

LUIGI D'ALPAOS^(a), LUCA CARNIELLO^(a)

SULLA REINTRODUZIONE DI ACQUE DOLCI NELLA LAGUNA DI VENEZIA

1. INTRODUZIONE

Nell'acceso dibattito sulla difesa di Venezia dalle "acque alte" e sulla salvaguardia della sua laguna l'attenzione dell'opinione pubblica quasi sempre è fatalmente richiamata sul progetto di chiusura delle bocche di porto, che permetterà di isolare la laguna dal mare in caso di necessità. Se non ignorata, molto meno considerata è, invece, la questione dei mutamenti morfologici che la laguna ha sperimentato negli ultimi due secoli e in modo particolarmente intenso negli ultimi quarant'anni, a causa della sovrapposizione sui naturali processi di subsidenza ed eustatismo, da sempre in atto nell'area veneziana, di importanti fenomeni erosivi dovuti alle opere realizzate dall'uomo, spesso concepite senza considerare le loro conseguenze complessive sul delicato ambiente lagunare.

Si tratta a dire il vero di problemi decisamente più complessi da affrontare rispetto alla difesa dei centri storici dalle "acque alte" e forse meno appetibili in termini economici, che hanno comportato un incremento generalizzato dei fondali della laguna, una tendenza al loro appiattimento e drammatici effetti negativi sulla conservazione di molte delle forme lagunari. Tra tutti basti ricordare l'evidente, inarrestabile, riduzione delle superfici un tempo occupate dalle barene, documentata dal confronto delle più recenti carte idrografiche della laguna con le più antiche e topograficamente affidabili mappe disponibili, quali sono quelle del Vestri del 1692 o dell'Emo del 1762.

Le cause di modificazioni morfologiche tanto evidenti sono molteplici, ma trovano la loro origine nel pressoché totale annullamento dell'apporto di materiale solido alla laguna a seguito della diversione dei grandi fiumi che vi sfociavano. I provvedimenti attuati dagli antichi Veneziani tra il XVI e il

^(a) Dipartimento IMAGE dell'Università di Padova – Via Loredan, 20 – 35131 Padova.

XVII secolo avevano ovviamente una giustificazione più che plausibile per quei tempi, essendo rivolti ad arrestare i processi di interrimento degli specchi d'acqua posti ai margini del bacino lagunare, che nel XV secolo si erano così estesi da minacciare direttamente la stessa città di Venezia.

L'allontanamento dei fiumi, intervento drastico e dalle conseguenze non prevedibili sul medio e lungo periodo, ha comportato nei secoli immediatamente successivi moderati effetti negativi sulle forme lagunari, che, associati ai processi della sommersione naturale, si sono concretizzati in lenti fenomeni erosivi a prevalente sviluppo orizzontale con una graduale riduzione dell'estensione delle superfici di barena ed un parallelo incremento delle zone d'acqua (D'Alpaos 2009; Carniello *et al.* 2009; Defina *et al.* 2007). Dopo la costruzione dei moli alle bocche di porto e lo scavo dei grandi canali navigabili interni, questa tendenza evolutiva della laguna si è però modificata. Da una parte, la forte asimmetria dei campi di moto tra la fase di flusso e di riflusso della marea, dovuta alla presenza di bocche armate (Blondeax *et al.* 1984), è stata causa di una perdita netta di sedimenti fini (D'Alpaos 2004; Tambroni e Seminara 2006), dall'altra, lo scavo dei grandi canali navigabili interni, in particolare del canale Malamocco-Marghera, hanno accelerato l'intensità dei processi erosivi, sovrapponendo ai già citati fenomeni a prevalente sviluppo orizzontale effetti non meno importanti anche in direzione verticale. Ne sono derivati, in una prima fase, un ulteriore incremento dell'estensione delle superfici occupate dalle zone d'acqua e, successivamente, un significativo aumento degli specchi d'acqua lagunari con valori di profondità tendenti ai valori che si dimostrano essere stabili rispetto alle sollecitazioni indotte dal moto ondoso (Fagherazzi *et al.* 2006).

Nei numerosi studi con i quali si è tentato di fornire una ragionevole spiegazione dei fenomeni che hanno concorso a modificare la morfologia della laguna, minore attenzione è stata rivolta agli effetti dovuti alla riduzione delle cospicue portate di acqua dolce un tempo introdotte dai fiumi. Gli apporti d'acqua dolce, diminuiti a seguito dell'allontanamento dei fiumi e ancor più limitati nel corso del '900 dalle portate irrigue concesse sui fiumi di risorgiva che ancora sfociavano in laguna, hanno pesantemente modificato i caratteri ambientali del suo bacino, soprattutto delle parti poste ai margini della conterminazione, contribuendo alla scomparsa delle ampie fasce di transizione tra terra e acqua che nel passato le occupavano.

La completa marinizzazione dell'ambiente lagunare seguita a tali provvedimenti è stata da molti considerata un processo di trasformazione assolutamente positivo per l'intero sistema, innanzitutto per gli evidenti benefici igienico-sanitari che ne sono derivati. Inoltre, il dominio all'interno del bacino lagunare delle acque salate, o comunque ad elevato contenuto salino, accompagnandosi all'approfondimento generale dei fondali determinato dalla sommersione naturale, ha favorito importanti modificazioni nell'uso del-

le ampie superfici appartenenti alla cosiddetta “laguna morta”, a loro volta giudicate positivamente.

Nel loro insieme l’allontanamento dei fiumi e gli effetti dei processi naturali e delle opere realizzate dall’uomo hanno permesso un più ampio sfruttamento economico delle aree marginali della laguna, testimoniato tra l’altro dal trasferimento su di esse delle secolari attività praticate all’interno delle valli da pesca, attività severamente controllate dalla Repubblica, se non addirittura combattute quando le valli stesse occupavano le aree idrodinamicamente più attive della “laguna viva” prossime alle bocche.

Gli attuali problemi di cui soffre la laguna evidenziano, tuttavia, che anche per gli aspetti più strettamente legati alla qualità delle acque l’allontanamento dei fiumi è stato un provvedimento troppo drastico per le conseguenze prodotte sui caratteri morfologici del sistema lagunare nel medio e nel lungo periodo. Di qui la proposta da qualche tempo formulata, ma per il momento ancora inascoltata, di rivedere i mutati rapporti stabiliti dall’uomo tra la laguna e i fiumi che hanno contribuito a costruirla, incrementando, rispetto alla condizione attuale, l’apporto di acque dolci in laguna, con l’obiettivo primario di mitigare i processi erosivi ed il degrado generalizzato che oggi si osservano.

Con queste finalità, premessa una breve illustrazione degli interventi attuati dagli antichi Veneziani per distogliere i fiumi dalla laguna, si esaminano, sulla base dei dati sperimentali disponibili e dei risultati forniti da un modello matematico bidimensionale multistrato, gli attuali caratteri generali del campo di moto che si stabilisce nelle zone marginali del bacino lagunare, dove le poche acque dolci ancora immesse dai fiumi vengono a contatto con le acque salate introdotte dal mare. Dopo aver indagato con l’ausilio della modellazione matematica quali potevano essere presumibilmente le condizioni esistenti antecedentemente all’estromissione dei fiumi dalla laguna per quanto riguarda la distribuzione della salinità, si esaminano le conseguenze di una eventuale più cospicua reintroduzione di acque dolci, formulando alcune considerazioni sugli effetti potenziali del provvedimento nei riguardi della difesa e del ripristino di quelle forme lagunari che in caso contrario, perdurando la situazione attuale, sarebbero fatalmente destinate a scomparire.

2. LA DIVERSIONE DEI FIUMI

A partire dal XIV secolo, come è noto, i Veneziani dovettero fronteggiare preoccupanti fenomeni di interrimento della loro laguna e crescenti difficoltà di navigazione attraverso le foci lagunari. Si trattava di problemi riconducibili alle interferenze con la laguna dei numerosi fiumi che vi si immettevano direttamente o che sfociavano al mare nelle sue immediate vi-

cinanze. Gli interrimenti erano causati soprattutto dai sedimenti introdotti in laguna dal Brenta, dopo che i Padovani nel corso del XII secolo, per contenere i sempre più frequenti episodi alluvionali del fiume a danno del loro territorio, ne avevano spostato il ramo principale a Fusina (l'antica Lizzafusina), quasi di fronte a Venezia.

