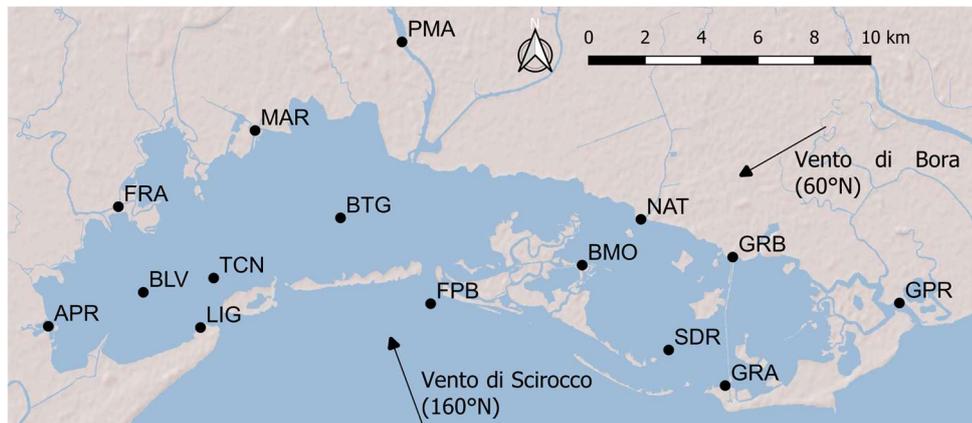


Figura 7-26: Laguna di Grado e Marano con indicazione delle stazioni mareografiche e dei venti utilizzati per il confronto del setup.

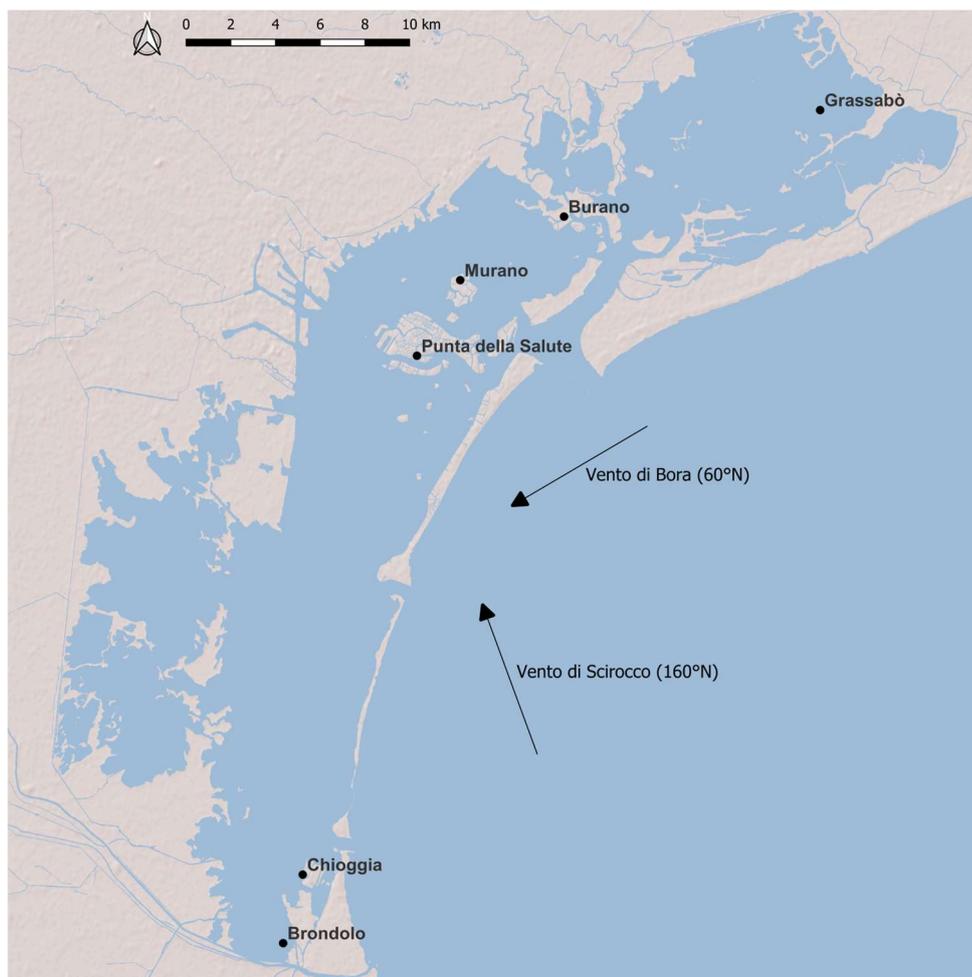


Figura 7-27: Laguna di Venezia con indicazione delle stazioni mareografiche e dei venti utilizzati per il confronto del setup.

