UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

TESI DI LAUREA

EVOLUZIONE MORFOLOGICA DELLA LAGUNA DI VENEZIA: ANALISI STORICA E IMPATTI DELLE PRINCIPALI OPERE IDRAULICHE

Relatore: **Chiar.mo PROF. DANIELE P. VIERO**

Laureando: **NICOLO' GIACOMELLO**

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

SOMMARIO

1. INTRODUZIONE 1

2. GENESI ED EVOLUZIONE NATURALE DELLA LAGUNA (FINO ALL'ANNO 1000) 3

2.1 ORIGINI GEOLOGICHE DELLA LAGUNA 3

2.2 INFLUENZA DEI FIUMI E DEL MARE 4

2.3 PROCESSI MORFOLOGICI NATURALI 6

3. LE GRANDI TRASFORMAZIONI IDRAULICHE: CRONOLOGIA E FINALITÀ 7

3.1 LA DIVERSIONE DEI FIUMI E IL CONTROLLO DEGLI APPORTI SOLIDI 8

3.1.1 LE PRINCIPALI OPERE DI DEVIAZIONE 10

3.1.2 CONSEGUENZE IDRAULICHE, MORFOLOGICHE E DIBATTITO TECNICO-POLITICO 13

3.2 LA COSTRUZIONE DEI MOLI ALLE BOCCHE DI PORTO 14

3.2.1 I TENTATIVI PRIMA DELLE GRANDI OPERE 14

3.2.2 LE GRANDI OPERE DELL'OTTOCENTO E NOVECENTO 15

3.2.3 CONSEGUENZE IDRAULICHE E MORFOLOGICHE 16

3.3 LO SCAVO DEI GRANDI CANALI NAVIGABILI 17

3.3.1 I PRINCIPALI CANALI NAVIGABILI 17

3.3.2 IMPATTI SUL SITEMA LAGUNARE 19

4. GLI EFFETTI IDRAULICI DELLE OPERE REALIZZATE NEGLI ULTIMI DUE SECOLI 21

4.1 FONTI E STRUMENTI DI ANALISI 21

4.1.1 FONTI STORICHE E DATASET BATIMETRICI 21

4.1.2 MODELLAZIONE IDRODINAMICA E SCELTE DI TARATURA 22

4.2 LA LAGUNA OTTOCENTESCA: CONGIGURAZIONE IDRAULICA E MORFOLOGICA 22

4.3 GLI INTERVENTI PRINCIPALI E I LORO EFFETTI 23

4.3.1 I MOLI ALLE BOCCHE DI PORTO *23*

4.3.2 IL CANALE VITTORIO EMANUELE E LE COLMATE DI PORTO MARGHERA *25*

4.3.3 IL CANALE DI MALAMOCCO-MARGHERA *25*

4.4 LA LAGUNA CONTEMPORANEA 26

5. LE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE E IL SISTEMA MO.S.E. 29

5.1 IL SISTEMA MO.S.E: DESCRIZIONE TECNICA 30

5.2 LE PRIME OPERAZIONI: DATI, METODOLOGIE E RISULTATI CHIAVE . 32

5.3 SITUAZIONE ATTUALE E CRITICITA' EMERGENTI 34

6. GLI EFFETTI IDRAULICI DELLE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE 37

6.1 DISTURBI INDOTTI DAL MO.S.E. NEL NORD ADRIATICO 37

7. CAUSE E IMPLICAZIONI DEL DEGRADO MORFOLOGICO DEL BACINO LAGUNARE. 39

7.1 BILANCI E PROCESSI DOMINANTI 40

7.2 PRESSIONI ANTROPICHE E IL RUOLO DELLE BOCCHE DI PORTO 42

7.3 EFFETTI MORFOLOGICI DEL MO.S.E. 43

7.3.1 IMPATTO SULLE BARENE E SUL BILANCIO SEDIMENTARIO 44

7.4 PROSPETTIVE FUTURE 45

CONCLUSIONI 47

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI 49

1. INTRODUZIONE

La Laguna di Venezia rappresenta uno degli ecosistemi più affascinanti e complessi al mondo, frutto di un delicato equilibrio tra processi naturali e interventi antropici. Fin dalle sue origini, essa ha svolto un ruolo fondamentale per la città di Venezia, sia come difesa naturale dalle mareggiate, sia come risorsa economica, ambientale e sociale. La sua storia è segnata da un costante intreccio tra dinamiche idrodinamiche e decisioni ingegneristiche, che ne hanno garantito la sopravvivenza ma al tempo stesso ne hanno modificato profondamente la struttura.

La presente tesi si propone di analizzare questo equilibrio, ricostruendo l'evoluzione storica della laguna e mettendo in luce le motivazioni che, nel corso dei secoli, hanno spinto a intervenire sul bacino. Da un lato, l'obiettivo è ripercorrere le principali scelte idrauliche che hanno modellato il sistema, dall'antichità fino alle opere più recenti; dall'altro, si intende valutarne gli impatti sui regimi idraulici e sulla morfologia lagunare, evidenziando i processi di trasformazione e degrado che ne sono derivati.

Il metodo adottato si basa principalmente sull'analisi del volume Fatti e misfatti di idraulica lagunare di Luigi D'Alpaos (2010). A questo riferimento fondamentale sono stati integrati ulteriori contributi scientifici e modellistici, in particolare relativi al progetto Mo.S.E. e ai suoi effetti idraulici e morfologici, non trattati nel libro. In questo modo è stato possibile coniugare una prospettiva storica con una valutazione tecnico-idraulica e geomorfologica, mettendo in evidenza non solo i successi, ma anche gli errori e le conseguenze degli interventi realizzati.

La tesi si articola in più fasi: dapprima viene presentata una panoramica sull'evoluzione naturale della laguna e sui processi idrodinamici che ne regolano il funzionamento; successivamente si analizzano, in ordine cronologico, le trasformazioni indotte dalle grandi opere idrauliche e i loro effetti sui bilanci sedimentari e sulla morfologia interna; infine, particolare attenzione è rivolta alle opere più recenti alle bocche di porto, con un approfondimento specifico sul Mo.S.E. e sugli impatti da esso generati, soprattutto in relazione al degrado morfologico.

2. GENESI ED EVOLUZIONE NATURALE DELLA LAGUNA (FINO ALL'ANNO 1000)

2.1 ORIGINI GEOLOGICHE DELLA LAGUNA

La laguna di Venezia appartiene al sistema delle lagune dell'Alto Adriatico, formatesi in una fascia costiera caratterizzata da una morfologia bassa, ricca di foci fluviali e soggetta a dinamiche di sommersione e sedimentazione. L'area lagunare si è sviluppata a partire da millenni di depositi alluvionali e marini che, nel tempo, hanno colmato una depressione naturale delimitata da cordoni litoranei sabbiosi.

Le oscillazioni del livello marino dovute alle glaciazioni hanno avuto un ruolo determinante. Durante le fasi glaciali, l'abbassamento dei mari comportava una regressione della linea di costa, mentre le successive trasgressioni marine, legate allo scioglimento dei ghiacciai, determinavano ingressioni di acqua marina nelle aree depresse, favorendo la formazione di bacini lagunari. Questo alternarsi di emersione e sommersione ha dato origine a un ambiente di transizione che ancora oggi caratterizza la laguna.

Numerosi ritrovamenti archeologici confermano la variabilità di tali condizioni: reperti preistorici e romani sono stati rinvenuti a profondità variabili, tra 1,5 e 6 metri sotto l'attuale piano campagna, dimostrando che la laguna non è sempre esistita. In epoche diverse, infatti, vaste aree risultavano emerse e coltivate, prima di essere nuovamente sommerse dalle acque.



Figura 2.1 – Una recente immagine satellitare della laguna di Venezia

2.2 INFLUENZA DEI FIUMI E DEL MARE

Il bacino lagunare è stato modellato nel tempo dall'interazione continua tra gli apporti fluviali e quelli marini. Da un lato, il mare, attraverso le bocche di porto[1], ha mantenuto il bacino salmastro e aperto, impedendone la trasformazione in terraferma; dall'altro, i fiumi hanno fornito un costante apporto di sedimenti, favorendo processi di interrimento che tendevano a colmare le aree depresse.

È importante sottolineare che questo equilibrio è dinamico: in assenza del contributo fluviale la laguna si sarebbe trasformata in un golfo marino, mentre senza l'apporto del mare sarebbe stata destinata a interrarsi. Un ruolo fondamentale è stato svolto anche dalle correnti di marea, che hanno modellato i fondali e favorito lo sviluppo di un sistema di canali, strutturatosi nel tempo attraverso incisioni e progressive organizzazioni idrauliche.

[1] **Bocche di porto:** aperture naturali o artificiali nei cordoni litoranei che mettono in comunicazione la laguna con il mare Adriatico.

Studi condotti mediante modelli idrodinamici (D'Alpaos A. et al., 2005; D'Alpaos A. et al., 2006) e sperimentazioni in laboratorio su lagune schematiche (Stefanon et al., 2008; Stefanon et al., 2009) hanno dimostrato che, anche in condizioni iniziali di fondali piani, la sola azione combinata di marea e correnti è sufficiente a generare una rete ordinata di canali e barene. Anche gli eventi estremi hanno avuto un ruolo determinante. Le grandi piene fluviali o le mareggiate, infatti, hanno accelerato i processi morfogenetici, modificando localmente i cordoni litoranei[2] e influenzando la distribuzione dei sedimenti. Tra i fattori più significativi va ricordata l'idrografia del fiume Po e dei suoi rami: deviazioni naturali e rotte improvvise, come quella di Ficarolo[3] del 1152, determinarono una netta divisione in quella che un tempo era quasi un'unica laguna estesa da Grado a Ravenna, modificando radicalmente l'evoluzione morfologica del sistema lagunare e del delta. Ciò dimostra la stretta connessione tra le dinamiche fluviali e la stabilità della laguna.

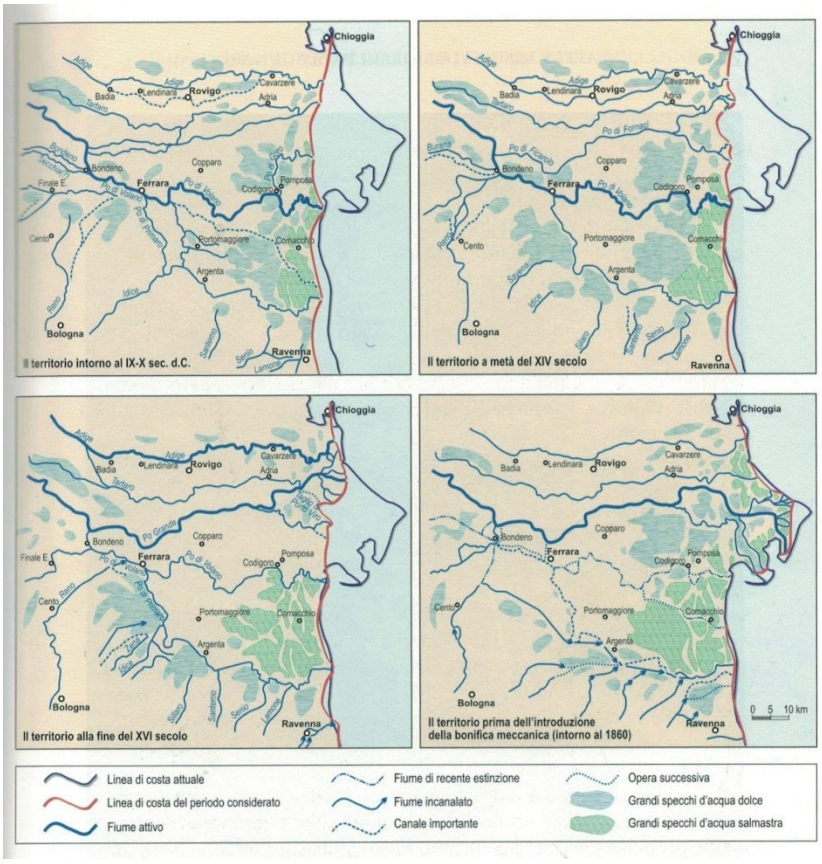


Figura 2.2 – Evoluzione nel tempo del Delta de Po; Riprodotta da D'Alpaos, 2010a.

[2] **Cordoni litoranei:** formazioni sabbiose costiere allungate, parallele alla linea di riva, che delimitano la laguna dal mare.

[3] **Rotta di Ficarolo (1152):** deviazione improvvisa del Po che modificò radicalmente il corso del fiume, con effetti duraturi sulla laguna e sul delta.

2.3 PROCESSI MORFOLOGICI NATURALI

Sono tre i principali processi naturali che hanno governato l'evoluzione della laguna fino all'anno Mille: la sedimentazione, la subsidenza e l'eustatismo. La sedimentazione, alimentata dagli apporti fluviali e successivamente rielaborata dalle correnti tidali, ha favorito l'accumulo di materiali fini che, con il passare del tempo, hanno portato alla formazione di barene[4], velme[5] e bassifondi, elementi caratteristici dell'ambiente lagunare. La subsidenza[6], intesa come abbassamento naturale del suolo causato dalla compattazione dei sedimenti e da fattori tettonici, ha contribuito a mantenere l'area costantemente soggetta a sommersione. L'eustatismo[7], ossia la variazione del livello marino legata ai cicli glaciali, ha inciso profondamente sull'estensione della laguna: durante l'ultima glaciazione, ad esempio, il livello del mare Adriatico si abbassò di oltre cento metri, spostando la linea di costa di decine di chilometri rispetto a quella attuale; al termine della glaciazione, la successiva risalita marina riportò progressivamente l'acqua nelle aree costiere, ricreando le condizioni lagunari.

L'insieme di questi processi ha reso la laguna un ambiente instabile e in continua trasformazione. Prima dell'anno Mille, il quadro che emerge è quello di un sistema dinamico, soggetto ad alternanze di espansione e regressione, che costituì il contesto in cui Venezia iniziò a svilupparsi come insediamento stabile. La laguna, infatti, rappresentava al tempo stesso un rifugio naturale contro le invasioni e una risorsa strategica per la navigazione e i traffici commerciali.

[4] **Barene:** superfici di terra emersa periodicamente sommerse dalla marea, tipiche delle lagune.
[5] **Velme:** banchi sabbiosi o fangosi sommersi per gran parte del tempo, emergenti solo con la bassa marea.
[6] **Subsidenza:** abbassamento progressivo del suolo dovuto a cause naturali (compattazione dei sedimenti, fenomeni tettonici) o antropiche.
[7] **Eustatismo:** variazioni del livello medio del mare su scala geologica, dovute a cicli glaciali e interglaciali.

