# ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

COMMISSIONE DI STUDIO Sui problemi di venezia

> VOLUME III

# LA LAGUNA DI VENEZIA E LE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE

Venezia 2017



# ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI

# Commissione di studio sui problemi di Venezia

(già Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della Laguna e della città di Venezia)

> I Il porto di Venezia a cura di Andrea Rinaldo 2014 (ebook)

II LIDIA FERSUOCH Codex Publicorum. *Atlante* Da San Martino in Strada a San Leonardo in Fossa Mala 2016

III La laguna di Venezia e le nuove opere alle bocche a cura di Luigi D'Alpaos 2017 (ebook) COMMISSIONE DI STUDIO SUI PROBLEMI DI VENEZIA

> VOLUME III

# LA LAGUNA DI VENEZIA E LE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE

a cura di LUIGI D'ALPAOS

> VENEZIA 2017

Commissione di studio sui problemi di Venezia (già Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della Laguna e della città di Venezia) Prof. Luigi D'Alpaos Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Università degli studi di Padova Prof. Gian Antonio Danieli Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Dott. Sandro G. Franchini Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Prof. Ignazio Musu Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Università Ca' Foscari di Venezia Prof. Gherardo Ortalli Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Università Ca' Foscari di Venezia Prof. Andrea Rinaldo Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Università degli studi di Padova École Polytechnique Fédérale de Lausanne Prof. Francesco Vallerani Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti Università Ca' Foscari di Venezia

#### Progetto e redazione editoriale: Ruggero Rugolo

© Copyright Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti - Venezia

30124 Venezia - Campo S. Stefano 2945 Tel. 0412407711 - Telefax 0415210598 ivsla@istitutoveneto.it www.istitutoveneto.it

#### INDICE

Presentazione	Pag.	VII
Peter A. Nelson, Nicoletta Tambroni, <i>Indagini numeriche sulla morfodinamica delle barre alternate in canali a marea</i>	»	3
LAURA TOMMASINI, ANDREA D'ALPAOS, LUCA CARNIELLO, LUI- GI D'ALPAOS, ANDREA RINALDO, <i>Ricostruzione morfologica della</i> <i>Laguna di Venezia ai tempi dell'Alberti (1611)</i>	»	29
LORENZO BONOMETTO, Scenari possibili per il riequilibrio della Laguna Centrale	»	61
A. KRUSS, F. MADRICARDO, G. MONTEREALE GAVAZZI, F. FO- GLINI, L. JANOWSKI, M. SIGOVINI, F. TRINCARDI, A New Ap- proach to the Benthic Habitat Mapping in the Venice Lagoon with a Multibeam Echosounder System	»	91
CRISTINA DA LIO, TAZIO STROZZI, PIETRO TEATINI, LUIGI TOSI, Uso integrato dei sensori satellitari SAR in banda X e L per quantificare l'eterogeneità della subsidenza in ambienti costieri di transizione: la Laguna di Venezia	»	111
Sonia Silvestri, Giovanna Nordio, Andrea D'Alpaos, Luca Carniello, <i>Effetti della costruzione dei moli alla Bocca di Lido</i> <i>sulla stabilità delle barene in Laguna Nord</i>	»	131

INDICE

Bruno Matticchio, Luca Carniello, Devis Canesso, Ele- na Ziggiotto, Marco Cordella, <i>Recenti variazioni della pro-</i>		
pagazione della marea in Laguna di Venezia: effetti indotti dalle opere fisse alle Bocche di Porto	Pag.	157
RICCARDO MEL, LUIGI D'ALPAOS, Sui sovralzi dei colmi di marea generati dal vento nella Laguna di Venezia a causa della chiusura delle paratoie mobili alle Bocche di Porto	»	185
RICCARDO MEL, LUIGI D'ALPAOS, Un criterio semplificato per il controllo degli allagamenti dei centri storici causati dai sovralzi in- dotti dal vento durante le fasi di chiusura delle Bocche di Porto	»	233
Elenco dei relatori	»	267

#### PRESENTAZIONE

Nel presentare il I volume della collana degli Atti della *Commissione di studio sui problemi di Venezia* ricostituita recentemente dall'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti si evidenziava che "oggi la frontiera delle conoscenze, pressata a Venezia da urgenze reali e da una viscerale partecipazione popolare, coinvolge una riflessione colta sull'arresto e l'inversione del degrado in considerazione dei rapporti tra intervento morfologico e condizioni di uso della laguna ai fini economici".

Le vicende più recenti riguardanti la laguna di Venezia sembrano confermare la necessità di approfondimenti nella direzione indicata dalla Commissione, tanto più se si considera l'antitesi persistente che sussiste fra gli obiettivi della salvaguardia dell'ambiente lagunare e i provvedimenti che l'uomo intende adottare per il suo sfruttamento economico.

Relativamente a questi aspetti continuano a essere pesantemente coinvolti gli interventi in via di completamento alle bocche per la difesa della laguna dalle acque alte. Osservato che l'ultimazione delle opere è stata ulteriormente spostata in avanti nel tempo, destano preoccupazione le previsioni sui loro costi di gestione e di manutenzione che, secondo stime più credibili di quelle del passato, rischiano di diventare insostenibili, al punto da precludere nei fatti l'operatività degli sbarramenti.

Si aggiungono, da qualche tempo a questa parte, forti contrapposizioni per la presenza in laguna delle grandi navi da crociera, alle quali dovrebbe da una parte essere interdetto il passaggio attraverso il bacino di San Marco, dall'altra essere comunque consentito, secondo i più recenti orientamenti, un approdo interno. Entrando attraverso la bocca di Malamocco e intervenendo opportunamente sui canali navigabili esistenti si dovrebbe permettere ai moderni *mostri del mare* di raggiungere ancora la Stazione della Marittima e, in aggiunta, attraccare ad alcune banchine di Porto Marghera opportunamente adattate per diventare nuovi punti di ormeggio.

VI

Nel fervore delle iniziative volte a sostenere l'*uso* della laguna da parte dell'uomo, continuano purtroppo a restare sullo sfondo, nonostante le crescenti contrarietà dell'opinione pubblica, i problemi della salvaguardia lagunare e, in particolare, la necessità di guardare finalmente con attenzione alla sua condizione morfologica e a un degrado, che sembra inarrestabile, delle sue forme caratteristiche (*canali, bassifondi, velme, ghebbi e barene*). Tali forme, è bene ribadirlo, non hanno solamente un valore estetico, ma anche funzionale, poiché condizionano da sempre il comportamento idraulico ed ecologico della laguna, consentendole, pur in presenza di una evoluzione continua, di non perdere ancora la sua identità.

È in questo quadro di scelte non proprio confortanti, che si inquadrano i contributi del presente volume degli Atti della Commissione. La speranza è che le nuove conoscenze e i risultati illustrati possano essere di stimolo per quanti hanno nelle loro mani il destino della laguna di Venezia, affinché si guardi con maggiore attenzione alla tutela del suo ambiente, promuovendo *usi* maggiormente compatibili con la sua intrinseca fragilità e prendendo finalmente coscienza del fatto che quanto di tale ambiente viene dissipato, per soddisfare, come direbbe Cristoforo Sabbadino, le *voglie ingorde* dell'uomo, possiede a sua volta un valore economico.

Alcuni contributi del volume sono di interesse per la laguna di Venezia, ma riguardano aspetti di carattere più generale dei bacini a marea. A tale ambito appartengono le indagini numeriche sull'evoluzione morfodinamica delle barre alternate nei canali a marea, che nascono da fenomeni di instabilità del fondo differenti però da quelli che generano le barre fluviali, gli studi sull'applicazione della tecnologia multi-beam nel rilevamento batimetrico del fondo mediante ecoscandaglio, rivolta alla mappatura del substrato bentonico dei fondali lagunari e dei relativi habitat in aree a basso fondale con applicazioni specifiche ad alcuni canali della laguna nord, nonché le indagini che introducono una strategia innovativa per l'uso integrato di sensori satellitari al fine di quantificare l'entità della subsidenza in ambienti costieri estesi, caratterizzati dalla presenza di forme eterogenee come sono quelle della laguna di Venezia.

Di interesse metodologico generale è anche il tentativo di ricostruzione morfologica della laguna di Venezia, partendo dalla mappa-

tura planimetrica di grande dettaglio di Sebastiano Alberti (1611) e ricostruendo la batimetria dei fondali mediante l'applicazione di leggi morfometriche. Nello specifico la legge di O'Brien-Jarret-Marchi per le profondità dei canali, i rapporti larghezza-profondità calcolati per la configurazione attuale della laguna, deducendo i tiranti d'acqua sui bassifondi partendo dalla batimetria del 1901 e modificandone opportunamente i valori sulla base dei tassi di innalzamento del livello medio del mare intervenuti fra il XVII e il XIX secolo. Interessante il confronto del comportamento idrodinamico di tale laguna con quello della lagune di epoche successive. Attraverso la modellazione matematica delle diverse configurazioni del bacino lagunare, si dimostra come la laguna abbia modificato in misura apprezzabile il suo comportamento a partire dalla costruzione dei moli alle bocche di porto. Inizialmente dominata dai processi dissipativi, a seguito della costruzione dei moli, prima, e dello scavo dei grandi canali navigabili, poi, la laguna è andata assumendo un comportamento quasi ovunque controllato dai fenomeni inerziali, con livelli interni di marea via via più elevati e scambi di portata e di volumi complessivi con il mare sempre maggiori.

Non meno interessanti i risultati delle note rivolte all'analisi degli effetti delle grandi opere realizzate dall'uomo per gli usi economici della laguna, a partire dalle conseguenze sulla stabilità delle barene della laguna nord della costruzione dei moli alla bocca di Lido, mediante i quali furono riuniti in un unico varco gli antichi *tre porti*. Sono evidenziati da una parte gli effetti non facilmente prevedibili e persino contro intuitivi delle opere eseguite, dall'altra il ruolo, fondamentale per la sopravvivenza o per la scomparsa delle barene, delle modificazioni del regime idrodinamico indotte dagli interventi antropici, spesso sottovalutate nelle loro conseguenze.

Più che mai attuali per il vivace dibattito intorno ai problemi della laguna i risultati delle indagini sulle variazioni determinate dalle opere fisse alle bocche, da qualche tempo ultimate, sulla propagazione dei livelli di marea all'interno del bacino lagunare. Le registrazioni sperimentali dei livelli di marea disponibili segnalano effetti di un qualche rilievo sulle ampiezze d'onda osservate e soprattutto sullo sfasamento dei colmi rispetto al mare. Potrebbero tali variazioni fornire una plausibile spiegazione degli effetti segnalati da quanti praticano la laguna sul comportamento, diverso dal passato recente, delle correnti di marea nei rii cittadini, in alcuni casi con inversione della direzione del flusso, e negli specchi d'acqua attraversati dai ponti translagunari e compresi fra Venezia e il bordo della conterminazione, con locale probabile spostamento della fascia di partiacque. Gioverebbe a questo tipo di analisi che fossero resi noti anche i risultati delle osservazioni sperimentali che dovrebbero essere state condotte sui parametri caratteristici del comportamento della laguna prima, durante e dopo la realizzazione delle opere alle bocche, nonché il commento esplicito sui risultati stessi degli studiosi degli enti che si sono dedicati a tale compito. Nessuna riservatezza al riguardo può essere, infatti, giustificata e l'informazione e la trasparenza su quanto si è osservato sono più che mai opportune, per non dire necessarie.

Relativamente ad alcune ipotesi poste alla base della progettazione delle nuove opere alle bocche, i cui lavori dopo l'ulteriore rinvio è da sperare siano finalmente portati a compimento, l'importanza di una corretta valutazione dei sovralzi dei livelli di marea generati dal vento è degna di una qualche riflessione da parte di coloro che saranno chiamati a gestire le opere stesse. Guardando alla difesa dalle acque alte dei centri storici della laguna, gli effetti del vento determinano a bocche chiuse sostanziali differenze di comportamento rispetto alla condizione di bocche aperte. Con bocche chiuse i venti di bora, a parità di altre condizioni, comportano nella laguna meridionale e in particolare a Chioggia sovralzi dei colmi di marea più che raddoppiati rispetto allo stato attuale. La circostanza sembra non essere stata considerata, assumendo in condizioni di laguna interclusa rispetto al mare sovralzi corrispondenti a quelli che si verificano a bocche aperte. Il risultato è di un qualche rilievo, poiché vanifica fra l'altro l'efficacia del cosiddetto piccolo Mo.S.E., realizzato per difendere Chioggia fino a quota 130 cm sullo zero mareografico di Punta della Salute.

Alla luce di tutto questo, per la gestione delle opere mobili alle bocche di porto è da segnalare il criterio proposto in una delle note presentate per individuare il livello interno di marea (*livello equivalente*), raggiunto il quale si dovrebbe dare inizio alla manovra di chiusura, per evitare l'allagamento di tutti i centri abitati della laguna in condizioni perturbate dall'azione del vento. La procedura suggerita evidenzia come il momento di inizio delle manovre di chiusura non possa basarsi unicamente sui livelli di marea, ma debba necessariamente tener conto delle caratteristiche del vento che si prevede soffi sulla laguna durante tutto il periodo in cui le paratoie alle bocche di porto saranno sollevate. Non è escluso che in alcune situazioni la manovra debba essere addirittura anticipata al ciclo di marea precedente a quello che è causa del fenomeno delle acque alte, con conseguente ulteriore penalizzazione della portualità.

Da ultimo si segnala un contributo, di carattere non solo metodologico, rivolto ai provvedimenti, ormai non più differibili, finalizzati al riequilibrio della laguna centrale e alla neutralizzazione dei disastrosi effetti morfologici causati dalla presenza del canale dei Petroli. Si tratta di argomenti intorno ai quali si discute da molti anni, peraltro senza mai attuare gli interventi necessari per risolvere i problemi evidenziati e proponendo opere che sono da considerare incompatibili con i caratteri particolari dell'ambiente lagunare. La proposta illustrata si sofferma, da una parte su di una concreta modifica del tracciato del canale navigabile nel suo primo tratto, ridando funzionalità idraulica ai grandi canali naturali che si dipartono dalla bocca di Malamocco, dall'altra sulla realizzazione di forme opportune in grado di neutralizzare gli effetti idrodinamici del canale a danno dei bassifondi adiacenti e delle casse di colmata, nel tratto in cui il suo tracciato si dispone con andamento parallelo a tali strutture.

Nel loro insieme i contributi scientifici pubblicati in questo volume a cura della *Commissione di studio sui problemi di Venezia* dell'Istituto Veneto, pur portando nuove interessanti conoscenze utili per meglio affrontare i non pochi problemi irrisolti riguardanti la laguna di Venezia, dimostrano, guardando alla situazione presente del bacino lagunare, quanto sia ancora lunga la strada da percorrere affinché gli aspetti legati alla sua salvaguardia ricevano la giusta attenzione da parte di quanti a vario titolo operano all'interno della laguna stessa.

Venezia, 21 novembre 2017

La Commissione

# LA LAGUNA DI VENEZIA E LE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE

# INDAGINI NUMERICHE SULLA MORFODINAMICA DELLE BARRE ALTERNATE IN CANALI A MAREA

Peter A. Nelson\*, Nicoletta Tambroni\*\*

#### 1. Introduzione

Le barre sono rilevanti elementi morfologici dei canali a marea. Le barre mareali possono presentare un'ampia varietà di caratteristiche diverse sia in termini di forma che di dimensioni. [1] classificano le barre mareali secondo tre tipologie: i) barre ripetitive, ii) barre allungate, e iii) depositi isolati, di tipo simile alle barre focive. Da un punto di vista meccanico, secondo una classificazione basata sui processi che stanno alla base della loro formazione, si può distinguere tra barre libere e forzate ([2]). Le barre libere nascono spontaneamente come risultato di un'instabilità del fondo; esse sono forme di fondo migranti osservate sia in canali relativamente stretti, nella forma di sequenze alternate di zone di scavo e deposito con fronti diagonali (barre alternate), sia in canali ampi dove formano sequenze multiple (barre multiple). La seconda classe di barre è invece associata agli effetti forzanti di varia natura che agiscono sul fondo erodibile del canale, come ad esempio la curvatura dell'asse del canale. Questo lavoro è volto allo studio delle barre alternate, che rappresentano la tipologia più comune di barre *ripetitive* e *libere* nei canali a marea ([3], [4], [5], [1]).

Capire l'origine, la dinamica, e l'eventuale stato di equilibrio delle barre nei canali a marea ha importanti implicazioni di tipo pratico e scientifico.

Le barre alternate nei canali a marea hanno lunghezze d'onda dell'ordine delle centinaia di metri ([3]) mentre la loro ampiezza tipicamente scala con la profondità ([6]). Conseguentemente, le barre

<sup>\*</sup> Department of Civil and Environmental Engineering Colorado State Unversity.

<sup>\*\*</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica ed Ambientale (DICCA), Università degli Studi di Genova.

sono elementi topografici prominenti, tali da poter condizionare, ad esempio, la navigabilità dei canali nelle lagune. Inoltre l'ampio spettro di profondità e di granulometrie di sedimenti che si generano, a causa delle interazioni tra la topografia della barra ed i flussi di marea, contribuiscono ad aumentare l'eterogeneità dell'ambiente lagunare nel suo complesso, producendo una varietà di habitat in grado di influenzare ad esempio la ricchezza e l'abbondanza di alcune specie di organismi acquatici ([7] e [8]).

Anche le barre mareali, come quelle fluviali rivestono un importante ruolo nei processi di meandrizzazione dei corsi d'acqua (e.g., [9] e [10]) e nei processi di assortimento granulometrico ([11], [12]): esse risultano pertanto un elemento essenziale per lo studio della morfodinamica dei canali a marea.

Le barre mareali presentano tuttavia anche alcune importanti differenze rispetto a quelle fluviali, ad esempio esse si formano per azione di un moto oscillante anziché unidirezionale, e in presenza di una componente rilevante di trasporto in sospensione. Negli ultimi decenni, il problema della formazione delle barre alternate nei canali a marea è stato oggetto di una certa attenzione da parte dei teorici della morfodinamica.

[2] hanno eseguito un'analisi di stabilità lineare utilizzando le equazioni del moto su acqua bassa per dimostrare che, in analogia alle barre alternate nei fiumi, le barre nei canali a marea originano a causa di una instabilità del fondo incoerente soggetto al moto mareale. L'analisi teorica ha suggerito che le barre alternate dovrebbero iniziare a formarsi quando il rapporto tra la semi-larghezza del canale e la profondità media della corrente,  $\beta$ , supera un valore critico, che è funzione della tensione adimensionale di Shields. Inoltre, secondo quanto emerso dall'analisi, la lunghezza d'onda del disturbo più instabile è dell'ordine della larghezza del canale. [13] hanno successivamente mostrato che, in presenza di armoniche superiori nella forzante mareale, le barre possono manifestare una migrazione netta nel ciclo di marea. Infine, più recentemente, [6] hanno eseguito un'analisi di stabilità lineare fondata sulle equazioni del moto in forma tridimensionale, confermando l'esistenza di un rapporto critico del parametro semi larghezza-profondità,  $\beta$ , per la formazione delle barre, ma suggerendo che l'ordine di grandezza più opportuno per descrivere

la lunghezza d'onda delle forme di fondo sia quello della profondità, anziché quello della larghezza del canale. Inoltre, il lavoro ha rivelato la presenza di due modi maggiormente instabili e caratterizzati da valori simili del coefficiente di amplificazione: al primo, corrispondono forme di fondo con lunghezze d'onda maggiori, ed al secondo, forme con lunghezze d'onda minori. Essi hanno anche suggerito che il modo corrispondente alla lunghezza d'onda minore non può essere riprodotto nell'ambito di un modello bidimensionale mediato sulla profondità.

Le forme di fondo tipiche dei canali mareali sono state anche studiate mediante un approccio di tipo sperimentale. Modelli di piccola scala di bacini soggetti ad una forzante mareale ([14], [15], [16]) hanno permesso l'osservazione in laboratorio della formazione di reti di canali mareali, di barre e di depositi focivi. Inoltre [17] hanno condotto alcuni esperimenti in un canale mareale rettilineo, a sezione rettangolare, chiuso ad un'estremità e collegato ad un bacino sottoposto all'azione di un'onda di marea all'altra. Il fondo del canale, inizialmente piano, è stato caratterizzato fin dalle prime fasi dell'esperimento dalla formazione di una serie di forme di fondo alternate, che si sono poi sviluppate fino al raggiungimento di uno stato d'equilibrio. Ulteriori conoscenze sullo sviluppo delle barre sono state raggiunte attraverso l'implementazione di codici numerici. [18], [19], [20] hanno utilizzato modelli numerici per simulare il campo di moto medio nella verticale, il trasporto di sedimenti e l'evoluzione a lungo termine del fondo di canali mareali, mettendo in evidenza come da piccole, quasi regolari, perturbazioni del fondo possano originare complesse configurazioni e forme di fondo di grande scala, caratterizzate dalla presenza di zone emerse e canali. Il paramero ß dei canali simulati in tali lavori è piuttosto grande (compreso tra 75 e 300), in questo contributo, intendiamo invece analizzare il caso di un canale caratterizzato da valori del rapporto semi larghezza-profondità più vicini al valore critico di formazione delle barre ( $\beta$ =10, [2]).

Nonostante le numerose conoscenze acquisite attraverso i modelli, teorici, sperimentali e numerici sopracitati, vi sono ancora una serie di questioni aperte sul problema delle barre alternate nei canali mareali: i) come interagiscono le barre con l'evoluzione del profilo medio del fondo nei canali a marea? ii) esse si formano in seguito ad un'instabilità del fondo di tipo assoluto o convettivo? iii) esiste una configurazione d'equilibrio per le barre mareali? iv) ed entro quali limiti le teorie lineari rappresentano uno strumento valido per predirne le caratteristiche? v) come si relazionano, infine, le caratteristiche tipiche delle barre (lunghezza d'onda e ampiezza) alle condizioni idrodinamiche locali?

Allo scopo di chiarire tali aspetti, si utilizza il modello morfodinamico bidimensionale, descritto nel paragrafo successivo. I risultati delle simulazioni sono illustrati e discussi nei paragrafi 3 e 4, mentre il paragrafo 5 conclude il contributo riportando alcune considerazioni finali.

# 2. Formulazione del modello

Si consideri un canale mareale rettilineo a sezione rettangolare chiuso ad un'estremità e collegato al mare aperto all'altra estremità (Fig. 1).









#### 2.1. Formulazione idrodinamica

Nel seguito si trae vantaggio dal fatto che nei canali mareali l'ordine di grandezza della scala longitudinale (lunghezza del canale) è molto maggiore della profondità e si utilizzano le equazioni dei moti su acqua bassa per descrivere l'idrodinamica del problema:

$$\frac{\partial d}{\partial t} + \frac{\partial du}{\partial x} + \frac{\partial dv}{\partial y} = 0$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial du}{\partial t} + \frac{\partial du^2}{\partial x} + \frac{\partial duv}{\partial y} \\ &= -gd \frac{\partial (d+\eta)}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2 v_e d \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} \left[ v_e d \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\ \frac{\partial dv}{\partial t} + \frac{\partial duv}{\partial x} + \frac{\partial dv^2}{\partial y} \\ &= -gd \frac{\partial (d+\eta)}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2 v_e d \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \left[ v_e d \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \end{aligned}$$

dove *t* è il tempo, *g* l'accelerazione di gravità,  $\rho$  è la densità dell'acqua, *x* è l'asse longitudinale del canale con origine all'imbocco e orientato verso monte (Fig. 1), *y* è l'asse trasversale, *d* e *h* sono, rispettivamente, la profondità e la quota del fondo, istantanee e locali, *u* e *v* le componenti, rispettivamente nelle direzioni *x* e *y*, delle velocità medie nella verticale,  $\tau_{bx}$  e  $\tau_{by}$  le componenti, rispettivamente nelle direzioni *x* e *y*, delle tensioni tangenziali al fondo, e *v*<sub>e</sub> la viscosità turbolenta locale. Le tensioni tangenziali al fondo sono valutate come

$$(\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho C_{\rm f} \sqrt{u^2 + v^2}(u, v)$$

dove il coefficiente di resistenza è calcolato come segue

$$C_{\rm f} = \left(6 + 2.5\ln\frac{d}{2.5d_s}\right)^{-2}$$

avendo indicato con  $d_s$  il diametro dei sedimenti.

6

Per chiudere il problema è necessario associare alle equazioni del moto una relazione per la valutazione della viscosità turbolenta. Nella presente analisi, seguendo l'approccio bidimensionale di [21], si pone:

$$v_{\rm e} = \sqrt{l_h^4 \left[ 2 \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \right] + (\gamma du_*)^2}$$

in cui  $u_*$  è la velocità d'attrito,  $\gamma$  una costante e  $l_{\mu}$  è la lunghezza di mescolamento orizzontale. In analogia alle simulazioni di [22], si è posto

$$v = 0,2$$
  $l_h = 0,28 B$ 

essendo *B* la semi-larghezza del canale.

Nel corso delle simulazioni numeriche alcune celle computazionali possono risultare temporaneamente, parzialmente asciutte. Per tenere conto di tali effetti, le equazioni del moto sono state opportunamente modificate implementando lo schema di sotto-griglia proposto da [23], secondo cui i domini parzialmente bagnati non vengono considerati perfettamente piani ma dotati di asperità irregolari, che vengono trattate statisticamente. In questo modo, il modello è in grado di garantire che la capacità di invaso del singolo elemento vari con continuità da un valore pressoché nullo, quando la quota idrometrica dell'elemento è inferiore alla quota minima delle irregolarità del terreno, al valore che compete all'intera estensione dell'elemento, quando la quota idrometrica è maggiore o uguale alla quota massima del terreno. Nelle simulazioni, l'indice di misura delle asperità della cella è stato posto pari a 1 cm, ovvero il modello di sotto-griglia entra in gioco quando la profondità locale della cella è minore o uguale a 1 cm.

#### 2.2. Formulazione morfodinamica

L'evoluzione temporale del fondo è descritta dall'equazione di [24] in forma bidimensionale, ovvero da un'equazione di continuità dei sedimenti secondo cui la convergenza (divergenza) del flusso di sedimenti è bilanciata da una variazione del profilo del fondo:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{1-p} \left( \frac{\partial q_{sx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{sy}}{\partial y} \right) = 0,$$

in cui si sono indicati con  $q_{sx}$  e  $q_{sy}$  le portate solide volumetriche per unità di larghezza, rispettivamente nelle direzioni x e y, e con p la porosità dei sedimenti.

La formulazione morfodinamica del problema è completata dall'introduzione di relazioni per la valutazione del trasporto solido. Esso è dato dalla somma del contributo di trasporto solido al fondo e  $(q_{sx'}^b q_{sy}^b)$  in sospensione  $(q_{sx'}^s q_{sy}^s)$ . Per il trasporto al fondo si assume

$$\left(q_{sx}^{b}, q_{sy}^{b}\right) = (\cos\psi, \sin\psi) \Phi \sqrt{(s-1)g \ d_{s}^{3}}$$

dove *s* è la densità relativa del sedimento, e  $\psi$  l'angolo di deviazione del trasporto al fondo rispetto alla direzione longitudinale. Si noti che tale parametro tiene conto anche degli effetti gravitazionali indotti dalla pendenza trasversale del fondo che comportano una deviazione delle traiettoria delle particelle solide rispetto alla direzione della tensione tangenziale [25]:

$$(\cos\psi, \sin\psi) = \left(\frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}}, -\frac{r}{\sqrt{\vartheta}}\frac{\partial\eta}{\partial y}\right)$$

Nella formula precedente, r è un parametro empirico pari a 0,56 secondo [26], e  $\vartheta$  è il parametro di Shields, o tensione adimensionale di Shields, definito come

$$\vartheta = \frac{u_*^2}{(s-1)gd_s}$$

L'intensità del trasporto solido al fondo è stata infine calcolata secondo la formula proposta da [27]:

$$\Phi = 8(\vartheta - \vartheta_c)^{3/2}.$$

in cui  $\vartheta_c$  è il valore critico del parametro di Shields al di sotto del quale il fondo rimane immobile.

La portata solida volumetrica in sospensione per unità di larghezza media nella verticale è stata valutata nell'ipotesi di equilibrio locale, ovvero adottando per la concentrazione media di sedimenti la classica distribuzione, lungo il tirante, di Rouse, calcolata in funzione delle caratteristiche del moto istantaneo e locale. Seguendo l'approccio di [28] risulta quindi

$$\left(q_{sx}^{s}, q_{sy}^{s}\right) = (u, v)\varphi dC_{e}$$

dove  $C_e$  è la concentrazione di equilibrio imposta ad una quota di riferimento (qui pari a 2,5 *d*) dal fondo e  $\varphi$  una funzione integrale che dipende dal numero di Rouse, definito come  $w_i/(ku_i)$ , in cui  $w_i$  indica la velocità di sedimentazione delle particelle e *k* la costante di von Karman.

#### 2.3. Condizioni al contorno

Per quanto riguarda le condizioni al contorno, all'imbocco (x=0) si è imposta un'oscillazione della quota della superficie libera h dovuta ad una marea di periodo T ed ampiezza  $a_a$ 

$$h(0, y, t) = d_0 + a_0 cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

In particolare si considera una marea forzante costituita da una singola armonica con periodo T pari a 12,44 ore. Lungo le pareti del canale, si impone l'annullamento della componente trasversale della velocità e del flusso di sedimenti, ovvero

$$v(x, \mp B, t) = 0, \qquad q_{sv}(x, \mp B, t) = 0$$

All'imbocco si assume infine che il flusso di sedimenti sia controllato dalla capacità di trasporto locale.

#### 2.4. Il modello numerico

Le equazioni del moto e della continuità dei sedimenti sono state risolte numericamente utilizzando un metodo alle differenze finite implementato su una griglia sfalsata. Le equazioni idrodinamiche sono risolte utilizzando lo schema numerico descritto in [29] e [30] e brevemente sintetizzato nel seguito. Le derivate spaziali nell'equazione di continuità e i termini gravitazionali nelle equazioni del moto sono stati discretizzati secondo uno schema alle differenze centrate del secondo ordine. I termini avvettivi nelle equazioni del moto sono trattati con uno schema QUICK upwind del secondo ordine. Le tensioni al fondo sono trattate in maniera semi implicita e i gradienti della profondità sono calcolati con uno schema Crank-Nicolson del secondo ordine.

Poiché le scale temporali tipiche della morfodinamica sono molto più grandi di quelle idrodinamiche, l'idrodinamica e la morfodinamica sono risolte in modo disaccoppiato, per cui ad ogni istante temporale, nota l'idrodinamica vengono aggiornate le quote del fondo risolvendo l'equazione di Exner, discretizzata. Al fine di evitare instabilità numeriche legate alla formazione di fronti ripidi nelle soluzioni è stato introdotto nel modello un coefficiente di viscosità artificiale, secondo il metodo proposto da [31].

# 2.5. Descrizione delle simulazioni numeriche

Il modello descritto è stato applicato al caso di un canale mareale rettilineo a sezione rettangolare chiuso ad un'estremità e collegato al mare aperto all'altra estremità (Fig. 1). Si è scelto di adottare questa semplice geometria in quanto si sono voluti escludere dall'indagine i possibili effetti legati, ad esempio, a variazioni di larghezza del corso d'acqua, e permettere un confronto diretto con i numerosi lavori di letteratura riguardanti il caso di bacini rettangolari (e.g., [32],[33], [34],[2],[35],[36],[18],[19],[20]). Inoltre, poiché il presente lavoro è finalizzato alla comprensione dei meccanismi generali responsabili dello sviluppo ed evoluzione delle barre, non si vuole ricreare o far riferimento ad un sito specifico o ad una particolare indagine di campo, bensì, nella scelta dei parametri (dimensioni del canale, diametro dei sedimenti e onda di marea), si fa riferimento ad un canale mareale generico. Il dominio computazionale, lungo 15 km e largo 80 m, è stato discretizzato in una griglia di maglie rettangolari di dimensioni 8 m x 120 m rispettivamente nella direzione trasversale e longitudinale.

La profondità media iniziale all'imbocco del canale è stata posta pari a 4 m. A tale geometria iniziale corrisponde quindi un valore di  $\beta$  pari a 10. La forzante mareale ha un periodo di 12,44 ore ed un'ampiezza di 1,5 m. Il sedimento sul fondo consiste in particelle dalla granulometria uniforme con diametro pari a 0,1 mm. Per facilitare la formazione delle barre, il fondo iniziale, caratterizzato da una debole pendenza (circa pari a 0,01 %), è stato forzato da disturbi di piccola ampiezza (inferiore ai 5 cm), distribuiti nello spazio in modo casuale. La simulazione è complessivamente durata 36200 cicli di marea (circa 51 anni) e l'intervallo di calcolo temporale è stato fissato pari a 3s.

# 3. Risultati

#### 3.1. Evoluzione del profilo medio longitudinale del fondo



Fig. 2 - Evoluzione temporale del profilo longitudinale medio del fondo del canale. I profili riportati fanno riferimento ai seguenti istanti temporali: dopo circa 2 anni (1400 cicli), 4 anni (2800 cicli), 8 anni (5650 cicli), 20 anni (14100 cicli) e 51 anni (36200 cicli) dall'inizio della simulazione.

La Fig. 2 mostra i profili medi longitudinali del fondo del canale a diversi istanti della simulazione. I profili riportati nella Fig. 2, come le topografie del fondo descritte nelle successive Figg. 3 e 4, fanno riferimento ai seguenti istanti temporali: dopo circa 2 anni (1400 cicli), 4 anni (2800 cicli), 8 anni (5650 cicli), 20 anni (14100 cicli) e 51 anni (36200 cicli) dall'inizio della simulazione. Fin dalle prime fasi, l'evoluzione del fondo è caratterizzata dalla formazione di un fronte di deposito che progressivamente migra verso l'interno del canale fino a raggiungere l'estremità chiusa del canale, in corrispondenza della quale genera una spiaggia. In particolare, nella simulazione in considerazione, le condizioni di bassa marea si realizzano per quote della superficie libera pari a 2,5 m, e, pertanto, a partire dagli 8 anni in poi la spiaggia che si forma in corrispondenza dell'estremità a monte del canale è periodicamente soggetta a fenomeni di emersione ad ogni ciclo di marea.

#### 3.2. Il processo di formazione ed evoluzione delle barre

Contestualmente all'evoluzione del profilo medio longitudinale del fondo, esso è interessato anche alla formazione di una serie di barre alternate migranti. Nella Fig. 3 è riportata la topografia del fondo del canale agli stessi istanti temporali della Fig. 2. Al fine di rendere maggiormente visibili le caratteristiche delle barre, la topografia riportata nella figura è stata ottenuta togliendo alla quota effettiva del fondo, il relativo profilo medio longitudinale. Le piccole perturbazioni random imposte al fondo del canale all'inizio della simulazione (0 cicli) si sviluppano e tendono a formare una serie di barre alternate, che, sebbene caratterizzate da piccola ampiezza, sono già riconoscibili dopo 1400 cicli di marea. Tali barre crescono e migrano verso monte, fino a stabilizzarsi, raggiungendo uno stato di 'quasi-equilibrio' dopo 36200 cicli, come mostrato nella Fig. 3.

La Fig. 4 permette una visione tridimensionale dell'assetto topografico del fondo del canale agli stessi istanti della simulazione già considerati nelle Figg. 2 e 3. Tale immagine consente di apprezzare l'evoluzione congiunta del profilo longitudinale medio del fondo e delle barre. Lo sviluppo simultaneo del fronte di deposito e dell'incipiente sistema di barre è già riconoscibile dopo 2800 cicli. Il fronte di deposito migra verso monte fino al raggiungimento della sezione chiusa del canale dove, dopo circa 5650 cicli di marea, inizia a formare una spiaggia. A partire da tale istante, nel tratto di canale più interno,



Fig. 3 - Mappa della topografia del fondo del canale rilevata a diversi istanti della simulazione. In ciascun grafico sono riportate le quote del fondo (in m) rispetto al relativo profilo medio, in modo da rendere evidenti le successioni di scavi e depositi indotti dalle forme di fondo.

il fondo inizia ad emergere periodicamente ad ogni ciclo di marea. A tal proposito si noti l'assenza di forme di fondo lungo tutto il tratto di canale a quota superiore al livello di bassa marea (2,5 m).

La dinamica spazio-temporale del processo di formazione ed evoluzione delle barre viene indagata nella Fig. 5, che riporta la posizione occupata lungo il canale, nel tempo, dagli apici di ciascuna barra (massimi locali della quota del fondo rispetto al relativo profilo medio, individuati lungo la sponda a y=40 m). In tale grafico, l'intervallo spaziale tra le curve misura la lunghezza d'onda delle barre, mentre la



Fig. 4 - Mappa tridimensionale della topografia del fondo del canale rilevata a diversi istanti della simulazione.

pendenza delle curve risulta pari all'inverso della celerità delle barre. Pertanto, linee verticali sono rappresentative di barre stazionarie o non soggette a migrazione. 16



Fig. 5 - Posizione lungo il canale, occupata, nel tempo, dagli apici delle barre individuati lungo la sponda corrispondente a y=40 m.

La Fig. 5 mostra quindi che, inizialmente le barre migrano verso monte, e che, con il procedere della simulazione, alcune barre iniziano ad emergere (ad es. in x=7500 m, dopo circa 20000 cicli di marea), e progressivamente rallentano, diventando pressoché stazionarie all'approssimarsi della configurazione di equilibrio. Dopo 1400 cicli l'intervallo spaziale medio tra due picchi successivi delle forme di fondo (lunghezza d'onda delle barre) è pari a circa 776 m, con una deviazione standard di 213 m, per cui ogni singola barra presenta valori delle lunghezze d'onda piuttosto variabili. Verso la fine della simulazione (dopo 36200 cicli), la lunghezza d'onda delle barre diventa più grande e regolare (mediamente è pari a 1414 m, con deviazione standard di 48 m). Al carattere a flusso dominante del campo di moto nelle prime fasi evolutive della simulazione corrisponde una migrazione netta delle barre verso monte.

La Fig. 6 mostra la distribuzione, lungo l'asse del canale, dei massimi delle velocità in fase di flusso e di riflusso, a diversi istanti della simulazione. Analogamente, in Fig. 7 sono riportate le curve rappresentanti il flusso netto di sedimenti nel ciclo mareale, mediato nella direzione trasversale, per ogni sezione del canale. La Fig. 6 dimostra come nelle fasi iniziali dell'evoluzione, per l'intera lunghezza del canale, la velocità di picco nella fase di flusso supera (in alcuni casi anche in maniera notevole) quella che si realizza nella fase di riflusso. 17



Fig. 6 - Distribuzione lungo il canale dei massimi di velocità locali durante la fase di flusso (linea continua) e durante la fase di riflusso (linea tratteggiata) dopo 50, 1400, 2800, 5650, 14100 e 36200 cicli di marea dall'inizio della simulazione.



Fig. 7 - Distribuzione lungo l'asse del canale del flusso netto di sedimenti in un ciclo di marea, dopo 50, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000 e 30000 cicli dall'inizio della simulazione.

A tale campo di moto a flusso dominante corrispondono i) un flusso di sedimenti netto non nullo e diretto verso monte (Fig. 7) ed una migrazione netta delle barre verso monte (Fig. 5). Con il 18

procedere della simulazione e con il progressivo avvicinamento alle condizioni d'equilibrio, le differenze tra i picchi in fase di flusso e di riflusso tendono a svanire, così come il trasporto netto di sedimenti nel ciclo di marea tende progressivamente ad annullarsi in ogni sezione del canale. L'evoluzione temporale mostrata dalle barre nel corso della simulazione è coerente sia con i risultati teorici di [13], che prevedono che l'asimmetria del campo di moto possa dare origine ad una migrazione netta delle barre, sia con i risultati di [2] secondo cui in assenza di una componente media residua della corrente o di armoniche superiori nel campo di moto, il flusso netto di sedimenti nel ciclo di marea si annulla e le barre possono migrare in modo perfettamente simmetrico (verso monte durante la fase di flusso e viceversa durante la fase di riflusso) ad ogni ciclo di marea, senza mostrare alcuna migrazione netta.

La relazione tra le caratteristiche del moto locale e le proprietà delle barre viene indagata nella Fig. 8, in cui sono riportati i valori dell'ampiezza relativa delle barre (definita come il rapporto tra l'ampiezza della barra e la profondità media locale) e del parametro  $\beta$  (rapporto tra la semi-larghezza del canale e la profondità media locale) delle barre alla fine della simulazione. Poiché il profilo longitudinale d'equilibrio del fondo è caratterizzato da profondità medie decrescenti verso monte, il rapporto larghezza-profondità conseguentemente aumenta passando dal valore 8,5 all'imbocco, al valore 25 ad una distanza pari a 10500 m da esso. In maniera analoga, procedendo dall'imbocco verso monte, si osserva un aumento dell'ampiezza relativa delle barre, fino ad una distanza pari a 8000 m dall'imbocco. Oltre tale distanza, cui corrispondono valori di β superiori a 16, l'ampiezza relativa delle barre inizia a diminuire. Come discusso in [2], ed in analogia a quanto accade in ambito fluviale ([9]), all'aumentare di  $\beta$ , possono assumere un ruolo rilevante anche i modi superiori, con una conseguente diminuzione dell'ampiezza relativa delle barre.

La Fig. 8 mostra anche che l'ampiezza relativa delle barre si annulla a distanze dall'imbocco superiori agli 11000 m, suggerendo che le barre di fatto scompaiono nel tratto di canale in cui la quota del fondo è superiore al livello della bassa marea.



Fig. 8 - a) Quote del fondo del canale in prossimità della sponda y=40m rispetto al relativo profilo medio alla fine della simulazione. b) e c) Distribuzioni lungo l'asse del canale rispettivamente del rapporto ampiezza profondità e semilarghezza-profondità delle barre.

### 4. Discussione

#### 4.1. Instabilità assoluta o convettiva?

Le simulazioni effettuate consentono di verificare il tipo di instabilità, assoluta o convettiva, da cui scaturiscono le barre nei canali a marea. [37] hanno mostrato che l'instabilità che porta alla formazione delle barre nei fiumi è di tipo convettivo. Si definisce di tipo convettivo un'instabilità tale da richiedere una forzante persistente nel tempo, ad esempio nel caso delle barre fluviali, esse possono svilupparsi a partire da una perturbazione iniziale del fondo, ma se la perturbazione non persiste nel tempo, le barre migrano lasciando il fondo indisturbato alle loro spalle. 20



Fig. 9 - Evoluzione temporale della quota del fondo rispetto il relativo valore medio nella trasversale, nel punto situato ad una distanza pari a x=597,6 m dall'imbocco e presso la sponda corrispondente a y=40 m.

Nelle nostre simulazioni, le barre si formano invece in modo continuo all'imbocco fino al raggiungimento di una condizione di 'equilibrio'. In Fig. 9 è riportata l'evoluzione temporale della quota del fondo rispetto il relativo valore medio nella trasversale, nel punto situato ad una distanza pari a x=597,6 m dall'imbocco e presso la sponda corrispondente a y=40 m del canale. Tale figura mostra che le barre si formano in modo pressoché spontaneo all'imbocco nei primi 5000 cicli di marea, dopodiché a causa degli effetti legati alle non linearità del problema ed alla finitezza dell'ampiezza delle barre, esse sembrano tendere verso uno stato d'equilibrio. A differenza del caso fluviale, le barre non migrano lasciando il fondo piano alle loro spalle, suggerendo che l'instabilità delle barre alternate mareali sia di tipo assoluto invece che convettivo. Quest'ultima rappresenta un'importante differenza tra il carattere mareale e fluviale delle barre, non ancora messa in evidenza nell'ambito del presente campo di ricerca.



Fig. 10 - Curva di stabilità marginale (linea continua) calcolata con il modello di [13] per valori dei parametri caratteristici delle condizioni che si realizzano all'inizio della simulazione in prossimità dell'imbocco del canale.  $\beta$  è il parametro semi larghezza-profondità e  $\lambda$  il numero d'onda adimensionale della perturbazione. La linea tratteggiata indica, per ogni valore di  $\beta$ , il valore di  $\lambda$  con il coefficiente di amplificazione massimo.

#### 4.2. *Confronto con la teoria lineare*

[13] hanno effettuato un'analisi di stabilità lineare del campo di moto medio nella verticale e del trasporto di sedimenti in canali mareali di lunghezza infinita, allo scopo di studiare, nell'ambito di una teoria lineare, la formazione delle barre mareali. Tale modello lineare è stato qui applicato per la derivazione delle curve di stabilità marginali delle barre, imponendo, ai parametri del problema, i valori corrispondenti alle condizioni che si realizzano all'imbocco del canale (x=896,4 m), nelle fasi iniziali della simulazione (dopo 50 cicli di marea). I valori dei parametri utilizzati nel modello lineare sono riportati in Tab. I. In Fig. 10 sono rappresentate la curva di stabilità marginale e la curva di crescita massima suggerite dall'analisi lineare. In particolare, lungo l'asse delle ordinate è riportato il parametro  $\beta$ , mentre lungo l'asse delle ascisse è riportato il numero d'onda adimensionale, definito come  $\lambda=2\pi B/L$ , essendo L la lunghezza d'onda delle perturbazioni. Tab. I - Parametri adimensionali utilizzati nel modello lineare, e corrispondenti alle condizioni che si verificano all'imbocco all'inizio della simulazione. R è definito come  $\sqrt{(s-1)g d_s^3}/v$ , dove v è la viscosità cinematica dell'acqua.

PARAMETRI	Valori			
Numero di Reynolds dei sedimenti (R <sub>p</sub> )	4			
Parametro di Shields (9)	0,37			
Diametro adimensionale dei sedimenti $(d_s/d_0)$	0,000025			

La regione di piano al di sopra della curva di stabilità marginale è instabile, ovvero perturbazioni caratterizzate da numeri d'onda adimensionali e valori di  $\beta$  tali da ricadere in questa parte di piano, secondo l'analisi teorica, sono destinate a crescere nel tempo e generare barre alternate. Per valori alti di  $\beta$ , può esistere pertanto un intervallo finito di numeri d'onda instabili, e caratterizzati da valori positivi del coefficiente d'amplificazione, la linea tratteggiata indica quello con il coefficiente d'amplificazione massimo. Occorre fare alcune importanti osservazioni a riguardo di tale curva. Innanzitutto essa suggerisce l'esistenza di un valore minimo di β tale per cui le perturbazioni possono essere instabili. Nel nostro caso tale valore è circa pari a 9, ovvero molto simile al valore che caratterizza le fasi iniziali della simulazione  $(\beta=10)$ . Infatti, come dichiarato nell'introduzione, uno degli scopi dell'analisi è proprio quello di studiare le condizioni prossime alla criticità. In secondo luogo, il numero d'onda caratterizzato dal massimo coefficiente d'amplificazione (il numero d'onda preferito, corrispondente all'intersezione delle curve in Fig. 10) è pari a 0,323, cui corrisponde una lunghezza d'onda delle barre pari a circa 778 m. Tale stima sembra essere piuttosto vicina al valore medio della lunghezza d'onda delle barre osservate nelle fasi iniziali della simulazione (circa 776 m, come discusso precedentemente). Tale accordo è sorprendente e suggerisce che sia i modelli lineari che quelli non lineari, catturano gli stessi importanti processi nelle fasi iniziali della formazione delle barre alternate nei canali a marea.

Tuttavia le simulazioni effettuate con un modello non lineare (Figg. 5 e 8) mostrano come le barre nel tempo tendano verso uno stato di equilibrio, caratterizzato da forme di fondo con lunghezza

23

d'onda pari a circa 1400 m, un valore molto maggiore rispetto a quello predetto dal modello lineare. Ciò suggerisce che, nel corso della loro evoluzione congiunta con il profilo medio del fondo, le barre stesse possano esercitare un effetto retroattivo sul campo di moto. Le conseguenti, reciproche interazioni di carattere non lineare, portano le forme di fondo a raggiungere una condizione caratterizzata da un'ampiezza finita e da una lunghezza d'onda molto maggiore di quella predetta nell'ambito di una teoria lineare.

Tali considerazioni, nel complesso suggeriscono che un modello bidimensionale, fondato sulle equazioni del moto mediante nella verticale, rappresenta un valido strumento d'indagine nei processi di formazione ed evoluzione delle barre mareali. Tuttavia, tale modello non è in grado di catturare tutte le possibili condizioni che possono portare alla formazione delle barre negli ambienti a marea. Ne è un chiaro esempio l'esperimento di [17], che ha mostrato la formazione una serie di scavi e depositi alternati in un modello in scala di un canale mareale, chiuso ad una estremità e forzato da oscillazioni di marea all'altra. Qualora il modello numerico descritto venga applicato agli esperimenti, esso è in grado di riprodurre con buona accuratezza l'evoluzione del profilo medio longitudinale del fondo, ma non la formazione delle forme di fondo osservate in laboratorio. In altre parole, qualora al modello numerico vengano imposti i valori dei parametri tipici dell'esperimento esso non predice la formazione di alcuna forma di fondo. Dunque, per quale ragione il modello non è in grado di riprodurre le forme di fondo osservate negli esperimenti di [17]? [6] hanno recentemente sviluppato un'analisi di stabilità lineare fondata sulle equazioni del moto tridimensionali per lo studio delle barre e delle dune nei canali a marea. I risultati mostrano l'esistenza di due modi maggiormente instabili, caratterizzati da valori simili del coefficiente di amplificazione, e che un modello fondato sulle equazioni del moto mediate sulla profondità può catturare solo il modo, a cui corrispondono forme di fondo caratterizzate dai valori maggiori della lunghezza d'onda (le barre), ma non è in grado di rilevare quello associato a forme di fondo con lunghezze d'onda inferiori (le dune). Tale limite può essere superato solo con l'ausilio di modelli fondati sulle equazioni del moto tridimensionali. Imponendo al modello lineare tridimensionale i valori dei parametri dell'esperimento di [17], [6]

hanno trovato un buon accordo tra i risultati teorici e sperimentali. In particolare, le forme di fondo osservate in laboratorio sembrano avere lunghezze d'onda confrontabili con quella associata al modo più instabile caratterizzato dalla lunghezza d'onda minore. Queste osservazioni sembrano suggerire che le forme di fondo osservate negli esperimenti di [17] possano essere riproducibili solo nell'ambito di modelli tridimensionali. Rimane pertanto un'importante problema aperto: che tipo di forme di fondo si osservano nei canali mareali reali? Sfortunatamente, al momento non vi è sufficiente disponibilità di dati di campo per poter affrontare in maniera esaustiva il problema. Tuttavia, la sempre più crescente disponibilità di strumenti ad alta risoluzione per la mappatura del fondo (ad esempio [38], [39], [40]) potrà agevolare la racconta dei dati necessari a chiarire la questione.

### 5. Conclusioni

In questo contributo si propone un modello morfodinamico per lo studio della formazione ed evoluzione delle barre alternate nei canali mareali, con lo scopo di chiarire alcuni aspetti sulla natura dell'instabilità delle barre e sull'equilibrio dei canali mareali.

La simulazione mostra che, sin dalle prime fasi dell'evoluzione, contestualmente alla formazione di un'onda di sedimenti che progressivamente migra verso l'interno del canale dando origine ad una spiaggia emersa, si generano anche una serie di barre alternate.

Nel corso del processo evolutivo, le barre migrano verso l'interno del canale a causa del carattere a flusso dominante del campo di moto. Esse inoltre crescono in ampiezza ed aumentano la propria lunghezza d'onda fino al raggiungimento di uno stato di 'equilibrio'. Con l'approssimarsi delle condizioni d'equilibrio, il flusso netto di sedimenti nel ciclo di marea tende ad annullarsi ovunque nel canale mareale e le barre non mostrano più alcun spostamento netto nel ciclo di marea. Il valore dell'ampiezza delle forme di fondo sembra essere in parte controllato dal valore del rapporto tra larghezza e profondità locale, mentre il tratto di canale caratterizzato da quote del fondo superiori al livello di bassa marea non presenta alcuna forma di fondo. Nel corso della simulazione le barre alternate sembrano originarsi in seguito ad 25

un'instabilità di tipo assoluto del fondo erodibile del canale a marea; ciò le distingue dalle barre fluviali la cui instabilità è stata mostrata ([37]) essere invece di carattere convettivo. La lunghezza d'onda delle barre nelle prime fasi della loro evoluzione è confrontabile con quella predetta dal modello lineare di [13]. Tuttavia, con il procedere della simulazione l'ampiezza delle forme di fondo cresce, e gli effetti legati alle non linearità del problema sembrano essere più rilevanti, conducendo a forme di fondo caratterizzate da lunghezze d'onda superiori a quelle predette dalla teoria lineare di [13]. Nel complesso tali considerazioni sembrano suggerire che sia i modelli lineari che quelli non lineari, fondati sulle equazioni del moto mediate sulla profondità sono un valido strumento nella modellazione morfodinamica dei canali a marea. Tuttavia, [6] hanno mostrato che in alcuni casi, come ad esempio negli esperimenti di [17], essi possono non essere del tutto adeguati alla descrizione delle forme di fondo, e si debba invece ricorrere a modellazioni di tipo tridimensionali.

Nel presente lavoro si è scelto di proposito di limitare l'indagine ad un caso molto semplice di canale mareale rettilineo a sezione rettangolare forzato da una marea costituita da una singola armonica, allo scopo di mettere inevidenza solo alcuni processi. Ciononostante, tale lavoro si presta facilmente ad estensioni ed approfondimenti futuri, quali, ad esempio, lo studio degli effetti legati alle variazioni di larghezza nel canale, alla presenza di una portata fluviale da monte, o all'innalzamento del livello medio del mare, sulla morfodinamica dei canali a marea.

# 6. Bibliografia

- [1] Dalrymple, R.W., Rhodes, R.N., 1995. Estuarine dunes and bars. *Developments in Sedimentology* 53, 359-422.
- [2] Seminara, G., Tubino, M., 2001. Sand bars in tidal channels. Part 1. Free bars. *Journal of Fluid Mechanics* 440, 49-74.
- [3] Barwis, J.H., 1978. Sedimentology of some South Carolina tidal-creek point bars, and a comparison with their fluvial counterparts, in: Miall, A.D. (Ed.), *Fluvial Sedimentology*. Can. Soc. Petrol. Geol. Mem. volume 5, 129-160.
- [4] Ashley, G.M., Ze, M.L., 1988. Tidal channel classification for a low mesotidal salt marsh. *Marine Geology* 82, 7-32.

#### 26 PETER A. NELSON, NICOLETTA TAMBRONI

- [5] Dalrymple, R.W., Knight, R., Zaitlin, B.A., Middleton, G.V., 1990. Dynamics and facies model of a macrotidal sand-bar complex, Cobequid Bay Salmon River Estuary (Bay of Fundy). *Sedimentology* 37, 577-612.
- [6] Blondeaux, P., Vittori, G., 2011. Dunes and alternate bars in tidal channels. *Journal of Fluid Mechanics* 670, 558-580.

[7] Elliott, M., Hemingway, K.L., 2008. Fishes in estuaries. John Wiley & Sons.

- [8] Franco, A., Franzoi, P., Malavasi, S., Riccato, F., Torricelli, P., 2006. Fish assemblages in different shallow water habitats of the Venice Lagoon, in: Queiroga, H., Cunha, M.R., Cunha, A., Moreira, M.H., Quintino, V., Rodrigues, A.M., Serodio, J., Warwick, R.M. (Eds.), *Marine Biodiversity: Patterns and Processes, Assessment, Threats, Management and Conservation.* Springer, 159-174.
- [9] Blondeaux, P., Seminara, G., 1985. A unified bar-bend theory of river meanders. *Journal of Fluid Mechanics* 157, 449-470.
- [10] Braudrick, C.A., Dietrich, W.E., Leverich, G.T., Sklar, L.S., 2009. Experimental evidence for the conditions necessary to sustain meandering in coarse-bedded rivers. *Proc Natl Acad Sci* U S A 106, 16936{41. doi:10.1073/pnas.0909417106.
- [11] Dietrich, W.E., Smith, J.D., 1984. Bed load transport in a river meander. Water Resources Research 20, 1355-1380.
- [12] Nelson, P.A., Dietrich, W.E., Venditti, J.G., 2010. Bed topography and the development of forced bed surface patches. *Journal of Geophysical Research* 115, F04024. doi:10.1029/2010JF001747.
- [13] Garotta, V., Pittaluga, M.B., Seminara, G., 2006. On the migration of tidal free bars. *Physics of Fluids* 18, 096601.
- [14] Stefanon, L., Carniello, L., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., 2010. Experimental analysis of tidal network growth and development. *Continental Shelf Research* 30, 950-962.
- [15] Vlaswinkel, B.M., Cantelli, A., 2011. Geometric characteristics and evolution of a tidal channel network in experimental setting. *Earth Surface Processes and Landforms* 36, 739-752. doi:10.1002/esp.2099.
- [16] Kleinhans, M.G., van der Vegt, M., van Scheltinga, R.T., Baar, A.W., Markies, H., 2012. Turning the tide: experimental creation of tidal channel networks and ebb deltas. *Netherlands Journal of Geosciences* 91, 311-323.
- [17] Tambroni, N., Pittaluga, M.B., Seminara, G., 2005. Laboratory observations of the morphodynamic evolution of tidal channels and tidal inlets. *Journal of Geophysical Research* 110, F04009. doi:10.1029/2004JF000243.
- [18] Hibma, A., De Vriend, H.J., Stive, M.J.F., 2003. Numerical modelling of shoal pattern formation in well-mixed elongated estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, 981-991.
- [19] Hibma, A., Schuttelaars, H.M., De Vriend, H.J., 2004. Initial formation and longterm evolution of channel-shoal patterns. *Continental Shelf Research* 24, 1637-1650.
- [20] van der Wegen, M., Roelvink, J.A., 2008. Long-term morphodynamic evolution of a tidal embayment using a two-dimensional, process-based model. *J. Geophys. Res* 113, C03016. doi:10.1029/2006JC003983.
- [21] Stansby, P.K., 2006. Limitations of depth-averaged modeling for shallow wakes. *Journal of Hydraulic Engineering* 132, 737.

- [22] Tambroni, N., C. Ferrarin and A. Canestrelli, 2010, Benchmark on the numerical simulations of the hydrodynamic and morphodynamic evolution of tidal channels and tidal inlets, *Continental Shelf Research* vol. 30, 963-983.
- [23] Defina, A., 2000. Two-dimensional shallow ow equations for partially dry areas. Water Resources Research 36, 3251-3264.
- [24] Exner, F. M., 1925, Uber die Wechselwirkung zwischen Wasser und Geschiebe in Flüssen (in German), Sitz. Acad. Wiss. Wien Math. Naturwiss. Abt. 2a 134, 165-203.
- [25] Seminara, G., 1998. Stability and morphodynamics. Meccanica 33, 59-99.
- [26] Talmon, A.M., Van Mierlo, M.C.L.M., Struiksma, N., 1995. Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial bed slopes. *Journal of Hydraulic Research* 33, 495-517.
- [27] Meyer-Peter, E., Müller, R., 1948. Formulas for bed-load transport, in: Proceedings of the 2nd Meeting of the International Association for Hydraulic Structures Research, 39-64.
- [28] van Rijn, L.C., 1984. Sediment transport, Part II: Suspended load transport. Journal of Hydraulic Engineering 110, 1613-1641.
- [29] Stansby, P.K., Lloyd, P.M., 2001. Wake formation around islands in oscillatory laminar shallow-water flows. Part 2. Three-dimensional boundary layer modelling. *Journal of Fluid Mechanics* 429, 239-254.
- [30] Stansby, P.K., 2003. A mixing-length model for shallow turbulent wakes. *Journal of Fluid Mechanics* 495, 369-384.
- [31] Bhallamudi, S.M., Chaudhry, M.H., 1991. Numerical modeling of aggradation and degradation in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering* 117, 1145-1164.
- [32] Schuttelaars, H.M., de Swart, H.E., 1996. An idealized long-term morphodynamic model of a tidal embayment. *European Journal of Mechanics Series B Fluids* 15, 55-80.
- [33] Schuttelaars, H.M., de Swart, H.E., 1999. Initial formation of channels and shoals in a short tidal embayment. *Journal of Fluid Mechanics* 386, 15-42.
- [34] Schuttelaars, H.M., de Swart, H.E., 2000. Multiple morphodynamic equilibria in tidal embayments. *Journal of Geophysical Research* 105, 24105-24118.
- [35] Schramkowski, G.P., Schuttelaars, H.M., de Swart, H.E., 2002. The effect of geometry and bottom friction on local bed forms in a tidal embayment. *Continental Shelf Research* 22, 1821-1833.
- [36] Schramkowski, G.P., Schuttelaars, H.M., de Swart, H.E., 2004. Non-linear channelshoal dynamics in long tidal embayments. *Ocean Dynamics* 54, 399-407.
- [37] Federici, B., Seminara, G., 2003. On the convective nature of bar instability. *Journal of Fluid Mechanics* 487, 125-145. doi:10.1017/S0022112003004737.
- [38] Wright, S.A., Kaplinski, M., 2011. Flow structures and sandbar dynamics in a canyon river during a controlled flood, Colorado River, Arizona. *Journal of Geophysical Research* 116, F01019. doi:10.1029/2009JF001442.
- [39] Guerrero, M., Lamberti, A., 2011. Flow field and morphology mapping using ADCP and multibeam techniques: Survey in the Po River. *Journal of Hydraulic Engineering* 137, 1576-1587.

27

#### PETER A. NELSON, NICOLETTA TAMBRONI

28

[40] Grams, P.E., Topping, D.J., Schmidt, J.C., Hazel, J.E., Kaplinski, M., 2013. Linking morphodynamic response with sediment mass balance on the Colorado River in Marble Canyon: issues of scale, geomorphic setting, and sampling design. *Journal* of Geophysical Research: Earth Surface 118, 361-381.

# RICOSTRUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA AI TEMPI DELL'ALBERTI (1611)

Laura Tommasini\*, Andrea D'Alpaos\*, Luca Carniello\*\*, Luigi D'Alpaos\*\*, Andrea Rinaldo\*\*

#### 1. Introduzione

La ricostruzione morfologica e batimetrica di configurazioni storiche della Laguna di Venezia è un tema di grande rilievo per l'analisi del comportamento idrodinamico della laguna stessa in epoche storiche diverse. Ricostruzioni di questo tipo sono inoltre importanti per formulare modelli matematici utili per la previsione dell'evoluzione morfologica a lungo termine di ambienti lagunari e per la comprensione dell'incidenza degli interventi antropici in un ambiente che è di per se stesso in continua evoluzione.

I rilievi batimetrici della Laguna di Venezia disponibili sono molteplici. Esistono infatti diverse batimetrie del XX e del XXI secolo (1901, 1932, 1970, 2012), mentre la più antica a oggi disponibile risale al 1810. Si tratta della prima carta idrografica redatta con criteri topografici moderni sulla base di rilievi eseguiti dal Capitano Augusto Dénaix tra il 1809 e il 1811. In questa carta sono ben riconoscibili da un punto di vista planimetrico i limiti delle barene, dei bassifondi e dei canali, e sono riportati in modo dettagliato i dati di profondità della rete principale dei canali. La mappa del Dénaix è stata infatti redatta per scopi di navigazione.

Con lo studio si è voluto estendere l'arco temporale delle batimetrie disponibili ricostruendo la Laguna di Venezia come si presentava nel XVII secolo, partendo dalla mappa storica di Sebastiano Alberti del 1611, anno della conterminazione lagunare da parte della Repub-

<sup>\*</sup> Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova.