## Vento di Bora

Nel paragrafo 7.3.1. è stato individuato per la laguna di Grado e Marano un setup pari a 40 cm fra la stazione di Grado Primero (est) e la stazione di Aprilia (ovest) generato da vento di Bora con direzione  $60^{\circ}\text{N}$  e velocità pari a 16 m/s.

Nella Figura 7-28 è riportata una sovrapposizione fra i livelli modellati ad Aprilia (APR) e a Grado Primero (GPR) nella simulazione dal 02 al 09 Febbraio 2015 dove si può apprezzare l'aumento del dislivello fra le due stazioni nei giorni 05 e 06 Febbraio dove si registra vento forte di Bora con intensità fino a 16 m/s.

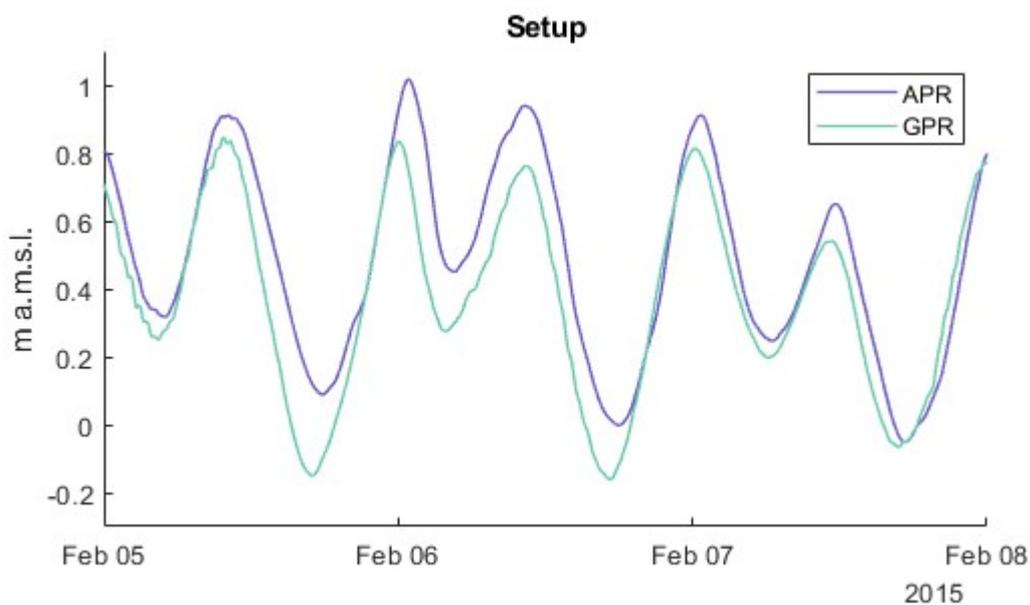


Figura 7-28: Andamento dei livelli ad Aprilia e a Grado Primero nella simulazione dal 02-09 Febbraio 2015.

Per quanto riguarda la laguna di Venezia sono state individuate 5 stazioni di misura per il confronto del set up generato dal vento: Grassabò, Burano, Murano, Punta della Salute, Chioggia, Brondolo.

Per il calcolo del setup nella laguna di Venezia si fa riferimento all'articolo di Mel et al. (2019), che mediante l'utilizzo di un modello idrodinamico bidimensionale calcola il sovrizzo dei livelli applicando velocità del vento da 0 a 30 m/s (con passo 1 m/s) e direzione di provenienza del vento da  $0$  a  $360^{\circ}\text{N}$  (con passo  $30^{\circ}$ ).

L'articolo confronta poi i risultati nella configurazione non regolata (scenario pre-Mo.S.E.) e configurazione regolata (post- Mo.S.E.), cioè simulando il regime idrodinamico nel caso in cui siano attive le barriere mobili alle bocche di porto di Lido, Malamocco e Chioggia.