Tra molti contrasti e ripensamenti, durante tutto il XIV secolo i Veneziani tentarono di fronteggiare il fenomeno con opere interne alla laguna, realizzando ai margini della "laguna morta" un argine, detto di *intestadura*, la cui sommità era posta cinque piedi al di sopra del comune marino (~ 2 m s.m.m.), e scavando a ridosso dell'opera un canale largo circa trenta passi (più di 50 m) per raccogliere le acque del Brenta e di altri fiumi minori (tra i quali il Bottenigo-Musone e il Maerne) che vi sfociavano, in modo da convogliarle lontano da Venezia. L'obiettivo era principalmente quello di introdurre un elemento di separazione tra acque dolci e acque salate a difesa della città, dei suoi rii e dei suoi specchi d'acqua, allontanando verso sud nel bacino di Malamocco le portate così raccolte, per restituirle alla laguna a Bocca Lama di fronte all'isola di S. Marco ora scomparsa (Fig. 1).

Nonostante i ripetuti aggiustamenti il provvedimento non sortì, tuttavia, gli esiti sperati. Non si fu in grado, infatti, né di contenere i problemi più direttamente collegati agli interrimenti della laguna intorno a Venezia, né di arrestare l'avanzamento del canneto, e quindi delle zone d'acqua a basso tenore salino, verso la città, come è ben documentato dai numerosi riferimenti storici reperibili e in particolare dalle ripetute delibere sull'argomento prese dagli organismi deputati dal governo della città a risolvere la questione.

La scarsa efficacia delle soluzioni intraprese rispetto ai problemi che si volevano risolvere, oggi ben spiegabile alla luce delle moderne conoscenze idrauliche, portò a un deciso cambiamento di indirizzo nel corso del XV secolo, grazie anche al mutato quadro politico. La sconfitta dei da Carrara, avvenuta proprio nei primi anni di quel secolo (1404), aveva infatti portato la Repubblica ad estendere il suo dominio sulla terraferma fin oltre Padova, rendendo possibili, diversamente da prima, interventi all'esterno della laguna per la sua salvaguardia.

Ebbe così inizio il secolo delle diversioni (Fig. 1), finalizzate a incrementare la pendenza motrice del Brenta, accorciandone il percorso verso la foce di Bocca di Lama, dove le acque del fiume erano già indirizzate dall'argine di *intestadura*. L'obiettivo fu dapprima perseguito con la realizzazione di tre diversivi bassi, che si staccavano dal fiume immediatamente a monte e a valle di Oriago e successivamente (1457) con la costruzione di un diversivo alto, che, partendo da S. Bruson di Dolo, avrebbe dovuto dare, nelle intenzioni, soluzione definitiva al problema.

L'esito dei provvedimenti adottati non portò ai risultati sperati. Né valse a migliorare la situazione la costruzione, verso la metà del '400, di un argi-



Fig. 1 – Gli interventi attuati dalla Repubblica di Venezia sul corso del Brenta, del Bacchiglione e di alcuni fiumi minori a difesa della laguna dagli interrimenti.

ne interno (*parador o traversagno*) disposto quasi ortogonalmente all'argine di intestadura e radicato alle motte del delta che si era formato a Bocca Lama dopo lo spostamento in questa località della foce del Brenta di Fusina. Il parador, costituito da una palificata alla quale si appoggiava un paré di graticci di arelle, tagliava trasversalmente quasi tutta la laguna, separando parte del bacino di S. Nicolò da quello di Malamocco. L'opera avrebbe dovuto impedire che le acque del Brenta scaricate a Bocca di Lama fossero sospinte dalle maree e dal vento verso Venezia, prima di depositare sul fondo i sedimenti trasportati.

A seguito di questi interventi, mentre le condizioni intorno a Venezia non migliorarono apprezzabilmente, fortissimi fenomeni di interrimento

incominciarono a interessare il bacino di Malamocco, a causa dell'accresciuto apporto di acque cariche di sedimenti fluviali ai limiti della "laguna viva".

Verso la fine del XV secolo maturò conseguentemente la decisione di costruire il grande diversivo tutt'ora riconoscibile che, partendo sempre da S. Bruson e seguendo inizialmente il tracciato del diversivo già realizzato nei primi decenni del '400, doveva portare il Brenta, unito al Bacchiglione, a sfociare a Conche (1507) quasi di fronte a Chioggia, molto più a sud quindi di Bocca Lama, ma pur sempre all'interno della laguna.

Inevitabilmente però assieme alla foce dei due fiumi si trasferirono a Conche e nella laguna di Chioggia i problemi che si volevano eliminare per il bacino di Malamocco. Di qui la decisione finale, molto discussa e contrastata, di estromettere completamente il Brenta-Bacchiglione dalla laguna, portandone la foce nell'adiacente laguna di Brondolo (1552) e di lì al mare (Fig. 1). Il provvedimento, completato dalla contestuale separazione della laguna di Chioggia da quella di Brondolo mediante la costruzione dell'omonimo *parador*, vide schierati su fronti opposti, con continue repliche e controrepliche, Cristoforo Sabbadino e Alvise Cornaro, sostenitori di soluzioni tecniche molto diverse tra loro, ma portatori anche di una visione politica completamente differente sul futuro della Repubblica. Ed è a Brondolo che, fatta eccezione per un breve periodo nella seconda metà dell'800 in cui la foce del Brenta fu ristabilita a Conche in attuazione del famoso Piano Fossoni-Paleocapa (1835), che i due fiumi riuniti ancor oggi giungono al mare, testimonianza indelebile del costante, pragmatico, impegno profuso dagli antichi Veneziani a difesa della loro laguna.

Risolta la questione del Brenta, con la realizzazione del Canale Novissimo (1610) e, in prosecuzione verso monte, del Taglio di Mirano (1613) furono distolti completamente dalla laguna centrale le acque dolci convogliate dai fiumi minori (Fig. 1). Solamente dopo la realizzazione di questi interventi la Repubblica volse decisamente l'attenzione ai problemi della laguna superiore, meno impellenti per la città di Venezia, ma egualmente importanti in quanto coinvolgenti alcuni tra i più antichi centri storici lagunari, quali Torcello, Mazzorbo e Burano.

Nella laguna superiore era il Piave a creare le più forti preoccupazioni. Durante le maggiori piene le torbide del fiume cariche di sedimenti, superando il corso Sile, penetravano in profondità all'interno della laguna, minacciando di interrimento gli specchi d'acqua posti in adiacenza a Torcello e a Burano. Inoltre i cospicui apporti di materiale solido convogliati al mare dal Piave al suo sbocco naturale di Jesolo, movimentati sotto riva dalle correnti costiere, interferivano pesantemente con i fondali delle foci lagunari di Lio Maggiore, Treporti, S. Erasmo e S. Nicolò, creando non poche difficoltà alla navigazione. Ne era particolarmente colpito il porto di S. Nicolò, il vero



Fig. 2 – Gli interventi attuati dalla Repubblica per la difesa della laguna di Venezia dalle piene del Piave e per l'estromissione del Sile.

porto di Venezia, che sul finire del XVI secolo non fu più agibile alle navi di maggiore stazza impossibilitate a superare la barra di foce esterna.

Sempre nella laguna superiore, problemi diversi, di ordine igienico-sanitario, non meno preoccupanti per quei tempi erano determinati dal Sile, il maggiore fiume di risorgiva del Veneto, che, drenando gli affioramenti a giorno del potente acquifero indifferenziato alloggiato nel sottosuolo dell'alta pianura trevigiana, immetteva ai margini della laguna cospicue portate

di acqua dolce, riducendo la salinità delle acque in questa parte del bacino lagunare e favorendo, tra l'altro, il prorompente avanzamento del canneto, come è tipico di molte zone di transizione fra terra e mare. Ne soffrirono in modo particolare gli insediamenti esistenti, al punto che alcuni di essi, come Torcello, proprio per motivi igienico-sanitari, dovettero essere almeno temporaneamente abbandonati dai loro abitanti.

Per fronteggiare questi problemi, nel corso del XVI secolo i Veneziani tentarono senza successo di eliminare le interferenze del Piave con la laguna superiore mediante la costruzione del famoso argine di S. Marco (Fig. 2). Né miglior esito produsse la successiva realizzazione di una serie di tagli, tra i quali il noto Taglio di Re a valle di S. Donà, con l'obiettivo di alleggerire dalle piene il corso terminale del fiume. Solo molti anni più tardi (1663) fu avviato l'intervento, previsto ma non attuato per le gravi difficoltà economiche in cui si era venuta a trovare la Repubblica, di spostare decisamente verso nord il corso del Piave. Inalveate entro un'apposita canalizzazione che partiva da S. Donà, le acque del fiume, decantate in un grande bacino costiero che formava il cosiddetto Lago della Piave, furono indirizzate nella foce del Livenza a Porto S. Margherita, dopo aver deviato a nord il Livenza stesso nella laguna di Carole, portandolo al mare a foce Nicessolo.