<sup>\*\*</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA), Università degli Studi di Padova

blica di Venezia (Fig. 1). Nella mappa storica dell'Alberti non sono disponibili informazioni altimetriche, ma sono ben identificabili a livello planimetrico le principali strutture morfologiche della laguna: barene, bassifondi, canali, ghebi e chiari.

Partendo da queste considerazioni, per la ricostruzione batimetrica della rete di canali ci si è avvalsi di alcune leggi morfometriche quali: i) la legge di O'Brien-Jarrett-Marchi [1], una relazione empirica [2,3] supportata dal punto di vista teorico da Marchi, 1990 [4], che fornisce un legame tra le dimensioni di una sezione di un canale a marea e il prisma di sizigie che la modella. La relazione, inizialmente proposta per le sezioni delle bocche lagunari, è stata successivamente estesa ai canali interni [5–7]; ii) il rapporto tra larghezza e profondità nei canali lagunari osservato da Marani et al., 2002 [8] per i canali della Laguna di Venezia nella sua configurazione attuale e da Marciano et al., 2005 [9] per i canali che si diramano dalle diverse bocche del Dutch Wadden Sea.

Le quote batimetriche dei bassifondi sono invece state dedotte a partire dai dati più antichi a disposizione, riportati nella mappa del 1901, opportunamente modificati analizzando i tassi di innalzamento del medio mare relativo [10,11].

Le informazioni batimetriche così ricostruite sono state utilizzate per implementare un reticolo di calcolo bidimensionale sulla base della mappa dell'Alberti opportunamente georeferenziata. Tale reticolo è stato utilizzato per analizzare, mediante un modello matematico [12–15] il comportamento idrodinamico della laguna del XVII secolo. I risultati sono stati confrontati con quelli della laguna nelle epoche successive per le quali erano già disponibili analoghi tipi di modellazione matematica [16,17].

# 2. Metodi e modelli

# 2.1. Rapporto larghezza profondità

Una delle relazioni più semplici riguardante la morfologia dei canali è il rapporto tra la larghezza (B) e la profondità (D),  $\beta$ =B/D [8,18,19] fattore fondamentale per la caratterizzazione delle sezioni dei canali lagunari [20]. Questo rapporto è stato analizzato in diversi studi, ma una relazione basata sui processi che consenta di determinare  $\beta$  in funzione delle forzanti ambientali (le forzanti di marea, le caratteristiche dei sedimenti, la geometria dei partiacque) non è ancora stata proposta.

Le numerose osservazioni di campo nella Laguna di Venezia [8] hanno permesso di evidenziare come il rapporto larghezza-profondità relativo ai canali nelle barene sia generalmente minore rispetto a quello dei canali che interessano i bassifondi. Il diverso valore di tale rapporto potrebbe dipendere dalla presenza della vegetazione, dall'idrodinamica e dalla percentuale di sedimenti coesivi che influenzano i processi di erosione nei canali incisi nelle zone di barena.

La relazione che ne deriva è controllata principalmente dalla larghezza del canale. Infatti i canali di minori dimensioni che incidono le barene, caratterizzati da larghezze inferiori ai 10 m, presentano sezioni trasversali più incise con un rapporto larghezza-profondità circa costante compreso in un intervallo tra 5 e 7, mentre i canali di dimensioni maggiori presenti sui bassifondi, caratterizzati da larghezze maggiori di 10 m, sono meno incisi e presentano un rapporto larghezzaprofondità maggiore, che aumenta rapidamente con la larghezza del canale ( $\beta \approx 8 - 50$ ), in quanto la larghezza continua a crescere mentre la profondità si attesta su valori costanti.

I risultati di un recente studio modellistico [21] che descrive l'evoluzione morfodinamica e le caratteristiche in condizioni di equilibrio di canali lagunari, risulta in accordo con le osservazioni in campo [8,22–24]. Questo risultato è molto importante, essendo possibile inferire il valore di  $\beta$ , e da esso il valore della profondità D, conoscendo solo la larghezza B del canale. Quest'ultima grandezza può essere tratta, ad esempio, da immagini aeree o satellitari o da mappe storiche come nel caso in esame della laguna del 1611.

#### 2.2. Legge di O'Brien-Jarrett-Marchi

Le variazioni morfologiche di un bacino a marea nel lungo periodo sono legate allo scambio netto di sedimenti tra il bacino stesso e lo specchio di mare adiacente. La valutazione di tali scambi di sedimenti è tradizionalmente effettuata analizzando i flussi attraverso una sezione di controllo, localizzata generalmente in corrispondenza delle

31

bocche di porto, dove la forma della sezione trasversale si adatta alle condizioni idrodinamiche e di trasporto solido.

L'accoppiamento tra i processi idrodinamici e morfodinamici può essere sinteticamente descritto sulla base di una relazione empirica che lega l'area della sezione trasversale della bocca di un canale,  $\Omega$ , con il prisma di marea, P:

$$\Omega = k P^{\alpha} \tag{1}$$

Nella (1) il coefficiente  $\alpha$ , determinato sulla base di indagini in campo, tipicamente si colloca in un intervallo compreso tra 0.85 - 1.10 [2,3,25,26]. Questa relazione permette di descrivere il complesso comportamento di causa ed effetto tra la morfologia dei canali a marea e il flusso di marea che la percorre, non solo nelle sezioni in corrispondenza delle bocche, ma anche nelle sezioni che appartengono ai canali interni [5,7,27].

Sono stati fatti diversi tentativi per assegnare un fondamento teorico alla relazione (1) [4,26,28]. Tutti questi tentativi assumono che la marea sia sinusoidale e che nelle condizioni di equilibrio la massima tensione tangenziale al fondo sia rappresentata dalla soglia critica di incipiente movimento per i sedimenti presenti sul fondo stesso.

Marchi (1990) [4] ha considerato il problema sulla base di un approccio unidimensionale, considerando un canale rettilineo di sezione rettangolare e simulando la connessione tra il mare aperto e un bacino a marea schematico. In tale contesto è stato ricavato il valore esatto di  $\alpha = 6/7$ . Per questo motivo D'Alpaos et al., (2009) [1] hanno proposto di riferirsi alla (1) come alla legge di O'Brien-Jarrett-Marchi (OBJM), con una attribuzione che è supportata dai buoni risultati ottenuti dalla verifica della validità della relazione tra area liquida e prisma di marea per diverse centinaia di sezioni di canali lagunari nella Laguna di Venezia [7]. L'applicazione della (1) alla configurazione attuale della Laguna di Venezia [7] ha infatti permesso di dimostrare che la legge OBJM è rispettata anche per le sezioni interne della rete di canali che innerva la laguna e non solo per le sezioni delle bocche di porto. Nelle indagini viene inoltre dimostrato che per la laguna attuale il valore del coefficiente  $\alpha$  della (1) si avvicina molto a 6/7 come era stato empiricamente osservato da O'Brien (1969) [2] e teoreticamente dimostrato da Marchi (1990) [4]. La legge di O'Brien-Jarrett-Marchi non è però rispettata per i canali con sezioni trasversali di modeste dimensioni, con larghezza inferiore ai 20 m, o perché esse si asciugano completamente durante la fase di riflusso della marea o per la bassa risoluzione dei dati geometrici disponibili [27] o per l'effetto del processo di transizione asciutto-bagnato che si verifica sulle superfici di barena che sono innervate da tali canali [7,29].

### 2.3. Modello idrodinamico

Il modello matematico utilizzato per studiare il comportamento idrodinamico della laguna è basato su di uno schema numerico bidimensionale semi-implicito agli elementi finiti, che risulta particolarmente adatto nel caso di domini dalla morfologia complessa come la Laguna di Venezia [12,13,15]. Tale modello risolve le equazioni delle onde lunghe in acque basse, opportunamente modificate per considerare gli effetti legati ai piccoli tiranti d'acqua che caratterizzano lo specchio lagunare e la dinamica determinata dalla periodica transizione asciutto-bagnato che caratterizza le ampie aree barenali coinvolte. Per una descrizione dettagliata dello schema di calcolo si rimanda a Defina, 2000 [14] e a D'Alpaos e Defina 2007 [15]. Ci si limita a ricordare che il modello utilizzato nello studio è stato, nel corso degli anni, applicato a diversi contesti lagunari italiani [30–32] ed esteri [33,34], nei quali, il confronto tra valori calcolati e valori misurati di livello, portata e velocità ha permesso di verificare la capacità del modello numerico di riprodurre correttamente il comportamento idrodinamico degli ambienti lagunari, esaminati in tutte le loro parti.

# 3. Ricostruzione batimetrica e morfologica della laguna del XVII secolo

La base di partenza dalla quale si è iniziata la ricostruzione batimetrica e morfologica della Laguna di Venezia del XVII secolo è stata la mappa storica redatta da Sebastiano Alberti nel 1611 (Fig. 1).

33

La scelta è giustificata dal fatto che la mappa è la più antica tra le mappe storiche disponibili, nella quale le proporzioni della laguna in pianta sono ragionevolmente rispettate in modo da rendere possibile una georeferenziazione attendibile, senza dover introdurre distorsioni eccessive della mappa stessa. La mappa georeferenziata è stata utilizzata per la costruzione del reticolo di calcolo, che è stato impiegato per le diverse simulazioni effettuate con il modello idrodinamico bidimensionale [14,15,31]. La differenziazione delle varie strutture morfologiche rappresentate nella mappa è stata possibile utilizzando le sole informazioni planimetriche ricavate dalla mappa. Per la quotatura del reticolo di calcolo, come accennato in precedenza, è stato invece necessario avvalersi di opportune relazioni a seconda della struttura morfologica considerata e di assunzioni basate sull'analisi dell'andamento temporale del tasso di innalzamento del medio mare relativo.



Fig. 1 - Carta storica della Laguna di Venezia redatta da Sebastiano Alberti nel 1611 coincidente con l'anno della prima conterminazione lagunare (Museo Correr, Venezia).

Si sono di conseguenza affrontate separatamente e con ragionamenti diversi la quotatura, dei canali, dei bassifondi, delle piane subtidali, delle barene e delle bocche di porto. 35

#### 3.1. Ricostruzione della batimetria dei canali lagunari

Per poter definire la quota del fondale nei canali lagunari a partire dall'unica informazione disponibile nella mappa, ovvero la loro larghezza, si sono utilizzate relazioni morfometriche presenti in letteratura [8,21,32], che mettono in relazione larghezza e profondità dei canali stessi (descritte nel paragrafo 2.1.). In particolare è stata aggiornata la relazione che lega larghezza e profondità aggregando tra loro dati relativi a precedenti misure *in situ* [8] e dati ricavati dalle carte batimetriche della Laguna di Venezia del 2012 e del 1810. Per la laguna del 1810 si sono considerate 190 sezioni, mentre per la laguna del 2012 sono state prese in esame altre 70 sezioni distribuite uniformemente su tutta la laguna. Per quanto riguarda la profondità delle sezioni di canale si è fatto sempre riferimento alla profondità massima della sezione presa in esame.

Con i dati a disposizione è stato possibile ricavare una relazione che rappresenta la profondità massima del canale in funzione della sua larghezza. I dati sono stati mediati considerando intervalli costanti di larghezza e i valori ottenuti sono stati interpolati con una relazione del tipo:

$$D = \frac{B}{aB^2 + bB + c}$$
(2)

dove D è la profondità massima del canale in una determinata sezione e B è la sua larghezza. L'approssimazione ottimale dei dati disponibili mediante l'Eq. (2), ottenuta attraverso la minimizzazione dello scarto quadratico medio, ha fornito per i parametri caratteristici i valori a = -0.0001365, b = 0.1646, c = 4.538.

Dai dati riportati nel grafico di Fig. 2 si nota che, in linea con i risultati già presenti in letteratura, al crescere della larghezza del canale aumenta anche la profondità. Per i canali di dimensioni minori (B<20-30 m), questo incremento è piuttosto rapido e quasi lineare ad indicare che la forma della sezione si mantiene pressoché invariata. Al crescere della larghezza dei canali invece si nota che dapprima la profondità cresce meno rapidamente con la larghezza, per poi riprendere ad aumentare linearmente con la larghezza stessa, con tasso di crescita minore rispetto a quanto accade per le sezioni di dimensioni più ridotte.



Fig. 2 - Profondità in funzione della larghezza del canale delle sezioni considerate (misure *in situ* [8], dati ricavati dalle carte batimetriche della Laguna di Venezia del 2012 e del 1810). I punti di colore grigio rappresentano tutti i dati a disposizione, i punti di colore rosso sono ricavati mediando i dati su intervalli costanti di profondità, mentre la curva rossa è l'Eq.2 che interpola i valori mediati ( $R^2$ =0.8293).

L'andamento evidenzia che, per i canali di maggiori dimensioni, la sezione tende ad essere proporzionalmente meno incisa. La relazione (2) proposta riproduce con un'unica espressione analitica questo comportamento e consente, da un punto di vista operativo, note le larghezze B, ottenute dalla mappa dell'Alberti, di stimare le corrispondenti profondità dei canali.

Per la forma della sezione si è deciso, infine, di mantenere quella riportata nella mappa del Dénaix del 1810.

# 3.2. Ricostruzione della batimetria delle porzioni di bassofondale, delle zone subtidali e delle superfici di barena

L'anno per il riferimento considerato per la quotatura delle aree di bassofondale, delle zone subtidali e delle superfici di barena della laguna al tempo dell'Alberti è stato il 1810, anno in cui è stata redatta da Augusto Dénaix la carta storica che porta il suo nome, già utilizzata in studi precedenti per la creazione di un reticolo di calcolo con il quale analizzare il comportamento idrodinamico della laguna di quell'epo-

ca [16,17]. Come già accennato, la mappa del Dénaix riporta solo le quote dei canali lagunari. La quotatura dei bassifondi del reticolo di calcolo della laguna del 1810 era a sua volta avvenuta prendendo come riferimento le quote riportate nella carta idrografica del 1901, la prima che fornisce un rilievo batimetrico completo della laguna. Per dedurre le quote dei bassifondi nel 1810 a partire dalle loro quote presenti nella carta idrografica del 1901, era stato sottratto a tali quote il contributo dovuto alla variazione del livello medio relativo del mare (somma di subsidenza e eustatismo) stimato in 10 cm e considerato uniforme per tutta la laguna. Tale valore deriva dall'estrapolazione del tasso di incremento del medio mare relativo calcolato tra il 1896 e il 1930 [10]. Per uniformità con le batimetrie più recenti, le quote del 1901, così come quelle del 1810, erano state inoltre riportate a valori riferiti al medio mare dell'epoca sottraendo altri 22 cm. Infatti entrambe le rilevazioni (del 1901 e del 1810) utilizzavano come quota di riferimento il cosiddetto medio comune marino ovvero il livello della comune alta marea, la cui quota si trova a circa 22 cm sul livello medio del mare.

Per definire le quote dei bassifondi nel 1611 a partire da quelle del 1810 si è ritenuto di non poter procedere come appena descritto, ovvero ipotizzando di mantenere costante il tasso di variazione del medio mare relativo. Questo in virtù del fatto che considerando un arco temporale di quasi 300 anni, non sarebbe realistico supporre che processi quali eustatismo e subsidenza si siano mantenuti costanti.

Si è seguito pertanto un ragionamento di tipo diverso; si è cercato di ricavare la probabile quota effettiva dei bassifondi della laguna dell'Alberti considerando separatamente il contributo dovuto all'innalzamento del livello del medio mare (LMM) e quello relativo alla variazione di quota del fondale. Per quest'ultimo contributo, in particolare, si è considerato che l'arretramento dei margini delle barene dal 1611 al 1810 abbia reso disponibili per la sedimentazione in laguna un non trascurabile volume di sedimenti. È da ricordare, infatti, che prima della costruzione dei moli iniziata nella prima metà dell''800, il comportamento idrodinamico delle bocche di porto era praticamente simmetrico tra fase di flusso e di riflusso di marea e, di fatto, non comportava una perdita netta di sedimenti da parte della laguna [17], perdita netta che caratterizza invece la laguna attuale.

Avendo valutato dalle mappe una diminuzione dell'area occupata da barene dal 1611 al 1810 di circa 73 km<sup>2</sup> e avendo assunto, per quanto appena detto, che il volume di sedimenti eroso delle barene fosse stato totalmente trattenuto nel bacino lagunare, si è ipotizzato per semplicità di distribuire uniformemente tale volume sui bassifondi, trascurando la compattazione. In questo modo, si è calcolato un incremento netto di quota degli stessi dell'ordine di circa 10 cm. Sono stati esclusi ulteriori significativi apporti di sedimenti da parte, ad esempio, del bacino scolante, in quanto ci si trova a ragionare su di un'epoca successiva alla diversione dei grandi fiumi dal bacino lagunare [16,17].

Assieme a questo contributo di innalzamento delle quote del fondo dal 1611 al 1810, si è cercato di valutare anche il contemporaneo effetto legato all'innalzamento del livello del medio mare, facendo riferimento a due studi presenti in letteratura. Il primo riguarda l'innalzamento del livello del medio mare nel mare Adriatico valutato negli ultimi 1500 anni [35] nel quale si afferma, prendendo come indicatore un particolare tipo di alga che vive nelle coste rocciose della Croazia nella zona di transizione asciutto-bagnato, che il livello del medio mare non abbia subito variazioni significative tra il 1300 e il 1600. Il secondo studio riguarda, invece, più specificatamente la Laguna di Venezia [10,36,37]. In esso è stato calcolato che il tasso di incremento del livello del mare tra il 1896 e il 1930, è stato pari a 1,54 mm/anno, dedotto da misure effettuate dal mareografo di Venezia [10]. Interpolando linearmente questi due valori si è stimato un tasso medio di incremento del livello medio del mare per i 200 anni che separano la mappa dell'Alberti da quella del Dénaix pari a 0.53 mm/anno, che porta ad un complessivo aumento del livello del medio mare di circa 10 cm.

Dai risultati precedenti si osserva che i due contributi legati, da un lato all'incremento di quota del fondale dei bassifondi dovuto ai sedimenti messi a disposizione dall'erosione delle barene, dall'altro all'innalzamento del livello del medio mare, sostanzialmente si compensano. Di conseguenza si è scelto di assegnare alle aree di bassofondale e alle piane subtidali della laguna del 1611 le stesse quote (riferite al medio mare contemporaneo) che sono state usate per la quotatura della laguna del 1810. Per quanto riguarda le quote delle superfici di barena, queste sono state mantenute pari a quelle del 1901, assumendo che le barene fossero in grado di mantenere stabile nel tempo la propria quota rispetto al medio mare.

## 3.3. Ricostruzione della batimetria delle bocche di porto

Per quanto riguarda la determinazione delle quote dei fondali delle bocche di porto della laguna al tempo dell'Alberti si è applicato un ragionamento diverso da quello adottato per la quotatura dei canali, in quanto tali sezioni costituiscono delle sezioni di chiusura del bacino lagunare, per le quali è applicabile la relazione morfometrica già menzionata come legge O'Brien-Jarrett-Marchi (OBJM). Si è dapprima condotta una ulteriore verifica della suddetta legge OBJM [2-4,25] considerando diverse sezioni prese lungo alcuni canali della carta del Dénaix. Per 190 sezioni scelte in maniera uniforme nella rete dei canali e per le sezioni in corrispondenza delle bocche di porto (Porto di Chioggia, Porto di Malamocco, Porto di Venezia, Porto di Sant'Erasmo e Porto di Treporti) sono stati calcolati il prisma di marea P e l'area  $\Omega$  della sezione di canale riferita al LMM. Il prisma di marea (Eq. 3) è stato ricavato dai dati di portata ottenuti grazie alle simulazioni effettuate con il modello idrodinamico e condotte imponendo come condizione al contorno una marea sinusoidale semidiurna, oscillante attorno al LMM con un'ampiezza di 50 cm.

$$\mathbf{P} = \int_0^{T/2} Q(t) dt \tag{3}$$

I dati sono stati suddivisi in intervalli costanti di prisma di marea e per ogni intervallo è stata calcolata la media sia per il prisma sia per l'area della sezione. I valori così ottenuti sono stati interpolati in un grafico bi-logaritmico utilizzando la relazione di OBJM. Per l'interpolazione non sono stati usati i punti con prisma di marea inferiore a  $10^6 m^3$ , essendo noto che le sezioni piccole non rispettano tale relazione [27].

L'esponente  $\alpha$  è stato fissato pari a 6/7, valore dimostrato essere caratteristico per la Laguna di Venezia [7,21], mentre si è fatto variare

39

il coefficiente *k* ricavando il valore che meglio approssima i punti e ottenendo  $k = 1.56 \times 10^{-3} m^{2-3\infty}$  (Fig. 3).

La legge di OBJM per la Laguna del Dénaix risulta quindi:

$$\Omega_{1810} = 1.56 \times 10^{-3} P_{1810}^{6/7} \tag{4}$$

Tale relazione è stata utilizzata per la quotatura dei fondali di tutte le bocche di porto ad esclusione della sezione in corrispondenza del porto di Sant'Erasmo per la quale si è utilizzata la relazione morfometrica che lega la larghezza alla profondità della sezione. Non è stato possibile fare riferimento al prisma di marea tramite la relazione di OBJM poiché la larghezza della bocca nel 1611 risulta di molto inferiore rispetto a quella del 1810 e di conseguenza la portata fluente varia in modo significativo.

Per ricavare le sezioni delle bocche di porto della laguna del 1611 si è quindi proceduto con il calcolo del prisma di marea  $(P_{1611(i)})$  delle varie bocche ricavato sulla base della sua definizione teorica che lo individua come volume d'acqua scambiato durante la fase di flusso o di riflusso di un ciclo di marea. Operativamente per le sezioni delle bocche di porto, Porto di Chioggia, Porto di Malamocco, Porto di Venezia e Porto di Treporti, si è dapprima calcolato il prisma di marea relativo al 1810 ( $P_{1810(i)}$ ), utilizzando l'Eq. (3) e i risultati della simulazione numerica. Successivamente, al prisma di ciascuna sezione si è sottratto il volume di barene erose tra il 1611 e il 1810 da riferire ad ogni bocca. Tale ragionamento assume che, essendo nel 1611 le barene più estese rispetto al 1810, il volume da esse occupato debba essere sottratto al prisma di marea calcolato per il 1810. Il volume di barene afferente a ciascuna bocca è stato valutato pari a un terzo del volume totale di barene perso tra il 1611 e il 1810 per il Porto di Chioggia e per il Porto di Malamocco, e pari a un nono per le sezioni del Porto di Venezia e di Treporti. Il volume totale di barene perso è stato stimato in 0,0365 km<sup>3</sup> sulla base della configurazione planimetrica fornita dalla mappa dell'Alberti georeferenziata e considerando come quota media di queste forme morfologiche il valore di 0,25 m s.m.m. e uno sviluppo medio al di sotto del livello del medio mare di 0,25 m.

Valutato secondo questa procedura il prisma di marea per ogni

41



Fig. 3 - Verifica della validità della legge O'Brien-Jarrett-Marchi per sezioni trasversali di canali a marea della Laguna del Dénaix. Il prisma di marea deriva dal modello accoppiato agli elementi finiti [15], dove l'area delle sezioni trasversali è calcolata riferendosi al LMM. I puntini rappresentano tutte le sezioni considerate, i cerchi sono i valori medi di un intervallo, i rombi sono le sezioni in corrispondenza delle bocche di porto. La pendenza della retta che interpola i dati mediati è stata fissata e pari a 6/7 mentre l'intercetta è  $k = 1.56 \times 10^{-3}m^{2-3\infty}$ ( $R^2 = 0.8613$ ).

bocca nel 1611 ( $P_{1611(i)}$ ), si è calcolata l'area  $\Omega$  della rispettiva sezione mediante l'Eq. 5:

$$\Omega_{1611(i)} = 1.56 \times 10^{-3} P_{1611(i)}^{6/7} \tag{5}$$

Nota l'area liquida della sezione,  $\Omega$ , e misurando la larghezza della singola bocca direttamente dalla mappa georeferenziata dell'Alberti, è stato possibile valutare la profondità media della sezione di bocca  $\overline{D}$ (Tab. I). Anche per le bocche di porto, come per i canali, per assegnare una forma alla sezione si è fatto riferimento alla laguna del Dénaix.

Infine, alle maglie che schematizzano la parte del Mar Adriatico antistante la laguna sono state assegnate le quote del 1810, non avendo altre informazioni a disposizione.

Sezioni bocche di porto							
	$P_{1611(i)}[m^3]$	$\Omega_{1611(i)}[m^2]$	B[m]	$\overline{D}[m]$			
Porto di Chioggia	4,7 × 10 <sup>7</sup>	5,9 × 10 <sup>3</sup>	279	20			
Porto di Malamocco	5,9 × 10 <sup>7</sup>	7,2 × 10 <sup>3</sup>	759	9			
Porto di Venezia	5,2 × 10 <sup>7</sup>	6,4 × 10 <sup>3</sup>	304	21			
Porto di Tre Porti	5,2 × 10 <sup>7</sup>	3,0 × 10 <sup>3</sup>	494	6			

Tab. I - Caratteristiche geometriche delle sezioni relative alle bocche di porto della Laguna dell'Alberti.

Sulla base dei ragionamenti descritti è stato possibile ricostruire la batimetria della Laguna di Venezia al tempo dell'Alberti. Il risultato della ricostruzione è riportato, a scala di colori in Fig. 4 nella quale sono raffigurate, per confronto, anche le batimetrie della laguna del 1810 e della laguna attuale (2012). Per completare il reticolo di calcolo e poterlo utilizzare per condurre le simulazioni numeriche è stato necessario caratterizzare la scabrezza idraulica dei diversi elementi di calcolo, assegnando loro un coefficiente di scabrezza secondo la formulazione di Stickler. Il valore da attribuire ai diversi elementi, in analogia con quanto fatto per i reticoli messi a punto per riprodurre le altre configurazioni storiche [16], è stato determinato seguendo un criterio basato sulle quote e riassunto in (Tab. II).

Tab. II -	Coeff	icienti	di sca	brezza	second	0 5	Strick	ler	rel	ativi	ai	vari	inter	valli	di	quo	te.
-----------	-------	---------	--------	--------	--------	-----	--------	-----	-----	-------	----	------	-------	-------	----	-----	-----

Quota [m s.m.m.]	Coefficiente di Scabrezza di Strickler
0,250.30	15
-0.301,00	20
-1,005,00	30
-5,0010,50	35
-10,5044,00	40

#### 4. Risultati e commenti

Il reticolo della laguna al tempo dell'Alberti è stato utilizzato per simulare, con il modello numerico bidimensionale, il comportamento idrodinamico della laguna nel XVII secolo. Come per le altre configu43



Fig. 4 - Rappresentazione con scala di colori della batimetria della Laguna di Venezia come si presentava ai tempi dell'Alberti (A), della batimetria ricavata dalla carta storica redatta da Augusto Dénaix (B) e della batimetria della laguna attuale (C).

razioni storiche, il modello è stato forzato con una marea sinusoidale semidiurna di ampiezza 0,5 m oscillante attorno al livello del medio mare in allora. I risultati ottenuti sono stati analizzati e confrontati con quelli relativi ad altre configurazioni della Laguna di Venezia. È stata verificata la legge OBJM anche per la laguna dell'Alberti (Fig. 5), mettendo in relazione, mediante l'Eq. 1, le aree liquide di 170 sezioni di canale selezionate all'interno del reticolo di calcolo, alle quali sono state aggiunte le sezioni in corrispondenza delle bocche di porto, con

il prisma di marea fluente attraverso tali sezioni, calcolato a partire dalle simulazioni numeriche.

I dati sono stati suddivisi in intervalli costanti di prisma di marea e per ogni intervallo è stata calcolata la media sia per il prisma sia per l'area della sezione. I punti mediati hanno permesso di ricavare la seguente equazione:

$$\Omega_{1611} = 1.38 \times 10^{-3} P_{1611}^{6/7} \tag{6}$$

E opportuno sottolineare che la verifica della validità della relazione di OBJM non è affatto scontata, poiché le sezioni dei canali della laguna dell'Alberti non sono state ricavate utilizzando la legge di OBJM, ma sulla base della relazione morfometrica empirica tra larghezza (B) e profondità (D). La verifica della validità della relazione di OBJM per le sezioni della laguna dell'Alberti fornisce prova della bontà delle assunzioni adottate per la determinazione della batimetria della laguna nei primi anni del XVII secolo.

Avendo a disposizione la legge di OBJM anche per la laguna dell'Alberti, le relazioni relative alla laguna del 1810 e del 1611 sono state confrontate in uno stesso grafico assieme alla relazione ottenuta per la laguna attuale (Fig. 6). Come si può osservare le rette di regolarizzazione dei dati si discostano poco fra loro, evidenziando la somiglianza di comportamento tra le configurazioni considerate.

Per verificare la consistenza della procedura utilizzata per la determinazione della batimetria e verificare la sensibilità dei risultati alle ipotesi assunte, si è ricalcolata la legge di OBJM utilizzando altri due reticoli di calcolo creati *ad hoc* mantenendo costanti tutte le condizioni e facendo variare solo le quote dei fondali. La quota del fondo infatti, incidendo sul calcolo del prisma di marea e della sezione, è la variabile che più influenza la legge di OBJM (Fig. 7).

Un primo reticolo di calcolo è stato ottenuto variando solo la quota dei bassifondi del reticolo del 1611, aumentandone la profondità di 1 m (Eq. 7). Analizzando, infatti, la possibile variazione di quota dei bassi fondali in epoca più recente e considerando le curve di distribuzione delle frequenze delle superfici con quota assegnata all'interno della laguna, si nota che i punti di massimo relativo riferibili alle 45

 $\langle \alpha \rangle$ 



Fig. 5 - Verifica della validità della legge di O'Brien Jarrett Marchi per sezioni trasversali di canali a marea della laguna dell'Alberti. Il prisma di marea deriva dal modello accoppiato agli elementi finiti, dove l'area [15] delle sezioni trasversali è calcolata riferendosi al LMM. I puntini rappresentano tutte le sezioni considerate, i cerchi sono i valori medi di un intervallo i rombi sono le sezioni in corrispondenza delle bocche di porto. La pendenza della retta che interpola i dati mediati è stata fissata e pari a 6/7 mentre l'intercetta è  $k = 1.38 \times 10^{-3}m^{2-3\alpha}$  ( $R^2 = 0.9740$ ).

quote dei bassifondi sono passati da valori di circa -0,50 m (1901) a valori di circa -1,5 m (2003) [17].

$$\Omega = 12,04 \times 10^{-3} P^{0,73} \tag{7}$$

Il secondo reticolo di calcolo è stato ottenuto modificando solo la quota del fondo dei canali, ipotizzando un'erosione di 5 m. In questo caso la legge OBJM diventa (Eq. 8):

$$\Omega = 12.18 \times 10^{-3} P^{0.75} \tag{8}$$

Confrontando i tre andamenti della legge di OBJM riportate nel grafico di Fig. 7 si nota come esse differiscano in modo non trascurabile (si ricorda che il grafico è bi-logaritmico) a indicare che la batimetria ricostruita seguendo la procedura descritta è ragionevole, e che possibili errori nell'assegnazione delle quote dei bassofondali e del fondo dei canali avrebbero comportato scostamenti importanti dalla legge di OBJM determinata per la laguna del 1611 e per le altre due configurazioni (1810 e 2003).



Fig. 6 - Legge di O'Brien Jarrett Marchi per i canali della laguna dell'Alberti (linea rossa) a confronto con la laguna del Dénaix (linea blu) e con la laguna attuale (linea verde tratteggiata) [7].

Avendo a disposizione questo ulteriore reticolo che riproduce la configurazione della laguna agli inizi del XVII secolo è di un qualche interesse esaminare, attraverso la modellazione matematica, il comportamento idraulico della laguna in quell'epoca e confrontarlo con quello delle epoche successive (1810, 2012). Tale confronto permette di valutare se, e in quale misura, gli interventi dell'uomo e i cambiamenti morfologici abbiano modificato nel tempo il comportamento idrodinamico della laguna.

Si è pertanto analizzato come si sia modificata, nei secoli, la propagazione l'onda di marea lungo alcune direttrici che si dipartono dalle tre bocche di porto (Fig. 8). Considerando dapprima la direttrice che dalla bocca di Lido (San Nicolò al tempo del Dénaix e dell'Alberti) passa per il centro storico di Venezia, si osserva come attualmente i colmi di marea tendano ad esaltarsi penetrando dal mare e dirigendosi verso Punta della Salute, prima, e Porto Marghera, poi (Fig. 9). Per la marea sinusoidale considerata, l'incremento è di poco inferiore ai 2 cm a Punta della Salute ed è di quasi 4 cm a Porto Marghera. Si tratta di un effetto ben documentato sia dal calcolo sia dalle numerose registrazioni mareografiche disponibili per le maree di sizigie, che per periodo e ampiezza di oscillazione sostanzialmente si avvicinano alla marea schematica qui assunta. 47



Fig. 7 - Nel grafico sono rappresentati gli andamenti della legge di OBJM per la laguna dell'Alberti (linea nera) con quelle ottenute imponendo un errore alle quote dei bassifondi (linea blu a tratto-punto) e dei canali (linea rossa tratteggiata).

Per le lagune al tempo di Dénaix e al tempo dell'Alberti le simulazioni numeriche evidenziano un comportamento decisamente diverso. Passando dal mare all'interno della laguna e giungendo, superata Punta della Salute, ai limiti della conterminazione lagunare, dove sarebbe poi sorta l'area industriale di Porto Marghera, si riscontrano ovunque apprezzabili attenuazioni dei colmi di marea (Fig. 9).

A Punta della Salute, in particolare, la riduzione del colmo rispetto al mare per l'evento considerato è di circa 8 cm per la laguna del Dénaix e di circa 6 cm per la laguna dell'Alberti. La riduzione dei colmi si incrementa di poco se ci si porta, sempre lungo questa direttrice, ai limiti del bacino lagunare.

Se ne conclude che nelle lagune storiche, come è già stato dimostrato [16], il fenomeno della propagazione della marea era dominato dalle forze dissipative, legate alle resistenze al moto incontrate dalle correnti di marea soprattutto nel penetrare attraverso i varchi delle bocche e fino ai margini della conterminazione, nettamente preponderanti nei loro effetti sulle forze inerziali. Di questi caratteri la laguna attuale conserva ben poco, registrandosi quasi ovunque la netta prevalenza dei fenomeni inerziali, che tendono ad amplificare i colmi di marea nella loro propagazione, più che compensare gli effetti di riduzione dovuti alle resistenze al moto.



Fig. 8 - Quattro traiettorie considerate all'interno del bacino lagunare.

Tale risultato risulta ben evidente anche analizzando le direttrici che partono dalle bocche di Malamocco e Chioggia (Fig. 10; Fig. 11; Fig. 13b) e penetrano verso i margini lagunari. Fanno eccezione le direttrici percorse dalla marea per portarsi nella laguna superiore, dove ancor oggi i colmi, propagandosi, tendono a ridurre i loro livelli massimi, sia pure in misura meno pronunciata di quanto non avvenisse per le due lagune storiche (Fig. 12; Fig. 13a).

I porti della laguna in particolare avevano un comportamento ben diverso nelle lagune del passato rispetto a quello delle bocche attuali, offrendo maggiori resistenze complessive al moto come conseguenza soprattutto della presenza di fondali poco profondi.

Dai risultati della modellazione numerica si può anche notare come nelle due lagune storiche si riscontri un vero e proprio abbattimento dell'ampiezza dell'onda di marea nel superamento della prima fascia di barene che si interpone tra la laguna viva e la laguna morta (Fig. 10, Fig. 11).

Come ovvia conseguenza del diverso andamento dei livelli di marea, nelle lagune storiche si rilevano, rispetto alla laguna attuale, importanti variazioni anche per le portate e i volumi d'acqua scambiati con il mare attraverso le bocche (Fig. 14; Fig. 15).

#### RICOSTRUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA

49



Fig. 9 - Direttrice del centro storico. Andamento dei livelli in alcune località comprese tra S. Nicolò e Marghera per la marea di riferimento assunta

Nel complesso le portate massime e i volumi scambiati dalle Lagune storiche con il mare sono sensibilmente più ridotti di quelli attuali. Le maggiori differenze sono segnalate per la bocca di Malamocco (Fig. 15), le cui portate massime attualmente sono sensibilmente





Fig. 10 - Andamento dei livelli in alcune località della laguna centrale appartenenti alla direttrice Canale Fisolo-Casone Tezze per la marea di riferimento assunta.

incrementate rispetto a quelle della laguna dei primi anni del XVII secolo, sia in fase di flusso che di reflusso.

Per la fase di flusso si passa, infatti, dai quasi 4500 m³/s della



Fig. 11 - Andamento dei livelli in alcune località della laguna inferiore appartenenti alla direttrice Valleselle-Sacca Piccola per la marea di riferimento assunta.

laguna al tempo dell'Alberti ai circa 9500 m<sup>3</sup>/s della laguna attuale. Durante la fase di riflusso, invece, la portata massima si incrementa da circa 4300 m<sup>3</sup>/s a circa 9000 m<sup>3</sup>/s rispettivamente.

51





Fig. 12- Andamento dei livelli in alcune località della laguna superiore appartenenti alla direttrice Treporti-Valle Grassabò per la marea di riferimento assunta.

Da queste analisi emerge che le due lagune del passato hanno mantenuto nel periodo successivo all'estromissione dei grandi fiumi dalla laguna un comportamento molto simile, che dal punto di vista idraulico si caratterizzava per una minore vivacità complessiva delle 53



Fig. 13 - Palude Maggiore (a) e Valle Millecampi (b). Andamento dei livelli per la marea di riferimento considerata nelle configurazioni esaminate.



Fig. 14 - Portate scambiate attraverso la bocca di Chioggia, Malamocco, S. Nicolò e S. Erasmo, e Tre Porti e per la marea di riferimento assunta nelle configurazioni esaminate.

correnti di marea al loro interno. Si trattava sicuramente, come si è detto, di lagune nelle quali la propagazione dell'onda di marea era nettamente dominata dalle dissipazioni di energia ed era poco influenzata


L. TOMMASINI, A. D'ALPAOS, L. CARNIELLO, L. D'ALPAOS,

54

Fig. 15 - Portate scambiate attraverso le bocche per la marea di riferimento assunta nelle configurazioni esaminate.

dai fenomeni inerziali. Ciononostante, le lagune storiche, fatta eccezione per i problemi legati alla navigabilità e ai fondali dei porti, sui quali peraltro influivano in misura rilevante gli stati di mare di fronte alle bocche, si sono mantenute in condizioni ambientali più che accettabili, nonostante scambiassero con il mare volumi d'acqua relativamente ridotti. Esse sono state capaci, in particolare, di conservare sia la potente rete di canali che le innervava sia alcune forme morfologiche caratteristiche come le barene, che nella laguna contemporanea si vanno, invece, inesorabilmente perdendo, modificando radicalmente l'ambiente.

### 5. Conclusioni

Con lo studio proposto si è riusciti a riprodurre, per gli aspetti morfologici e idrodinamici, la Laguna di Venezia come si presentava all'inizio del XVII secolo combinando le informazioni planimetriche con alcune relazioni morfometriche e con risultati di studi precedenti riguardanti le variazioni morfologiche della laguna.

A causa della mancanza di informazioni altimetriche si sono trattate in maniera separata le varie strutture morfologiche che caratterizzano la Laguna Veneta: la rete di canali, i bassifondi, le bocche di porto e le barene. Per la quotatura del fondale dei canali si è utilizzata la relazione che lega la larghezza alla profondità, per i bassifondi è stato eseguito un bilancio tra l'incremento relativo del livello del mare e il contributo di sedimenti depositati sui fondali avvenuti tra il 1611 e il 1810, per le bocche di porto si è utilizzata la relazione di OBJM calcolata per la laguna del 1810, le barene infine sono state considerate a una quota costante caratteristica anche della morfologia lagunare attuale.

I dati batimetrici così definiti sono stati utilizzati per la creazione del reticolo di calcolo di un modello matematico bidimensionale. I risultati del modello idrodinamico hanno permesso, attraverso la legge di OBJM, di validare il modello concettuale che ha consentito la determinazione delle quote della laguna dei primi anni del XVII secolo. Si è dimostrato, infatti, che la relazione tra le aree liquide delle sezioni dei canali e i prismi di marea che fluiscono attraverso di esse è ben descritta da una legge di potenze nota come relazione di O'Brien-Jarrett-Marchi.

L'applicazione del modello bidimensionale ha permesso di confrontare il comportamento idrodinamico della laguna del 1611 con

# 56 L. TOMMASINI, A. D'ALPAOS, L. CARNIELLO, L. D'ALPAOS, A. RINALDO

quello delle lagune del 1810 e del 2012. In particolare dal confronto dei livelli emerge il comportamento molto più dissipativo che caratterizzava le lagune del passato rispetto a quella attuale. Sia nel 1611 che nel 1810 i livelli diminuivano apprezzabilmente con il propagarsi dell'onda di marea all'interno della laguna, mentre nella laguna attuale l'attenuazione è molto minore. In alcuni casi i livelli addirittura aumentano quando la marea si propaga all'interno della laguna. Dall'analisi delle portate scambiate con il mare, si può concludere che il volume d'acqua scambiato nella fase di flusso e di riflusso è maggiore nella laguna attuale rispetto a quello delle lagune storiche. Tali differenze, particolarmente evidenti per la bocca di Malamocco, sono verosimilmente dovute allo spostamento dei partiacque e alla diversa conformazione delle bocche di porto. La Laguna di Venezia ha quindi mantenuto sostanzialmente invariato il suo comportamento idrodinamico nell'epoca compresa tra la diversione dei grandi fiumi e l'inizio dei lavori alle bocche di porto, caratterizzato da una forte riduzione dei colmi di marea determinata dalla conformazione morfologica della laguna stessa. La laguna ai tempi di Sebastiano Alberti, come del resto quella ai tempi del Denaix, era infatti caratterizzata, a differenza della configurazione odierna, sia da bocche larghe e poco profonde sia dalla presenza di una rete interna di canali e di zone d'acqua adiacenti con fondali alquanto ridotti, che favorivano una maggiore resistenza al moto delle correnti di marea.

Si può concludere che la ricostruzione proposta per l'altimetria dei fondali lagunari e la sua successiva verifica, risultano essere un passaggio fondamentale per l'analisi dell'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia. Lo studio svolto ha permesso di ampliare l'arco temporale delle configurazioni storiche disponibili e quindi di approfondire il comportamento idrodinamico e morfodinamico della laguna nel passato, con indubbia utilità per l'implementazione e la verifica di modelli di evoluzione a lungo termine.

# 6. Bibliografia

 A. D'Alpaos, S. Lanzoni, M. Marani, A. Rinaldo, On the O'Brien–Jarrett–Marchi law, *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 20 (2009) 225-236. doi:10.1007/s12210-009-0052.

#### RICOSTRUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA

57

- M.P. O'Brien, Equilibrium flow areas of inlets in sandy coasts, ASCE J. Waterways Harbors Div. 95 (1969) 43-52.
- [3] J.T. Jarrett, Tidal prism-inlet area relationships, General investigation of tidal inlets, report 3. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA. U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS., 1976.
- [4] E. Marchi, Sulla stabilita delle bocche lagunari a marea., *Rend. Fis. Acc. Lincei.* 9 (1990) 137-150.
- [5] C.T. Friedrichs, Stability shear stress and equilibrium cross-sectional geometry of sheltered tidal channels, J. Coast. Res. (1995) 1062-1074.
- [6] A. Rinaldo, S. Fagherazzi, S. Lanzoni, M. Marani, W.E. Dietrich, Tidal networks 3. Landscape-forming discharges and studies in empirical geomorphic relationships, *Water Resour. Res.* 35 (1999) 3919-3929.
- [7] A. D'Alpaos, S. Lanzoni, M. Marani, A. Rinaldo, On the tidal prism-channel area relations, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 115 (2010) 1–13. doi:10.1029/2008JF001243.
- [8] M. Marani, S. Lanzoni, D. Zandolin, G. Seminara, A. Rinaldo, Tidal meanders, Water Resour. Res. 38 (2002). doi:10.1029/2001WR000404.
- [9] R. Marciano, Z.B. Wang, A. Hibma, H.J. De Vriend, A. Defina, Modeling of channel patterns in short tidal basins, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 110 (2005) 1–13. doi:10.1029/2003JF000092.
- [10] L. Carbognin, P. Teatini, L. Tosi, Eustacy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium, J. Mar. Syst. 51 (2004) 345-353. doi:10.1016/j.jmarsys.2004.05.021.
- [11] L. D'Alpaos, L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche, *Istituto Veneto di Scienze*, *Lettere ed Arti*, (2010).
- [12] L. D'Alpaos, A. Defina, Venice lagoon hydrodynamics simulation by coupling 2D and 1D finite element models, *in: Proc. 8th Conf. Finite Elem. Fluids. New Trends Appl.*, (1993), 917-926.
- [13] L. D'Alpaos, A. Defina, Modellazione matematica del comportamento idrodinamico delle zone di barena solcate da una rete di canali minori, *Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti*, Rapp. E Stud. 12 (1995) 353-372.
- [14] A. Defina, Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas, Water Resour. Res. 36 (2000) 3251. doi:10.1029/2000WR900167.
- [15] L. D'Alpaos, A. Defina, Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon, *Comput. Geosci.* 33 (2007) 476-496. doi:10.1016/j.cageo.2006.07.009.
- [16] L. D'Alpaos, Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere delle bocche di porto, *Istituto Veneto di Scienze, Lettere e Arti*, (2010).
- [17] L. Carniello, A. Defina, L. D'Alpaos, Morphological evolution of the Venice lagoon: Evidence from the past and trend for the future, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 114 (2009) 1-10. doi:10.1029/2008JF001157.
- [18] J.R.L. Allen, Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the

# 58 L. TOMMASINI, A. D'ALPAOS, L. CARNIELLO, L. D'ALPAOS, A. RINALDO

Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe, *Quat. Sci. Rev.* 19 (2000) 1155-1231. doi:10.1016/S0277-3791(99)00034-7.

- [19] L. Solari, G. Seminara, S. Lanzoni, M. Marani, A. Rinaldo, Sand bars in tidal channels Part 2. Tidal meanders, *J. Fluid Mech.* 451 (2002) 203-238. doi:10.1017/ S0022112001006565.
- [20] A. D'Alpaos, S. Lanzoni, M. Marani, S. Fagherazzi, A. Rinaldo, Tidal network ontogeny: Channel initiation and early development, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 110 (2005) 1-14. doi:10.1029/2004JF000182.
- [21] S. Lanzoni, A. D'Alpaos, On funneling of tidal channels, J. Geophys. Res. Earth Surf. (2015) 433-452. doi:10.1002/2014JF003203.
- [22] D. Garofalo, The Influence of Wetland Vegetation on Tidal Stream Channel Migration and Morphology, *Estuaries*. 3 (1980) 258-270.
- [23] E.J. Gabet, Lateral migration and bank erosion in a saltmarsh tidal channel in San Francisco Bay, California, *Estuaries*. 21 (1998) 745-753.
- [24] L.B. Leopold, J.N. Collins, L.M. Collins, Hydrology of some tidal channels in estuarine marshland near San Francisco, *Catena*. 20 (1993) 469-493. doi:10.1016/0341-8162(93)90043-O.
- [25] M.P. O'Brien, Estuary tidal prisms related to entrance areas, *Civ. Eng.* 1(8) (1931) 738-739.
- [26] S.A. Hughes, Equilibrium cross-sectional area at tidal inlets, J. Coast. Res. 18(1) (2002) 160-174.
- [27] A. Rinaldo, S. Fagherazzi, S. Lanzoni, M. Marani, W.E. Dietrich, Tidal networks 2. Watershed delineation and comparative network morphology, *Water Resour. Res.* 35 (1999) 3905-3917. doi:10.1029/1999WR900237.
- [28] M. Krishnamurthy, Tidal prism of equilibrium inlets, J. Waterw. Port Coast. Ocean Div. 103 (1977) 423-432.
- [29] S. Lanzoni, G. Seminara, Long-term evolution and morphodynamic equilibrium of tidal channels, *J. Geophys. Res. Ocean.* 107 (2002).
- [30] L. Carniello, A. Defina, S. Fagherazzi, L. D'Alpaos, A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy, *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 110 (2005) 1-15. doi:10.1029/2004JF000232.
- [31] L. Carniello, A. D'Alpaos, A. Defina, Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins, *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 92 (2011) 263-276. doi:10.1016/j. ecss.2011.01.001.
- [32] M. Marani, S. Lanzoni, S. Silvestri, A. Rinaldo, Tidal landforms, patterns of halophytic vegetation and the fate of the lagoon of Venice, *J. Mar. Syst.* 51 (2004) 191–210. doi:10.1016/j.jmarsys.2004.05.012.
- [33] G. Mariotti, S. Fagherazzi, P.L. Wiberg, K.J. McGlathery, L. Carniello, A. Defina, Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes, *J. Geophys. Res. Ocean.* 115 (2010) 1-17. doi:10.1029/2009JC005892.
- [34] C. Zarzuelo, A. López-Ruinz, A. D'Alpaos, L. Carniello, M. Ortega-Sánchez, Impact of future constructions in the tidal morphodynamics of a constricted bay: Cádiz Bay, Spain., *Coast. Eng.* (Submitted).

- [35] S. Faivre, T. Bakran-Petricioli, N. Horvatinčić, A. Sironić, Distinct phases of relative sea level changes in the central Adriatic during the last 1500 years - influence of climatic variations?, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 369 (2013) 163-174.
- doi:10.1016/j.palaeo.2012.10.016.
  [36] L. Carbognin, P. Teatini, L. Tosi, T. Strozzi, A. Tomasin, Present Relative Sea Level Rise in the Northern Adriatic Coastal Area, *Mar. Res. CNR*. (2011) 1-10.
- [37] L. Carbognin, G. Taroni, Eustatismo a Venezia e Trieste nell'ultimo secolo, Atti Ist. Veneto Di Sci. Lett. Ed Arti. 154 (1996) 281-298.

#### RICOSTRUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA

# SCENARI POSSIBILI PER IL RIEQUILIBRIO DELLA LAGUNA CENTRALE studio di fattibilità e linee operative per la pianificazione e progettazione degli interventi morfologici nelle aree attraversate dal canale dei petroli

Lorenzo Bonometto\*

#### 1. Introduzione

L'alluvione del 1966, con la marea eccezionale che aveva sommerso Venezia, è stata uno schiaffo per la cultura di governo e per il sentire comune che, nell'onda del "miracolo economico", salutavano come progresso qualunque intervento sull'ambiente senza nemmeno porsi il problema di conoscerne gli effetti. Riscoprendo la fragilità della Città e della Laguna violentata quell'evento aveva attivato le migliori risorse umane, in un appassionato dibattito civile e scientifico da cui era scaturita, nel 1973, la prima Legge Speciale per Venezia: l'avvio nelle intenzioni di un percorso virtuoso, ribadito da due successive leggi speciali, che poneva tra gli obiettivi prioritari il riequilibrio lagunare<sup>1</sup>, il ripristino della morfologia nei suoi caratteri identificativi e funzionali, la rimozione delle cause di dissesto [1].

La storia ci dice che, dopo una stagione di studi e di proposte

<sup>\*</sup> Società Veneziana di Scienze Naturali

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> L'idea stessa di riequilibrio lagunare è stata oggetto di equivoci, dato che l'accezione di "equilibrio" in senso termodinamico indica la tendenza all'entropia e quindi all'indifferenziazione. Il concetto di equilibrio, come quello di stabilità, nel significato ambientale sottintende al contrario la tendenza dei sistemi a mantenere le proprie complessità e funzionalità, in un contesto dinamico ed evolutivo nel quale i dinamismi stessi, azione umana inclusa, determinano le capacità autoconservative. Evidente che le leggi speciali fanno riferimento a questa accezione del termine, ponendo precisi obiettivi che, al di là delle disquisizioni linguistiche, vanno recepiti come prioritari.

finalizzati a quegli scopi (basti ricordare la monografia "Ripristino, conservazione ed uso dell'ecosistema lagunare veneziano" [2]), molte cose sono andate diversamente. Il bilancio, a cinquant'anni dall'alluvione, parla di un solo obiettivo ambientale realmente raggiunto, l'interruzione dei vasti interrimenti. Utile ricordare che le tre Casse di Colmata, migliaia di ettari al centro della laguna interrati con i sedimenti dragati durante lo scavo del Canale Malamocco-Marghera (di seguito indicato col nome usuale e più conosciuto di "Canale dei Petroli"), costituivano i primi lotti di un interrimento che avrebbe dovuto portare all'eliminazione anche di tutta la superficie lagunare retrostante [3,4], mentre era già ipotizzata una prosecuzione della "bonifica", con seppellimento delle aree a barene, fino alle Valli di Chioggia [5]. Per il resto il processo di degrado è avanzato sotto gli occhi di tutti. Le sue cause sono state ridotte in misura inadeguata mentre altri fattori demolitivi si sono aggiunti, tollerati e addirittura autorizzati in spregio alle stesse leggi speciali. Paradossale la pesca alle vongole "filippine" attuata con la tecnica della frullatura dei fondali, che ha accelerato in modo traumatico la perdita di sedimenti e i dissesti conseguenti. Quanto al ripristino della morfologia lagunare questo è stato troppo spesso evocato a giustificazione di opere che hanno prodotto ulteriori anomalie. Per la Laguna Centrale, oggetto della presente nota, negli stessi decenni che hanno visto il succedersi delle leggi speciali finalizzate alla salvaguardia si è assistito al collasso dei caratteri morfologici che avevano assicurato per millenni la natura canalizzata. Un semplice confronto tra le cartografie del 1970 e del 2000 è sufficiente per rendersi conto di quanto la Laguna sia degenerata rispetto all'epoca della prima Legge Speciale (Fig.1).

Oggi la perdita dei caratteri idro-morfologici è ulteriormente avanzata, mentre le previsioni per il futuro rendono ancora più urgente e drammatico il rilancio degli obiettivi di riequilibrio. Le stime dell'eustatismo fornite dai più accreditati organismi internazionali prefigurano, per epoche non lontane, scenari critici a fronte dei quali il Mo.S.E. stesso, al di là delle incertezze sull'opera e sulla sua funzionalità, risulterà inefficiente. Ma la Laguna ha elevate capacità di adattarsi alle variazioni graduali del livello marino<sup>2</sup> e queste, se non



Fig. 1 - La morfologia sommersa come risulta dalle cartografie del Settanta, appena scavato il Canale dei Petroli, e del 2000. L'azzurro più scuro indica le profondità superiori ai due metri. Evidenti l'affossamento dell'area attraversata dal canale e la scomparsa della rete periferica dei canali che ne assicuravano la funzionalità (da: *Il crepuscolo della Laguna,* in: *La Laguna di Venezia, Ambiente Naturalità Uomo,* Nuovadimensione, Portogruaro [4]).

impedite dal perseverare di errori oggi ben noti, le consentiranno entro certi limiti di compensare gli effetti dovuti ai cambiamenti climatici. Si è mantenuta per circa seimila anni adeguandosi alle oscillazioni del medio mare, il che ci dice che le sue capacità autoconservative, sostenute e orientate nell'ultimo millennio dalla gestione umana, sono state elevatissime. Solo dall'inizio del Novecento le disponibilità di nuove energie hanno consentito interventi e azioni tali da superare, per impatti e velocità esecutive, le possibilità del sistema di attivare processi compensativi sufficientemente rapidi, e si è passati dalla gestione della Laguna alla sua aggressione; ma la resilienza caratte-

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ciò differenzia profondamente la Laguna dalla città, che, oltre ai possibili

sollevamenti e nonostante la particolare resilienza del suo tessuto edilizio e urbano, non consentirà una pari flessibilità nel seguire gli incrementi del livello marino.

rizza tuttora, almeno potenzialmente, gli ambienti che hanno consentito l'adeguamento alle variazioni del livello marino<sup>3</sup>. Per questo il riequilibrio, con conservazione e ripristino degli habitat peculiari, rappresenta il primo obiettivo per assicurare alla Laguna prospettive coerenti con la funzionalità e con la storia di cui è espressione; e quando, come è nelle previsioni, l'eustatismo costringerà a chiudere le bocche ad ogni normale marea entrante, impedendo così il ricambio, la funzionalità ecosistemica legata alle capacità autoossigenanti e autodepurative risulterà decisiva anche per le aree la cui qualità dipende oggi dall'ingresso quotidiano di acque marine.

Le grandi trasformazioni degli anni Sessanta che hanno sconvolto la geografia della Laguna Centrale sono ragionevolmente non reversibili; ma è ancora possibile riportare l'area ad un assetto che ne ricomponga in forme nuove funzionalità e identità, riavviando una fase responsabile nella storia dei rapporti tra poteri decisionali e Laguna. La presente nota si propone di indicare soluzioni realistiche in detta direzione, e lo fa ripartendo da studi e da soluzioni prefigurati prima della stagione degli scandali dallo stesso Magistrato alle Acque.

Come noto la seconda Legge Speciale, del 1984, al fine di snellire le procedure aveva "autorizzato" la nomina di un concessionario unico per le opere in Laguna, legittimato ad operare anche in deroga alle disposizioni vigenti e tale da perseguire gli interessi pubblici, con finanziamenti pubblici, attraverso l'iniziativa privata<sup>4</sup>. Sappiamo come

<sup>4</sup> Garante della correttezza doveva essere il Consiglio Nazionale delle Ricerche, in base a quanto deliberato dal Comitato Interministeriale che aveva finanziato allo scopo "un piano di ricerche complementari e di controllo" degli studi predisposti dal Concessionario; ma di lì a poco un aggiustamento ha stabilito di lasciare al CNR "un lavoro scientifico svincolato dalle linee intraprese dal Concessionario": il che, tradotto, ha



ALTERNATIVA A



Fig. 2 - Tra le soluzioni individuate negli elaborati del Piano Morfologico del 1992 il Magistrato alle Acque aveva previsto l'interrimento del primo tratto del Canale dei Petroli, riportando il traffico navale nel canale Fisolo-Melison. Questa soluzione, supportata da simulazioni di ingresso delle navi, esaminava due percorsi: uno ripercorrendo l'intero canale Fisolo-Melison fino al Porto di S. Leonardo (alternativa A); l'altro, prescelto, raggiungendo le Casse di Colmata con un tratto rettilineo a partire dal passaggio dal Fisolo al Melison (alternativa B). (Da: schematizzazione dei differenti tracciati del Canale Malamocco-Marghera, progetto di massima, vol. 7B pag. 137).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Nell'interfaccia tra Laguna e mare la resilienza naturale è data dai sistemi di dune; nelle aree lagunari interne la capacità di mantenere le quote al variare dei livelli marini è assicurata dai sistemi intertidali (barene e velme) e dai bassifondi; nell'interfaccia tra Laguna e terraferma erano le grandi estensioni di canneti dovuti alle acque dolci e salmastre ad assicurare la produzione di suolo organico mantenendo le quote al variare del livello marino ed alimentando a valle i sistemi di barene [6,7]. La grande maggioranza di questi habitat, con le rispettive funzioni autoconservative, è stata compromessa a seguito delle diversioni fluviali e degli interventi dell'ultimo secolo, ma è in larga misura ripristinabile senza particolari costi per le attività umane finalizzando la progettazione alla ricomposizione di un rapporto compatibile e funzionale tra uso e conservazione.

sono andate le cose. Meno noto è il fatto che il concessionario aveva iniziato l'attività ponendo realmente tra gli obiettivi il riequilibrio e la rimozione delle cause di dissesto: risale al 1992 il primo Piano Morfologico ("Nuovi interventi per la Salvaguardia di Venezia - Interventi per il recupero morfologico della Laguna"), redatto dal Magistrato alle Acque con la progettazione di Technital e il coordinamento progettuale del Consorzio Venezia Nuova, che forniva un quadro unitario di riferimento ricercando una coerenza complessiva. Quel Piano individuava tra le cause di dissesto, come emergenza prima, il Canale dei Petroli, definendolo già allora "causa dell'inizio di un processo di movimentazione dei sedimenti con conseguente forte erosione dei bassifondi"; e, ponendosi come obiettivo la progettazione di una Laguna in rinnovato equilibrio, presentava tra le soluzioni praticabili, "per ridurre gli effetti della portualità o della navigazione sulla morfologia", l'"intervento radicale di interramento del Canale da Malamocco a S. Leonardo, con parallela ricostruzione di una via navigabile lungo il canale Fisolo" (Fig. 2). Con la precisazione che quel percorso, data la curvatura del Fisolo, avrebbe comportato l'estromissione delle grandi petroliere, consentendo comunque il transito di porta-containers lunghe fino 240 metri.

Il Piano del '92, pur contenendo parti che avrebbero richiesto un riesame, rappresentava un importante passo nella direzione degli obiettivi dati; ma altre mire e altre logiche si stavano imponendo, svilendo la portata di linee progettuali che, non a caso, sono state poi dimenticate. E così, dopo aver delineato con più alternative la soluzione di interrare il tratto iniziale del Canale dei Petroli e riattivare il Fisolo, l'elaborato l'aveva posta tra gli interventi da verificare richiedendo come "cautela", prima di procedere con gli sviluppi progettuali, un confronto con i risultati del previsto "riempimento del canale Valleselle" (il Taglio Nuovo di Caroman, breve drizzagno alla bocca di Chioggia nemmeno paragonabile per dimensioni ed effetti al Canale dei Petroli), al fine di fugare i timori di effetti negativi sull'erosione e sulla diffusione degli inquinanti. Timori enfatizzati nel "Rapporto finale" come "elementi molto contraddittori", in realtà irrilevanti o superabili già allora. Comunque sia l'indicazione operativa era chiara; solo che al riempimento di quel piccolo canale non si è mai provveduto, e ciò è bastato per non riprendere più l'obiettivo di restituire funzionalità alla Laguna Centrale.

#### 2. Obiettivi e soluzioni possibili

Negli ultimi lustri, mentre l'attenzione del mondo ambientalista era polarizzata sull'opposizione al Mo.S.E., alcune voci avevano portato testimonianze scientifiche e tecniche su come poter intervenire nella Laguna Centrale perseguendo gli obiettivi di civiltà dati dalle leggi speciali e ribaditi nel 2001 dal Consiglio dei Ministri. Ma quelle voci sono rimaste inascoltate, perfino quando accolte a parole nelle sedi istituzionali competenti. Particolarmente istruttivi, e strettamente attinenti i temi trattati in queste pagine, due incontri avvenuti nel 2002 e 2003 finalizzati a definire degli "orientamenti condivisi": il primo tenutosi presso il servizio Tutela Acque Interne del Ministero dell'Ambiente, presenti i direttori dei settori Ingegneria e Ambiente del Consorzio Venezia Nuova; il secondo, richiesto del Comune di Venezia, tenutosi presso la sede del Magistrato alle Acque con la partecipazione dei dirigenti e amministratori interessati<sup>5</sup>. In entrambi gli incontri, condivisa la necessità di attivare e sostenere le capacità di autorisanamento del sistema lagunare, si era convenuto che le energie anomale dovute al Canale dei Petroli dovevano essere ridotte al minimo ed orientate, grazie a strutture morfologiche da progettare ad hoc, in modo da diventare fattori di vivificazione, di rinaturazione e di rinnovato equilibrio dinamico. Indicazioni chiarissime, fatte proprie

significato svincolare il Concessionario dal previsto e deliberato controllo. Un voltafaccia ricordato da Tomasin con un auspicio in cui è oggi facile leggere l'amara ironia: "non rimane che sperare che qualche incontro futuro possa ricordare anniversari di fatti scientifici ed operativi fruttuosi per Venezia e il suo ambiente" [8, 9].