Un vento con direzione  $60^\circ\text{N}$  e velocità  $16\text{ m/s}$  nella laguna di Venezia, secondo lo studio precedentemente citato, genera un dislivello di circa  $45\text{ cm}$  tra la stazione di Brondolo e la stazione di Grassabò nel caso di configurazione pre-Mo.S.E., mentre in una configurazione post- Mo.S.E. genera un dislivello di circa  $65\text{ cm}$  (vedi Figura 7-29) a testimonianza del fatto che, in una laguna regolata, gli effetti del vento sui livelli interni risultano sensibilmente incrementati.

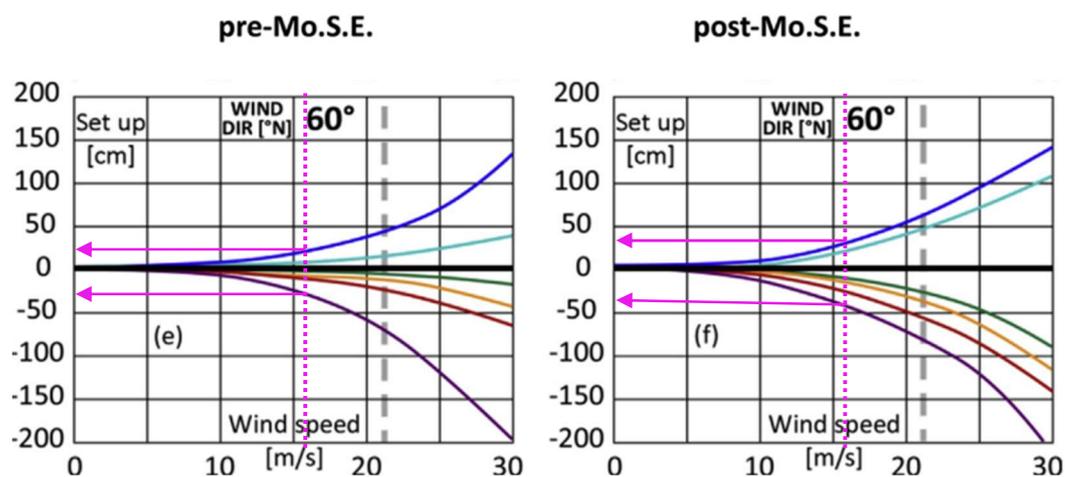


Figura 7-29: Andamento del set up nella laguna di Venezia in funzione della velocità del vento e direzione fissa pari a  $60^\circ\text{N}$  tratta da R.Mel et al (2019). I colori indicano rispettivamente: in viola la stazione di Grassabò, in rosso la stazione di Burano, in giallo la stazione di Murano, in verde la stazione di Punta della Salute, in ciano la stazione di Chioggia e in blu la stazione di Brondolo. Con la linea magenta puntinata è evidenziata la velocità di confronto pari a  $16\text{ m/s}$ , mentre con la grigia tratteggiata è evidenziata la massima velocità del vento registrata nel periodo 1999-2018

Dalla Figura 7-29 si nota che il setup indotto dal vento di Bora con direzione  $60^\circ\text{N}$  è maggiore nella configurazione post- Mo.S.E. rispetto alla configurazione pre-Mo.S.E.

Confrontando, invece, il setup nella Laguna di Grado- Marano e nella laguna di Venezia in configurazione pre-Mo.S.E. si evidenzia che gli stessi sono comparabili (rispettivamente  $40$  e  $45\text{ cm}$ ), nonostante le dimensioni molto diverse delle due lagune. La laguna di Grado-Marano presenta, infatti, una superficie di circa  $160\text{ km}^2$  rispetto alla Laguna di Venezia che ha un'area di circa  $550\text{ km}^2$ .

Inoltre, si fa notare che le dimensioni parallele alla direzione del vento di Bora ( $60^\circ\text{N}$ ) delle lagune sono rispettivamente pari a  $45\text{ km}$  per la Laguna di Venezia e  $15\text{ km}$  per la Laguna di Grado- Marano.

## Vento di Scirocco

Nel paragrafo 7.3.1. è stato individuato per la laguna di Grado e Marano un setup pari a 16 cm fra la stazione di Lignano (sud) e la stazione di Marano (nord) generato da vento di Scirocco con direzione  $160^{\circ}\text{N}$  e velocità pari a  $13.70\text{ m/s}$ .