Il labile percorso terminale stabilito dalla nuova inalveazione del Piave non resse agli eventi. Circa 20 anni dopo, infatti, il fiume, con la famosa rotta della Landrona (Revedoli), si aprì una nuova strada verso il mare, più breve ed idraulicamente più ragionevole rispetto a quella che gli uomini gli avevano voluto dare, stabilendo definitivamente la sua foce a Cortellazzo, poco a nord di Jesolo, dove ancor oggi sfocia.

Dopo questi accadimenti, nell'alveo abbandonato del Piave furono introdotti il Sile e altri fiumi minori, compresi il Vallio, il Meolo e il Musestre, mediante la costruzione ai margini nord orientali della laguna dell'omonimo Taglio (1683). Fu in tal modo distolta dalla laguna superiore la maggior parte delle acque dolci che in origine vi si immettevano (Fig. 2), avviando quelle modificazioni ambientali di cui da qualche tempo si incomincia a discutere per gli effetti non sempre positivi che esse hanno comportato.

Con la realizzazione di quest'ultima opera trovava compimento il grandioso piano perseguito dai Veneziani in un arco di tempo di circa due secoli, che vide distogliere completamente dalla laguna i maggiori fiumi. L'idea, preconizzata da Marco Cornaro fin dal 1450 nei suoi scritti sulla laguna veneta, ebbe un secolo più tardi in Cristoforo Sabbadino il suo lucido interprete, capace di tradurla in una circostanziata serie di interventi, in parte realizzati come il grande cultore di idraulica lagunare li aveva concepiti, in parte attuati con soluzioni diverse, ma sostanzialmente rispettose dei principi che egli aveva delineato nel suo celebre piano. Nello specifico del Sile, Cristoforo Sabbadino aveva indicato una soluzione più radicale di quella poi



Fig. 3 – Il progetto di Cristoforo Sabbadino per allontanare dalla laguna le acque del Sile e di altri fiumi minori della pianura trevigiana.

realizzata, ipotizzando che alle acque del fiume fossero unite anche quelle del Bottenigo (ovvero del Musone e del Marzenego), del Dese e dello Zero, per deviarle unite insieme verso settentrione mediante lo scavo di un apposito canale. Questa nuova inalveazione, partendo da Mirano doveva arrivare al mare per il “Canal de Lio Mazor” (Lio Maggiore), tagliando all’interno della laguna per valle Dogà e valle Dragojesolo (Fig. 3). Nell’attraversa-

mento lagunare secondo Sabbadino il canale avrebbe dovuto essere arginato verso laguna, sottraendo alla libera espansione della marea solo una piccola parte di bacino lagunare, a salvaguardia dall'impaludamento e dagli interrimenti della rimanente.

Gli interventi attuati dai Veneziani sui fiumi che confluivano in laguna, principalmente per difenderla dagli interrimenti, sono stati sicuramente decisivi rispetto ai problemi che si volevano affrontare, ma presentano, come si è accennato, anche molti aspetti negativi che non si possono ignorare, se rivisitati alla luce delle moderne conoscenze di idraulica lagunare, considerando le loro conseguenze complessive. Il riferimento non è solo al quasi totale annullamento dell'apporto di sedimenti alla laguna, ma anche alla drastica riduzione delle immissioni di acqua dolce, i cui effetti, molto sottovalutati, meriterebbero, invece, di essere approfonditi per gli aspetti sia di carattere morfologico sia, più in generale, di tipo ambientale. Per le fasce marginali della laguna le dimensioni del problema emergono in tutta evidenza se si considera che la diversione del Brenta e del Sile ha da sola sottratto alla laguna una portata media di acqua dolce che è dell'ordine del centinaio di m^3/s , di almeno tre volte superiore rispetto a quella che attualmente è recapitata dai fiumi minori e dai canali che ancora vi sfociano.

3. LA DISTRIBUZIONE DELLA SALINITÀ NELLA LAGUNA SECONDO ALCUNI DATI SPERIMENTALI DISPONIBILI

Gli apporti complessivi di acqua dolce alla laguna in condizioni di regime normale sono valutabili attualmente in non più di una trentina di m^3/s . Si tratta prevalentemente di contributi provenienti da canali di bonifica e da fiumi di risorgiva, pressoché privi quindi di sedimenti anche in condizioni di piena. La laguna, sacrificata nel corso del '900 anche al soddisfacimento dei fabbisogni irrigui del cosiddetto "bacino scolante", riceve oggi solo modeste portate residue, di gran lunga inferiori a quelle tipiche del regime idrologico naturale dei corsi d'acqua che vi sfociano.

I caratteri generali e locali del moto ai margini della laguna, determinati dal contatto tra le acque dolci recapitate dai fiumi e le acque salate introdotte dalla marea, non sono mai state nel passato oggetto di indagini approfondite. Né l'attenzione verso questi problemi è cresciuta in questi ultimi anni, quando le questioni riguardanti la difesa di Venezia dalle "acque alte" e la salvaguardia della sua laguna si sono imposte all'attenzione dell'opinione pubblica, in verità più per le molte polemiche sollevate che per le analisi di merito sulle soluzioni proposte.

Mentre le trasformazioni morfologiche negative sperimentate dalla laguna come conseguenza dei diffusi processi erosivi che la colpiscono e che

si sostanziano in un preoccupante deficit di sedimenti negli scambi con il mare sono da qualche tempo al centro degli interessi degli studiosi, restano di fatto pressoché non indagati i complessi processi idrodinamici ed ambientali innescati dal contatto tra acque dolci e acque salate nelle zone poste ai limiti della conterminazione lagunare. Sempre relativamente a tali processi, del tutto trascurate sono anche le conseguenze del mutato rapporto stabilito dall'uomo all'interno della laguna tra gli apporti di origine fluviale e quelli provenienti dal mare.

Trova giustificazione in queste brevi considerazioni la quasi totale mancanza nella letteratura tecnica di dati sperimentali sull'argomento e l'assenza di indagini, sia pure teoriche, sui complessi fenomeni che governano il contatto ed il mescolamento all'interno della laguna tra acque dolci e acque salate.

Con riferimento al passato, le sole informazioni storiche reperibili sull'argomento riguardano i risultati di alcune misure della salinità in superficie e in profondità, associate a misure di temperatura dell'acqua e dell'aria, di velocità del vento e delle correnti di marea, eseguite nella laguna settentrionale negli specchi d'acqua della Palude di Cona e nei canali che più direttamente la interessano (canale di Burano, Silone e fiume Dese). Le indagini, condotte nei mesi invernali del triennio 1926-1928 (Ministero dei Lavori Pubblici e Ministero dell'Agricoltura e Foreste, 1937), pur finalizzate principalmente a studi sull'anofelismo, sono di un qualche interesse anche dal punto di vista idraulico. Esse evidenziano in tutta l'area indagata, che va dalla foce del Dese alle isole di Burano e Torcello, valori medi di salinità (10-14 ‰) apprezzabilmente inferiori a quelli attuali, verosimilmente per le maggiori portate di acqua dolce introdotte in quegli anni dai fiumi e dai canali che sfociavano in questa parte della laguna, non ancora interessati nel loro corso superiore dai prelievi irrigui successivamente assentiti. Sono tra l'altro colti dalle misure importanti differenze di salinità tra i valori dello strato superficiale e quelli rilevati in profondità, con una netta tendenza alla stratificazione. Nelle zone d'acqua a basso fondale, parimenti individuata è la tendenza alla formazione in superficie di lenti di acqua dolce di piccolo spessore, che conservano la loro identità anche a grande distanza dalla zona in cui si formano.

Del tutto ignorati negli anni che seguirono, gli effetti dell'immissione di acque dolci ai margini della laguna sono stati riconsiderati solo sul finire del secolo appena trascorso, quando, con il supporto tra gli altri del Consorzio Venezia Nuova, furono condotte due campagne di misura (Imberger 1991), la prima nel periodo invernale, la seconda nel periodo estivo, utilizzando strumenti con elevato grado di risoluzione dei valori misurati per la conduttività, la temperatura e la pressione, capaci di fornire indicazioni anche sulla microstruttura di tali grandezze.