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> I resoconti di quegli incontri sono riportati nello studio monografico "*Ecologia* applicata e ripristino ambientale nella Laguna di Venezia. Analisi e classificazione funzionale delle barene e delle tipologie di intervento sulle barene", prodotto nel 2003 dallo scrivente nell'ambito della convenzione tra Ministero dell'Ambiente e ICRAM, programma "*Studio in materia di Tutela, Riqualificazione e Salvaguardia del Territorio della Laguna di Venezia*". Su autorizzazione del Ministero lo studio era stato stampato dal Comune di Venezia (Centro Produzione Multimediale) e ampiamente diffuso tra gli addetti ali lavori.

dalla Commissione per la Salvaguardia di Venezia che le aveva ribadite all'unanimità con valore di prescrizione<sup>6</sup>. La realtà ci dice che sono state ignorate anche dai soggetti che a parole le avevano condivise, tanto che è mancato qualsiasi approfondimento al riguardo.

A fronte degli obiettivi di riequilibrio le "Linee Guida" del 2004 ("*Attività di aggiornamento del Piano Morfologico, studi di base, linee guida e proposte di intervento*"), prodotte per il Magistrato alle Acque dal Consorzio Venezia Nuova e da Technital, hanno rappresentato un arretramento eclatante, con sconcertanti rovesciamenti negli indirizzi<sup>7</sup> e con eliminazione, divenuta definitiva, di ogni riferimento alle possibilità di riequilibrare l'area della Laguna Centrale riattivando il Fisolo. Così è stato anche per le ripetute bozze di Aggiornamento del Piano succedutesi dal 2004, fino al testo trasmesso nel novembre 2016 al Ministero dell'Ambiente per essere sottoposto a VAS, che hanno ignorato tout court quell'indicazione del Piano del '92 e confermato il Canale dei Petroli nel suo assetto attuale, consolidandolo con arginature e addirittura con barene artificiali fin dalla bocca di Malamocco.

In queste pagine vengono ripresi gli obiettivi, dati dalle leggi speciali per Venezia, del risanamento lagunare coniugato con lo sviluppo

<sup>7</sup> L'elaborato sfiora appena tematiche da tempo approfondite (ad esempio, i diversi significati morfologici e funzionali delle aree lagunari a barene); scompone invece la Laguna in 45.000 "celle" di un ettaro ciascuna, valutate secondo caratteri quantitativi e riassemblate statisticamente in 16 raggruppamenti (portati poi a 25) con uno spezzettamento elusivo del patrimonio di conoscenze e della visione per sistemi funzionali. Emblematiche alcune indicazioni, come quella che propone di intervenire sulla laguna per adattarla alla pesca alle vongole anziché ricondurre la pesca a forme compatibili, e quella che dichiara "insussistente" qualsiasi "attitudine" delle valli da pesca ai fini del riequilibrio lagunare, come se non fossero parte della laguna e non avessero interferenze con questa. delle attività umane compatibili, ripartendo dalle linee progettuali del Piano del '92 estese al recupero morfologico dei fondali ed all'esame di possibili soluzioni volte a recepire in nuovi assetti funzionali le energie scaricate dai transiti delle navi.

Va chiarito che le proposte, pur se articolate e precise, hanno carattere solo preliminare: le variabili da considerare sono infatti molte e le soluzioni possibili, suggerite dalle conoscenze e dall'esperienza, dovranno essere oggetto di confronto e di verifica effettuata con l'ausilio di adeguati strumenti modellistici. L'obiettivo è soprattutto quello di evidenziare come sia necessario e possibile un salto metodologico nella pianificazione alle diverse scale e nella progettazione degli interventi, in modo che questi siano finalizzati realmente alla riattivazione degli equilibri lagunari in una visione attenta a tutte le problematiche.

Per l'area in esame le strade attraverso cui ricercare una ricomposizione sono plurime. Un fatto appare in ogni caso chiaro, e questa nuota lo vuole evidenziare: <u>un'inversione rilevante del disastro provocato dal Canale dei Petroli è tuttora possibile</u>, e può essere perseguita dando risposta a più necessità prioritarie:

- neutralizzare gli impatti morfologici e idraulici del primo tratto del canale, ridefinendone l'andamento, come proposto già nel 1992, per poter restituire all'area carattere e funzioni di laguna canalizzata;
- restituire per quanto possibile ai fondali, oggi affossati e appiattiti, le differenziazioni che convogliavano i flussi, in modo da ricostruire una rete di canali di marea con i relativi assetti idrodinamici;
- contenere e recepire in un quadro di nuova funzionalità le energie demolitive causate dal Canale e dai transiti delle navi, realizzando lungo le casse di colmata delle interfacce intertidali e acquee relazionate alle forzanti naturali e artificiali.

#### 2.1. Il ripristino del canale Fisolo

Il Canale dei Petroli è un solco artificiale scavato negli anni Sessanta, profondo fino a 17 metri, che attraversa le acque libere

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Con atto del 18 dicembre 2003 la Commissione per la Salvaguardia di Venezia aveva disposto che "le energie anomale ed eccessive dovute alla innaturalità dell'assetto attuale e ai passaggi delle navi vengano ridotte al minimo, sulla base di progetti di uso e riassetto dell'area, ...inglobate nei nuovi assetti funzionali progettati e realizzati in modo da divenire fattori di vivificazione, di rinaturazione e di nuovo equilibrio dinamico". Ciò avrebbe richiesto la progettazione di elementi canalizzati "raccordati al Canale dei Petroli in modo da ricevere le onde provocate dal passaggio delle navi trasformandole da elementi di aggressione a elementi di vivificazione delle superfici acquee retrostanti... innescando processi evolutivi di rimodellamento spontaneo e di rinaturazione progressiva in equilibrio con un nuovo assetto morfologico ed energetico".

partendo dalla bocca di Malamocco per deviare poi verso est costeggiando le Casse di Colmata fino a Porto Marghera. Uno squarcio che taglia le anse dei due grandi canali naturali (Spignon e Fisolo-Melison) dai quali le correnti di marea si irradiavano alimentando la rete dei canali minori, ed attraversa fondali le cui profondità, prima dello scavo, si aggiravano mediamente sui cinquanta centimetri, superando il metro solo in alcuni tratti della "Fossa della Rosina" (tra lo Spignon e il Melison). Era evidente per tutti che l'opera avrebbe ferito in profondità la morfologia lagunare; e doveva essere ovvio, almeno per gli addetti, che avrebbe sottratto ai canali naturali gran parte dei flussi di marea, compromettendoli e alterando il ricambio nelle superfici lagunari interne. Ma erano altri tempi. Ulteriori collassi si sono evidenziati negli anni, dato che l'energia della corrente indotta dal nuovo canale ha risucchiato i sedimenti dalle superfici laterali, provocando in una vasta area l'affossamento e appiattimento del fondale fino a profondità di oltre due metri, con asportazione dello strato che supportava la rete dei canali minori. Le maree in uscita, due volte al giorno per oltre cinquant'anni, hanno espulso dalla Laguna gran parte del materiale solido messo in sospensione, mentre quello rimasto, per effetto delle correnti trasversali, è andato ad interrare gli alvei superstiti. Come conseguenza le correnti di marea ai lati del canale artificiale non si diffondono più per flussi canalizzati ma si espandono per laminazione sopra fondali spianati, tanto che gran parte del bacino alimentato dalla bocca di Malamocco ha perso l'assetto di laguna canalizzata andando incontro progressivamente, anche nel moto ondoso e nella biologia, a condizioni di golfo marino. Un disastro idraulico e geomorfologico tuttora in atto e in accentuazione [10], a fronte del quale la reimmissione nel Fisolo dei flussi originari di marea invertirebbe il processo di dissesto consentendo di avviare il risanamento idraulico e morfologico di una vastissima area.

I motivi ambientali addotti nel '92 per rimandare questa soluzione a verifiche mai avvenute apparivano quantomeno deboli, e comunque non sono più attuali. Più seria la limitazione posta allora dai problemi di navigazione nel Fisolo, la cui curvatura avrebbe consentito il passaggio di navi di lunghezza non superiore ai 240

m. Dal '92 ad oggi le soluzioni tecniche per il governo delle grandi navi sono cambiate, consentendo manovre in sicurezza prima proibitive (è stato proposto di recente un nuovo canale curvilineo, il taglio del Tresse, per il passaggio delle navi da crociera). Non vi sono quindi preclusioni tecniche perché un naviglio usuale possa percorrere l'ansa del Fisolo, riassestata nel tracciato e raccordata al Canale dei Petroli secondo un percorso da definire in base alle valutazioni idrauliche e alle esigenze della navigazione. Ottimale sarebbe riportare il traffico navale lungo il corso del Fisolo-Melison fino alla prossimità dell'immissione al Porto San Leonardo, come già ipotizzato nel 1992 (Fig. 2, alternativa A); comunque sia il raccordo dovrebbe evitare l'innaturale tratto rettilineo previsto nell'ipotesi indicata nel '92 come preferibile (Fig. 2, alternativa B), disegnando dall'inizio del Melison una contro-ansa successiva a quella con cui il Fisolo penetra in Laguna (Fig. 3). Il che richiede, è chiaro, nuovi scavi; ma qui è in gioco la possibilità, ancora realistica, di ricomporre una ferita aperta da mezzo secolo, restituendo all'area identità e funzionalità lagunare.

Nelle indicazioni progettuali del '92 il Magistrato alle Acque prefigurava l'interrimento del Canale dei Petroli nell'intero tratto dalla bocca a San Leonardo, riportato a quota di bassofondo. Può essere sufficiente limitare l'occlusione a due diaframmi, uno all'imboccatura del Canale ed uno all'incrocio con lo Spignon, per riportare i flussi di marea nell'alveo originario (Figg. 3 e 5). Rimarrebbero solo due fosse, con ricambio assicurato tramite le connessioni non occluse con i canali Spignon e Melison, che non sottrarrebbero più i flussi di marea e che sarebbero soggette nel tempo a riduzioni di profondità per deposizioni spontanee di sedimenti non più espulsi in mare.

### 2.2. Il ripristino delle differenziazioni nella morfologia sommersa

Il ripristino del Fisolo quale canale naturale e di navigazione, sostituito al tratto iniziale del Canale dei Petroli, rappresenta la premessa per la riformazione progressiva della rete di canali minori che innervava la vasta estensione lagunare antistante alle Casse di Colmata, oggi ridotta a mozziconi e tracce residue. Questa rete, mantenutasi nei secoli e rimasta tale fino ai primi anni Sessanta, era alimentata dai due

70



Fig. 3 - Rispetto alle soluzioni riportate in Fig. 2, proposte dal Magistrato alle Acque nel 1992, il presente studio progettuale ipotizza, per il nuovo raccordo tra il Fisolo e il Canale dei Petroli, una soluzione intermedia, con una controcurva di raggio analogo alla grande ansa naturale del Fisolo. Le valutazioni sono lasciate agli approfondimenti in sede di confronto tecnico-specialistico.

grandi rami laterali al Fisolo (Fig. 4): il canale Re di Fisolo (del quale permane solo l'imboccatura e qualche solco residuo), raccordato in una duplice circolarità acquea col canale Rochetta-Malamocco tramite il canale Campana e più a nord tramite i canali Perarol e Poveglia; il canale Molini, ramificato a ventaglio nei canali Maggiore (non ripristinabile nel nuovo assetto), Rischio e Lussariol (che potrebbero riconnettersi col Canale dei Petroli lungo le Casse di Colmata, ripristinando una circolarità acquea di cui restano poche tracce) e Brenta in Resta de Aglio (che innervava superfici acquee nella laguna aperta raggiungendo le ramificazioni interne del canale Poveglia).

La conoscenza della morfologia pregressa è fondamentale come riferimento primo, ma va assunta in modo flessibile: se gli approfondimenti portassero ad indicare, nel contesto mutato, morfologie sommerse più efficienti per il ritorno alla funzionalità idraulica lagunare, potrebbero essere condivisibili variazioni progettuali rispetto alla canalizzazione storica.

La necessità di ripristinare una rete canalizzata era stata oggetto di specifico esame già nello studio realizzato nel 2003 per il Ministero dell'Ambiente citato in nota 5, che riprendeva la proposta del Piano



Fig. 4 - Le barene oggi sepolte dalle Casse di Colmata e la rete dei canali di marea che innervava l'area antistante prima dello sprofondamento e appiattimento conseguenti allo scavo del Canale dei Petroli. L'immagine è tratta dalla carta idrografica dell'Ufficio Genio Civile di Venezia del 1901, rielaborata da D'Alpaos [10]. La canalizzazione, evidenziata con indicazione degli idronimi, si era mantenuta integra fino allo scavo del Canale.

del 1992 di riattivare il Fisolo e proponeva per i fondali erosi e spianati la <u>realizzazione di dossi sommersi, con finalità plurime</u> (Fig. 5):

- contenere e incanalare i flussi acquei evitandone la dispersione per laminazione, favorendo la pulizia degli alvei residui e inducendo la riapertura di rami terminali;
- contrastare gli interrimenti dei canali causati dalle correnti trasversali;
- frenare la formazione e diffusione delle onde da vento conseguenti alle accresciute profondità dei bassifondi, ed arrestare la risospensione di sedimenti dovuta a queste;
- trattenere le torbide impedendone la perdita in mare e favorendone la rideposizione, con incremento nelle quote e nelle differenziazioni delle morfologie sommerse;
- riorganizzare l'estensione acquea in corpi idrici confinati.



Fig. 5 - Dei semplici dossi sommersi, realizzati in prevalenza lungo i lati a nord-est dei canali preesistenti in localizzazioni tali da intercettare le torbide sollevate e spinte dalle onde di bora, non solo eviterebbero l'ulteriore perdita in mare dei sedimenti con le maree in uscita, ma, fungendo da celle di cattura o da imbuti, porterebbero al recupero di quota nei fondali interessati e indurrebbero flussi coesi, il tutto con rinnovate differenziazioni nella morfologia sommersa. Ciò, grazie alle correnti di marea nuovamente alimentate dal Fisolo, rappresenterebbe la partenza per un ripristino progressivo degli alvei e della natura stessa di laguna canalizzata.

Legenda: Morfologia sommersa e intertidale, soluzioni proposte. 1) occlusione dell'attuale imboccatura del Canale dei Petroli; 2) occlusione del Canale dei Petroli all'incrocio col canale Spignon; 3) dosso sommerso di contenimento delle torbide nell'ansa del canale Fisolo; 4) dosso a protezione della regolarizzazione dell'ansa del Fisolo; 5) dosso di protezione e cattura delle torbide nel raccordo tra Fisolo e Canale dei Petroli; 6) dossi finalizzati a convogliare la corrente nei canali Re di Fisolo e Molini; 7) dossi di cattura delle torbide sui lati a bora delle preesistenti canalizzazioni; 8) dossi a imbuto atti a recepire la bora originando flussi coesi; 9) pennelli soffolti atti a favorire la cattura di sedimenti; 10) superfici di realizzazione di frange barenali relazionate agli impatti della navigazione e alle forzanti meteomarine (Fig. 6).

Per rendersi conto di quanto siano realistici questi obiettivi basta osservare gli effetti conservativi e ripascitivi affermatisi spontaneamente a ridosso delle "dighette" lungo il Canale dei Petroli. Queste opere artificiali hanno intercettato i sedimenti movimentati dagli eventi meteomarini e dalla pesca alle vongole, mantenendo delle superfici a bassofondo a differenza di quanto avvenuto nelle acque libere della Laguna Centrale. Una chiara evidenza di come una ricostruzione della morfologia sommersa possa essere attivata con semplici elementi opportunamente localizzati e orientati.

Alcuni di questi obiettivi si riconoscono nelle ultime stesure dell'Aggiornamento del Piano Morfologico e Ambientale, che pongono come prioritarie *"la riduzione della perdita netta di sedimento per arrestare il degrado e procedere ove e quando possibile a invertirne il decorso*" e la realizzazione, mediante opportuni "criteri idromorfodinamici", di opere che possano "canalizzare i flussi e limitare il trasporto di sedimenti verso i canali principali"<sup>8</sup>.

I processi di nuova differenziazione andrebbero avviati realizzando dossi a quote intertidali inferiori<sup>9</sup>, formando delle celle di

<sup>8</sup> L'Aggiornamento al Piano contraddice però l'obiettivo principale, quello di rimuovere i fattori che causano degrado e invertirne il decorso. Le tavole dell'Aggiornamento indicano ripetutamente, come opere di canalizzazione, argini emersi con cui confermare e consolidare il tratto iniziale del Canale dei Petroli nella sua configurazione attuale, proteggendo il Fisolo solo all'inizio dell'ansa; per di più due disegni che simulano l'assetto futuro trasformano questi argini in sequenze di barene artificiali, trasversali alla Laguna, totalmente estranee alla geografia del luogo, immotivate e richiedenti volumi di sedimenti stimati in due milioni di metri cubi. Il tutto, senza alcun riferimento agli obiettivi di ripristino dei canali di marea e più in generale al riequilibrio della Laguna Centrale, prevedendo come effetto non l'inversione del degrado ma solo un rallentamento (del 48%) nella perdita di sedimenti.

<sup>9</sup> D'Alpaos, citando uno studio di Miazzi, indica per l'interruzione del fetch da bora una "quota efficace" di +50 cm sul livello medio del mare, considerando anche l'effetto idrodinamico assicurato dalla vegetazione alofila [11]. È chiaro che quote normalmente emergenti avrebbero maggiori capacità di contrastare l'onda; ma, come ricordato nella stessa opera, si tratterebbe di strutture morfologiche mai esistite nell'area. Un'adeguata sperimentazione dovrebbe contemplare le diverse possibili soluzioni, considerando non solo gli effetti sul fetch ma anche quelli sui dinamismi indotti, in particolare sul ricambio e sulle ridistribuzioni dei sedimenti (i dossi stessi potrebbero essere previsti anche quali ricariche). In questo quadro di sperimentazioni andrebbero testate anche soluzioni alternative o accessorie date da strutture rimovibili posizionate sui fondali e/o costituite da elementi galleggianti.

cattura in corrispondenza dei margini a nord-est dei canali attuali e preesistenti (Fig. 5). Lungo il Fisolo e il suo nuovo raccordo l'effetto trappola sarebbe accresciuto grazie a dighette soffolte a pettine, atte a trattenere ed accumulare i sedimenti come è prassi usuale nei litorali sabbiosi. Alle imboccature dei canali laterali al Fisolo in cui riportare le correnti di marea ("Re di Fisolo" e "Molini"), se il caso risagomate per recepire al massimo i flussi in entrata, un prolungamento delle arginature sommerse, oltre a catturare i sedimenti, dovrebbe favorire la canalizzazione, evitando la dispersione per laminazione. Un ulteriore effetto positivo ottenibile attraverso dossi opportunamente posizionati e orientati, prevalentemente nelle posizioni distali dei canali da ripristinare, potrebbe consistere nella creazione di "imbuti" atti a recepire e convogliare in flussi canalizzati le acque spinte dal vento di bora, trasformando in parte l'energia eolica, che oggi nell'area è un fattore di appiattimento, in fattore di differenziazione capace di contribuire alla riformazione della rete periferica. Con questi interventi i ripristini di quota, avviati con interventi diretti, dovrebbero procedere nel tempo, sfruttando le rideposizioni dei sedimenti mobilitati dal moto ondoso sommati a quelli immessi con eventuali ricariche.

In ogni caso va prevista una progressione graduale nei processi di ripristino, i cui vantaggi richiamano in qualche modo la cultura antica delle "scomenzere"<sup>10</sup>: gli interventi umani, e quindi i costi, vengono ridotti, perché si sfruttano i dinamismi spontanei indirizzandoli verso il completamento di ciò che si intende ottenere; vengono ridotte le quantità di sedimenti da immettere, poiché almeno in parte questi derivano da rideposizioni del materiale solido del quale si evita la perdita; le morfologie risultanti sono più relazionate alle forzanti, e quindi più conservative; risultano possibili delle verifiche in itinere sul raggiungimento degli effetti voluti, il che permette di correggere il tiro in un contesto dinamico talmente alterato da imporre flessibilità. Si tratta di operazioni da perseguire in tempi non brevi avendo come orizzonte, dopo più lustri, le nuove connessioni dei canali anche nelle ramificazioni interne, con una rinnovata delimitazione di corpi acquei che ridarebbe alla Laguna Centrale l'organizzazione spaziale in aree confinate<sup>11</sup>.

#### 2.3. Le disponibilità di sedimenti

Le previsioni sui tempi di raggiungimento di questi obiettivi richiedono una quantificazione aggiornata del materiale solido trasportato dalle correnti laterali e dalle onde. Sono certamente quantità minori rispetto a quanto si verificava negli anni Novanta e primi anni Duemila, quando la frullatura sistematica dei fondali attuata per la pesca alle vongole "filippine" metteva in sospensione le componenti limo-argillose facendole espellere in mare dalle correnti in uscita, con ulteriore affossamento e con trasformazione nella granulometria oggi dominata dalle sabbie fini residue [12]. Se si fosse intervenuti per tempo anziché eludere il problema si sarebbero almeno intercettati quei volumi di sedimenti, contenendo le perdite e restituendoci dei fondali in parte recuperati. Oggi il trasporto solido è ridotto, data la mutata tessitura del fondale, tanto da dover considerare l'eventualità di ricorrere a ricariche con cui alimentare le rideposizioni.

Il ripristino di differenziazioni nella morfologia sommersa pone in ogni caso il problema di individuare i materiali con cui realizzare i dossi, e ove possibile quello di prevedere azioni sinergiche che

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Una soluzione per realizzare nuovi canali in Laguna consisteva nell'aprirne le imboccature (le "scomenzere") e tracciarne appena gli alvei, indirizzando in questi una corrente per far sì che fosse la corrente stessa ad approfondire i solchi. In questo caso l'operazione sarebbe in parte diversa, perché l'azione imboccata porterebbe alla riformazione di canali realizzando dossi sul fondale ai lati dei canali da ripristinare, più che scavandone i percorsi; ma resta il principio di indurre correnti capaci di operare portando alle morfologie attese.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Il ripristino di superfici acquee confinate rappresenta un presupposto per una gestione responsabile della pesca. Nei primi anni Duemila l'ICRAM (oggi confluito nell'ISPRA) aveva individuato, tra le strategie per ricondurre ad un quadro di compatibilità la pesca alle vongole "filippine", la responsabilizzazione degli addetti nella gestione complessiva di corpi acquei funzionalmente delimitati, nei quali abbinare obbligatoriamente gli usi impattanti con soluzioni e azioni di miglioramento e con rilancio in forma moderna delle pratiche tradizionali di pesca. Premessa necessaria era appunto la possibilità di assegnare le concessioni per superfici confinate. Questa soluzione, che avrebbe salvato la diversificazione produttiva e con questa il futuro della pesca, non ha avuto seguito. Oggi assistiamo al previsto tracollo della produzione di vongole, senza che siano stati creati sviluppi alternativi efficienti e sostenibili capaci di rilanciare il comparto.

accelerino i processi ricostruttivi. È usuale che detti materiali siano prima di tutto quelli resi disponibili dai dragaggi in aree lagunari compatibili sotto il profilo ecotossicologico; a questa attenzione è da aggiungere quella relativa alla compatibilità granulometrica, dato che i sedimenti immessi devono rimanere in situ disperdendosi il meno possibile, il che orienta le scelte su sedimenti con elevate percentuali di sabbie<sup>12</sup>. Nei casi qui in esame la fonte prima potrebbe derivare dai dragaggi e dalla ricalibratura del Fisolo, dallo scavo con cui raccordarlo al Canale dei Petroli (la cui profondità, come avvenuto negli anni Sessanta con la realizzazione del canale portuale, andrebbe a raggiungere strati preesistenti alla Laguna<sup>13</sup>) e in misura minore dagli interventi più avanti esaminati sui margini delle Casse di Colmata. Volendo dare un'idea orientativa delle quantità gli scavi e i dragaggi potrebbero fornire volumi per oltre cinque milioni e mezzo di metri cubi (circa 2.500.000 dallo scavo del nuovo raccordo tra il Fisolo e il Canale dei Petroli; circa 900.000 dagli scavi per la riprofilatura del Fisolo; circa 1.800.000 per i dragaggi del Fisolo; circa 400.000 per la realizzazione dei ghebi e dei chiari sui margini delle Casse di Colmata). Ciò a fronte di una necessità valutabile orientativamente, per il complesso delle opere considerate nello studio, in meno di quattro milioni e mezzo di metri cubi (circa 900.000 per le occlusioni del Canale dei Petroli nelle intersezioni con lo Spignon e col Fisolo; circa 2.000.000 per le realizzazioni dei dossi sommersi, ovvero un volume analogo a quello stimato nell'Aggiornamento del Piano Morfologico per le barene artificiali citate in nota 8; circa

1.500.000 per la realizzazione delle frange barenali). Il bilancio metterebbe a disposizione una quota residua, da destinare a ricariche sommerse con cui alimentare i processi di rideposizione spontanea. Tutto ciò, evidentemente, previo accertamento delle compatibilità chimiche, per le quali è lecito aspettarsi esiti favorevoli, quantomeno per gli scavi negli strati più profondi.

Particolari benefici per la stabilità dei dossi e per le loro capacità di trattenere le torbide potrebbero derivare dall'aggiunta in superficie di nicchi di gasteropodi o conchiglie di bivalvi (preferibilmente, data la scabrezza, di ostriche), per l'effetto protettivo e per la capacità di innescare accrescimenti di organismi incrostanti e alghe. Qualcosa di noto, visto che detti ammassi erano usuali nei fondali sottostanti gli allevamenti di mitili. Un ripristino della mitilicoltura lungo i margini dei canali in esame andrebbe per questo proposto come soluzione al tempo stesso produttiva, migliorativa dell'ambiente – i mitili filtrano l'acqua – e sinergica nel ripristino della morfologia e nell'attenuazione del moto ondoso.

Risultati importanti, tra le sinergie possibili, potrebbero derivare anche dall'uso di elementi galleggianti ancorati al fondale, capaci di ridurre gli effetti del moto ondoso. Detti elementi, ben noti e sperimentati, presentano massima flessibilità e sono completamente e rapidamente rimovibili, con costi contenuti. In quanto galleggianti la loro efficacia non risente della marea; sola limitazione è data dalle profondità che devono essere sufficienti per il galleggiamento e l'ancoraggio.

#### 2.4. Le energie anomale come opportunità da recepire

Nell'antico ramo del Brenta che dalle chiuse dei Moranzani conduce a Fusina capita di osservare, ai passaggi di navi nel Canale dei Petroli, una leggera corrente che raggiunge la piccola darsena determinandovi per pochi minuti una variazione visibile nel livello dell'acqua. Questo fenomeno era stato richiamato già nei primi anni Duemila nel corso delle due riunioni tecniche prima citate tenutesi presso il Ministero dell'Ambiente e il Magistrato alle Acque, finalizzate ad affrontare in modo nuovo le soluzioni per la delimitazione del Canale dei Petroli al fine di mitigarne gli impatti. Se infatti il transito dei navigli origina correnti capaci di interessare in profondità le canalizzazioni laterali

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Questo criterio di ottimizzazione ha indotto ad individuare, tra le soluzioni proposte in uno dei progetti che prevedono alla bocca del Lido l'avamporto crocieristico, l'area affossata dal Canale dei Petroli quale sito per il recapito dei sedimenti sabbiosi dragati.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Buona parte delle Casse di Colmata deriva dallo scavo di quegli strati. Le casse stesse potrebbero essere serbatoi per sedimenti da restituire alla morfologia sommersa, a parziale compensazione del danno causato oltre mezzo secolo fa. Le valenze per cui sono tutelate come aree SIC sono infatti discontinue, e in gran parte le quote sono improprie rispetto a quelle lagunari dell'area. Riportare le superfici meno pregiate alle quote peculiari, sulla base di una progettazione raffinata che mantenga ed esalti tutte le valenze e potenzialità naturalistiche, oltre a rimettere a disposizione ingenti volumi per le opere di riequilibrio rappresenterebbe un miglioramento ai sensi della direttiva Habitat.

vien da sé che queste energie possono essere almeno in parte recepite e incanalate mediante opportune realizzazioni, piuttosto che subite e contrastate con mere barriere di contenimento. Un modo non solo per limitarne gli effetti erosivi ma anche per accogliere gli impulsi quali fattori di vivificazione e di trasporto di sedimenti, con rimodellamenti verso assetti morfologici di rinnovata efficienza. Si tratta dunque di verificare in chiave progettuale come, e in che misura, le energie aggressive scaricate nell'ambiente possano essere incanalate attivando nuovi processi funzionali.

Per affrontare queste linee in ottica operativa occorre partire dal fatto che il Canale dei Petroli pone problemi diversi nei vari tratti e nelle due sponde, richiedendo soluzioni altrettanto diverse.

- Nel primo tratto, che attraversa le acque libere, l'emergenza prima, cui si sommano gli effetti demolitivi dei passaggi delle navi, è data dal tirante d'acqua che sottrae ai canali naturali i flussi di marea, risucchia i sedimenti e ne espelle in mare con le correnti in uscita le frazioni più fini. Per questo tratto si è già esaminato, come intervento necessario per il riequilibrio, il ripristino del Fisolo quale alveo naturale e via di navigazione, con interruzione del canale rettilineo.
- Nel tratto lungo le Casse di Colmata, da S. Leonardo all'isola delle Tresse, sono le variazioni di pressione e le conseguenti correnti dovute ai passaggi delle navi i fattori di maggior destabilizzazione, con effetti diversi tra il lato che fiancheggia le Casse e quello rivolto alle acque libere. L'obiettivo primo è dato dal controllo delle energie prodotte dalle navi, nella duplice finalità di dissiparle e di recepirle quali fattori di vivificazione e di nuova differenziazione morfologica. Pur essendo le due sponde molto diverse le logiche di intervento si possono basare su un criterio comune: realizzare sistemi di "ghebi" capaci di accogliere in sequenza le acque movimentate dai passaggi delle navi facendole confluire, con impulsi discontinui, in corpi acquei confinati ("laghi" o "chiari"<sup>14</sup>) connessi tra

loro. Sul lato rivolto alle acque libere ciò richiede la costruzione di elementi emergenti a quote intertidali; lungo le Casse richiede al contrario lo scavo di ghebi e di chiari.

Oggi i passaggi delle navi mobilitano i sedimenti determinandone sollevamenti e circolazioni laterali [13], con risucchi e accumuli sul fondo in un sistema costantemente destabilizzato in cui le correnti di marea in uscita portano a perdite nette della sostanza solida. I flussi capaci di trasportare sedimenti sono provocati tanto dalle onde di compressione quanto dall'acqua richiamata dalle depressioni, con interferenze, variabili con la velocità e il dislocamento delle navi. Nelle morfologie qui prefigurate basta che ad ogni passaggio una percentuale significativa di acque e sedimenti venga spinta ad imboccare i ghebi realizzati sui due lati perché, nel tempo, gran parte del materiale in sospensione risulti catturata ed indirizzata verso i "laghi" e i "chiari", migrando e stratificandosi progressivamente in nuovi fondali strutturati.

Il bilancio finale di questa soluzione porterebbe a più benefici, rispondenti a precisi obiettivi sia ambientali che tecnici ed economici:

- verrebbero limitate le perdite di sostanza solida;
- verrebbe ridotto l'interrimento del canale navigabile, con maggiore sicurezza per la navigazione e riduzione degli oneri imposti dagli interventi di dragaggio;
- verrebbe attivata localmente una circolazione periferica;
- le morfologie realizzate, intertidali e sommerse, andrebbero incontro ad assestamenti spontanei tendendo a forme con crescenti capacità autoconservative;
- la differenziazione morfologica originerebbe nicchie di elevato valore ecosistemico ed elevata produttività biologica.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> I "ghebi" sono i canali interni ai sistemi di barene; i "chiari" sono invasi di medie o piccole dimensioni presenti entro i corpi barenali, spesso in localizzazione perimetrale; i "laghi" sono specchi acquei di dimensioni medie o grandi compresi all'interno dei sistemi

di barene. Nella Laguna Centrale il termine "laghi", tuttora in uso, evidenzia l'originaria bassa salinità in un sistema che era dominato dalle piene del Brenta; gli analoghi specchi nella Laguna Nord sono chiamati invece "paludi".

# 2.5. Un' interfaccia di nuove barene tra il Canale dei Petroli e le acque libere

Nel tratto lungo le Casse di Colmata, sul versante confinante con la laguna aperta, il sistema da progettare dovrà configurarsi come interfaccia funzionale tra il canale e le acque libere capace di relazionarsi con le forzanti proprie dell'area. Sul bordo del canale queste sono date in primo luogo dagli impulsi elevati e discontinui dovuti ai transiti delle navi; sul lato rivolto alle acque libere è il moto ondoso da vento il fattore di criticità con cui relazionarsi, accentuato dal lungo fetch su superfici a fondali affossati. Tra i due fronti, costituiti ciascuno da un allineamento di corpi barenali separati da ghebi (Fig. 6), una superficie intermedia a bassifondi e velme fungerà da fascia di espansione e transizione lasciata ai rimodellamenti spontanei, con benèfici effetti anche sull'avifauna e sulla produttività ittica.

Prima dello scavo del Canale l'estensione delle acque libere confinava con i sistemi di barene e velme oggi sepolti dalle Casse di Colmata; dopo lo scavo rimanevano solo esigui lembi relitti, oggi scomparsi, corrispondenti alle estremità dei sistemi preesistenti. Il rapporto tra l'acqua e le frange intertidali è prioritario nella funzionalità lagunare, e va ripristinato con elementi che restituiscano, in forme e localizzazioni necessariamente nuove, identità e qualità all'area<sup>15</sup>. L'utilità di realizzare lungo il Canale delle barene artificiali era stata prospettata già nel Piano Morfologico del 1992; nel 2006 è stata realizzata all'altezza di Fusina la "barena artificiale Canale Fusina" (richiamata ancora nell'ultimo Aggiornamento del Piano Morfologico come modello di riferimento per l'intercettazione del moto ondoso<sup>16</sup>), seguita dalla più lunga "ba-



Fig. 6 - Lungo il tratto del Canale dei Petroli che costeggia le Casse di Colmata il sistema intertidale sul lato acque libere dovrà interfacciarsi con forzanti diverse. Sul bordo del Canale la morfologia intertidale sarà relazionata alle variazioni di pressione, elevate e discontinue, dovute ai transiti delle navi; verso le acque libere sarà relazionata al moto ondoso da vento. Una superficie intermedia a bassifondi e velme fungerà da fascia di espansione e transizione, lasciata ai rimodellamenti spontanei. (L'esempio è limitato al tratto tra l'ex canale Rischio e il Contorta).

<u>Legenda</u>: 1: elementi del sistema atto a relazionarsi alle energie provocate dalle navi; 2: elementi relazionati al moto ondoso da bora; 3: idem, da scirocco; 4: elementi ribordanti i canali attuali; 5: idem sui canali preesistenti; 6: "laghi" di dissipazione delle correnti; 7: "sacche" sul fronte esposto a vento.

rena Sant'Angelo"; infine un progetto di morfologie artificiali è stato presentato nel 2013 come "*Interventi per la protezione e conservazione dei fondali del canale Malamocco-Marghera*", proposto dall'Autorità Portuale e dal Magistrato alle Acque e finalizzato al recapito di materiali di scavo<sup>17</sup>. Né le opere realizzate, né il progetto del 2013, rispondono però

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> La progettazione di questo sistema di interfaccia chiama in causa una tematica generale di importanza basilare per gli interventi in laguna, ampiamente trattata nello studio richiamato in nota 5: dove localizzare le barene artificiali correttamente intese e come definirne forme, strutture e accorpamenti, in ragione degli obiettivi posti, della naturalità da assumere come riferimento e delle forzanti che caratterizzano i siti [6].

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Questa "barena artificiale", stretta e compatta, è armata verso il Canale da sistemi privi di discontinuità formati da burghe e materassi riempiti in materiali lapidei, posti su più livelli al fine di creare una barriera nei confronti delle onde prodotte dalle navi. Un'opera, opposta al principio di recepire le energie quali fattori di vivificazione, che ha originato sul versante rivolto alle acque libere delle aree a ricambio insufficiente

<sup>(</sup>Sfriso, comunicazione personale), suggerendo interventi correttivi come più avanti indicato.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Detto progetto proponeva la replica delle barene vicine sepolte dalle Casse di Colmata, "traslate" di circa 500 metri, copiando forme che già prima dello scavo del Canale dei Petroli erano residuali [6]; in tutto prevedendo cinque elementi, due dei quali, a quote non raggiungibili dalle sommersioni, destinati allo sversamento di fanghi inquinati (isole-discariche dunque, non barene, ancorché artificiali, in un'area che richiede e merita ben altro). Il progetto era stato ritirato dal Magistrato alle Acque a

#### SCENARI POSSIBILI PER IL RIEQUILIBRIO DELLA LAGUNA 85

agli obiettivi del riequilibrio, non proponendo sistemi di interfaccia articolati in ragione delle forzanti attuali. Come si è visto queste, nel caso in esame, sono diverse sui due lati del fronte barenale proposto, richiedendo attenzioni progettuali altrettanto diversificate.

- Gli <u>elementi costitutivi lungo il bordo del Canale</u> saranno tendenzialmente ripetitivi e simmetrici, data la linearità del canale stesso e la simmetria delle onde provocate dalla navigazione nei due sensi di marcia (Figg. 6, 7, 8). Saranno intervallati da ghebi, orientati in modo da ricevere i flussi generati dalle navi convogliando l'energia fino a dissiparla nelle retrostanti superfici a bassifondi e velme. In corrispondenza delle intersezioni con i canali tuttora esistenti (ridotti ai soli canale Contorta e canale Nuovo di Fusina) gli elementi saranno prolungati fino a raggiungere le acque libere; in corrispondenza dei canali cancellati dal dissesto (Rischio e Lussariol) un'analoga soluzione, finalizzata al ripristino, andrà esaminata in base ai criteri di nuova funzionalità.
- Lungo il lato della frangia barenale rivolto alle acque libere la ٠ fascia intertidale sarà formata da successioni di elementi del tutto diversi, relazionati al moto ondoso prodotto dalla bora e dallo scirocco nelle rispettive direzioni e stagionalità. Come riferimenti morfologici di confronto si potranno assumere i profili che si ritrovano nei margini tra barene e acque libere della laguna centrale e meridionale, nella quale i dinamismi naturali legati ai venti dominanti hanno portato a ricorrenti perimetri a "sacche", piccole baie a diverse dimensioni e concavità. Nelle esemplificazioni grafiche una serie di elementi prominenti, con forme e orientamento atti ad intercettare le torbide spinte dalla bora, si alterna ad elementi a celle allungate finalizzate a trattenere le torbide da scirocco (Figg. 6 e 8), in complessi che formano una successione di sacche; tra i singoli elementi le brecce di separazione sono orientate per trasportare nelle superfici retrostanti, con le sciroccate, parte dei sedimenti accumulatisi sui fondali antistanti.



Fig. 7 - Delle canalizzazioni laterali al Canale dei Petroli, intervallate ai nuovi elementi morfologici, possono recepire e incanalare parte delle energie provocate dai passaggi delle navi attivando una localizzata circolazione, evitando l'accumulo nel canale dei sedimenti mobilitati e la loro progressiva espulsione in mare, attivando processi ricostruttivi della morfologia. Queste canalizzazioni, curvilinee in analogia agli assetti naturali, devono essere orientate in ragione dei due sensi di marcia dei natanti; il che porta a morfologie ripetitive e simmetriche, variabili a seconda delle distanze e delle sfasature tra i canali stessi. Tra le varie possibilità la figura a destra indica una soluzione di particolare significato, in cui i canali contigui orientati alle correnti causate dalle navi in arrivo e in partenza confluiscono portando i flussi in uno stesso alveo.



Fig. 8 - Modelli esemplificativi, con evidenziazione dei rapporti tra forme e quote, per la progettazione dei margini protettivi nei nuovi elementi morfologici finalizzati al recepimento delle energie, alla cattura delle torbide e al ripristino della funzionalità intertidale. Gli elementi a sinistra riprendono l'esempio della Fig. 7 riferito agli elementi relazionati all'energia prodotta dalle navi; quelli a destra sono relazionati ai venti di scirocco e di bora (Fig. 6).

<u>Legenda</u>: V = velme (superfici intertidali prevalentemente sommerse); B = barene tabulari (superfici intertidali a quote di circa +20  $\div$ 30 cm sul medio mare relativo); F = barene "forti" (a circa + 45 cm); R = protezioni rigide.

In tutti i casi le superfici realizzate saranno a quote intertidali analoghe per collocazioni e funzioni a quelle naturali, con le estensioni a

seguito di osservazioni che avevano evidenziato le conflittualità con le normative e con i criteri di corretta gestione della Laguna; salvo ricomparire, sotto il nome di "*strutture morfologiche artificiali in progettazione*", nelle tavole dei recenti aggiornamenti del Piano Morfologico e Ambientale.

barena tabulare ribordate da "barene forti" lungo i perimetri lambiti dalle correnti [14]. Gli elementi rigidi di protezione ai margini saranno il più possibile limitati, e potranno essere sia contigui alle superfici intertidali da realizzare, sia scostati per lasciare tra le protezioni e le barene fasce di acque calme a bassifondi o velme. L'intero sistema presenta un elevatissimo sviluppo dei perimetri attivi, importante nella funzionalità ecosistemica di interfaccia, con mantenimento interno di ampie estensioni acquee di elevato valore per gli effetti dissipativi e per la produttività.

I fattori da considerare per passare ad una fase progettuale compiuta sono molteplici, legati all'effettivo stato di fatto, alle previsioni di traffico acqueo e alle conseguenti valutazioni sulle energie e sulle problematiche con cui rapportarsi. Da ciò le valutazioni sui profili delle imboccature e sulle inclinazioni dei canali da realizzare, sulle loro distanze e frequenze nei due sensi di marcia, sulle loro dimensioni. In ogni caso, alla luce degli obiettivi indicati, alcuni criteri dovranno essere assunti come prioritari.

- Gli orientamenti, le forme e le sezioni delle canalizzazioni laterali al Canale dei Petroli, dovranno essere finalizzati al massimo recepimento delle energie prodotte dal traffico navale e alla canalizzazione dei flussi fino alle superfici di dissipazione.
- In tutto il sistema saranno previsti e favoriti i processi di migrazione, rideposizione e rimodellamento spontaneo dei sedimenti tendenti al raggiungimento di forme stabilizzate relazionate alle forzanti.
- Le quote e i rapporti tra quote e morfologie dovranno essere il più possibile conformi, ad assestamento avvenuto, a quanto si riconosce nelle barene naturali. Localizzate eccezioni, a livelli di poco superiori, saranno opportune solo se finalizzate a funzioni che accrescano la resistenza (es., protezioni all'innesco dei canali) o la qualità ecosistemica (es., siti di nidificazione).
- L'inevitabile ricorso ad elementi rigidi a protezione delle morfologie e delle funzioni idrauliche dovrà essere limitato ai tratti non altrimenti difendibili, e attuato comunque con soluzioni dissipative.

Dove il Canale dei Petroli è già ribordato da elementi di protezione saranno da prevedere soluzioni ad hoc coerenti con detti criteri. Si pensi alle due "dighette" (una tra Fusina e le Trezze e una all'altezza della Cassa B) e alle strette "barene artificiali di intercettazione moto ondoso e canalizzazione" realizzate tra il canale Contorta e Fusina (v. nota 16). Nelle soluzioni qui prospettate la dighetta parallela alla Cassa B verrebbe inglobata nella nuova morfologia, con varchi in corrispondenza dei ghebi, mentre le "barene" dovrebbero essere trasformate da barriere di separazione a elementi di interfaccia tra sistemi acquei, mediante numerosi tagli trasversali analoghi alle "vegnue" dei pescatori tradizionali con l'aggiunta, lungo il Canale, di sequenze di elementi atti a dissipare e incanalare l'energia, e sul lato acque libere di pettini per trattenere i sedimenti spinti dalla bora e dallo scirocco.

I disegni proposti indicano delle soluzioni progettuali da proporre al confronto e da sottoporre alle verifiche modellistiche. Il necessario presupposto per la loro attuazione è dato dalla reperibilità di sedimenti idonei per quantità e qualità; nel caso vi sia carenza sarà importante procedere comunque alla realizzazione degli elementi finalizzati ad incanalare i flussi e catturare le torbide, assottigliando le superfici a quote di barena ma mantenendo i perimetri esterni e le successioni tra protezioni rigide, barene "forti" e barene tabulari.

# 2.6. Ridare funzionalità al margine delle Casse di Colmata

Le superfici acquee tra il Canale dei Petroli e le Casse di Colmata confinano, oltre una fascia a minor profondità, con sponde a quote per lo più insulari, che riflettono le onde prodotte dalle navi accentuando l'instabilità, il rilascio di sedimenti e il progressivo arretramento del fronte delle casse. Anche lungo queste sponde l'obiettivo di dissipare e recepire le energie può essere perseguito con soluzioni articolate e sequenziali, che possono prevedere (Fig. 9):

- <u>un primo marginamento sul bordo del canale</u>, costituito da successioni lineari di elementi protettivi alternati a varchi, volto a creare tra il Canale e le Casse una fascia ad acque più calme soggetta internamente a dissipazioni e rimodellamenti spontanei;
- u<u>na sequenza di ghebi lungo i perimetri delle Casse</u>, raccordati al Canale e finalizzati a incanalare i flussi provocati dalle navi raccordandoli con sequenze di "chiari" connessi tra loro fungenti da vasche di espansione.



Fig. 9 - Raffigurazione esemplificativa degli interventi sui margini delle Casse di Colmata lungo il Canale dei Petroli (nell'esempio la Cassa B). Una sequenza di "chiari" interni, alimentati da ghebi opportunamente orientati provenienti dal Canale, avrebbe effetti dissipativi delle energie scaricate dalle navi, porterebbe al trattenimento dei sedimenti e ricreerebbe pregiati habitat, con incremento nei popolamenti di specie prioritarie ed effetti di protezione e nursery per la fauna ittica (*sfondo: da Google Earth*).

Legenda: •Elementi attuali: 1) superfici a barena (in senso lato); 2) superfici a quote superiori, variamente boscate; 3) superfici di transizione; 4) specchi acquei e "chiari"; 5) velme e bassifondi degradanti; 6) resti delle originarie protezioni angolari. •Linee progettuali: 7) protezioni rigide (dighette) lungo il Canale; 8) "ghebi" atti a incanalare correnti e moto ondoso; 9) "chiari" fungenti da vasche di dissipazione; 10) piccoli ghebi di connessione tra le vasche e con i canali interni.

Tale sistema sarebbe destinato a rimodellarsi spontaneamente tendendo al raggiungimento di condizioni relativamente stabilizzate, con ripristino spontaneo di funzioni ecosistemiche particolarmente pregiate. La nuova morfologia porterebbe infatti alla dissipazione delle energie, alla cattura di sedimenti, al sequestro di nutrienti e inquinanti (resi così più controllabili, come avveniva negli "schiumatori" vallivi), con riformazione di superfici intertidali e subtidali di particolare importanza per la biodiversità e per la protezione e alimentazione del novellame; in più questo tipo si soluzione, riducendo le erosioni, rallenterebbe l'arretramento dei margini delle casse, con effetti benefici anche ai sensi della Direttiva Habitat.

Numerosi aspetti andranno approfonditi in fase progettuale, anche con sperimentazioni e simulazioni modellistiche: le strutture, forme e dimensioni dei marginamenti da realizzare a lato del Canale; le frequenze e gli orientamenti nei "ghebi" da aprire; le loro sezioni, profondità, sinuosità; le dimensioni e forme dei "chiari" e delle connessioni tra questi. Tutto ciò in relazione ai perimetri attuali dei margini delle Casse e alle diverse valenze, discontinuità e potenzialità naturalistiche che le caratterizzano.

3. Conclusioni

L'obiettivo di queste pagine è soprattutto quello di evidenziare come sia necessario e possibile un salto metodologico nella pianificazione alle diverse scale e nella progettazione degli interventi, finalizzandoli realmente al riequilibrio. Tutte le raffigurazioni proposte vogliono essere delle esemplificazioni da adattare alle condizioni effettive presenti nell'area e da sottoporre a verifiche con l'ausilio di adeguati strumenti analitici e previsionali. In riferimento alla realizzazione delle diverse morfologie esaminate (la frangia barenale, lo scavo di ghebi e dei chiari, il ripristino delle differenziazioni del fondale mediante dossi sommersi) quanto proposto si presta a realizzazioni sperimentali su numeri limitati di elementi, da cui ottenere le indicazioni per perfezionare e calibrare le soluzioni consentendo di procedere con gradualità e di adeguare progressivamente le opere alle risposte dell'ambiente. Sarebbe un passo significativo nella direzione richiesta, da oltre quarant'anni, dalle Leggi Speciali.

# 4. Bibliografia

[2] Avanzi C., Fossato V., Gatto P., Rabagliati R., Rosa Salva P., Zitelli A., Ripristi-

<sup>[1]</sup> COMUNE DI VENEZIA, *Raccolta della legislazione speciale per Venezia* (a cura di G. Gidoni e M. Ballarin). Centro Stampa Lavori Pubblici, Venezia (1995).

no, conservazione ed uso dell'ecosistema lagunare veneziano. Comune di Venezia, Tip. Commerciale, Venezia (1979).

- [3] STOCCHETTI S., Il porto commerciale di Venezia: interventi tecnici in laguna nei secoli XIX e XX. In *Mostra storica della Laguna di Venezia (catalogo)*. Stamperia di Venezia, Venezia, 261-270, (1970).
- [4] BONOMETTO L., Il crepuscolo della Laguna. In La Laguna di Venezia, Ambiente Naturalità Uomo, Nuovadimensione (Portogruaro). Peruzzo Industrie Grafiche s.p.a., Mestrino, 181-243 (2007).
- [5] ROSA SALVA P., Trasformazioni ambientali ed alterazioni nella laguna Veneta, *Urbanistica* 62 (1974).
- [6] BONOMETTO L., Il respiro della Laguna. Corte del Fontego ed., Venezia (2014).
- [7] BONOMETTO L., La vegetazione delle barene e delle colmate. Appunti di biodiversità funzionale. *Lavori Società Veneziana di Scienze Naturali* 40 suppl., 45-90 (2015).
- [8] DALLAPORTA G., La ricerca scientifica per Venezia Il Progetto Sistema lagunare Veneziano, 1 (introduzione). Istituto Veneto di Scienze, Lettere a Arti, Venezia, 1-3 (2000).
- [9] TOMASIN A., L'attività scientifica sui problemi lagunari condotta dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, in *Conterminazione Lagunare, IVSLA, Atti del convegno per il bicentenario della conterminazione, 1991.* La Garangola, Padova, 259-269 (1992).
- [10] D'ALPAOS L., L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche. Comune di Venezia, Istituzione Centro Previsioni e Segnalazioni Maree, Legge Speciale per Venezia. Europrint, Quinto di Treviso (2010a).
- [11] D'ALPAOS L., Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La Laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto. Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti, Memorie XLIV, Venezia (2010b).
- [12] SFRISO A., FACCA C., Effetti della pesca di *Ruditapes philippinarum* (Adams & Reeve, 1850) sui tassi di sedimentazione e sui processi di erosione nella laguna di Venezia. *Lavori Società Veneziana di Scienze Naturali* 35, 83-92 (2010).
- [13] D'ALPAOS L., Il porto di Venezia: impatti della navigabilità sulla Laguna. In *Il porto di Venezia, Commissione di Studio sui Problemi di Venezia.* Istituto Veneto di Scienze, Lettera e Arti, Venezia, 49-75 (2014).
- [14] BONOMETTO L., Functional characteristics of salt marshes (barene) in the Venice Lagoon, and environmental restoration scenarios. Workshop on Venice lagoon. University of Cambridge Press, 473-486 (2005).

# A NEW APPROACH TO THE BENTHIC HABITAT MAPPING IN THE VENICE LAGOON WITH A MULTIBEAM ECHOSOUNDER SYSTEM

A. Kruss<sup>(1)</sup>, F. Madricardo<sup>(1)</sup>, G. Montereale Gavazzi<sup>(1,2,3)</sup>, F. Foglini<sup>(4)</sup>, L. Janowski<sup>(5)</sup>, M. Sigovini<sup>(1)</sup> F. Trincardi<sup>(1)</sup>

#### 1. Introduction

Estuaries and shallow coastal ecosystems are very productive and valuable environments [e.g. 1,2]. They are particularly susceptible to anthropogenic pressure because they are often in close proximity to urban agglomerations and heavy marine traffic. Effective management of vulnerable coastal regions requires an understanding of the spatial complexity of benthic forms and habitats as well as an understanding of hydrodynamic processes. Many national and international programmes focus on mapping these ecosystems already, e.g. *Mapping European Seabed Habitats* (*MESH*) (http://www.searchmesh.net), *MESH Atlantic* (http:// www.meshatlantic.eu), *EU Seamap* (http://jncc.defra.gov.uk/page-5040), *MAREANO* (http://mareano.no/en), *UK SeaMap* [3], the Irish *INFOMAR* program (http://www.infomar.ie), the *Gulf of Maine Mapping Initiative* (http://www.gulfofmaine.org/gommi), the Victorian marine habitat mapping project in Australia (http://hdl.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Arsenale - Tesa 104, Castello 2737/F, 30122 Venezia, Italy.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Royal Belgian Institute of Natural Sciences, Operational Directorate Natural Environment Gulledelle 100, 1200 Brussels, Belgium.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Renard Centre of Marine Geology, Department of Geology and Soil Science, University of Ghent.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bologna, Italy.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Institute of Oceanography, University of Gdansk, al. Marszalka Pilsudskiego 46, 81-378 Gdynia, Poland.

handle.net/10536/DRO/DU:30010514) and implementing their results for fact-based legislative frameworks (including the designation of Marine Protected Areas).

The mapping of coastal and shallow benthic habitats (in water depths < 30 m) is significantly limited when using conventional surveying technologies (e.g. dives, grabs) referred to low-resolution bathymetric maps. Satellite and aerial remote sensing techniques have been employed to map littoral ecosystems [e.g. 4] although water turbidity and limited light penetration dramatically restrict the potential of such applications [5]. Conversely, underwater acoustic techniques are recognized as a very efficient tool for benthic habitat mapping.

In the last decade the advances in marine acoustic survey technique and, in particular, multibeam echo-sounder (MBES) technology have opened new frontiers in the field of mapping bottom morphologies, substrates and habitats (see Brown et al. 2011 for a review [6]). While these methods start to be widely used in shallow waters [e.g. 7-11], they were only very recently applied in extremely shallow tidal environments [12,13]. In fact, substrate mapping using backscatter and water column data is relatively new in extremely shallow environments, where acoustic methods have rarely been used [e.g. 14, 13]. However, extremely shallow coastal environments often undergo pervasive human pressure that needs to be constantly monitored. This is the case of the Venice Lagoon, the largest lagoon in the Mediterranean Sea (Fig. 1), where the anthropogenic impact is not only related to the tourism industry in the historical city of Venice, but also to a large industrial area and heavy ship traffic.

In the last 15 years, the inlets have been substantially modified as mobile barriers are under construction to defend the city from high-water events that may be exacerbated in the near future by the ongoing sea level rise [15]. Among other impacts, these modifications of the inlets may alter or may have already altered the lagoon's benthic communities. In fact, in a ten-years monitoring of the macrozoobenthic community at the inlets, some trends were recognised, which can be possibly associated to the indirect effects of the morphological modifications on water circulation and sedimentation [16].

Many quantitative studies of the benthic community in the



Fig. 1 - The northern part of the Venice Lagoon with the bathymetry of the channels investigated during 2013. The black and blue squares indicate the locations of the Scanello and La Bissa channels, respectively

Venice Lagoon were carried out throughout the past century. However, channels habitats and biodiversity were rarely explored. The only extensive survey of these biocoenoses dates back to the 1930-1932 [17] representing the very first benthic community study in the

#### A NEW APPROACH TO THE BENTHIC HABITAT MAPPING 95

# 94 A. KRUSS, F. MADRICARDO, G. MONTEREALE GAVAZZI, F. FOGLINI, L. JANOWSKI, M. SIGOVINI, F. TRINCARDI

Venice Lagoon. Most researches and monitoring activities focused on the mudflat communities, with the exception of a few spatially very limited works [e.g. 18].

In 2013, within the National Flagship Project RITMARE, an extensive MBES survey was carried out to explore all channels of the Lagoon, covering a total area of 50 km<sup>2</sup>, at very high resolution (up to 5 cm). During this survey, from April to December 2013, a large MBES dataset was collected, including bathymetric, bottom and water column backscatter data.

The combination of MBES bathymetry and backscatter, together with ground validation samples, provides a robust tool for mapping bottom substrates and benthic communities like oysters and submerged aquatic vegetation (SAV) [19]. However, to produce such maps, it is very important to properly segment the MBES data into acoustic facies (i.e. areas with similar acoustic properties). Conventional, visual interpretation can be very effective if there are very distinctive features (e.g. rocks and bare, sandy bottom) but it can become very subjective where the seafloor is very heterogeneous or where its acoustic properties change gradually, with no clear separation from one backscatter area to another. To overcome this problem, we applied an objective (semi-) automated classification of seafloor backscatter data (for an overview of different segmentation techniques see [20]). The classification was done by comparing with sediment samples and photographs collected in a natural tidal channel (Scanello channel) in the Northern Lagoon (Fig. 1).

A further application of MBES for benthic habitat mapping is based on the analysis of the MBES water column data. The use of water column data (*wcd*) for benthic habitat mapping is a relatively new research topic [21-25] whose potential has not been fully explored so far. This is because the *wcd* analysis includes not only the study of angular dependence of acoustic reflectivity but also of the sidelobe interference effects. In this study, we analyze the water column data collected in an extremely shallow water channel (La Bissa channel) (Fig. 1) during a dedicated experiment carried out in 2014 [25], showing the potential of *wcd* analysis for mapping and estimating the height of submerged vegetation.

#### 2. Material and Methods

#### 2.1. Study sites

The Lagoon of Venice is the largest in the Mediterranean (about 550 km<sup>2</sup>) and very shallow (mean depth of only 1.2 m). Tidal channels occupy 15% of the lagoon surface for a total of about 64 km<sup>2</sup>. Their depths range from 1 m up to a maximum of 50 m. From the maze of tidal channels, we selected two study sites: a) the Scanello channel and b) the La Bissa channel, both located in the northern part of the Venice lagoon (Fig. 1).

The Scanello channel is a natural tidal channel, part of a complex system of tidal creeks and salt marshes. The channel flows as a sidebranch of a major navigation channel into a salt marsh area. Following a short straight section of about 200 m, the channel bends to the North for about 300 m, where it separates into two smaller branches flowing into an extremely shallow tidal flat with depths < 1 m. It shows an erosion-deposition pattern characteristic of meandering tidal channels [26]. The channel follows a gentle gradient from north to south and includes geomorphologic features like fields of megaripples, scours, flat zones, point bars and pools [27].

The La Bissa channel is located NE of the city of Venice between two big navigation channels (Fig. 1). The channel is almost 1 km long but narrow (up to 50 m) with total area around 0.021 km<sup>2</sup>. It has a u-shaped cross-section with steep banks and a maximum depth of 5 m under the influence of tidal cycles (usually with amplitudes in the order of 1 m). Current speed depends on tide and wind conditions. The water column inside the channel is rather turbid because of suspended sediment concentration. This site was investigated because of the spread occurrence of macroalgae that was noticed during previous studies.

#### 2.2. Acoustic data

Multibeam data were acquired with a Kongsberg EM2040 Dual-Compact MBES during a survey carried out in April 2013. The MBES was on a pole on the 10-m long vessel Litus. The double-

head MBES operates with up to 800 beams (400 per swath) and a frequency that can range from 200 to 400 kHz. During the survey in the Scanello channel, the frequency was set to 360 kHz and the data were acquired in equidistant mode, ensuring more than 30% of overlap between different survey lines. To have high-accuracy attitude corrections, we used the Seapath 300 positioning system with a Fugro DGPS correction. Sound velocity was measured continuously, close to the transducers, with a Valeport miniSVS sensor. Moreover sound velocity profiles were taken regularly with an AML Smart-X sound velocity profiler.

The tide corrections in all areas were computed with hydrodynamic model SHYFEM [28], giving the values of water level in 93 locations of the lagoon. The model computes sea level at each location (station) using wind and sea level data from all the tidal stations in the lagoon and at the inlets as forcing factors. The error of the model in the sea level simulation at a given station is about 2 cm. All corrections are referred to the local datum Punta Salute 1897.

To produce the digital terrain model files and the mosaics we used the software CARIS Hips & Sips accounting for sound velocity variations, tides and basic quality control (see Montereale Gavazzi et al., 2016 for more details [13]).

# 2.3. Analysis of backscatter data-Jenks optimization clustering and OBIA

For the Scanello channel, after testing different segmentation and classification techniques for the BS mosaics, Montereale Gavazzi et al. 2016 [13] found that the best classification results could be obtained with the Jenks' Optimization clustering in ArcGIS (v10.2). However, as pointed out by Lucieer et al. 2013 [10] amongst others, per-pixel classifiers may cluster together acoustic features which have very close backscatter signatures but are in fact different in the real world. This limitation posed by per-pixel clustering algorithms was overcome by querying geometrical other than solely spectral variables. Ultimately, large low backscatter patches (> 1 m<sup>2</sup>) representative of muddy soft and bare sediment were efficiently separated from biogenic substrate (< 1 m<sup>2</sup>).



Fig. 2 - Fragment of the mosaic of a channel  $(120 \times 28 \text{ m})$  from Fledermaus FMGT with sample areas, showing different texture pattern for 3 classes: green square-macroalgae; yellow-bare bottom 1(hard); red-bare bottom 2 (soft). The backscatter grey scale is in dB.

For the La Bissa channel, data analysis was carried out in two steps. First, we processed the surface backscatter for segmentation and classification. Mosaics elaborated with the software Fledermaus were exported as geotiffs (see Fig. 2 for an example) and elaborated in eCogniton, which is software for object-based analysis of images: the image can be divided into objects of similar characteristics such as texture, shape or contextual relationships. Similar objects are joined into bigger segments [29]. Each of the intensity images were first segmented using a multi-resolution algorithm and the following settings: scale parameter = 45 (modifying the value of the scale parameter, it is possible to vary the size of the image objects); shape=0.5 and compactness=0.2 (these are homogeneity criteria).



A. KRUSS, F. MADRICARDO, G. MONTEREALE GAVAZZI, F.

98

Fig. 3 - Up: Example of the MBES echogram extracted from the central beam along the transect where the red stripe marks the sea floor. The green colour close to seafloor shows part of the signal reflected by the bulk macroalgae volume. Down: Zoom in of the echogram where the black line represent the location of the signal presented on the inset. The greenish rectangle highlights the part of the signal reflected by the macroalgae volume (Modified from Kruss et al. 2005 [24]).

The following object-oriented classification was based on supervised nearest neighbourhood algorithm (k-NN) [30]. Sample data were provided by video ground-truth data, identifying 3 classes: macroalgae, bare bottom 1(hard) and bare bottom 2 (soft). A few objects related to each of the classes were selected as reference samples (Fig. 2). The object shape and texture parameters were tested in different combinations to explore the features that classify the segments into classes with highest distance (best partition ability). The best classification performance was achieved for 2 texture parameters (Gray-Level-Co-occurrence Matrix correlation and standard deviation) and for 2 statistical one (mode-median and standard deviation) with the best separation distance of 0.93 in a scale from 0 to 1 [31].