3. LE GRANDI TRASFORMAZIONI IDRAULICHE: CRONOLOGIA E FINALITÀ

Sin dalle origini, la laguna non è stata soltanto l'ambiente in cui Venezia si è sviluppata, ma la condizione imprescindibile per la sua stessa esistenza ed espansione. La sopravvivenza e l'evoluzione della città, non solo sul piano economico ma anche su quello sociale e politico, sono sempre state strettamente legate al mantenimento dell'equilibrio lagunare, equilibrio che nel corso della storia è stato più volte messo a rischio sia dalle attività umane sia dai processi naturali.

Le opere idrauliche non nacquero come interventi isolati, ma come strumenti strategici e fondamentali per garantire stabilità alla laguna e continuità al potere veneziano. L'obiettivo politico principale era quello di proteggere la centralità di Venezia come nodo strategico, sia commerciale che militare; parallelamente, la finalità tecnico-idraulica mirava a preservare la morfologia della laguna e a ridurre i rischi di colmata[8]. Ogni grande intervento si inseriva dunque in una logica di interesse collettivo e in una visione di lungo periodo. La città e i suoi abitanti, consapevoli della fragilità dell'ambiente lagunare, tradussero la gestione idraulica in una vera e propria politica di governo e gestione del territorio.

Nel corso dei secoli, il governo veneziano affidò la gestione della laguna a istituzioni e magistrature specializzate, che operarono seguendo principi saldi e condivisi, volti a consolidare e rafforzare la potenza della città. Il primo principio fu la salvaguardia morfologica, ossia l'insieme delle azioni volte a prevenire l'interramento e a garantire la permanenza degli spazi acquei, condizione fondamentale per la conservazione del carattere lagunare. Il secondo riguardava la navigazione, intesa come la tutela e il miglioramento delle vie d'acqua, indispensabili per il commercio, principale fonte di prosperità della Serenissima. Infine, la difesa, che consisteva nel preservare la laguna come "barriera naturale" contro le invasioni sia dal mare che dalla terraferma, assicurando così una protezione aggiuntiva alla città.

Tutte le opere idrauliche furono concepite e realizzate in funzione di questi principi e, grazie al contributo di ingegneri idraulici e tecnici della Repubblica, garantirono per secoli una gestione coerente della laguna e il mantenimento di quell'equilibrio tanto

[8] **Colmata:** progressivo riempimento di un bacino lagunare o fluviale dovuto alla deposizione dei sedimenti trasportati dai corsi d'acqua.

fragile quanto essenziale. Queste azioni testimoniano come Venezia sia riuscita a trasformare una condizione di vulnerabilità in un punto di forza, e permettono di affermare che i tecnici e gli ingegneri del passato abbiano posto le basi di una vera e propria "ingegneria ambientale", le cui considerazioni rappresentano ancora oggi un riferimento fondamentale per comprendere le dinamiche storiche e tecniche della laguna.

3.1 LA DIVERSIONE DEI FIUMI E IL CONTROLLO DEGLI APPORTI SOLIDI

Sin dal XII secolo la laguna di Venezia iniziò a presentare fenomeni di interrimento sempre più preoccupanti: i principali fiumi che vi sfociavano, come il Brenta, il Bacchiglione, il Piave e il Sile, riversavano nel bacino ingenti quantità di acque torbide[9], soprattutto durante le piene. Le maree, pur regolando gli scambi con il mare, non erano sufficientemente energiche per mantenere i sedimenti in sospensione e convogliarli verso le bocche di porto. Ne derivava un progressivo deposito solido che riduceva la profondità dei fondali e favoriva l'avanzamento delle paludi, mettendo così a rischio la sopravvivenza stessa della laguna.

Dal punto di vista idraulico, la progressiva riduzione delle superfici acquee determinava un indebolimento del cosiddetto prisma di marea, ossia il volume d'acqua scambiato in ciascun ciclo tidale[10]. Un prisma minore comportava correnti più deboli alle bocche di porto e una crescente tendenza all'ostruzione dei canali d'accesso, con conseguenze gravi per la navigazione. I veneziani sintetizzarono questa consapevolezza nell'aforisma "gran laguna fa gran porto", evidenziando il legame diretto tra estensione lagunare e funzionalità portuale.

Questa intuizione trova oggi una conferma empirica nella legge di O'Brien–Jarrett–Marchi (O'Brien, 1931; Jarrett, 1976; Marchi, 1990), che esprime una relazione fra l'area della sezione trasversale di una bocca di porto (Ω) e il prisma di marea massimo (P):

$$\Omega = kP^{\alpha}$$

dove k è una costante di proporzionalità e α un esponente empirico. Applicata anche alla laguna di Venezia, questa legge conferma che una riduzione dell'estensione lagunare

[9] **Tidale**: relativo alle maree. In idraulica lagunare indica i processi e i volumi d'acqua (prisma di marea) che entrano ed escono dal bacino durante un ciclo di marea.

[10] **Acque torbide:** acque fluviali con elevata concentrazione di sedimenti in sospensione (limi, sabbie fini, materiale organico), responsabili dei fenomeni di interrimento e colmata nei bacini recettori.

implica la diminuzione del prisma e, di conseguenza, la diminuzione della sezione efficace delle bocche, con maggiore tendenza all'insabbiamento. Un aforisma del Quattrocento trova quindi oggi una solida conferma nelle leggi dell'idraulica moderna.

Per contrastare questi processi, la Repubblica mise in atto una strategia di gestione sempre più radicale. I primi tentativi furono rappresentati dagli argini di intestadura[11] e dal cosiddetto partidor[12] (o traversagno), pensati per deviare i sedimenti verso bacini meno sensibili. Tuttavia, a causa delle ridotte pendenze idrauliche, tali opere si rivelarono poco efficaci, favorendo comunque la deposizione dei materiali. Di fronte a questi insuccessi, la Serenissima optò per una scelta di ben altra portata: l'estromissione progressiva dei fiumi dalla laguna e il loro convogliamento diretto in mare. Questa decisione segnò l'inizio della cosiddetta epoca delle diversioni, che avrebbe mutato in modo irreversibile l'equilibrio idraulico e morfologico del bacino lagunare.



Figura 3.1 - Posizione dell'argine di intestadura e del traversagno secondo una mappa di Cristoforo Sabbadino del 1547.

[11] **Argini di intestadura:** opere arginali realizzate lungo i margini lagunari a partire dal XIV secolo, con lo scopo di separare le acque dolci fluviali da quelle salate della laguna. Dal punto di vista idraulico costituivano una barriera longitudinale, che raccoglieva le acque dei fiumi in arrivo e le convogliava in canali artificiali per allontanarle dalle aree più sensibili.

[12] **Partidor (o traversagno):** opera idraulica costruita a metà del XV secolo come prosecuzione degli argini di intestadura. Si trattava di un argine trasversale che separava bacini lagunari contigui (San Nicolò e Malamocco), con l'obiettivo di impedire che i sedimenti trasportati dal Brenta si diffondessero verso i canali prossimi a Venezia.

3.1.1 LE PRINCIPALI OPERE DI DEVIAZIONE

Il Brenta e il Bacchiglione

Il primo fiume oggetto di deviazioni radicali fu il Brenta, la cui foce principale si trovava a Fusina e riversava torbide che minacciavano direttamente Venezia e il bacino di San Marco. Il primo grande intervento fu la deviazione a Conche (1502-1507), dove Brenta e Bacchiglione furono riuniti in un unico sbocco presso l'attuale canale di Montalbano. Questa soluzione, pur alleviando i problemi in prossimità della città, aggravò però le condizioni della laguna meridionale, favorendo fenomeni di interramento. Per far fronte a tali criticità, nel 1540 si decise di condurre i due fiumi in alvei[13] separati fino a Brondolo, dove nel 1548 venne costruito il cosiddetto Parador di Brondolo[14], che sancì la separazione definitiva delle acque dolci dalla laguna centrale.

L'opera salvaguardò Venezia, ma ebbe conseguenze pesantissime per la laguna di Brondolo, portandola alla definitiva scomparsa. Questa scelta alimentò un acceso dibattito, in particolare tra Cristoforo Sabbadino[15] e Alvise Cornaro[16]: il primo sosteneva la necessità di estromettere i fiumi per preservare la laguna, mentre il secondo riteneva utile mantenere portate liquide del Brenta per favorire la circolazione interna e soprattutto la bonifica delle terre marginali a fini agricoli. La vittoria della linea di Sabbadino inaugurò la politica di progressivo allontanamento dei corsi d'acqua dal bacino lagunare.

I corsi minori

Dopo la diversione del Brenta, la Repubblica intervenne anche su numerosi corsi minori. Nel 1507 il Marzenego fu deviato verso il bacino di Treporti, mentre nel 1610 fu aperto il Brenta Novissimo, grande collettore che convogliava nel nuovo sbocco a Brondolo le acque di diversi fiumi minori. Parallelamente fu mantenuto l'alveo del Brenta (oggi Naviglio Brenta), che venne adattato alla navigazione interna e al traffico commerciale con Padova. Questi interventi, pur meno imponenti, contribuirono a ridurre i fenomeni di

[13] **Alveo**: termine che indica il solco occupato dal corso d'acqua.

[14] **Parador di Brondolo**: struttura di separazione realizzata nel 1548 per isolare la laguna di Chioggia dagli apporti solidi del Brenta e del Bacchiglione. Inizialmente palificata, fu poi trasformata in un argine in terra.

[15] **Cristoforo Sabbadino**: (1509-1588) proto alle acque della Repubblica di Venezia, figura centrale dell'ingegneria idraulica cinquecentesca.

[16] **Alvise Cornaro:** (1484-1566) patrizio veneziano, savio alle acque e sostenitore delle bonifiche agrarie.

dolcificazione e interramento nei bacini centrali, ma accrebbero i rischi idraulici per l'entroterra, reso più esposto alle inondazioni.



Figura 3.2 – Carta storica dei principali interventi di deviazione del Brenta, Bacchiglione e corsi minori (Pietro Marcon 1878) Riprodotta da D'Alpaos 2010a .

Il Piave

Il Piave rappresentava un ulteriore problema: durante le piene riversava enormi quantità di torbide nella laguna superiore, con depositi che si accumulavano soprattutto in prossimità della bocca di San Nicolò, ostacolando così la navigazione verso Venezia. I primi tentativi di contenimento furono l'argine di San Marco[17] (1534-1543) e il Taglio di Re[18], che ottennero risultati modesti. Solo nel 1664 si attuò la diversione definitiva, con

[17] **Argine di San Marco**: argine costruito tra il 1534 e il 1543 tra Ponte di Piave e Cava di Caligo, per contenere le esondazioni del Piave in destra idrografica.
[18] **Taglio di Re:** diversivo rettilineo lungo circa 15 km, scavato nel XVI secolo per alleggerire le piene del Piave. Collegava Musile a Cortellazzo

il nuovo sbocco a Porto Santa Margherita; tuttavia, nel 1683, a seguito di una rotta arginale, la foce si spostò nuovamente a Cortellazzo, dove si trova tuttora.

Il Sile

Il Sile e altri corsi minori non costituivano un problema per i sedimenti trasportati, ma per i fenomeni di impaludamento e per la forte dolcificazione delle acque lagunari. Per contrastare questi effetti, nel 1683 fu realizzato il Taglio del Sile, che convogliò le sue acque nell'alveo abbandonato del Piave Vecchia, allontanandole così dal bacino lagunare.

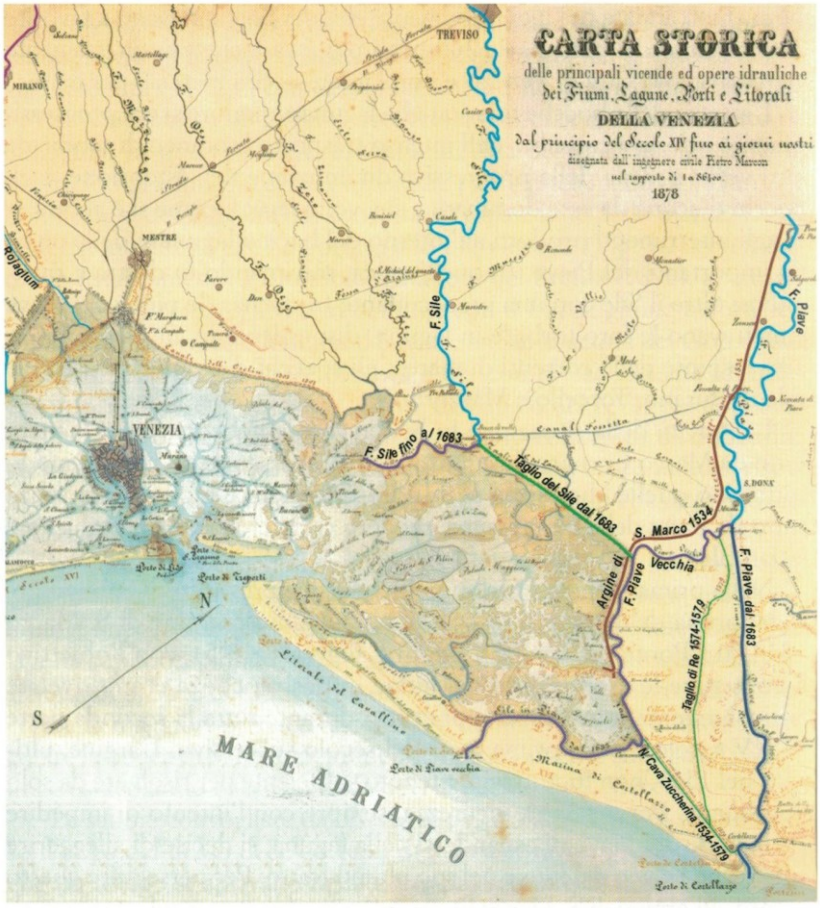


Figura 3.3 – Carta storica dei principali interventi di deviazione del Piave e del Sile (Pietro Marcon 1878) Riprodotta da D'Alpaos 2010a .

3.1.2 CONSEGUENZE IDRAULICHE, MORFOLOGICHE E DIBATTITO TECNICO-POLITICO

Le azioni di deviazione dei fiumi segnarono una svolta netta nell'equilibrio lagunare, andando a rovesciare quei processi che per secoli ne avevano regolato l'evoluzione. Si passò così da un regime in cui l'apporto solido dei corsi d'acqua garantiva l'accrescimento di barene e velme[19], a una loro estromissione quasi totale, che ridusse drasticamente il bilancio sedimentario e innescò un lento ma costante processo di erosione. Le barene, prive di rifornimento, iniziarono a regredire sotto l'azione combinata di subsidenza ed eustatismo, mentre la diminuzione del prisma di marea indebolì le correnti alle bocche di porto, rendendo più difficoltoso il mantenimento dei canali navigabili.

Accanto alla carenza di sedimenti si manifestarono anche gli effetti della riduzione degli apporti di acqua dolce, che accentuarono la salinizzazione e portarono alla scomparsa di ambienti di transizione, con conseguenze ecologiche rilevanti. Le carte storiche testimoniano chiaramente questo cambiamento: da una rete di canali incisi nelle terre marginali si passò progressivamente a un ambiente dominato dall'espansione delle superfici d'acqua e dalla contrazione delle barene.