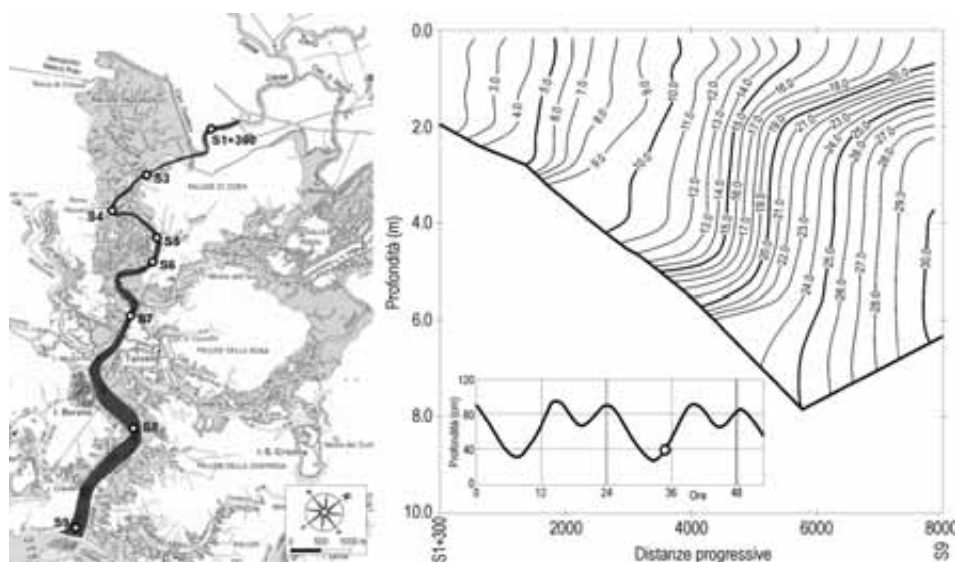


Fig. 4 – Distribuzione istantanea delle isoaline (salinità espressa in ‰) in fase di marea crescente lungo la direttrice foce Dese-Zero, Canale di Burano.

La mancata contemporanea determinazione delle portate immesse dai fiumi, delle caratteristiche locali dei campi di vento e soprattutto l'assenza di un accurato e puntuale rilievo dei fondali, particolarmente lungo i canali lagunari esplorati, forniscono alle misure eseguite un carattere utile per un primo inquadramento del problema, lasciando ampio margine a interpretazioni soggettive dei risultati, che solo con approfondimenti successivi si sarebbero potute rimuovere. Era sicuramente questa l'intenzione del Prof. Jorg Imberger, notissimo esperto del settore in campo internazionale, che condusse tali misure, ma purtroppo nessuna successiva attività è stata svolta, lasciando molte lacune conoscitive che sarebbe stato, invece, opportuno colmare.

Pur con questi limiti l'interesse dell'indagine è notevole, sia per l'inquadramento dei caratteri globali del moto delle acque fluviali ai margini della laguna sia per l'individuazione dei più complessi processi che presiedono al loro mescolamento con le acque di maggiore salinità già residenti in laguna. Si tratta di processi fortemente dipendenti dalla microstruttura delle correnti che animano gli strati con diversa salinità che vengono a contatto tra loro e che la strumentazione utilizzata è in grado di cogliere.

Per gli aspetti globali del moto, dei quali nel seguito si tenterà di proporre una modellazione matematica accettabile, le misure ben descrivono i fenomeni di stratificazione delle acque che si manifestano nelle zone ancora interessate dall'introduzione di apprezzabili portate di acqua dolce. I dati raccolti si riferiscono ad aree con fondali sostanzialmente uniformi e a zone,

come è quella che ha come suo vertice in laguna il canale di S. Felice e che si appoggia alla conterminazione nel tratto che va da Tessera alla foce del canale Silone, incise da canali sensibilmente più profondi rispetto ai fondali adiacenti: nello specifico la foce del Dese-Zero e, in prosecuzione, il canale di Burano.

Per quest'area i transetti di misura eseguiti durante la campagna invernale, con il rilievo di numerosi profili verticali di salinità lungo l'asse della direttrice fiume Dese-canale di Burano, evidenziano innanzitutto il ruolo fondamentale esercitato dalla fase della marea sulla distribuzione della salinità (Imberger 1991). All'inizio della fase di marea crescente, lungo il canale di Burano l'acqua dolce che penetra in laguna tende a generare veri e propri fronti verticali, attraverso i quali si passa in breve spazio da valori di salinità di circa l'8 ‰ a valori superiori al 22 ‰ (Fig. 4). Questa distribuzione della salinità sostanzialmente si conserva nelle ore successive, pur osservandosi una leggera tendenza del gradiente misurato a ridistribuirsi in direzione longitudinale. Le linee isoaline avanzano verso la foce del fiume e progrediscono su distanze simili sia in superficie sia sul fondo, conservando sostanzialmente la loro pendenza originale, a dimostrazione del fatto che l'attrito sul fondo del canale è sufficientemente elevato per vincere gli effetti di galleggiamento dovuti alla stratificazione. Si tratta di una distribuzione della salinità che tende a ripetersi costantemente nei suoi caratteri principali durante le fasi di marea crescente, come è ben documentato dall'analisi delle misure effettuate lungo lo stesso transetto nei giorni successivi.

Condizioni sensibilmente diverse si rilevano, invece, durante la fase di marea calante. Le misure segnalano, infatti, ancora una marcata tendenza alla stratificazione delle acque, ma con una diversa struttura nella distribuzione verticale della salinità, tipica in questo caso delle foci interessate dalla penetrazione della salsedine solo in vicinanza al fondo, essendo la parte superiore occupata da acque sostanzialmente dolci. Significativa per questi aspetti, nel momento in cui è massimo alla foce il gradiente dei livelli in fase di marea calante, l'andamento della linea isoalina 28 ‰ (Fig. 5). Lungo il transetto misurato essa si estende per circa 5 km con andamento quasi orizzontale prima di piegare rapidamente verso la superficie. Il tratto di canale più prossimo alla foce del Dese rimane stratificato nelle suddette condizioni, sia pure con gradienti più deboli, fino all'inversione di marea, quando è rilevabile in superficie una variazione quasi linearmente distribuita della salinità, risalendo dal canale di Burano verso le ultime sezioni del fiume. Durante la fase di marea calante, pertanto, in uscita dalla foce la componente gravitazionale del moto concorre a incrementare la componente barotropica delle velocità, mentre azioni tangenziali più elevate si sviluppano attraverso la colonna d'acqua, dove, secondo le misure, lo strato più superficiale, a minor densità, si muove con velocità sensibilmente superiori a quelle degli strati più profondi.

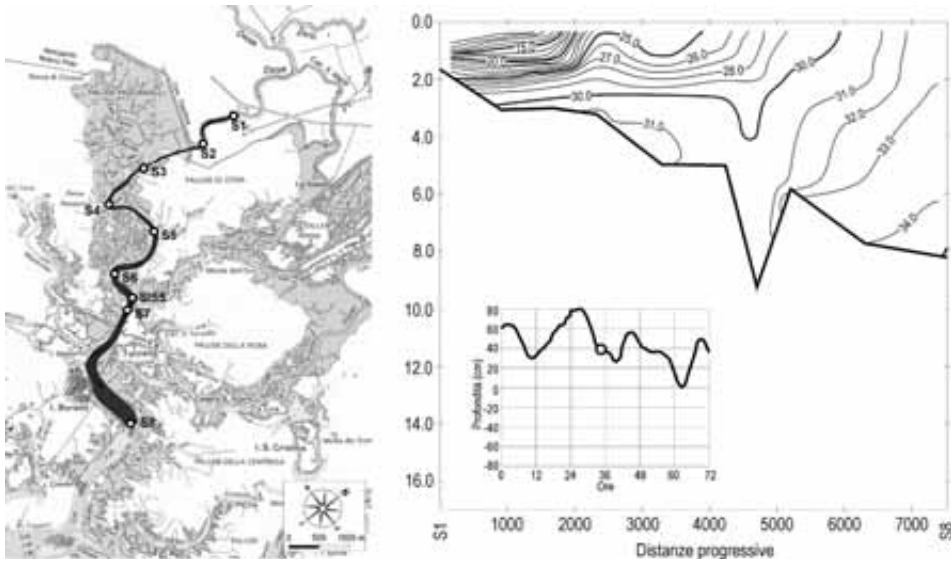


Fig. 5 – Distribuzione istantanea delle isoaline (salinità espressa in ‰) in fase di marea calante lungo la direttrice foce Dese-Zero, canale di Burano.