Fig. 4 - Left: Backscatter map of the Scanello channel area, with the locations of drop frames, three diving sites, grab samples and photo-transects. Black, Grey and Blue triangles show the locations of grab samples. Center: close-up view of the backscatter at diving site 3, with the location of the images extracted from the video transects. Right: examples of video transect image. The colour of the circle in the photographs represents the corresponding class (Modified from Montereale Gavazzi et al. 2016 [13]).

The last step of the data processing was devoted to macroalgae detection using water column intensity data. Macroalgae are acoustically visible in water column data. They can be usually seen on the echogram as a layer above the bottom reflection line (strong backscatter) with intensity levels between -40 and -50 dB lower than the bottom amplitude (Fig. 3).

Each of the exported echograms was processed in Matlab using an edge-detection algorithm. It detects sharp changes in image brightness (pixel values related to backscatter intensity) giving as a result edge lines separating macroalgae from water and bottom reflections [32]. This approach allowed an estimate of the macroalgae layer height above seafloor. In this study, we used only the central beams ( $\pm 10^{\circ}$ ).

For central beams this method is as efficient as for single-beam echosounder data, whereas for outer beams a more complex approach would be necessary to account for the angular dependence of the backscatter and for the side lobe interference effect [33].

# 2.4. Ground truth data

The ground truth dataset for the Scanello Channel comprised (i) sediment grab samples, (ii) underwater photography (drop-frame camera and transects) and (iii) underwater video-transects collected within three 400 m<sup>2</sup> quadrats (Fig. 4). The locations of the sampled points were selected to include all the characteristic textural patterns identified from the backscatter mosaic. The samples were collected at slack water to reduce positioning errors.

#### 2.5. Grab samples

Ten sediment samples were collected with a Van Veen Grab (7L) and a subsample of the top 5 cm were used for the granulometric analysis according to the classification of Wentworth (1922). The fine fraction (< 2 mm) was measured by laser diffraction analysis (LISST 100X), whereas we found that the coarse (> 2 mm) fraction was mainly composed of fragmented shells. This bioclastic component was classified according to a semi-quantitative scale, which includes: no shell detritus, fine and coarse shell detritus. Fine shell detritus was mostly composed of the shells of the Gastropod *Bittium* sp., whereas coarser detritus presented entire and fragmented valves, including large (> 10 cm in length) dead oyster shells of *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793), with some degree of cementation. The location of these samples is shown in Fig. 4 as coloured triangles.

#### 2.6. *Underwater imagery*

The photographic surveys were carried out on 22/11/2013 and 10/12/2013, around neap tides and slack water to minimize the impact of water turbidity and positioning errors. Two 10-m transects were positioned over the study area roughly along the direction of

the current, over a range of depths (from 6 m to 1.7 m). Coordinates of the transect tips were measured with a DGPS. Pictures of 25 cm 20 cm photoquadrats were collected (moving upstream) every 5 m on both sides of the transects, by professional technical divers (*State Police Divers, Venice Unit*).

Moreover, a Go-Pro (HERO-3) camera installed on an aluminum frame was dropped from the boat (drop-frame camera) on 22 and 23/07/2014. Seven photoquadrats (25 cm  $\times$  20 cm) were collected over a range of bathymetries.

Underwater videos were acquired by divers with a Go-Pro (HERO-3) camera on 22/07/2014 over 3 areas of 20 m  $\times$  20 m ("diving sites" in Fig. 4), following five parallel transects in the north-south direction (diving site). A graduated rope was positioned straight on the seabed along the north-south axis to be followed by the diver. Initial and final transect coordinates were acquired with the DGPS system. For each meter of the transect, we extracted and classified images out of the videos.

#### 3. Results and Discussion

### 3.1. The Scanello Channel seabed composition classes

Using 0.05-m and 0.20-m MBES grids, we observed very-fine scale channel floor heterogeneity, also reflected in the ground truth data. The resolution used in this study allows us to observe patterns at different scales and hierarchical levels. We define five seabed classes in terms of main substrate features and habitat-forming biota (Tab. I). These classes are distributed in patches of highly variable extent (down to less than  $1 m^2$ ).

The following classes of subtidal seabed were identified (Fig. 4): 1) "Sponges": massive, cushion-shaped demosponges together with associated macroalgal canopy (mainly Rodophyta and Phaeophyceae) on a bed of dead oysters of the non-indigenous species *Crassostrea gigas* (Thunberg, 1793); in Tab. I and Fig. 3, it is represented in red. 2) "Submerged Aquatic Vegetation (SAV)": the class includes macroalgae and algal turfs on fine sediments,

Tab. I - Distinctive backscatter signatures present within the study area and correspondent classes and ground-truth images.



as well as canopy-forming macroalgae (mainly Rodophyta and Phaeophyceae) on dead oyster beds and cemented coarse shell detritus; the physical proximity between sponges and algal canopy causes a relatively noisy classification of sponges in the pixel-based methods; in Tab. I and in Fig. 4, it is represented in green. 3) "Fine shell detritus": patches of fine and sparse shell detritus (mostly the gastropod Bittium sp.) with abundant filter-feeders infauna, such as Sabellidae polychaetes; in Tab. I and in Fig. 4, it is represented in grey. 4) "Coarse shell detritus": patches of coarse and dense shell detritus (mostly whole or fragmented bivalve shells) with some degree of cementation and intensely colonised by both infauna and epifauna, mostly suspension- and filter-feeders, such as Sabellidae and Terebellidae polychaetes, anemones, ascidians; in Tab. I and in Fig. 4, it is represented in blue. 5) "Bare muddy bottom": patches of bare mud and sandy mud with benthic diatom film and burrows



Fig. 5 - Top row: Backscatter data manual and Jenks' Optimization classification results using the 0.2-m grid. Bottom row: 20 m  $\times$  20 m spatial unit backscatter and segmentations at 0.05-m resolution. Refer to text for explanation of abbreviations and classes.

of the thalassinid decapod *Upogebia* sp.; in Tab. I and Fig. 4, it is represented in black. 6) "MBES artefacts": they represent the nadir artefact and the artefact due to the presence of bubbles under the transducers and to multiple reflections at the channel borders.

The comparison with the samples (Fig. 5) showed that the Jenks' Optimization Clustering unsupervised classification technique had an accuracy of 97% (we refer to Montereale Gavazzi et al. 2016 for

#### A NEW APPROACH TO THE BENTHIC HABITAT MAPPING 105

# 104 A. KRUSS, F. MADRICARDO, G. MONTEREALE GAVAZZI, F. FOGLINI, L. JANOWSKI, M. SIGOVINI, F. TRINCARDI

details [13]). The channel is characterised by strong tidal currents (up to 0.6 m/s) and high water exchange, also during neap tides. These are major factors in shaping these communities. Currents, mainly during ebb tides, transport a high concentration of suspended sediment, including particulate organic matter. This suspended material causes high turbidity but supports a community of suspension feeders, such as *Bivalvia, Polychaeta, Porifera, Tunicata and Bryozoa.* At the same time, the strong current contributes to the export of catabolites during ebb tide and import of oxygen during flood tide. These processes reduce the natural saprobity of the system, which is typical of transitional ecosystems such as lagoons [34]. This factor, together with the highly structured habitat provided by bioconstructors, contributes to enhance biodiversity (see also Sigovini et al., 2014 [35]).

# 3.2. The La Bissa Channel macroalgae spatial distribution and height estimation

For the OBIA classification one of the mosaics was divided into classes according to sample areas based on video data (Fig. 6).

Macroalgae create a characteristic pattern (Fig. 2) but in terms of pixel statistics this class overlaps with both bare-bottom types. Therefore, a texture analysis helps to separate the classes with high confidence. GLCM parameters such as correlation and standard deviation show less than 0.05 overlapping tendency. Thanks to the OBIA classification, we identified the three classes (Macroalgae, bare bottom 1 and bare bottom 2) depicted in Fig. 6. We estimated that macroalgae cover 34% of investigated bottom, with a total surface of 0.007 km<sup>2</sup>.

Seaweeds are known to be acoustically visible in the *wcd* and might be detected by MBES within different angular ranges depending on MBES technology, due to signal to noise ratio (SNR). Using the Kongsberg 2040DC MBES, SAV could be detected in the central beams (Fig. 3). The dense bottom vegetation traps gas bubbles, which significantly increase reflectivity. This phenomenon can also influence the accuracy of bathymetric measurements, creating false bottom detections. Using water column data analysis for macroalgae detection is still a developing area and draws increasing attention [22]. One



Fig. 6 - OBIA classification results (green, red, yellow polygons) compared with ground-truth data (blue dots and images) and macroalgae detections from the water column data of central beams of MBES (black dots).

approach for WTC data processing is to use image based techniques for beam or swath analysis, the other one is to use statistical analysis of each beam envelope. The first one, that was used here, has a good efficiency for central beams, where macroalgae are significantly different from the noise signal. We estimated the mean height of the macroalgae layer to be 0.23 m, varying along the survey between 0.2 and 0.3 m.

In outer beams more complex analysis are necessary to distinguish canopies from sidelobe interference [22]. Processing of each beam is a very time consuming task since it produces a large amount of data given that each MBES swath is recorded by 800 beams. For this reason, image analysis of stacked *wcd* data along track beams seems to be more efficient for macroalgae detection and height estimation [33].

### 4. Conclusions

Using MBES and high-accuracy positioning for ground-truth data, it has been possible to explore benthic substrates in tidal channels and map ecologically noteworthy biogenic features such as grounds colonized by sponges. In the Scanello channel, the Jenks clustering optimization classification of the backscatter allowed the mapping of five seabed classes with an accuracy up to 83%. Based on sediment samples and bottom photographs, backscatter patterns could be ascribed to distinctive sediment textures and biogenic covers. Recognised substrate types include bare sediments, ranging from coarse silt to very fine sand, macroalgae, seagrass beds, and complex biogenic structures such as dead oyster beds. Hard grounds are intensively encrusted by bioconstructors such as tubicolous polychaetes, and colonised by other organisms such as sponges, tunicates and bryozoans, resulting in communities characterized by high biomass and diversity. Arguably, the strong tidal currents and high water exchange are a major factor in shaping these communities.

In the La Bissa channel, the OBIA-based classification proved to be effective for habitat mapping with the important potential of creating a database of substrata related samples. Textural analysis confirmed its potential in mosaic classification and we showed that not only GLCM homogeneity or entropy can be used with high success for that purpose but also GLM correlation and standard deviation are useful. We estimated the macroalgae coverage in the La Bissa channel (0.007 km<sup>2</sup>) including mean height of their canopy (0.23 m). Some restrictions for these results were presented, since the macroalgae spatial distribution might be affected by currents. This is completed with the first acoustic identification of macroalgae and seagrasses in the Venice Lagoon, using MBES water column backscatter data, showing it can be very useful to map macrophytes in tidal channel environments.

Our results show that tidal channels possess a range of habitats extremely valuable for the lagoon's biodiversity and ecological processes (i.e. nursery grounds, bio-physical coupling, etc.). A deeper understanding of these virtually unexplored habitats provides crucial information on the functioning of the lagoon ecosystem. This assessment opens a totally new perspective in the monitoring of benthic habitats in view of a knowledge-based management of natural resources in very shallow coastal areas.

# 5. Acknowledgements

We would like to thank the entire ISMAR Team (M. Bajo, D. Bellafiore, E. Campiani, C. Ferrarin, V. Grande, L. Janowski, E. Keppel, E. Leidi, G. Lorenzetti, F. Maicu, G. Manfè, V. Maselli, A. Mercorella, C. Pellegrini, A.Petrizzo, M. Prampolini, A. Remia, F. Rizzetto, M. Rovere, A. Sarretta, D. Tagliapietra, L. Zaggia) and the crew of the research vessel Litus who helped us to achieve these results, Christian Ferrarin and Georg Umgiesser for providing the tidal corrections, the Nucleo Sommozzatori della Polizia di Stato di Venezia for collecting the bottom photographs. This work was technically and financially supported by the National Research Program RITMARE funded by the Italian Ministry of University and Research and Bandiera project Cofunded by the European Union under FP7-People - Co-funding of Regional, National and International Programmes, GA n. 600407 and RITMARE Flagship Project.

# 6. References

- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., and Silliman, B. R. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. Ecological Monographs, 81(2), 169-193.
- [2] Kirwan, M. L., Megonigal, J. P., 2013. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. Nature, 504 (7478), 53-60.
- [3] McBreen, F., Askew, N., Cameron, A., Connor, D., Ellwood, H., Carter, A., 2011. UK SeaMap 2010 Predictive mapping of seabed habitats in UK waters, JNCC Report 446, ISBN 0963 8091. 103pp. Available online at http://jncc.defra.gov.uk/ PDF/jncc446\_web.pdf.
- [4] Wang, C. K., Philpot, W. D., 2007. Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. Remote Sensing of Environment, vol. 106(1), 123-135.
- [5] Lehman, A., Lachavanne, J.B., 1997. Geographic information systems and remote sensing in aquatic botany, Aquatic Botany, 58(3), 195-207.

- [6] Brown, C.J., Smith, S.J., Lawton, P., Anderson, J.T. 2011. Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 92: 502-520.
- [7] Brown, C.J., Blondel, P., Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping. Applied Acoustics 70, 1242-1247, 2009.
- [8] De Falco, G., Tonielli, R., Di Martino, G., Innangi, S., Simeone, S., Parnum, I.M., 2010. Relationships between multibeam backscatter, sediment grain size and *Posidonia oceanica* seagrass distribution. Continental Shelf Research, 30-18, 1941-1950.
- [9] Micallef, A., Le Bas, T. P., Huvenne, V. A. I., Blondel, P., Hühnerbach, V., Deidun, A., 2012. A multi-method approach for benthic habitat mapping in shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. Continental Shelf Research 39-40, 14-26.
- [10] Lucieer, V., Hill, N. A., Barrett, N. S., and Nichol, S., 2013. Do marine substrates 'look' and 'sound' the same? Supervised classification of multibeam acoustic data using autonomous underwater vehicle images. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 117, 94-106.
- [11] Hasan, R. C., Ierodiaconou, D., Laurenson, L., & Schimel, A., 2014. Integrating multibeam backscatter angular response, mosaic and bathymetry data for benthic habitat mapping. Plos one, 9(5), e97339.
- [12] Madricardo, F., Foglini, F., Tonielli, R., 2011. Bathymetric surveys in super-shallow water: case study of the Lagoon of Venice, Italy. Proceedings of UAM 2011- 4th International Conference and Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results, Kos, Greece.
- [13] Montereale-Gavazzi, G., Madricardo, F., Janowski, L., Kruss, A., Blondel, P., Sigovini, M., Foglini, F. 2016. Evaluation of seabed mapping methods for finescale classification of extremely shallow benthic habitats–Application to the Venice Lagoon, Italy. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 170, 45-60.
- [14] Stolt, M., Bradley, M., Turenne, J., Payne, M., Scherer, E., Cicchetti, G., Shumchenia, E., Guarinello, M., King, J., Boothroyd, J., Oakleay, B., Thornber, C., August, P. 2011. Mapping shallow coastal ecosystems: a case study of a Rhode Island lagoon. *Journal of Coastal Research*, 27 (6A): 1-15.
- [15] Trincardi, F., A. Barbanti, M. Bastianini, A. Benetazzo, L. Cavaleri, J. Chiggiato, A. Papa, A. Pomaro, M. Sclavo, L. Tosi, and G. Umgiesser. 2016. The 1966 flooding of Venice: What time taught us for the future. Oceanography 29(4), https://doi.org/10.5670/ oceanog.2016.87.
- [16] Tagliapietra, D., Anelli Monti, M., Checchin, E., Curiel, D., Miotti, C., Pranovi, F., Sigovini, M., 2017. La comunità bentonica: breve storia alle bocche di porto Benthic community at the Venice lagoon inlets: a brief history. *Il controllo ambientale della costruzione del MOSE. 10 anni di monitoraggi tra mare e laguna di Venezia* (ed. P. Campostrini, C. Dabalà, P. Del Negro, L. Tosi), CORILA (IN PRESS).
- [17] Vatova, A., 1940. Le zoocenosi della Laguna veneta. Thalassia, III (10): 1-28.
- [18] Occhipinti Ambrogi, A., Gola, G., Macrozoobenthos di fondo incoerente in

Laguna di Venezia: contributo alla conoscenza del bacino di Malamocco. Biol. Mar. Mediterr., 8 (1): 393-402, 2001.

- [19] Rattray, A., Ierodiaconou, D., Monk, J., Versace, V. L., Laurenson, L. J. B. 2013. Detecting patterns of change in benthic habitats by acoustic remote sensing. Marine Ecology Progress Series, 477, 1-13.
- [20] Diesing, M., Green, S. L., Stephens, D., Murray Lark, R., Stewart, H. A., and Dove, D., 2014. Mapping seabed sediments: Comparison of manual, geostatistical, object-based image analysis and machine learning approaches. Continental Shelf Research. (84), 107-119.
- [21] Kruss, P. Blondel, J. Tęgowski, J. Wiktor, A. Tatarek, 2008. Estimation of macrophytes using single-beam and multibeam echosounding for environmental monitoring of Arctic fjords (Kongsfjord, West Svalbard Island). Journal of Acoustics Society of America 123: 3213.
- [22] McGonigle, C., Grabowski, J.H., Brown, C.J., Weber, T.C., Quinn, R. 2011. Detection of deep water benthic macroalgae using image-based classification techniques on multibeam backscatter at Cashes Ledge, Gulf of Maine, USA. Estuarine, Coastal and Shelf Science 91, 87-101.
- [23] Colbo K., Ross T., Brown C., Weber T., 2014. A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders. Estuarine, Coastal and Shelf Science 145, 41-56.
- [24] Kruss, A., Madricardo, F., Sigovini, M. Ferrarin, C., Montereale Gavazzi, G. 2015. Assessment of submerged aquatic vegetation abundance using multibeam sonar in very shallow and dynamic environment. The Lagoon of Venice (Italy) case study. Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics), IEEE/OES, Rio de Janeiro, Brazil, 29-31 July 2015, DOI: 10.1109/RIOAcoustics.2015.7473596
- [25] Kruss, A., Tęgowski, J., Tatarek, A., Wiktor, J., Blondel, Ph. 2017. Spatial distribution of macroalgae along the shores of Kongsfjorden (West Spitsbergen) using acoustic imaging. Polish Polar Research, 38(2), 205-229. doi:10.1515/ popore-2017-0009
- [26] Perillo, G.M.E., Wolanski, E., Cahoon, D.R., Brinson, M.M. 2009. Coastal Wetlands: an Integrated Ecosystem Approach. Elsevier. 941pp.
- [27] Dalrymple, R. W., Rhodes, R. N., 1995. Estuarine dunes and bars. Geomorphology and sedimentology of estuaries, 53, 359-422.
- [28] Umgiesser, G., Canu, D. M., Cucco, A., Solidoro, C., 2004. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set up, calibration and validation, Journal of Marine Systems, 51-1, 123-145.
- [29] Lucieer, V., 2008. "Object-oriented classification of sidescan sonar data for mapping benthic marine habitats," Int. J. Remote Sensing 29, 905-921, 2008.
- [30] ECOGNITION, User Guide (Munich: Definiens Imaging GmbH), 2005.
- [31] Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, R., 1973. Textural features for image classification, IEEE Transactions Systems, Man and Cybernetics, 3, 610-621.
- [32] Niblack, W.1986. An introduction to digital image processing. Prentice-Hall International Ltd, New Jersey.

- [33] Hughes Clarke, J.E., 2006. Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey. Hydrographic Journal, 120, 3.
- [34] Tagliapietra, D., Sigovini, M., Magni, P., 2012. Saprobity, a unified view of benthic succession models for coastal lagoons. Hydrobiologia, 686: 15-28.
- [35] Sigovini M., Foglini F., Keppel E., Kruss A., Manfrin F., Tagliapietra D., Zaggia L., Madricardo F., 2014. Habitat mapping in coastal lagoons: first results on a tidal channel and future prospects. Biologia Marina Mediterranea, 20 (1).

# USO INTEGRATO DEI SENSORI SATELLITARI SAR IN BANDA X E L PER QUANTIFICARE L'ETEROGENEITÀ DELLA SUBSIDENZA IN AMBIENTI COSTIERI DI TRANSIZIONE: LA LAGUNA DI VENEZIA

# Cristina Da Lio\*, Tazio Strozzi\*\*, Pietro Teatini<sup>\*,\*\*\*</sup>, Luigi Tosi\*

# 1. Introduzione

Le livellazioni geometriche sono state nel secolo scorso l'unico metodo di rilievo altimetrico che abbia consentito di misurare con precisione l'entità della subsidenza "moderna" dell'area costiera nord adriatica. Solo alla fine degli anni '90 è stata installata una rete per misurazioni GPS in differenziale (DGPS) e in continuo (CGPS) [1].

Nel nuovo millennio, l'uso del radar ad apertura sintetica (*Synthetic Aperture Radar*, SAR) montato su vettori satellitari, ha consentito lo sviluppo e l'affinamento dell'analisi dell'interferometria differenziale (InSAR) e dell'analisi interferometrica su riflettori persistenti (*Persistent Scatterers*, PSI), aumentando notevolmente la capacità di monitorare i movimenti del suolo e aprendo nuove possibilità per una più accurata interpretazione del processo di subsidenza e delle forzanti che la caratterizzano.

L'interferometria SAR utilizza come "punti" di monitoraggio le strutture riflettenti comunemente distribuite sul territorio come edifici, strade, ponti, dighe, rilevati arginali, rocce esposte, strutture

<sup>\*</sup> Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia, Italia.

<sup>\*\*</sup> GAMMA Remote Sensing, Gümligen, Svizzera.

<sup>\*\*\*</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA), Università degli Studi di Padova, Italia.

metalliche e altre infrastrutture. Tuttavia, in ambienti umidi naturali come quelli deltizi e lagunari, prevale la presenza di vegetazione che, mutando le proprie caratteristiche elettromagnetiche nel corto periodo, non costituisce un diffusore coerente nel tempo, limitando o precludendo l'uso dell'interferometria SAR per la scarsità o l'assenza di riflettori.

Ciò nonostante, l'interferometria ha consentito di misurare la subsidenza anche in alcuni settori della Laguna di Venezia non accessibili a rilievi geodetici e GPS [e.g., 1-4]. Le informazioni ottenute hanno evidenziato la presenza di una forte eterogeneità spaziale dei movimenti del suolo con la necessità di sviluppare nuove metodologie di monitoraggio specifiche per questi ambienti.

Sono stati quindi sperimentati riflettori artificiali [5] installati su barene e bassifondali lagunari che hanno permesso di quantificare i movimenti del suolo in circa 50 siti interni alla laguna, confermando la forte variabilità della subsidenza di questi ambienti e l'inadeguatezza di estrapolare su ampie zone lagunari i dati acquisiti su pochi punti.

Recentemente, sono stati analizzati i risultati interferometrici ottenuti da sensori SAR con bande diverse che, avendo caratteristiche di acquisizione differenti, consentono di individuare movimenti del suolo in ambienti a diverso grado di urbanizzazione ovviando alla riduzione di decorrelazione temporale e spaziale propria degli ambienti meno urbanizzati. Ad esempio, [6] ha confrontato dati di ERS-1/2 con dati di ALOS PALSAR sulla zona della miniera di sale di Wieliczka, in Polonia. L'obiettivo è stato quello di estendere la copertura del monitoraggio SAR ad aree poco antropizzate, per le quali la banda C di ERS-1/2 non risulta particolarmente efficace, al contrario della banda L di ALOS PALSAR che, sfruttando la maggiore lunghezza d'onda, risente in modo minore della decorrelazione temporale e spaziale. [7] ha sottolineato i vantaggi dell'uso sinergico dei dati TerraSAR-X e ALOS PALSAR per monitorare versanti instabili ad Hong Kong, Cina. L'elaborazione in banda L è stata utilizzata per monitorare le zone naturali su vasta scala sfruttando l'elevata coerenza nelle aree vegetate, mentre i dati in banda X hanno permesso di estrarre informazioni dettagliate, ad esempio identificando i confini di versante instabili, sfruttando l'alta risoluzione ed i brevi tempi rivisitazione.

Le informazioni che sensori SAR con diverse lunghezze d'onda possono fornire sono pertanto di gran vantaggio per ottenere una maggior copertura di informazioni sui movimenti del suolo nelle aree umide con poche strutture antropiche riflettenti e dove l'accessibilità diventa impegnativa o preclusa alle livellazioni e misure CGPS.

Nella presente nota si illustra un approccio originale per integrare in modo ottimale i risultati della tecnica PSI su immagini COSMO-SkyMed in banda X con quelli forniti dalla tecnica InSAR su acquisizioni ALOS PALSAR in banda L. Data l'elevata risoluzione delle immagini in banda X e la precisione della tecnica PSI, i primi consentono di monitorare spostamenti di strutture antropiche, anche di piccola dimensione, sparse nell'area di studio; grazie all'elevata coerenza temporale nel lungo tempo delle immagini in banda L, i secondi permettono di valutare i movimenti del suolo in ambienti naturali come barene, aree umide e zone coltivate presenti in Laguna di Venezia. Vista la sua generalità, la metodologia integrata sviluppata potrà essere applicata a qualsivoglia ambiente naturale di transizione.

#### 2. Materiali e metodi

#### 2.1. Prodotti interferometrici SAR

Questo studio si basa su dati acquisiti da satelliti con sensori SAR e caratteristiche di acquisizione differenti:

- ALOS PALSAR in banda L (~24 cm di lunghezza d'onda), polarizzazione HH, angolo di incidenza 35° e risoluzione nominale spaziale 10 x 5 m;
- COSMO-SkyMed in banda X (~3 cm di lunghezza d'onda), polarizzazione HH, angolo di incidenza 34° e risoluzione nominale di 3 x 3 m a pixel.

Sono state processate 16 immagini stripmap ALOS PALSAR con orbita discendente acquisite nel periodo 15/01/2007 - 26/07/2010 e 31 immagini stripmap COSMO-SkyMed con orbita discendente relative al periodo 26/09/2008 - 17/07/2011.

Le immagini ALOS PALSAR sono state processate con la tecnica *Small Baseline Subsets* (SBAS) [8] utilizzando il software di elaborazione InSAR commercializzato da GAMMA [9]. Questo approccio permette di produrre sequenze temporali di deformazione a scala di pixel anche con un numero relativamente ridotto di immagini processando interferogrammi con baseline spaziale e temporale ridotta. Per l'analisi delle immagini COSMO-SkyMed, ben più numerose, si è utilizzata la tecnica PSI chiamata *Interferometric Point Target Analysis* (IPTA) [10], come descritto in [3]. Le misure di movimento del suolo derivanti da IPTA vengono interpretate per un numero di bersagli riflettenti con fase stabile (*point targets*, PTs) che sono coerenti sull'intero intervallo di tempo.

# 2.2. Misure GPS per la calibrazione e validazione dei dati interferometrici

Per ottenere precisioni millimetriche sulle misure dei movimenti del suolo, è fondamentale calibrare i prodotti interferometrici con misure in-situ. Negli ultimi anni sono state installate decine di stazioni GPS/GNSS permanenti lungo la costa Nord Adriatica da diverse Autorità. Molte di queste stazioni sono state collegate nelle reti Nazionali ed Internazionali, ad es. la Rete GPS della Regione del Veneto [11], FReDNet di OGS e Regione Friuli [12], MAGNET – University of Nevada [13], Jet Propulsion Laboratory – NASA [14], SOPAC – University of California, San Diego [15].

Ciò nonostante, a causa dell'irregolarità della registrazione e della lunghezza temporale talvolta limitata a pochi anni, le velocità di movimento del suolo fornite dalle stazioni GPS/GNSS presentano incertezze troppo elevate per essere utilizzabili nella calibrazione/validazione dei prodotti interferometrici SAR. Fra le stazioni GPS localizzate all'interno dei frame di COSMO-SkyMed e ALOS PALSAR, le seguenti sette hanno fornito serie temporali di misurazioni ragionevolmente lunghe e complete: TRVS (Treviso), ODEZ (Oderzo), VEN1 (Venezia centro storico), SFEL (San Felice, Chioggia), PTO1 (Porto Tolle), SDNA (San Donà di Piave), and TGPO (Taglio di Po) (Fig. 1, Tab. I).



Fig. 1 - Frame di ALOS PALSAR 890/900 (blu) e Cosmo-SkyMed Track 639 (rosso). In giallo sono indicate le posizioni delle stazioni GPS permanenti (Tab. I) utilizzate per "agganciare" la soluzione SAR ad un sistema di riferimento assoluto [modificata da 26]

Tab. I - Posizione, intervallo temporale e componenti delle velocità est (E), nord (N), e verticale (UP) delle stazioni GPS in continuo selezionate. E, N e UP si riferiscono all'intervallo temporale utilizzato. Le serie di velocità derivano da Nevada Geodetic Laboratory (NGL) [13].

GPS ID	Nome Stazione GPS	Lon (deg)	Lat (deg)	Intervallo temporale (anni)	Intervallo temporale utilizzato (anni)	E (mm/a)	N (mm/a)	UP (mm/a)
TRVS	Treviso	12.222	45.680	2009-2015	2009-2012	21.1	17.5	-1.0
ODEZ	Oderzo	12.489	45.788	2011-2015	2011-2014	20.5	16.8	-2.3
VEN1	Venice	12.354	45.431	2008-2015	2008-2011	21.1	16.6	-0.6
SFEL	San Felice	12.291	45.230	2001–2010	2007–2010	16.9	13.6	-8.0
PTO1	Porto Tolle	12.334	44.952	2011–2015	2011–2014	20.8	16.9	-4.9
SDNA	San Donà di Piave	12.564	45.630	2008–2015	2008–2012	21.3	17.3	-1.9
TGPO	Taglio di Po	12.228	45.003	2007–2015	2007-2011	21.3	16.2	-5.2

#### Calibrazione 3.

Le soluzioni interferometriche in banda X e L sono state calibrate con le velocità di movimento del suolo registrate dalle stazioni GPS (ODEZ, PTO1, VEN1 e TRVS, PTO1, VEN1). La procedura consente di mitigare il cosiddetto problema di 'flattening', cioè la leggera inclinazione della fase risultante dalla non perfetta conoscenza delle posizioni satellitari [16-18] (Tab. II).

Si noti che gli intervalli temporali delle serie CGPS differiscono tra loro e sono in genere diversi da quelli dalle immagini SAR. Tuttavia, sulla base dei risultati di indagini precedenti [19], si può ragionevolmente assumere che le cause della subsidenza siano generalmente rimaste invariate nel corso del decennio 2005-2015; pertanto è ragionevole l'utilizzo di serie temporali CGPS leggermente diverse da quelle per le procedure di calibrazione/validazione. La soluzione IGS08 delle serie CGPS indica inoltre movimenti orizzontali abbastanza simili tra le stazioni: 20.5-21.3 mm/a nella componente nord e 16.2-17.5 mm/a nella componente est (Tab. I). Queste velocità indicano un movimento pressoché rigido della porzione di placca Eurasiatica riguardante la zona di studio rispetto al riferimento IGS08.

Poiché l'interferometria SAR restituisce spostamenti relativi, si è definito un sistema di riferimento locale basato sulla stazione permanente GPS TRVS ubicata esternamente all'area di studio e alla parte della costa maggiormente subsidente. In questo modo le componenti dello spostamento relativo nelle direzioni nord ed est per tutte le altre stazioni GPS si annullano (Tab. I), mentre le componenti verticali rimangono invariate.

Inoltre, il SAR fornisce i movimenti del suolo lungo la linea di vista del satellite Line of Sight (LOS) i.e. tra il satellite stesso e gli obiettivi a terra. Per riferire quindi i movimenti dei GPS e del SAR allo stesso sistema di riferimento, si sono proiettate le velocità dei GPS del sistema di riferimento locale lungo la direzione LOS per mezzo della relazione:

 $GPS_{LOS} = \sin(\theta)\cos(\varphi)E + \sin(\theta)\sin(\varphi)N + \cos(\theta)UP$ 

dove  $\theta$  è l'angolo di incidenza del segnale del satellite con la verticale e  $\phi$  l'angolo di inclinazione dell'orbita del satellite rispetto la direzione Nord.

Tab. II - Calibrazione dei dati. Le velocità dei CGPS sono state proiettate lungo la direzione LOS di COSMO-SkyMed (ODEZ, PTO1, VEN1) e ALOS PALSAR (TRVS, PTO1, VEN1). LOSc è la velocità media calibrata in un intorno opportuno dei CGPS grande abbastanza da includere un numero significativo di pixels/PTs (più di cinque) ma non troppo da escludere gli effetti delle eterogeneità del sottosuolo.

Stazione CGPS	CGPS LOS (mm/a)	LOSc (mm/a)	# pixels/PTs
ODEZ	-2.3	$-2.2 \pm 0.5$	31
PTO1	-4.3	$-5.1 \pm 0.6$	66
VEN1	-0.6	$-0.7 \pm 0.8$	10
TRVS	-0.8	$-1.0 \pm 0.1$	15
PTO1	-3.7	$-4.2 \pm 0.1$	9
VEN1	-0.6	$-0.5 \pm 0.1$	20

117

La validazione dei due set di dati SAR calibrati è stata eseguita utilizzando le stazioni CGPS non considerate in fase di calibrazione.

Nello specifico, in Fig. 2 sono poste a confronto le serie temporali di movimento del suolo misurate dai CGPS con quelle di un PT rappresentativo di COSMO-SkyMed prossimo alla stazioni GPS; per quanto riguarda ALOS PALSAR, la buona validazione si denota dal confronto fra le velocità di movimento verticale dei CGPS e quelle della soluzione calibrata SBAS in un intorno dei CGPS (Tab. III).



Fig. 2 - Validazione dei dati. Confronto fra le velocità dei CGPS proiettate lungo la direzione LOS di COSMO-SkyMed (rosso) con la velocità calibrata IPTA di un point target rappresentativo (blu) in un intorno dei CGPS [modificata da 26]

Tab. III - Validazione dei dati. Confronto fra le velocità dei CGPS proiettate lungo la direzione LOS di ALOS PALSAR con le velocità calibrate SBAS (LOSc) in un intorno dei CGPS grande abbastanza da includere un numero significativo di pixels ma non troppo da escludere gli effetti delle eterogeneità del sottosuolo.

Stazione CGPS	CGPS LOS (mm/a)	LOSc (mm/a)	#Pixels
TGPO	-4.4	$-4.1 \pm 0.2$	13
ODEZ	-1.5	$-1.9 \pm 0.1$	16

#### Risultati 4.

#### 4.1. Confronto fra i risultati di banda L e banda X

La differente capacità di acquisire informazioni sui movimenti del suolo fornita da ALOS PALSAR (SBAS) e COSMO-SkyMed (IPTA) è ben evidente in tutta la Laguna di Venezia; si osserva una sorta di "complementarietà" della distribuzione areale dei punti osservati (Fig. 3 e Fig. 4).

Nelle barene e negli ambienti intertidali del settore nord della laguna (Fig. 3), il numero di misure ottenute da ALOS PALSAR è considerevole, mentre i punti misurati con COSMO-SkyMed sono quasi assenti. La capacità della banda L di penetrare la vegetazione alofila che cresce nelle barene ha permesso di quantificare la subsidenza di alcune barene tra 5 e 10 mm/a, valori inaspettati e decisamente elevati (Fig. 3a). Questa informazione assume un ruolo fondamentale nella valutazione delle condizioni nelle quali i feedback eco-geomorfologici permettono alle aree umide costiere di adattarsi alle variazioni del medio mare relativo presente e ai cambiamenti attesi secondo le proiezioni future [20,21]. L'efficienza di COSMO-SkyMed è invece specifica per le misurazioni in corrispondenza degli argini delle valli da pesca, che occupano il settore più settentrionale della laguna (Fig. 3b).

Le due distribuzioni di frequenza di velocità, probability density functions (pdf(v)), presentano lo stesso valore modale (-2 mm/a), quella relativa a COSMO-SkyMed è caratterizzata da una frequenza significativa per v=0 mm/a mentre quella delle velocità acquisite da ALOS PALSAR mette in risalto una coda asimmetrica negativa. Poiché si




può ragionevolmente assumere non siano state costruite nuove strutture nel periodo analizzato, IPTA consente di sottolineare come le strutture presenti in laguna nord, caratterizzate da una certa profondità di infissione/fondazione siano relativamente stabili; SBAS, invece, restituendo informazioni dalla superficie naturale del suolo, evidenzia che la subsidenza superficiale che caratterizza gli ambienti lagunari, rappresenta in quest'area la frazione principale della subsidenza totale.

Il trend regionale della subsidenza aumenta passando dalla zona pressoché stabile di Burano e dell'isola di Sant'Erasmo verso la zona più settentrionale della laguna, a conferma della tendenza già osservata negli ultimi due decenni [1,3,18,22-25].

Nella laguna centrale e meridionale le informazioni sulla velocità dei movimenti del suolo ottenute da ALOS PALSAR e soprattutto da COSMO-SkyMed sono molto ridotte (Fig. 4), con una densità spaziale di circa 14 punti/km<sup>2</sup>. Tuttavia, la banda L consente il monito-



Fig. 4 - Laguna centrale e laguna sud: velocità medie di movimento del suolo calibrate ottenute da (a) ALOS PALSAR e (b) COSMO-SkyMed (mm/a) nel periodo 2007-2010 e 2008-2011, rispettivamente; (c,d) distribuzioni di frequenza di velocità di movimento del suolo (pdf(v)) di pixels e point targets situati nel poligono evidenziato in linea continua nera. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento [modificata da 26].

raggio nelle aree poco vegetate come i margini delle Casse di Colmata (le isole artificiali), delle "briccole" (cioè i pali di legno che segnalano i canali), delle velme (strutture geomorfologiche situate a circa -0.2 m slm), dei capanni dei pescatori e delle reti di mitilicoltura che si trovano lungo i bordi dei canali Spignon, Valgrande, Perognola e Novissimo a sud della bocca di Malamocco. In questi settori lagunari, ALOS PALSAR evidenzia valori di velocità di subsidenza molto variabili: la pdf(v) è caratterizzata da una frequenza quasi uguale per le classi di spostamento 0, -2, -4 mm/a. COSMO-SkyMed invece, presenta una pdf(v) molto stretta con moda uguale a 0 mm/a, ad evidenziare la stabilità delle piccole isole rilevabili dal satellite in banda X.

Infine, per evidenziare maggiormente la complementarietà dei dataset ALOS PALSAR e COSMO-SkyMed, sono state selezionate due aree esemplificative ad una scala più locale rispetto quanto sopra riportato. La prima è la parte di laguna più settentrionale con i territori agricoli circostanti, la seconda è ubicata nella porzione meridionale della laguna, e comprende il margine con l'entroterra e la città di Chioggia (Fig. 5). In generale, le velocità di movimento del suolo



Fig. 5 - Velocità medie di movimento del suolo ottenute da: (a) ALOS PALSAR e (b) COSMO-SkyMed nel nord della laguna di Venezia; (c) ALOS PALSAR e (d) COSMO-SkyMed nel sud della laguna di Venezia. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento. L'immagine di sfondo è da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo, and the GIS User Community [modificata da 26].

ottenute dalle bande X e L sono simili quando le due serie di dati si sovrappongono, anche se una certa differenza si verifica in alcune zone. La banda X con IPTA permette di misurare un numero significativo di PTs lungo i principali argini fluviali e lagunari e nelle zone urbanizzate, mentre solo pochi riflettori radar vengono rilevati all'interno del bacino lagunare in corrispondenza di zone barenali e nei territori agricoli. Il vantaggio della banda L con SBAS si evidenzia chiaramente nelle zone lagunari interne e nei campi coltivati dove viene rilevato un cospicuo numero di dati.

### 4.2. Risultati Multi-Banda combinati

Per migliorare la conoscenza degli spostamenti del suolo i prodotti di COSMO-SkyMed / IPTA e ALOS PALSAR / SBAS sono stati combinati in modo da far risaltare le diverse potenzialità dei due sensori e delle tecniche di processamento, ovvero l'elevata precisione degli spostamenti rilevati dalla banda X IPTA su strutture antropiche e l'elevata coerenza temporale nel lungo periodo della banda L SBAS che permette di valutare gli spostamenti del terreno in ambienti naturali.

L'integrazione è stata eseguita combinando i due set di dati in modo ragionato e diverso a seconda della scala di indagine.

Su scala regionale, cioè, alla scala dell'intera area di studio, i due dataset sono stati uniti ed interpolati utilizzando il metodo di Kriging su una griglia a maglia regolare di 100 m. Un effetto *nugget* dell'ordine 0.7 mm/a, come suggerito dal variogramma sperimentale, è stato inserito per filtrare la grande variabilità locale.

Alla scala locale, vale a dire alla scala di pochi km<sup>2</sup>, dove il rapporto punti/pixel può essere gestito manualmente, il metodo che è stato sviluppato può essere suddiviso nelle seguenti fasi: (1) sovrapposizione dei PT in banda X con i pixel in banda L su una mappa comune; (2) rimozione dei pixel in banda L che si trovano ad una distanza inferiore a 10 m da un PT, cioè la dimensione caratteristica del pixel banda L, in forza della maggiore precisione delle informazioni derivanti dalla banda X; (3) assemblaggio di un unico set di dati "migliorato" ed interpolazione con il metodo di Kriging su 10-m di griglia regolare [26].

La Fig. 6 mostra la mappa delle velocità medie di movimento del suolo ottenute a scala regionale. Con le zone centrali e meridionali della Laguna di Venezia stabili e gli abbassamenti non trascurabili della parte settentrionale, si conferma il trend regionale evidenziato in studi precedenti [1,2,4,18,27-30]. Tuttavia, la combinazione multibanda rivela in modo dettagliato la distribuzione della velocità di subsidenza presente negli ambienti naturali e rurali senza perdere la precisione nel quantificare il movimento verticale di infrastrutture ed aree urbane. Alcuni esempi significativi sono i cedimenti da -3 a -5 mm/a che caratterizzano il bacino centrale e meridionale della laguna da un lato, e, dall'altro, l'importante compattazione dei terreni presso le co-



Fig. 6 - Mappa delle velocità medie dei movimenti del suolo ottenuta dalla combinazione dei prodotti interferometrici in banda L e in banda X alla scala regionale. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento. I poligoni evidenziati in bianco rappresentano il posizionamento delle aree proposte in Fig. 7. L'immagine di sfondo è da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo, and the GIS User Community [modificata da 26]

struzioni alle tre bocche di porto lagunari dove il progetto Mo.S.E. è in corso di realizzazione.

Al fine di evidenziare il massimo contributo delle due bande, sono state selezionate due aree locali rappresentative (Fig. 7). Queste sono principalmente caratterizzate da ambienti naturali o rurali, dove la presenza di vegetazione bassa non ostacola completamente la capacità di monitoraggio in banda L. Le zone sono delimitate o attraversate da infrastrutture lineari, come argini e ponti, i cui spostamenti possono essere misurati con grande precisione dalla banda X. Tali aree, la cui estensione areale è compresa tra 10 e 20 km<sup>2</sup>, corrispondono alle parti settentrionale e meridionale della laguna di Venezia.

La Fig. 7 è organizzata come segue: ogni riga fornisce le velocità interpolate dei due satelliti per la stessa area e ogni colonna mostra



Fig. 7 - Mappe delle velocità medie di movimento del suolo ottenute dai prodotti interferometrici in banda L e in banda X alla scala locale. a), d) risultati di ALOS PALSAR; b), e) risultati di COSMO-SkyMed; c), f) mappe combinate. La posizione delle due aree è in Fig. 6. Valori negativi indicano subsidenza, positivi sollevamento. L'immagine di sfondo è da Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, Swisstopo, and the GIS User Community [modificata da 26].

la velocità interpolata dello stesso satellite per le varie aree. La prima (Fig. 7a,d) e la seconda colonna (Fig. 7b,e) mostrano le velocità di spostamento di ciascun pixel/PT attribuite ad un cerchio di 250 m di raggio ottenute rispettivamente da ALOS PALSAR e COSMO-SkyMed. Da notare:

(i) la complementarietà dei due set di dati in termini di distribuzione spaziale dei punti di monitoraggio rilevati, con le misurazioni in banda X principalmente collocate lungo i confini delle aree selezionate (Fig. 7b) o lungo il ponte che attraversa la laguna sud (Fig. 7e);

(ii) la differenza significativa tra i tassi di movimento osservati nella parte interna (dalla banda SBAS) e in quella di confine (dalla banda X IPTA) di ogni area. Si noti, per esempio, che nella parte settentrionale della Laguna di Venezia il tasso di subsidenza della zona naturale interna (Fig. 7a) è quasi pari al doppio dei valori presenti lungo gli argini (Fig. 7b), vale a dire una media di circa -7 mm/a contro i -4 mm/a di questi ultimi.

Le mappe combinate (Fig. 7c,f) mantengono le peculiarità intimamente connesse con il ruolo dei diversi processi che hanno contribuito alla subsidenza cumulata, e ne permettono il miglioramento dell'interpretazione. Nella parte settentrionale della laguna di Venezia i processi regionali sono responsabili delle velocità di subsidenza dell'ordine di 3-4 mm/a.

# 5. Conclusioni

I movimenti della superficie delle forme morfologiche e lagunari, come barene e piane tidali, sono difficilmente quantificabili a causa della ridotta accessibilità per le indagini tradizionali (livellazioni e GPS) e per la scarsa capacità dei sensori radar in banda C e X dovuta alla bassa coerenza delle zone vegetate e la mancanza di punti riflettenti. A causa della grande estensione areale della laguna, la densità areale di pixels/PTs può ridursi a meno di 150 punti/km<sup>2</sup>.

Per ottenere il massimo vantaggio da sensori SAR a diversa banda, in questo studio si è adottata una strategia innovativa che consiste nell'integrazione dei loro risultati. Nello specifico, si è investigata la capacità di combinare i risultati interferometrici di ALOS PALSAR (banda L) e COSMO-SkyMed (banda X) in una sorta di nuovo unico dataset in banda L/X.

L'approccio multi-banda ha permesso di migliorare la copertura spaziale in ambienti fortemente eterogenei del sistema lagunare di Venezia. Inoltre, l'aumento del numero di punti di misura offerto dall'analisi combinata multi-banda ha permesso di migliorare notevolmente la conoscenza della subsidenza in atto rispetto a quanto si sarebbe potuto ottenere con l'utilizzo separato ed indipendente dei due satelliti.

Tale approccio ha rivelato un'eterogeneità dei movimenti del suolo maggiore rispetto a quanto mostrato da studi precedenti, dettata dal diverso contributo dei processi superficiali e profondi alla subsidenza cumulata nei settori settentrionali, centrali e meridionali del bacino lagunare.

In conclusione, data l'importanza di un monitoraggio affidabile e preciso dei movimenti del suolo di lagune, zone umide e coltivate costiere in vista dell'innalzamento del livello del mare previsto, l'approccio combinato multi-banda presentato in questo studio rappresenta uno strumento importante che potrà essere utilizzato in altre zone costiere con caratteristiche fisiografiche simili al sistema lagunare di Venezia.

#### 6. Ringraziamenti

Lavoro sviluppato all'interno del Progetto Bandiera RITMARE – la Ricerca Italiana per il Mare – coordinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e finanziato dal MIUR all'interno del Programma di Ricerca Nazionale 2011-2013. Per cortesia dei dati: (1) COSMO-SkyMed AO, Project ID 2100 © ASI Land movements in the Venice Lagoon: measuring the natural/regional and anthropogenic/local components by SAR Interferometric Point Target Analysis (IPTA); (2) ALOS PALSAR, Project AOALO-3550, © JAXA; CGPS Time series, Nevada Geodetic Laboratory (NGL).

# 7. Bibliografia

- Tosi, L.; Teatini, P.; Strozzi, T.; Carbognin, L.; Brancolini, G.; Rizzetto, F. Ground surface dynamics in the northern Adriatic coastland over the last two decades. Rend. Lincei Sci. Fis. (2010), 21, 115-129.
- [2] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Carbognin, L.; Wegmüller, U.; Rizzetto, F. Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. Remote Sens. Environ. (2005), 98, 403-413.
- [3] Teatini, P.; Strozzi, T.; Tosi, L.; Wegmüller, U.; Werner, C.; Carbognin, L. Assessing short- and long-time displacements in the Venice coastland by synthetic aperture radar interferometric point target analysis. J. Geophys. Res. Earth Surface (2007), 112.
- [4] Tosi, L.; Teatini, P.; Strozzi, T.; Da Lio, C. Relative Land Subsidence of the Venice Coastland, Italy. In: (a cura di): Giorgio Lollino, Andrea Manconi, Jacques Locat,

Yu Huang, Miquel Canals Artigas, Engineering Geology for Society and Territory - Marine and Coastal Processes. Springer International Publishing Switzerland, (2014); Volume 4, 171-173.

- [5] Strozzi, T.; Teatini, P.; Tosi, L.;Wegmüller, U.;Werner, C. Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors. J. Geophys. Res. Earth Surface (2013), 118, 1177-1191.
- [6] Nitti, D.O.; De Vitis, L.; Bovenga, F.; Nutricato, R.; Refice, A.; Wasowski, J. Multi-temporal L-band SAR interferometry confirms C-band spatial patterns of subsidence in the ancient Wieliczka Salt Mine (Unesco Heritage Site, Poland). In Proceedings of the Fringe 2009 Workshop, Frascati, Italy, 4 December (2009).
- [7] Chen, F.; Lin, H.; Hu, X. Slope superficial displacement monitoring by small baseline SAR interferometry using data from L-band ALOS PALSAR and X-band TerraSAR: A case study of Hong Kong, China. Remote Sens. (2014), 6, 1564-1586.
- [8] Berardino, P.; Fornaro, G.; Lanari, R.; Sansosti, E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. (2002), 40, 2375-2383.
- [9] Werner, C.; Wegmüller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Gamma SAR and interferometric processing software. In ERS - ENVISAT Symposium, Gothenburg, Sweden (2000); 16-20.
- [10] Werner, C.;Wegmüller, U.; Strozzi, T.;Wiesmann, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003); Toulouse, France, 21-25 July (2003); 4362-4364.
- [11] Veneto GPS Network. Available online: http://retegnssveneto.cisas.unipd.it/Web/ index.php (accessed on November 2015).
- [12] FReDNet GPS Network. Available online: http://frednet.crs.inogs.it/ItalianSite/ XFReDNetHome.htm (accessed on November 2015).
- [13] MAGNET GPS Network. Available online: http://geodesy.unr.edu/billhammond/ gpsnetmap/GPSNet Map.html (accessed on November 2015).
- [14] Jet Propulsion Laboratory GPS time series. Available online: http://sideshow.jpl. nasa.gov/ post/series.html (accessed on November 2015).
- [15] SOPAC GPS data. Available online: http://sopac.ucsd.edu/map.shtml (accessed on November 2015).
- [16] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Carbognin, L.; Cecconi, G.; Rosselli, R.; Libardo, S. Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. Phys. Chem. Earth (2012a), 40-41, 72-79.
- [17] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. Comment on "Recent subsidence of the Venice Lagoon from continuous GPS and interferometric synthetic aperture radar". Geochem. Geophys. Geosys. (2012b), 13.
- [18] Tosi, L.; Teatini, P.; Strozzi, T. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. Sci. Rep. (2013), 3.
- [19] Tosi, L.; Teatini, P.; Carbognin, L.; Brancolini, G. Using high resolution data to reveal depth-dependent mechanisms that drive land subsidence: The Venice coast, Italy. Tectonophysics (2009), 474, 271-284.

- [20] Kirwan, M.L.; Guntenspergen, G.R.; D'Alpaos, A.; Morris, J.T.; Mudd, S.M.; Temmerman, S. Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. Geophys. Res. Lett. (2010), 37.
- [21] D'Alpaos, A.; Da Lio, C.; Marani, M. Biogeomorphology of tidal landforms: Physical and biological processes shaping the tidal landscape. Ecohydrology (2012), 5.
- [22] Teatini, P.; Gambolati, G.; Tosi, L. A new 3-D non-linear model of the subsidence of Venice. In Land Subsidence; Barends, F.B.J., Ed.; IAHS Publishing; Wallingford, UK, (1995); 353-361.
- [23] Carbognin L.; Marabini F.; Tosi L. Land subsidence and degradation of the Venice littoral zone, Italy. In: (eds.): FBJ Barends; FJJ Brouwer; FH Schröder, Land Subsidence: by Fluid Withdrawal, by Solid Extraction, Theory and Modelling, Environmental Effects and Remedial. International Association of Hydrological Sciences (IAHS Press), THE HAGUE, NETHERLANDS, (1995); Volume 234, 391-402.
- [24] Carbognin, L.; Teatini, P.; Tosi, L. Relative land subsidence in the lagoon of Venice, Italy, at the beginning of the new millennium. J. Mar. Syst. (2004), 51, 345-353.
- [25] Carbognin L.; Teatini, P.; Tosi, L. Land subsidence in the Venetian area: known and recent aspects. Ital J Eng Geol Environ (2005), 1, 5-11.
- [26] Tosi, L., Da Lio, C., Strozzi, T., Teatini, P. Combining L- and X-Band SAR Interferometry to Assess Ground Displacements in Heterogeneous Coastal Environments: The Po River Delta and Venice Lagoon, Italy. Remote Sens. (2016), 8, 308.
- [27] Carbognin, L.; Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T.; Tomasin, A. Present relative sea level rise in the northern Adriatic coastal area. In Marine Research at CNR–Theme 3 "Coastal and Marine Spatial Planning"; Brugnoli, E., Cavarretta, G., Mazzola, S., Trincardi, F., Ravaioli, M., Santoleri, R., Eds.; CNR-DTA: Roma, Italy, (2011); 1123-1138.
- [28] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. Quantitative evidence that compaction of Holocene sediments drives the present land subsidence of the Po Delta, Italy. J. Geophys. Res. Solid Earth (2011), 116.
- [29] Teatini, P.; Tosi, L.; Strozzi, T. Capability of X-Band Persistent Scatterer Interferometry to Monitor Land Subsidence in the Venice Lagoon. In: (a cura di): Giorgio Lollino, Andrea Manconi, Jacques Locat, Yu Huang, Miquel Canals Artigas, Engineering Geology for Society and Territory - Marine and Coastal Processes. Springer International Publishing Switzerland, (2014); Volume 4, 175-178.
- [30] Kourkouli, P; Wegmüller, U.; Teatini, P; Tosi, L.; Strozzi, T.; Wiesmann, A.; Tansey, K. Ground deformation monitoring over Venice Lagoon using combined DIn-SAR/PSI techniques. In Engineering Geology for Society and Territory; Lollino, G., Ed.; Springer: Cham, Switzerland, (2014); Volume 4, 181-186.

# EFFETTI DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI ALLA BOCCA DI LIDO SULLA STABILITA' DELLE BARENE IN LAGUNA NORD

# Sonia Silvestri\*, Giovanna Nordio\*\*, Andrea D'Alpaos\*\*\*, Luca Carniello\*\*

# 1. Introduzione

La Laguna di Venezia, in origine caratterizzata da una morfologia estremamente eterogenea, ha subito nel corso dei secoli numerose modificazioni ad opera dell'uomo che, in particolar modo all'epoca delle grandi diversioni dei fiumi Brenta, Piave e Sile (XIV-XVII secolo) e con la costruzione dei moli alle Bocche e dei grandi canali navigabili (XIX-XX secolo), ha dato il via ad un cambiamento radicale del territorio lagunare [1]. Se prima della diversione dei fiumi la laguna si stava progressivamente interrando, con l'esclusione della maggiore sorgente di sedimenti la tendenza all'interrimento si è sostanzialmente annullata e la laguna ha raggiunto nei secoli uno stato di pseudo-equilibrio, caratterizzato da canali poco profondi e ampie superfici di barene e bassifondi. Questa conformazione è ben descritta dalla mappa redatta da Augusto Denaix nel 1811 e dalle mappe prodotte durante l'800 (e.g. mappa del De Bernardi 1840), dalle quali si evince una situazione di sostanziale stabilità morfologica. Pochi anni prima della fine dell'800, però, nuovi interventi antropici danno inizio ad un periodo di cambiamenti rapidi ed irreversibili. Osservando le carte storiche si nota come le superfici barenali, ad esempio, dal 1901 al 2003 si siano ridotte di circa il 70%, ed occupino oggi appena il 5-10% dell'intera Laguna [2]. Le barene sono

<sup>\*</sup> Dip. TESAF, Università degli Studi di Padova, Nicholas School of the Environment, Duke University, Durham, North Carolina, USA.

<sup>\*\*</sup> Dip. ICEA Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università degli Studi di Padova.

<sup>\*\*\*</sup> Dip. di GEOSCIENZE, Università degli Studi di Padova.

aree fondamentali per lo sviluppo ed il mantenimento dell'ecosistema, poiché proteggono la zona costiera durante violente tempeste, filtrano nutrienti ed inquinanti dalle acque, sono l'habitat di molti organismi viventi e sono una risorsa importante per la pesca e altre attività antropiche. La comprensione dei fenomeni fisici che hanno portato alla loro drastica riduzione nel corso degli ultimi 150 anni e delle azioni umane che furono all'origine di tali fenomeni sono di fondamentale importanza ai fini di una corretta gestione della laguna veneta e di altre realtà simili. In questo lavoro si analizzano due aree barenali situate nel bacino settentrionale della Laguna, una lontana dalla Bocca di Lido in corrispondenza della Valle Ca' Zane e una più vicina alla bocca, in corrispondenza di Treporti e prospicente il canale San Felice (Fig. 1).



Fig. 1 - Mappe storiche del 1901 e del 1932 [2]: visione della laguna nord (a, b), particolare delle barene in località Treporti (c, d) e delle barene di Valle Ca' Zane (e, f).

Se nelle mappe dei primi '800 Valle Ca' Zane risulta costantemente circondata da ampie superfici di barena, le mappe storiche risalenti al periodo 1887-1932 evidenziano un cambiamento drammatico di queste barene, che in pochi anni sono in gran parte scomparse, sostituite da laghi e bassi fondali (Fig. 1). Tale decadimento non può essere attribuito alla mancanza di apporto di sedimenti dovuto alla diversione del fiume Sile, in quanto questa era stata completata ben due secoli prima, nel 1683. La scomparsa non si può neppure attribuire alle bonifiche dell'area agricola retrostante il Taglio del Sile, nota come Palude Fossone, in quanto, proprio per bonificare questa palude, nel 1887 era stata costruita la Botte dei Lanzoni che, sottopassando il Sile, riportava, dopo due secoli, acqua dolce e quindi anche sedimento all'interno della laguna. Questa azione, che ha sicuramente aumentato l'apporto di sedimenti disponibili per le barene di Valle Ca' Zane, non é comunque bastata ad evitarne la scomparsa. Al contrario, nello stesso periodo storico, le barene vicine a Treporti non hanno subito fenomeni erosivi degni di nota, e si sono altresì mantenute sino ad oggi quasi immutate. Per capire quali fenomeni possano aver portato a una tale differenza delle dinamiche evolutive, in questo studio abbiamo preso in considerazione alcuni interventi antropici realizzati proprio negli anni di passaggio tra '800 e '900 in Laguna Nord, ed in particolare la costruzione dei moli alla Bocca di Lido eseguita tra il 1882 e il 1892, e la rimozione delle *arelle*<sup>1</sup> in Valle Ca' Zane che è avvenuta nel 1910 (a seguito di ripetuti danneggiamenti dovuti a intense mareggiate, che probabilmente le avevano rese inefficaci giá dagli inizi del secolo).

Scopo principale di questo studio è quello di capire se e in quale misura la scomparsa delle barene di Ca' Zane sia attribuibile alle modifiche idrauliche introdotte dai citati interventi antropici, e quale processo possa, al contrario, aver contribuito alla stabilità delle barene prossime alla bocca di porto. A tal fine viene impiegato un modello numerico in grado di descrivere il comportamento idrodinamico della laguna in diverse configurazioni storiche successive. Nello specifico, sono stati utilizzati alcuni reticoli di calcolo già realizzati ([3] e [1]) che riproducono la laguna di Venezia nelle sue configurazioni

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Le *arelle* sono strutture formate da parè di grisiole in canna che delimitano le Valli da pesca favorendo la pesca interna.

del 1901 e del 1932, corrispondenti alle mappe riportate in Fig. 1, nonché in quelle del 2003 e del 2012. Per meglio seguire l'evoluzione legata agli interventi antropici della fine dell'800, è stato creato un ulteriore reticolo di calcolo realizzato sulla base delle tavolette IGM relative agli anni 1887-1892. Sempre con la finalità di confronto tra i diversi periodi, il livello del mediomare (assunto come riferimento per le quote batimetriche assegnate ai diversi reticoli di calcolo) è stato calcolato tenendo conto dell'eustatismo naturale, cosicché lo zero di marea utilizzato in ognuna delle diverse configurazioni storiche è quello esistente al di fuori della laguna all'epoca considerata. Le analisi condotte hanno permesso di descrivere l'evoluzione dell'idrodinamica lagunare in un arco di tempo superiore a 100 anni, dal 1887 al 2012.

L'utilizzo di un secondo modello matematico, in grado di descrivere in modo puntuale l'evoluzione della quota delle barene nel tempo, ha poi permesso di studiare quale impatto abbiano avuto le modificazioni idrodinamiche indotte dagli interventi antropici già menzionati sull'evoluzione morfologica delle due aree barenali allo studio.

I risultati ottenuti rivelano come gli interventi umani sull'idrodinamica lagunare possano portare a conseguenze a volte insospettate e contro intuitive.

#### 2. Modelli

Nell'ambito del presente studio sono stati utilizzati due diversi modelli: (1) un modello numerico idrodinamico uni-bidimensionale agli elementi finiti; (2) un modello puntuale per descrivere l'evoluzione della quota di una barena nel tempo in risposta alla variazione delle forzanti esterne.

### 2.1. Il modello idrodinamico

Il modello idrodinamico utilizzato è il modello uni-bidimensionale agli elementi finiti, semi-implicito, euleriano-lagrangiano sviluppato dai ricercatori del dipartimento ICEA dell'Università di Padova [4]. Il modello è stato ampiamente applicato e testato in diversi contesti lagunari e costieri (e.g. [5], [6], [7]). Esso è basato su uno

schema numerico che risolve le equazioni differenziali che governano la propagazione delle onde lunghe in acque basse (equazioni di De Saint Venant), opportunamente modificate per descrivere in modo computazionalmente efficiente e fisicamente basato il delicato processo legato alla transizione asciutto-bagnato [8]. Lo schema numerico adottato è in grado di accoppiare, all'interno della medesima griglia di calcolo, elementi bidimensionali e monodimensionali. Gli elementi monodimensionali vengono utilizzati dal modello per la rappresentazione della fitta rete di canali minori che innerva l'intera laguna. Tali canali influenzano in modo importante la propagazione della marea ma, se fossero riprodotti con elementi bidimensionali, richiederebbero di scendere ad un grado di discretizzazione eccessivamente fitto e di fatto proibitivo dal punto di vista computazionale. L'uso di elementi monodimensionali consente di descrivere l'effetto idrodinamico della rete minore con un incremento minimo dei tempi di calcolo. I canali monodimensionali, posti in adiacenza alle maglie triangolari bidimensionali, funzionano come elementi in pressione a sezione costante fino a quando le zone che li fiancheggino sono coperte dall'acqua e come canali a pelo libero quando il livello scende al di sotto della quota delle zone laterali. Per una descrizione dettagliata dello schema numerico e dell'accoppiamento tra elementi uni e bidimensionali si rimanda il lettore a [9] e [4].