Nella Figura 7-30 è riportata una sovrapposizione fra i livelli modellati a Marano (MAR) e a Lignano (LIG) nella simulazione dal 23 al 30 Aprile 2016 dove si può apprezzare l'aumento del dislivello fra le due stazioni nei giorni 26 e 27 Aprile dove si registra vento forte di Scirocco fino a  $13.7\text{ m/s}$ .

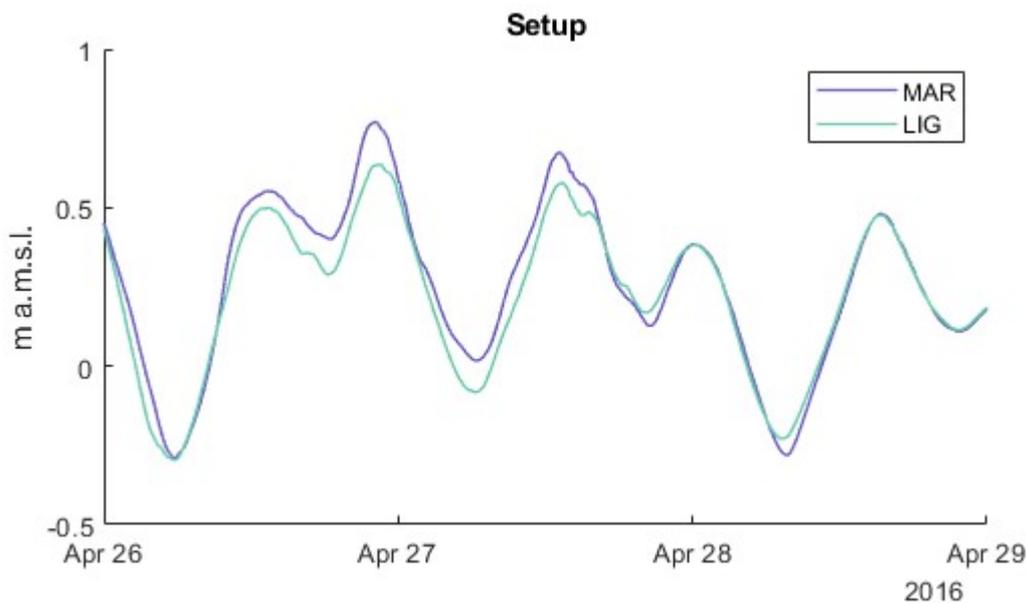


Figura 7-30: Andamento dei livelli a Marano e a Lignano nella simulazione dal 23-30 Aprile 2016.

Per il calcolo del setup nella laguna di Venezia si fa riferimento, anche in questo caso, all'articolo di Mel et al. (2019).

Un vento con direzione  $160^{\circ}\text{N}$  e velocità  $13.7\text{ m/s}$  nella laguna di Venezia, secondo lo studio precedentemente citato, genera un dislivello di circa 20 cm (15 cm per  $150^{\circ}\text{N}$  e 35 cm per  $180^{\circ}\text{N}$ ) cm tra la stazione di Grassabò e la stazione di Brondolo nel caso di configurazione pre-Mo.S.E., mentre in una configurazione post- Mo.S.E. genera un dislivello di circa 43 cm (40 cm per  $150^{\circ}\text{N}$  e 50 cm per  $180^{\circ}\text{N}$ ), (vedi Figura 7-31). Purtroppo, le stazioni di Grassabò e Brondolo risultano essere poco allineate con la direzione del vento presa in esame, al contrario delle stazioni di Lignano e Marano. Per questo motivo il confronto relativo all'effetto di setup tra i due bacini lagunari risulta meno significativo per il vento di scirocco rispetto a quanto lo è per il vento di Bora.