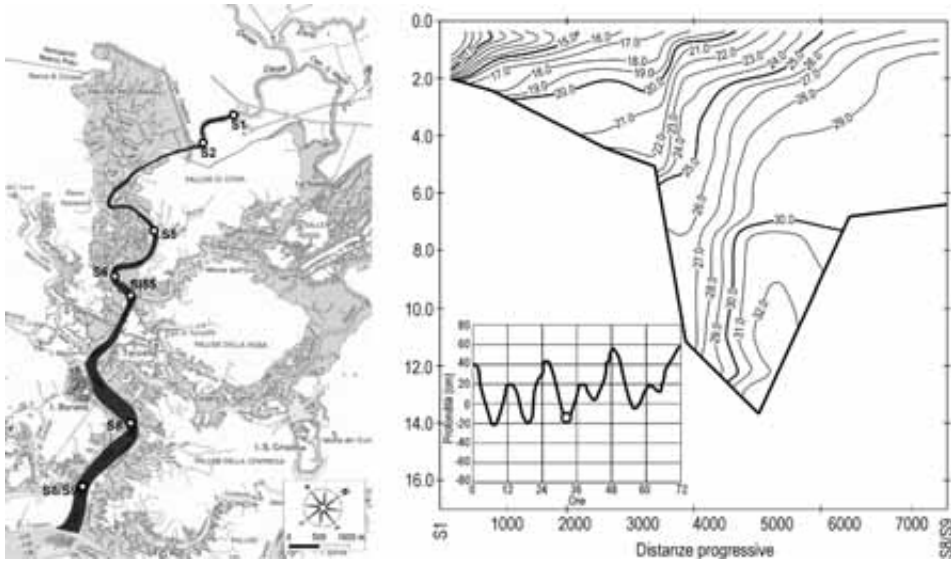


Fig. 6 – Acque con salinità più elevata imprigionate nelle depressioni del fondo, debolmente assoggettate all'azione di pompaggio del flusso di acque soprastanti con minore salinità (valori espressi in ‰).

A parità di forzanti idrodinamiche esterne, l'importante ruolo esercitato dalla topografia dei fondali sui caratteri del moto è documentato dalla permanenza di acque con maggior contenuto salino in corrispondenza delle

fosse altimetriche presenti lungo il canale di Burano. La debole azione di pompaggio esercitata dal flusso soprastante e la sostanziale stabilità dell'interfaccia che separa le acque a maggiore salinità delle parti più profonde del canale da quelle più dolcificate che scorrono superiormente, attenua apprezzabilmente il ricambio nel tempo di tali masse d'acqua. Queste ultime tendono in qualche modo a rimanere "imprigionate" in vicinanza del fondo entro le depressioni che caratterizzano l'andamento della linea di thalweg del canale, che nello specifico si presenta con una pronunciata sinuosità (Fig. 6).

Sempre con riferimento agli aspetti generali del moto, sulle zone a basso fondale interessate da ingressi di acqua dolce, come tipicamente può essere considerato lo sbocco in laguna del canale Osellino, le misure effettuate evidenziano condizioni molto diverse rispetto a quelle rilevate lungo la direttrice foce Dese-canal di Burano, formata da canali apprezzabilmente più incisi (Imberger 1991). All'uscita in laguna dalla foce del canale Osellino, le acque dolci convogliate sono soggette a importanti processi di mescolamento in direzione verticale con le acque più salate già residenti nelle zone a basso fondale antistanti. Questi processi non sono, tuttavia, sufficientemente intensi per omogeneizzare completamente la colonna d'acqua. Acque con salinità più ridotta si raccolgono conseguentemente solamente nello strato più superficiale e tendono a essere sospinte dalle correnti mareali verso est. La deviazione è meno accentuata nella fase di marea calante che segue immediatamente il colmo di marea (Fig. 7), rispetto a quella che si rileva in fase di marea crescente, qualche tempo dopo il superamento del cavo (Fig. 8), quando l'effetto è decisamente più evidente. Nel complesso permane a ridosso della foce del canale una zona, non molto estesa, con apprezzabili gradienti orizzontali della salinità, che non favoriscono la completa dispersione in laguna delle acque dolci introdotte. Almeno durante le campagne di misura condotte, la maggior parte del flusso d'acqua dolce in ingresso dall'Osellino tende a lasciare l'area antistante la foce raccolta prevalentemente nello strato superiore della colonna d'acqua, sfuggendo verso est lateralmente al perimetro che delimita l'area osservata e mantenendosi ai margini della laguna.

Un'ultima interessante considerazione sui caratteri globali del moto, che discende dai risultati di questa indagine sperimentale purtroppo non più ripetuta, riguarda le masse d'acqua che tendono ad occupare le zone a basso fondale poste lateralmente ai canali lagunari interessati dall'introduzione di portate fluviali. Appaiono ben individuati dalle misure i meccanismi che governano la distribuzione della salinità all'interno di queste zone. Durante la fase di marea crescente, quando incominciano ad essere invase dalla marea, esse sono interessate da introduzioni di acque con diverso valore di salinità sul loro perimetro. Dati i fondali, la salinità delle acque introdotte

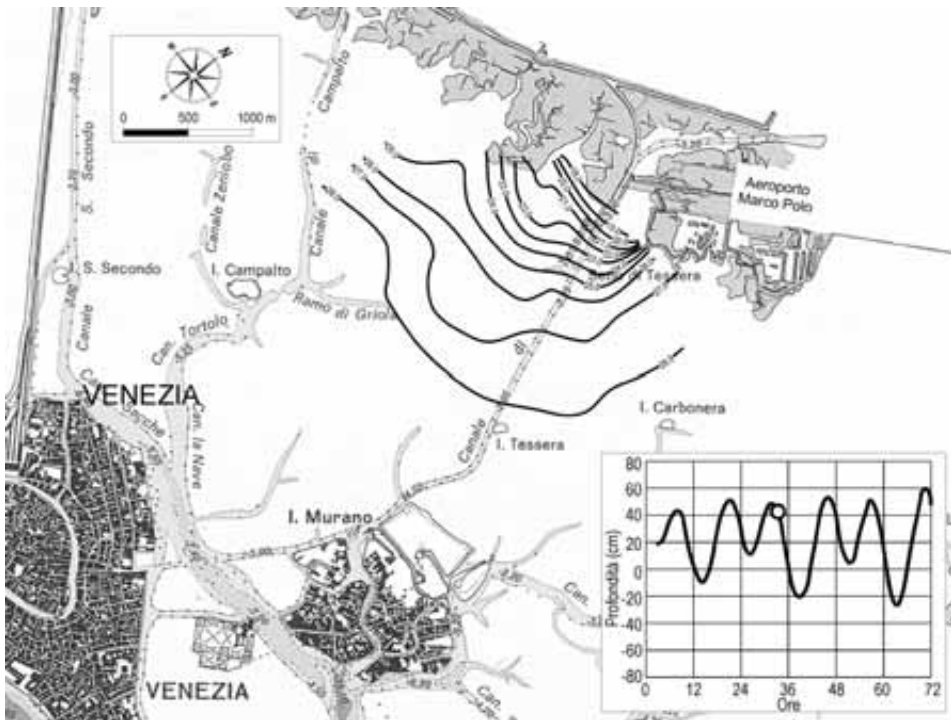


Fig. 7 – Andamento delle isoaline dello strato più superficiale della colonna d’acqua alla foce del Canale Osellino immediatamente dopo il superamento del colmo di marea.

corrisponde a quella dello strato più superficiale del tratto di canale che le alimenta, sensibilmente variabile in direzione longitudinale. Possono conseguentemente comparire all’interno delle zone a basso fondale più fronti di salinità, in relazione alle diverse caratteristiche delle acque immesse nei diversi punti di alimentazione da parte del canale che le fiancheggia. Si tratta di strutture lenticolari che, per il ridotto dinamismo delle zone a basso fondale, tendono a conservare la loro identità, quantomeno durante il ciclo di marea, che può essere considerato il tempo caratteristico del fenomeno.