#### 2.2. Il modello di evoluzione di quota della barena

Il modello di evoluzione della quota delle barene nel tempo [10] è stato utilizzato sfruttando i risultati ottenuti con il modello idrodinamico, allo scopo di analizzare gli effetti dovuti al cambiamento negli anni delle forzanti esterne agenti sulle forme lagunari, in particolare sulle barene. Questo modello consente di descrivere la variazione puntuale della quota di una barena a fronte di una variazione del livello medio del mare e dell'ampiezza di marea, della subsidenza, della produzione di suolo organico dovuto alla presenza di vegetazione alofila e delle perturbazioni legate alla concentrazione di sedimenti in sospensione, simulando la risposta dinamica della barena stessa. Le barene sono aree intertidali caratterizzate da una subsidenza continua dovuta alla compattazione degli strati sedimentari superficiali, e

pertanto la loro esistenza è legata al continuo apporto di sedimento organico e inorganico che si deposita sulla superficie e alla produzione di biomassa ad opera delle piante. Nell'ipotesi, ragionevole, che in presenza di vegetazione si possa trascurare l'erosione dalla superficie della barena, il sistema è in equilibrio quando, nel caso in cui il livello del mare rimanga costante, la compattazione è eguagliata dalla crescita verticale. Se ciò non accade ma la velocità con cui il livello medio relativo del mare varia (indichiamo con R il tasso di incremento del medio mare relativo) può essere bilanciata dal tasso di accrescimento organico e inorganico, il sistema si autoregola e può recuperare lo stato di equilibrio grazie ad un meccanismo di retroazione positivo. Infatti, in condizioni caratterizzate da un aumento del livello del mare (R positivo) le superfici di barena sono sommerse con più frequenza e per un periodo più lungo, il che favorisce un aumento della deposizione di sedimenti sospesi e un'accelerazione della crescita verticale della barena stessa che riesce così a mantenere il passo con l'incremento del medio mare relativo. Se il livello medio del mare si abbassa, il tempo di sommersione decresce e di conseguenza diminuisce anche la quantità di sedimento che ha il tempo di depositarsi sulla superficie barenale; ciò favorisce un abbassamento netto della barena che tende a tornare alla quota di equilibrio. Questa mutua dipendenza non è solo collegata al livello del medio mare e alle sue variazioni, ma anche alla disponibilità di sedimento in sospensione e alla vegetazione che cresce sulla barena che con le sue radici stabilizza e trattiene il sedimento e con i rami e le foglie diminuisce la velocità dell'acqua incrementando la deposizione. Le piante sono inoltre sorgente fondamentale di sostanza organica che si accumula nel suolo anossico e contribuisce alla continua crescita verticale del suolo. Quando la velocità con cui cresce il medio mare supera una certa soglia (calcolabile per ogni specifico sito di studio), la barena affonda e lentamente scompare [11]. Il modello utilizzato in questo studio è un modello numerico puntuale che simula la variazione della quota della barena e che sfrutta la soluzione analitica sviluppata in [10] variandone però le ipotesi. Il modello descritto in [10], infatti, simula l'evoluzione delle barene colonizzate da Spartina alterniflora, specie alofila tipica delle lagune del Nord America. Tale specie cresce particolarmente densa e abbondante in aree depresse della barena, apportando una maggiore quantità di sostanza

organica al diminuire della quota del suolo [10]. A differenza delle barene americane, quelle della Laguna di Venezia sono caratterizzate da una vegetazione 'multi-specie', che include numerose specie alofile quali Salicornia veneta, Spartina maritima, Limonium narbonense, Sarcocornia fruticosa, Juncus maritimus, Inula crithmoides, Puccinellia palustris, Halimione portulacoides, Suaeda maritima, Arthrocnemum macrostachyum, Aster tripolium. La diversità delle specie alofile tipica delle barene venete cresce con la quota del suolo [12], così come la biomassa della vegetazione, che quindi contribuisce con un maggiore apporto organico ai suoli barenali più elevati, apporto che decresce al diminuire della quota. Malgrado ciò, uno studio recente sui suoli delle barene in Laguna di Venezia [13] ha evidenziato che la quantità di sostanza organica presente nei suoli barenali è pressoché costante al variare della quota, fenomeno probabilmente legato alla variabilità nella velocità di decomposizione ad opera dei batteri. Sulla base di queste osservazioni, il modello sviluppato in [10] è stato modificato per quanto riguarda il contributo organico alla crescita verticale del suolo e adattato al caso della Laguna di Venezia. Nello specifico, una volta definita la quota z della barena riferita al livello medio del mare (MSL) locale, la variazione di z nel tempo è determinata da

$$\frac{dz}{dt} = Q_D - Q_E - R \tag{1}$$

dove  $Q_D$  è il flusso di sedimenti depositati in un ciclo mareale,  $Q_E$  è quello dei sedimenti erosi, mentre R è il tasso di incremento del medio mare relativo, che rappresenta il tasso di sommersione locale a cui è soggetta la barena al netto non solo della crescita del livello medio del mare ma anche della subsidenza associata alla singola barena.

Nella soluzione della (1) sono state fatte alcune assunzioni fondamentali già presenti in [10]:

1. Il termine  $Q_D$  rappresentativo della sedimentazione sulla barena viene definito come la somma di più contributi: i)  $Q_C$  dovuto alla cattura dei sedimenti sospesi da parte della vegetazione (stelo e foglie); ii)  $Q_S$  legato esclusivamente al processo di sedimentazione e iii)  $Q_O$  dovuto all'accumulo di materiale organico sulla superficie della barena. I primi due termini vengono solitamente inglobati nel termine  $Q_T=Q_C+Q_s$ , rappresentativo dell'intero contributo inorganico per intrappolamento. È stato altresì dimostrato [11] che al crescere di  $Q_s$  il termine  $Q_C$  decresce e viceversa, conservando nel complesso la costanza del termine  $Q_T$ .

2. Il termine  $Q_{D}$  è quindi descritto analiticamente come:

$$Q_D = Q_T + Q_O = \alpha_T \left( 1 - \frac{z}{H} \right) + \gamma_0 \tag{2}$$

dove H è l'ampiezza di marea,  $\alpha_T$  è il massimo tasso di deposizione inorganica e  $\gamma_0$  un tasso costante di deposizione organica. Nel complesso, il primo termine a destra del segno di uguaglianza rappresenta l'apporto inorganico  $Q_T$  ed è una funzione decrescente della quota, mentre l'apporto organico  $Q_O$ , riprodotto dal secondo termine, è considerato costante, in linea con i risultati sperimentali discussi in [13].

3. Il termine  $Q_{E}$ , relativo all'erosione, viene tipicamente trascurato poiché le correnti di marea e le onde da vento, che rappresentano i meccanismi naturali in grado di mobilitare i sedimenti negli ambienti lagunari, sono molto deboli in corrispondenza delle barene a causa dei ridotti tiranti idrici e della presenza della vegetazione.

Sulla base delle ipotesi fatte, è possibile quindi riscrivere la (1) come segue:

$$\frac{dz}{dt} = -\frac{\alpha_T}{H}z + k - R \tag{3}$$

con *k* pari alla somma di  $\alpha_T e \gamma_0$ . Grazie alla (3) è possibile descrivere, in modo puntuale, l'evoluzione delle barene selezionate per questo studio in risposta alle variazione delle forzanti del sistema dovute, a loro volta, alle variazioni idrodinamiche. All'equilibrio, la barena tende alla quota  $z_{eq}$  che viene determinata sulla base dell'equazione (3) considerando dz/dt = 0. Possiamo così definire:

$$z_{eq} = H\left(\frac{k}{\alpha_T} - \frac{R}{\alpha_T}\right) \tag{4}$$

dove a parità di H,  $\alpha_T e \gamma_0$  la quota varia linearmente con R. La barena soggetta così ad una variazione del tasso di incremento del medio mare R, tenderà ad una  $z_{eq}$  diversa rispetto a quella inizialmente caratterizzata da un diverso valore di R. Se i valori di R sono troppo elevati, la barena non è in grado di tenere il passo con l'incremento del medio mare e lentamente affonda. Il tasso R massimo che la barena può tollerare è pari a k, in corrispondenza del quale la  $z_{eq}$  risulta essere nulla; nel caso in cui invece il tasso R risulti superiore a k la  $z_{eq}$  diventa negativa, a significare appunto un affondamento della barena stessa.

L'equazione (3) può essere agevolmente risolta utilizzando uno schema esplicito alle differenze finite che consente di seguire l'evoluzione della quota della singola barena a seguito della variazione delle forzanti locali. Nel presente studio il passo di integrazione utilizzato è pari ad 1 anno e l'orizzonte temporale preso in considerazione va dal 1887 al 2012.

L'ampiezza H, utilizzata per condurre i calcoli, è un'ampiezza variabile ad ogni passo, dedotta sulla base dei risultati ottenuti con il modello idrodinamico. Si noti che l'ampiezza H, oltre a comparire esplicitamente nella (3) contribuisce a determinare il valore di  $\alpha_{\tau}$  secondo quanto riportato in [10]. Il tasso *R* racchiude in sé l'effetto dell'eustatismo, della subsidenza e della variazione del livello del medio mare all'interno della laguna, livello che è influenzato dagli effetti idrodinamici legati alla propagazione dell'onda di marea lungo i canali lagunari e che pertanto viene anch'esso calcolato con il modello idrodinamico. Per quanto riguarda invece i valori relativi all'apporto di sedimenti organici e inorganici, le considerazioni variano a seconda del luogo e del tipo di sedimento che si vuole considerare: infatti se per il sedimento organico il valore  $y_0$  in questo studio è considerato costante, per il sedimento inorganico il valore  $\alpha_{\tau}$  dipende, oltre che dall'ampiezza di marea come ricordato in precedenza, anche dalla concentrazione di sedimento in sospensione e va valutato sulla base delle informazioni disponibili per la singola area di barena che si intende analizzare.

Accoppiando il modello puntuale di evoluzione della barena con il modello idrodinamico, è possibile determinare la variazione delle forzanti idrodinamiche locali (ampiezza di marea e livello del

139

medio mare) nelle diverse configurazioni storiche della laguna e, di conseguenza, aggiornare il valore della quota della barena ad ogni passo temporale, simulando quindi l'evoluzione della singola barena analizzata al variare delle forzanti.

# 3. Reticoli di calcolo

Come già anticipato, al fine di studiare la propagazione dell'onda di marea dalle bocche di porto ai limiti della conterminazione e successivamente l'evoluzione morfologica delle aree barenali oggetto della presente indagine, sono stati utilizzati diversi reticoli di calcolo che riproducono sei diverse configurazioni lagunari a partire dalla fine del 1800 fino ai giorni nostri.

Il primo reticolo utilizzato, nel seguito indicato come reticolo del 1887, è stato ricostruito nell'ambito del presente studio sulla base delle tavolette dell'Istituto Geografico Militare (IGM) redatte tra il 1887 e il 1892. Esso riproduce la laguna poco prima della completa costruzione dei moli alla Bocca di porto di Lido (ultimata nel 1892): nella mappa è infatti presente il solo molo nord, appena realizzato (Fig. 2a). Sono invece già presenti i moli alla Bocca di Malamocco, completati nel 1872, mentre sono ancora da realizzare quelli alla bocca di Chioggia. Gli altri reticoli sono stati invece sviluppati in lavori precedenti (e.g. [1] e [3]). Nello specifico il secondo reticolo è stato ricostruito sulla base della mappa redatta dall'Ufficio del Genio Civile di Venezia nel 1901 e riproduce la laguna dopo la costruzione del molo sud della Bocca di Lido, terminata nel 1892 (Fig. 2b). Il terzo reticolo ha come base la mappa redatta dall'Ufficio Idrografico del Magistrato delle Acque di Venezia nel 1932 e riproduce la Laguna caratterizzata dalla presenza ormai completa dei moli anche alla bocca di Chioggia, ultimati nel 1934, oltre che dall'assenza delle arelle poste a protezione della valle Ca' Zane che invece erano ancora presenti nella mappa del 1901.

Infine, i reticoli del 2003 e del 2012, ricostruiti sulla base delle mappe e dei rilievi batimetrici realizzati dal Magistrato delle Acque di Venezia, corrispondono alla Laguna attuale, rispettivamente prima (2003) dell'inizio dei lavori per la realizzazione delle opere per la difesa dalle acque alte (Mo.S.E.) e dopo l'ultimazione delle opere fisse





#### (2012).

Dal confronto tra il reticolo del 1887 e quello del 1901 (Fig. 2) è evidente come, in meno di 15 anni, la profondità del canale della Bocca di Lido sia aumentata in modo importante, soprattutto lungo la porzione superiore del canale e nella zona di foce, passando da valori di 1-2 m a valori di oltre i 6-8 m. Questo rapido cambiamento, dovuto chiaramente alla variata morfologia della bocca, ha prodotto, come vedremo più avanti, conseguenze importanti sulla propagazione dell'onda di marea all'interno della laguna.

Una seconda osservazione derivante dalle mappe storiche considerate riguarda le *arelle*, strutture costruite utilizzando grisiole in canna e presenti in alcune Valli da pesca della laguna nord con lo scopo di trattenere i pesci all'interno della valle e favorire la pesca (Fig. 3a). I reticoli datati 1887 e 1901 sono caratterizzati entrambi dalla presenza di *arelle* in numerose valli lagunari tra cui la valle di Ca' Zane. Pro-



Fig. 3 - (a) Disposizione tipica delle *arelle*, costituite da parè di grisiole in canna, poste a protezione delle Valli da pesca. (b) Esperienze di laboratorio sulla resistenza idrodinamica prodotta dalle *arelle* [2].

prio all'inizio del secolo scorso si diffuse la convinzione che le arelle non permettessero un buon ricambio d'acqua, e ci furono numerose dispute riguardo il loro reale effetto globale sullo stato della laguna. Le mappe storiche testimoniano come, per effetto di tale convinzione e a causa di danneggiamenti continui dovuti alle mareggiate, le arelle siano state progressivamente rimosse. Nel caso specifico della Valle Ca' Zane le *arelle*, ancora presenti nella mappa del 1901, non compaiono in quella del 1932 (Fig. 1e-f). In questo studio si è tenuto conto degli effetti dissipativi che queste strutture inducono nella propagazione dell'onda di marea. A tal fine esse sono state riprodotte all'interno dei reticoli di calcolo mediante l'imposizione di un opportuno valore di scabrezza agli elementi di calcolo corrispondenti. I valori del coefficienti di scabrezza utilizzati (secondo Strickler) sono stati tratti da esperienze in laboratorio [2] e variano da 1 a 5 m<sup>1/3</sup>s<sup>-1</sup> (Fig. 3b).

# 4. Analisi del comportamento idrodinamico delle diverse configurazioni lagunari

L'analisi idrodinamica della propagazione dell'onda di marea dalla bocca di porto ai limiti della conterminazione è stata condotta mediante l'imposizione di una marea astronomica di durata 15 giorni, al fine di prendere in considerazione sia la condizione di sizigia,



Fig. 4 - Direttrice Bocca di Lido-Valle Ca' Zane tracciata sulla mappa della Laguna del 1901.

caratterizzata dai massimi valori di escursione di marea, sia lo stato di quadratura, con escursioni molto più modeste. La marea prescelta è stata imposta come condizione al contorno lato mare dapprima al reticolo di calcolo del 1887. I risultati del calcolo sono stati analizzati considerando in particolare la propagazione della marea lungo una direttrice che, partendo dalla bocca di Lido, giunge fino a Valle Ca' Zane passando per Treporti (Fig. 4).

In Fig. 5 sono riportati gli andamenti dei livelli di marea in alcuni punti posti lungo la direttrice (Fig. 4). Dal grafico si osserva un'importante attenuazione del segnale di marea nel corso della propagazione verso le zone più interne. Questo comportamento dimostra chiaramente come la laguna dell'epoca fosse estremamente dissipativa, caratterizzata da profondità complessivamente modeste. Un risultato analogo si ottiene analizzando i risultati della simulazione condotta facendo propagare la medesima marea nel reticolo del 1901, dove le profondità dei fondali alla Bocca di Lido sono sensibilmente aumentate (anche del 250%) rispetto al 1887 a cau-



Fig. 5 - Andamento dei livelli di marea lungo la direttrice Lido - Ca' Zane considerando la configurazione della laguna del 1887.

sa della costruzione delle dighe foranee, ma, per quanto riguarda i fondali delle zone interne alla bocca, la profondità non è variata in modo apprezzabile.

Utilizzando il reticolo del 1901 è stato inoltre interessante studiare l'effetto sulla propagazione della marea indotto dalla presenza delle arelle di Valle Ca' Zane, ponendo a confronto la situazione reale, caratterizzata dalla presenza delle arelle, con una situazione ipotetica, caratterizzata dalla loro assenza. Sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni si osserva come le arelle non avessero un effetto idrodinamico significativo, producendo differenze nell'ampiezza e nel livello medio di pochi millimetri. Ciò è certamente da ascrivere al già menzionato comportamento fortemente dissipativo della laguna nel suo complesso a cavallo tra '800 e '900, che comportava una notevole attenuazione della marea nelle aree più interne della laguna stessa. A tale attenuazione poco o nulla aggiungeva la presenza delle arelle che invece avrebbero prodotto effetti ben più importanti su un segnale meno attenuato. Alla luce di questa osservazione si può assumere che la rimozione delle arelle, avvenuta ai primi del '900, non abbia prodotto modifiche rilevanti sui livelli di marea locali, bensì abbia modificato il trasporto di sedimenti, come spiegheremo nei prossimi capitoli.



Fig. 6 - (a), (c) Confronto tra i livelli di marea nei diversi anni rispettivamente a Treporti e a Ca' Zane. (b), (d) Ingrandimento degli intervalli contenuti nei riquadri tracciati rispettivamente in (a) e (c).

Al pari di quanto fatto utilizzando i reticoli del 1887 e del 1901, le simulazioni numeriche sono state condotte utilizzando anche i reticoli del 1932, 2003 e 2012 considerando la medesima forzante di marea. Ciò con lo scopo di esplorare le modificazioni sulla propagazione della marea causata dalle variazioni morfologiche e dei fondali nei vari periodi storici considerati. È qui opportuno ricordare che tutti i reticoli di calcolo presentano le quote batimetriche espresse rispetto al contemporaneo medio-mare valutato esternamente alla laguna.

In Fig. 6 si riportano i livelli calcolati con il modello numerico in corrispondenza delle due aree di studio, Treporti e Valle Ca' Zane (punto Ca' Zane 1 in Fig. 4). I grafici mettono in evidenza come, col passare degli anni, l'ampiezza dell'onda di marea sia considerevolmente aumentata, ma che tale cambiamento non sia avvenuto in modo simmetrico. Dai risultati del calcolo si nota, infatti, come i livelli massimi siano aumentati in modo minore rispetto ai livelli minimi, diminuiti di un valore decisamente più consistente (Fig. 6). Questa dissimmetria ha modificato anche il livello del medio-mare locale che, nel tempo, è progressivamente diminuito.

La variazione subita dal medio-mare locale rispetto al medio-mare esterno alla laguna (ovvero il medio-mare della forzante di marea imposta come condizione al contorno) è ancor più evidente se si osservano i valori corrispondenti a diversi punti lungo la direttrice Lido -Ca' Zane per le diverse configurazioni storiche considerate. Tali valori sono riportati in Tab. I.

Tab. I - Livello del medio mare locale calcolato per i diversi punti lungo la direttrice Lido - Ca' Zane.

	Distanza	Mediomare (m)											
PUNTI	dalla bocca (m)	1887	1901	1932	2003	2012							
Bocca di Lido	0	-0.0018	-0.0023	-0.0031	-0.0032	-0.0039							
Treporti	7433	0.0406	0.0171	0.0070	0.0043	0.0034							
Motta San Lorenzo	12764	0.0468	0.0349	0.0215	0.0179	0.0170							
Palude del Bombagio	15091	0.0469	0.0360	0.0260	0.0196	0.0188							
Ca' Zane	16201	0.0469	0.0356	0.0290	0.0209	0.0201							
Valle Ca' Zane1	17613	0.0534	0.0491	0.0343	0.0210	0.0203							
Valle Ca' Zane 2	19173	0.0533	0.0490	0.0389	0.0211	0.0204							

Si osservano, ad esempio, circa 4 cm di differenza tra il mediomare alla Bocca di Lido e quello a Treporti nel 1887, quando, prima della costruzione del molo sud, le profondità del canale portuale erano talmente ridotte da produrre una importante attenuazione dell'onda di marea, e un conseguente aumento del livello del medio-mare locale a Treporti per il processo di distorsione del segnale di marea evidenziato in precedenza. Tale aumento è ancora più evidente a Valle Ca' Zane, dove il medio-mare, sempre nel 1887, è di oltre 5 cm più alto che alla bocca. Questo salto si attenua negli anni successivi al completamento delle dighe foranee a causa dell'aumento progressivo delle profondità del canale portuale nonché dei canali lagunari (Fig. 7) e della conseguente riduzione degli effetti dissipativi.

Nel tempo, quindi, il medio-mare locale decresce in tutti i pun-



Fig. 7 - Livello del medio-mare calcolato in diversi punti lungo la direttrice Lido - Ca' Zane tra il 1887 e il 2012.

ti ma la velocità di riduzione varia a seconda della posizione. Nel caso di Treporti già nel 1901 il medio-mare si è ridotto da +4 cm a meno di +2 cm rispetto al medio-mare esterno alla laguna, mentre a Valle Ca' Zane la riduzione tra il 1887 e il 1901 è quasi nulla (Fig. 8), per incrementarsi successivamente raggiungendo una velocità massima di riduzione tra il 1901 e il 1932. Nelle zone più lontane dalla bocca, la diminuzione del medio-mare locale si mantiene elevata anche successivamente, tra il 1932 e il 2003 (Fig. 8a, b), a conferma del fatto che ci sono volute varie decine di anni affinché le modifiche alla Bocca di Lido avessero un effetto importante sulla laguna interna. A Treporti, invece, dopo la rapida decrescita del medio-mare locale sperimentata tra 1887 e 1901 si nota una decrescita molto più contenuta che diviene via via trascurabile. Le lagune più recenti, 2003 e 2012, presentano ancora una differenza, sia pur ridotta rispetto alle lagune storiche, tra il medio-mare alla bocca



Fig. 8 - Andamento del medio-mare locale (a) e dell'escursione di marea (b) a Treporti (linee verdi) e in corrispondenza di Valle Ca' Zane (linee rosse) confrontato con i corrispondenti valori relativi alla bocca di Lido (linee blu).

e quello a Valle Ca' Zane, dove il valore è di circa 2 cm superiore, ma oramai la differenza è pressoché nulla tra la bocca e Treporti. Ciò a riprova del fatto che le bocche di porto attuali producono resistenze del tutto trascurabili alla propagazione della marea che pertanto entra in laguna praticamente inalterata nella forma. Nel complesso i risultati ottenuti confermano come le configurazioni storiche della laguna veneta fossero molto più dissipative rispetto alla laguna attuale.

L'andamento dell'escursione di marea negli anni (Fig. 8b) assume un comportamento opposto rispetto a quello del medio-mare, con una progressiva crescita dal 1887 al 2012, presentando anche in questo caso un aumento più rapido per quanto riguarda Treporti nel periodo 1887-1901, ed uno più attenuato nel periodo successivo. A Valle Ca' Zane l'escursione di marea invece cresce in modo pressoché lineare. Anche nel caso dell'escursione di marea, quindi, come per il medio-mare, si osserva come la costruzione delle dighe foranee abbia portato effetti diversi in diversi punti della laguna, con conseguenze a breve termine nelle zone più vicine alla bocca di porto e conseguenze più diluite nel tempo nelle zone più distanti.

I risultati ottenuti sulle modificazioni locali del livello medio del mare e dell'ampiezza di marea hanno dei riflessi diretti sull'evoluzione della quota delle singole barene la quale, secondo quanto visto in precedenza, è strettamente correlata alle variazioni delle forzanti (ampiezza di marea e tasso di incremento del medio-mare). Questi effetti sono indagati nel dettaglio nel prossimo capitolo.

## 5. Effetti sull'evoluzione delle barene

Sulla base dei risultati ottenuti con il modello idrodinamico analizzando le diverse configurazioni storiche della laguna, è ora possibile affrontare il problema dell'evoluzione temporale delle barene a Treporti e a Ca' Zane. Come illustrato in precedenza, il modello utilizzato per descrivere l'evoluzione della quota delle barene nel tempo è un modello puntuale che si limita a simulare la variazione di quota subita dalla singola barena nei diversi periodi considerati. In questo lavoro abbiamo preferito utilizzare questo modello, semplice e con pochi parametri, allo scopo di focalizzare l'attenzione sull'andamento generale delle tendenze evolutive. Le forzanti che entrano in gioco all'interno del modello sono:

- L'ampiezza dell'onda di marea, *H*, pari alla metà dell'escursione di marea, variabile nel tempo e calcolata interpolando linearmente i risultati relativi al valore locale dell'ampiezza ottenuti con il modello idrodinamico applicato alle singole configurazioni storiche considerate.
- L'incremento del medio mare relativo (R) che è dato da

$$R = R_{idro} + R_{eus} + R_{sub} + R_{sub\_antr}$$
(5)

somma di diverse componenti quali: 1) la componente legata agli effetti idrodinamici valutati con il modello idrodinamico così come descritto in precedenza,  $R_{idra}$ , e calcolata sulla base della variazione del medio-mare locale nelle diverse configurazioni storiche considerate ( $R_{idea}$  corrisponde alla pendenza delle curve riportate in Fig. 8a); 2) la componente dovuta all'eustatismo, ovvero alla crescita globale del livello medio del mare,  $R_{\rm m}$ , ottenuta dai valori tratti da bibliografia per l'Alto Adriatico e pari a 1.13 mm/anno [14], [15], [16]; questo valore è in linea con l'andamento del livello medio del mare nella vicina Trieste dove, per la conformazione naturale del territorio roccioso, si possono ottenere risultati depurati dall'effetto della subsidenza ([17], [18]) che si avvicinano al solo valore eustatico; 3) la componente dovuta alla subsidenza naturale,  $R_{uk}$ , è stata recentemente stimata ([19], [20]) sulla base di dati rilevati dal satellite TerraSAR-X e relativi a riflettori artificiali che hanno misurato un abbassamento di circa

151

1 mm/anno a Treporti e di circa 5 mm/anno in barene vicine a Valle Ca' Zane; 4) la componente della subsidenza antropica, dovuta in particolare agli emungimenti delle falde acquifere nel periodo del boom industriale che coinvolse il polo di Marghera nel Novecento, soprattutto dal 1950 al 1970, definita  $R_{sub\_antr}$ , è stata ritenuta trascurabile per le nostre aree di studio sulla base dei risultati di studi modellistici [21].

• L'apporto organico e inorganico rappresentato rispettivamente dai coefficienti  $\gamma_0$ , assunto costante [13] e pari a 0.0015 m/anno, e  $\alpha_T$ , coefficiente di apporto inorganico dipendente dalla concentrazione di sedimenti locale, C<sub>0</sub>, che viene assunto variabile tra 10 mg/l e 70 mg/l a seconda del luogo e del periodo storico come verrà meglio specificato nel seguito.

Una volta descritte le forzanti, ipotizziamo di seguire dapprima l'evoluzione di un punto posizionato su una barena a Valle Ca' Zane. La quota iniziale imposta al modello è la quota di equilibrio raggiunta nel 1887, calcolata ipotizzando un valore di R dato dalla somma di 1)  $R_{iden} = 0$ , che equivale ad assumere che la condizione idrodinamica valutata per il 1887 fosse stabile da un periodo di tempo sufficientemente lungo, 2)  $R_{exc} = 0.5$  mm/anno cioè la metà del valore assunto da letteratura per il XX secolo, supponendo cioè che nell'800 la crescita del livello medio del mare fosse più contenuta [2], 3)  $R_{sub} = 5 \text{ mm/}$ anno. Per la definizione di  $\alpha_{\tau}$  consideriamo tre valori per la concentrazione di sedimenti  $C_o$ , ovvero 50 mg/l, 60mg/l e 70 mg/l, valori piuttosto elevati assunti alla luce della presenza delle arelle in grado di trattenere all'interno della valle tutti i sedimenti risospesi dal moto ondoso da vento o introdotti dal bacino scolante (Fig. 1e). Con tali assunzioni si ottiene un valore della quota iniziale della barena molto bassa, compresa tra 0.05 e 0.07 m s.m.m., in linea con i valori ridotti di ampiezza di marea che caratterizzano l'area di valle Ca' Zane in quegli anni.

Con lo scopo di capire quali variazioni delle forzanti debbano essere introdotte per spiegare la scomparsa delle barene tra il 1901 e il 1932 si sono effettuate diverse simulazioni. Malgrado la quota iniziale di equilibrio delle barene sia molto bassa, se si mantiene nelle simulazioni la concentrazione di sedimenti nell'intervallo 50-70mg/l, i risultati del calcolo mostrano che le barene sarebbero so-



Fig. 9 - (a, b) Andamento della quota della barena a Valle Ca' Zane per diversi valori della concentrazione di sedimenti locale,  $C_{o}$ , e con una riduzione degli stessi per effetto della rimozioni delle arelle pari a  $\Delta C$ = -20 mg/l (a) e  $\Delta C$ = -30 mg/l (b) a partire dal 1901. (c, d) Andamento della quota della barena Treporti (San Felice) per diversi valori della concentrazione di sedimenti locale,  $C_{o}$ , considerato costante nel tempo (c) e con un incremento degli stessi imputabile al disfacimento delle barene più interne pari a  $\Delta C$ = +10 mg/l (d) nel periodo 1901-1932.

pravvissute ed esisterebbero ancora oggi (risultati non mostrati per limiti di spazio). La scomparsa delle barene di Ca' Zane è quindi necessariamente legata alla diminuzione dei sedimenti disponibili, evento legato a nostro parere alla rimozione delle *arelle*, avvenuta nel 1910 a seguito di danneggiamenti che le avevano rese inefficaci giá dagli inizi del secolo. Tale rimozione avrebbe ridotto la capacità della valle di mantenere al proprio interno i sedimenti risospesi o

immessi dal bacino scolante. Per verificare tale ipotesi, i tre valori iniziali di  $C_{a}$  per i quali è stato condotto il calcolo sono stati ridotti di un fattore  $\Delta C$  a partire dal 1901, anno in cui, convenzionalmente, si è deciso di assumere l'inefficacia delle arelle. In Fig. 9a,b si riportano i risultati per valori  $\Delta C = -20 \text{ mg/l}$  (Fig. 9a) e  $\Delta C = -30$ mg/l (Fig. 9b). Si nota come la quota della barena nel periodo 1901-1932 si avvicini alla quota del livello medio del mare (linea blu) e addirittura nel caso C<sub>0</sub>= 50 mg/l e  $\Delta$ C= -30 mg/l (linea rossa in Fig. 9b) si spinga al disotto della quota del livello medio del mare, situazione che corrisponde alla scomparsa della barena. Le poche barene sopravvissute avevano probabilmente una quota iniziale leggermente più elevata oppure si trovavano in un punto con maggiore apporto di sedimenti (Fig. 9a), e pertanto, malgrado un'iniziale perdita di quota, dal 1932 in poi si sono avvantaggiate degli effetti "benefici" di decrescita del medio-mare locale dovuti alla costruzione dei moli alla bocca di Lido, effetti riprodotti nel grafico dall'evidente recupero di quota delle barene rispetto al medio mare successivamente al 1932.

Per quanto riguarda le barene situate nella zona di Treporti, ripetendo il procedimento seguito per valle Ca' Zane, le condizioni iniziali sono state calcolate assumendo: 1)  $R_{idro}$  =0; 2)  $R_{eus}$  = 0.5 mm/anno; 3)  $R_{sub}$  = 1 mm/anno; 4) valori iniziali di  $C_o$  più contenuti, pari a 10 mg/l e 20 mg/l, rappresentativi [22] di una porzione di laguna meno protetta. Tali valori forniscono una quota iniziale di equilibrio di circa 0.25 m s.m.m., coerente con valori di ampiezza di marea locale decisamente maggiori rispetto a Valle Ca' Zane.

Nuovamente, si è calcolata l'evoluzione della quota della barena utilizzando il modello puntuale a partire dalla quota iniziale di equilibrio e considerando le variazioni delle forzanti esterne dedotte dal modello idrodinamico. Come si vede in Fig. 9c la barena in area Treporti tra il 1887 e il 1901 incrementa la propria quota rispetto al livello del medio-mare, a causa dell'abbassamento relativo di quest'ultimo legato al contributo di  $R_{idro}$ , per poi crescere fino ai giorni nostri in modo proporzionale con l'incremento del medio-mare.

Ipotizzando un incremento dei sedimenti sospesi prodotto dalla rimozione delle *arelle* nel 1901 e dal conseguente disfacimento delle barene più interne della laguna testimoniato in modo evidente dalle mappe storiche, si simula anche il caso in cui questi sedimenti, trasportati dalle correnti di marea lungo i canali lagunari e verso la bocca, possano aver raggiunto l'area di Treporti producendo un temporaneo aumento della concentrazione di sedimenti disponibili. Si è assunto di riprodurre l'effetto di tale incremento sommando a  $C_0$  un valore  $\Delta C$ = +10 mg/l per il periodo 1901-1932 (Fig. 9d). In questo caso si vede come la quota della barena tenda ad incrementarsi in modo più sensibile rispetto al medio mare nel periodo 1901-1932, avvantaggiandosi dell'apporto aggiuntivo di sedimenti. Successivamente la barena conserva quasi inalterata la sua quota rispetto al medio-mare con valori intorno ai 0.35 m s.m.m in linea con le effettive quote attuali.

A valle dei risultati ottenuti appare opportuno ricordare che il modello di evoluzione della quota di barena è stato volutamente scelto per semplificare le osservazioni e limitare il numero di parametri, e pertanto non pretende di descrivere con precisione i fenomeni effettivamente avvenuti in laguna. Siffatto approccio non è infatti, per sua natura, in grado di cogliere le eterogeneità spaziali che caratterizzano, ad esempio, la concentrazione di solidi in sospensione anche all'interno di una stessa barena. E anche per questo motivo che si è scelto di considerare, nel calcolo, un intervallo di valori di  $C_0$  e  $\Delta C$  invece di un singolo valore, oltre ovviamente che per fornire un'indicazione sulla sensibilità del modello ai parametri stessi. In quest'ottica i risultati ottenuti vanno considerati come indicativi della tendenza evolutiva delle barene analizzate e dimostrano come, per le barene più interne (Ca' Zane), il periodo 1887-1932 sia stato un periodo di forte "stress morfologico" in cui esse hanno tendenzialmente perso quota rispetto al medio mare. Questo fenomeno può ragionevolmente spiegare la loro scomparsa, avvenuta in pochissimi anni ed in modo definitivo, come testimoniato dalle mappe storiche. Al contrario, le barene più prossime alla bocca (in località Treporti) hanno "guadagnato" quota rispetto al medio mare, avvantaggiate delle modificazioni idrodinamiche indotte dagli interventi antropici e da una maggiore stabilità dei suoli in termini di subsidenza, mantenendosi fino ai giorni nostri.

# 6. Conclusioni

Gli effetti dell'azione antropica sull'ambiente sono difficilmente prevedibili e a volte persino contro intuitivi. Il nostro studio dimostra come, in laguna di Venezia, le zone di barena molto vicine alla Bocca di Lido, dove l'uomo è intervenuto pesantemente nel periodo 1882-1892 con la costruzione dei moli, abbiano tratto "vantaggio" dalle modificazioni idrodinamiche indotte da tale intervento. Proprio la vicinanza alla Bocca di Lido, dove sono state eseguite le opere idrauliche, potrebbe in un primo momento far pensare ad un effetto negativo per le barene prospicenti Treporti, soggette ad un cambiamento repentino dell'idrodinamica lagunare. Al contrario, in questo caso è proprio il cambiamento notevole e repentino del livello del medio mare causato dalle modifiche antropiche che dà vita alla prima importante fase positiva per l'evoluzione delle barene vicine alla bocca, aumentandone la quota rispetto al medio-mare locale. Un secondo contributo positivo arriva pochi anni dopo, tra il 1901 al 1932, periodo in cui si suppone che, a seguito della rimozione delle arelle nella zona di Valle Ca' Zane e al conseguente rapido disfacimento di vaste porzioni di barena in tale area (testimoniato in modo chiaro dalle mappe storiche), grandi quantità di sedimenti liberati dalla Valle siano stati trasportati verso la bocca e resi disponibili per la sedimentazione sulle barene situate tra la valle stessa e la Bocca di Lido. Questa disponibilità avrebbe ulteriormente contribuito alla crescita verticale delle barene esistenti lungo la direttrice che da Valle Ca' Zane porta alla Bocca di Lido, incluse quelle in località Treporti.

Al contrario, per le barene che circondavano Valle Ca' Zane, la rimozione delle *arelle* ha prodotto un impatto decisamente negativo: se prima i sedimenti trattenuti all'interno della valle contribuivano in modo vitale alla crescita verticale dei suoli barenali garantendone la sopravvivenza, la rimozione delle *arelle* ha comportato una diminuzione repentina della concentrazione di sedimenti a disposizione. Inoltre, per queste barene lontane dalla bocca, gli effetti positivi legati alla diminuzione del medio-mare indotto dalla costruzione dei moli si sono fatti sentire più tardi e in modo molto ridotto rispetto a quelli negativi causati dalla rimozione delle arelle. Le barene di Ca' Zane, caratterizzate da una quota di equilibrio estremamente bassa e da una subsidenza naturale elevata, non sono state in grado di contrastare l'aumento naturale del livello del mare, scomparendo in pochi anni. Le simulazioni dimostrano che se queste barene fossero riuscite a superare la fase di crisi avvenuta tra il 1901 e il 1932, si sarebbero probabilmente salvate, godendo di una successiva fase di crescita legata proprio al ritardo con cui gli effetti della costruzione dei moli alla Bocca di Lido raggiungono queste zone più interne della laguna.

Decine di studi recenti mirano a descrivere gli effetti dell'aumento del livello del mare sulle barene del mondo, facendo previsioni a breve e lungo termine. Quasi sempre, però, questi studi non tengono in considerazione la variabilità temporale e spaziale delle forzanti idrodinamiche, né, tanto meno, gli effetti che le modificazioni, anche piccole, della circolazione possono avere sulla morfologia. Questo studio rivela in modo quantitativo quanto le modificazioni all'idrodinamica indotte da interventi antrocipi possa giocare un ruolo fondamentale nella sopravvivenza, o al contrario nella scomparsa, delle barene, ruolo non sempre facilmente prevedibile a priori e che non va assolutamente sottovalutato.

# 7. Bibliografia

- [1] D'Alpaos, L. Fatti e Misfatti di Idraulica Lagunare. La Laguna di Venezia dalla diversione di fiumi alle nuove opere alle bocche di porto. *Istituto Veneto di Lettere ed Arti*, (2010a).
- [2] D'Alpaos, L. L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche. *Comune di Venezia Istituzione Centro Previsioni e Segnalazione Maree Legge speciale per Venezia*, (2010b).
- [3] Carniello, L., A. Defina and L. D'Alpaos. Morphological evolution of the Venice Lagoon: evidence from the past and trend for the future, J. Geophys. Res. – Earth Surface, 114, F04002, doi:10.1029/2008JF001157, (2009).
- [4] D'Alpaos, L., Defina, A. Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon. In *Compu*ters & Geosciences, 33, 476-496, (2007).
- [5] Carniello, L., A. Defina, S. Fagherazzi and L. D'Alpaos. A combined wind wavetidal model for the Venice lagoon, Italy. *Journal of Geophysical Research – Earth Surface*, 110, F04007, doi:10.1029/2004JF000232, (2005).
- [6] Carniello, L., A. D'Alpaos and A. Defina, Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, doi:10.1016/j. ecss.2011.01.001, (2011).
- [7] Mariotti, G., S. Fagherazzi, P. L. Wiberg, K. J. McGlathery, L. Carniello and A. De-

fina, Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes, J. Geophys. Res. - Oceans, 115, C11012, doi:10.1029/2009JC005892, (2010).

- [8] Defina, A.:Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas. Water Resources Research, Vol. 36, 11, 3251-3264, (2000).
- [9] D'Alpaos, L., Defina, A., Modellazione matematica del comportamento idrodinamico delle zone di barena solcate da una rete di canali minori. *Istituto Veneto di SS.LL.AA., Rapporti e studi, Vol. XII*, 353-372, (1995).
- [10] D'Alpaos, A., Mudd, S.M., Carniello, L. Dynamic response of marshes to perturbations in suspended sediment concentrations and rates of relative sea level rise. In *Journal of Geophysical Research*, 116, F04020, (2011).
- [11] Marani, M., A. D'Alpaos, S. Lanzoni, L. Carniello, and A. Rinaldo, The importance of being coupled: Stable states and catastrophic shifts in tidal biomorphodynamics, *J. Geophys. Res.*, 115, F04004, doi:10.1029/2009JF001600, (2010).
- [12] Silvestri S., A. Defina, M. Marani, Tidal regime, salinity and salt-marsh plant zonation, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, vol. 62 no. 119-130 (ISSN: 0272-7714, (2005).
- [13] Roner, M., D'Alpaos, A., Ghinassi , M., Marani, M., Silvestri, S., Franceschinis, E., Realdon, N. Spatial variation of salt-marsh organic and inorganic deposition and organic carbon accumulation: Inferences from the Venice Iagoon, Italy. In *Advances in Water Resources*, 93(B), 276-287, (2016).
- [14] Tsimplis, M.N., Raicich, F., Fenoglio-Marc, L., Shaw, A.G.P., Marcos, M., Somot, S., Bergamasco, A. Recent developments in understanding sea level rise at the Adriatic coasts. In *Physics and Chemistry of the Earth*. Elsevier, (2009).
- [15] Carbognin L., Taroni G. "Eustatismo a Venezia e Trieste nell'ultimo secolo", Atti Istituto Veneto SS.LL.AA., Classe di Scienze Fis., Mat. e Nat., Venezia: Tomo CLIV, 281-298, (1996).
- [16] Day, J.W. Jr., Rismondo, A., Scarton, F., Are, D. & Cecconi, G. Relative sea level rise and Venice lagoon wetlands. In *Journal of Coastal Conservation 4: 27-34*, (1998).
- [17] Scortegana, U. La Laguna di Venezia: genesi ed evoluzione. Assessorato Ambiente-Osservatorio Naturalistico della Laguna. Centro Studi Riviera del Brenta, 2008-2009.
- [18] Battistin, D., e P. Canestrelli, 1872-2004 La serie storica delle maree a Venezia, 208 pp., Grafiche Veneziane, Venice, Italy, (2006).
- [19] Bortolami, G., Carbognin, L., Gatto, P. The Natural Subsidence in the Lagoon of Venice. In *Land Subsidence*, IAHS ,151, 777-788, (1984).
- [20] Strozzi, T., Teatini, P., Tosi, L., Wegmüller, U., Werner, C. Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors. In *Journal of Geophysical Research*. Earth Surface, 118, 1177-1191, (2013).
- [21] Teatini, P., Gambolati, G., Tosi, L. A new three-dimensional non- linear model of the subsidence at Venice. In Land Subsidence (Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague), (1995).
- [22] Venier, C., A. D'Alpaos, and M. Marani, Evaluation of sediment properties using wind and turbidity observations in the shallow tidal areas of the Venice lagoon, *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, 119, 1604-1616, doi:10.1002/2013JF003019, (2014).

# RECENTI VARIAZIONI DELLA PROPAGAZIONE DELLA MAREA IN LAGUNA DI VENEZIA: EFFETTI INDOTTI DAL-LE OPERE FISSE ALLE BOCCHE DI PORTO

Bruno Matticchio\*, Luca Carniello\*\*, Devis Canesso\*, Elena Ziggiotto\*\*, Marco Cordella\*\*\*

# 1. Introduzione

La laguna di Venezia è la più ampia laguna del Mediterraneo con una superficie di circa 550 km<sup>2</sup>, dei quali circa 130 km<sup>2</sup> sono costituiti da isole e terre emerse e i restanti 420 km<sup>2</sup> da specchi d'acqua. Essa è posta nella parte settentrionale del mare Adriatico, al quale è collegata mediante tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia), ed è caratterizzata da profondità decisamente ridotte (mediamente di circa 1 m se si escludono i canali) e da una morfologia molto articolata.

Il regime delle maree nell'Alto Adriatico è caratterizzato da escursioni che raggiungono valori dell'ordine di 1 m e che sono tra le più ampie del Mediterraneo. Gli specchi d'acqua lagunari seguono le oscillazioni del mare antistante, con un andamento che si differenzia nel bacino secondo complesse dinamiche tipiche dei sistemi tidali poco profondi [1].

La propagazione della marea all'interno della laguna è condizionata da molteplici fattori, che vanno dalla conformazione delle bocche di porto alla morfologia delle tipiche forme lagunari (canali, bassifondi, barene, velme, ecc.). Procedendo dalle bocche verso l'interno della laguna, il segnale che descrive l'oscillazione della superficie libera modifica la sua ampiezza e la sua forma, subendo nel contempo un

<sup>\*</sup> Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l., Padova.

<sup>\*\*</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (ICEA), Università degli Studi di Padova.

<sup>\*\*\*</sup> ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Servizio Laguna di Venezia.

progressivo ritardo di fase. Queste trasformazioni giocano un ruolo primario sulla circolazione delle correnti lagunari, poiché le correnti stesse sono principalmente governate dai dislivelli istantanei che si generano tra un punto e l'altro della laguna. Piccole variazioni dei dislivelli istantanei possono modificare sensibilmente l'intensità e la direzione delle correnti interne alla laguna e possono influenzare la posizione dei cosiddetti "partiacque" ossia delle fasce che, in prima approssimazione, rappresentano i limiti dei sotto-bacini afferenti a ciascuna delle tre bocche di porto [2].

Le significative trasformazioni subite dalla laguna ad opera dell'uomo nel corso dei secoli hanno modificato in modo non trascurabile il locale regime delle maree. Tra gli interventi più significativi sono da menzionare la costruzione delle dighe foranee alle bocche di porto e la riduzione della superficie degli specchi d'acqua aperti alla libera espansione delle maree mediante la perimetrazione delle valli da pesca. Nel corso del secolo scorso, particolarmente rilevanti sono stati anche gli effetti dello scavo dei grandi canali navigabili. Primo fra essi il canale Vittorio Emanuele (1920-1925), realizzato per collegare il polo industriale di Porto Marghera al canale della Giudecca e quindi direttamente al mare e, successivamente, il cosiddetto "Canale dei Petroli" (1964-1968) che collega la stessa Zona industriale di Porto Marghera con la Bocca di Malamocco.

Le dinamiche mareali sono state influenzate anche dalle variazioni morfologiche che la laguna ha subito nel tempo (in particolare la riduzione della superfice delle barene e l'interrimento di molti canali), in parte dovute ai naturali processi evolutivi tipici degli ambienti lagunari, ma in gran parte innescate dagli interventi antropici stessi [3] [4] [5].

Le variazioni nel tempo dell'idrodinamica lagunare sono state analizzate nel dettaglio in alcuni recenti studi in cui, mediante modelli matematici, è stata ricostruita l'evoluzione della morfologia lagunare a partire dall'inizio del 1800 e fino ai giorni nostri [5]. Altri lavori hanno analizzato, pur se limitatamente a epoche più recenti, i medesimi aspetti sulla base delle registrazioni dell'andamento della marea in laguna [4] [6] [8].

In questo lavoro si evidenziano alcune non trascurabili variazioni intervenute negli ultimi anni sulla propagazione delle maree, che posso-

no essere ricondotte agli interventi realizzati alle tre bocche di porto per l'installazione delle paratoie mobili (Progetto Mo.S.E.) che, una volta ultimate, dovranno proteggere dalle "acque alte" la città di Venezia e gli altri centri urbani presenti in laguna. Le opere che sono state realizzate hanno comportato infatti la modifica della configurazione degli accessi alla laguna e, conseguentemente, del locale assetto delle correnti di marea e delle resistenze idrauliche che le correnti incontrano nel superamento di ciascuna bocca. Sono significativi, al riguardo, la realizzazione delle dighe curvilinee all'esterno (le cosiddette "lunate") ma soprattutto il restringimento della sezione delle bocche per la realizzazione delle spalle del Mo.S.E. e dei porti rifugio con annesse conche di navigazione. In particolare la larghezza minima della Bocca di Malamocco è passata da 450 m nella configurazione antecedente all'inizio dei lavori a 375 m attuali (riduzione del 17%). Per la Bocca di Chioggia la larghezza minima è variata da 485 m a 360 m (riduzione del 26%). Infine, la costruzione dell'isola al centro della Bocca di Lido ha comportato per tale bocca la creazione di due varchi di larghezza pari a 400 m e 415 m al posto di un unico varco che, nel punto più stretto, misurava 890 m (riduzione dell'8%). L'entità non trascurabile dei restringimenti risulta evidente osservando la Fig. 1 in cui è riportata una sequenza di foto aeree che documenta le variazioni conseguenti alla realizzazione dei lavori che hanno interessato le tre bocche, iniziati formalmente il 14 maggio 2003 con la posa della prima pietra.

Il presente lavoro è organizzato come segue. Il paragrafo 2 descrive il complesso dei dati mareografici che sono stati acquisiti ed elaborati e si illustrano i metodi e modelli utilizzati per l'analisi. Il paragrafo 3 illustra i risultati di alcune valutazioni condotte analizzando le costanti armoniche, che costituiscono la componente astronomica della marea registrata nelle stazioni mareografiche presenti in laguna. Nel paragrafo 4 sono illustrate le analisi condotte sul segnale di marea direttamente registrato (somma di contributo astronomico e meteorologico) in alcune delle stazioni considerate e che confermano i riscontri ottenuti dall'analisi delle costanti armoniche. Nel paragrafo 5 si illustrano, infine, i risultati di un'indagine condotta con l'ausilio di un modello matematico bidimensionale, volta ad evidenziare alcune possibili conseguenze che le variazioni delle dinamiche mareali possono comportare sull'idrodinamica lagunare.



Fig. 1 - Restringimento della sezione delle bocche di porto dovuto alla realizzazione del Mo.S.E. (foto aeree georeferenziate tratte dal GeoPortale Nazionale del Ministero dell'Ambiente http://www.pcn.minambiente.it/GN/).

# 2. Metodi e modelli

Le valutazioni che si espongono nei paragrafi seguenti sono basate principalmente sull'analisi dell'ampio database di registrazioni mareografiche disponibile per la laguna di Venezia. Le prime osservazioni mareografiche sistematiche iniziarono nella città di Venezia già nel 1871 per opera del Genio Civile e dell'Istituto Geografico Militare. Successivamente, dopo la ricostituzione del Magistrato alle Acque (1907), venne istituito il Servizio Mareografico con il compito specifico di provvedere alla raccolta dei dati di marea in laguna e lungo il litorale Nord-Adriatico. Attualmente la maggior parte delle stazioni mareografiche lagunari è gestita da ISPRA, Servizio Laguna di Venezia, che dispone di una rete di 52 stazioni meteo-mareografiche distribuite all'interno del bacino lagunare e lungo il litorale. Alcune stazioni aggiuntive sono invece gestite dal Comune di Venezia, Centro Previsioni e Segnalazioni Maree. Le registrazioni mareografiche, soggette a periodiche procedure di validazione e controllo, sono generalmente rese disponibili come serie temporali a passo temporale di 10 minuti e sensibilità di 1 cm.

Insieme a CNR-ISMAR e Comune di Venezia il Servizio Laguna di Venezia di ISPRA provvede anche all'elaborazione delle previsioni mareografiche per le stazioni più significative, sia nel breve termine, utilizzando modelli che forniscono la previsione con anticipo massimo di alcuni giorni, sia nel lungo termine, elaborando le tavole annuali di marea. In quest'ultimo caso la previsione riguarda la marea astronomica, ossia la componente dell'oscillazione mareale che è determinata dall'attrazione luni-solare, senza considerare le altre componenti che a questa si sovrappongono di giorno in giorno e che sono legate alle perturbazioni atmosferiche, alle oscillazioni del livello del mare Adriatico e alle variazioni di lungo periodo del livello medio del mare.

In questo studio sono considerati i dati mareografici del periodo 1994-2015 relativi a 21 stazioni distribuite in laguna e alle bocche di porto. Le stazioni selezionate sono quelle che dispongono delle più complete serie di dati validati ed in particolare dei dati relativi all'ultimo decennio, che è quello di interesse per la presente indagine. Sono stati considerati, inoltre, i dati della Piattaforma Oceanografica Acqua Alta, situata in Adriatico circa 15 km al largo del litorale veneziano, che sono stati resi disponibili dal Centro Maree del Comune di Venezia (Fig. 2).

Per il calcolo della marea astronomica è stato utilizzato il codice POLIFEMO [9] sviluppato presso ISMAR-CNR. Il programma elabora la serie dei livelli misurati per determinare le costanti armoniche che compongono la marea astronomica. Quest'ultima è espressa nella forma:

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{N} A_n \cos(\sigma_n t - \kappa_n)$$

in cui y(t) è l'altezza di marea al tempo t,  $A_n$ ,  $\sigma_n$ ,  $\kappa_n$ , sono, rispettivamente, l'ampiezza, la velocità angolare e il ritardo di fase della singola componente,  $A_0$  è il valore medio del livello del mare. Nel calcolo, le velocità angolari  $\sigma_n$ , che dipendono dal periodo dei moti celesti, sono assunte come costanti note. L'ampiezza e la fase di ciascu-

#### RECENTI VARIAZIONI DELLA PROPAGAZIONE DELLA MAREA 163

#### 162 B. MATTICCHIO, L. CARNIELLO, D. CANESSO, E. ZIGGIOTTO, M. CORDELLA

na componente sono invece determinate dal programma elaborando le serie storiche delle altezze di marea e ricercando la migliore approssimazione tra le osservazioni e la funzione teorica mediante il metodo dei minimi quadrati [10].

Nel caso dell'Adriatico e della laguna di Venezia, sono sufficienti otto componenti armoniche per il calcolo pratico della marea astronomica con la precisione del centimetro. Le varie componenti, quattro con periodicità semidiurna e quattro con periodicità diurna, sono individuate con una sigla, legata alla loro origine astronomica: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, S1 [11].

Il ritardo di fase  $\kappa_n$  che, in generale, rappresenta il ritardo del massimo di marea rispetto al passaggio della luna, o dell'astro di riferimento, sul meridiano della località considerata, può essere calcolato secondo diverse convenzioni. Nel codice di calcolo utilizzato i ritardi di fase sono calcolati rispetto ad uno zero temporale fissato all'inizio dell'anno 1900, e sono poi corretti per essere allineati temporalmente con l'anno in corso. A tale riguardo, una caratteristica importante del codice POLIFEMO è la capacità di tener conto delle variazioni di lungo periodo delle costanti armoniche, legate alle periodicità del moto degli astri [10].

Le simulazioni idrodinamiche sono state condotte utilizzando il modello 2DEF, sviluppato dai ricercatori del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova [12] [13] [14]. Tale strumento modellistico costituisce il risultato di un'esperienza più che quarantennale nello studio dell'idrodinamica lagunare ed è tuttora impiegato e aggiornato dal medesimo gruppo di ricerca per condurre indagini sui processi idro-morfodinamici che caratterizzano la laguna di Venezia [15] [16] [17] [18].

Il modello è basato su di uno schema numerico uni-bidimensionale agli elementi finiti che risolve le equazioni differenziali del moto di una corrente a superficie libera su bassi fondali, formulate in modo da poter essere applicate anche ad aree parzialmente asciutte o che possono essere allagate o prosciugate durante l'evoluzione del fenomeno indagato [13] [14] [19].

Nel presente lavoro il modello idrodinamico è stato utilizzato per simulare la propagazione della marea all'interno della laguna considerando due diverse configurazioni delle tre bocche di porto: quel-



Fig. 2 - Mappa delle stazioni della rete mareografica di ISPRA e del Centro Maree del Comune di Venezia considerate nell'analisi.

la antecedente alla costruzione delle opere fisse del progetto Mo.S.E (scenario 2003) e quella successiva al completamento di tali opere (scenario 2012).

## 3. Variazioni di ampiezza e ritardo della marea astronomica

In condizioni atmosferiche non perturbate, quando la circolazione è influenzata solo dall'azione della marea, la Laguna di Venezia può essere considerata come composta da tre bacini che, dal punto di vista idrodinamico, sono quasi indipendenti. Ciascun bacino è collegato con il mare attraverso una delle tre bocche di porto (Lido, Malamocco e Chioggia) ed è separato dal bacino adiacente da una zona in cui le correnti sono quasi assenti e che può essere identificata come fascia di "partiacque". L'oscillazione della marea in Adriatico si propaga dalle bocche verso i margini di ciascun bacino subendo delle modificazioni

legate alla dinamica delle correnti nei canali e sui bassifondi lagunari. In particolare, negli specchi d'acqua interni, il segnale presenta una variazione di ampiezza (generalmente una riduzione) e un ritardo rispetto al segnale in mare aperto [1].

L'analisi della marea astronomica consente di valutare delle condizioni di riferimento non influenzate dagli effetti delle perturbazioni meteorologiche. Queste ultime, infatti, possono modificare in modo molto rilevante sia l'oscillazione del livello in Adriatico, sia i livelli sia le correnti lagunari, al punto che, in particolari condizioni di vento, la suddivisione tra i tre sotto-bacini può modificarsi sostanzialmente [5] [16]. Tuttavia le perturbazioni atmosferiche producono effetti che sono limitati nel tempo e che non modificano in modo rilevante le caratteristiche medie dell'idrodinamica lagunare nell'arco dell'anno, le quali sono sostanzialmente governate dalla forzante astronomica.

Per la valutazione delle variazioni di ampiezza e del ritardo di propagazione della marea che si sono verificati nel corso degli anni nelle diverse stazioni lagunari è perciò opportuno riferirsi alla marea astronomica [4] [6] [20].

A tale scopo sono state prese in considerazione 21 stazioni ubicate all'interno della laguna (Fig. 2). Si tratta di alcune delle stazioni della rete ISPRA, Servizio Laguna di Venezia, per le quali la serie dei livelli misurati è sostanzialmente completa nel periodo 1994-2015 e i dati che ne fanno parte sono stati sottoposti alle procedure di validazione e pubblicati [21]. La distribuzione delle stazioni considerate copre diffusamente la laguna settentrionale, a Nord della città di Venezia. Non sono molte, invece, le stazioni disponibili nel bacino centrale e nella laguna Sud. Purtroppo per le altre stazioni esistenti si è riscontrata una disponibilità di dati validati insufficiente per le elaborazioni, in particolare per gli ultimi anni, che sono quelli di maggiore interesse per la presente indagine.

Per ampliare ulteriormente la serie di dati e, soprattutto, a scopo di verifica, sono state considerate anche tre stazioni della rete del Centro Previsione e Segnalazione Maree del Comune di Venezia (Malamocco Porto, Misericordia e Fusina, Fig. 2) che dispongono anch'esse di registrazioni continue, limitate peraltro agli anni più recenti.

È stata, infine, considerata la serie dei livelli misurati presso la Piattaforma Acqua Alta del CNR-ISMAR, acquisita dal sensore del Centro Maree del Comune di Venezia e disponibile per tutto il periodo considerato.

Per ciascun anno di registrazione e per ciascuna stazione, sono state determinate, mediante il software POLIFEMO, le ampiezze e i ritardi di fase delle 7 componenti principali della marea astronomica, (M2, S2, N2, K2 con periodicità semidiurna e K1, O1, P1 con periodicità diurna). È stato trascurato l'effetto dell'ottava componente diurna S1 che, in termini pratici, ha una modestissima influenza sulla determinazione dell'altezza di marea e le cui variazioni di anno in anno sono minime.

La valutazione dei valori "medi annuali" dell'ampiezza e del ritardo di fase di ciascuna stazione è stata ottenuta con un procedimento analogo a quello adottato in precedenti indagini [4] [6] [7]. L'ampiezza complessiva è stata, cioè, ottenuta sommando le ampiezze delle singole componenti. Diversamente dagli studi citati, in questo caso nella somma sono state considerate tutte e 7 le componenti astronomiche e non solo quelle più importanti M2 e S2.

Per quanto riguarda il ritardo, in analogia con i criteri seguiti nei lavori citati, sono stati calcolati i singoli ritardi di fase, in gradi, delle 7 componenti. Essendo note le velocità angolari di ciascuna componente, i ritardi di fase sono stati convertiti da gradi in minuti e trasformati in ritardi relativi operandone la differenza rispetto ai corrispondenti valori determinati per la stazione in mare aperto (Piattaforma). Infine, il ritardo complessivo per la generica stazione in un certo anno è stato ottenuto calcolando la media dei ritardi di ogni componente pesata rispetto all'ampiezza di ciascuna di esse.

I risultati ottenuti, in termini di ampiezza complessiva e ritardo complessivo sono riportati rispettivamente in Tab. I e Tab. II, e rappresentati graficamente in Fig. 3 e Fig. 4.