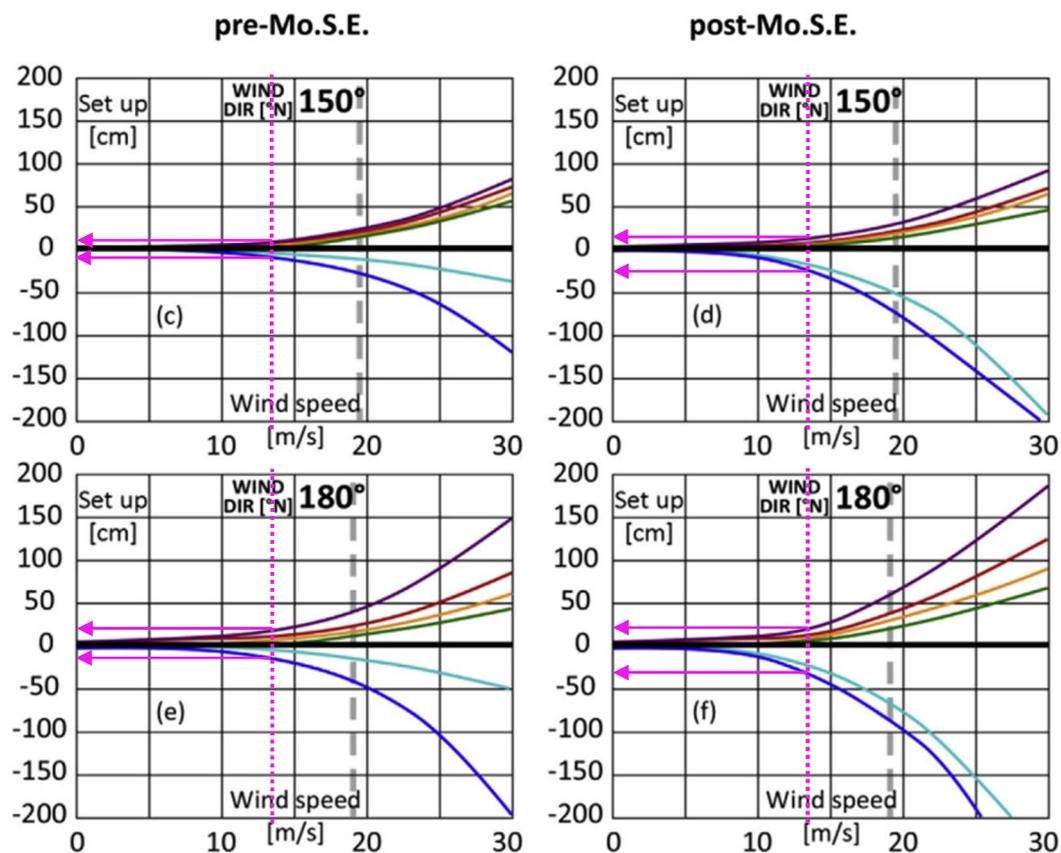


Figura 7-31: Andamento del set up nella laguna di Venezia in funzione della velocità del vento e direzione fissa pari a  $60^{\circ}N$  tratta da R.Mel et al (2019). I colori indicano rispettivamente: in viola la stazione di Grassabò, in rosso la stazione di Burano, in giallo la stazione di Murano, in verde la stazione di Punta della Salute, in ciano la stazione di Chiaggia e in blu la stazione di Brondolo. Con la linea magenta puntinata è evidenziata la velocità di confronto pari a 13.7 m/s, mentre con la grigia tratteggiata è evidenziata la massima velocità del vento registrata nel periodo 1999-2018.

Dalla Figura 7-31 si nota che il setup indotto dal vento di Scirocco con direzione  $160^{\circ}N$  è maggiore nella configurazione post- Mo.S.E. rispetto alla configurazione pre-Mo.S.E.

Confrontando, invece, il setup nella Laguna di Grado- Marano e nella laguna di Venezia in configurazione pre-Mo.S.E. si evidenzia, anche in questo caso, che gli stessi sono comparabili (rispettivamente 16 e 20 cm), nonostante le dimensioni molto diverse delle due lagune. La laguna di Grado-Marano presenta, infatti, una superficie di circa  $160 \text{ km}^2$  rispetto alla Laguna di Venezia che ha un'area di circa  $550 \text{ km}^2$ .

Inoltre, si fa notare che la dimensione delle lagune parallela alla direzione del vento di Scirocco ( $160^{\circ}N$ ) sono rispettivamente pari a 25 km per la Laguna di Venezia e 7 km per la Laguna di Grado- Marano.



## 8 Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro di tesi ha avuto come scopo primario la predisposizione di un reticolo di calcolo della Laguna di Grado e Marano e successivamente alla calibrazione del modello idrodinamico bidimensionale applicato a tale dominio computazionale.