Se quelli brevemente delineati sono i meccanismi ai quali si deve far riferimento quando si esaminano i fenomeni che si producono nelle zone di contatto tra le acque di origine fluviale e quelle che penetrano dal mare, è superfluo sottolineare la complessità dei campi di moto che si determinano. Per la corretta interpretazione dei dati osservati e per la loro eventuale simulazione matematica, diventa indispensabile conoscere con grande accuratezza, accanto alle forzanti esterne, la morfologia dei fondali, verosimilmente con un dettaglio che nessuno dei rilievi batimetrici disponibili per la laguna è in grado di offrire. Risultano, inoltre, evidenti per la comprensione dei caratteri locali del moto, i limiti di una impostazione che introduca sempre e comunque nell’analisi dei fenomeni l’ipotesi di fluido omogeneo, che non può essere forzata,

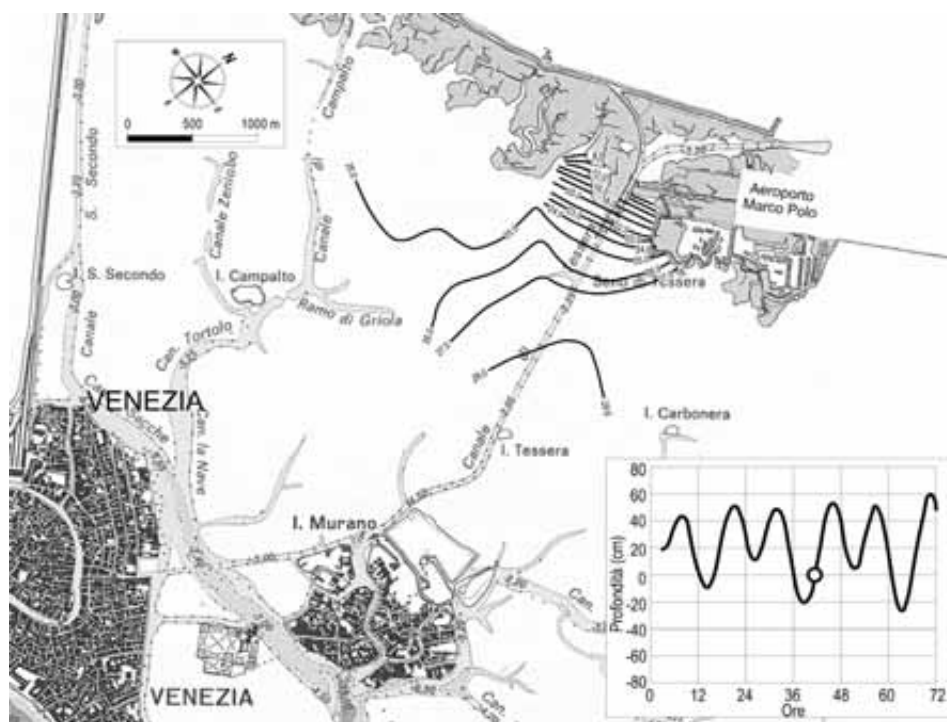


Fig. 8 – Andamento delle isoaline (espresse in ‰) dello strato più superficiale della colonna d’acqua alla foce del Canale Osellino in piena fase di marea discendente.

come a volte è accaduto e accade per la laguna di Venezia, all’interpretazione di processi che sono governati da ipotesi completamente diverse.

4. MODELLAZIONE MATEMATICA DELLA DISPERSIONE DELLE ACQUE DOLCI IN LAGUNA

Le misure sperimentali cui si è fatto riferimento conservano ancor oggi grande interesse. Esse non consentono, tuttavia, un’estensione delle osservazioni a situazioni diverse da quelle sperimentate, in particolare a condizioni in cui le forzanti esterne sono naturalmente modificate o variate a causa di interventi da parte dell’uomo, come da sempre è avvenuto nel caso della laguna di Venezia.

Indicazioni in tal senso potrebbero, invece, essere ottenute da una analisi comparativa tra situazioni diverse condotta con l’ausilio di modelli matematici opportunamente strutturati per descrivere la dinamica dei fenomeni considerati. I limiti dei modelli matematici sono ben noti e sono sostanzialmente riconducibili alla necessità di procedere preliminarmente a una loro taratura, simulando con il calcolo situazioni osservate. Se però l’obiettivo

non è tanto quello di riprodurre fedelmente i fenomeni osservati, quanto piuttosto quello di condurre valutazioni di tipo comparativo sugli effetti di eventuali provvedimenti che si intendono adottare, nel confronto tra risultati forniti dai modelli e realtà sperimentale ci si può limitare a considerare anche solo aspetti qualitativi del campo di moto.

Tenendo presenti questi limiti i modelli matematici ben si prestano ad essere convenientemente utilizzati e possono fornire un ragionevole supporto a indagini rivolte a esaminare le conseguenze sia degli interventi attuati per distogliere i fiumi dalla laguna sia di provvedimenti rivolti a una più significativa reintroduzione di acque dolci rispetto alla condizione attuale.

Con queste finalità è stato messo a punto un modello matematico bi-dimensionale multistrato basato sull'ipotesi Boussinesq, ovvero che le variazioni di densità nel campo di moto siano modeste. Rimandando alla letteratura tecnica per una più dettagliata descrizione del modello utilizzato e delle caratteristiche della soluzione numerica implementata per le equazioni che governano il moto di una corrente su bassi fondali in un dominio con densità non omogenea (D'Alpaos. *et al.* 1996), è sufficiente in questa sede ricordare le peculiarità della modellazione adottata. Rispetto ad altri modelli disponibili, attraverso un collaudato schema di sottogriglia (D'Alpaos e Defina 1993; Defina 2000), è introdotta una riformulazione delle equazioni del moto per rappresentare gli effetti sull'idrodinamica lagunare delle irregolarità dei fondali e delle superfici che, durante l'alternarsi delle maree, sono soggette a periodico prosciugamento. Si tratta, come è noto, di situazioni che localmente giocano un ruolo non trascurabile sia sulla propagazione dell'onda di marea sia sul trasporto e sulla dispersione di eventuali sostanze conservative ad essa associati, soprattutto quando i tiranti d'acqua assumono valori confrontabili con quelli delle irregolarità batimetriche dei fondali.

L'analisi numerica è stata preliminarmente rivolta a indagare i caratteri più rilevanti del moto, considerando la laguna nella sua condizione attuale e utilizzando come reticolo di calcolo una schematizzazione da molto tempo utilizzata per le indagini sulla laguna di Venezia (Fig. 9a). In direzione verticale la colonna d'acqua è suddivisa in dieci strati di spessore non uniforme, più ridotto in superficie e maggiore in profondità.

Poiché i dati delle campagne di misura precedentemente illustrati non si prestano, come si è detto, a una vera e propria taratura del modello, è parso sufficiente in una prima fase esaminare se lo schema di calcolo fosse in grado di simulare quantomeno in termini qualitativi gli aspetti globali del moto evidenziati dalle indagini sperimentali.

A tal fine, a titolo puramente esemplificativo, si è considerato per la marea un andamento periodico sinusoidale (periodo di 12 ore) con un'altezza di ± 0.30 m, oscillante intorno a un livello medio di 0.10 m s.l.m.

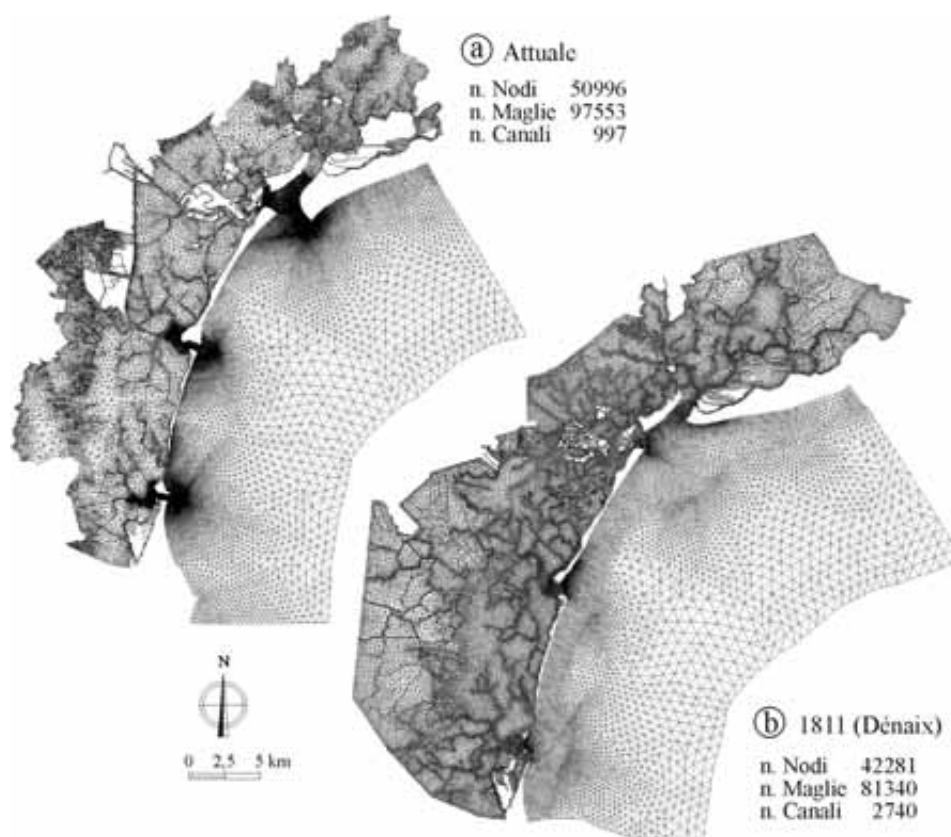


Fig. 9 – Reticolo di calcolo dei modelli bidimensionali multistrato realizzati per le indagini sulla laguna di Venezia nella configurazione attuale (a) e in quella esistente al tempo del Dénaix (b).