Per quanto riguarda l'ampiezza, le curve di Fig. 3 mettono in evidenza una tendenza che, nonostante le oscillazioni che si riscontrano tra anno e anno, sembra essere abbastanza ben delineata. Si osserva infatti che, mentre nel periodo 1994-2004 l'ampiezza si è mantenuta sostanzialmente stabile o ha seguito una leggera crescita, negli anni successivi al 2004 in quasi tutte le stazioni essa si è progressivamente ridotta. Si osserva che da questa tendenza si discostano, oltre che alcune stazioni periferiche (in particolare Cavallino Centro), tutte le stazioni esterne alla

Tab. I - Variazione dell'ampiezza complessiva della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

Somma	Somma delle semi-ampiezze (cm) delle componenti astronomiche in alcune stazioni della Laguna di Venezia dal 1994 al 2015															)15						
Anno	BU	CH	CN	CV	DS	FR	FU	GB	LS	MA	ME	MI	MP	MU	NM	PS	PT	SC	SE	SN	TR	VA
1994	66.7	73.3		47.9	75.1	75.8		59.0	58.9	77.8	74.9				76.1	76.3	74.2	74.6		74.9	66.8	
1995	67.3	73.4		48.3	74.7	74.4	73.7	58.9		74.0	73.7			76.9	76.9	76.3	74.5	74.0		74.8	67.5	74.6
1996	65.4	73.2		48.8	74.1	75.0	78.3	59.4		78.8	73.2			74.3	75.8	76.6	74.0	73.9	72.6	73.9	66.8	75.1
1997	67.5	73.9		49.5	76.2	76.3	79.2	59.2		80.4	76.7			78.5	77.8	78.1	75.9	76.1		75.4	67.6	75.8
1998	67.4	73.1		48.4	74.6	75.4		57.9		77.7	73.8				76.4	76.6	75.1	74.5		75.5	66.9	
1999	67.6	72.5		48.1	74.7	75.7	78.0	58.2	58.9	77.6	73.8			74.8	76.5	76.2	74.7	74.7	73.0	75.2	67.1	74.4
2000	65.7	71.5		47.5	74.8		76.3	57.7	58.4	75.5	71.9			73.4	74.1	74.9	72.1	73.0	71.9	72.9		73.3
2001	68.7	73.9		50.7	77.1	74.8	79.1	60.7	61.5	78.0				75.8	77.6	77.4	75.4	75.2	74.3	75.5	67.5	75.5
2002	67.2	73.3		51.3	75.7	74.9	77.9	60.7	60.7	77.6				74.9	75.2	77.3	74.3	73.9	72.9			75.3
2003		73.9		52.5	76.2	75.0	78.7	60.0	60.7	78.7		75.4		75.6	76.1	78.0	74.7	74.3	73.5	75.4	67.1	75.6
2004	68.5	74.3	61.5	53.5	76.9	76.8	79.4	61.0	61.5	78.9	74.5	75.1		75.2	76.1	77.7	75.2	74.9	73.2	75.1		76.8
2005	65.4	71.7	58.3	50.8	75.2	73.5	77.2	57.4	58.9	77.5	73.2	72.0	74.2	72.0	75.1	75.9	73.9	73.4	72.3	73.3		74.3
2006	64.9	71.5		48.8	75.3	73.0	77.6	57.2	58.4	77.0		72.3	74.0	71.0	75.0	76.0	73.8	72.4	72.4	73.2		73.6
2007	64.7	71.7	58.5	49.2	76.2	73.6	77.8	57.1	58.3	77.5	74.0	72.3	74.4	71.5	74.3	75.2	74.6	74.5	72.0	73.5	62.1	73.4
2008	63.1	70.6	57.1	48.4	75.2	72.2	75.5	56.5	56.8	75.6	73.3	70.2	72.4	68.4	75.1	73.4	73.8	74.0	69.9	71.1	60.3	71.5
2009	64.1	71.3	58.9	51.2	77.4	72.0	75.7	57.9	58.0	75.7	73.7	70.5	72.3	70.4	75.3	73.2	74.7	74.4	69.8	71.6	61.4	71.9
2010	62.8	69.5	57.0	50.2	74.9	69.5		57.0	56.8	73.3	72.4	68.9	69.7	68.6	74.7	71.1	73.6	73.2	67.3	69.5	60.0	70.9
2011	63.6	70.7	56.8	48.3	75.5	70.7		55.9	56.5	75.0		70.7	71.0	69.8	76.2	72.6	74.7	74.4	69.7	71.1	60.5	72.1
2012	62.3	69.4	56.3	47.9	73.0	69.6		56.6	56.0	73.9	73.3	69.7	70.0	68.7	74.5	71.7	73.4	73.1	68.0	69.4	58.9	70.7
2013	62.4	69.2	56.9	48.4	73.5	69.2		57.2	56.2	73.3	73.2	69.3	69.8	68.5	75.0	71.2	73.5	73.4	67.7	70.9	59.4	70.9
2014	62.4	69.6	56.5	48.1	74.3	68.7		55.8	56.0	73.1	73.2	69.0	70.4	68.2	74.4	71.5	73.1	73.0	67.3	69.5	59.2	69.6
2015	62.7	71.0	56.5	48.6	75.3	70.4		56.7	56.4	75.2	74.3		71.0	70.1	75.9	72.8	74.8	74.1	69.1	71.2	58.8	71.3
media 03-05	66.9	73.3	59.9	52.3	76.1	75.1	78.4	59.5	60.4	78.4	73.9	74.2	74.2	74.3	75.8	77.2	74.6	74.2	73.0	74.6	67.1	75.6
media 13-15	62.5	69.9	56.6	48.4	74.4	69.4	-	56.6	56.2	73.9	73.6	69.1	70.4	68.9	75.1	71.8	73.8	73.5	68.0	70.5	59.1	70.6
differenza %	-6.7	-4.6	-5.5	-7.4	-2.3	-7.5	-	-4.9	-7.0	-5.8	-0.5	-6.8	-5.1	-7.2	-0.9	-7.0	-1.1	-0.9	-6.9	-5.5	-11.8	-6.6
Codice stazio	ne: BU	J: Burai	no, CH	: Chiog	ggia Vi	go, CN	: Canal	Ancor	a, CV:	Cavall	no Ce	ntro, DS	S: Diga	a sud	Lido, F	R: Far	o Roci	chetta,	FU: Fi	usina,	GB: Gr	assabo
LS: Le Saline	, MA:	Marghe	ra, ME	: Meda	bocca	- a di Lio	lo, MI:	Miserio	ordia,	MP: M	alamoc	co Port	o, MU:	Murar	no, NM	Diga	nord N	lalamo	cco, PS	: Punt	a della	Salute
PT : Piattaform	a CNR,	SC: Dig	ga sud (	Chioggi	a, SE: S	antEras	smo, SN	: San N	licolò, T	R: Tre	oorti, VA	v Valle A	verto.			ů						
Note: tutti i dat	i sono s	tati mes	isi a dis	posizior	ne da IS	PRA-S	ervizio L	aguna	di Vene	zia ad e	ccezio	ne di qu	elli evid	enziati i	in blu, fo	rniti da	CPSM	- Comu	une di Vr	enezia		

laguna, e cioè la stazione di Piattaforma e le stazioni ubicate alle bocche di porto (Lido Diga Sud, Malamocco Diga Nord, Chioggia Diga Sud, Meda bocca di Lido) per le quali, anche per gli anni successivi al 2004, le ampiezze si mantengono sostanzialmente costanti.

I dati riportati in Tab. 1 mostrano che, mediamente, le variazioni dell'ampiezza complessiva che si riscontrano nel decennio 2004-2014 nelle stazioni interne alla laguna sono dell'ordine del 5÷7%. Questo risultato si ottiene confrontando la media dei valori del triennio 2003-2005 con quella del triennio 2013-2015.

Anche i ritardi complessivi mostrano un andamento che si differenzia in modo marcato se si considerano il periodo antecedente al 2004 e quello successivo. Si osserva infatti che, dopo il 2004, i ritardi tendono in modo generalizzato ad aumentare (Fig. 4). Come nel caso delle ampiezze, questa tendenza è comune a tutte le stazioni lagunari, ma non riguarda, o riguarda in misura molto minore, le stazioni poste alle bocche di porto. Mediamente, dopo il 2004, nelle stazioni interne



Fig. 3 - Variazione dell'ampiezza complessiva della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

alla laguna il ritardo complessivo si incrementa in misura variabile tra 10 e 15 minuti, ma vi sono alcune stazioni per cui il ritardo stesso si incrementa di oltre 20 minuti (Tab. II).

Si tratta di variazioni non trascurabili che, essendo comuni alla maggior parte delle stazioni situate all'interno della laguna, ma non a quelle situate in mare, segnalano che nell'ultimo decennio vi sono stati cambiamenti in grado di influenzare la propagazione della marea dal mare verso l'interno.

Queste variazioni sembrano riconducibili ai restringimenti operati sulle sezioni delle bocche di porto dovuti alla realizzazione delle opere di supporto del Mo.S.E. (Fig. 1) iniziate nel 2003. I lavori per la realizzazione dell'opera nel suo complesso sono attualmente ancora in corso, tuttavia le cosiddette opere fisse che hanno modificato la configurazione delle bocche e che possono avere indotto un impatto sulle correnti di marea sono sostanzialmente concluse dal 2011. Tali opere comprendono le dighe curvilinee al largo delle bocche (le cosiddette "lunate"), i rialzi del fondale, le spalle dei varchi presidiati dalle paratoie mobili, le conche di navigazione, i porti rifugio (Fig. 1). Si può presumere che il restringimento delle bocche lagunari e la modifica

Tab. II - Variazione del ritardo complessivo di propagazione della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

Ritardo	di pro	opaga	zione	minut	i) delle	e comp	onen	ti astro	onomi	che in	alcun	e staz	ioni de	ella La	guna	di Ven	ezia ri	spetto	a Piat	ttaforn	na CN	R
Anno	BU	СН	CN	CV	DS	FR	FU	GB	LS	MA	ME	MI	MP	MU	NM	PS	PT	SC	SE	SN	TR	VA
1994	78.3	21.1		185.1	0.2	15.0		165.8	103.9	72.5	7.1				10.8	44.6	0.0	2.4		29.2	50.4	
1995	74.9	22.4		187.5	1.3	25.9	40.7	160.4		66.2	12.8			55.1	2.9	48.4	0.0	3.9		30.2	50.4	92.4
1996	81.3	21.4		193.5	-0.2	20.9	60.6	164.0		66.0	14.2			65.2	4.2	49.6	0.0	-0.9	46.4	32.7	51.8	97.3
1997	84.7	24.1		189.8	-1.7	20.0	43.4	174.2		56.1	5.2			58.4	-1.2	45.4	0.0	-2.0		28.0	47.4	98.5
1998	85.4	24.9		189.1	3.0	20.0		167.5		62.1	13.1				8.1	53.8	0.0	3.1		29.7	52.4	
1999	86.1	26.3		196.6	4.7	19.0	56.8	167.2	124.5	63.2	10.3			67.3	4.2	51.3	0.0	0.0	47.0	28.7	54.3	94.7
2000	80.9	21.1		191.3	-4.0		53.0	160.5	115.0	57.7	5.3			62.9	-9.9	43.4	0.0	-5.4	41.7	26.7		86.5
2001	88.2	27.1		195.2	3.5	12.0	60.4	162.0	122.1	62.4				71.2	5.4	51.1	0.0	2.9	49.6	36.1	58.6	94.7
2002	78.3	26.5		185.4	-2.9	24.9	58.2	163.0	118.8	58.8				67.1	0.9	50.1	0.0	0.6	48.1			89.9
2003		19.9		173.8	-9.9	20.7	48.7	154.5	112.4	52.8		59.2		69.5	-6.1	41.8	0.0	-7.0	39.2	26.4	50.6	84.4
2004	76.9	27.3	145.8	183.5	-3.7	22.1	51.8	159.1	120.8	69.1	1.4	64.8		73.5	-1.5	46.9	0.0	1.2	52.5	28.2		84.3
2005	84.1	32.5	154.1	183.4	4.4	28.5	53.5	160.8	114.7	66.2	7.3	65.6	31.9	72.5	-0.4	51.0	0.0	4.9	47.7	30.3		84.7
2006	88.0	32.0		187.9	-0.8	28.3	60.1	161.2	123.1	56.9		68.8	36.5	71.1	-0.5	47.5	0.0	4.2	47.1	29.0		91.0
2007	93.7	36.9	153.6	193.7	5.2	35.3	65.4	172.1	126.1	74.0	16.1	74.4	41.5	83.6	5.7	56.5	0.0	6.3	40.6	36.4	70.0	101.3
2008	94.8	37.6	155.3	194.5	6.2	37.0	67.4	169.8	133.1	73.5	13.7	75.6	44.3	84.3	2.4	56.3	0.0	5.9	56.7	33.2	72.7	108.1
2009	91.6	38.0	151.7	193.3	4.9	38.6	74.7	163.8	132.6	72.0	11.6	76.3	48.6	81.2	2.5	57.1	0.0	6.3	57.2	39.0	74.0	100.5
2010	90.7	37.9	161.0	195.2	0.3	41.8		162.7	134.2	72.1	10.9	76.5	54.5	80.4	-3.3	57.1	0.0	2.8	62.3	37.2	73.0	99.4
2011	94.7	38.7	162.1	208.2	7.1	45.2		173.4	135.7	78.5		79.0	55.4	85.7	5.3	60.6	0.0	7.9	61.8	38.7	69.9	109.6
2012	90.3	38.9	163.9	208.3	11.9	46.1		172.7	136.4	78.2	12.1	77.6	53.5	86.6	13.0	58.9	0.0	16.2	58.3	44.4	75.9	112.0
2013	95.1	36.9	159.0	202.5	8.8	44.1		170.2	134.5	76.9	10.1	77.8	51.1	83.9	5.3	60.3	0.0	5.6	58.7	45.4	79.5	112.0
2014	90.4	32.5	161.1	201.1	-0.6	38.7		164.6	132.3	75.0	6.4	73.8	44.1	78.3	1.0	56.2	0.0	2.1	56.8	40.7	74.8	108.4
2015	90.3	34.1	160.8	202.8	2.6	41.2		174.9	135.0	76.4	10.5		48.4	84.8	0.7	58.7	0.0	2.1	58.3	43.4	78.4	109.1
media 03-05	80.5	26.6	149.9	180.2	-3.1	23.8	51.3	158.1	116.0	62.7	4.3	63.2	31.9	71.8	-2.7	46.6	0.0	-0.3	46.4	28.3	50.6	84.5
media 13-15	91.9	34.5	160.3	202.2	3.6	41.4	-	169.9	133.9	76.1	9.0	75.8	47.9	82.3	2.3	58.4	0.0	3.3	57.9	43.2	77.5	109.8
differenza	11.5	7.9	10.4	21.9	6.7	17.6	-	11.8	18.0	13.4	4.7	12.6	16.0	10.5	5.0	11.8	0.0	3.6	11.5	14.9	27.0	25.4
Codice stazio	ne: BU	J: Bura	no, CH	: Chiog	igia Viç	jo, CN	Cana	Ancor	a, CV:	Cavall	no Cei	ntro, DS	S: Diga	a sud	Lido, F	R: Far	o Roci	chetta,	FU: Fi	usina, (	GB: Gr	assabò
LS: Le Saline	, MA:	Marghe	era, ME	Meda	bocca	a di Lid	lo, MI:	Miserio	ordia,	MP: M	alamoc	co Port	o, MU:	Murar	no, NM	: Diga	nord N	lalamo	cco, PS	3: Punta	a della	Salute
PT: Piattaform	a CNR,	SC: Di	ga sud (	Chioggia	a, SE: S	anťEras	imo, SM	I: San N	licolò, T	R: Trep	oorti, VA	Valle A	werto.									
Note: tutti i dat	i sono s	tati mes	ssi a dis	posizion	e da IS	PRA-S	ervizio I	Laguna	di Vene	zia ad e	ccezio	ne di qu	elli evid	enziati i	n blu, fo	orniti dal	CPSM	- Comu	une di Ve	enezia		

della loro configurazione geometrica abbia provocato un incremento delle resistenze idrauliche che le correnti di marea incontrano nel superamento delle bocche stesse e, conseguentemente, una modificazione del segnale di marea che si traduce proprio in una riduzione di ampiezza e un incremento del ritardo di fase [22] [23].

Come si è detto, le stazioni mareografiche prese in esame non sono distribuite in modo omogeneo in tutta la laguna per cui non è possibile, in base ai dati disponibili, differenziare con la dovuta precisione gli effetti segnalati nei diversi ambiti lagunari. Tuttavia i risultati ottenuti suggeriscono che le maggiori variazioni, sia in termini di ampiezza che di ritardo di fase, si siano verificate nel Bacino di Malamocco. Questo appare abbastanza evidente se si osservano le variazioni relative alla stazione ISPRA di Faro Rocchetta (FR), che si colloca all'interno della Bocca di Malamocco, per la quale le variazioni osservate sono le massime in assoluto. In questo caso, l'affidabilità del risultato ottenuto è implicitamente confermata dal confronto con la stazione

#### RECENTI VARIAZIONI DELLA PROPAGAZIONE DELLA MAREA 169



Fig. 4 - Variazione del ritardo complessivo di propagazione della marea astronomica tra il 1994 e il 2015.

di Malamocco Porto (MP), gestita dal Comune di Venezia. Anche se la stazione del Comune dispone di dati solo per un periodo limitato, per tale periodo i risultati ottenuti per le due stazioni, che si collocano a breve distanza l'una dall'altra, sono praticamente coincidenti.

# 4. Variazioni di ampiezza e ritardo della marea reale

Le valutazioni esposte nel paragrafo precedente hanno portato a stimare le variazioni di ampiezza e ritardo di fase della marea per via indiretta, combinando opportunamente i valori che definiscono le singole componenti armoniche che costituiscono la marea astronomica. Si è perciò ritenuto opportuno completare le valutazioni suesposte mediante il calcolo diretto dell'ampiezza e del ritardo di fase in base all'analisi del segnale completo della marea, in cui sono stati preliminarmente identificati i colmi e i cavi delle oscillazioni (i cosiddetti "estremali"). Questo al fine, da una parte, di verificare il risultato ottenuto con il metodo indiretto, dall'altra di ottenere delle valutazioni su

Tab. III - Ampiezza e ritardo di fase ottenuti analizzando gli estremali relativi alla sola componente astronomica e al segnale di marea completo in alcune stazioni di Fig. 2.

	Ampiezza dell'oscillazione di marea (cm)												Ritardo rispetto al mare (minuti)									
		mare	a astron	omica		marea reale					1	marea as	tronomic	а	marea reale							
Anno	PT	FR	BU	CH	PS	PT	FR	BU	СН	PS	FR	BU	СН	PS	FR	BU	СН	PS				
1994	56.2	56.9	50.5	55.7	58.7	55.4	57.6	52.1	56.3	60.5	18.8	75.4	20.7	40.6	25.9	78.1	25.4	43.2				
1995	56.0	56.6	50.8	55.6	58.8	55.6	57.2	52.3	57.0	60.9	24.4	74.6	21.4	43.4	28.7	78.3	24.9	46.8				
1996	56.3	56.6	49.8	55.8	59.0	55.6	58.7	52.4	57.4	61.2	23.3	79.5	21.1	45.7	27.0	77.6	24.3	48.5				
1997	56.6	56.8	51.3	56.1	59.2	56.1	58.4	53.7	58.0	61.5	21.5	77.4	19.4	40.5	25.0	77.4	23.3	44.3				
1998	56.2	56.5	51.6	55.5	58.9	56.5	58.1	53.5	56.5	60.8	21.2	81.1	22.6	48.9	27.7	84.8	27.7	49.5				
1999	56.6	56.9	51.7	55.7	59.0	56.6	58.4	54.5	57.4	61.2	24.3	81.6	24.1	46.8	29.8	84.6	28.1	52.4				
2000	55.8		50.9	55.5	58.7	56.2		53.6	57.0	61.0		77.5	20.7	39.7		80.9	26.3	46.1				
2001	57.0	56.1	52.4	56.1	59.6	57.5	57.0	55.0	57.7	61.7	14.9	83.3	25.4	45.5	29.8	86.8	29.5	51.6				
2002	56.1	56.5	51.0	55.6	59.1	56.4	57.5	53.8	56.9	61.0	26.8	73.7	25.4	46.3	30.8	75.2	28.6	51.2				
2003	56.3	56.2		56.0	59.4	56.6	58.0		57.7	61.5	22.9		17.5	37.5	28.5		23.5	43.1				
2004	56.5	57.6	51.7	55.9	59.3	57.5	59.6	54.9	58.1	61.7	27.7	73.6	27.6	43.1	32.8	73.6	30.7	48.9				
2005	56.2	55.5	49.8	54.9	58.0	57.0	57.7	53.1	57.1	60.8	31.2	81.4	30.4	49.5	34.4	83.7	33.2	49.7				
2006	56.2	54.9	49.3	54.4	58.2	56.3	56.8	52.0	55.5	60.0	30.2	84.6	31.1	44.6	34.7	86.9	33.8	51.2				
2007	56.3	55.4	48.9	54.4	57.6	56.7	56.9	51.8	55.9	59.7	37.4	90.6	36.4	54.1	40.0	94.4	39.6	56.5				
2008	55.8	54.3	47.6	53.4	56.0	56.7	56.4	50.9	55.3	58.5	39.8	94.4	38.1	55.6	40.6	97.2	40.2	58.5				
2009	56.0	53.7	48.1	53.6	55.4	56.9	56.1	51.4	55.8	58.0	42.2	91.3	38.8	55.3	42.0	91.2	39.9	58.7				
2010	56.1	52.6	47.7	53.0	54.7	56.6	55.0	50.7	55.1	57.3	45.6	89.1	38.9	55.2	44.5	89.0	40.1	58.4				
2011	56.5	53.0	48.0	53.3	55.3	56.9	55.3	51.0	55.2	57.6	48.2	92.2	39.0	57.7	47.9	93.0	41.5	61.9				
2012	55.6	52.0	46.8	52.6	54.6	56.3	54.6	50.3	54.9	57.2	48.7	86.9	38.8	55.9	47.9	88.4	40.6	60.0				
2013	55.7	51.8	47.2	52.5	54.6	56.6	54.4	50.4	54.6	57.2	46.1	90.4	35.4	55.9	46.7	93.2	38.1	60.6				
2014	55.5	51.4	46.9	52.6	54.5	56.4	53.5	49.8	54.3	56.8	41.7	87.2	32.2	53.7	42.1	89.4	36.0	57.7				
2015	56.6	52.3	47.2	53.7	55.6	57.1	54.7	50.4	55.3	57.8	44.6	85.6	33.2	55.2	44.4	88.3	36.5	59.2				
media 03-05	56.4	56.5	50.8	55.6	58.9	57.0	58.4	54.0	57.6	61.4	27.3	77.5	25.2	43.4	31.9	78.7	29.1	47.2				
media 13-15	55.9	51.9	47.1	52.9	54.9	56.7	54.2	50.2	54.8	57.3	44.1	87.7	33.6	54.9	44.4	90.3	36.9	59.2				
differenze	0.5	46	27	27	40	0.4	4.2	20	20	44	160	40.2		116	125	11 6	77	110				

ampiezze e ritardo di fase quantitativamente congruenti con le misure mareografiche che normalmente sono effettuate in laguna.

Una prima elaborazione è stata effettuata calcolando, per ciascun anno e per ciascuna stazione, l'andamento della marea astronomica sulla base delle componenti armoniche elaborate con il software PO-LIFEMO e utilizzate nel paragrafo precedente. Il segnale è stato elaborato selezionando tutti i massimi e i minimi, ed è stata calcolata l'ampiezza media annuale dell'oscillazione di marea come differenza tra la media dei massimi e la media dei minimi di ciascun anno. Il ritardo di fase rispetto alla Piattaforma CNR è stato calcolato individuando, per ogni estremale (massimo o minimo) della generica stazione, il corrispondente estremale registrato alla stazione Piattaforma e calcolando il ritardo da quest'ultimo in minuti. Per ciascuna stazione, l'ampiezza media ( $A_{med}$ ) e il ritardo di fase medio ( $R_{med}$ ) sono stati, in definitiva, ottenuti utilizzando le formule seguenti: npiezze della marea misurata e della marea astronomica in alcune stazion

della Laguna di Venezia nel periodo tra il 1994 e il 2015 64 - FR astro -\_\_\_\_\_ BU astro - CH astro cm - O- • PT mis ->-·FR mis 62 54 52 50 48 2009 995 1997 1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 010 011 012 014 966

Fig. 5 - Variazione di ampiezza della marea ottenuta analizzando gli estremali relativi alla sola componente astronomica (linea continua) e il segnale di marea completo (linea tratteggiata) in alcune stazioni di Fig. 2.



Fig. 6 - Variazione dei ritardi di propagazione della marea ottenuta analizzando gli estremali relativi alla sola componente astronomica (linea continua) e il segnale di marea completo (linea tratteggiata) in alcune stazioni di Fig. 2.

$$A_{med} = \frac{1}{N_{max}} \sum_{i=1}^{N_{max}} H_i^{max} - \frac{1}{N_{min}} \sum_{j=1}^{N_{min}} H_j^{min}$$
$$R_{med} = \frac{1}{N_{max} + N_{min}} \left( \sum_{i=1}^{N_{max}} (T_i^{max} - T_{i\_PT}^{max}) + \sum_{j=1}^{N_{min}} (T_i^{min} - T_{i\_PT}^{min}) \right)$$

in cui  $N_{max}$  e  $N_{min}$  rappresentano il numero di estremali positivi (massimi di marea) e negativi (minimi di marea),  $H^{max}$  e  $H^{min}$  indicano il valore del livello in corrispondenza del singolo massimo e minimo di marea, mentre  $(T^{max} - T^{max}_{p})$  e  $(T^{min} - T^{min}_{p})$  individuano il ritardo con cui il singolo estremale si presenta nella singola stazione rispetto a quando si presenta nella Piattaforma CNR.

Una seconda elaborazione è stata effettuata analizzando direttamente i dati misurati, ovvero senza passare attraverso la ricostruzione della componente astronomica della marea ma considerando il segnale completo (somma di contributo astronomico e meteorologico) così come registrato nelle singole stazioni.

Nello specifico, i dati misurati ad intervalli di 10 minuti (o interpolati per riportarli a tale cadenza nei pochi casi in cui gli intervalli di campionamento risultavano superiori) sono stati ri-elaborati applicando un filtro a media mobile su 5 dati, in modo da regolarizzare l'andamento dei dati stessi che, come si è detto, sono forniti con una sensibilità pari a 1 cm. L'individuazione degli estremali dei dati misurati è stata effettuata considerando, per ciascuna stazione, tutti i massimi e i minimi ricavati dalla marea astronomica e individuando, per ciascuno di essi, il valore misurato massimo o minimo più prossimo, considerando convenzionalmente un intorno temporale massimo pari a 2 ore. Una volta individuati gli estremali, l'ampiezza e il ritardo di fase sono stati calcolati con le medesime formule utilizzate per le maree astronomiche.

I grafici riportati in Fig. 5 e Fig. 6 rappresentano i risultati ottenuti dall'analisi degli estremali considerando sia la sola componente astronomica (linee continue) sia la marea reale (contenente anche il contributo meteorologico – linee tratteggiate) per le stazioni mareografiche di Chioggia Vigo, Faro Rocchetta, Punta della Salute, Burano, selezionate tra quelle disponibili in modo da ottenere delle valutazioni distribuite all'interno di tutto il bacino lagunare.

Dai grafici si evince come le variazioni che caratterizzano sia l'ampiezza sia il ritardo di fase siano del tutto in linea con quelle ottenute, sulla base delle sole costanti armoniche, nel paragrafo precedente. Se si confronta, infatti, la media delle ampiezze del periodo 2003-2005 con quella del periodo 2013-2015 si ottiene che, per le quattro stazioni considerate, l'ampiezza di marea si è ridotta negli ultimi anni di circa 3÷4 cm. Le riduzioni maggiori si ottengono per la stazione di Faro Rocchetta e per quella di Punta della Salute. Leggermente inferiori sono le riduzioni valutate per le stazioni di Burano e di Chioggia. Per quanto riguarda il ritardo di fase rispetto al mare, i risultati ottenuti indicano che questo è aumentato di circa 15 minuti per Faro Rocchetta, e di circa 10 minuti per le altre stazioni. Appare confermato, quindi, che gli effetti massimi indotti dagli interventi alle bocche di porto hanno riguardato il bacino di Malamocco.

L'accordo evidenziato tra i risultati ottenuti analizzando le singole componenti armoniche (par. 3) e quelli ottenuti analizzando la serie degli estremali (sia della sola componente astronomica che dei segnali di marea completi – par. 4), al di là di essere una conferma della validità dei risultati ottenuti, ribadisce l'attendibilità del primo tipo di approccio che, oltretutto, è operativamente molto meno oneroso.

#### 5. *Effetti sulla circolazione lagunare*

A completamento dell'indagine, sono state effettuate delle simulazioni modellistiche per analizzare gli effetti delle variazioni della configurazione delle bocche sull'idrodinamica lagunare nel suo complesso, utilizzando il modello idrodinamico uni-bidimensionale della laguna di Venezia messo a punto dal Dipartimento ICEA dell'Università di Padova, descritto nel par. 2.

Il modello è stato utilizzato considerando due diverse schematizzazioni della laguna: la prima (2003) che riproduce le bocche di porto nella loro configurazione antecedente l'inizio dei lavori del Mo.S.E. (Fig. 7); la seconda (2012) che riproduce invece la configurazione delle bocche stesse ad opere ultimate. Il reticolo di calcolo relativo alla

#### RECENTI VARIAZIONI DELLA PROPAGAZIONE DELLA MAREA 175

#### 174 B. MATTICCHIO, L. CARNIELLO, D. CANESSO, E. ZIGGIOTTO, M. CORDELLA

seconda configurazione differisce dalla configurazione "ante operam" solo per la conformazione dei contorni geometrici delle bocche di porto e per le relative quote batimetriche, che sono state dedotte dagli elaborati progettuali. In entrambi i casi, le quote batimetriche interne alla laguna sono state assegnate sulla base del più recente rilievo completo della laguna disponibile ([16] – Fig. 7).

La capacità del modello di riprodurre il comportamento idrodinamico della laguna, già ampiamente testata in applicazioni precedenti [15] [16], è stata ulteriormente verificata simulando due eventi reali (uno del 2003 e uno del 2012) considerando le due diverse configurazioni e confrontando i risultati del calcolo con le registrazioni di marea fatte nelle stazioni della rete di monitoraggio ISPRA. I risultati ottenuti hanno mostrato un'ottima corrispondenza tra le misure e il calcolo confermando l'accuratezza del modello nella simulazione della propagazione della marea all'interno della laguna veneziana.

Successivamente, sono state effettuate ulteriori simulazioni con entrambe le schematizzazioni (2003 e 2012) imponendo come condizione al contorno in mare la medesima marea (una marea astronomica sizigiale della durata di alcuni giorni).

Il confronto tra i risultati ottenuti tra i due scenari si è dimostrato in linea con i risultati ottenuti nelle precedenti analisi. Il modello segnala infatti che la modifica della configurazione delle bocche per effetto delle opere fisse del Mo.S.E. ha prodotto complessivamente una maggiore attenuazione dell'ampiezza di marea all'interno della laguna e un incremento dei ritardi di fase. L'osservazione dei dati forniti dal modello nell'intero dominio di calcolo ha permesso di evidenziare come queste variazioni non sono distribuite uniformemente su tutta la laguna ma risultano concentrate maggiormente nel bacino centrale, dominato dalla Bocca di Malamocco, e nella Laguna Nord, alimentata dal canale di Treporti.

Il modello mette in evidenza che la variazione della configurazione geometrica delle bocche, ed in particolare il restringimento della sezione, porta ad un incremento delle velocità massime della corrente che attraversa le bocche stesse. Ciò accade in particolare per la Bocca di Malamocco (Fig. 8) che è quella, tra le tre bocche, dove le velocità della corrente sono più elevate.

L'incremento locale della velocità della corrente giustifica le varia-



Fig. 7 - Reticolo di calcolo e schematizzazione batimetrica adottata nel modello unibidimensionale della laguna di Venezia.

zioni che si osservano sulle oscillazioni della marea in laguna perché, a velocità maggiori, corrispondono maggiori azioni dissipative. Queste si traducono in un incremento delle resistenze idrauliche che la marea incontra nel superamento della bocca di porto e, quindi, in uno smorzamento dell'oscillazione mareale all'interno del bacino [22] [23].

L'impiego del modello è risultato particolarmente utile per l'analisi degli spostamenti subiti dalle zone di "partiacque", che separano i bacini di influenza delle singole bocche lagunari. Le linee di "partiacque" sono state individuate mediante un'analisi sui campi di velocità sia in fase di marea crescente (flusso) che in fase di marea calante (riflusso), delimitando i sottobacini afferenti a ciascuna bocca sulla base della distribuzione delle linee di corrente. Non essendo il processo perfettamente simmetrico, le linee individuate nelle due fasi di marea (flusso e riflusso) non risultano coincidenti e portano a materializzare delle "fasce di partiacque", mediamente riferibili all'intero ciclo di marea.



Fig. 8 - Bocca di Malamocco. Confronto tra i campi di velocità in flusso entrante calcolati con il modello bidimensionale considerando le due configurazioni analizzate: 2003 e 2012.

I risultati modellistici (Fig. 9) mostrano che la posizione dei limiti delle "fasce di partiacque", identificata per la configurazione successiva agli interventi alle bocche (linee verdi), è cambiata rispetto a quella antecedente (linee nere).

Dalla Fig. 9 si evince, in particolare, che la fascia che separa i bacini dominati dalle bocche di Lido e di Malamocco si è spostata verso la parte centrale della laguna. Si osserva inoltre che l'ampiezza della stessa fascia si è visibilmente ridotta.

Viceversa non sembra essersi apprezzabilmente modificata la posizione dei limiti della fascia di partiacque che separa i bacini dominati dalle bocche di Malamocco e di Chioggia.

Questo risultato conferma ulteriormente come le modificazioni alle bocche di porto abbiano fatto risentire i loro effetti in modo più importante nel bacino di Malamocco. Infatti dalla simulazione modellistica si evince che per effetto dei restringimenti alle bocche si è verificata un'espansione del bacino dominato dalla Bocca di Lido, avvenuta a spese del bacino dominato dalla Bocca.

La posizione delle "fasce di partiacque" ha un ruolo cruciale sull'idrodinamica interna della laguna, perché determina l'ubicazione degli



Fig. 9 - Spostamento delle "fasce di partiacque" che delimitano il bacino di Malamocco ottenuta in base ai risultati del modello idrodinamico. Le linee nere si riferiscono alla configurazione ante-operam (2003), le linee verdi alla configurazione post-operam (2012).

specchi d'acqua in cui le correnti di marea sono più deboli e che sono perciò più vulnerabili rispetto alle problematiche legate allo scarso ricambio idrico. La variazione di ampiezza di tali fasce, a sua volta, segnala non trascurabili modificazioni al regime delle correnti locali ed in particolare ai fenomeni di dispersione idrodinamica legati alle correnti secondarie (o "residue") che si sovrappongono al periodico alternarsi delle correnti di marea.

Lo spostamento della "fascia di partiacque" tra i bacini di Lido e di Malamocco può avere peraltro degli effetti da considerare con attenzione anche sulla circolazione delle correnti di marea nei rii e nei canali interni della città di Venezia, dove l'intensità e il verso delle correnti stesse, nelle diverse fasi della marea, sono controllati da piccoli gradienti di livello. Variazioni anche minime, ma differenziate, dell'ampiezza dell'oscillazione della marea e, soprattutto, dei ritardi di fase, possono portare a modifiche significative della velocità della corrente che percorre i canali.

Queste circostanze sono ben evidenziate dalle simulazioni modellistiche che mostrano come, in alcuni canali del Centro Storico si osservino, tra le due configurazioni esaminate, variazioni



Fig. 10 - Misure correntometriche all'intersezione tra C. Grande – C. Cannaregio effettuata il 26/11/2011 durante una marea crescente (tra le 8.57 e le 9.06). Nelle tre sezioni le misure non sono simultanee per cui la continuità non è rigorosamente rispettata (dati forniti da ing. P. Peretti).

apprezzabili della velocità e, in alcuni casi, anche del verso della corrente.

Che negli ultimi anni si siano verificate modificazioni dell'intensità delle correnti nei canali di Venezia è peraltro un'osservazione sperimentata e riportata da molti cittadini veneziani, non ultimi i gondolieri, spettatori e fruitori interessati delle vie d'acqua più famose del mondo. Questa osservazione è supportata anche da qualche riscontro sperimentale, come le misure correntometriche effettuate nel 2011 all'intersezione tra il Canal Grande e il Rio di Cannaregio (Fig. 10). Diversamente da quello che si riscontrava in passato [24] le misure mostrano che, quando la marea è crescente (fase di flusso), il Rio di Cannaregio riceve l'acqua dal Canal Grande sia dalla direzione di Rialto che da quella della Stazione Ferroviaria. Analogamente, quando la marea è calante (riflusso), le misure indicano che il flusso proveniente dal rio di Cannaregio si divide secondo due direzioni, una verso Rialto e una verso la Stazione. Come conseguenza, la velocità delle correnti che interessano il rio di Cannaregio sono molto più elevate rispetto a quelle che si riscontrano lungo il Canal Grande, in virtù anche della ben più ampia sezione di quest'ultimo.

# 6. Conclusioni

L'analisi delle registrazioni dei livelli di marea raccolte in numerose stazioni mareografiche attive da anni in laguna di Venezia e nel mare Adriatico antistante ha evidenziato alcune variazioni intervenute a partire dagli anni 2003-2004, che hanno comportato in particolare una riduzione dell'ampiezza delle oscillazioni della marea e un incremento dei ritardi di fase.

Essendo tali variazioni evidenziate da tutte le stazioni all'interno della laguna, ma non dalle stazioni poste in mare (Piattaforma Acqua Alta e mareografi sulle dighe che delimitano le bocche di porto), la conclusione logica è che la causa che ha determinato queste modifiche al regime mareale sia da ricercarsi all'interno della laguna stessa. I risultati delle analisi condotte suggeriscono che tali cambiamenti sono correlati alle modifiche apportate alla geometria delle tre bocche di porto della laguna nell'ambito dei lavori per la costruzione del sistema di paratoie mobili del progetto Mo.S.E., che hanno provocato non trascurabili restringimenti delle sezioni delle bocche stesse.

I dati evidenziano che le variazioni non sono omogenee nel bacino lagunare ma differenziate da zona a zona. Le variazioni risultano, in particolare, maggiori nel bacino centrale e nella laguna settentrionale, il che suggerisce che i varchi che hanno risentito maggiormente delle opere realizzate sono la Bocca di Malamocco e la Bocca di Lido sul varco di Treporti.

Le analisi condotte con il supporto della modellistica numerica hanno confermato queste circostanze e hanno permesso di individuare alcune variazioni sulla posizione dei limiti delle aree di influenza di ciascuna bocca (i cosiddetti "partiacque"). In particolare, la Bocca di Lido sembra aver ampliato la propria area di influenza, a scapito del bacino afferente alla Bocca di Malamocco. Ciò implica delle modifiche sia sul ruolo reciproco delle tre bocche che

alimentano la laguna, sia sui percorsi delle correnti di marea, che si concretizzano in un rafforzamento delle correnti in prossimità della Bocca di Lido rispetto a quelle che competono alla parte centrale della laguna, controllate dalla Bocca di Malamocco.

Anche se per via indiretta, tali cambiamenti possono probabilmente spiegare l'incremento della velocità della corrente che si osserva in alcuni dei canali interni alla città di Venezia, dal momento che i flussi che percorrono i canali sono essenzialmente legati agli sfasamenti istantanei della marea che si realizzano tra il Canal Grande e gli specchi d'acqua lagunari che circondano la città. Questo fenomeno, evidente a chiunque pratichi la navigazione nei canali, rischia di essere sottovalutato, non solo per le conseguenze sulla navigazione, ma soprattutto per i possibili danni arrecati alle antiche costruzioni a diretto contatto con l'acqua. Inoltre, un diverso regime idrodinamico legato ai cambiamenti sulla propagazione della marea potrebbe comportare nel tempo conseguenze non trascurabili sui parametri principali della circolazione lagunare, come i tempi di residenza e di ricambio dell'acqua, soprattutto nelle parti più periferiche della laguna Nord.

È perciò auspicabile che le valutazioni esposte, basate sulla sola analisi dei livelli di marea, possano essere approfondite e perfezionate mediante specifiche indagini sulle correnti lagunari. In particolare, emerge la necessità di valutare, con apposite misure di portata alle bocche di porto, l'entità delle variazioni dei flussi scambiati tra la laguna e il mare per effetto dei restringimenti prodotti dalle opere realizzate.

Parallelamente, dovrebbero essere effettuate indagini sulle correnti nei rii e canali interni della città di Venezia, basate su misure dirette e simulazioni modellistiche, da confrontarsi con dati raccolti in passato, prima della realizzazione delle opere alle bocche di porto [24] [25] [26].

## 7. Ringraziamenti

Si ringraziano gli uffici di ISPRA - Servizio Laguna di Venezia e il Centro Maree del Comune di Venezia per aver reso disponibili i dati mareografici utilizzati nelle elaborazioni.

Le elaborazioni effettuate sono state in parte sostenute dal contributo di We Are Here Venice (WAHV), weareherevenice.org, associazione non profit che ha come finalità la divulgazione delle informazioni sulle scelte determinanti per il futuro di Venezia.

# 8. Bibliografia

- D'Alpaos, L. (1992), Evoluzione morfologica della laguna di Venezia dal tempo del Denaix ad oggi e sue conseguenze sul regime idrodinamico, IVSLA, Conterminazione lagunare: storia, ingegneria, politica e diritto nella laguna di Venezia, Venezia.
- [2] D'Alpaos L. (2003), *Conoscere il comportamento idrodinamico della laguna del passato per progettare la laguna del futuro*, Atti IVSLA, Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Tomo CLXII (2003-2004).
- [3] Dorigo L. (1961), Le correnti di marea nei porti e nella Laguna di Venezia, IVSLA, Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia, Rapporti preliminari, 127-147.
- [4] Ferla M., Cordella M., Michielli L., Rusconi A. (2007), Long-term variations on sea level and tidal regime in the lagoon of Venice, Estuarine, Coastal and Shelf Science, 75, 214-222, doi:10.1016/j.ecss.2007.03.037.
- [5] D'Alpaos L. (2010), Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere delle bocche di porto, IVSLA, Memorie Scienze Fisiche, Venezia.
- [6] Polli S. (1952), *Propagazione della marea nella Laguna di Venezia*, Annali di Geofisica, vol. V, n°2, 273-292.
- [7] Polli S. (1961), *La propagazione della marea nel golfo di Venezia*, IVSLA, Rapporti preliminari della comm. di studio per la conservazione della Laguna e della città di Venezia. vol. 1., Venezia.
- [8] Ferrarin C., Tomasin A., Bajo M., Petrizzo A., Umgiesser G. (2015), *Tidal changes in a heavily modified coastal wetland*, Continental Shelf Research, 101, 22–33, doi: 10.1016/j.csr.2015.04.002.
- [9] Tomasin A. (2005), *The software Polifemo for tidal analysis*, Technical Note 202, ISMAR-CNR, Venezia.
- [10] Cordella M., Zampato L., Pastore F., Tomasin A., Canestrelli P., Ferla M. (2010), *Le tavole annuali di marea per Venezia*, Atti IVSLA, Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Tomo CLXIX (2010-2011).
- [11] ISPRA SLV, ICPSM, CNR-ISMAR (2016), Previsioni delle altezze di marea per il bacino San Marco e delle velocità di corrente per il Canal Porto di Lido - Laguna di Venezia, Valori astronomici, 2016, http://www.venezia.isprambiente.it/.

- [12] D'Alpaos, L., Defina, A. (1993), Venice Lagoon Hydrodynamic Simulation by Coupling 2D and 1D Finite Elements Models, Proceedings of the 8th Conference on "Finite Elements in Fluids. New Trends and Applications", Barcelona, 917-926.
- [13] D'Alpaos, L., Defina, A. (1995), Modellazione matematica del comportamento idrodinamico delle zone di barena solcate da una rete di canali minori, IVSLA, Rapporti e studi, Vol. XII, 353-372, Venezia.
- [14] Defina, A. (2000), *Two dimensional shallow flow equations for partially dry areas*, Water Resources Research, Vol. 36, 11, 3251-3264, doi:10.1029/2000WR900167.
- [15] Carniello, L., A. Defina, S. Fagherazzi and L. D'Alpaos (2005). A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy. Journal of Geophysical Research – Earth Surface, 110, F04007, doi:10.1029/2004JF000232.
- [16] Carniello, L., A. D'Alpaos, A. Defina (2011), *Modeling wind waves and tidal flows in shallow micro-tidal basins*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, doi:10.1016/j.ecss.2011.01.001.
- [17] Carniello, L., A. Defina and L. D'Alpaos (2012), Modeling sand-mud transport induced by tidal currents and wind waves in shallow microtidal basins: Application to the Venice Lagoon (Italy), Estuarine, Coastal and Shelf Science, doi:10.1016/j.ecss.2012.03.016
- [18] Carniello, L., S. Silvestri, M. Marani, A. D'Alpaos, V. Volpe, and A. Defina (2014), Sedi-ment dynamics in shallow tidal basins: In situ observations, satellite retrievals, and numerical modeling in the Venice Lagoon, J. Geophys. Res. Earth Surf., 119, doi:10.1002/2013JF003015.
- [19] Defina, A., L. D'Alpaos, and B. Matticchio (1994), A new set of equations for very shallow water and partially dry areas suitable to 2D numerical models, in Proceedings of the Specialty Conference on "Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas," edited by P. Molinaro and L. Natale, Am. Soc. of Civ. Eng., New York, 72-81,
- [20] Tomasin A. (1974), Recent changes in the tidal regime in Venice, Rivista italiana di Geofisica 23 (5-6), 275-278.
- [21] ISPRA (2012), Manuale di mareografia e linee guida per i processi di validazione dei dati mareografici, Manuali e linee guida 77/2012.
- [22] Matticchio B. (2004), Effetti idrodinamici prodotti da opere fisse alle bocche di porto della laguna di Venezia. Parte I: Parte 1: Idrodinamica locale e resistenze idrauliche, Atti IVSLA, Venezia, Tomo CLXII, 287-334.
- [23] Umgiesser G. (2004), Effetti idrodinamici prodotti da opere fisse alle bocche di porto della laguna di Venezia. Parte II: Riduzione delle punte di marea ed effetti sul ricambio idrico. Atti IVSLA, Venezia, Tomo CLXII, 335-376.
- [24] Dorigo L. (1966), Rilievi contemporanei di velocita della corrente di marea nei canali della Giudecca, Fondamenta Nuove, Canal Grande ed in alcuni rii interni della citta, IVSLA, Commissione di studio dei provvedimenti per la conservazione e difesa della laguna e della città di Venezia, Rapporti e Studi, 3, 128-151.

# RECENTI VARIAZIONI DELLA PROPAGAZIONE DELLA MAREA 183

- [25] Carrera, F. (1999), *Il comportamento idrodinamico dei canali interni di Venezia*, In: Venezia la citta` dei rii, UNESCO/INSULA, 197 e 207.
- [26] Coraci, E., G. Umgiesser and R. Zonta (2007), *Hydrodynamic and sediment transport modelling in the canals of Venice (Italy)*, Estuarine, Coastal and Shelf Science, doi:10.1016/j.ecss.2007.02.028.

# SUI SOVRALZI DEI COLMI DI MAREA GENERATI DAL VENTO NELLA LAGUNA DI VENEZIA A CAUSA DELLA CHIUSURA DELLE PARATOIE MOBILI ALLE BOCCHE DI PORTO

Riccardo Mel, Luigi D'Alpaos

#### 1. Introduzione

I livelli di marea all'interno della laguna di Venezia sono determinati dalla somma di due componenti: la marea astronomica, correlata al moto dei corpi celesti, principalmente Luna e Sole, e il contributo meteorologico dovuto alle condizioni atmosferiche. Mentre la previsione della marea astronomica può essere condotta per molti anni con errori inferiori al centimetro, il contributo meteorologico risulta prevedibile con maggiore difficoltà. Le sue previsioni, inoltre, non si spingono oltre la settimana. Le due componenti della marea a Venezia (astronomica e meteorologica) sono indipendenti fra loro e pertanto è possibile calcolarle separatamente e poi sommarne gli effetti.

Le registrazioni e le previsioni del livello di marea in laguna fanno riferimento allo Zero Mareografico di Punta della Salute (ZMPS), corrispondente al livello medio del mare di Venezia del 1897, calcolato mediando 25 anni di osservazioni, dal 1885 al 1909, e selezionando come riferimento l'anno centrale. Tale riferimento risulta essere inferiore di circa 23 cm rispetto allo zero della rete altimetrica dello stato italiano, che è riferita, invece, al livello medio del mare registrato dal mareografo di Genova nel 1942 (ottenuto a sua volta come media dei dati registrati dal 1937 al 1946).

Un evento di marea che eguaglia o supera la soglia di 110 cm sullo ZMPS viene abitualmente classificato come evento di "marea molto sostenuta" ed è attualmente segnalato mediante allarme sonoro attivato dal personale del Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia (CPSM). Il raggiungimento di tale valore comporta attualmente
l'allagamento di circa il 10% della città di Venezia, ostacolando gli spostamenti lungo i più comuni percorsi cittadini [1]. Poiché si riscontrano condizioni simili anche per le isole della Giudecca, di Murano e Burano, la quota di 110 cm è stata scelta come limite superato il quale, in sede previsionale, si attiveranno le procedure di chiusura delle barriere mobili in fase di completamento in corrispondenza delle tre bocche di porto.

La frequenza di eventi di marea molto sostenuta, che si attesta attualmente per la stazione di Punta della Salute in circa 5 casi l'anno, presenta un trend crescente a causa del contribuito di due fenomeni: la subsidenza del suolo e, soprattutto, l'eustatismo (innalzamento del livello medio del mare), che agiscono congiuntamente sovrapponendosi negli effetti [1].

La subsidenza si determina sia in seguito a processi naturali di consolidamento dei terreni argilloso-limosi (subsidenza naturale) sia a causa della compattazione degli stessi livelli per depressurizzazione delle falde per eccessivo sfruttamento delle acque degli acquiferi sotterranei da parte dell'uomo (subsidenza di origine antropica). Un importante processo di subsidenza antropica si è verificato nella laguna di Venezia nei decenni centrali dello scorso secolo quando, soprattutto per soddisfare le necessità dello sviluppo industriale di Porto Marghera, si è fatto un uso indiscriminato di acque del sottosuolo. L'emungimento di copiose portate dalle falde in pressione ha provocato un abbassamento del suolo lagunare stimato di oltre 10 cm.

L'eustatismo, invece, è la misura dell'incremento del livello medio del mare dovuto principalmente ai cambiamenti climatici. La stima più recente fornita dal rapporto IPCC del 2013 indica un innalzamento medio di 40 – 60 cm per la fine del corrente secolo. Qualora venisse rispettata tale stima, la frequenza di eventi di marea maggiori o uguali a 110 cm sullo ZMPS nella laguna di Venezia potrebbe superare i 100 casi all'anno nell'arco di pochi decenni.

La maggior parte delle statistiche sui livelli di marea in laguna riguardano la città di Venezia (stazione di Punta della Salute) [2]. Tali valori possono differire dai livelli registrati nelle stazioni mareografiche degli altri centri abitati lagunari, come Chioggia, Murano, Burano e Torcello. Le differenze di livello dei colmi di marea si accentuano, in particolare, durante gli eventi di "acqua alta", a causa della concomitante presenza di venti più o meno intensi, che concorrono con la loro azione ad alterare l'equilibrio idrodinamico lagunare. I dislivelli osservati presentano un ordine di grandezza di alcune decine di centimetri, risultando non trascurabili nella determinazione dei fenomeni di allagamento dei centri abitati lagunari.

### 1.1. Differenze di livello all'interno della laguna

Durante un evento di "acqua alta" i venti osservati sulla laguna di Venezia provengono principalmente dal primo e dal secondo quadrante, rispettivamente bora e scirocco, con intensità che possono raggiungere i 20 m/s. In occasione di alcuni particolari eventi di marea eccezionale, associati a venti di intensità superiore ai 15 m/s, si sono registrati, nei mareografi dislocati all'interno della laguna, livelli di marea che presentano differenze superiori anche a 30 cm rispetto a quelli registrati dal mareografo di Punta della Salute.

Si tratta di differenze di livello causate dall'attrito che si crea nel contatto tra la massa d'aria in movimento e la superficie dell'acqua, attrito che esercita una spinta nella direzione del vento. Tale spinta, associata al tirante ridotto che si registra sui bassifondi lagunari, è in grado di generare nelle aree sopra vento un fenomeno di "wind set up" di alcune decine di centimetri.

Quando il vento spira dal primo quadrante si determina, in particolare, un insaccamento delle masse d'acqua a ridosso dell'intero perimetro centro-meridionale della laguna. Le misurazioni [3] relative all'evento dell'8 dicembre 1992 hanno evidenziato in alcune stazioni di registrazione poste all'estremità meridionale della laguna un sovralzo del colmo di marea rispetto a Punta della Salute di oltre 40 cm. Nel contempo i livelli misurati all'estremità settentrionale della laguna hanno presentato valori inferiori di circa mezzo metro rispetto a quelli osservati nella città di Venezia.

Dislivelli dello stesso ordine di grandezza sono stati ricostruiti mediante un modello matematico, utilizzando le registrazioni di direzione e intensità del vento effettuate nelle stazioni meteorologiche lagunari nel corso di alcuni eventi storici di "acqua alta" associati a venti di bora [3]. Le simulazioni degli eventi considerati hanno prodotto come risultato dislivelli sui colmi rispetto a Punta della Salute di circa -50 cm in laguna nord e di 45 cm in laguna sud. La spiegazione del fenomeno va ricercata principalmente nella circolazione secondaria indotta dal vento. Quando spira sulla laguna un vento dal primo quadrante si genera una corrente proveniente dalle zone centro-settentrionali della laguna e diretta verso la laguna meridionale. Tale corrente tende a richiamare acqua dalla bocca di Lido, insaccandola nelle zone lagunari più meridionali, dove si possono realizzare livelli più elevati rispetto a quelli registrati in mare aperto. Il fenomeno, quando è più spinto, può comportare addirittura l'inversione dei flussi di marea, poiché talvolta dalla bocca di Chioggia viene espulsa in mare portata quando si è ancora in fase di marea crescente.

Sulla circolazione lagunare secondaria indotta dal vento, è da qualche tempo iniziata una caratterizzazione quali-quantitativa. Nel caso dell'evento di marea dei giorni 7-10 dicembre 1992, durante il quale il vento di bora ha soffiato per oltre 48 ore con intensità superiore ai 12 m/s, secondo alcuni studi [3] il fenomeno della circolazione secondaria è stato particolarmente importante, provocando, ripetutamente, l'inversione dei flussi di marea alle bocche, per una durata totale di circa 20 ore.

Un comportamento simile ma opposto si verifica quando soffiano venti dal secondo quadrante (scirocco), che comportano un innalzamento dei livelli dei colmi di marea nella laguna settentrionale (dove si trovano, fra gli altri, i centri abitati di Burano e Torcello). Una recente analisi sui dati mareografici del passato, ha portato alla luce le registrazioni di livello raccolte presso alcune stazioni che funzionarono regolarmente durante l'evento eccezionale del 4 novembre 1966. I dati registrati in occasione di quell'evento hanno evidenziato come la differenza fra i livelli massimi di marea a Venezia e a Chioggia sia andata progressivamente aumentando al crescere dell'intensità del vento di scirocco, che spirava con raffiche superiori ai 25 m/s. Al culmine dell'evento, in particolare, il livello al colmo di marea a Venezia, pari a 194 cm sullo ZMPS, risultò più alto di oltre 30 cm rispetto a quello di Chioggia. Estremamente significativi furono i livelli massimi raggiunti in prossimità della parte centro-settentrionale del perimetro lagunare con valori di 197 cm sullo ZMPS nella stazione di Marghera (all'interno del porto industriale) e di 204 cm sullo ZMPS nella stazione di Pagliaga, situata in vicinanza della testata nord della pista dell'aeroporto di Tessera. Un'ipotesi suggerita dall'esame dei dati porta a ritenere che il livello registrato a Punta della Salute, che nell'occasione si è portato nel giro di poche decine di minuti dai 175 cm ZMPS al valore massimo di 194 cm ZMPS, sia stato determinato dall'improvvisa attenuazione del vento di scirocco e dal conseguente riversamento nella laguna centrale delle masse d'acqua accumulate nelle zone settentrionali della laguna dal vento stesso.

Come ulteriore esempio del ruolo assunto dal vento, si riportano le analisi riguardanti le differenze di livello sui colmi di marea registrate durante due tra i più recenti eventi di "acqua alta" associati a un vento intenso. Si tratta di eventi che consentono, rispetto al passato, un esame basato su di un numero maggiore di stazioni mareografiche disponibili per il confronto.

Il primo evento considerato è quello del 10 novembre 2004, caratterizzato da un vento di bora di intensità pari a 18 m/s. Il secondo evento, associato a un vento di scirocco caratterizzato dalla medesima intensità, è quello verificatosi il 6 novembre 2000. Le stazioni scelte per i confronti, ubicate nel pannello di sinistra della Fig. 1, sono quelle dell'ISPRA poste lungo l'asse longitudinale della laguna con un passo di circa 8 km.



Fig. 1 - Stazioni di registrazione del livello di marea utilizzate per i confronti di livello (pannello di sinistra) e per la taratura del modello matematico bidimensionale utilizzato nello studio (pannello di destra).







Fig. 2 - Andamento dei livelli di marea registrati dalle stazioni dell'ISPRA (Fig. 1, pannello di sinistra) nel caso dei due eventi di bora e di scirocco presi in esame, "filtrando" il ritardo di fase dovuto alla propagazione.





Fig. 3 - Quote istantanee del pelo libero in laguna (ZMPS) nel caso dei due eventi di marea analizzati, in diversi istanti temporali.



Fig. 4 - Evoluzione dei dislivelli di marea tra le stazioni di Punta della Salute e di Chioggia durante le ore di maggior intensità del vento per i due eventi analizzati.

In Fig. 2 sono riportati i livelli di marea registrati nelle diverse fasi evolutive di entrambi gli eventi. Al fine di rendere più facilmente "leggibili" le registrazioni, le onde di marea registrate sono state allineate temporalmente, "filtrando" i ritardi di fase, in maniera da evidenziare le differenze di livello dovute alla sola azione del vento fra le diverse stazioni ubicate lungo la direttrice longitudinale della laguna considerata. I dislivelli massimi fra i livelli di marea nelle diverse stazioni considerate superano i 60 cm durante i periodi di maggiore intensità del vento.

La Fig. 3 rappresenta una "fotografia" del profilo della superficie libera lungo la direttrice longitudinale esaminata senza filtrare i ritardi di fase, il cui effetto è chiaramente visibile. Si evidenzia come per entrambi gli eventi si realizzi un graduale incremento del dislivello tra le zone settentrionali e meridionali della laguna. Fra Punta della Salute e Chioggia, in particolare, si riscontra una differenza al colmo di circa 30 cm in entrambi gli eventi.

Con l'obiettivo di evidenziare i dislivelli che si possono instaurare fra Venezia e Chioggia e la loro persistenza nel tempo è utile confrontare l'evoluzione dei dislivelli che si realizzano tra i due principali centri abitati lagunari durante le ore di vento più intenso, a cavallo del colmo di marea osservato (Fig. 4). Si osserva che il dislivello generato, proporzionale all'intensità del vento, si assesta per l'evento di bora su di un valore di circa 28 cm durante tre ore circa, mentre per l'evento di scirocco si registra un picco di 30 cm, con una sua brusca diminuzione in coincidenza con l'altrettanto brusca attenuazione del vento.

#### SUI SOVRALZI DEI COLMI DI MAREA GENERATI DAL VENTO 193

#### 1.2. Circolazione secondaria indotta dal vento

Gli effetti dovuti al perdurare di venti particolarmente intensi sulla laguna non riguardano solamente i livelli, ma anche le portate fluenti attraverso le bocche. Nelle ore a cavallo del colmo di marea, quando soffia un vento lungo l'asse longitudinale della laguna, l'acqua tende a insaccarsi nella zona sopra vento producendo livelli interni maggiori non solo rispetto a quelli della zona sotto vento ma, come si è detto, anche a quelli del mare aperto.

Nel caso di vento proveniente dal primo quadrante (vento di bora) l'acqua, durante la fase finale di marea crescente in prossimità del colmo, defluisce dalla bocca di Chioggia verso il mare, con direzione contraria a quella delle altre bocche, nelle quali, per compensazione, l'acqua continua a entrare con portate superiori a quelle delle situazioni senza vento, mantenendo la condizione di flusso entrante per una o due ore dopo il picco. Si configura quindi, in queste situazioni particolari, una circolazione lagunare antioraria diretta dalla bocca di Lido verso la laguna meridionale, dove l'acqua fuoriesce dalla bocca di Chioggia.

Una situazione opposta si verifica durante le situazioni di vento di scirocco e soprattutto di ostro, casi in cui si osserva una portata entrante incrementata attraverso le bocche di Chioggia e Malamocco e una portata uscente maggiore attraverso quella del Lido.

L'entità della portata fluente attraverso le bocche di Lido e di Chioggia, indotta dalla circolazione secondaria, è stata stimata mediante un modello matematico in circa 2000 - 3000 m<sup>3</sup>/s nei casi di venti con tempo di ritorno pari a un anno. Questo flusso è in grado attualmente di attenuare i dislivelli tra le estremità lagunari, con effetti che verrebbero meno nel momento in cui fossero chiuse le bocche per difendere la laguna dal fenomeno delle "acque alte".

## 1.3. Le barriere mobili alle bocche di porto

Da sempre la laguna è soggetta all'azione dell'uomo, il quale, con interventi sempre più complessi e impattanti, ha tentato di adattarla alle proprie necessità, influendo sulla sua naturale evoluzione morfologica.

L'ultimo intervento in ordine di tempo riguarda le opere concepite per difendere la città di Venezia e gli altri centri lagunari dalle "acque alte". Il sistema integrato di opere, denominato Mo.S.E., acronimo di Modulo Sperimentale Elettromeccanico, ha il suo fulcro nella schiera di paratoie mobili a scomparsa che saranno installate alle bocche di porto e consentiranno di intercludere la laguna rispetto al mare in caso di necessità.

In condizioni normali di marea le paratoie (zavorrate d'acqua) sono adagiate sul fondo entro appositi alloggiamenti. Quando è prevista una marea con colmo superiore a 110 cm (ZMPS) le paratoie sono gradualmente e parzialmente vuotate dell'acqua di zavorra e, ruotando per spinta di galleggiamento attorno alle cerniere che le ancorano al fondo, sono portate a emergere. Una volta cessato l'allarme esse, nuovamente riempite d'acqua, rientrano nella propria sede. Il tempo di sollevamento delle paratoie è stimato in 30 minuti circa, contro i 15 minuti necessari per il loro abbassamento.

Tralasciando le perplessità tecniche, che possono essere più o meno fondate, occorre considerare un altro aspetto che diventerà importante a lungo termine. Qualora l'innalzamento del livello medio del mare dovesse manifestarsi con l'intensità paventata, la frequenza di sollevamento delle paratoie potrebbe passare dalle attuali 5 volte l'anno previste dal progetto alle oltre 100 volte l'anno entro la metà di questo secolo [4]. Questo scenario comporterebbe conseguenze non più accettabili sia sul ricambio delle acque della laguna sia sulle attività portuali.

## 2. Calcolo dei livelli di marea in laguna con barriere mobili in funzione

Alla luce delle brevi considerazioni esposte, è sembrato di un qualche interesse esaminare l'entità delle differenze di livello che si vengono a creare all'interno della laguna in caso di bacino lagunare "chiuso", ovvero quando il flusso attraverso le bocche di porto viene impedito tramite il sollevamento delle paratoie mobili. In questa particolare configurazione verrebbe meno, in condizioni di vento intenso, la possibilità di parziale riequilibrio dei livelli che la circolazione secondaria indotta dal vento ora realizza [4].

Per indagare questa particolare condizione idrodinamica, si è fat-

to ricorso a un modello matematico in grado di simulare sia la propagazione della marea all'interno della laguna sia gli effetti sui livelli dovuti alla presenza di vento sia quelli conseguenti alla chiusura delle paratoie mobili.

## 2.1. Caratteristiche del modello matematico utilizzato

Il modello matematico utilizzato è quello proposto dall'Università di Padova, che si basa su di una soluzione numerica mediante il metodo agli elementi finiti delle equazioni che governano la propagazione di un'onda lunga in acque basse in ipotesi bidimensionali [5]. La soluzione è stata implementata per l'ambiente lagunare veneziano, caratterizzato da ampie superfici periodicamente destinate ad asciugarsi e ad allagarsi durante l'alternarsi delle fasi di marea e dalla presenza di un diffuso reticolo di canali, più o meno importanti dal punto di vista idraulico e dalla morfologia molto articolata, che innervano le zone d'acqua e le superfici di barena. Lo schema implementato risulta particolarmente efficiente ed è in grado di cogliere sia gli aspetti generali della propagazione della marea sia quelli locali, come dimostrano i sistematici confronti tra i valori forniti dal calcolo e quelli misurati per alcune grandezze tipiche del moto (livelli di marea, portate, velocità ecc.) in tutte le zone della laguna.