Lo stesso potrebbe essere in futuro oggetto di modifiche al fine di migliorare la corrispondenza dei livelli modellati e quelli effettivamente misurati, in particolare, in corrispondenza della stazione di Grado Primo. Si potrebbe, infatti pensare di isolare la zona di mare aperto antistante alla Bocca di Grado Primo e imporre sulla stessa diverse condizioni al contorno, al fine di ottenere una migliore stima dei livelli sulla parte est della laguna.

Il modello calibrato ha poi consentito di svolgere alcune analisi idrodinamiche.

La prima, riguardante l'influenza dei fiumi sui livelli interni alla laguna, ha consentito di avvalorare l'assunzione fatta inizialmente per cui i fiumi non hanno capacità di invaso e non convogliano portate tali (almeno in condizioni ordinarie) da influenzare i livelli all'interno dell'area lagunare. La stessa assunzione potrebbe però essere messa in discussione in studi futuri nel caso in cui fosse possibile disporre, per i fiumi stessi, di idrogrammi di piena relativi ad eventi più consistenti rispetto alle stime delle portate medie utilizzare per condurre queste analisi preliminari.

Un'ulteriore analisi dei risultati della modellazione ha consentito la determinazione dei partiacque e, di conseguenza, di stimare l'estensione dei sotto-bacini lagunari corrispondenti alle singole bocche di porto, (Figura 7-9).

I risultati modellistici hanno permesso di evidenziare come, nel caso di presenza di vento all'interno della laguna, la nascita di una circolazione interna per effetto dello spostamento delle masse d'acqua da parte del vento modifichi in modo sostanziale l'idrodinamica lagunare di fatto annullando la presenza dei sotto-bacini.

L'ultima analisi svolta ha permesso, infine, di verificare la presenza del setup dovuto a vento di Bora proveniente da NE e di Scirocco proveniente da SE e di valutarne l'entità.

I setup della laguna di Grado e Marano sono stati confrontati con la laguna di Venezia. Gli stessi nonostante le diverse dimensioni delle lagune, sono confrontabili rispetto a quelli ottenuti per la configurazione pre. Mo.S.E. della laguna di Venezia.

Il confronto della laguna di Grado e Marano rispetto alla laguna di Venezia potrà essere ulteriormente sviluppato in futuro per analizzare non solo analogie e differenze dal punto di vista idrodinamico ma anche per quanto riguarda i fenomeni di trasporto solidi e l'evoluzione morfologica dei due ambienti lagunari a seconda delle diverse condizioni che li caratterizzano, primo fra tutti la regolazione della marea in laguna di Venezia operata attraverso il sistema Mo.S.E.

Mediante l'utilizzo del modello creato nel presente lavoro, si potranno infatti analizzare altri aspetti della laguna di Grado e Marano tra cui, ad esempio, il trasporto di sedimenti e l'evoluzione del fondo, mediante l'utilizzo degli altri moduli del modello bidimensionale, o la dinamica della temperatura all'interno della laguna.

Tutte queste indagini sono infatti già state svolte o sono in atto per quanto riguarda il bacino lagunare veneziano che da ottobre 2020 è di fatto diventato un bacino regolato in cui la propagazione delle alte maree non avverrà più in modo naturale. Come questo stia influenzando e influenzerà l'evoluzione della laguna di Venezia è un tema di spiccata attualità e poter disporre, per confronto, di informazioni relative ad un bacino simile ma non regolato come la laguna di Grado-Marano risulterà essere quanto mai utile e scientificamente significativo. In questo contesto il lavoro descritto nella presente tesi costituisce un primo, importante, passo verso questa analisi comparata tra questi due bacini così simili ma anche, soprattutto dopo l'entrata in operatività del sistema Mo.S.E., così diversi.