Volgendo l'analisi allo studio del comportamento della laguna centro-settentrionale, dove gli attuali apporti di acqua dolce immessi sono più importanti, si sono considerate per i diversi corsi d'acqua che ancora vi sfociano portate costanti, tipiche del loro regime normale, e precisamente: 2.5 m³/s per il Bondante, 7.5 m³/s per il Naviglio Brenta a Fusina, 1.3 m³/s per l'Osellino, 3.0 m³/s per il Marzenego, 7.7 m³/s per il Dese, 4.3 m³/s per lo Zero, 5.0 m³/s per il Silone, per un valore complessivo di 31,3 m³/s. Quanto alle acque lagunari, considerate le finalità puramente esemplificative dell'analisi, si è assunta come condizione iniziale una salinità uniformemente distribuita su tutta la laguna pari al 20 ‰.

I risultati del calcolo sono di un qualche interesse. Innanzitutto il modello sembra essere in grado di cogliere i caratteri più significativi del moto evidenziati dalle due campagne di misura sulle quali ci si è brevemente soffermati. Lungo la direttrice foce Dese-canale di Burano-canale di S. Felice, la corrente si presenta stratificata, generando nella fase crescente di marea

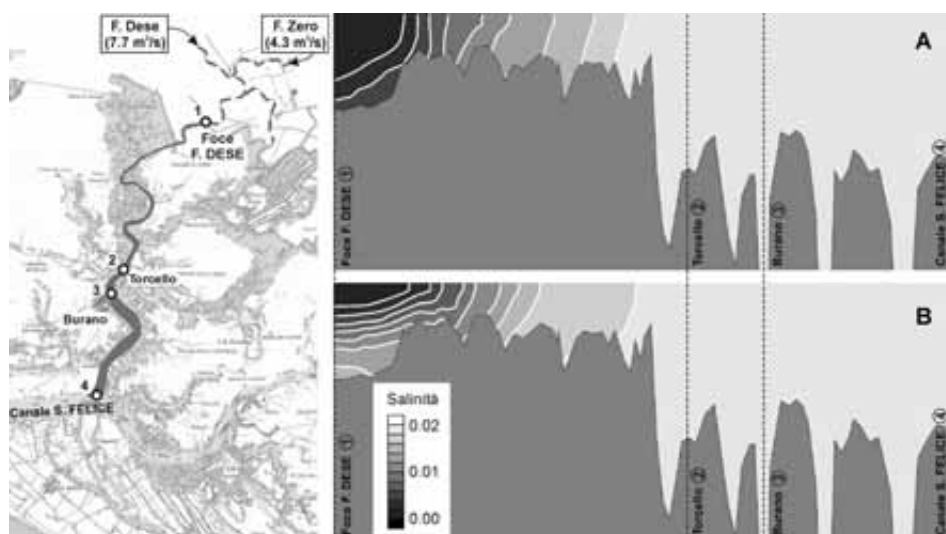


Fig. 10 – Distribuzione istantanea della salinità (valori espressi in ‰) lungo la direttrice foce Dese-canal di Burano-canal di S. Felice calcolata con il modello in fase di marea crescente (A) e in fase di marea calante (B).

un sistema di fronti sub-verticali (Fig. 10A), simili nella struttura e nell'andamento a quelli rilevati sperimentalmente (Fig. 4). Una diversa struttura del campo di moto si riscontra in fase di marea discendente (Fig. 10B), quando la corrente in uscita dalla foce del Dese, pur conservandosi stratificata, tende a generare un sistema di fronti con andamento sub-orizzontale, del tutto simile a quello delle misure (Fig. 5): l'acqua dolce occupa gli strati più superficiali e scivola verso laguna al di sopra di strati con maggiore salinità che interessano la parte bassa della foce stessa. Appena evidenziato dalle simulazioni numeriche è, invece, il fenomeno per cui nelle numerose fosse del profilo di fondo della direttrice considerata permangono a lungo nel tempo acque con maggiore salinità, caratterizzate da ridotti scambi di portata con gli strati superiori.

L'inadeguatezza del modello rispetto a queste particolarità sperimentali del moto è verosimilmente riconducibile sia al numero ridotto di strati con cui si è schematizzata in direzione verticale la colonna d'acqua (solo 10 strati nelle simulazioni condotte) sia alle caratteristiche delle forzanti esterne (portata immessa, onda di marea), inevitabilmente diverse da quelle agenti nel periodo delle misure cui si fa riferimento, sia, infine, alla non corretta simulazione matematica dei meccanismi di "entrainment" fra strato e strato.

Significativamente riprodotta dalle simulazioni numeriche è, infine, la ridotta estensione delle superfici lagunari attualmente interessate da una apprezzabile variazione della salinità. Se si esamina la distribuzione della salinità nello strato più superficiale della colonna d'acqua (dello spessore

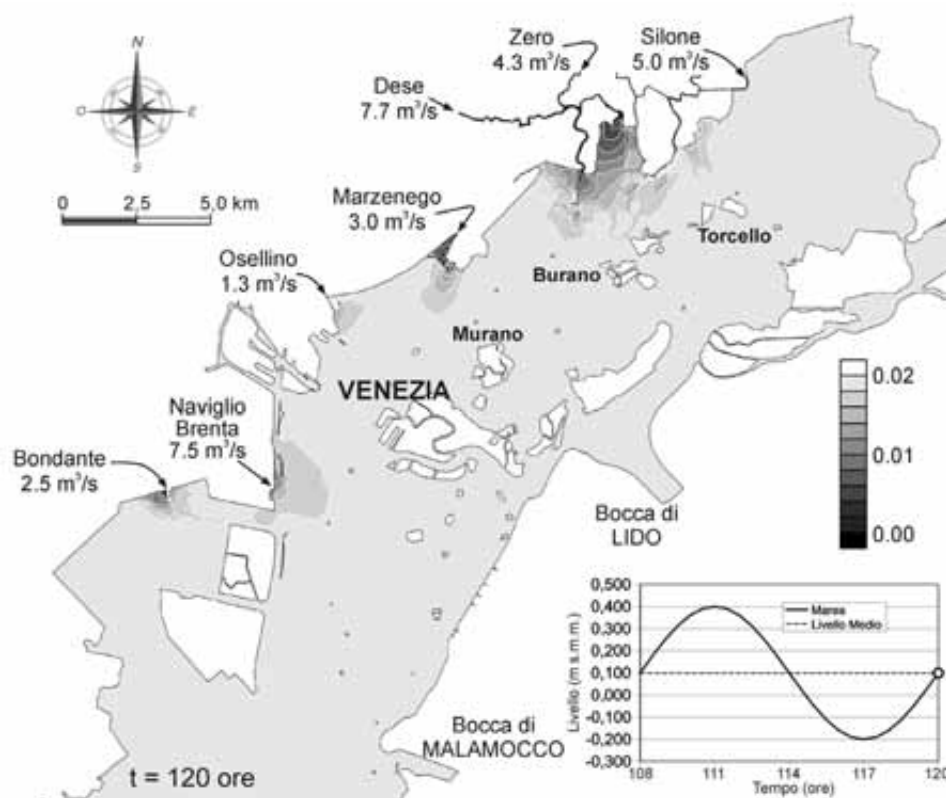


Fig. 11 – Distribuzione spaziale della salinità (valori espressi in ‰) dello strato d’acqua superficiale dopo 10 cicli di marea a partire dall’istante iniziale con portate di acqua dolce immesse pari all’attuale valore medio annuale.

di circa 40 cm), gli effetti dovuti all’introduzione di acqua dolce restano sostanzialmente confinati in un intorno delle foci, a conferma di un deciso cambiamento delle condizioni rispetto a quelle di un lontano passato, quando uno dei problemi da risolvere per la laguna, accanto a quello degli interramenti, era sicuramente l’eccessiva dolcificazione delle acque intorno agli antichi centri storici e alla stessa Venezia. Dopo numerosi cicli di marea, l’espansione in senso orizzontale delle acque dolci attualmente introdotte dai fiumi non interessa, secondo le simulazioni numeriche, né le isole della laguna superiore (Burano, Torcello, Mazzorbo), né tanto meno Venezia, dove, a conferma della generale marinizzazione delle acque in quasi tutta la laguna, non si riscontra una qualche significativa riduzione della salinità negli specchi d’acqua circostanti (Fig. 11).