Rimandando alla letteratura specifica per quanto riguarda gli aspetti originali del modello e delle soluzioni adottate, ci si limita a segnalare che lo sforzo  $\tau_w$  generato dal vento sulla superficie libera è introdotto come sforzo tangenziale aggiuntivo a quello esercitato dall'attrito del fondo ed espresso tramite la relazione:

$$\tau_w = \rho_a c_d U_{wind}^2 (1 - e^{e_w U_{wind}}) \tag{1}$$

nella quale  $\rho_a$  è la densità dell'aria (assunta pari a 1.25 kg/m<sup>3</sup>),  $C_d$  è il coefficiente di resistenza aerodinamica, la cui definizione ha fatto parte del presente lavoro,  $U_{wind}$  è la velocità del vento ed  $e_w$  è un coefficiente assunto nello specifico pari a 1.62·10<sup>-6</sup>.

Per quanto riguarda la geometria della laguna, il reticolo di calcolo implementato è costituito da 49771 nodi e 94162 maglie bidimensionali (Fig. 5), le cui caratteristiche in termini di profondità

sono state definite sulla base del rilievo batimetrico generale della laguna del 2003. Ad ogni singola maglia sono assegnate tre grandezze caratteristiche: le quote del fondo, i valori del coefficiente di scabrezza secondo Strickler e le dimensioni rappresentative delle irregolarità di fondo  $a_r$ [5] poste pari a 0.3 m.



La distribuzione dei coefficienti di scabrezza adottata deriva da recenti operazioni di taratura del modello idrodinamico, condotte considerando le registrazioni mareografiche di 40 stazioni lagunari, sia in condizioni di marea ordinaria sia in caso di eventi di "acqua alta", alcuni dei quali fortemente perturbati dal vento. Il criterio generale utilizzato lega il valore del coefficiente di scabrezza alla morfologia (distinguendo fra canali, bassifondi, velme e barene).

Le condizioni al contorno necessarie alla soluzione consistono nei livelli imposti su di una sezione trasversale delle bocche di porto, mentre le caratteristiche del vento (direzione e intensità) sono applicate sull'intera superficie lagunare. Tutti i dati presentano una cadenza di 5 minuti e sono forniti dalle stazioni del CPSM del Comune di Venezia. Per quanto riguarda i livelli di marea si tratta di quelli registrati sul lato mare di Diga Sud Lido, di Diga Nord Malamocco e di Diga Sud Chioggia. I dati di intensità e direzione del vento provengono, invece, dalle stazioni di Diga Sud Chioggia e di Le Saline (posta nell'estremità settentrionale della laguna). Il vento è supposto distribuito su tutta l'area presa in esame assegnando i valori di intensità e direzione in 20 stazioni. Di esse 13 sono situate in laguna sud e in mare, e fanno riferimento ai dati registrati a Chioggia, 7 in laguna nord, e fanno riferimento ai dati registrati a Le Saline. La distribuzione assunta per il vento si dimostra essere la più verosimile, poiché, da una campagna di osservazioni eseguita su di un numero significativo di stazioni interne alla laguna di proprietà dell'ISPRA, si sono evidenziati per l'intera laguna centro-meridionale valori di vento molto simili a quelli registrati a Diga Sud Chioggia. Analogo riscontro risulta valido per le stazioni poste nella laguna centro-settentrionale con riferimento alla stazione delle Saline. Utilizzando i dati di vento imposti nelle stazioni individuate, il modello è in grado di calcolare, tramite interpolazione, un campo di vento distribuito che approssima quello reale [6].

Le condizioni iniziali di livello assunto sono caratterizzate da un valore uguale per tutta la laguna, corrispondente a quello osservato in quell'istante nella stazione di Punta della Salute. La correttezza delle condizioni iniziali influisce, tuttavia, solamente nel periodo di tempo di messa a regime del sistema. Il problema pertanto si può aggirare avviando prudenzialmente le simulazioni 24 ore prima dell'inizio dell'evento da analizzare, anche se il modello si dimostra in grado di andare a regime in poche ore.

## 2.2. Taratura e verifica del coefficiente di attrito del vento

Preliminarmente si è proceduto alla taratura del coefficiente di attrito del vento  $C_d$  agente sulla superficie libera, contenuto nella (1), attraverso il quale si introduce la tensione tangenziale esercitata sulla superficie libera stessa. Il processo è consistito nel simulare tramite il modello alcuni eventi del recente passato, caratterizzati da venti sufficientemente intensi. Le simulazioni hanno coinvolto diverse ipotesi per i valori del coefficiente di attrito  $C_d$ , in modo da confrontare i risultati dei livelli di marea ottenuti in determinate stazioni con i dati osservati e stabilire quale fosse il valore che meglio si adattava a riprodurre la situazione reale.

Sono stati selezionati 5 eventi per la taratura e altri 11 per veri-



ficare la consistenza dei risultati ottenuti con il coefficiente di attrito scelto (Tab. I). I criteri di selezione degli eventi di marea da considerare sono stati il raggiungimento della soglia di marea sostenuta a Punta della Salute (80 cm ZMPS) e la presenza di un vento che spira con velocità superiori a 12 m/s durante le ore poste a cavallo del colmo di marea.

Tab. I - Caratteristiche principali degli eventi selezionati per la taratura (evidenziati in giallo) e la verifica (evidenziati in azzurro) del coefficiente di attrito  $C_d$ : data, direzione e intensità del vento.

EVENTI DI TARATURA E DI VERIFICA DEL COEFFICIENTE DI ATTRITO									
Data Evento	Direzione vento (°N)	Intensità vento (m/s)							
18 / 01 / 04	50	19							
28 / 02 / 04	20	18							
10 / 11 / 04	40	18							
04 / 03 / 08	30	20							
01 / 12 / 08	175	16							
06 / 11 / 00	155	18							
16 / 11 / 02	125	12							
24 / 09 / 04	50	24							
03 / 12 / 05	165	12							
19 / 03 / 07	205	13							
14 / 09 / 08	35	16							
28 / 11 / 08	30	18							
26 / 12 / 08	60	18							
09 / 03 / 10	45	23							
01 / 11 / 12	10	15							
11 / 11 / 12	120	15							







Fig. 6 - Evento di taratura del 28 febbraio 2004: livelli di marea nelle tre zone significative della laguna (meridionale, centrale e settentrionale) al variare del coefficiente d'attrito  $C_d$  del vento.

Operativamente si è proceduto considerando per il coefficiente di attrito  $C_d$  l'intervallo 0 ÷ 0.2 con un passo di 0.01.

Le simulazioni di taratura e di verifica hanno avuto durata pari a 72 ore, in modo che per ogni evento preso in considerazione l'azione del vento si collocasse nella parte centrale del periodo di calcolo.

Nel procedimento di taratura sono state scelte 5 stazioni mareografiche del CPSM, situate in corrispondenza dei principali centri abitati, sulle quali si sono eseguiti i confronti: Punta della Salute, Murano, Chioggia, Burano e Le Saline. La scelta di queste stazioni rispetto a quelle più numerose dell'ISPRA trova motivazione sia nel fatto che per esse le registrazioni hanno cadenza di 5 minuti sia nella minor frequenza di dati mancanti per il periodo esaminato.

Come esempio di procedimento di taratura si riportano i risultati ottenuti per l'evento del 28 febbraio 2004, associato a un intenso vento di bora, per il quale i livelli osservati sono confrontati con quelli simulati dal modello nelle stazioni di riferimento poste rispettivamente nella laguna meridionale, centrale e settentrionale, assumendo diversi valori del coefficiente di attrito  $C_4$  (Fig. 6).

I risultati evidenziano l'importanza del valore assunto per il coefficiente di attrito nella determinazione del livello di marea. Per ciascuna delle stazioni di riferimento considerate, è stato coperto l'intervallo temporale di un giorno intero (28 febbraio), al fine di evidenziare come il valore del coefficiente  $C_d$  comporti differenze minime quando il vento soffia con intensità trascurabile, ovvero durante le prime 12 ore del 28 febbraio. Nelle 12 ore successive, in cui il vento soffia con intensità maggiore, è possibile visualizzare con un certo grado di dettaglio le differenze che si registrano al variare del coefficiente di attrito  $C_d$ . Si nota come a una variazione di 0.01 del coefficiente di attrito corrisponda una variazione di livello di marea pari a circa un centimetro. È quindi questo l'ordine di grandezza dell'eventuale errore che si commetterebbe nella scelta di tale coefficiente, piccolo rispetto all'entità del fenomeno che si intende simulare se la scelta non è esageratamente lontana dalla realtà.

Per l'individuazione del valore più appropriato del coefficiente di attrito si è minimizzato l'errore, definito come valore assoluto della differenza tra i valori osservati e quelli simulati dal modello, per i 5 eventi di marea di taratura considerati, durante le 12 ore in cui è mas-



Fig. 7 - Andamento dell'errore medio assoluto per i 5 eventi scelti per la taratura al variare del coefficiente di attrito del vento. Ogni linea colorata è riferita a una diversa stazione, la linea rossa in grassetto ne rappresenta invece la media.

sima l'intensità del vento (720 dati utili in totale per ognuna delle 5 stazioni di confronto).

I risultati della procedura sono riassunti nella Fig. 7 (5 eventi x 12 ore x 12 dati utili all'ora) nella quale, per ogni stazione, si rappresenta con colore diverso l'errore assoluto, mediato nelle 12 ore scelte per i 5 eventi considerati, al variare del coefficiente  $C_d$ . Il punto di minimo della curva di colore rosso, che rappresenta la media tra le 5 stazioni, fornisce un valore del coefficiente di attrito  $C_d$  che minimizza l'errore pari a 0.08.

Si nota come l'errore assoluto medio relativo al coefficiente di attrito scelto sia di poco superiore a 2 cm, valore ampiamente accettabile e dell'ordine degli errori casuali dovuti a oscillazioni locali dei livelli di marea o a errori di misura e/o taratura relativi alle stazioni mareografiche di confronto.

Il passo successivo riguarda il processo di verifica del valore scelto per il coefficiente di attrito. La verifica ha interessato gli 11 eventi

riportati in Tab. I, i quali ricoprono in maniera completa le più frequenti direzioni del vento durante gli eventi di "acqua alta". In particolare sono presenti 4 eventi di scirocco (125-165° N), 6 eventi di bora (30-60° N) e un evento di libeccio (205° N). La verifica consiste nella comparazione fra i livelli calcolati dal modello, utilizzando il coefficiente  $C_d$  pari a 0.08 che minimizza gli errori per gli eventi di taratura, e quelli osservati. Allo scopo sono state prese in esame 15 diverse stazioni: 5 del CPSM, già considerate nel processo di taratura, e 10 dell'ISPRA, in modo da coprire l'intera superficie lagunare (Fig. 1, pannello destro).

Un primo confronto fra le curve di livello simulate e quelle registrate per ciascun evento e per ciascuna delle stazioni, indica una quasi perfetta corrispondenza di valori. Per un'analisi globale e soprattutto statisticamente robusta dei risultati, gli scostamenti risultanti sono stati studiati tramite tre parametri statistici: il Nash-Sutcliffe Model Efficiency (*ME*), il Percentage Model Bias (*PB*) e lo Scatter Index (*SI*), ampiamente utilizzati nella letteratura scientifica con queste finalità.

L'indice di efficienza di Nash-Sutcliffe (*ME*), in particolare, è una misura del rapporto tra l'errore del modello e la variabilità dei dati osservati ed è dato dalla differenza tra la prestazione di un modello "perfetto" (l'unità) e quella del modello utilizzato:

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

dove d è il dato osservato, m è il corrispondente valore stimato dal modello e D rappresenta la media dei dati osservati. L'indice di efficienza del modello è stato utilizzato per due verifiche: la prima riguarda l'efficienza del modello nel simulare la propagazione dell'onda di marea (in questo caso l'indice è stato denominato  $ME_p$ ), la seconda riguarda l'efficienza del modello nel simulare il solo contributo del vento. L'indice in questo caso è stato denominato  $ME_V$ . La differenza consiste nella valutazione del termine D, il quale in  $ME_p$ indica il livello medio dell'ampiezza dell'onda di marea, mentre in  $ME_V$  la grandezza è ottenuta tramite una media mobile sulle 6 ore in cui i contributi da vento sono massimi nella stazione considerata. In breve  $ME_p$  misura l'errore nella stima del livello pesato sul livello medio dell'ampiezza d'onda di marea, mentre  $ME_V$  pesa tale errore sul livello medio osservato del contributo da vento.

Il secondo indice considerato, il Percentage Model Bias (*PB*), valuta l'errore del modello normalizzato con il corrispondente dato osservato:

$$PB = \frac{|d-m|}{d} \cdot 100 \tag{3}$$

Esso è stato introdotto per valutare l'errore del modello nei riguardi della simulazione degli effetti del vento sui livelli ed è stato indicato con  $PB_V$ . Per questo motivo nello specifico la sua formulazione cambia leggermente rispetto a quella classica sopra indicata. Al numeratore, infatti, si è inserito il valore assoluto dell'errore, mentre al denominatore non si considera il valore di livello osservato, ma il solo contributo dovuto al vento.

Il terzo indice (Scatter Index *SI*) è definito come la radice dell'errore quadratico medio, normalizzato sulla media dei dati osservati:

$$SI = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}(d-m)^2}}{D} \tag{4}$$

essendo n il numero di dati. Anche questo parametro è stato calcolato con riferimento al solo contributo di sovralzo dovuto al vento sul livello di marea. Questa scelta dal punto di vista teorico penalizza i risultati forniti dai 3 test in termini di prestazione del modello. L'obiettivo, tuttavia, è proprio quello di valutare l'errore pesato sulla grandezza misurata, che corrisponde al contributo del solo vento.

I valori degli indici, ottenuti per ogni evento e per ogni stazione presa in considerazione, sono riassunti nelle Figg. 8 e 9, assegnando ad ogni cella un colore in relazione categoria di prestazione del modello, secondo la classificazione, presente in letteratura, specificata nella Tab. II.

I risultati relativi ai valori degli indici  $ME_p$ ,  $ME_V$ ,  $PB_V$ ,  $SI_V$  utilizzati per testare l'efficienza del modello nel riprodurre la propagazione dell'onda di marea ( $ME_p$ ) e il solo contributo del vento ( $ME_V$ ,  $PB_V$ ,  $SI_V$ ) sono sintetizzati nelle Figg. 8 e 9.

	Valore assunto	Prestazione	Colore cella
	> 0.65	Eccellente	
ME	0.65 - 0.50	Molto Buona	
INC	0.50 - 0.20	Buona	
	< 0.20	Scarsa	
	< 10	Eccellente	
DD	10 - 20	Molto Buona	
PD	20 - 40	Buona	
	> 40	Scarsa	
	< 0.3	Eccellente	
	0.3 - 0.5	Molto Buona	
51	0.5 - 1	Buona	
	>1	Scarsa	

Tab. II – Classificazione dei valori assunti dai tre indici statistici considerati nella fase di verifica del coefficiente di attrito idrodinamico  $C_d$ .

Per la lettura delle figure è da tener presente che le celle con sfondo bianco e simbolo #N/D indicano la mancanza dei dati osservati in quella stazione per quel dato evento. Su di essi quindi non è possibile proporre alcun confronto. Le celle con sfondo grigio e simbolo N/S indicano, invece, che il contributo dovuto al vento sul livello di marea (calcolato come la differenza tra i valori osservati e i valori simulati dal modello imponendo vento nullo) non è significativo, ovvero è inferiore a un limite assunto pari a 4 cm. La causa principale di un tale risultato è riconducibile alla posizione baricentrica della stazione in oggetto rispetto alla lunghezza del fetch (Fig. 10).

Si può concludere che i valori dei tre parametri per quanto riguarda la propagazione dell'onda di marea indicano un eccellente corrispondenza tra livelli calcolati e osservati per tutte le stazioni. Per quanto riguarda l'effetto del vento sui sovralzi, gli indici considerati assegnano al modello una valutazione molto buona. Eventuali errori non sono superiori a qualche centimetro, comparabili con gli errori di misura delle stazioni di registrazione e con le oscillazioni locali interne alla laguna dei livelli di marea che possono perturbare i valori osservati.

## 1.3. Modalità di chiusura delle bocche di porto

La chiusura delle bocche di porto è stata simulata nel modello incrementando, a un istante fissato con criteri definiti, la quota del

								Indice	ΜE <sub>P</sub>									
Data	Ora	DV [°N]	VV [m/s]	SAL	MUR	сні	BUR	SAL	GRA	PAG	SER	FUS	BRO	SET	VAL	EXP	FIG	AVE
6/11/2000	19	145	18	0.999	#N/D	0.997	#N/D	#N/D	0.999	#N/D	0.998	0.998	0.997	0.991	0.998	0.999	#N/D	#N/C
16/11/2002	14	125	12	0.999	#N/D	0.990	#N/D	0.996	0.997	1.000	0.998	0.999	0.986	0.994	0.995	0.999	0.998	0.998
24/9/2004	18	50	24	0.996	0.994	0.992	#N/D	0.999	0.970	0.991	0.997	0.997	#N/D	0.994	0.996	0.999	0.994	0.991
3/12/2005	12	165	12	1.000	0.999	0.999	0.997	0.997	#N/D	0.998	0.996	0.998	0.999	1.000	1.000	0.999	0.999	0.999
19/3/2007	10	205	13	0.994	0.969	0.997	0.989	0.987	0.990	#N/D	0.992	0.998	0.989	0.998	0.995	0.999	0.961	0.993
14/9/2008	14	35	16	0.996	0.988	0.992	0.995	0.994	0.983	0.999	0.995	0.997	#N/D	0.999	0.997	0.999	0.990	0.991
28/11/2008	16	30	18	0.999	0.998	0.999	0.999	0.998	0.996	0.999	0.997	0.999	0.995	0.999	0.999	0.999	1.000	0.998
26/12/2008	5	60	18	0.997	0.997	0.997	0.999	0.992	0.985	0.996	0.997	0.993	0.996	0.999	0.998	0.999	0.995	0.995
9/3/2010	7	45	23	0.990	#N/D	0.999	0.994	0.997	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1/11/2012	1	40	16	0.999	#N/D	0.995	0.999	0.991	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
11/11/2012	12	140	15	0.999	#N/D	0.997	0.999	0.999	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
	1	DV	10/					indice	e ME <sub>V</sub>									
Data	Ora	[°N]	[m/s]	SAL	MUR	СНІ	BUR	SAL	GRA	PAG	SER	FUS	BRO	SET	VAL	EXP	FIG	AVE
6/11/2000	19	145	18	0.674	#N/D	0.651	#N/D	#N/D	0.948	#N/D	0.769	0.506	0.777	N/S	N/S	0.645	#N/D	#N/D
16/11/2002	14	125	12	0.930	#N/D	N/S	#N/D	N/S	0.796	0.897	N/S	0.849	N/S	N/S	N/S	N/S	0.868	0.901
24/9/2004	18	50	24	N/S	N/S	N/S	#N/D	0.890	0.815	0.479	0.721	0.702	#N/D	N/S	N/S	N/S	0.676	0.253
3/12/2005	12	165	12	0.891	0.906	0.809	0.508	0.532	#N/D	0.906	0.677	0.737	0.924	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
19/3/2007	10	205	13	N/S	N/S	0.882	0.380	0.748	0.640	#N/D	0.856	N/S	0.881	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
14/9/2008	14	35	16	0.645	0.588	0.877	0.890	0.707	0.688	0.896	0.807	N/S	#N/D	0.889	0.886	N/S	0.771	0.815
28/11/2008	16	30	18	0.819	0.817	0.668	0.492	0.465	0.232	0.680	0.594	N/S	0.530	0.899	0.790	N/S	0.363	0.252
26/12/2008	5	60	18	0.689	0.900	0.603	0.957	0.672	0.752	0.782	0.896	N/S	0.775	0.895	0.849	N/S	0.789	0.767
9/3/2010	7	45	23	0.249	#N/D	0.750	0.794	0.877	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1/11/2012	1	40	16	0.653	#N/D	0.448	0.979	0.993	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
/ /	4.5	140	15	0 774	44N1 / D	0.220	0 7 2 2	0.000	#N1/D	#N1/D	#N1/D	44N1 / D	44 M	44 L /D	#NI/D	#NI/D	#NI/D	461/0

Fig. 8 - Valori assunti dall'indice ME per la verifica del coefficiente di attrito del vento. I colori fanno riferimento alla classificazione riportata in Tab. II

## sui sovralzi dei colmi di marea generati dal vento 207



Fig. 10 - Esempi di stazioni che per determinate direzioni del vento risultano baricentriche rispetto al fetch, rendendo non significativo il valore degli indici statistici introdotti.

fondo degli elementi bidimensionali posti sulle tre bocche in corrispondenza degli alloggiamenti delle paratoie mobili. La quota finale di sollevamento delle paratoie è fissata a 3 m sullo ZMPS.

In via preliminare si è indagato l'effetto della velocità di sollevamento delle paratoie sui livelli finali interni e sulle portate nei canali lagunari antistanti le bocche. Il progetto indica un tempo di mezz'ora circa per completare l'intero processo di chiusura.

								Indice	e PB <sub>v</sub>									
Data	Ora	DV [°N]	VV [m/s]	SAL	MUR	СНІ	BUR	SAL	GRA	PAG	SER	FUS	BRO	SET	VAL	EXP	FIG	AVE
6/11/2000	19	145	18	6.2	#N/D	11.8	#N/D	#N/D	3.8	#N/D	8.7	7.7	5.6	N/S	N/S	8.3	#N/D	#N/D
16/11/2002	14	125	12	5.2	#N/D	N/S	#N/D	N/S	21.4	2.7	N/S	2.1	N/S	N/S	N/S	N/S	8.9	5.7
24/9/2004	18	50	24	N/S	N/S	N/S	#N/D	4.3	5.5	16.1	6.6	13.3	#N/D	N/S	N/S	N/S	12.7	16.1
3/12/2005	12	165	12	2.9	3.1	8.9	19.3	20.7	#N/D	5.9	13.8	12.2	2.3	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
19/3/2007	10	205	13	N/S	N/S	16.4	28.3	19.9	19.8	#N/D	9.5	N/S	2.8	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
14/9/2008	14	35	16	18.1	19.6	5.0	2.0	5.6	5.0	4.2	9.8	N/S	#N/D	4.7	3.0	N/S	9.3	10.4
28/11/2008	16	30	18	9.7	8.8	14.7	7.8	14.2	26.4	11.8	9.9	N/S	28.7	4.1	0.8	N/S	14.2	11.9
26/12/2008	5	60	18	10.0	5.6	8.4	1.7	14.9	7.7	2.8	8.3	N/S	6.0	3.4	3.6	N/S	10.9	8.6
9/3/2010	7	45	23	10.5	#N/D	2.9	3.5	1.9	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1/11/2012	1	40	16	9.7	#N/D	19.8	1.5	0.3	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
11/11/2012	12	140	15	7.1	#N/D	24.6	14.4	29.4	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
								Indic	e Sl <sub>v</sub>									
Data	Ora	DV [°N]	VV [m/s]	SAL	MUR	СНІ	BUR	SAL	GRA	PAG	SER	FUS	BRO	SET	VAL	EXP	FIG	AVE
6/11/2000	19	145	18	0.116	#N/D	0.227	#N/D	#N/D	0.199	#N/D	0.240	0.119	0.252	N/S	N/S	0.164	#N/D	#N/D
16/11/2002	14	125	12	0.118	#N/D	N/S	#N/D	N/S	0.370	0.319	N/S	0.071	N/S	N/S	N/S	N/S	0.142	0.131
24/9/2004	18	50	24	N/S	N/S	N/S	#N/D	0.017	0.100	0.278	0.166	0.424	#N/D	N/S	N/S	N/S	0.260	0.394
3/12/2005	12	165	12	0.050	0.100	0.213	0.270	0.283	#N/D	0.442	0.508	0.254	0.117	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
19/3/2007	10	205	13	N/S	N/S	0.316	0.488	0.299	0.292	#N/D	0.274	N/S	0.198	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
14/9/2008	14	35	16	0.273	0.297	0.123	0.064	0.105	0.307	0.108	0.267	N/S	#N/D	0.055	0.058	N/S	0.410	0.253
28/11/2008	16	30	18	0.201	0.215	0.215	0.130	0.199	0.416	0.225	0.133	N/S	0.436	0.008	0.166	N/S	0.272	0.269
26/12/2008	5	60	18	0.172	0.118	0.135	0.043	0.213	0.118	0.053	0.146	N/S	0.209	0.085	0.446	N/S	0.137	0.274
9/3/2010	7	45	23	0.158	#N/D	0.065	0.060	0.024	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
1/11/2012	1	40	16	0.158	#N/D	0.275	0.030	0.011	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D
11/11/2012	12	140	15	0.102	#N/D	0.378	0.237	0.467	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D

Fig. 9 - Valori assunti dagli indici PB ed SI per la verifica del coefficiente di attrito del vento. I colori fanno riferimento alla classificazione riportata in Tab. II.

RICCARDO MEL, LUIGI D'ALPAOS

Con queste finalità si sono scelte quattro modalità di chiusura:

- sollevamento delle paratoie a velocità uniforme nell'arco di tempo di mezz'ora;
- sollevamento delle paratoie a velocità uniforme completato nell'arco di tempo di un'ora;
- sollevamento delle paratoie a velocità non uniforme completato nell'arco di tempo di mezz'ora;
- sollevamento delle paratoie a velocità non uniforme completato nell'arco di tempo di un'ora.

Per velocità non uniforme si intende l'ipotesi che il sollevamento avvenga con la stessa velocità tranne che nel tratto finale della manovra, compreso tra i -2 a 0 m di tirante al di sopra della sommità delle paratoie, intervallo all'interno del quale la velocità di sollevamento è dimezzata.

Simulando tutte le modalità di chiusura prospettate mediante il modello matematico, si riscontra la comparsa di un'onda impulsiva che si propaga sia a monte (lato mare) che a valle dello sbarramento (lato laguna). In laguna si registra un rapido abbassamento di livello, con propagazione di un'onda negativa nel verso del flusso della marea entrante, mentre in mare si riscontra un significativo innalzamento della superficie libera con successiva generazione di forti oscillazioni di livello all'interno delle bocche. L'altezza delle onde generate è grossomodo direttamente proporzionale alla velocità di chiusura delle bocche di porto.

Il fenomeno, analizzato in maniera approfondita in passato, non è di particolare significato ma soprattutto non ha un'influenza pratica sui risultati qui illustrati, che mirano a determinare i livelli finali che si instaurano all'interno della laguna una volta chiuse le bocche. I risultati indicano infatti che tra le diverse modalità di chiusura non sussistono differenze significative in termini di livello, le quali si attestano intorno al punto percentuale per i quattro differenti casi considerati.

È possibile concludere che, in mancanza di più dettagliate informazioni circa la manovra di sollevamento delle paratoie e non essendo state evidenziate particolari differenze tra le quattro diverse modalità di chiusura, la velocità di sollevamento può essere assunta costante con un tempo di chiusura pari a mezz'ora, come peraltro riportato nello Studio di Impatto Ambientale redatto a suo tempo dal Magistrato alle Acque.

### 3. Commento sui risultati

Il fenomeno dei sovralzi differenziati indotti dal vento risulta essere non trascurabile già nelle attuali condizioni di flusso libero alle bocche di porto. Nei casi in cui l'effetto del vento si associ a condizioni favorevoli al fenomeno dell'acqua alta, tali differenze di livello possono essere il discrimine per l'allagamento dei centri abitati all'interno della laguna, come Venezia, Chioggia, Murano e Burano, i quali, essendo situati in zone diverse, sono penalizzati da differenti direzioni del vento.

Le finalità dell'indagine sono quelle di esaminare se la chiusura delle bocche di porto, nei modi e nei tempi previsti dal progetto in presenza di venti di forte intensità, abbia un'influenza sull'entità dei dislivelli generati, potendo provocare un allagamento non previsto di uno o più centri abitati. L'ipotesi che si vuole suffragare è che i dislivelli generati in laguna dallo spirare di venti intensi, con barriere chiuse, potranno essere significativamente maggiori rispetto a quelli della condizione attuale, in cui le paratoie non sono ancora operative. Il procedimento adottato nell'analisi è stato il seguente:

- scelta di alcuni eventi recenti con livello maggiore o uguale a 110 m su ZMPS, per i quali si sarebbe dovuto prevedere la chiusura delle bocche, associati a un vento intenso con un'ampia casistica di direzioni;
- simulazione mediante il modello matematico idrodinamico di tali eventi, con bocche aperte e chiuse;
- confronto dei livelli che si determinano in diverse stazioni mareografiche distribuite all'interno della laguna, in modo da valutare le differenze tra i dislivelli che si generano nelle due differenti condizioni considerate per le bocche.

#### 3.1. Caratteristiche tecniche per le simulazioni

Gli eventi presi in considerazione sono una parte di quelli già utilizzati per la taratura del coefficiente di attrito  $C_d$  e sono riportati nella Tab. III:

Tab. III – Eventi di marea che hanno superato i 110 cm sullo ZMPS associati a un vento intenso scelti per il confronto dei dislivelli generati sui colmi di marea all'interno della laguna.

EVENTI SCELTI PER IL CONFRONTO DEI DISLIVELLI

Data Evento	Direzione Vento (°N)	Intensità vento (m/s)
06/11/00	50	19
13/11/01	20	18
16/11/02	40	18
10/11/04	30	20
03/12/05	175	16
01/12/08	155	18
01/11/12	125	12
11/11/12	50	24

Le simulazioni condotte con il modello matematico bidimesionale si sono basate sulle seguenti condizioni e ipotesi:

- durata delle simulazioni pari a 72 ore, con condizione di vento intenso che si colloca nella parte centrale del periodo considerato;
- passo temporale di acquisizione dei risultati di 5 minuti, pari alla cadenza delle registrazioni mareografiche del CPSM;
- condizioni al contorno di livello imposte alle bocche a Diga Sud Lido, Diga Nord Malamocco e Diga Sud Chioggia;
- imposizione della forzante dovuta al vento (direzione e intensità), attraverso i dati osservati ogni 5 minuti, registrato nelle stazioni del CPSM di Diga Sud Chioggia e di Le Saline;
- sforzo tangenziale indotto dal vento valutato con coefficiente di attrito C<sub>4</sub> pari a 0.08;
- chiusura contemporanea di tutte e tre le bocche in modo tale che le paratoie risultino completamente sollevate al raggiungimento

di un livello prefissato sullo ZMPS alla bocca di Lido. Poiché questo livello non è stato ancora definito in via ufficiale, per ogni evento esaminato si sono eseguite più simulazioni, modificando il momento in cui incomincia la manovra di chiusura delle bocche, considerando 10 diversi momenti iniziali. Il primo di essi corrisponde al raggiungimento del valore di 110 cm (ZMPS), alla bocca di Lido; i restanti momenti di inizio della manovra sono ottenuti anticipando la chiusura di 20 minuti fino ad arrivare a sollevare le paratoie tre ore prima di raggiungere quota 110 cm (ZMPS);

 riapertura delle bocche nella fase di marea calante al pareggio tra i livelli esterni e interni a ogni bocca di porto. L'istante in cui tale fase inizia può cambiare leggermente da bocca a bocca, ma risulta in pratica ininfluente sui risultati ottenuti.

Al fine di poter eseguire tutti confronti ritenuti opportuni si sono condotti tre diversi tipi di simulazione, considerando:

- gli eventi di Tab. III senza chiusura delle paratoie in presenza di vento;
- gli eventi di Tab. III con inizio della chiusura delle paratoie in ciascuno dei 10 momenti precedentemente descritti;
- gli eventi di Tab. III con chiusura delle paratoie facendo cessare il vento dopo mezzora dalla completa chiusura delle bocche, in modo da evidenziare i sovralzi che il vento è in grado di generare.

In via preliminare si è verificata l'affidabilità del modello nel caso degli eventi presi in esame, confrontando i valori osservati con quelli simulati nell'ipotesi di bocche aperte in tutte le stazioni scelte. I risultati si confermano più che buoni, con un errore medio di 3 cm circa durante le 12 ore per le quali risulta massima l'intensità del vento. Tale errore si riduce a 2 cm se si considerano le sole stazioni mareografiche del CPSM.

## 3.2. Analisi dei dislivelli calcolati

L'analisi dei risultati ottenuti ha coinvolto tutte le stazioni di riferimento individuate per ciascun evento considerato e per tutti i 10 momenti scelti come inizio della manovra di chiusura.

Fissato un istante per la chiusura (nello specifico, a titolo esemplificativo, il momento in cui si raggiunge la soglia di 110 cm ZMPS a Diga Sud Lido), è possibile evidenziare le condizioni che si realizzano in laguna con bocche chiuse nel caso di due degli eventi esaminati (10 novembre 2004 e 6 novembre 2000), rappresentativi rispettivamente di situazioni caratterizzate dalla presenza di venti di bora e di scirocco particolarmente intensi.

#### 3.3. Evento del 10 novembre 2004

212

L'evento del 10 novembre 2004 è importante con riferimento al contributo fornito dal vento ai livelli di marea, essendosi registrati picchi di 124 cm ZMPS a Venezia e di 144 cm ZMPS a Chioggia.

Si tratta di un evento di bora con velocità del vento di 18 m/s, pressoché costante durante le 12 ore a cavallo del colmo (Fig. 11). La costanza dell'intensità del vento permette di delineare chiaramente i dislivelli che si vengono a creare tra le stazioni situate rispettivamente a nord e a sud della laguna in seguito alla chiusura delle bocche (Fig. 12). Si riscontra in particolare che fra Punta della Salute e Chioggia il dislivello che si genera a causa del vento a bocche chiuse è quasi triplicato rispetto alla situazione con bocche di porto aperte. Da notare che a bocche aperte l'incremento del livello di marea al colmo a Chioggia dovuto al vento risulta superiore di 35 cm rispetto alla condizione simulata in assenza di vento. Fra Punta della Salute e Burano, invece, i dislivelli sono molto simili nelle due condizioni di bocche aperte e chiuse (Fig. 12). Il fatto è dovuto sia alla scarsa influenza indotta in questa parte di laguna dalla circolazione secondaria fra le bocche, sia all'annullamento, in condizioni di bocche chiuse, della riduzione d'ampiezza dell'onda di marea entrante, causata dalla propagazione, che tende a innalzare il livello a Burano. La circostanza giustifica la leggera riduzione del dislivello calcolato fra le due stazioni in condizioni di bocche aperte e di bocche chiuse.

Quanto all'andamento nel tempo dei dislivelli di marea fra le stazioni poste a confronto (curve tracciate in verde nella Fig. 12), è opportuno precisare che l'andamento stesso a bocche aperte risente del ritardo di fase dell'onda di marea (20 minuti di anticipo per Chioggia e 40 minuti di ritardo per Burano rispetto a Punta della Salute). Tali



Fig. 11 - Direzione e intensità del vento per l'evento di "acqua alta" del 10 novembre 2004.



Fig. 12 - Confronto dei livelli e dei dislivelli tra Punta della Salute e Chioggia in condizioni di bocche di porto aperte e chiuse per l'evento del 10 novembre 2004. La linea rossa in grassetto indica la differenza di livello tra le due stazioni a bocche chiuse mentre quella arancio indica la differenza a bocche aperte. Le linee tratteggiate verticali si riferiscono rispettivamente ai momenti in cui si concludono le manovre di apertura e di chiusura delle bocche.

sfasamenti non sussistono a bocche chiuse. Per questo motivo, nel confrontare l'andamento delle curve dei dislivelli, il ritardo di fase è stato "filtrato" durante il periodo in cui le paratoie non sono in funzione, al fine di rendere il confronto omogeneo dal punto di vista temporale.

## 3.4. Evento del 6 novembre 2000

Questo evento si colloca all' 11° posto nella serie dei maggiori eventi di "acqua alta" del XX e XXI secolo osservati a Punta della Salute. Qui nella serata del 6 novembre 2000 la marea raggiunse alle ore 20:35 la quota di 144 cm ZMPS. Il fenomeno fu generato da forti venti meridionali originati da un rilevante gradiente barico. Nell'occasione la pressione diminuì a Venezia di 27 millibar in 24 ore e nel pomeriggio nella città lagunare si abbatté un violento temporale causato da un fronte d'aria fredda. Il contributo meteorologico alla marea fu di 118 cm alle ore 21, secondo solo a quello dell'acqua granda del novembre 1966 con un valore pari ai due terzi del contributo registrato nel corso di quel tragico evento.

Nel periodo in cui le paratoie sarebbero state sollevate i venti di scirocco, con velocità superiori ai 18 m/s fino alle ore 21.30, avrebbero provocato tra le stazioni di Punta della Salute e Chioggia un dislivello sui colmi di marea doppio rispetto a quello delle condizioni di bocche aperte. In queste condizioni, secondo il calcolo, si determinano livelli molto simili fra Punta della Salute e Burano. In quest'ultima località, a bocche aperte, la riduzione dei livelli dell'onda di marea entrante, a causa della propagazione, diminuisce i livelli stessi e bilancia in una certa misura l'effetto del vento. In condizioni di bocche chiuse, invece, si verifica, sempre secondo il calcolo, un dislivello fra le due stazioni di circa 8 cm, dovuto interamente al vento. Le differenze di livello fra Punta della Salute e Burano per le due diverse condizioni alle bocche sono quindi imputabili soprattutto alle differenti modalità di propagazione dell'onda di marea a bocche aperte e a bocche chiuse, mentre l'interruzione della circolazione secondaria indotta dal vento fra le bocche stesse ha effetti trascurabili.

La Tab. IV consente un confronto fra alcune coppie di stazioni per tutti gli eventi simulati, avendo scelto sempre come instante di sollevamento delle paratoie quello corrispondente al raggiungimento



Fig. 13 - Direzione ed intensità del vento per l'evento di "acqua alta" del 6 novembre 2000.

Tab. IV - Confronto dei dislivelli indotti dal vento e dalla marea in alcune coppie di stazioni significative per tutti gli eventi di "acqua alta" considerati.

	DISLIVELLI MEDI TRA STAZIONI PER EFFETTO DEL VENTO (cm)														
EVENTO DI	CARATTERISTICHE EVENTO DI DEL VENTO			SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			VALGRANDE FUSINA		
ACQUA ALTA	DIR (°N)	VEL (m/s)	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	BOCCHE CHIUSE	BOCCHE APERTE	λ	
06/11/2000	150	18	41	25	1.6	4	3	1.7	46	24	2.0	23	14	1.6	
13/11/2001	70	15	36	19	1.9	<4	/	1	38	27	1.4	10	4	2.3	
16/11/2002	135	10	6	4	1.5	<4	/	1	6	3	2.2	5	5	1.0	
10/11/2004	40	18	52	24	2.2	12	19	0.6	64	40	1.6	19	9	2.1	
03/12/2005	165	12	14	7	1.9	4	2	2.0	16	6	2.6	7	3	2.2	
01/12/2008	175	16	20	10	1.9	5	3	1.4	23	11	2.1	10	3	2.7	
01/11/2012	20	16	36	22	1.6	12	14	0.8	44	36	1.2	14	9	1.5	
11/11/2012	120	15	21	14	1.5	<4	/	1	20	9	2.2	13	12	1.1	

a Diga Sud Lido del livello di marea di 110 cm (ZMPS). Per ogni coppia di stazioni e per ciascun evento esaminato sono riportati tre valori: il primo rappresenta il dislivello medio durante il periodo di chiusura delle bocche, il secondo rappresenta il dislivello medio a bocche aperte, calcolato nel medesimo intervallo temporale, mentre il terzo valore è il coefficiente moltiplicativo calcolato come rapporto fra i due

dislivelli a bocche chiuse e a bocche aperte. Tale rapporto indica di quante volte il dislivello a bocche chiuse aumenta rispetto a quello che si osserva nelle attuali condizioni.

I dislivelli sono calcolati prendendo come intervallo temporale di riferimento per eseguire la media quello compreso tra l'ora successiva alla chiusura delle bocche e l'ora precedente la loro riapertura.

I risultati ottenuti sono di un qualche interesse. L'ipotesi per cui l'interclusione della laguna rispetto al mare comporta un aumento dei dislivelli indotti dal vento è ampiamente confermata. Può sorprendere al più l'entità di tale aumento. Il dislivello generato con paratoie chiuse risulta circa doppio di quello calcolato a bocche aperte nella zona compresa fra le bocche di Lido e di Chioggia. È questa la porzione di laguna soggetta, in condizioni di bocche aperte, alla circolazione secondaria indotta dal vento che si è evidenziata.

Quanto alle differenze riscontrate per le due situazioni di bocche chiuse e aperte fra Venezia e le zone poste a nord della bocca di Lido (ad esempio i dislivelli tra Punta della Salute e Burano) esse devono essere interpretate diversamente. In quest'area la circolazione secondaria, indotta dal vento nella situazione attuale e interrotta dal sollevamento delle paratoie, non ha effetti di un qualche rilievo e quindi le eventuali differenze sono dovute solo al ritardo di fase dell'onda di marea che si realizza a bocche aperte e che, ovviamente, non sussiste più poche decine di minuti dopo la chiusura delle stesse. Per l'evento di "acqua alta" del 6 novembre 2000 (Fig. 14), ad esempio, è chiaramente evidenziato questo risultato. In condizioni di bocche aperte il dislivello negativo di 8 cm nel confronto fra Punta della Salute e Burano dovuto al vento viene in una certa misura bilanciato da un dislivello positivo dovuto alla riduzione dell'ampiezza dell'onda di marea. Gli andamenti dei livelli di marea nelle due stazioni risultano essere conseguentemente molto simili. Nel caso di sollevamento delle paratoie, invece, vengono meno gli effetti della propagazione, facendo emergere il ruolo del sovralzo generato dal vento.

## 3.5. Analisi delle portate alle bocche

Per spiegare in maniera più approfondita la correlazione tra dislivelli indotti dal vento e flussi di scambio con il mare alle bocche



Fig. 14 - Confronto dei livelli e dei dislivelli fra Punta della Salute e Burano in condizioni di bocche di porto aperte e chiuse per l'evento del 6 novembre 2000. La linea rossa in grassetto indica la differenza di livello tra le due stazioni a bocche chiuse, mentre quella arancio indica la differenza a bocche aperte. Le linee tratteggiate verticali indicano rispettivamente i momenti in cui si concludono le manovre di apertura e di chiusura delle bocche.

è opportuno analizzare le variazioni di portata alle tre bocche che si determinano in presenza di vento.

A tal fine si sono analizzati ancora gli eventi del 10 novembre 2004 e del 6 novembre 2000 (Figg. 15 e 16), calcolando con l'ausilio del modello matematico bidimensionale le portate che transitano attraverso le bocche di porto, considerando sia il vento che è stato realmente osservato sia la condizione di vento assente.

Il confronto fra le due situazioni permette di evidenziare l'effetto sulle portate della circolazione secondaria indotta dal vento.

Nel caso dell'evento di "acqua alta" del 10 novembre 2004, in presenza di vento di bora, la portata entrante attraverso la bocca di Lido aumenta sensibilmente, fornendo un maggior apporto d'acqua in laguna settentrionale e centrale. La differenza fra le due situazioni con e senza vento può essere quantificata per la portata massima entrante in circa 3000 m<sup>3</sup>/s. Per quanto riguarda la bocca di Malamocco, in virtù della sua posizione mediana rispetto all'asse della laguna,

120

105

10000

7500

5000





Bocca di Chioggia - Evento del 10 Novembre 2004

10/11/04 0.00

---DIFFERENZE CON-SENZA VENTO ----VENTO CHIOGGIA

-SENZA VENTO

120

105

90

75

45

30

15

0

11/11/04 0.00

VELOCITA' VENTO (m/s)

Fig. 15 - Confronto fra le portate alle 3 bocche di porto in presenza e in assenza di vento nell'evento del 10 novembre 2004. Le portate di flusso entrante nella laguna assumono segno positivo.

12000

9000

6000

3000

ATA (m<sup>3</sup>/s) -3000

ర్ద్ద -6000

-9000

-12000

9/11/04 0.00

-CON VENTO



Bocca di Lido - Evento del 6 Novembre 2000

fronto tra le portate alle 3 bocche di porto in presenza e in assenza di vento nell'evento del 6 novembre 2000. Le portate di flusso entrante nella laguna assumono segno positivo.



non si notano differenze rilevanti. A Chioggia accade, invece, il fenomeno opposto rispetto a Lido, con una diminuzione della portata massima di flusso e un aumento di quella di riflusso. La differenza media si attesta anche in questo caso intorno ai 3000 m<sup>3</sup>/s.

Quando vengono chiuse le bocche le differenze di portata evidenziate fra Lido e Chioggia, non potendo più fluire portata attraverso le bocche, si tramutano in un aumento dei livelli di marea nella laguna meridionale e in una loro diminuzione in quella settentrionale. È pertanto quella indicata la causa che origina il forte aumento dei dislivelli sui colmi di marea che si riscontrano in alcune parti della laguna, confrontando le due situazioni di bocche aperte e chiuse.

Quanto all'evento di "acqua alta" del 6 novembre 2000, dominato da forti venti di scirocco, si evidenziano secondo il calcolo differenze di portata in uscita dalle bocche di Lido e di Malamocco pari a 500 m<sup>3</sup>/s sui valori massimi, mentre a Chioggia la differenza, questa volta sulle portate massime in ingresso, è di circa 2000 m<sup>3</sup>/s. Il predominio complessivo del flusso entrante può essere spiegato con l'effetto di insaccamento dell'acqua nella parte settentrionale della laguna, il quale contribuisce a contenere la diminuzione di portata entrante dalla bocca di Lido, poiché bisogna comunque fornire una portata aggiuntiva per invasare maggiori volumi nelle zone sommerse, a causa del sovralzo indotto dal vento, in laguna nord. Questa condizione perdura finché il vento sostiene con la sua azione le masse d'acqua spinte verso le zone settentrionali della laguna. Una volta ridotto l'effetto del vento, le masse d'acqua accumulate nella laguna settentrionale ridiscendono rapidamente verso sud, come risulta dall'aumento della portata di riflusso attraverso le bocche di Lido e di Malamocco.

Si può concludere che nel caso di venti di scirocco la bocca di Chioggia esercita un'azione calmieratrice sui dislivelli generati dal vento all'interno della laguna, fornendo consistenti portate che innalzano il livello nelle zone meridionali della laguna stessa, riducendo i dislivelli con la parte nord occidentale. Quando le bocche sono chiuse, questo processo viene a mancare, provocando un'accentuazione delle differenze di livello che si generano fra Venezia e Chioggia.

Come ulteriore conferma di quanto esposto si possono esaminare



Fig. 17 - Confronto tra i livelli marea all'interno della laguna calcolati dal modello matematico due ore prima del colmo di marea in condizioni di bocche aperte (pannello sinistro) e chiuse (pannello di destra) per l'evento di "acqua alta" del 10 novembre 2004 in presenza di venti di bora.



Fig. 18 - Confronto tra i livelli di marea all'interno della laguna calcolati dal modello matematico due ore prima del colmo di marea in condizioni di bocche aperte (pannello di sinistra) e chiuse (pannello di destra) per l'evento di "acqua alta" del 6 novembre 2000 dominato da venti di scirocco.

i risultati ottenuti per i livelli di marea in tutta la laguna con il modello bidimensionale per i due eventi di "acqua alta" portati come esempio, caratterizzati entrambi da velocità del vento pari a 18 m/s (Figg. 17 e 18). Sebbene a bocche chiuse all'interno della laguna i livelli

siano mediamente inferiori, si evidenzia chiaramente che i gradienti di livello tra le sue diverse zone sono molto più accentuati.

# 3.6. Effetti di una variazione dell'istante di inizio della manovra di chiusura delle bocche

Il livello di marea a partire dal quale incominciare a chiudere le bocche nel caso di eventi di "acqua alta" non sembra essere stato ancora definito, almeno in via ufficiale. Per chiarire il problema e le sue conseguenze sono state eseguite più simulazioni per ciascun evento di "acqua alta" fra quelli esaminati, trattando tutti i 10 diversi istanti di chiusura. Si ricorda che, nella prima manovra considerata le paratoie iniziano a sollevarsi nel momento in cui è raggiunto il valore di 110 cm (ZMPS) alla bocca di Lido. Nelle altre manovre la chiusura è anticipata di 20 minuti sino ad arrivare via via a tre ore di anticipo rispetto al momento di raggiungimento della quota indicata di 110 cm (ZMPS) a Diga Sud Lido.

Analizzando i risultati delle 10 diverse situazioni considerate si è verificato che i dislivelli generati dal vento non subiscono significative variazioni. La variazione del momento di inizio della manovra di

Tab. V - Si riportano le stesse informazioni della Tab. IV, ma con valori che rappresentano la media dei dislivelli nelle 10 diverse modalità di chiusura e con l'inserimento di due colonne relative alla deviazione standard e alla sua percentuale rispetto alla media.

ME	MEDIA E DEVIAZIONE STANDARD DEI DISLIVELLI SUI 10 DIVERSI TEMPI DI CHIUSURA DELLE BOCCHE													
EVENTO DI	CARATTE DEL V	RISTICHE /ENTO	SALUTE CHIOGGIA			SALUTE BURANO			BURANO CHIOGGIA			VALGRANDE FUSINA		
ACQUA ALTA	DIR (°N)	VEL (m/s)	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%	MEDIA (cm)	DEV. ST. (cm)	%
06/11/2000	150	18	41	2	4.2	4	0	2.2	46	2	3.9	23	1	4.9
13/11/2001	70	15	36	2	4.7	<4	/	1	38	4	9.5	10	1	12.6
16/11/2002	135	10	6	0	0.4	<4	/	1	6	0	2.7	5	0	1.4
10/11/2004	40	18	52	2	3.4	12	1	6.3	64	1	1.7	19	0	2.3
03/12/2005	165	12	14	2	11.6	4	0	3.9	16	3	19.7	7	1	13.1
01/12/2008	175	16	20	1	3.5	5	0	4.1	23	1	5.0	10	0	3.0
01/11/2012	20	16	36	0	0.5	12	1	5.6	44	1	1.7	14	0	2.1
11/11/2012	120	15	21	1	2.4	<4	/	1	20	0	2.0	13	0	2.3

chiusura non influisce quindi significativamente sui dislivelli che si riscontrano fra le diverse parti della laguna a bocche chiuse. La Tab. V riassume per alcune coppie di stazioni e per ciascun evento fra quelli considerati la media dei dislivelli al colmo calcolata considerando le 10 diverse modalità di chiusura delle bocche. In essa è riportata inoltre la deviazione standard e la percentuale di quest'ultima sul dislivello medio calcolato a seconda del diverso anticipo considerato per l'inizio della manovra di chiusura, rispetto a quella corrispondente al raggiungimento della soglia di 110 cm (ZMPS) a Diga Sud Lido.

Si può concludere che la scelta di un eventuale diverso momento di inizio della manovra di chiusura, e quindi di un diverso livello interno in laguna per gli eventi di "acqua alta" interessati dalla presenza di venti che spirano con forti intensità, non influisce, se non in maniera trascurabile, sui dislivelli che si generano tra le diverse parti della laguna nel periodo di tempo in cui le paratoie sono sollevate e, di conseguenza, sui risultati fin qui ottenuti.

## 4. Problemi evidenziati e possibili soluzioni

La valutazione dei sovralzi dovuti al vento che spira sulla superficie lagunare durante gli eventi di "acqua alta" riveste un ruolo importante nella scelta del momento cui dare inizio alla manovra di sollevamento delle paratoie mobili per proteggere dal fenomeno tutti i centri lagunari. Ufficialmente tale istante è stabilito sulla base di un processo decisionale descritto nel documento del Magistrato alla Acque [7] in cui si afferma che la chiusura delle paratoie deve garantire che i livelli massimi di marea all'interno della laguna risultino sempre inferiori al prescelto livello di salvaguardia di 110 cm (ZMPS). Le chiusure inoltre non dovranno avvenire con troppo anticipo rispetto all'effettivo andamento della marea, mentre il sistema di previsione dovrebbe limitare il numero e la durata degli interventi di chiusura delle maree di "acqua alta", al fine di ridurre il loro impatto sulle attività portuali e sull'equilibrio ecologico-ambientale della laguna.

Nel citato documento del Magistrato alle Acque si tiene conto dei sovralzi differenziati dovuti al vento tra le diverse zone della laguna, ma non è considerata nè la possibilità che tali sovralzi possano

cambiare chiudendo le bocche nè è definita una precisa procedura per determinare le conseguenze dei dislivelli che si possono generare.

Nello Studio di Impatto Ambientale (SIA) è indicato un sovralzo a Punta della Salute dovuto a forti venti di scirocco di 2 cm e uno di 22 cm a Chioggia, quando spirano venti di bora. Si tratta di sovralzi che corrisponderebbero a venti con tempo di ritorno pari a 100 anni, caratterizzati, nello studio del Magistrato alle Acque, da intensità di 21 e 22 m/s rispettivamente [8].

Nel documento non ci si pone minimamente il problema che i sovralzi indotti dal vento possano essere, nel caso di chiusura delle bocche, di molto superiori a quelli indicati. In aggiunta, anche nella situazione attuale di bocche aperte, i sovralzi assunti presentano un tempo di ritorno di molto inferiore a quanto sostenuto.

Secondo i risultati ottenuti nel presente studio con riferimento alla condizione di bocche chiuse, a Punta della Salute, in caso di vento di scirocco si avrebbe un sovralzo di 8 cm (evento 6/11/2000), superiore quindi ai 2 cm prospettati dal SIA, pur con intensità del vento inferiori (18 m/s). Tale sovralzo sarebbe persino doppio nella città di Burano, peraltro non citata nel SIA.

Quanto al sovralzo del colmo di marea a Chioggia generato da venti di bora, esso raggiunge i 35 cm (evento 10/11/2004), a sua volta superiore rispetto a quello indicato dal SIA, pur considerando un evento di "acqua alta" con intensità del vento minore (18 m/s) rispetto ai 22 m/s indicati nel documento del Magistrato alla Acque.

I risultati delle simulazioni condotte confermano i dubbi a suo tempo espressi dalla Commissione VIA (Valutazione di Impatto Ambientale) del Ministero dell'Ambiente, la quale nella sezione II.4 del proprio documento scrive: "Il proponente non pare considerare con sufficiente prudenza le conseguenze di simili eventi (i sovralzi differenziati da vento) rispetto alla prospettata strategia di chiusura delle bocche." e ancora : "L'introduzione di coefficienti di correzione che tengono conto delle incertezze previsionali di alcuni contributi al sovralzo (pioggia e vento, entrambi in laguna) e gli ulteriori abbassamenti prudenziali dei livelli di chiusura per alcune classi di eventi a maggior rischio riducono in certa misura le incertezze previsionali dei livelli di chiusura. Tuttavia non sembra sufficiente a evitare il rischio di sottostima dei contributi effettivi al sovralzo di marea precedentemente definiti." Alla luce di queste considerazioni si è ritenuto opportuno esaminare se, nei casi considerati, fosse possibile il superamento della quota di salvaguardia (110 cm ZMPS), pur sollevando le paratoie secondo le procedure indicate dal Magistrato alle Acque.

I risultati ottenuti meritano una qualche riflessione.

4.1. Evento del 6 novembre 2000 - Sovralzo a Punta della Salute, Burano e Pagliaga

L'analisi considera una situazione in cui le paratoie sono sollevate al raggiungimento dei 110 cm (ZMPS) alla stazione di Lido Diga Sud, tenuto ovviamente conto del fatto che all'interno della laguna i livelli di marea sono inferiori a tale limite a causa del ritardo di fase dovuto alla propagazione. Per la marea considerata, in assenza di vento si calcola, mediante il modello matematico bidimensionale, un livello massimo inferiore a 100 cm (ZMPS) su tutta la laguna. In presenza di vento, invece, si calcola con lo stesso modello un livello massimo a bocche chiuse che raggiunge a Punta della Salute il valore di 108 cm (ZMPS), al di sotto del limite di salvaguardia, ma che



Fig. 19 - Livelli di marea calcolati nelle stazioni di Punta della Salute, Burano e Pagliaga a seguito della chiusura delle bocche in occasione dell'evento di "acqua alta" del 6 novembre 2000.

creerebbe comunque disagi a causa del numero di ore di permanenza delle acque al di sopra di 100 cm (ZMPS). A Burano si verificherebbe invece, per oltre 2 ore il superamento dei 110 cm (ZMPS) con picco di 116 cm (ZMPS).

Alcuni dei risultati del calcolo sono illustrati nei grafici di Fig. 19, nella quale sono messi a confronto anche i livelli di marea raggiunti alla stazione di Pagliaga, situata a nord-est di Burano. A Pagliaga il superamento del livello di 110 cm (ZMPS) interesserebbe un periodo di tempo molto più esteso di oltre 4 ore. In ogni caso la manovra di chiusura non garantirebbe il non superamento dei 110 cm (ZMPS) in un centro storico importante come Burano.

## 4.2. Evento del 10 novembre 2004 - Sovralzo a Chioggia e Brondolo

Per questo secondo evento si è scelto ancora come inizio della manovra di chiusura il momento in cui a Diga Sud Lido si raggiunge il livello di 110 cm (ZMPS). A Chioggia, tuttavia, in occasione di eventi di "acqua alta" il livello di salvaguardia non è più di 110 cm (ZMPS) ma di 130 cm (ZMPS). Fino a quest'ultima quota la città dovrebbe essere protetta dagli allagamenti dal sistema chiamato "piccolo Mo.S.E.", installato sul canal Vena in corrispondenza di porta Santa Maria e in prossimità di piazza Vigo.

I risultati del calcolo indicano come la chiusura, la quale realizzerebbe in assenza di vento un livello massimo di marea a Chioggia e a Punta della Salute di circa 100 cm ZMPS (al di sotto quindi del limite di salvaguardia), determini, nel caso soffi il vento effettivamente registrato nell'occasione, il superamento per oltre 4 ore di 130 cm (ZMPS) nella città di Chioggia e di 140 cm (ZMPS) a Brondolo (Fig. 20).

# 4.3. Evento del 1 novembre 2012 - Sovralzo a Chioggia e Brondolo

Per questo evento di "acqua alta", operando nelle stesse condizioni dei due eventi precedenti, secondo il calcolo si determinerebbe a Chioggia un livello superiore al limite di salvaguardia di 130 cm (ZMPS) per circa due ore, con un sovralzo di circa 30 cm rispetto alla condizione di assenza di vento. Per lo stesso evento a Brondolo si



Fig. 20 - Livelli di marea calcolati nelle stazioni di Punta della Salute, Chioggia e Brondolo raffigurati nel periodo di chiusura delle bocche nella simulazione dell'evento del 10 novembre 2004.



Fig. 21 - Livelli di marea calcolati nelle stazioni di Punta della Salute, Chioggia e Brondolo per il periodo di chiusura delle bocche per l'evento del 1 novembre 2012.

realizzerebbe un livello ancora superiore, di quasi 140 cm (ZMPS). Nell'intervallo temporale sopra definito, la città di Chioggia sarebbe allagata, nonostante la presenza del "piccolo Mo.S.E.", la cui efficacia sarebbe ovviamente pregiudicata (Fig. 21).

# 4.4. Chiusura differenziata alle bocche

Una soluzione proposta nel SIA per porre rimedio a eventuali dislivelli locali, pur non prevedendo che essi si possano spingere sino ai valori qui calcolati, consiste nel lasciare aperta la bocca di Chioggia o di Lido, a seconda che soffino venti di bora o di scirocco, al fine di ridurre i dislivelli generati dal vento e evitare, quindi, gli allagamenti nel centro abitato maggiormente penalizzato (Chioggia o Burano).

Prendendo come esempio gli eventi analizzati in precedenza si sono condotte alcune simulazioni per valutare l'efficacia della proposta. Per ogni evento si è studiata la situazione nella quale è mantenuta aperta la bocca posta sopra vento per tutta la durata dell'evento, da confrontare con quella precedentemente analizzata che consiste nel tenere le bocche chiuse durante tutto il periodo.

I risultati sono chiari: la soluzione è negativa non solo per il centro abitato maggiormente penalizzato dal vento, ma più in generale per tutto il bacino lagunare poiché tende a rialzare il livello massimo di marea in tutta la laguna. Il fenomeno riguarda tutti gli eventi analizzati, per tutti i momenti di inizio di manovra alle paratoie considerati. Si riporta l'esempio dell'evento di bora del 10 novembre 2004 con chiusura delle bocche che avviene al raggiungimento, sostanzialmente contemporaneo, di 110 ZMPS a Diga Sud Lido e del livello di salvaguardia a Chioggia (Fig. 22).

Il rialzo dei livelli dovuto a tale manovra, che si realizza in tutta la laguna, può essere facilmente spiegato ponendo a confronto il livello interno della stazione penalizzata, calcolato considerando tutte e tre le bocche chiuse per l'intera durata dell'evento, con il livello registrato sul lato mare della relativa bocca. Quest'ultimo livello risulta essere sempre superiore a quello interno, generando una portata entrante in laguna che innalza i livelli in tutte le stazioni, mantenendo inalterati i dislivelli indotti dal vento.



Fig. 22 - Livelli di marea calcolati nella stazione di Chioggia con le tre bocche chiuse e sola bocca di Chioggia aperta durante tutta la durata dell'evento di bora del 10 novembre 2004.

Un commento sarcastico si impone. Le "sparate" improvvisate e non meditate di alcuni personaggi possono impressionare solo i controllori distratti, ma sono destinate a franare miseramente se messe alla prova.

## 4.5. Aumento del numero di ore di chiusura delle bocche

Alla luce di tutte le analisi svolte appare evidente come l'unica soluzione per fronteggiare l'incremento dei sovralzi dovuto alla chiusura delle bocche sia anticipare convenientemente il momento nel quale le paratoie incominciano a essere sollevate. È una soluzione semplice da attuare dal punto di vista teorico, ma che si scontra inevitabilmente con altre necessità della laguna [9]. Tale anticipo, la cui determinazione precisa coinvolge considerazioni nei riguardi degli equilibri idrodinamici lagunari, sarebbe diverso da evento a evento ma generalmente potrebbe aggirarsi sull'ordine di un'ora o poco più.

Si sono tuttavia già registrati eventi nel recente passato, destinati ad aumentare in misura considerevole alla luce dell'incremento del

livello medio del mare previsto, in cui l'anticipo necessario potrebbe risultare di gran lunga superiore. Si tratta delle situazioni nelle quali il massimo di marea dell'evento da controllare è preceduto da un minimo che si presenta con un livello non sufficientemente ridotto per garantire la salvaguardia di tutti i centri abitati lagunari, ancorché si chiuda proprio al verificarsi di tale minimo. Questa eventualità obbligherebbe di fatto a procedere al sollevamento delle paratoie addirittura prima del raggiungimento del massimo di marea antecedente al minimo considerato, anticipando le manovre di chiusura di almeno una decina di ore.

## 5. Conclusioni

I risultati delle indagini sul comportamento idrodinamico della laguna di Venezia nelle condizioni che si determinano quando si renderà necessario chiudere le bocche di porto per fronteggiare gli eventi di "acqua alta" permettono di evidenziare alcuni aspetti importanti sui quali probabilmente il progettista delle opere e il Magistrato alle Acque, suo controllore, sembra non abbiano condotto i dovuti approfondimenti.

I sovralzi di marea generati dal vento indicati nel SIA che ha accompagnato il progetto delle opere alle bocche sono sottostimati rispetto a quanto risulta dalle simulazioni numeriche sviluppate, i cui risultati sono illustrati nella presente nota. In particolare i sovralzi dei colmi di marea che si determinano a Chioggia quando spira vento di bora con velocità di circa 18 m/s, a bocche chiuse possono arrivare a 36 cm, ben superiori ai 22 cm indicati nello studio del Magistrato alle Acque a bocche aperte, pur avendo considerato un vento di intensità inferiore rispetto a quello ipotizzato nel SIA stesso.