Tali scelte maturarono all'interno di un vivace dibattito politico, che ebbe il suo apice nella contrapposizione tra Cristoforo Sabbadino e Alvise Cornaro. Il primo, sostenitore di una visione sistemica fondata sul principio "gran laguna fa gran porto", difendeva la necessità di estromettere radicalmente i fiumi; il secondo, al contrario, riteneva che le portate fluviali fossero indispensabili per favorire la circolazione interna e per la bonifica delle terre marginali. Prevalse la linea di Sabbadino, che ispirò per secoli l'azione della Repubblica, salvaguardando Venezia ma a scapito dell'entroterra.

Con uno sguardo retrospettivo, si può dire che questa strategia ebbe effetti ambivalenti: da un lato preservò i bacini centrali dall'interramento, dall'altro indebolì progressivamente la stabilità idraulica e morfologica lagunare, aprendo la strada a criticità che ancora oggi condizionano l'equilibrio del sistema.

[19] **Velme:** superfici lagunari poste a quote più basse delle barene, sommerse per la maggior parte del tempo e affioranti solo durante le basse maree.

3.2 LA COSTRUZIONE DEI MOLI ALLE BOCCHE DI PORTO

Agli inizi del XIV secolo la città di Venezia dovette confrontarsi con un problema crescente per la navigazione: le bocche di porto andavano incontro a un progressivo insabbiamento, in particolare la vecchia bocca di San Nicolò, fondamentale via d'accesso al bacino di San Marco. Le barre di foce[20], alimentate dalle sabbie trasportate dal Piave e spinte verso sud dalle correnti costiere, ridussero progressivamente i fondali da circa 5 metri a valori sempre più bassi, rendendo difficile, se non impossibile, l'ingresso in laguna alle navi di maggiore stazza.

Nel porto di Malamocco, invece, la situazione appariva quasi opposta: qui i fondali tendevano ad approfondirsi, soprattutto dopo la deviazione del Brenta nel Quattrocento. Questa contraddizione alimentò il già acceso dibattito politico e tecnico tra Alvise Cornaro e Cristoforo Sabbadino. Cornaro interpretava l'approfondimento come un effetto positivo degli apporti fluviali, mentre Sabbadino ne colse le vere cause nella competizione idraulica tra le diverse bocche e nella particolare configurazione morfologica del litorale, sottolineando come la ridotta energia tidale di San Nicolò compromettesse la capacità della bocca di mantenersi efficiente e navigabile.

Il contrasto tra i due porti e le opposte visioni degli idraulici dell'epoca rese evidente la necessità di un intervento organico. Nei secoli successivi si susseguirono numerosi tentativi, che avrebbero infine condotto, con l'età napoleonica e poi austriaca, alla costruzione dei moli foranei[21], destinati a trasformare in modo irreversibile la dinamica delle bocche lagunari

3.2.1 I TENTATIVI PRIMA DELLE GRANDI OPERE

I primi provvedimenti per salvaguardare la funzionalità delle bocche di porto furono soluzioni leggere e localizzate, come l'arginatura dei litorali[22], la costruzione di piccoli traversi e il restringimento artificiale di alcuni canali per aumentare la velocità delle correnti. Un'idea straordinaria per l'epoca fu quella avanzata da Sabbadino nel 1551, consistente nella costruzione di un molo divisorio tra San Nicolò e Sant'Erasmo per

[20] **Barre di foce:** accumuli sabbiosi che si formano in prossimità delle foci lagunari o fluviali per l'azione combinata delle correnti costiere e del moto ondoso, riducendo la profondità dei canali di accesso e ostacolando la navigazione.
[21] **Moli foranei:** opere marittime in pietrame o calcestruzzo, realizzate a protezione delle bocche lagunari e spinte verso il mare aperto per convogliare i flussi tidali, approfondire i fondali e stabilizzare i canali di ingresso.
[22] **Arginatura dei litorali:** intervento consistente nel rafforzamento o innalzamento degli argini sabbiosi naturali lungo le coste, finalizzato a contenere l'erosione e limitare l'ingresso di sabbie nelle bocche di porto.

concentrare i flussi e potenziare così l'erosione della foce. Tuttavia, a causa dei limitati mezzi disponibili e della complessità, questi interventi risultarono incapaci di contrastare il continuo apporto di sabbie trasportate dal mare.

Nel frattempo, il porto di Malamocco, che presentava condizioni opposte, si impose progressivamente come alternativa a San Nicolò. Nel Settecento la Serenissima prese infatti la decisione di abbandonare quest'ultimo a favore di Malamocco, ordinando lo scavo di un canale lagunare artificiale che collegasse direttamente la nuova bocca con il bacino di San Marco.

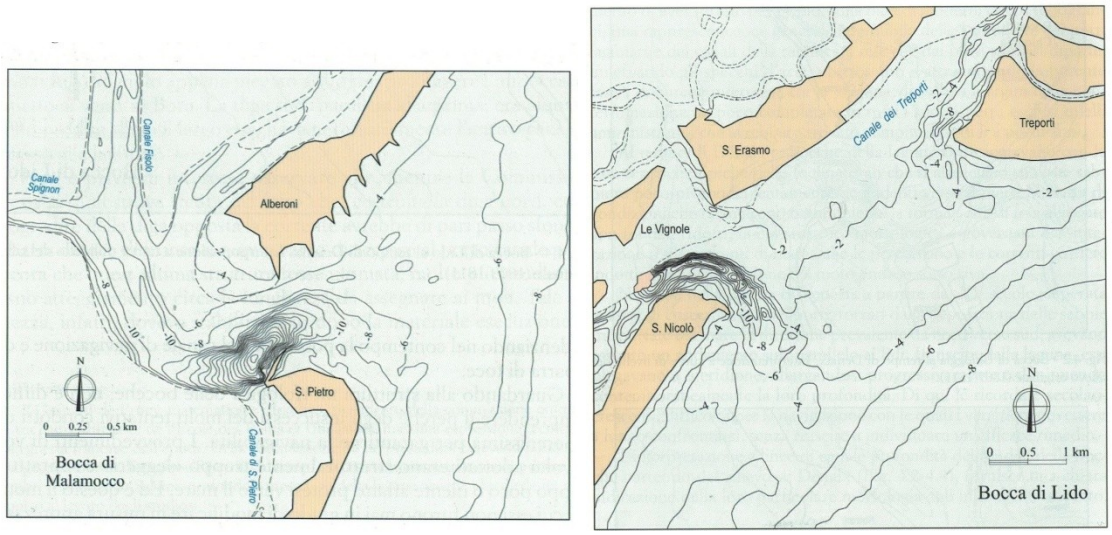


Figura 3.4 – Bocca di Malamocco (a sinistra) e di Lido (a destra) prima delle grandi opere (D'Alpaos 2010a)

3.2.2 LE GRANDI OPERE DELL'OTTOCENTO E NOVECENTO

Con l'età napoleonica la questione delle bocche tornò al centro dell'attenzione. L'aumento delle dimensioni dei bastimenti e l'introduzione dei battelli a vapore richiedevano infatti fondali più profondi e regolari. Per questo nel 1806 fu istituita la Commissione Prony, incaricata di studiare soluzioni al problema. La proposta fu quella di armare la bocca di Malamocco con moli foranei, spinti fino a fondali di circa 9 metri e disposti in modo da concentrare le correnti di marea nel canale di accesso.

I lavori iniziarono nel 1813 e, dopo numerose interruzioni, si conclusero nel 1872 sotto il governo austriaco. L'opera presentava un molo nord lungo oltre 2 km e un molo sud di circa 950 m, distanziati 475 m, e consentì di stabilizzare i fondali attorno ai 9–10 metri, garantendo la navigabilità in sicurezza e segnando il successo di questa nuova tecnica.



Figura 3.5 – Immagine satellitare della bocca di Malamocco nelle fasi di realizzazione del Mose (Google Earth 2013).

Sull'esempio di Malamocco anche le altre bocche vennero armate[23]. A Treporti, San Nicolò e Sant'Erasmo si decise di riunire gli sbocchi in un unico varco, la bocca di Lido, dove fu costruita una diga di oltre 3 km, completata nel 1892. Infine, a Chioggia, dove i lavori iniziarono nel 1910 e si conclusero solo nel 1934, vennero realizzati due moli più corti ma capaci di garantire fondali stabili tra i 7 e i 9 metri. In tutti i casi, i nuovi canali consentirono l'accesso anche a navi di maggiore pescaggio, consolidando definitivamente il ruolo delle bocche come porte di ingresso moderne alla laguna.

3.2.3 CONSEGUENZE IDRAULICHE E MORFOLOGICHE

La costruzione dei moli alle bocche, pur risolvendo i problemi legati alla navigazione, introdusse nuove criticità idrauliche e morfologiche. L'armatura delle foci aumentò infatti i volumi di scambio mare–laguna, alterando la distribuzione delle correnti tidali e generando forti asimmetrie tra flusso e riflusso. Ciò ebbe conseguenze sfavorevoli sul trasporto solido e sull'assetto morfodinamico[24] della laguna.

[23] **Armatura delle bocche**: termine con cui si indica l'insieme degli interventi strutturali (moli, dighe, palificate) atti a stabilizzare e regolare idraulicamente le foci lagunari, garantendo profondità costanti e riducendo l'insabbiamento.
[24] **Assetto morfodinamico:** configurazione geomorfologica di un ambiente costiero o lagunare in relazione ai processi dinamici che lo governano (idraulici, sedimentari, tidali). Nella laguna di Venezia indica l'equilibrio tra erosione, sedimentazione e circolazione mareale.

Veniva così meno la centralità del principio “gran laguna fa gran porto”: i moli modificarono in modo irreversibile l’equilibrio idraulico lagunare, già compromesso dall’estromissione dei fiumi. Ne derivarono un incremento delle velocità in corrispondenza delle bocche, processi erosivi diffusi nei canali interni e una ridistribuzione dei sedimenti che ha contribuito al degrado morfologico osservabile ancora oggi, con fenomeni come la perdita di barene e velme e la progressiva fragilità del sistema lagunare.

3.3 LO SCAVO DEI GRANDI CANALI NAVIGABILI

Lo scavo dei grandi canali navigabili segna l’inizio di un nuovo capitolo nella storia idraulica della laguna di Venezia. Dopo le opere di diversione dei fiumi e la costruzione dei moli foranei, la priorità divenne garantire l’accesso a navi di stazza sempre maggiore, spinte dallo sviluppo industriale di Porto Marghera. Questo portò a ridisegnare profondamente la rete dei canali lagunari, trasformandola da un sistema naturale in una vera e propria infrastruttura portuale.

3.3.1 I PRINCIPALI CANALI NAVIGABILI

Canale di Santo Spirito

Il primo grande canale navigabile fu il canale di Santo Spirito, realizzato nel 1725 per collegare Malamocco al bacino di San Marco. Per lungo tempo costituì la via di accesso principale delle grandi navi. Pur ampliato in epoca napoleonica fino a 6,5 m di profondità e 14–18 m di larghezza, mantenne un ruolo marginale poiché non alterava in modo significativo l’equilibrio idraulico lagunare.

Canale Vittorio Emanuele

Il vero salto di scala avvenne nel 1920 con lo scavo del canale Vittorio Emanuele, concluso nel 1925, che collegava direttamente Porto Marghera a Venezia. Portato fino a 9–10 m di profondità e 40–50 m di larghezza, costituì una vera e propria “autostrada d’acqua” per il traffico mercantile. Fu però il primo canale a introdurre forti squilibri: la marea trovò qui un percorso preferenziale, con una propagazione più rapida che innescò correnti trasversali nei canali minori, erosione dei bassifondi e interrimenti diffusi. La

manutenzione richiese dragaggi[25] continui, pari ad esempio a 280.000 m³ solo nel periodo 1992–1997.

Canale Malamocco-Marghera

Gli effetti maggiori furono tuttavia causati dallo scavo del canale Malamocco–Marghera, noto anche come canale dei petroli, realizzato tra il 1964 e il 1968. Progettato con sezioni fino a 150 m di larghezza e 14,5 m di profondità nel tratto iniziale, fu accompagnato dal marginamento e dalla colmata[26] di oltre 14 km² di barene. Questa nuova via d'acqua, dal tracciato innaturale e trasversale rispetto alla morfologia lagunare, alterò profondamente la circolazione delle maree. L'onda tidale si concentrò in questo canale, incrementando la propria velocità e innescando intensi processi erosivi e diffusivi. Ciò portò alla progressiva contrazione, e in alcuni casi alla scomparsa, dei canali naturali della laguna. Il bilancio sedimentario risultò fortemente negativo: tra il 1968 e il 2001 furono dragati circa 3.500.000 m³, un valore più che doppio rispetto a quello del Vittorio Emanuele.

[25] **Dragaggi:** operazioni di escavo e rimozione di sedimenti dai fondali per mantenere o aumentare la profondità dei canali navigabili; possono essere periodici (di manutenzione) o straordinari.

[26] **Marginamento e colmata:** interventi consistenti nella delimitazione di aree lagunari con argini artificiali e nel loro successivo riempimento con materiali terrosi o dragati, al fine di ricavare superfici emerse da destinare a usi industriali o infrastrutturali.

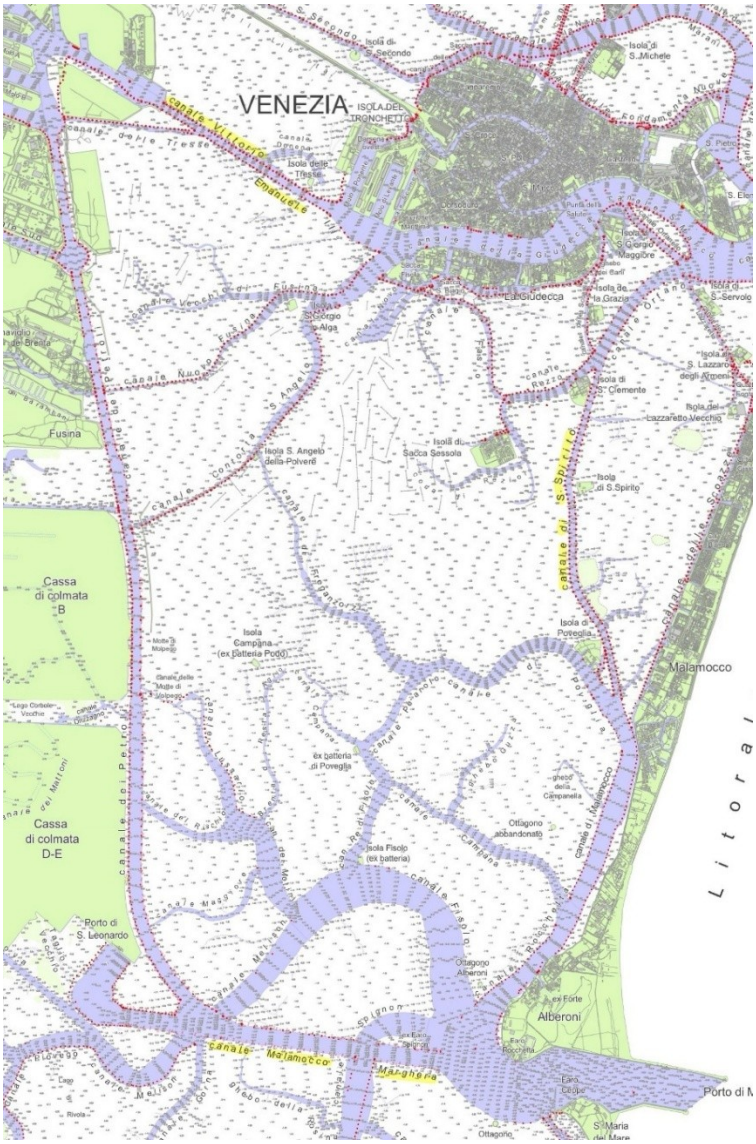


Figura 3.6 – Il tracciato dei principali canali analizzati (evidenziati in giallo) in una recente cartina del Comune di Venezia.