## 9 Bibliografia

1. Acquavita A., Covelli S., Emili A., Berto D., Faganeli J., Giani M., Horvat M., Koron N., Rampazzo F.: “Mercury in the sediments of the Marano and Grado Lagoon (Northern Adriatic Sea): Sources, distribution and speciation”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 113: 20-31 (2012);
2. Allen J.R.L.: “Morphodynamics of Holocene saltmarshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe”. *Quaternary Science Review*, 19: 1151-1231 (2000);
3. Anderson F.E.: “Resuspension of Estuarine Sediments by Small Amplitude Waves”. *Journal of Sedimentary Research*, VOL. 42: 602-607 (1972);
4. Barnett T. P., Wilkerson J. C.: “On the Interpretation of Fetch-limited Wave Spectra as Measured by an Airborne Sea-swell Recorder”. *Naval Oceanographic Office* (1967);
5. Battjes J.A., Janssen J.P.F.M.: “Energy loss and set-up due to breaking of random waves”. *Proceedings of 16th International Conference on Coastal Engineering*, 569-587. New York: Am. Soc. Of Civ. Eng. (1978);
6. Bezzi A.: “Le Barene della laguna di Marano e Grado: Analisi degli aspetti Morfo-Evolutivi nella prospettiva gestionale”. *Università degli studi di Trieste – Dottorato di ricerca in Geoscienze* (2013);
7. Bosa S., Petti M., Pascolo, S.: “Improvement in the Sediment Management of a Lagoon Harbor: The Case of Marano Lagunare”, Italy. *Water* (2021) 13, 3074;
8. Boscutti F., Marcorin I., Sigura M., Bressan E., Tamberlich F., Vianello A., Casolo V.: “Distribution modeling of seagrasses in brackish waters of Grado-Marano lagoon (Northern Adriatic Sea)”. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 164: 183-193 (2015);
9. Brambati A. (1988): “Lagune e stagni costieri: due ambienti a confronto.” *Le lagune costiere ricerca e gestione, CLEM*, 9-33 (1988);
10. Brambati A., Fonda Umani S., Olivotti R., Orel G., Perco F.: “Principi e proposte di gestione di ambienti lagunari alto-adriatici: la laguna di Grado Marano”. *Le lagune costiere: ricerca e gestione, CLEM*, 157-190 (1988);

11. Breugem W.A., Holthuijsen L.H.: “Generalized Shallow Water Wave Growth from Lake George”. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133:3(173);
12. Cahoon D.R., Reed D.J.: “Relationships among Marsh Surface Topography, Hydroperiod, and Soil Accretion in a Deteriorating Louisiana Salt Marsh”. *Journal of Coastal Research*, VOL. 11: 357-369 (1995);
13. Carniello, L., Defina A., D'Alpaos L.: “A combined wind wave-tidal model for the Venice Lagoon, Italy”. *Geophysical Research-Earth Surface*, 110, F04007 (2005);
14. Carniello L., D'Alpaos A., Defina A.: “Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins”. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 92: 263-276 (2011);
15. Collins, J. Ian.: "Prediction of shallow-water spectra.". *Journal of Geophysical Research* 77.15: 2693-2707 (1972);
16. Cosolo M., Sponza S., Fattori U.: “La laguna di Marano e Grado: un mosaico di biodiversità – un patrimonio da preservare”. Regione Autonoma Friuli-Venezia Giulia, Udine (2015);
17. D'Alpaos A., Carniello L., Rinaldo A.: “Statistical mechanics of wind wave-induced erosion in shallow tidal basins: Inferences from the Venice Lagoon”. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 40: 3402-3407 (2013);
18. D'Alpaos A., Lanzoni S., Marani M., Fagherazzi S., Rinaldo A.: “Tidal network ontogeny: Channel initiation and early development”. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 110, F02001 (2004);
19. Dorigo L., Magistrato alle acque - Ufficio idrografico: “La laguna di Grado e le sue foci : ricerche e rilievi idrografici” (1965);
20. Fagherazzi S., Wiberg P.L.: “Importance of wind conditions, fetch, and water levels on wave-generated shear stresses in shallow intertidal basins”. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 114:F03022 (2009);
21. Ferrarin C., Umgiesser G., Bajo M., Bellafiore D., De Pascalis F., Ghezzi M., Mattassi G., Scroccaro I.: “Hydraulic zonation of the lagoons of Marano and Grado, Italy. A modeling approach”. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 87: 561-572 (2010);