Nei periodi di chiusura delle bocche di porto, in particolare, se sulla laguna spirano venti di forte intensità i dislivelli fra laguna nord e laguna sud sono molto più marcati rispetto a quanto si osserva nella condizione che si manifesta a bocche aperte. Fra Chioggia e Punta della Salute, in particolare, l'aumento dei sovralzi generati è più che doppio.

Come conseguenza, i sovralzi sui colmi di marea indotti dal vento

possono comportare allagamenti inattesi rispetto alle stime riportate nei documenti ufficiali. Infatti nonostante le bocche di porto vengano chiuse realizzando il mantenimento del livello di marea al di sotto del limite di salvaguardia per Venezia, analoga condizione potrebbe non verificarsi durante gli eventi di bora a Chioggia, dove si potrebbero registrare livelli superiori al limite di 130 cm ZMPS. Risulterebbe vanificata in queste situazioni l'efficacia del cosiddetto piccolo MO.S.E., dimensionato probabilmente sulla base di sovralzi di marea generati dal vento a bocche aperte. Problemi analoghi si potrebbero verificare a Burano durante gli eventi di scirocco, dove i colmi di marea potrebbero superare la soglia di 110 cm (ZMPS).

La soluzione indicata nel SIA di una chiusura parziale della laguna in modo da contrastare i sovralzi differenziati dovuti al vento risulta essere non solo totalmente inefficace rispetto all'obiettivo, ma addirittura deleteria, poiché provocherebbe un incremento dei livelli massimi in tutta la laguna.

Alla luce dei risultati ottenuti, l'unica soluzione percorribile consiste in un forte e adeguato anticipo del momento di inizio delle manovre di chiusura degli sbarramenti alle bocche. Ne deriverebbe un aumento del numero di ore chiusura delle bocche, al fine di mantenere in qualunque condizione meteorologica i livelli di marea inferiori a quello di salvaguardia in ogni centro abitato lagunare, con un conseguente impatto sull'ecosistema lagunare non trascurabile.

Superfluo rilevare che la portualità della laguna, che ha pesantemente condizionato le dimensioni dei varchi navigabili alle bocche di porto, sarebbe in prospettiva penalizzata non solo dal previsto aumento del livello medio del mare, ma anche dagli effetti del vento non correttamente valutati a bocche chiuse.

#### 6. Ringraziamenti

I dati di marea sono stati gentilmente forniti dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia, che si ringrazia per la preziosa e sempre tempestiva collaborazione.

## 7. Bibliografia

- Canestrelli P., Mandich M., Pirazzoli A.P., Tomasin A. Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1950-2000), Centro Previsioni e Segnalazione Maree, Città di Venezia, 2001.
- [2] APAT, Stazioni di osservazione Meteo Mareografiche nella laguna di Venezia e nell'arco costiero Nord Adriatico, Rapporti 68, 2006.
- [3] Zecchetto S., Umgiesser G., Brocchini M. Hindcast of a storm surge induced by local real wind fields in the Venice Lagoon, Continental Shelf Research, Vol.17 No.12, 1513-1538, 1997.
- [4] Umgiesser G., Matticchio B. Simulazione delle chiusure delle barriere mobili per gli anni 2000, 2001 e 2002 nella situazione attuale e ipotizzando l'innalzamento del livello medio del mare, consultabile sul sito http://www2.comune.venezia.it/ mose-doc-prg/.
- [5] D'Alpaos L., Defina A. Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon, Computers & Geosciences, 2006.
- [6] Cavaleri L., Bertotti, L. Accuracy of the modelled wind and wave fields in encloses seas. Tellus 56A (2), 167-175, 2004.
- [7] Magistrato alla Acque: Interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea- Studio di impatto ambientale del progetto di massima- Allegato 6 - Tema 5, 1997.
- [8] Ministero dell'Ambiente: Valutazione di impatto ambientale relativa agli interventi alle bocche lagunari per la regolazione dei flussi di marea. Studio di impatto ambientale del progetto di massima, consultabile sul sito http://www2.comune. venezia.it/mose-doc-prg/, 1998.
- [9] D'Alpaos L. Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto, Istituto Veneto di SS.LL.AA., Venezia, 2010.

# UN CRITERIO SEMPLIFICATO PER IL CONTROLLO DEGLI ALLAGAMENTI DEI CENTRI STORICI CAUSATI DAI SOVRALZI INDOTTI DAL VENTO DURANTE LE FASI DI CHIUSURA DELLE BOCCHE DI PORTO

## Riccardo Mel, Luigi D'Alpaos

## 1. Introduzione

Obiettivo del lavoro è lo studio dei livelli di marea che si raggiungono all'interno della laguna nei periodi di vento intenso, con particolare riferimento alle condizioni di flusso interrotto attraverso le bocche determinate dalla chiusura delle paratoie mobili durante gli episodi di "acqua alta".

In una fase preliminare sono esaminati i sovralzi di livello dovuti al vento a bocche aperte e a bocche chiuse, analizzando venti con qualsiasi direzione e intensità, entro i limiti fisici imposti per natura, al fine di ottenere un panorama completo delle casistiche possibili.

Per determinare i livelli al colmo di marea che si raggiungerebbero in laguna nella condizione di bocche chiuse, i sovralzi, calcolati con l'ausilio di un modello matematico, sono sommati al livello di riposo che si otterrebbe durante i periodi di chiusura delle bocche in assenza di vento. Al livello ottenuto in queste ultime ipotesi si è dato il nome di "livello equivalente".

La somma dei livelli equivalenti e dei sovralzi da vento è stata poi confrontata con i valori che si sarebbero ottenuti utilizzando i sovralzi calcolati nelle condizioni attuali con bocche aperte.

Il lavoro si conclude con l'individuazione di un criterio semplice ma efficacie al quale far riferimento per l'individuazione del momento in cui dare inizio alla manovra di chiusura alle bocche. Segue l'applicazione concreta del criterio individuato con il calcolo dei livelli di marea che si si sarebbero raggiunti in laguna durante la chiusura delle bocche nei casi di "acqua alta" registrati nel recente passato, caratterizzati da venti con intensità significativa.



Fig. 1 - Stazioni di registrazione interne ed esterne alla laguna utilizzate nello studio.

Nello specifico, i risultati ottenuti fanno riferimento a sei stazioni di registrazione attive in laguna di Venezia gestite dall'ISPRA o dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree (CPSM). Si tratta di stazioni (Grassabò, Burano, Murano, Punta della Salute, Chioggia Vigo e Brondolo [1]), distribuite in modo da coprire tutti i settori lagunari di interesse, da nord a sud (Fig. 1).

#### 2. Statistiche dei venti in laguna di Venezia

L'azione dinamica del vento ha conseguenze non trascurabili sulla distribuzione dei livelli di marea che si registrano all'interno della laguna di Venezia. Differenti intensità e direzioni del vento comportano a volte differenze notevoli dei livelli massimi raggiunti nelle diverse parti della laguna, con valori che si sommano a quelli generati dalla propagazione dell'onda di marea [2].

Venti dal primo quadrante, come la bora, provocano un apprezzabile innalzamento dei livelli nella laguna meridionale, dove si trova la città di Chioggia, che ne risulta estremamente penalizzata con sovralzi che possono superare attualmente anche i 20 cm. Per risolvere questo problema è stato progettato e realizzato il cosiddetto "piccolo Mo.S.E.", opera che è in grado di proteggere Chioggia fino alla quota di 1.30 m sullo zero mareografico di Punta della Salute (ZMPS). Con un tale intervento si è creduto, erroneamente, di poter difendere dall'allagamento Chioggia con qualsiasi condizione di vento.

Le barriere mobili alle bocche di porto dovrebbero garantire la difesa dalle "acque alte" di Venezia, Murano, Burano e di Chioggia (con l'aggiunta per quest'ultimo centro del cosiddetto piccolo Mo.S.E.), anche in presenza di intensi venti di bora o di scirocco, a seconda dei casi [3], al netto degli errori che potrebbero essere commessi nella previsione dei livelli di marea [4],[5]. L'assunzione implicita del progettista delle opere è che i sovralzi generati dal vento a bocche chiuse siano gli stessi che oggi si osservano a bocche aperte.

Per valutare la credibilità dell'ipotesi si è esaminato il comportamento della laguna a bocche chiuse, definendo preliminarmente la frequenza dei casi di vento significativo che interessano la laguna di Venezia e analizzandone le caratteristiche mediante un'indagine sulla loro direzione e intensità.

Allo scopo si sono considerate le registrazioni effettuate nel periodo 2000 - 2015 in sei stazioni di misura di proprietà del CPSM (Tab. I), le quali forniscono i valori di intensità e direzione del vento con passo di 5 minuti.

Tab. I - Stazioni del CPSM utilizzate per lo studio delle statistiche sulla direzione e intensità del vento in laguna. La colonna di destra indica la percentuale di dati disponibili sul totale.

DEDOENTIME DE DATE DIODONIDIE

PERCENTUALE DI DAITI DISPONIBILI									
Stazione	Periodo di osservazione	Percentuale dati							
Chioggia Diga Sud	2000 - 2012	96.05%							
Paittaforma CNR	2000 - 2012	97.58%							
Le Saline	2000 - 2012	88.39%							
Malamocco Porto	2007 - 2012	99.95%							
Chioggia Porto	2007 - 2012	99.81%							
Lido Diga Sud	2011 - 2012	86.04%							

Un'indagine statistica condotta sui dati registrati permette di definire in termini percentuali le principali direzioni da cui spira il vento e le sue intensità, in modo da individuare la frequenza degli eventi in grado di generare sovralzi di marea significativi fra le diverse parti della laguna. I risultati relativi a tre delle sei stazioni considerate (Diga Sud Chioggia, Malamocco Porto e Diga Sud Lido), suddivisi per classi di direzione e intensità, sono riportati in Fig. 2.

Si evidenziano due direzioni che si presentano con una frequenza maggiore. Si tratta dei venti provenienti dal primo quadrante (tramontana e bora) e dal secondo quadrante (scirocco, con picchi meno accentuati). Per quanto riguarda le intensità del vento, pur essendo le classi con maggior frequenza quelle con velocità inferiori, nel 5% circa del periodo di osservazione considerato il vento soffia con intensità superiori a 10 m/s.

Risulta inoltre dalle valutazioni condotte che sussiste una stretta



Fig. 2 - Analisi statistica sulla direzione e sull'intensità del vento nelle tre stazioni di Malamocco, Lido e Chioggia considerate.



Fig. 3 - Statistica delle direzioni del vento nella stazione di Malamocco Porto per intensità superiori a 10 m/s.

correlazione tra il verificarsi di un evento di acqua alta e la presenza di vento intenso sulla laguna di Venezia: un caso su quattro di marea molto sostenuta ( $\ge 1.10$  m ZMPS) è generalmente associato a venti con intensità superiore a 10 m/s.

Al fine di comprendere per quali direzioni si sono registrate le maggiori intensità del vento, e quindi i maggiori dislivelli all'interno della laguna da esso generati, l'intensità stessa è stata correlata alla direzione dalla quale il vento spira. Con riferimento a questo aspetto si riportano, a titolo esemplificativo, le situazioni registrate con di velocità maggiori ai 15 m/s nella stazione di Malamocco Porto (Fig.3).

Le registrazioni esaminate confermano quanto già accennato: il vento in laguna spira prevalentemente dal primo e dal secondo quadrante. All'aumentare della velocità, tuttavia, i venti che spirano dal primo quadrante tendono a prevalere decisamente su quelli provenienti da tutte le altre direzioni.

## 3. Sovralzi generati dal vento in laguna

La differente configurazione idraulica che si verrà a creare a seguito della chiusura delle bocche di porto rende necessario indagare come si modifichi in tale situazione l'equilibrio della superficie libera lagunare quando soffino i venti più intensi. Bisognerà altresì valutare, con riferimento alle tempistiche di chiusura delle bocche, quali siano i provvedimenti più opportuni da attuare per preservare dall'allagamento non solo Venezia e Chioggia, ma tutti i centri abitati lagunari.

In una prima fase è stata esaminata la situazione attuale, mediante il calcolo dei livelli in laguna nel caso di bocche completamente e costantemente aperte. In una fase successiva, i risultati ottenuti per lo stato attuale sono stati confrontati con quelli relativi al caso in cui le paratoie intercludano completamente le bocche di porto, al fine di individuare le eventuali criticità che potrebbero prodursi in queste condizioni.

#### 3.1. Bocche aperte

Gli effetti del vento sui livelli dei colmi di marea in laguna in assenza di barriere mobili alle bocche di porto (situazione attuale) sono stati determinati mediante una serie di simulazioni numeriche che considerano tutte le direzioni da cui può spirare il vento stesso, al variare della sua velocità. Il modello matematico utilizzato, basato su di una soluzione mediante il metodo agli elementi finiti delle equazioni che governano la propagazione di un'onda lunga in acque basse in ipotesi bidimensionali [6] fornisce i livelli di marea che si instaurano ovunque nella laguna per ogni combinazione delle caratteristiche del vento.

Nello specifico, i passi di analisi scelti sono stati di 1° per quanto riguarda la direzione (da 0° a 359°) e di 1 m/s per le intensità (da 1 m/s a 30 m/s), per un totale di oltre 10000 simulazioni, ciascuna della durata di 24 ore.

Volendo valutare preliminarmente gli effetti del solo vento, come condizione al contorno si è assunto un livello di marea costante alle tre bocche pari a 0.85 m sullo ZMPS; lo stesso livello è stato assunto come condizione iniziale su tutta la laguna. La forzante da vento è stata a sua volta imposta uniforme su tutto il bacino lagunare e per tutta la durata della simulazione, assumendo i valori registrati a Diga Sud Chioggia.

I livelli forniti dal modello sull'intera laguna permettono di determinare il sovralzo generato dal vento, con particolare riferimento alle sei stazioni per le quali si dispone delle registrazioni mareografiche (Grassabò, Burano, Murano, Punta della Salute, Chioggia Vigo e Brondolo). Tale sovralzo è stato calcolato come differenza tra il livello iniziale di 0.85 m sullo zero mareografico di Punta della Salute (ZMPS) e la media dei valori registrati fra la dodicesima e la ventiquattresima ora di simulazione con vento costante, periodo durante il quale il sistema è praticamente a regime e presenta sovralzi pressoché costanti in tutte le stazioni esaminate.

I grafici di Fig. 4 illustrano i sovralzi (positivi o negativi) calcolati nelle sei stazioni mareografiche assunte come riferimento (Fig. 1), in funzione dell'intensità del vento e delle direzioni più frequenti di provenienza.

I risultati evidenziano come le stazioni di Brondolo e Grassabò, situate rispettivamente alle estremità meridionale e settentrionale della laguna, presentino comportamenti opposti. Quando il vento spira dal primo quadrante, i massimi sovralzi si registrano a Brondolo, mentre a Grassabò si registra un abbassamento del livello. Nel caso in cui il vento spiri dai quadranti meridionali, invece, si registra la situazione opposta, con un sovralzo massimo a Grassabò e un abbassamento consistente a Brondolo.

Per le altre stazioni mareografiche di riferimento assunte, i risultati indicano un comportamento intermedio, in funzione della loro posizione in laguna. L'andamento dei sovralzi a Chioggia risulta simile a quello di Brondolo, mentre Punta della Salute, Murano e Burano seguono sostanzialmente per i dislivelli l'andamento di Grassabò.

## 3.2. Bocche chiuse

Al fine di confrontare le differenze tra i sovralzi indotti dal vento in condizioni di bocche chiuse e quelli calcolati per lo stato attuale di bocche aperte, le simulazioni precedentemente descritte sono state ripetute, riproducendo con il modello le conseguenze della chiusura delle bocche. Condizioni iniziali e al contorno, passi di direzione e intensità del vento non sono stati modificati.

Il sollevamento delle paratoie, supposto contemporaneo in tutte e tre le bocche di porto, avviene nella prima mezz'ora di simulazione, ragione per cui la manovra non interferisce con la formazione dei sovralzi generati dal vento.

Nei grafici di Fig. 5, del tutto simili a quelli di Fig. 4 ma con

#### UN CRITERIO PER IL CONTROLLO DEGLI ALLAGAMENTI 241



RICCARDO MEL, LUIGI D'ALPAOS

Fig. 4 - Andamento dei sovralzi nelle sei stazioni mareografiche di riferimento considerate in funzione dell'intensità del vento nella condizione attuale di bocche aperte. I risultati sono presentati variando con passo di 30° le direzioni del vento da 0° a 210° (direzioni generalmente associate a eventi di acqua alta). Le linee tratteggiate verticali (rossa e grigia) indicano rispettivamente le intensità massime del vento registrate a Diga Sud Chioggia nel periodo 2000-2015 e quelle con tempo di ritorno pari a un anno.



Fig. 5 - Andamento dei sovralzi nelle sei stazioni mareografiche di riferimento considerate in funzione dell'intensità del vento nella condizione di bocche chiuse. I risultati sono presentati variando con passo di 30° le direzioni del vento da 0° a 210° (direzioni associate a eventi di acqua alta). Le linee tratteggiate verticali (rossa e grigia) indicano rispettivamente le intensità massime del vento registrate a Diga Sud Chioggia nel periodo 2000-2015 e quelle con tempo di ritorno pari ad un anno.

interruzione del flusso attraverso le bocche, sono evidenziati i sovralzi generati nelle sei stazioni di riferimento considerate, al variare dell'intensità del vento e per le diverse direzioni di provenienza esaminate, assumendo valori uniformemente distribuiti. Sono altresì evidenziati i valori di intensità del vento per un evento con tempo di ritorno di circa un anno (linea tratteggiata in grigio) e quelli di massima intensità registrata dal 2000 al 2015 (linea tratteggiata in rosso) con riferimento alle registrazioni di Diga Sud Chioggia. Si tratta di informazioni utili al fine di individuare quale sia la probabilità di trovarsi in presenza di eventi con intensità del vento proveniente da assegnate direzioni associata ai sovralzi calcolati con il modello (Fig. 5).

I sovralzi generati dal vento risultano nettamente superiori rispetto a quelli calcolati in condizioni di bocche aperte. Ad esempio per un vento di bora con intensità pari a quella massima registrata per la serie storica considerata, si ottiene un sovralzo di 1.2 m a Brondolo e di -1.3 m a Grassabò. Secondo il calcolo quindi, a bocche chiuse, il dislivello tra le due stazioni sarebbe di 2.5 m. Nel caso di vento di scirocco i sovralzi sono caratterizzati da minori valori, a causa soprattutto della diversa direzione del vento stesso rispetto all'asse longitudinale della laguna. Il dislivello tra le zone più settentrionali e il porto di Brondolo è comunque ancora importante, essendo di circa un metro per la condizione di vento più gravosa registrata nel periodo considerato, sempre a Diga Sud Chioggia.

In una seconda rappresentazione dei risultati si è fissata l'intensità del vento, facendo variare la sua direzione (Fig. 6), in modo da determinare, per ognuna delle stazioni mareografiche di riferimento, la direzione che comporta i massimi sovralzi. I valori ottenuti sono presentati, sempre nella configurazione di bocche chiuse, per un'intensità del vento di 18 m/s, che, con riferimento alle direzioni più significative, ha un tempo di ritorno di circa un anno.

# 4. Effetti del tirante iniziale e della durata dell'evento meteorologico sui sovralzi generati dal vento

Il livello utilizzato come condizione iniziale nelle simulazioni illustrate, assunto uniforme all'interno della laguna e pari a 0.85 m



Fig. 6 - Relazione tra sovralzi generati in alcune stazioni all'interno della laguna e direzione del vento con un'intensità di 18 m/s, in condizioni di bocche chiuse. Per un'assegnata stazione il sovralzo è riportato in ordinata, mentre in ascisse è rappresentata la direzione del vento.

sullo ZMPS, potrebbe non rappresentare adeguatamente le reali condizioni della laguna nel momento della chiusura delle tre bocche. È importante, conseguentemente, valutare se e in quale misura il valore assunto per il livello iniziale in laguna influisca sui sovralzi calcolati con il modello.

A tale scopo sono state eseguite alcune simulazioni variando il livello iniziale da 0.65 m a 1.05 m sullo ZMPS con passo di 10 cm, in modo da coprire l'intervallo di valori corrispondenti alle condizioni iniziali più probabili nel momento di inizio del sollevamento delle paratoie.

I risultati ottenuti indicano come il livello iniziale in laguna sia sostanzialmente ininfluente sull'entità dei sovralzi calcolati in ciascuna delle stazioni mareografiche di riferimento considerate e per ciascuna direzione e intensità del vento. In Fig. 7 sono illustrati, a titolo di esempio, i risultati relativi alla città di Chioggia con un vento di bora che spira con intensità uniforme di 20 m/s.

Un ultimo approfondimento sull'influenza delle condizioni al

#### RICCARDO MEL, LUIGI D'ALPAOS





contorno assunte nelle simulazioni numeriche condotte riguarda gli effetti della durata del vento sui sovralzi generati in laguna. Le condizioni reali potrebbero, infatti, non corrispondere a quelle qui considerate, per le quali i sovralzi sono stati calcolati dopo aver fatto spirare il vento con direzione e intensità prefissate durante un periodo di dodici ore.

A tal fine sono stati determinati i sovralzi che si generano nell'intervallo compreso fra 30 minuti e 6 ore dopo l'attivazione del vento, partendo da una condizione iniziale di calma. I sovralzi ottenuti sono stati confrontati con quelli calcolati in precedenza, come media dei valori calcolati nell'intervallo compreso fra 6 e 12 ore dopo l'imposizione della forzante. I risultati ottenuti sono sintetizzati in Fig. 8.

Si osserva che mediamente entro un'ora e mezzo dall'inizio dell'azione del vento si genera il 50% del massimo sovralzo, il quale si raggiunge in pratica dopo circa cinque ore dall'attivazione del vento stesso. È quest'ultima una durata del vento assolutamente verosimile durante un evento di "acqua alta".



Fig. 8 - Percentuale del sovralzo di livello raggiunto nell'intervallo compreso fra 30 minuti e sei ore dopo l'attivazione di un vento con intensità di 15 m/s. I risultati sono mediati sulle direzioni significative (0°-210° con passo di 15°) considerando le stazioni di Chioggia, Punta della Salute e Burano.

5. Confronto fra i sovralzi di livello generati dal vento in condizioni di bocche aperte e di bocche chiuse

Con lo scopo di valutare come il sollevamento delle barriere mobili alle bocche di porto influisca sull'entità dei sovralzi generati dal vento e dei dislivelli che si determinano fra le varie parti della laguna, si sono confrontati i risultati ottenuti per le due configurazioni di laguna con bocche aperte e chiuse, assumendo le medesime condizioni di vento. Nel confronto sono analizzate sia le differenze fra i sovralzi generati nelle due diverse configurazioni sia i rapporti che li caratterizzano.

Le differenze fra i sovralzi generati dal vento calcolati a bocche chiuse e a bocche aperte definiscono l'incremento di livello di marea al colmo causato dall'impedimento del flusso attraverso le bocche di porto che la manovra di chiusura comporta.

A parità di altre condizioni si evidenzia (Fig. 9), all'aumentare della velocità del vento, un andamento crescente delle differenze fra le due condizioni considerate di bocche aperte e chiuse. Per intensità

#### UN CRITERIO PER IL CONTROLLO DEGLI ALLAGAMENTI 247

di circa 20 m/s le differenze di sovralzo sono prossime a 40 cm nelle stazioni della laguna meridionale, nel caso di vento di bora, e di 20 cm in quelle della laguna settentrionale, nel caso di vento di scirocco. Per i valori in giuoco, è indubbia l'importanza di tener conto di tali differenze nella gestione della chiusura delle paratoie, le quali probabilmente, a parità di condizioni di vento, dovranno essere sollevate con un discreto anticipo rispetto alla situazione attuale, volendo garantire la salvaguardia dagli allagamenti di tutti i centri abitati lagunari.

Un'analisi più approfondita dei risultati (Fig. 9) indica come le differenze tra i sovralzi a bocche aperte e a bocche chiuse siano molto simili fra Chioggia e Brondolo, da una parte, e fra Punta della Salute, Murano, Burano e Grassabò, dall'altra.

Si tratta di un risultato interessante che suggerisce come le differenze di sovralzo tra le due configurazioni considerate alle bocche si concentrino principalmente nella parte di laguna compresa fra le bocche di Lido e di Chioggia. È questa la zona in cui, a bocche chiuse, viene meno la circolazione secondaria attivata dal vento a bocche aperte, circolazione che mitiga gli effetti dovuti all'azione del vento stesso.

I rapporti fra i sovralzi ottenuti per le due configurazioni di bocche chiuse e aperte in ciascuna delle stazioni di riferimento considerate, al variare delle caratteristiche del vento, sono illustrati nei grafici di Fig. 10. Ciascuna stazione presenta un differente valore del suddetto rapporto, che varia al variare della direzione del vento. Si conferma che le differenze di sovralzo tra le stazioni poste a nord di Punta della Salute e Punta della Salute stessa e tra quelle poste a sud di Chioggia e Chioggia stessa non cambiano in modo significativo. Per contro, cambiano i valori locali del sovralzo, che risultano significativamente diversi fra le due situazioni, determinando i diversi rapporti che si riscontrano. In Fig. 10 sono illustrati i risultati relativi alle 4 direzioni del vento comunemente associate a eventi di "acqua alta" e a dislivelli significativi all'interno della laguna.

# 6. Definizione del "livello equivalente"

La laguna di Venezia è un ambiente fortemente eterogeneo la cui morfologia è in grado di modificare in modo significativo l'onda di



Fig. 9 - Differenze fra i sovralzi generati dal vento sui livelli di marea per ciascuna delle sei stazioni di riferimento considerate, al variare delle caratteristiche (direzione e intensità) del vento.



Fig. 10 - Rapporti fra sovralzi generati in ciascuna delle stazioni di riferimento considerate, al variare delle caratteristiche del vento nelle due ipotesi di bocche aperte e chiuse.

marea entrante a causa della propagazione. Al fenomeno si deve aggiungere l'effetto del vento, che è capace di dislocare considerevoli masse d'acqua all'interno della laguna, quando spira con velocità importanti. Il risultato che ne consegue è una differenza significativa dei livelli di marea fra le diverse parti della laguna, in termini sia di picco raggiunto sia di sfasamento degli estremali della marea stessa.

Una corretta gestione delle operazioni di chiusura delle paratoie mobili richiede di individuare il livello massimo di marea che si raggiunge nelle diverse parti della laguna durante tutto il periodo in cui le bocche saranno chiuse. A tal fine, preliminarmente, è necessario determinare il livello su cui si assesterebbe la laguna in assenza di vento, una volta chiuse le bocche di porto. Questo livello, che si raggiunge "a riposo", può essere definito "livello equivalente". Ad esso andranno poi sommati i sovralzi locali generati dal vento e calcolati con il modello matematico, stazione per stazione, in funzione della direzione e dell'intensità del vento durante l'evento di "acqua alta" in esame. L'individuazione di una procedura semplice per il calcolo del "livello equivalente" è stata implementata secondo le seguenti tre fasi successive:

1) simulazione mediante il modello matematico di cento eventi di alta marea del passato (con e senza vento), imponendo la chiusura delle bocche in istanti prefissati e calcolando il livello a riposo ("livello equivalente"), facendo cessare eventualmente il vento dopo la chiusura stessa;

2) stima del "livello equivalente" mediante una combinazione lineare dei livelli registrati in opportune stazioni interne alla laguna nel momento della chiusura, in modo da ottenere a riposo lo stesso livello calcolato con il modello (al punto 1);

3) verifica dell'intera procedura su eventi osservati di marea molto sostenuta(≥ 1,10 m sul mareografo di Punta della Salute), in presenza di venti intensi.

Con questi obiettivi sono stati individuati 50 eventi di marea "senza vento" (intensità inferiore a 6 m/s in tutte le stazioni di osservazione assunte e per tutto il periodo considerato) e 50 eventi "con vento" (intensità superiore a 10 m/s in tutte le stazioni di osservazione e per tutta la durata di chiusura delle bocche). Le relative simulazioni numeriche sono state protratte per 36 ore, con una manovra di chiusura che inizia 18 ore dopo l'istante iniziale di calcolo. La manovra di chiusura delle paratoie ha una durata totale di 30 minuti ed è condotta con velocità di sollevamento delle barriere costante, così come ipotizzato dal progettista delle opere ora in fase di ultimazione.

Gli eventi appartenenti alle due categorie, scelti fra quelli del periodo compreso tra gli anni 2000 e 2015, sono stati individuati cercando di simulare condizioni di livello simili a quelle che si avranno durante le effettive manovre di chiusura. In particolare:

• per le simulazioni degli eventi senza vento, è stato scelto un picco di marea compreso tra 1.00 m (ZMPS) e 1.30 m (ZMPS) nella stazione di Punta della Salute;

• per le simulazioni degli eventi in presenza di vento, a causa della loro minore frequenza, sono state scelte maree per le quali il livello al colmo supera a Punta della Salute i 0.80 m sullo ZMPS (eventi di marea sostenuta).

I risultati ottenuti sono stati elaborati per le stazioni di Brondolo,



Fig. 11 - Andamento dei livelli di marea nelle sei stazioni considerate (Fig. 1) per un evento classificato "con vento". La linea tratteggiata indica l'istante in cui viene completata la chiusura, istante assunto coincidente con l'annullamento dell'azione del vento.

Chioggia, Punta della Salute, Murano, Burano e Grassabò (Fig. 1), che possono essere ritenute rappresentative del comportamento della laguna nelle sue diverse zone.

Per la prima serie di eventi di "acqua alta" presi in considerazione, per i quali l'effetto del vento è trascurabile, il completamento della chiusura delle bocche è stato arbitrariamente fatto coincidere con il raggiungimento nella stazione di Punta della Salute di un livello di marea di 20 cm inferiore al picco massimo. In quello stesso istante il vento, seppur debole, è supposto che venga a cessare del tutto.

I risultati evidenziano come, una volta completate le manovre di chiusura alle bocche, i livelli delle sei stazioni di riferimento considerate tendano in breve tempo allo stesso valore. Si tratta del livello, definito "livello equivalente", che viene raggiunto nella laguna nel caso in esame e che è uniforme in ogni sua zona e costante nel tempo.

La seconda serie di simulazioni, caratterizzata da eventi di marea associati a intensità del vento superiori ai 10 m/s, ha avuto come suo obiettivo principale quello di valutare gli eventuali effetti di una differente condizione iniziale dei livelli in laguna sul "livello equivalente" raggiunto. Il completamento della chiusura delle bocche è in questo caso fatto coincidere con un anticipo di 3 ore sul manifestarsi, a Punta della Salute, del picco massimo di marea. Nello stesso istante il vento è fatto cessare su tutta la laguna.

I risultati relativi ad un evento associato a un'elevata intensità del vento (18 m/s) proveniente dal primo quadrante (vento di bora) sono illustrati in Fig. 11. Si nota come, una volta sollevate le paratoie e fatto cessare il vento, entro poche ore i livelli di marea nelle diverse stazioni si stabilizzino, sebbene prima della chiusura i livelli stessi siano fra loro molto differenti, a causa dell'azione combinata del vento e del ritardo di fase causato dalla propagazione della marea.

Le conclusioni sono di un qualche rilievo: la presenza del vento non apporta modifiche all'introduzione del concetto di formazione del "livello equivalente", essa influisce solo sulla sua entità.

Prima di implementare il criterio di stima semplificato del "livello equivalente" senza ricorrere alle simulazioni con un modello matematico adeguatamente strutturato, è opportuno un approfondimento riguardante sia il comportamento dell'onda di marea entrante nel periodo posto a cavallo del momento di inizio delle operazioni di chiusura delle paratoie sia il suo effetto sui livelli raggiunti in laguna dopo la chiusura.

Al fine di comprendere tale comportamento, sono stati scelti dieci eventi di marea in assenza di vento, variando il livello che definisce le condizioni al contorno alle bocche, a partire da un assegnato istante antecedente l'inizio delle operazioni di chiusura e fino alla completa ultimazione della manovra. Si sono allo scopo considerati due diversi istanti temporali: il primo coincide con l'inizio delle operazioni di chiusura (20 minuti di anticipo rispetto all'interruzione del flusso e 30 minuti di anticipo rispetto alla completa chiusura delle bocche); il secondo istante temporale si colloca, invece, 50 minuti prima dell'inizio delle operazioni di chiusura (70 minuti di anticipo rispetto all'interruzione del flusso e 80 minuti prima della completa chiusura delle bocche).

I due diversi anticipi temporali considerati assumono un preciso significato. L'effetto di ciò che avviene nel primo caso dall'inizio delle operazioni di chiusura sino all'interruzione del flusso influisce sul livello di riposo e quindi sulla determinazione del "livello equivalente" in laguna, qualora si utilizzino come suoi predittori i livelli di marea alle bocche di porto.

Quanto accade invece nel secondo caso, a partire da 50 minuti prima dell'inizio delle operazioni di chiusura, ha un ruolo se il criterio ricercato utilizza come predittori i livelli di marea registrati nelle stazioni di Punta della Salute, Malamocco Porto e Brondolo, le quali mediamente presentano un ritardo di fase di circa 50 minuti rispetto ai valori registrati in mare.

Per tener conto di tutto questo si sono valutate le differenze sui valori calcolati per il "livello equivalente" nella condizione estrema, che consiste nel fissare un livello di marea costante alle bocche a partire dagli anticipi temporali indicati. Nella Tab. II sono confrontati i valori di "livello equivalente" calcolati con il modello matematico imponendo le corrette condizioni al contorno nel caso dei dieci eventi con quelli ottenuti bloccando la crescita della marea sia all'inizio delle operazioni di chiusura sia, a titolo di esempio, 50 minuti prima di avviare la manovra.

Emerge che nel caso in cui si blocchi la crescita del livello di marea sul valore che si realizza alle bocche con un anticipo di 50 minuti

Tab. II – Confronto tra i "livelli equivalenti" ottenuti con il modello matematico bidimensionale imponendo le corrette condizioni al contorno (colonna A), con quelli ottenuti fissando i valori del livello di marea alle bocche nel momento dell'inizio delle operazioni di chiusura (colonna B) e 50 minuti prima dell'avvio della manovra (colonna C). I valori sono espressi in cm.

	A	E	3		c
Evento Liv. eq.		Liv. eq.	Errore	Liv. eq.	Errore
1	60.24	60.06	0.18	56.88	3.36
2	65.73	65.61	0.12	62.64	3.09
3	74.39	74.23	0.16	70.79	3.60
4	95.44	95.30	0.14	92.58	2.86
5	74.58	74.45	0.13	71.17	3.41
6	73.81	73.82	0.01	70.27	3.55
7	81.89	81.77	0.12	79.32	2.58
8	76.85	76.66	0.19	73.77	3.08
9	69.93	69.82	0.11	66.98	2.95
10	66.51	66.37	0.14	63.37	3.15
		MEDIA	0.13	MEDIA	3.16

rispetto all'inizio della manovra di chiusura si ha una sottostima media del "livello equivalente" di circa 3 cm. Si può quindi affermare che, essendo la condizione di blocco della crescita del livello di marea una situazione estrema e difficilmente realizzabile, l'effetto della variazione dei livelli di marea nel periodo successivo al momento in cui si registra il livello assunto come livello predittore è trascurabile, sia che tale livello corrisponda ai valori registrati alle bocche di porto sia che si assumano livelli interni alla laguna.

Per la definizione introdotta, il "livello equivalente" è univoco per tutta la laguna. Nelle valutazioni condotte con l'ausilio del modello matematico bidimensionale esso è stato determinato come media dei livelli calcolati nelle sei stazioni di riferimento assunte, considerando le 12 ore di simulazione successive di sei ore alla chiusura delle bocche. In tale intervallo di tempo il livello di marea non risente più degli effetti della manovra di chiusura delle bocche, assestandosi, pur con leggere oscillazioni residue, in un intervallo dell'ordine del centimetro per tutte le stazioni considerate (Fig. 11).

La ricerca dei livelli predittori per la stima del "livello equivalente" tramite un metodo diverso, più semplice, come può essere quello basato su di una opportuna combinazione lineare di livelli di marea, deve tener conto, oltre che della ricerca di un criterio agevole da applicare, di due altri importanti fenomeni che devono essere correttamente rappresentati.

Il primo di essi riguarda la propagazione della marea all'interno della laguna, la cui morfologia favorisce il ritardo di fase rispetto al mare fino a oltre due ore in alcuni casi. Il volume invasato all'interno della laguna nel momento del sollevamento delle paratoie, direttamente collegato al "livello equivalente", è infatti funzione del livello registrato sia nelle zone situate in prossimità delle bocche di porto sia in quelle più remote della laguna stessa.

Il secondo fenomeno da considerare riguarda il dislocamento delle acque osservato all'inizio delle operazioni di chiusura: in presenza di vento forte, come si è già evidenziato, si manifestano dislivelli importanti tra le diverse zone della laguna rispetto alle situazioni in assenza di vento.

Per calcolare il "livello equivalente" sarebbe pertanto necessario che i livelli predittori scelti rappresentino adeguatamente i livelli che si verificano in quel momento in tutte le zone del bacino. Dopo alcune valutazioni preliminari, la scelta dei livelli predittori è caduta sui livelli di marea calcolati alla stazione di Malamocco Porto, che ha un'ubicazione tale da renderla un punto strategico dell'intero sistema. La sua collocazione geografica la pone, infatti, in una posizione baricentrica della laguna con riferimento agli effetti di un qualsiasi tipo di vento. L'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche condotte dimostra come un vento proveniente da qualunque direzione e di qualsiasi intensità non produca differenze significative nella suddetta stazione. Questo fatto rende di conseguenza la località di Malamocco Porto particolarmente adatta allo scopo, essendo in grado di rappresentare il volume invasato all'interno della laguna indipendentemente dalla direzione e dalla intensità del vento che spira.

Quanto agli effetti dovuti alla propagazione dell'onda di marea nelle ore precedenti la manovra di chiusura, il problema è stato risolto assumendo come livelli predittori i valori dei livelli di marea che si riscontrano sempre a Malamocco Porto in due altri istanti, antecedenti l'inizio della manovra di chiusura.

Dopo alcune indagini preliminari, si è quindi utilizzata una combinazione lineare fra i livelli di marea calcolati a Malamocco Porto considerando tre differenti livelli predittori corrispondenti rispettivamente ai livelli di marea nell'istante di inizio delle operazioni di chiusura e a quelli registrati un'ora e due ore prima dell'inizio del sollevamento delle paratoie. La formula utilizzata per esprimere il "livello equivalente" assume la forma semplice:

$$heq = A \cdot h_{0h} + B \cdot h_{-1h} + C \cdot h_{-2h} \tag{1}$$

nella quale  $h_{0k}$ ,  $h_{-1k}$  e  $h_{-2k}$  sono i livelli di marea predittori.

Applicando la (1) in uno qualsiasi degli eventi analizzati è possibile stimare con buona approssimazione il valore del "livello equivalente". Tale livello, sommato ai sovralzi provocati dal vento, calcolati a bocche chiuse, consente una stima sufficientemente accurata del livello che si formerà nelle diverse parti della laguna in funzione del momento in cui saranno chiuse le bocche.

Individuati i livelli predittori, sono stati calcolati i valori dei coefficienti della combinazione lineare (1) mediante una procedura di minimizzazione dell'errore commesso nel calcolo del "livello equiTab. III – Errore nella stima del "livello equivalente" ottenuto tramite la combinazione lineare (2). La colonna di sinistra riporta gli errori introducendo come livelli predittori i valori calcolati con il modello matematico bidimensionale a Malamocco Porto, mentre quella di destra esprime l'errore utilizzando come livelli predittori i valori effettivamente registrati nella stazione del CPSM.

	Confronto con i dati calcolati	Confronto con i dati registrati
Errore assoluto medio	1.52 cm	3.06 cm
Errore assoluto <3 cm	96 %	59 %
Errore assoluto <4 cm	98 %	82 %
Errore assoluto <5 cm	100 %	96 %

valente" per i cento eventi di marea considerati, avendo come riferimento il suo valore determinato mediante il modello matematico bidimensionale.

Il processo di identificazione dei coefficienti A,  $B \in C$  ha fornito i seguenti valori delle costanti che nella (1) minimizzano l'errore: A=0.78,  $B=0.10 \in C=0.12$ . Il "livello equivalente" ottenuto dai valori di marea calcolati con il modello matematico bidimensionale a Malamocco Porto, utilizzando come condizione al contorno i livelli di marea registrati in mare, è pertanto ben approssimato dall'espressione:

$$heq = 0.78 \cdot h_{0h} + 0.10 \cdot h_{-1h} + 0.12 \cdot h_{-2h} \tag{2}$$

Gli errori che caratterizzano la stima proposta, basata sul criterio semplificato introdotto, rispetto ai valori del "livello equivalente" ottenuti direttamente dal modello nella situazione di bocche chiuse e con il raggiungimento in laguna delle condizioni di stazionarietà, sono riassunti nella Tab. III. Nella stessa tabella, per completezza, sono riportati anche gli errori che caratterizzano la stima del "livello equivalente", utilizzando sempre la (2) ma introducendo come livelli predittori non i valori calcolati ma quelli effettivamente registrati a Malamocco Porto dalla stazione del CPSM (colonna di destra). L'errore, a sua volta calcolato rispetto al valore di "livello equivalente" fornito direttamente dal modello, risulta essere di poco superiore ma ancora ampiamente accettabile ai fini pratici.
Si può concludere che la relazione lineare utilizzata fornisce buoni risultati introducendo come predittori solamente tre livelli di marea, tutti riferiti alla medesima località di Malamocco Porto e noti nel momento di inizio delle manovre alle paratoie.

Un'ulteriore drastica semplificazione che si potrebbe introdurre consiste nel ridurre a uno il numero di livelli predittori utilizzati, in modo da rendere ancor più immediata e intuitiva la stima del "livello equivalente". In una prima ipotesi si è fatto riferimento al solo livello di marea  $h_{ob}$  calcolato a Malamocco Porto nell'istante in cui iniziano le operazioni di chiusura delle bocche. Con questa assunzione per la quasi totalità degli eventi (il 98%) si ha una sovrastima del "livello equivalente". Si tratta, tuttavia, di una stima che è a favore della sicurezza e che ha il vantaggio di semplificare drasticamente la relazione precedentemente introdotta, la quale diventa banalmente:

$$heq = h_{0h} \tag{3}$$

Gli errori, seppur superiori a quelli forniti dalla relazione che utilizza tre diversi livelli predittori, restano ancora ampiamente accettabili ai fini pratici (Tab. IV).

Tab. IV - Errore nella stima del "livello equivalente" calcolato tramite la relazione semplificata (3). La colonna di sinistra riporta gli errori usando come livello predittore il valore calcolato a Malamocco Porto con il modello, mentre quella di destra indica gli errori commessi introducendo nella (3) il valore realmente registrato dalla stazione del CPSM.

	Confronto con i dati calcolati	Confronto con i dati registrati
Errore assoluto medio	2.30 cm	3.65 cm
Errore assoluto <3 cm	83 %	47 %
Errore assoluto <4 cm	90 %	57 %
Errore assoluto <5 cm	92 %	75 %

Un miglioramento che può essere apportato a questa seconda procedura semplificata potrebbe consistere nella sostituzione del livello di marea relativo al momento dell'inizio delle operazioni di chiusura con quello che si riscontra in un istante leggermente anticipato. Dopo una serie di prove è risultata ottimale la scelta del livello di marea che si verifica 15 minuti prima dell'inizio delle operazioni di chiusura delle bocche. Esso fornisce una stima abbastanza precisa, caratterizzata da un errore che presenta una distribuzione grossomodo simmetrica ed è ridotto di circa un centimetro rispetto al caso precedente. Mantenendo nella (3) il coefficiente A unitario ma anticipando di un quarto d'ora il livello predittore ( $h_{-15}$ ), si ottiene una stima del "livello equivalente" soddisfacente, simile a quella ottenuta mediante la combinazione lineare dei tre valori (relazione 2).

$$heq = h_{-15} \tag{4}$$

Le statistiche degli errori che si commettono in queste ipotesi sono riassunte nella Tab. V.

Tab. V - Errore nella stima del "livello equivalente" tramite la (4). La colonna di sinistra riporta gli errori usando come predittore il valore a Malamocco Porto calcolato da modello mentre quella di destra il valore osservato.

	Confronto con i dati calcolati	Confronto con i dati registrati
Errore assoluto medio	1.80 cm	2.46 cm
Errore assoluto <3 cm	86 %	76 %
Errore assoluto <4 cm	88 %	90 %
Errore assoluto <5 cm	94 %	96 %

Sulla base dei risultati esposti si evidenzia la possibilità pratica di valutare il "livello equivalente" utilizzando come predittore addirittura un solo livello e più precisamente il livello di marea che si verifica a Malamocco Porto con un anticipo di 15 minuti rispetto all'inizio delle manovre di chiusura delle bocche.

Un ulteriore aspetto da considerare, volendo ricorrere a uno dei criteri semplificati illustrati per la definizione del "livello equivalente", riguarda il breve tempo trascorso dall'attivazione della stazione di Malamocco Porto (anno 2007). Per superare questo limite potrebbe essere interessante individuare una relazione che colleghi il livello re-

256

gistrato a Malamocco Porto con quello che si verifica in altre stazioni in funzione da più lungo tempo, in modo da poter esaminare per gli aspetti qui considerati anche eventi antecedenti al 2007, da una parte, e di supplire in sede operativa a un eventuale mal funzionamento futuro della stazione di Malamocco Porto, dall'altra. Con queste finalità si sono considerate le registrazioni di marea a Chioggia e a Punta della Salute, rispetto alle quali Malamocco Porto si colloca approssimativamente in posizione baricentrica.

Trattandosi di tre stazioni che presentano tra loro una leggera differenza di fase dell'onda di marea, è necessario, nel procedimento di identificazione dei coefficienti che permettono di esprimere i livelli di marea registrati a Malamocco Porto in funzione di quelli registrati a Chioggia e a Punta della Salute, allineare in maniera opportuna nel tempo i dati relativi alle stazioni considerate. Generalmente, considerando come riferimento Malamocco Porto, a Chioggia si registra un anticipo della fase di marea di 15 minuti, mentre a Punta della Salute si verifica un ritardo di 5 minuti.

Il livello di marea presso la stazione di Malamocco Porto può quindi essere stimato con una relazione del tipo:

$$h_{MP} = M \cdot h_{PS-5}, + N \cdot h_{CH+15}, \tag{5}$$

i cui coefficienti, identificati sulla base dei valori registrati durante tutto il 2012, risultano essere M=0.54 e N=0.46. Gli errori nella stima del livello effettivamente registrato a Malamocco Porto che il procedimento adottato comporta sono riassunti in Tab. VI.

Tab. VI - Errore nella stima del livello di marea a Malamocco Porto tramite combinazione lineare dei livelli osservati a Punta della Salute e Chioggia. I livelli considerati sono tutti livelli osservati nelle stazioni mareografiche.

	Confronto con i dati registrati
	a Malamocco Porto
Errore assoluto medio	1.13 cm
Errore assoluto <3 cm	95 %
Errore assoluto <4 cm	99 %
Errore assoluto <5 cm	100 %

La distribuzione degli errori presenta un valore medio trascurabile con un andamento grossomodo di tipo gaussiano. La coda degli errori negativi risulta essere leggermente più lunga di quella degli errori positivi, a causa di alcuni episodi di vento particolarmente intenso con direzione trasversale rispetto all'asse della laguna.

# 7. *Applicazione del criterio predittivo individuato a eventi di marea di "acqua alta" registrati*

Un'applicazione pratica su eventi del recente passato diversi da quelli fin qui utilizzati consente di valutare quanto il criterio predittivo semplificato proposto, basato sull'utilizzazione di tre diversi livelli predittori, sia performante nella stima sia del "livello equivalente" che del livello massimo di marea raggiunto nei centri abitati lagunari durante i periodi di chiusura delle bocche, in condizioni in cui sulla laguna spirano venti di particolare intensità. Il livello massimo di marea è calcolato come somma del "livello equivalente" e dei sovralzi teorici risultanti per il tipo di vento registrato nel corso dell'evento di "acqua alta" esaminato con il calcolo. Il confronto del valore derivante da questa stima con il livello di marea al colmo calcolato direttamente con il modello matematico bidimensionale fornisce una significativa dimostrazione dell'affidabilità del criterio individuato.

Gli eventi considerati sono quelli che rappresentano i casi di acqua alta più significativi in presenza di venti intensi registrati dal 2000 sino ai giorni nostri. Si tratta di eventi di marea molto sostenuta associati a venti particolarmente intensi (Tab. VII), che coprono la maggior parte delle casistiche che si verificano in laguna per quanto riguarda la direzione del vento.

Preliminarmente per ciascun evento di marea si sono presi in considerazione quattro differenti momenti di inizio della manovra di chiusura delle bocche di porto, corrispondenti rispettivamente al raggiungimento del livello di 1.10 m ZMPS a Diga Sud Lido e a istanti anticipati rispetto a questo momento di 1, 2 e 3 ore.

Calcolato il "livello equivalente" con il criterio semplificato basato sull'utilizzazione di tre livelli predittori, ai quali precedentemente si è fatto riferimento, si è sommato ad esso il sovralzo teorico

#### RICCARDO MEL, LUIGI D'ALPAOS

260

Tab. VII - Eventi di marea molto sostenuta, associata a venti particolarmente intensi e caratterizzati da diverse direzioni, utilizzati per verificare l'efficienza del criterio predittivo semplificato proposto per la stima dei livelli massimi in laguna nel caso di chiusura delle bocche.

n. evento	Data
1	6 novembre 2000
2	13 novembre 2001
3	16 novembre 2002
4	10 novembre 2004
5	3 dicembre 2005
6	1 dicembre 2008
7	1 novembre 2012
8	11 novembre 2012

determinato per le condizioni di vento registrate per ciascuno degli eventi di marea considerati. Il livello massimo di marea così ottenuto per le diverse stazioni di riferimento è stato confrontato con quello fornito dalle simulazioni numeriche condotte con il modello matematico bidimensionale, applicando alle bocche e sulla laguna, per quanto riguarda il vento, le corrette condizioni al contorno.

Il criterio semplificato proposto, qualunque sia il momento di inizio della manovra di chiusura e per tutti gli eventi considerati, porta a una stima dei livelli massimi raggiunti in tutte le zone della laguna che non si discosta in misura apprezzabile da quella, più laboriosa da ottenere, fornita dall'applicazione del modello matematico bidimensionale.

Ben più significativo risulta, invece, lo scostamento sui livelli massimi di marea raggiunti in condizioni di bocche chiuse, se questi ultimi sono ottenuti valutando i sovralzi generati dall'azione del vento nelle condizioni attuali.

A titolo d'esempio si possono esaminare le condizioni che si stabiliscono in laguna per l'evento di marea del 10 novembre 2004, operando su di esso con una manovra di chiusura delle bocche che ha inizio un'ora prima dell'istante in cui a Diga Sud Lido si raggiunge il livello di marea di 1.10 m ZMPS. Si tratta di un evento di marea





Murano ZMPS 1.00 0.80 0.60 0.40 0.20 Tempo [h] 0.00 -12 -9 -6 -3 ſ 3 6 9 12 —Livello senza vento Livello con vento ----- Chiusura -- Livello equivalente Sovralzo bocche aperte -- Sovralzo bocche chiuse 1.20 Burano ZMPS 1.00 0.80 ivello. 0.60 0.40 0.20 Tempo [h] 0.00 -12 -9 -6 -3 ſ 9 12 3 6 —Livello senza vento Livello con vento ----- Chiusura -- Livello equivalente Sovralzo bocche aperte -- Sovralzo bocche chiuse 1.20 Grassabò 1.00 ZMF 0.80 0.60 .40 0.20 Tempo [h] 0.00 -9 -12 -6 -3 0 6 9 12 —Livello senza vento Livello con vento ----- Chiusura -- Livello equivalente -- Sovralzo bocche aperte -- Sovralzo bocche chiuse

1.20

Fig. 12 - Evento di "acqua alta" del 10 novembre 2004. La curva nera a sinistra della linea verticale, che rappresenta il momento in cui avviene la chiusura delle bocche, descrive l'andamento del livello di marea simulato dal modello matematico imponendo il vento osservato. La linea nera, a sinistra della linea verticale, individua l'andamento del livello di marea simulato dal modello dopo l'inizio della manovra di chiusura delle bocche, imponendo le condizioni di vento registrate. La linea grigia rappresenta il livello di marea simulato a seguito della chiusura delle bocche, imponendo vento assente dopo la chiusura stessa (si tratta del "livello equivalente"). La linea orizzontale blu rappresenta il "livello equivalente" stimato tramite la (2); la linea verde individua il livello massimo di marea previsto come somma del "livello equivalente" stimato e dei sovralzi teorici calcolati a bocche chiuse; la linea rossa, infine, indica il livello massimo di marea che si otterrebbe come somma del "livello equivalente" stimato e dei sovralzi teorici calcolati a bocche chiuse;

perturbato da un vento di bora che spira mediamente sulla laguna con una velocità di 18 m/s circa, elevata ma non straordinaria. Nella Fig. 12 sono illustrati, a confronto per le diverse stazioni mareografiche di riferimento considerate, i risultati relativi all'evento scelto, ottenuti con l'applicazione sia del criterio semplificato proposto sia del modello matematico bidimensionale per quanto riguarda il "livello equivalente", e il massimo livello raggiunto come conseguenza del sovralzo dovuto all'azione del vento. Sempre nella Fig. 12 il valore massimo del livello di marea raggiunto è confrontato con il livello massimo stimato, qualora si considerino i sovralzi generati dal vento nelle condizioni di bocche aperte.

Dopo l'istante zero, corrispondente all'inizio della manovra di chiusura delle bocche che è portata a termine in 30 minuti, il modello matematico bidimensionale permette di individuare da una parte il massimo livello di marea raggiunto nella stazione considerata (nei grafici linea nera continua in grassetto), dall'altra il "livello equivalente", ottenuto dallo stesso modello imponendo che il vento cessi di agire una volta chiuse le bocche (nei grafici la linea grigia continua). Per le stesse grandezze nella figura citata sono evidenziati i valori forniti dal criterio semplificato proposto. Con linea blu tratteggiata è indicato il "livello equivalente" calcolato tramite la (2), mentre con linea verde tratteggiata è indicato il massimo livello raggiunto tenendo conto del sovralzo "teorico" dovuto al vento stimato con la procedura proposta a bocche chiuse.

Ben evidenziato anche nella stessa figura l'errore che si commetterebbe se si valutasse il sovralzo dei livelli generato dal vento, mantenendo per la condizione di bocche chiuse le stime relative alla situazione attuale di bocche aperte. Il livello massimo di marea che si otterrebbe in tal modo è indicato, per le diverse stazioni mareografiche, dalla linea rossa tratteggiata. Le differenze sono di assoluto rilievo e potrebbero comportare, ragionando in termini di "acqua alta", criticità impreviste nelle zone di laguna sopra vento con conseguenti allagamenti dei centri abitati che vi sorgono. Nello specifico della città di Chioggia, il piccolo Mo.S.E., verosimilmente dimensionato sulla base dei sovralzi generati dal vento nello stato attuale di bocche aperte, fallirebbe il suo compito.

#### 8. Conclusioni

Le simulazioni condotte con l'ausilio di un modello matematico bidimensionale hanno permesso di indagare in modo approfondito il comportamento idrodinamico della laguna di Venezia in presenza di venti di intensità significativa, con particolare riferimento alla condizione che si determinerà quando le paratoie mobili diventeranno operative e permetteranno di intercludere le bocche di porto.

Il modello utilizzato si è rivelato assolutamente performante nella descrizione della propagazione della marea all'interno della laguna, permettendo di analizzare tutti gli aspetti che possono assumere un ruolo attivo e importante nella gestione delle operazioni di chiusura delle bocche di porto.

I risultati indicano come i sovralzi indotti dal vento possano produrre allagamenti inattesi di alcuni centri abitati lagunari, qualora non venissero prese in considerazione le problematiche legate ai diversi effetti generati dal vento sui livelli massimi di marea raggiunti in laguna nelle condizioni di bocche aperte e di bocche chiuse.

È stato dimostrato che livelli di marea presenti in laguna non influiscono significativamente sui sovralzi locali indotti dal vento. Il risultato ha reso possibile implementare una procedura operativa semplificata mediante la quale prevedere il livello massimo di marea raggiunto nelle diverse parti della laguna e quindi nei centri abitati lagunari che vi insistono. Tale livello massimo è stato ottenuto come somma del "livello equivalente" (livello di riposo raggiunto in laguna una volta chiuse le bocche e cessato il vento) e dei sovralzi generati dal vento stesso.

La procedura proposta permette di individuare il momento di inizio della manovra di chiusura delle bocche di porto per garantire in tutta la laguna il livello di salvaguardia rispetto agli allagamenti. La scelta relativa non potrà essere basata unicamente sul livello della marea, ma dovrà necessariamente tener conto delle caratteristiche del vento che è previsto soffi sulla laguna durante tutto il periodo in cui le paratoie mobili saranno completamente sollevate.

Una chiusura atta a garantire il livello di salvaguardia rispetto agli allagamenti in tutti i centri lagunari dovrà, inoltre, essere opportunamente anticipata di volta in volta rispetto a quanto attualmente si valuta, al fine di partire da un "livello equivalente" in laguna capace di neutralizzare gli effetti del vento previsto.

Sarebbe un grave errore se, come si è dimostrato, nelle manovre previste non si tenesse conto del significativo incremento dei sovralzi di marea generati dal vento nella condizione di bocche chiuse rispetto allo stato attuale di bocche aperte. Il fenomeno potrà essere contrastato solamente anticipando opportunamente il momento di inizio della manovra di chiusura delle paratoie alle bocche.

Come conseguenza si determinerà inevitabilmente un incremento in termini di ore del periodo in cui le paratoie dovranno essere sollevate. Non è escluso che talvolta si debba anticipare la manovra di chiusura addirittura al ciclo di marea precedente a quello che è causa del fenomeno delle "acque alte", con una ulteriore penalizzazione della portualità e con danni ambientali ed economici che probabilmente non sono stati preventivati, almeno finora [7].

## 9. Ringraziamenti

I dati di marea utilizzati sono stati gentilmente forniti dal Centro Previsioni e Segnalazioni Maree del Comune di Venezia, al quale va un ringraziamento particolare per la costante disponibilità dimostrata.

## 10. Bibliografia

- [1] APAT, Stazioni di osservazione Meteo Mareografiche nella laguna di Venezia e nell'arco costiero Nord Adriatico, Rapporti 68, 2006.
- [2] Canestrelli P., Mandich M., Pirazzoli A.P., Tomasin A. Venti, depressioni e sesse: perturbazioni delle maree a Venezia (1950-2000), Centro Previsioni e Segnalazione Maree, Città di Venezia, 2001.
- [3] Umgiesser G. Matticchio B., Simulazione delle chiusure delle barriere mobili per gli anni 2000, 2001 e 2002 nella situazione attuale e ipotizzando l'innalzamento del livello medio del mare, consultabile sul sito http://www2.comune.venezia.it/ mose-doc-prg/
- [4] Canestrelli, P., Moretti, F. I modelli statistici del comune di Venezia per la previsione della marea: valutazioni e confronti sul quinquennio 1997-2001. Atti dell'Istituto Veneto di Scienze Lettere ed Arti, Tomo CLXII, 479-516, 2004.

264

- [5] Lionello, P., Sanna A., Elvini E., Mufato R. A data assimilation procedure for operational prediction of storm surge in the northern Adriatic Sea, Continental shelf research 26, 539-553, 2006.
- [6] D'Alpaos L., Defina A. Mathematical modeling of tidal hydrodynamics in shallow lagoons: A review of open issues and applications to the Venice lagoon, Computers & Geosciences, 2006.
- [7] D'Alpaos L. Fatti e misfatti di idraulica lagunare. La laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto, Istituto Veneto di SS.LL.AA., Venezia 2010.

## ELENCO DEI RELATORI

LORENZO BONOMETTO, Società Veneziana di Scienze Naturali

DEVIS CANESSO, Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l., Padova.

LUCA CARNIELLO, Università degli Studi di Padova

MARCO CORDELLA, ISPRA Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Servizio Laguna di Venezia

- CRISTINA DA LIO, Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia
- ANDREA D'ALPAOS, Università degli Studi di Padova
- LUIGI D'ALPAOS, Università degli Studi di Padova; Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti
- F. FOGLINI, Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Bologna
- A. KRUSS, Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia;
- L. JANOWSKI, Institute of Oceanography, University of Gdansk
- F. MADRICARDO, Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia;
- BRUNO MATTICCHIO, Ipros Ingegneria Ambientale s.r.l., Padova
- RICCARDO MEL, Università degli Studi di Padova
- G. MONTEREALE GAVAZZI, Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia; Royal Belgian Institute of Natural Sciences; University of Ghent
- PETER A. NELSON, Università degli Studi di Padova

GIOVANNA NORDIO, Università degli Studi di Padova

#### RELATORI

- Andrea Rinaldo, Università degli Studi di Padova; Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti
- M. SIGOVINI, Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia
- SONIA SILVESTRI, Nicholas School of the Environment, Duke University
- TAZIO STROZZI, GAMMA Remote Sensing, Gümligen, Svizzera
- NICOLETTA TAMBRONI, Università degli Studi di Genova
- PIETRO TEATINI, Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia; Università degli Studi di Padova
- LAURA TOMMASINI, Università degli Studi di Padova
- LUIGI TOSI, Istituto di Scienze Marine (ISMAR), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia
- F. TRINCARDI, Istituto di Scienze Marine-Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia;
- ELENA ZIGGIOTTO, Università degli Studi di Padova

Pubblicato nel mese di novembre 2017

All'indirizzo internet www.istitutoveneto.it è consultabile il catalogo delle più recenti pubblicazioni dell'Istituto Veneto.

Allo stesso indirizzo possono essere scaricati gratuitamente alcuni volumi in formato PDF.

I volumi possono essere acquistati presso l'Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti (fax 041.5210598) oppure tramite il distributore CIERREVECCHI Srl (fax 049.8840277)

268

Nelle vicende più recenti riguardanti la laguna di Venezia continuano a essere pesantemente coinvolti gli interventi in via di completamento alle bocche per la difesa della laguna dalle acque alte. Si aggiungono, da qualche tempo a questa parte, forti contrapposizioni per la presenza in laguna delle grandi navi da crociera.

Nel fervore delle iniziative volte a sostenere l'*uso* della laguna da parte dell'uomo, continuano purtroppo a restare sullo sfondo, nonostante le crescenti contrarietà dell'opinione pubblica, i problemi della salvaguardia lagunare e, in particolare, la necessità di guardare finalmente con attenzione alla sua condizione morfologica e a un degrado, che sembra inarrestabile, delle sue forme caratteristiche (*canali, bassifondi, velme, ghebbi* e *barene*).

È in questo quadro di scelte non proprio confortanti, che si inquadrano i contributi del presente volume degli Atti della Commissione di studio sui problemi di Venezia. La speranza è che le nuove conoscenze e i risultati illustrati possano essere di stimolo per quanti hanno nelle loro mani il destino della laguna di Venezia, affinché si guardi con maggiore attenzione alla tutela del suo ambiente, promuovendo *usi* maggiormente compatibili con la sua intrinseca fragilità e prendendo finalmente coscienza del fatto che quanto. di tale ambiente viene dissipato possiede a sua volta un valore economico.

ISBN ebook: 978-88-95996-77-6