3.3.2 IMPATTI SUL SITEMA LAGUNARE

Lo scavo dei grandi canali navigabili garantì l'accesso delle navi e sostenne lo sviluppo di Porto Marghera, ma provocò profonde alterazioni dell'equilibrio idraulico e morfologico. I nuovi tracciati offrirono vie preferenziali alle onde di marea, traducendosi in alterazioni della circolazione dei canali naturali, in fenomeni di erosione e interrimento, e in una progressiva perdita di barene e velme, diffusa in tutto il bacino lagunare. A ciò si aggiunse il crescente bisogno di dragaggi continui per mantenere le sezioni navigabili, segno eloquente della fragilità di un sistema ormai forzato da scelte infrastrutturali imposte al contesto lagunare.

4. GLI EFFETTI IDRAULICI DELLE OPERE REALIZZATE NEGLI ULTIMI DUE SECOLI

L'assetto idraulico e morfologico della laguna di Venezia ha subito trasformazioni profonde e in larga parte irreversibili negli ultimi due secoli.

L'ambiente originario, caratterizzato da estese barene, ampi fondali bassi e bocche di porto con profondità modeste, si è progressivamente modificato sotto l'azione dei grandi interventi idraulici e infrastrutturali che hanno interessato il bacino.

4.1 FONTI E STRUMENTI DI ANALISI

4.1.1 FONTI STORICHE E DATASET BATIMETRICI

Le conoscenze relative alle profondità lagunari risultano, per lunghi tratti della storia, incomplete e frammentarie. Le prime indicazioni derivano infatti da rilievi quattrocenteschi lungo la direttrice Fusina–San Nicolò e da scandagli seicenteschi citati da Zendrini[27].

Una prima rappresentazione sistematica e attendibile si ebbe solo agli inizi del XIX secolo, con la carta di Dénaix[28], che pur limitata alle bocche di porto e ai principali canali navigabili, adottava criteri topografici moderni.

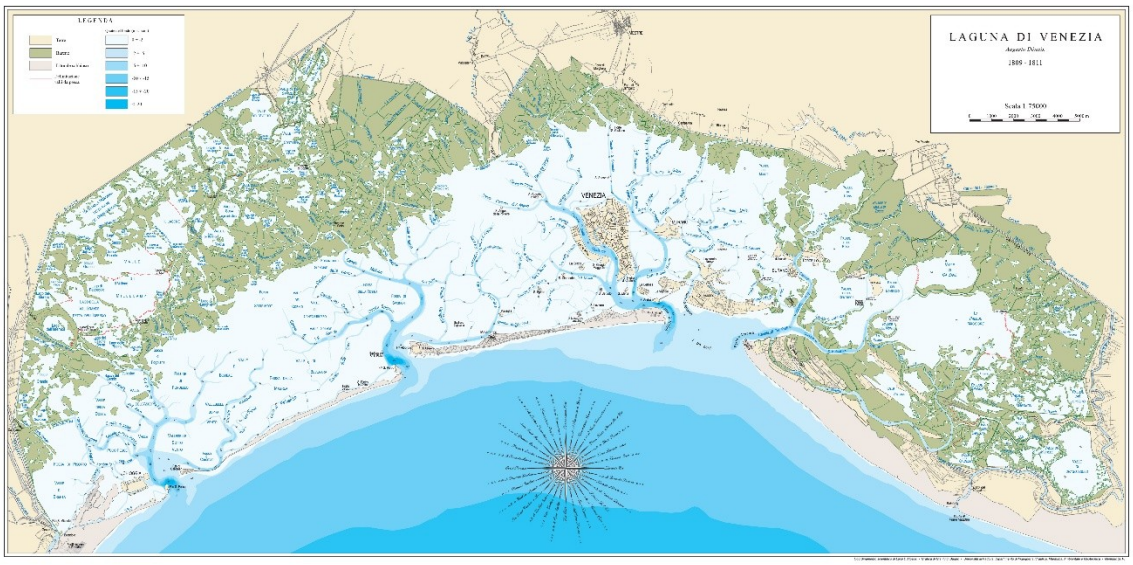


Figura 4.1 - Mappa con i rilievi topografici eseguiti dal capitano napoleonico Augusto Dénaix (1809-1811)

[27] **Bernardino Zendrini:** (1679-1747) ingegnere idraulico della Repubblica di Venezia, noto come "Proto delle acque"
[28] **Louis Joseph Dénaix:** (1776-1846) ufficiale del Genio Idrografico francese.

Successivamente, la base conoscitiva si ampliò progressivamente: dalla carta idrografica del 1901 e quella del 1932, ai rilievi batimetrici puntuali alle bocche (Lido 1913, Chioggia 1914, Malamocco 1915), fino alle campagne degli anni Settanta e ai rilievi del 2003.
Questo insieme di dati costituisce oggi un corpus coerente che consente confronti sistematici sulle variazioni morfologiche e idrauliche avvenute nel tempo.

4.1.2 MODELLAZIONE IDRODINAMICA E SCELTE DI TARATURA

Il comportamento idraulico delle diverse configurazioni lagunari è stato ricostruito tramite modelli numerici bidimensionali agli elementi finiti[29] (D'Alpaos e Defina 1993; Defina 2000; D'Alpaos e Defina 2006). Tali modelli risolvono le equazioni che governano la propagazione della marea in condizioni di fondale mobile, includendo anche gli effetti del vento e del trasporto solido.
La rappresentazione della rete lagunare è stata ulteriormente affinata mediante l'introduzione di elementi monodimensionali per i canali minori, così da descrivere con maggiore accuratezza le interazioni tra i flussi convettivi e le resistenze distribuite.
La taratura dei coefficienti di scabrezza, basata sulla formula di Gauckler–Strickler[30], è stata condotta utilizzando dati mareografici moderni relativi a numerose stazioni interne.
In assenza di registrazioni storiche, si sono assunte condizioni analoghe anche per le configurazioni del passato.
Questa impostazione ha reso possibile il confronto omogeneo tra le principali configurazioni note della laguna – da quella ottocentesca di Dénaix fino a quelle più recenti – riducendo sensibilmente le incertezze legate alla modellazione e alla discretizzazione.

4.2 LA LAGUNA OTTOCENTESCA: CONGIGURAZIONE IDRAULICA E MORFOLOGICA

Le carte di Dénaix (1809–1811) consentono di analizzare l'ultima configurazione della laguna prima delle grandi trasformazioni moderne, offrendo quindi un termine di paragone tra l'assetto ottocentesco e quello contemporaneo.

[29] **Modelli numerici bidimensionali agli elementi finiti:** strumenti di calcolo che discretizzano il dominio lagunare in piccole celle (elementi finiti), risolvendo le equazioni che governano la propagazione delle maree su fondali variabili.
[30] **Gauckler-Strickler:** relazione empirica che mette in relazione la scabrezza del fondo con la velocità media della corrente.

Dal punto di vista morfologico, la laguna era caratterizzata da fondali poco profondi, con valori medi intorno ai 50 cm, e da ampie zone di barena e velme che emergevano regolarmente durante le basse maree. Le bocche di porto si presentavano molto ampie in larghezza ma poco profonde, tanto da costituire un ostacolo alla navigazione di navi di maggiore stazza.

Sul piano idrodinamico, le simulazioni numeriche mostrano come la propagazione della marea fosse dominata da fenomeni dissipativi. Procedendo dal mare verso l'interno, si registrava infatti una progressiva attenuazione dei colmi[31]: circa –6 cm a San Nicolò, subito oltre la bocca, –8 cm a Punta della Salute e fino a –10/12 cm ai margini lagunari in prossimità dell'area oggi occupata da Porto Marghera. Si trattava dunque di una significativa riduzione media dei livelli. Al contrario, nella laguna attuale i colmi risultano quasi ovunque simili a quelli marini, con addirittura un leggero incremento in zone come Punta della Salute (+2 cm) e Porto Marghera (+4 cm).

Un'ulteriore caratteristica distintiva era rappresentata dal ritardo di fase: l'onda di marea raggiungeva le aree più periferiche con un sensibile sfasamento temporale, segno della notevole dissipazione energetica associata al superamento di barene e bassifondi.

Infine, contribuivano al carattere dissipativo anche le valli da pesca, le cui strutture di perimetrazione limitavano la circolazione interna e il ricambio idrico, accentuando le difficoltà di alimentazione idraulica delle zone più marginali.

4.3 GLI INTERVENTI PRINCIPALI E I LORO EFFETTI

4.3.1 I MOLI ALLE BOCCHE DI PORTO

La costruzione dei moli alle bocche di porto, terminata tra la fine dell'Ottocento e gli inizi del Novecento, portò grandi miglioramenti per la navigazione, ma anche aspetti negativi dal punto di vista idraulico, producendo nette modificazioni dei campi di corrente.

Prima della loro costruzione i passaggi presentavano correnti in fase di flusso e riflusso con un comportamento pressoché simmetrico, con intensità di ingresso e uscita confrontabili e che si diffondevano equamente in mare o in laguna. Con l'inserimento dei moli la situazione cambiò radicalmente: infatti, nella fase di riflusso le correnti tendevano a concentrarsi generando un vero e proprio getto che si proiettava al largo con la

[31] **Colmi di marea:** livello massimo raggiunto dalla superficie del mare o della laguna durante un'oscillazione di marea, rappresenta il valore di picco rispetto al livello medio marino.

formazione di vortici laterali (Figura 4.2); nella fase di flusso le correnti convergevano da più direzioni verso l'imboccatura del porto, tendendo però a concentrarsi lungo il canale navigabile che ne favoriva l'aumento di velocità (Figura 4.3).
Questo comportamento, positivo per la navigazione, rese però le bocche idraulicamente più efficaci, incrementando le portate scambiate con il mare e modificando la dinamica del sistema.

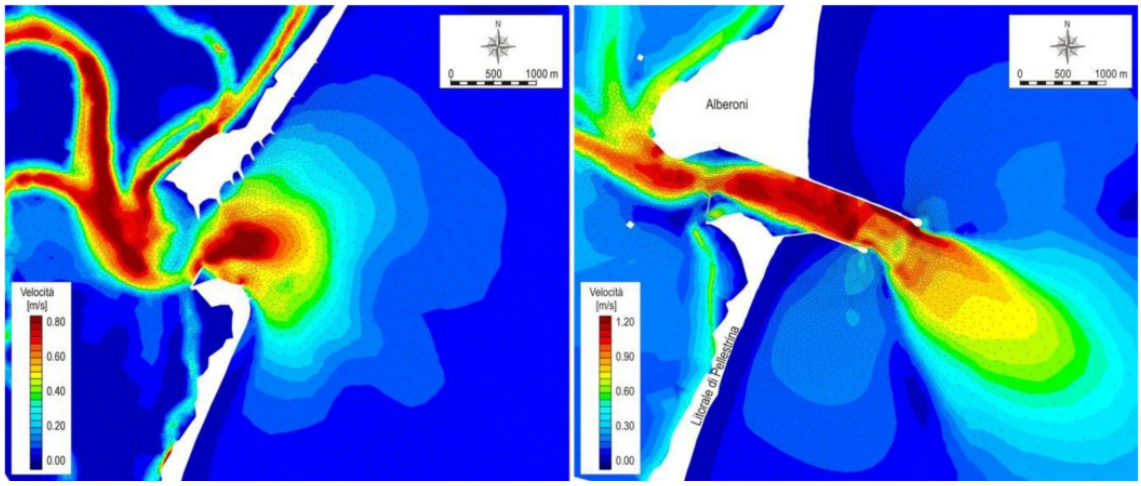


Figura 4.2 – Fase di massimo riflusso di marea; confronto fra i campi di moto istantanei in prossimità della bocca di Malamocco nella configurazione esistente al tempo di Dénaix (a sinistra) e nella configurazione attuale (a destra)

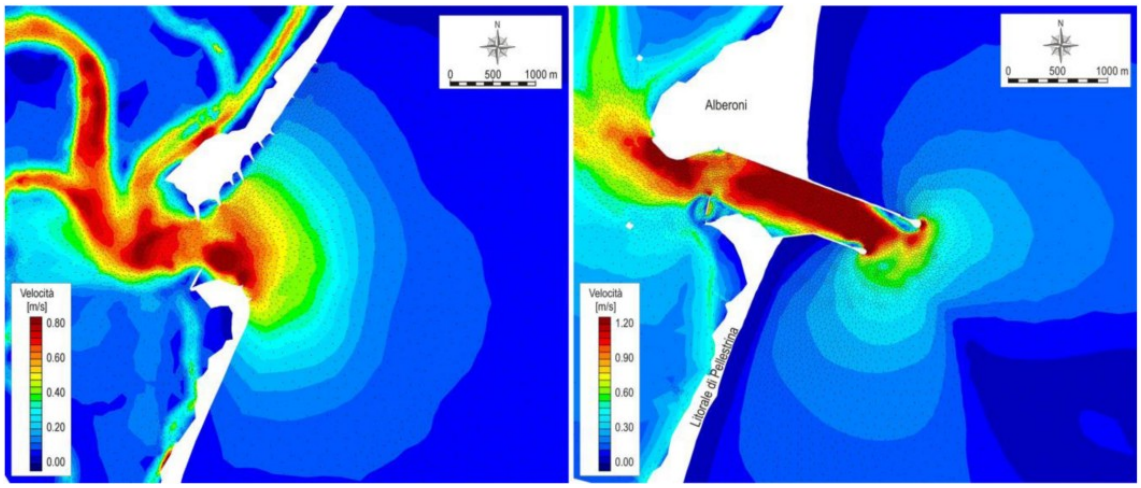


Figura 4.3 – Fase di massimo flusso di marea; confronto fra i campi di moto istantanei in prossimità della bocca di Malamocco nella configurazione esistente al tempo di Dénaix (a sinistra) e nella configurazione attuale (a destra)