22. Friedrichs, C.T., Madsen O.S.: “Nonlinear diffusion of the tidal signal in frictionally dominated embayments”. *Journal of Geophysical Research*, VOL. 97: 5637-5650 (1992);
23. Fontolan G., Pillon S., Bezzi A., Villalta R., Lipizer M., Triches A., D’Aierri A.: “Human impact and historical transformation of saltmarshes in the Marano and Grado Lagoon, northern Adriatic Sea”. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 113: 41-56 (2012);
24. Green, Malcolm O. and Giovanni Coco: “Review of wave-driven sediment resuspension and transport in estuaries”. *Reviews of Geophysics* 52.1, pp. 77–117 (2014);
25. Hasselmann, K.: “On the spectral dissipation of ocean waves due to whitecapping”. *Boundary-Layer Meteorology*, 6:107-127 (1974);
26. Hesselman K. et al.: “Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)”. *Deutsches Hydrographisches Zeitschrift Supplement*, 12(A8): 1-95 (1973);
27. Holthuijsen L.H., Booij N., Herbers T.H.C.: “A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents”, *Coastal Engineering*, Vol. 13, Issue 1, Pages 23-54, (1989);
28. Komen, G.J., Hasselmann K., Hasselmann S.: “On the existence of a fully developed wind sea spectrum”. *Journal of Physical Oceanography*, 14, 1271-1285 (1984);
29. Le Hir P., Roberts W., Cazaillet O., Christie M., Bassoullet P., Bacher C.: “Characterization of intertidal flat hydrodynamics”. *Continental Shelf Research* Vol. 20, pages 1433-1459 (2000);
30. LeMéhauté, B.: “On non.saturated breskers and the wave run-up”. *Proceedings of 8th International Conference on Coastal Engineering*, 77-92. Mexico City: Am. Soc. Of Civ.Eng. (1962);
31. McCowan, John.: "VII. On the solitary wave." *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 32.194: 45-58 (1891);
32. Mel R., Carniello L., D’Alpaos L.: “Dataset of wind setup in a regulated Venice lagoon”. *Data in brief* 26 (2019) 104383;

33. Ministero dell’Ambiente e della Tutela del territorio e del mare, Museo Friulano di Storia Naturale – Comune di Udine. “Lagune, estuari e delta”. *Quaderni Habitat* 2009;
34. Möller I. Spencer T.: “Wave dissipation over macro-tidal saltmarshes: Effects of marsh edge typology and vegetation change”. *Journal of Coastal Research*, VOL.36: 506-521 (2002);
35. Petti M., Bosa S., Pascolo S.: “Lagoon Sediment Dynamics: A coupled model to study a medium-term silting of tidal channels”. *Water* (2018) 10, 569;
36. Temmerman S. Govers G., Wartel S., Meire P.: “Spatial and temporal factors controlling short-term sedimentation in a salt and freshwater tidal marsh, Sheldt estuary, Belgium, SW Netherlanda”. *Earth Surface Processes and Landforms* 28:739-755 (2003);
37. Tognin D., Finotello A., D’Alpaos A., Viero D.P., Pivato M., Mel R.A., Defina A., Bertuzzo E., Marani M., Carniello L.: “Loss of geomorphic diversity in shallow tidal embayments promoted by storm-surge barriers”. *Science Advances* 2022;
38. Tognin D.: “Natural and anthropogenic drivers of erosional and depositional dynamics in shallow tidal system”. *Università degli studi di Padova – Dottorato di ricerca in Ingegneria Civile, Edile e Ambientale* (2022);
39. Wang P.: “Principles of Sediment Transport Applicable in Tidal Environments. In: Principles of Tidal Sedimentology”. *Ed. by Richard A. Davis and Robert W. Dalrymple*. Vol. c. Dordrecht: Springer Netherlands, Chapter 2 (2012);
40. Willmarrh W., Wooldrige, C.: “Measurements of the fluctuating pressure at the wall beneath a thick turbulent boundary layer”. *Journal of Fluid Mechanics*, 14(2):187-210 (1962);
41. Young I.R., Verhagen L.A.: “The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Parth 1: Total energy and peak frequency”. *Costal Engineering*, 29(1-2), 47-78 (1996).

## 10 Sitografia

- [www.irdat.regione.fvg.it](http://www.irdat.regione.fvg.it)
- [www.venezia.isprambiente.it](http://www.venezia.isprambiente.it)
- [www.physicalgeography.net](http://www.physicalgeography.net)
- [www.cmsarpa.regione.fvg.it](http://www.cmsarpa.regione.fvg.it)