4.3.2 IL CANALE VITTORIO EMANUELE E LE COLMATE DI PORTO MARGHERA

Ulteriori alterazioni arrivarono negli anni Venti, quando per la nascita del polo industriale si realizzarono le prime grandi colmate e lo scavo del canale Vittorio Emanuele.
Dal punto di vista dei livelli mareali nella direttrice del centro storico, gli effetti furono in realtà modesti, con lievi incrementi dei colmi e riduzioni dei ritardi di fase rispetto al mare. Tuttavia, modificò significativamente la via preferenziale delle correnti di marea, che iniziarono a deviare il loro percorso lateralmente verso il canale, accentuando i gradienti trasversali e favorendo fenomeni di erosione sui fondali adiacenti e di interrimento dei canali naturali minori. Nel frattempo, i grandi interventi di colmata ridussero l'estensione del bacino lagunare, limitandone la propagazione della marea e introducendo ulteriori discontinuità idrauliche e morfologiche

4.3.3 IL CANALE DI MALAMOCCO-MARGHERA

L'intervento più impattante sull'equilibrio idrodinamico lagunare fu realizzato tra il 1964 e il 1968 e collegava direttamente il mare aperto al porto industriale attraverso la bocca di Malamocco.
Le simulazioni numeriche documentano incrementi consistenti delle portate massime, sia in fase di flusso che di riflusso, con valori quasi doppi rispetto alla laguna ottocentesca.
Di conseguenza, il partitore di flusso[32] fra i tre bacini principali si è progressivamente spostato verso Venezia, riducendo l'apporto idrico al bacino di Lido e indebolendone la capacità di ricambio delle acque nelle zone prossime al centro storico.
Analizzando i livelli di propagazione della marea lungo la direttrice Malamocco–Giudecca–Marghera, si nota che essa ha assunto caratteri più inerziali: i colmi, infatti, non tendono più ad attenuarsi ma bensì si esaltano progressivamente, con incrementi di 3-4 centimetri rispetto al mare, a causa della realizzazione di questo canale (figura 4.4). Analogamente, i ritardi di fase si sono ridotti, segnalando quindi una perdita della naturale funzione dissipativa tipica del vecchio ambiente lagunare.

[32] **Partitore di flusso:** linea ideale che separa le aree lagunari alimentate dalle diverse bocche di porto indica come i volumi idrici si distribuiscono nei bacini principali in funzione della morfologia e delle opere idrauliche.

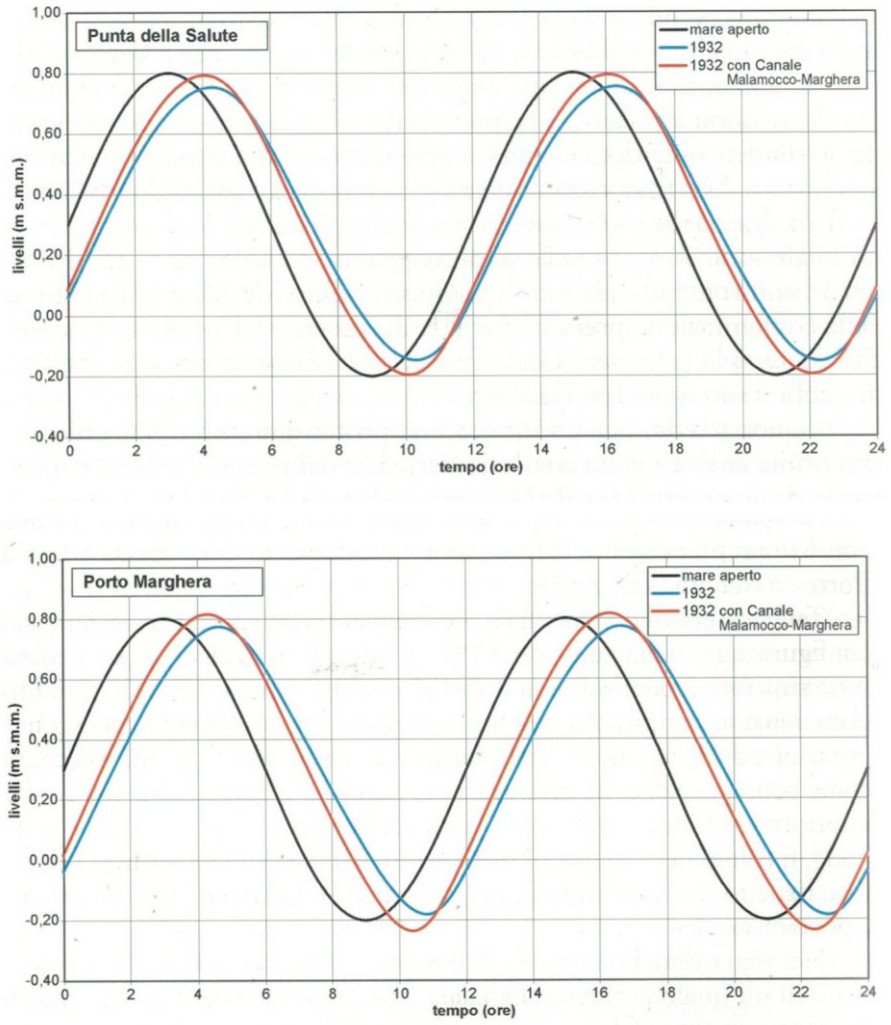


Figura 4.4 – andamento dei livelli prima e dopo la costruzione del canale navigabile Malamocco-Marghera, inserito nella configurazione del 1932, per la marea di riferimento considerata a Punta della Saluto (sopra) e a Porto Marghera (sotto); Riprodotta da D'Alpaos, 2010a.

4.4 LA LAGUNA CONTEMPORANEA

La situazione attuale della laguna veneziana riflette gli effetti causati da tutte le opere idrauliche che l'hanno interessata negli ultimi due secoli. Il cambiamento è stato netto: siamo passati da un sistema fortemente dissipativo a un sistema dominato da fenomeni inerziali, con colmi di marea amplificati e correnti più intense e concentrate lungo le principali direttrici.

Questo mutamento si manifesta con alcuni tratti idraulicamente distintivi: attenuazioni ridotte dei livelli, con colmi interni ormai simili a quelli marini; ritardo di fase molto più contenuto, con una conseguente propagazione d'onda più rapida; e un maggiore incremento delle portate scambiate con il mare, quasi raddoppiate rispetto all'Ottocento.

È chiaro che queste trasformazioni non sono il prodotto di un'evoluzione naturale, ma di interventi antropici che hanno reso l'attuale sistema idraulico così vivace, una condizione idraulicamente anomala nella storia della laguna.

Questo si è tradotto in effetti negativi anche dal punto di vista morfologico: un generalizzato approfondimento dei fondali, la regressione di barene e velme sommerse sempre più frequentemente, l'erosione e la ormai ridotta funzionalità dei canali minori, nonché una significativa riduzione del ricambio idrico e della circolazione convettiva, principalmente nelle zone periferiche della laguna.

Tutto ciò ha reso il sistema significativamente più vulnerabile a eventi estremi di marea e agli impatti di ulteriori modificazioni antropiche.

5. LE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE E IL SISTEMA MO.S.E.

L'insieme delle opere e degli interventi realizzati tra il XIX e il XX secolo, che hanno profondamente trasformato il sistema lagunare, non può considerarsi completo senza analizzare l'ultima grande infrastruttura progettata per la difesa di Venezia dalle acque alte. Le serie mareografiche storiche mostrano infatti un evidente aumento della frequenza degli eventi di colmo, aggravato da fenomeni di subsidenza del suolo e dall'innalzamento del livello medio del mare.

In questo quadro di crescente criticità, nel 2002 è stato approvato il progetto definitivo del sistema di difesa, con due obiettivi principali: contenere i livelli idrici in laguna oltre la soglia di salvaguardia senza generare impatti idraulici irreversibili e, al contempo, garantire la piena funzionalità della portualità lagunare.

L'idea alla base è quella di intercludere episodicamente la laguna rispetto al mare mediante paratoie mobili collocate presso le tre bocche principali (Lido, Malamocco e Chioggia), integrate da opere fisse come isole di appoggio, soglie e alloggiamenti, protezioni d'alveo, conche di navigazione e porti rifugio.

A scala di varco, la soluzione adottata risponde anche a esigenze paesaggistiche, poiché evita ingombri emergenti in condizioni ordinarie. A scala di sistema, invece, la strategia è stata calibrata su una soglia di salvaguardia pari a 110 cm per Venezia e 130 cm per Chioggia, con una gestione basata sulle previsioni mareografiche e su finestre di attivazione compatibili con il traffico portuale.



Figura 5.1 – la laguna ed evidenziate le tre bocche di porto dove sorge il Mo.S.E.

5.1 IL SISTEMA MO.S.E: DESCRIZIONE TECNICA

Il sistema Mo.S.E. (Modulo Sperimentale Elettromeccanico) rappresenta l'esito di un lungo e complesso iter progettuale e realizzativo. La prima idea risale agli anni Ottanta e viene formalizzata nel 1984, quando si discusse per la prima volta la possibilità di installare uno sbarramento mobile alle bocche di porto. Dopo decenni di dibattiti, il progetto definitivo venne approvato nel 2002. I lavori iniziarono già l'anno successivo (2003), ma furono presto rallentati da difficoltà burocratiche, ritardi costruttivi e, soprattutto, da scandali legati alla gestione dei fondi. L'opera venne completata solo nel 2021, con circa nove anni di ritardo rispetto al cronoprogramma originario.

Il sistema è composto da quattro barriere indipendenti, collocate alle tre bocche di porto: due alla bocca di Lido (Treporti e San Nicolò), una a Malamocco e una a Chioggia, per un totale di 78 paratoie mobili. Ciascuna paratoia è una struttura in acciaio di circa 20 m di larghezza, 5 m di spessore e un'altezza variabile tra 18 e 28 m, incernierata al fondo mediante un cassone alloggiato nel fondale.

In condizioni ordinarie le paratoie sono riempite d'acqua e rimangono adagiate sul fondo, così da non ostacolare né la navigazione né le attività portuali. Quando invece le

previsioni indicano il superamento delle soglie di salvaguardia (110 cm a Venezia, corrispondenti a un allagamento stimato di circa il 12% della città), l'acqua viene espulsa dai comparti interni e sostituita con aria compressa. La spinta di galleggiamento permette così alle paratoie di sollevarsi ed emergere fino a formare una barriera continua, capace di isolare temporaneamente la laguna dal mare.

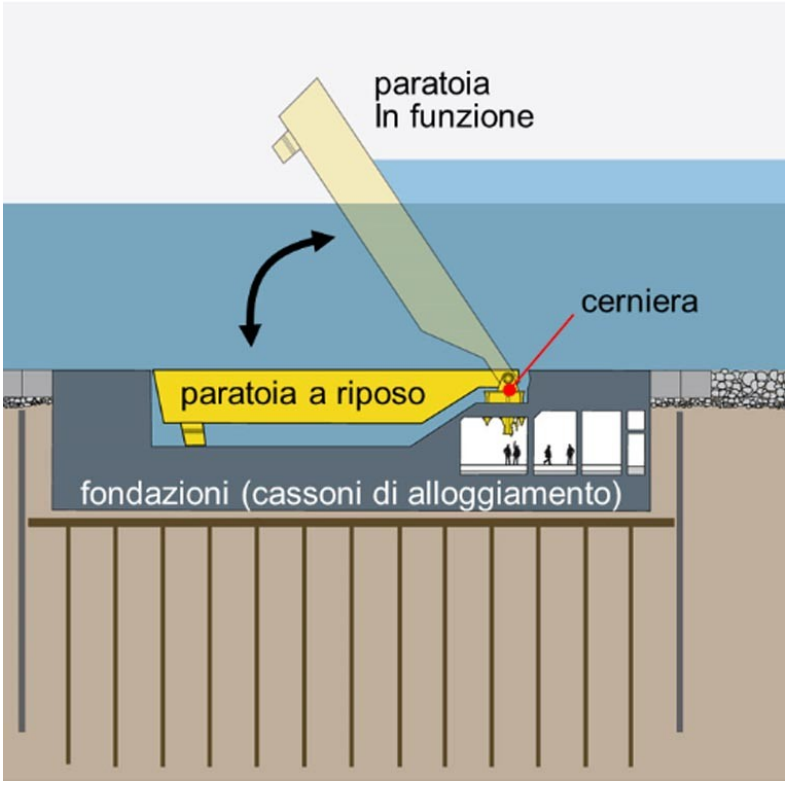


Figura 5.2 – schema di funzionamento della paratoie

Le diverse sezioni del sistema presentano caratteristiche differenti in termini di lunghezza e profondità, a seconda delle esigenze di utilizzo. Ad esempio, la bocca di Malamocco, collegata al porto industriale, ospita 19 paratoie e uno sbarramento largo 380 m e profondo 14 m, mentre il canale di Treporti, meno utilizzato da imbarcazioni di grande pescaggio, presenta 21 paratoie su un varco di 420 m, ma con una profondità ridotta a soli 6 m.

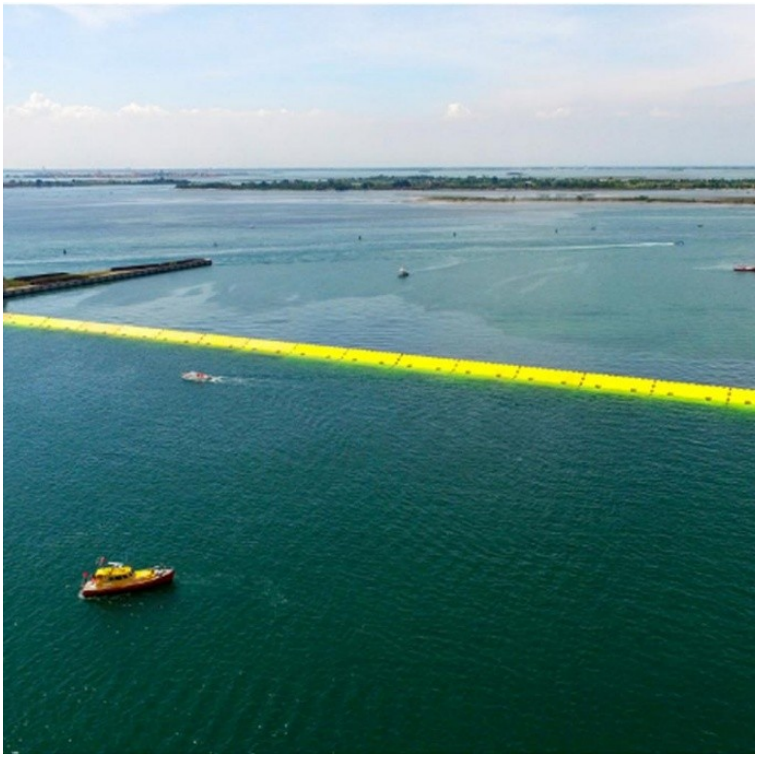


Figura 5.3 – la barriera di Lido nord (Treporti) in funzione

Le paratoie sono dimensionate per resistere a dislivelli mare-laguna fino a 3 m. La loro configurazione consente di contrastare sia la spinta idrostatica derivante dal dislivello idrico, sia le sollecitazioni dinamiche indotte dal moto ondoso, evitando fenomeni di risonanza che potrebbero compromettere la stabilità della struttura. Una scelta progettuale rilevante è stata quella di mantenere le paratoie completamente sommerse in condizioni ordinarie: questo riduce l'impatto visivo ma comporta possibili fenomeni di degrado e usura, rendendo la manutenzione un elemento cruciale. Tale aspetto assume un rilievo crescente se si considera il probabile aumento della frequenza di utilizzo delle barriere, legato al progressivo innalzamento del livello medio del mare.

5.2 LE PRIME OPERAZIONI: DATI, METODOLOGIE E RISULTATI CHIAVE

Le prime attivazioni del sistema Mo.S.E., avvenute nell'ottobre 2020, hanno rappresentato una svolta storica: per la prima volta la laguna di Venezia è stata completamente separata dal mare. In occasione di tre eventi mareali (3, 15 e 16 ottobre) con colmi esterni compresi fra 1,30 e 1,40 m, i livelli interni sono stati mantenuti tra 0,65 e 0,77 m, evitando così l'allagamento dei centri lagunari, incluso il bacino di San Marco.

Dal punto di vista idraulico l'attenzione si è concentrata su due aspetti principali: l'infiltrazione attraverso le paratoie e il setup da vento[33].

Per la stima della quantità d'acqua infiltrata attraverso le paratoie, che non sono perfettamente stagne, è stata utilizzata la formulazione classica per il moto attraverso orifizi:

$$Q_{in} = C_Q\sqrt{2g \triangle h}$$

Dove Q_{in} rappresenta la portata che si infiltra, $\triangle h$ il dislivello mare-laguna e C_Q un coefficiente che viene calibrato sui dati osservati. Le misure mareografiche hanno evidenziato una crescita media del livello lagunare di circa 9–10 mm/h durante le chiusure, equivalente a portate infiltranti fino a 1000 m³/s distribuite sui quattro sbarramenti. Questi valori confermano le stime di laboratorio e mettono in luce come le oscillazioni delle paratoie indotte dal moto ondoso amplifichino l'area effettiva di passaggio.

Il secondo risultato significativo riguarda l'azione del vento. In condizioni di laguna chiusa la propagazione mareale è annullata, e diviene quindi evidente il gradiente idrico causato dal vento, che ridistribuisce i volumi d'acqua lungo le diverse sezioni. Il coefficiente di attrito superficiale è stato descritto con una relazione lineare:

$$C_D = (C_{D0} + e_W U_{wind}) * 10^{-3}$$

Dove U_{wind} è la velocità del vento a 10m di altezza, e_w il coefficiente di pendenza e C_{D0} l'intercetta[34]. La calibrazione effettuata su eventi reali ha mostrato valori più elevati rispetto a quelli tipici del mare aperto, evidenziando come un bacino poco profondo e articolato come la laguna di Venezia sia particolarmente sensibile all'azione del vento.

Un ruolo fondamentale è stato svolto dal modello idrodinamico WWTM[35], che ha permesso di integrare i dati osservati con simulazioni numeriche, rendendo più precisa la quantificazione sia dell'infiltrazione intra-gate sia degli effetti del vento.

[33] **Setup del vento:** dislivello idrico generato dall'azione del vento su un bacino chiuso o semichiuso che induce a uno spostamento forzato della massa d'acqua.

[34] **Intercetta C_{D0}**: valore di base del coefficiente di attrito che con vento nullo.

[35] **WWTM:** Wind Wave Tide Model, modello idrodinamico sviluppato per la laguna di Venezia che integra gli effetti combinati di vento, onde e marea.

Nel complesso, le operazioni del 2020 hanno confermato la capacità del sistema di contenere i livelli lagunari al di sotto delle soglie critiche, ma hanno anche evidenziato alcune criticità operative: un'infiltrazione non trascurabile, la necessità di previsioni meteomarine molto accurate per ridurre le false manovre e, in prospettiva, l'impatto che la frequenza di chiusura avrà sui costi di gestione e manutenzione del sistema.

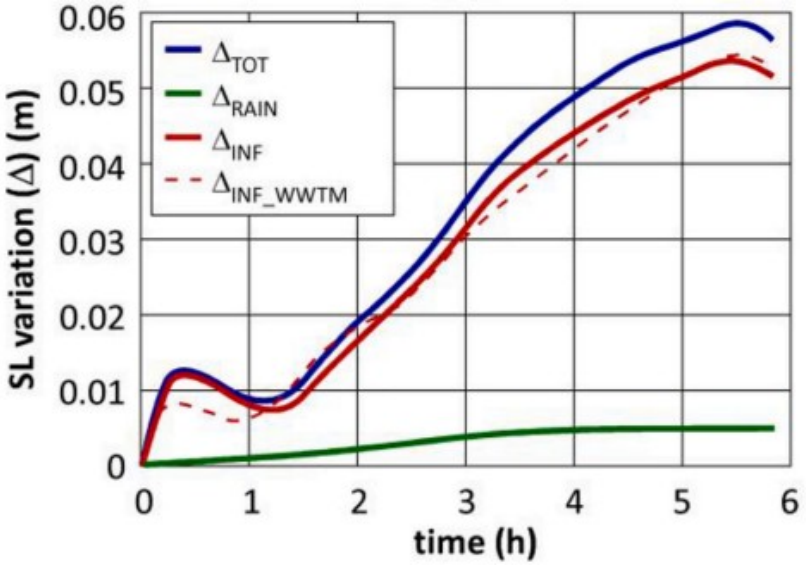


Figura 5.4 - Variazione temporale del livello medio misurato all'interno della laguna durante la chiusura delle paratoie. ΔTOT = aumento del livello del mare; ΔRAIN = contributo delle precipitazioni e del deflusso; ΔINF, contributo infiltrazione paratoie. La linea rossa tratteggiata (ΔINF_{WWTM}) è l'aumento del livello del mare calcolato dal WWTM.

5.3 SITUAZIONE ATTUALE E CRITICITA' EMERGENTI

Le esercitazioni analizzate hanno confermato l'efficacia del sistema Mo.S.E., ma hanno anche messo in luce come, durante la chiusura, la laguna assuma il comportamento tipico di un bacino regolato, in cui un ruolo determinante è svolto sia dalle infiltrazioni attraverso le paratoie sia dall'azione del vento. Al contrario, con la riapertura delle bocche, il sistema ritorna a un regime dominato dalla naturale propagazione mareale.

Ne consegue che la gestione dell'opera non potrà limitarsi a un semplice meccanismo di attivazione e disattivazione, ma dovrà fondarsi su una pianificazione accurata, supportata da previsioni mareografiche affidabili e da modelli idrodinamici capaci di stimare in tempo reale gli effetti combinati delle diverse criticità, consentendo di valutarne l'impatto e la tollerabilità.

Un’ulteriore considerazione riguarda i costi di esercizio e manutenzione: l’innalzamento previsto del livello medio del mare comporterà una frequenza sempre maggiore delle manovre di chiusura, con conseguente incremento delle sollecitazioni strutturali e dei fabbisogni manutentivi. Si tratta di una criticità da non sottovalutare, che condizionerà non solo la sostenibilità economica del sistema, ma anche la sua affidabilità e funzionalità nel lungo periodo.

6. GLI EFFETTI IDRAULICI DELLE NUOVE OPERE ALLE BOCCHE

Le nuove opere realizzate alle bocche di porto hanno profondamente influenzato e modificato l'equilibrio idraulico della laguna. Come già discusso nei capitoli precedenti, le numerose azioni attuate e le opere costruite hanno determinato un lento ma progressivo passaggio da un regime dissipativo a uno dominato da fenomeni inerziali. Ciò si è tradotto, come analizzato, in un incremento delle portate scambiate tra mare e laguna, in una propagazione più rapida e meno attenuata del segnale di marea, nella riduzione dei ritardi di fase e nel livellamento dei colmi interni rispetto al mare. A ciò si aggiunge una maggiore concentrazione delle correnti lungo le principali direttrici, con conseguente intensificazione dei processi erosivi nei canali e nelle aree limitrofe.

Questi effetti, già noti e discussi, si sono ulteriormente accentuati con la messa in funzione del Mo.S.E., che ha introdotto un nuovo fattore: la possibilità di isolare temporaneamente la laguna dal mare.

6.1 DISTURBI INDOTTI DAL MO.S.E. NEL NORD ADRIATICO

Un aspetto meno considerato, ma di crescente interesse, riguarda i disturbi indotti dalle chiusure lato mare. Le prime misure condotte durante le attivazioni del 2020 hanno infatti mostrato come la manovra delle paratoie generi anomalie nei segnali di livello marino registrati al largo: appiattimento dei picchi, spike[36] inattesi e irregolarità non spiegabili unicamente dalle condizioni meteomarine.

Per analizzare meglio questo fenomeno è stato utilizzato il modello numerico WWTM, che ha permesso di simulare la propagazione mareale sia in condizioni di laguna non regolata sia con attivazione delle paratoie. Le simulazioni evidenziano che la chiusura produce un aumento temporaneo del livello marino immediatamente a ridosso delle bocche, con un innalzamento fino a 25 cm, seguito da una rapida diminuzione. Questo segnale si attenua progressivamente con la distanza, ma resta comunque rilevabile a diversi chilometri: le osservazioni mostrano ampiezze di circa 6 cm presso la stazione CNR, a circa 8 km dalla costa, e valori residui di 3–4 cm fino a Trieste. I risultati, riportati nella Figura 6.1, confermano quindi come l'Adriatico agisca da dissipatore efficiente, ma

[36] **Spike inattesi:** picchi anomali e improvvisi nei dati di livello marino, non riconducibili a marea e condizioni meteomarine note, ma indotti da variazioni rapide dei flussi in prossimità delle chiusure.

dimostrano al tempo stesso che l'onda lunga[37] generata dal Mo.S.E. si propaga in tutto il bacino settentrionale.

Questo sottolinea che il funzionamento del Mo.S.E. non è neutro neppure dal punto di vista idrodinamico per l'ambiente marino esterno alla laguna. La generazione di onde lunghe, seppur di piccola entità, rappresenta un ulteriore elemento da considerare nella gestione del sistema, soprattutto quando si combinano eventi di vento e variazioni di pressione atmosferica, in grado di amplificarne gli effetti.

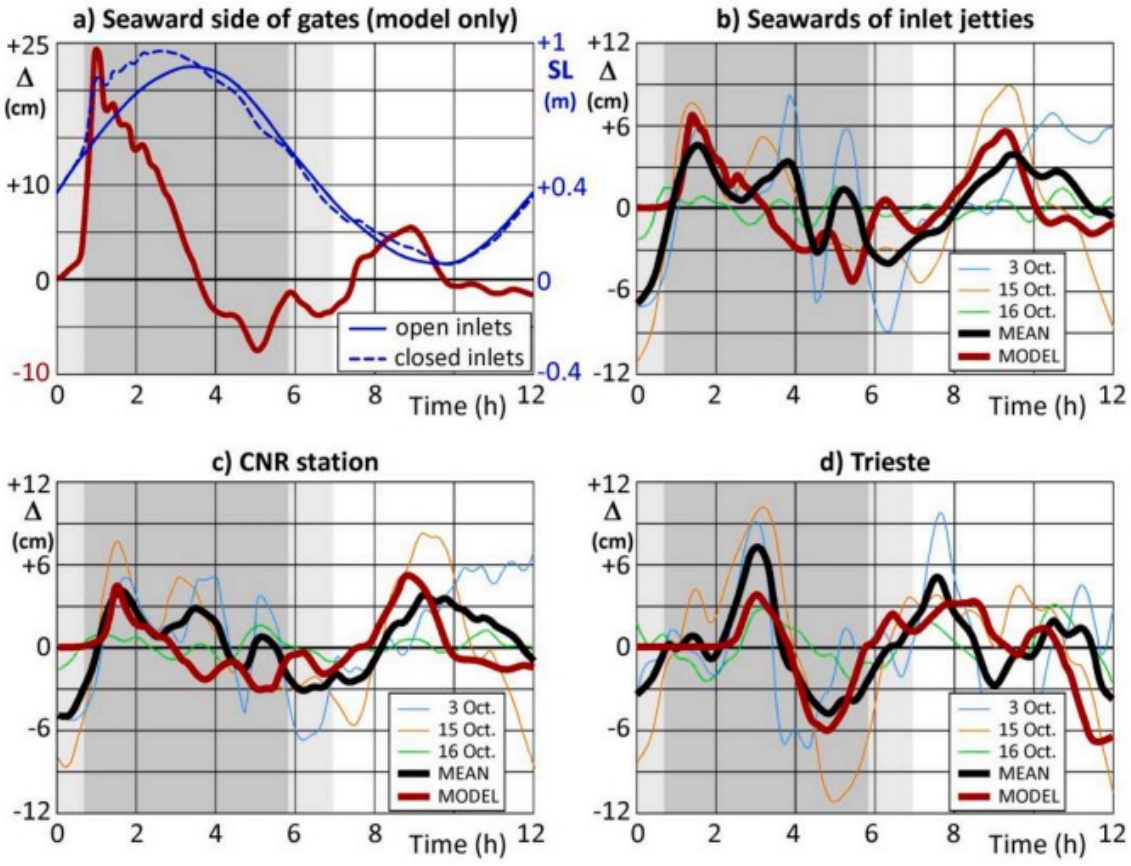


Figura 6.1 – Grafici che sottolineano il disturbo indotto dal Mo.S.E. sul lato mare delle paratoie (a), appena al di fuori dei tre ingressi (b), presso le stazioni di misurazione del CNR (c) e di Trieste (d).

In sintesi, le nuove opere costruite alle bocche non hanno solamente accelerato i processi idrodinamici interni al sistema lagunare, ma hanno anche introdotto nuove dinamiche lato mare, connesse alla regolazione episodica operata dal Mo.S.E., le cui implicazioni richiedono ulteriori indagini e monitoraggi.

[37] **Onda lunga:** oscillazione marina con lunghezza d'onda molo maggiore rispetto al moto ondoso locale, che interessa l'intero bacino e può propagarsi per decine di chilometri con ampiezze ridotte.

7. CAUSE E IMPLICAZIONI DEL DEGRADO MORFOLOGICO DEL BACINO LAGUNARE.

Dal XIX secolo a oggi la laguna di Venezia ha subito trasformazioni profonde e in parte irreversibili. L'indicatore più evidente è la drastica riduzione delle barene, che dall'inizio del Novecento hanno perso oltre due terzi della loro estensione. Nel 1901 esse coprivano circa 170 km², mentre un secolo dopo risultavano già ridotte a meno di 50 km². Parallelamente, i bassifondi lagunari hanno registrato un progressivo approfondimento: nella zona centrale, ad esempio, la profondità media è passata da circa 0,5 m a inizio Novecento a oltre 1,5 m nei primi anni Duemila. Non si tratta soltanto di un abbassamento delle quote: il paesaggio lagunare si è progressivamente appiattito, i canali minori hanno perso incisione e le differenze morfologiche che rendevano la laguna un mosaico variegato si sono via via attenuate.

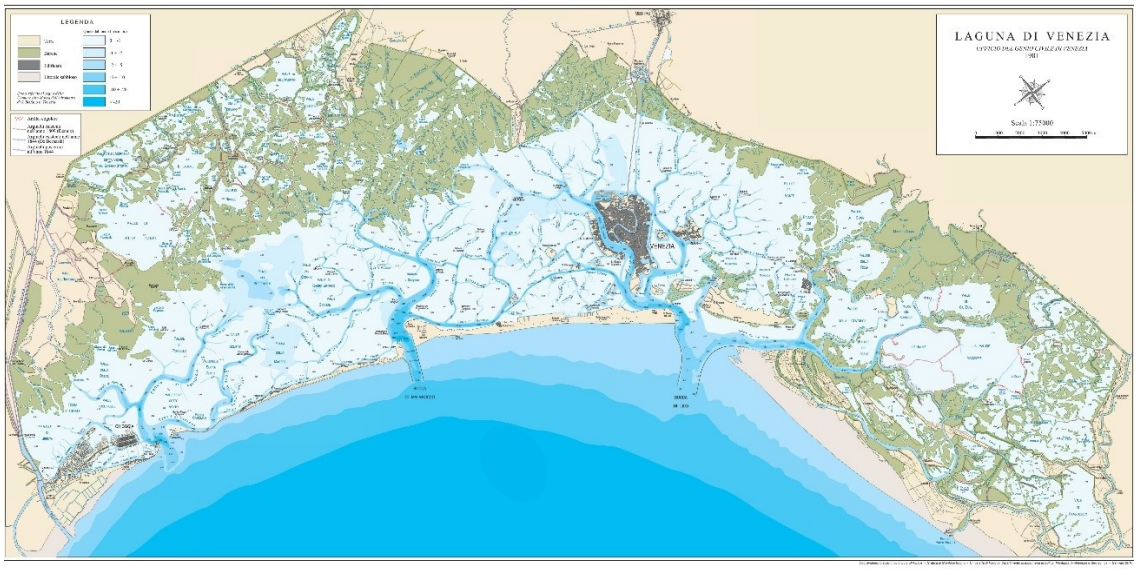


Figura 7.1 – mappa redatta dal Corpo Reale del Genio Civile di Venezia 1901;



Figura 7.2 - carta idrografica della Laguna ricostruita sulla base dei rilievi più recenti, resi disponibili dal Magistrato alle Acque di Venezia attraverso il Consorzio Venezia Nuova 2003; se messa a confronto con la precedente (Figura 7.1) risultano evidenti i cambiamenti morfologici del ultimo secolo.

Queste trasformazioni derivano da una consistente perdita di sedimenti, stimata in alcune centinaia di migliaia di metri cubi all'anno, con valori che in diversi studi arrivano fino a circa 1×10^6 m³/anno. La sola sommersione relativa, pari a circa 30 cm tra il 1872 e il 2005 (equivalente a 22–23 cm/100 anni di "approfondimento equivalente"), non è sufficiente a spiegare tale bilancio negativo. A incidere sono soprattutto i processi idrodinamici che mobilitano e trasportano i sedimenti verso il mare, amplificati da grandi opere storiche come i moli alle bocche di porto, lo scavo dei canali navigabili e, più in generale, dalle pressioni antropiche legate alla navigazione e alla pesca.

7.1 BILANCI E PROCESSI DOMINANTI

Se si confronta la batimetria lagunare ottocentesca con quella attuale, emerge una dinamica chiara: le barene arretrano, i bassifondi si approfondiscono e i canali si interrano. Nei primi decenni del Novecento l'erosione dei margini delle barene aveva parzialmente contribuito a rifornire di materiale fine i fondali interni, ma dagli anni Settanta questo non è più bastato. La concentrazione media di sedimento in sospensione si è ridotta e ha prevalso l'erosione verticale, che spinge i bassifondi verso quote più profonde. La sola marea non può però spiegare l'intensità di questi processi. All'interno della laguna, infatti, gli sforzi di corrente restano spesso inferiori alla soglia critica necessaria per muovere i limi e le argille (0.4-0.6 Pa). Un ruolo determinante è svolto

invece dal moto ondoso dovuto al vento. Per quantificare la sua importanza basta pensare che una Bora di 15 m/s può generare onde alte fino a 1 m nella zona centrale, valori sufficienti a rimettere in sospensione grandi quantità di sedimenti dai bassifondi. Una volta in sospensione, questi vengono intercettati dalle correnti di marea e convogliati nei principali canali, fino a essere espulsi in mare.

Spesso trascurati ma determinanti nella modulazione di tali fenomeni sono gli ostacoli lineari, come i ponti translagunari, che riducendo il fetch[38] smorzano l'energia d'onda. Ne derivano acque torbide e ricche di sospensioni a monte vento, e acque più limpide sottovento.

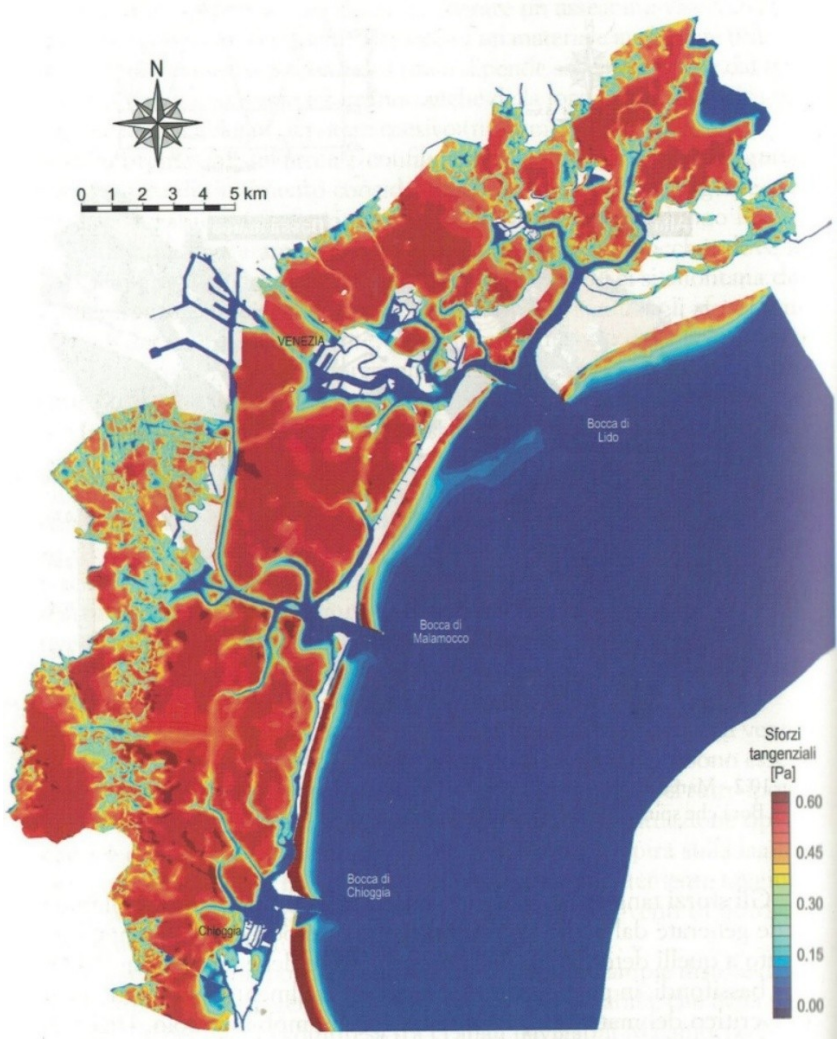


Figura 7.3 – Inviluppo degli sforzi tangenziali massimi al fondo indotti dal moto ondoso generato da un vento di Bora che spira con una velocità di 15 m/s; Riprodotta da D'Alpaos 2010a

[38] **Fetch:** lunghezza del tratto libero d'acqua su cui il vento può agire generando onde;

7.2 PRESSIONI ANTROPICHE E IL RUOLO DELLE BOCCHE DI PORTO

Oltre alle forze naturali vanno considerate le pressioni antropiche, che hanno accelerato il degrado morfologico. La navigazione nei grandi canali, ad esempio, genera onde di scia e correnti secondarie che sollevano sedimenti, li spingono verso zone più profonde e ne favoriscono il deposito, con conseguente necessità di dragaggi ricorrenti. Da non sottovalutare è anche l'impatto della pesca dei molluschi, che compromette la stabilità dei fondali, aumentando l'erodibilità e il deficit di bilancio.

Un ruolo ancora più incisivo è stato però quello della costruzione dei moli alle bocche di porto. In ingresso la marea richiama acqua da più direzioni, ma in uscita il flusso si concentra in un unico getto canalizzato, che trascina con sé le sospensioni fini[39]. Una volta depositati sui fondali profondi dell'Adriatico, questi materiali difficilmente riescono a rientrare in laguna, con una conseguente perdita netta di sedimento. Differente è invece il comportamento delle sabbie fini[40], più pesanti: pur uscendo con il riflusso, esse tendono a rientrare con il flusso successivo.

Si tratta di un comportamento molto diverso rispetto al passato, quando, in assenza dei moli, i depositi in mare erano più superficiali e facilmente risospendibili, con scambi sedimentari più equilibrati e conservativi.

[39] **Sospensioni fini:** si indicano principalmente i sedimenti limosi e argillosi (d_{50} = 20-40 um)

[40] **Sabbie fini:** particelle non coesive con diametro medio d = 150 um

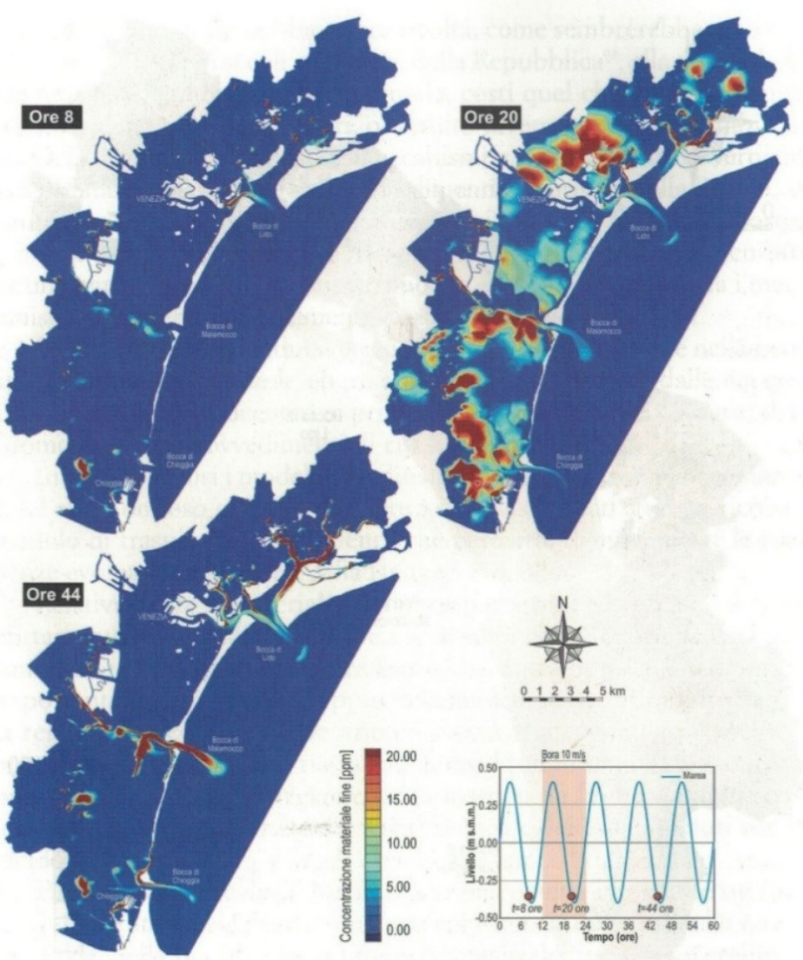


Figura 7.4 -Laguna attuale. Distribuzione spaziale della concentrazione istantanea dei sedimenti fini trascinati in sospensione dal moto ondoso, indotto da un vento di Bora che spira per un periodo di 12 ore, e dalle correnti di marea generate da una successione di cicli periodici; Riprodotta da D'Alapos 2010a

7.3 EFFETTI MORFOLOGICI DEL MO.S.E.

Un ulteriore fattore da considerare è rappresentato dalle chiusure operate dal sistema Mo.S.E., che modificano i livelli idrici e, di conseguenza, i processi di trasporto solido. Le prime 15 attivazioni, avvenute tra l'ottobre 2020 e il gennaio 2021, hanno mostrato come i livelli ridotti aumentino l'efficacia del moto ondoso sulle piane, determinando un incremento della tensione di fondo[41]: +5% il 3 ottobre e fino a +20% il 15 ottobre, con valori massimi prossimi a 0,5 Pa in condizioni di Bora. Questi valori sono sufficienti a risospendere con facilità i sedimenti fini. Le concentrazioni di sedimento in sospensione

[41] **Tensione di fondo:** forza tangenziale esercitata dall'acqua (correnti e onde) sul fondale;

(SSC) hanno infatti registrato picchi oltre 120 mg/L, con incrementi fino al 21% rispetto agli scenari aperti.

Nei canali principali, al contrario, le chiusure riducono sensibilmente le correnti di marea, con un conseguente abbattimento delle tensioni di fondo. Ciò innesca una tendenza prevalente al deposito piuttosto che all'erosione. Durante la chiusura del 15 ottobre, ad esempio, i modelli hanno evidenziato un interrimento più che raddoppiato rispetto allo scenario aperto (+105%, pari a circa 2400 m³ di sedimenti). La ripetizione di condizioni analoghe, soprattutto in concomitanza con venti forti e maree elevate, favorisce nel tempo un progressivo colmamento dei canali interni, con perdita di profondità e riduzione della loro capacità di scambio idraulico.

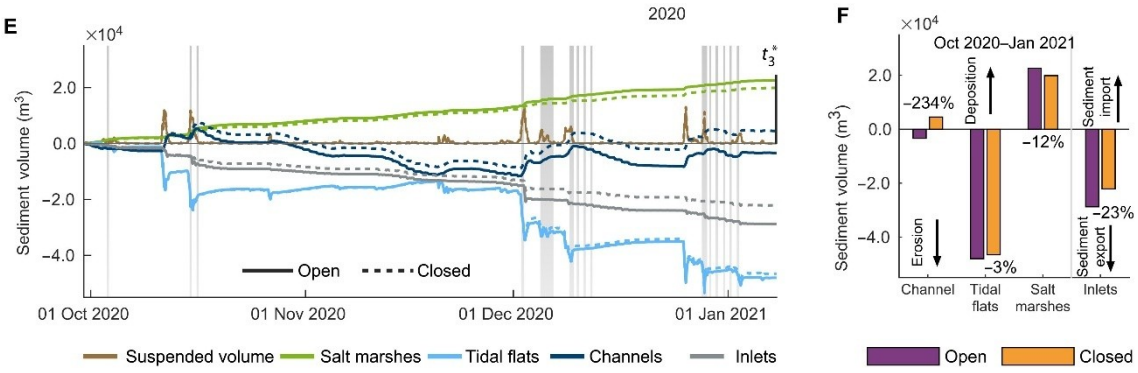


Figura 7.5 – Bilancio sedimentario durante la chiusura del Mo.S.E. (ottobre 2020- gennaio 2021), Il pannello (E) mostra con linee continue l'andamento temporale dei volumi di sedimento nello scenario a bocche aperte e con linee tratteggiate quello nello scenario con chiusure (sono riportati i contributi distinti per barene, piane tidali, canali, sedimento sospeso e flussi di scambio con il mare). Nel pannello (F) le barre verticali rappresentano il bilancio netto a fine evento, quando la concentrazione di sedimenti sospesi torna trascurabile. Si osserva chiaramente che le chiusure riducono la deposizione sulle barene (~−12% su scala stagionale) e favoriscono un marcato interrimento dei canali, mentre l'export verso il mare risulta solo temporaneamente ridotto.

7.3.1 IMPATTO SULLE BARENE E SUL BILANCIO SEDIMENTARIO

Le barene risultano particolarmente penalizzate dalle chiusure alle bocche di porto, poiché la riduzione dei livelli ne accorcia sia la profondità che la durata di sommersione. Il 3 ottobre 2020, ad esempio, la sommersione media si è ridotta di circa 0,42 m e la durata di 1,4 ore; il 15 ottobre quasi metà delle barene settentrionali è rimasta completamente asciutta. Poiché l'allagamento rappresenta il principale meccanismo di apporto di sedimenti fini, le chiusure riducono drasticamente questi contributi: −20% e −27% nei due eventi, con un deficit stagionale complessivo pari a circa −12%.

Durante scenari aperti, fino al 50% dei sedimenti risospesi raggiungeva le barene, mentre in condizioni di chiusura questa quota si riduce sensibilmente, arrivando in alcune aree anche al −100%. Le conseguenze a lungo termine sono il rischio di drowning[42] delle barene, che non riuscirebbero più a tenere il passo con l'innalzamento del livello del mare. La perdita delle barene non è un problema secondario: comprometterebbe sia l'ecologia lagunare sia la funzionalità idraulica del sistema. Meno barene infatti significano fetch più lunghi, onde più alte e un maggiore setup del vento, con il paradosso di aumentare proprio quella vulnerabilità che il Mo.S.E. era stato progettato per ridurre.

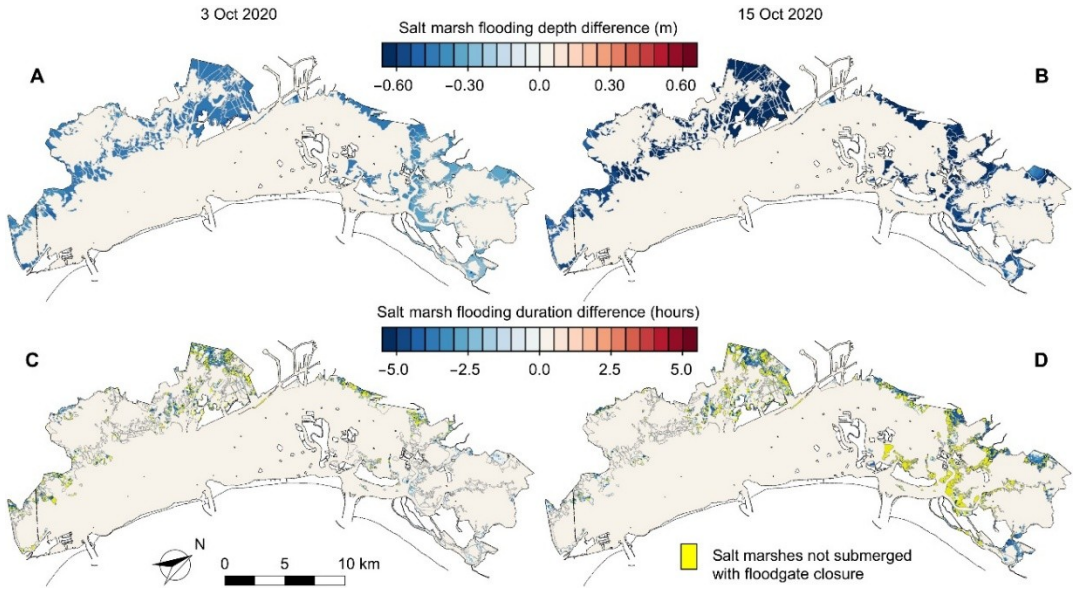


Figura 7.6 - Effetto della chiusura delle paratoie sull'allagamento delle barene. Differenza tra la massima profondità di allagamento delle barene modellata negli scenari con barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (A) e del15 ottobre 2020 (B). Differenza tra la massima durata di allagamento delle barene negli scenari con barriere chiuse e aperte per gli eventi del 3 ottobre (C) e del 15 ottobre 2020 (D).

7.4 PROSPETTIVE FUTURE

Il quadro che emerge è quello di una laguna sempre più uniforme, con bassifondi che tendono a stabilizzarsi attorno a profondità comprese tra i 2 e i 2,5 metri: si tratta della soglia critica oltre la quale gli sforzi idrodinamici non sono più sufficienti a mobilitare i sedimenti fini. Un esempio emblematico di questa condizione è rappresentato dal Fondo dei Settemorti, che da decenni mostra una stabilità a queste profondità.

[42] **Drowning:** processo di sommersione progressiva delle barene;

La combinazione dei processi naturali e delle pressioni antropiche analizzati nei paragrafi precedenti contribuisce ad accelerare questa tendenza verso una progressiva semplificazione geomorfologica. Le barene, che nell'ultimo secolo hanno già perso oltre il 70% della loro estensione, rischiano ulteriori arretramenti e fenomeni di annegamento, mentre i canali mostrano una crescente propensione all'interrimento.

Per garantire la sostenibilità futura del sistema sarà necessario affiancare al funzionamento del Mo.S.E. una serie di misure di mitigazione. Tra queste si possono citare la reintroduzione dei sedimenti fluviali, la ricostruzione delle barene, il rafforzamento dei margini contro l'erosione e una gestione calibrata delle chiusure in relazione alle condizioni meteomarine. Solo attraverso un approccio integrato sarà possibile salvaguardare la laguna nel lungo periodo, mantenendone sia la funzionalità idraulica sia la diversità ecologica.

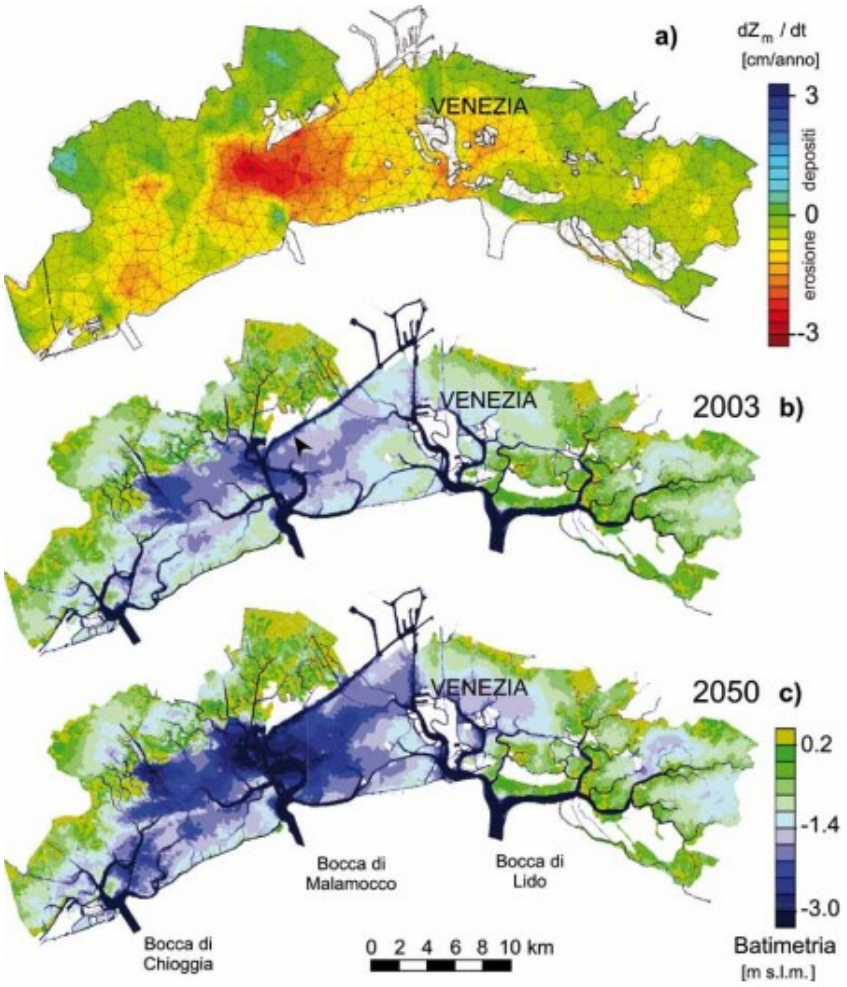


Figura 7.7 - Evoluzione morfologica della laguna centro-meridionale. (a) Tassi di variazione delle quote del fondale (Zm) calcolati a partire dalle condizioni attuali; (b) batimetria della laguna nel 2003 rappresentata a scala di colori; (c) batimetria prevista al 2050 ottenuta mediante estrapolazione dei gradienti di variazione Zm,.

CONCLUSIONI

In questa tesi si è ricostruita l'evoluzione storica e idraulica della Laguna di Venezia, analizzando sia i processi naturali che ne hanno determinato la formazione, sia i principali interventi antropici che l'hanno modificata, fino al più recente sistema Mo.S.E. L'attenzione è stata rivolta in particolare agli effetti che tali scelte hanno avuto sul bilancio sedimentario, sulla morfologia e sulla dinamica idrodinamica del bacino, evidenziando i meccanismi di trasformazione e le criticità che ne sono derivate.

Dallo studio emerge con chiarezza la straordinaria complessità, ma al tempo stesso la fragilità, della laguna veneziana: un ambiente di transizione regolato dall'interazione di maree, apporti fluviali, vento e, non meno importanti, fenomeni di subsidenza ed eustatismo. Questo equilibrio, già intrinsecamente delicato, è stato più volte alterato dagli interventi antropici, che hanno trasformato la laguna da sistema fortemente dissipativo a sistema dominato da dinamiche più inerziali. È proprio questa trasformazione a spiegare molte delle sfide attuali: erosione diffusa, perdita di barene, innalzamento del livello marino e crescente esposizione a eventi estremi.

Nel corso della sua storia le opere idrauliche hanno avuto un ruolo cruciale, costituendo strumenti indispensabili per la sopravvivenza di Venezia e per la tutela delle funzioni portuali e commerciali. Tuttavia, esse sono state anche la causa di nuove criticità: indebolimento dei bilanci sedimentari, erosione dei fondali, riduzione della diversità morfologica, squilibri idrodinamici interni e alterazioni lato mare. Il Mo.S.E. rappresenta un esempio emblematico di questa ambivalenza: efficace nel contenere i livelli idrici e difendere la città dalle acque alte, ma al tempo stesso generatore di problematiche legate alla gestione delle chiusure, al ricambio idrico e al bilancio sedimentario.

Alla luce di quanto emerso, appare evidente che la salvaguardia della Laguna di Venezia non possa basarsi unicamente su grandi opere di difesa, ma debba fondarsi su solide conoscenze scientifiche, monitoraggi costanti e modellazioni idrodinamiche e morfologiche sempre più accurate. Solo una continua attività di ricerca potrà guidare strategie di gestione e mitigazione realmente efficaci, capaci di affrontare le sfide future in modo sostenibile, garantendo al tempo stesso la funzionalità idraulica della laguna e il suo inestimabile valore ambientale e culturale.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOGRAFICI

- Luigi D'Alpaos 2010a; "Fatti e misfatti di idrauilca lagunare, la Laguna di Venezia dalla diversione dei fiumi alle nuove opere alle bocche di porto".

- Luigi D'Alpaos 2010b; "L'evoluzione morfologica della Laguna di Venezia attraverso la lettura di alcune mappe storiche e delle sue carte idrografiche".

- Gianni Fabbri, Giuseppe Tattara 2014; "Venezia, la laguna, il porto e il gigantismo navale Libro Bianco sul perché le grandi navi debbono stare fuori della laguna".

- Tommasini L., A. D'Alpaos, L. Carniello, L. D'Alpaos, A Rinaldo 2016; "Ricostruzione morfologica e comportamento idrodinamico della Laguna di Venezia nel XVII secolo".

- Riccardo A. Mel, Daniele P. Viero, Luca Carniello, Andrea Defina, Luigi D'Alpaos 2021; "The first operations of Mo.S.E. system to prevent the flooding of Venice: Insights on the hydrodynamics of a regulated lagoon".

- Davide Tognin, Alvise Finotello, Andrea D'Alpaos, Daniele P. Viero, Mattia Pivato, Riccardo A. Mel, Andrea Defina, Enrico Bertuzzo, Marco Marani, Luca Carniello 2022; " Loss of geomorphic diversity in shallow tidal embayments promoted by storm-surge barriers".

- Sistema Mo.S.E. per la difesa di Venezia e della Laguna dalle acque alte, Progetto: https://mosevenezia.eu/progetto/

- Sistema Mo.S.E. per la difesa di Venezia e della Laguna dalle acque alte, Paratoie: https://mosevenezia.eu/paratoie/

- Checchetto&Associati, Mose Water Architecture in Malamocco: https://www.cecchettoassociati.com/progetti/infrastrutture-terminal/mose-porto-malamocco-architettura/

- Atlante della Laguna, il geoportale della laguna, del territorio e della zona costiera di Venezia: https://www.silvenezia.it/?q=node/56

- Comune di Venezia, Cartografia e viabilità: https://www.comune.venezia.it/it/content/download