I risultati forniti dalla modellazione matematica per l’attuale configurazione della laguna, ancorché gravati dai limiti che la mancanza di una vera e propria taratura dello schema di calcolo comporta, sembrano ragionevoli. È dimostrata in particolare la possibilità di cogliere con il modello

predisposto i caratteri essenziali del campo di moto in una laguna soggetta a introduzioni di acque dolci e di confrontare tra loro configurazioni diverse della laguna stessa o di valutare, per la medesima configurazione, gli effetti di una modificazione delle forzanti esterne.

Partendo da questi presupposti si è preliminarmente esaminato quale poteva essere il comportamento della laguna prima della diversione del Brenta e dell'estromissione del Sile, quando dai due fiumi erano immesse apprezzabili portate di acqua dolce. Non essendo noti i fondali della laguna all'epoca di quegli interventi, se si escludono alcune sezioni particolari dei principali canali interessati dalla navigazione (Zendrini 1811), si è ritenuto che si potesse far riferimento, almeno per un primo inquadramento del problema, alla configurazione della laguna ottocentesca ricostruita partendo per i canali dal rilievo del Dénaix (1811) e per i bassifondi e per le barene dalle quote del rilievo del 1901, opportunamente corrette per tener conto degli effetti della sommersione naturale intervenuta nei secoli precedenti.

Mantenendo invariate la marea e le portate introdotte dai corsi d'acqua minori ai limiti della conterminazione, si sono modificate le sole portate del Naviglio Brenta a Fusina e del Sile recapitate in laguna attraverso il canale Silone e le foci ad esso collegate, innalzandole rispettivamente a 40 m³/s e a 55 m³/s. Tali valori corrispondono alle attuali portate medie annuali dei due fiumi a Limena poco a monte di Padova, nel caso del Brenta, e a Casier, non lontano dalla laguna nel caso del Sile. Si tratta di portate che con buona approssimazione si possono ritenere indicative anche delle condizioni che si presentavano nei due fiumi prima degli interventi attuati dai Veneziani.

Le nuove ipotesi comportano, secondo le simulazioni numeriche, un radicale cambiamento delle caratteristiche del campo di moto in laguna in prossimità delle foci dei due fiumi. Le portate del Sile, trasportate e disperse dall'alternarsi delle maree, si diffondono su ampie superfici, spingendosi ben lontano dai loro punti di recapito in laguna, interessando aree molto più estese di quelle attuali. Lo strato superficiale, occupato da acque fortemente dolcificate, investe in pieno i bassi fondi circostanti le isole di Burano, Torcello e Mazzorbo (Fig. 12), modificandone la condizione generale. Nella situazione risultante dal calcolo trovano ampia spiegazione le difficoltà di ordine igienico-sanitario che nel lontano passato si determinarono per quanti vivevano negli antichi insediamenti della laguna superiore, alcuni dei quali, come si è accennato, furono temporaneamente abbandonati dai loro abitanti.

Di non minore impatto sono le variazioni che si osservano intorno a Venezia, determinate in questo caso dalle maggiori portate di acqua dolce rilasciate dal Brenta a Fusina. L'alternarsi delle maree fa espandere progressivamente le acque introdotte dal fiume negli specchi d'acqua lagunari

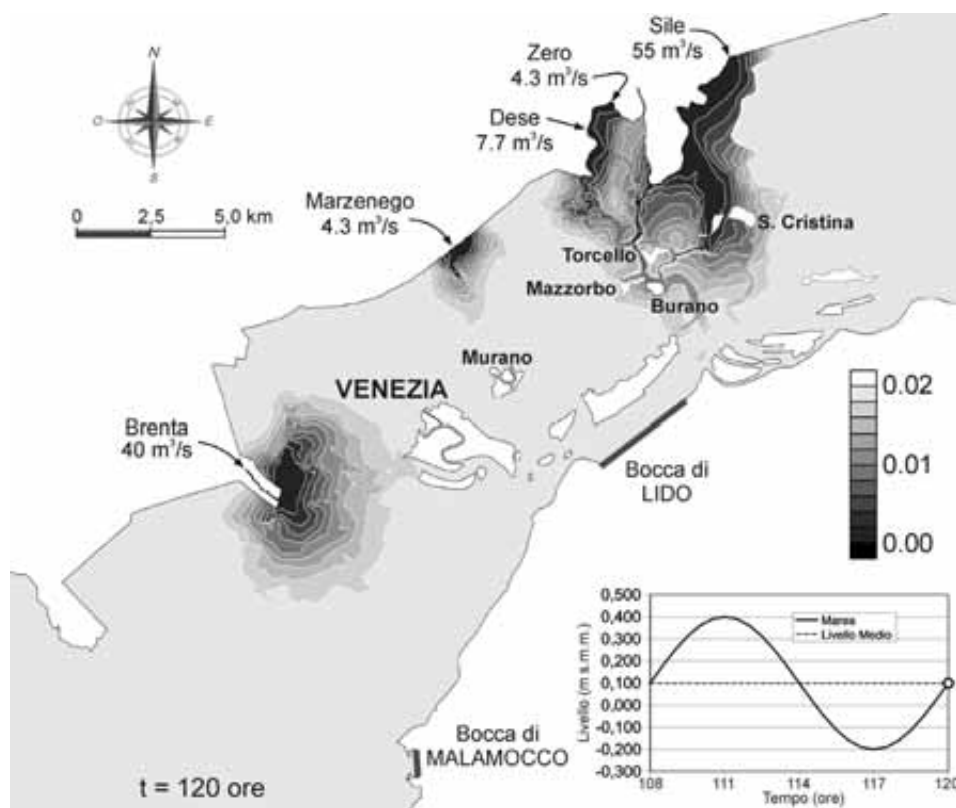


Fig. 12 – Distribuzione spaziale della salinità (valori espressi in ‰) dello strato d’acqua superficiale dopo 10 cicli di marea dall’istante iniziale, nell’ipotesi di incrementare le portate di acqua dolce immesse dal Sile e dal Naviglio Brenta fino ai valori medi annuali preesistenti all’estromissione dei due fiumi.

antistanti. L’acqua dolce, mescolandosi con le acque più salate residenti in laguna, si diffonde rapidamente fino a interessare zone molto prossime alla città di Venezia (Fig. 12). Lo stato di dolciificazione delle acque intorno alla città diventa ovviamente più spinto, se si incrementano le portate rilasciate a Fusina dal fiume.

Il problematico rapporto fiumi-laguna vissuto dai Veneziani fino allo spostamento della foce del Brenta a Brondolo è efficacemente testimoniato dal calcolo, se si analizza quanto accade all’interno della laguna partendo dallo stato finale della simulazione precedente (Fig. 12) e immettendo a Fusina un idrogramma di piena della durata di circa 40 ore con una portata al colmo di 1000 m³/s.

Sempre con riferimento allo strato più superficiale della colonna d’acqua, dopo 16 cicli di marea dall’istante iniziale l’espansione delle acque dolci interessa quasi tutta la laguna centrale nella parte compresa tra la bocca di S. Nicolò e la bocca di Malamocco. Anche la città di Venezia è piena-

mente coinvolta dal trasporto e dalla dispersione delle portate introdotte dal fiume, che praticamente la avvolgono, spingendosi verso nord fino all'isola di Murano (Fig. 13).

Per i riflessi su Venezia e sugli specchi d'acqua circostanti il commento dei risultati ottenuti è quasi banale. Trovano innanzitutto ampia giustificazione dall'esame dei campi di moto forniti dalla simulazione matematica gli sforzi secolari della Repubblica per estromettere il Brenta dalla laguna. In condizioni di regime normale delle portate introdotte sono molto estese di fronte a Fusina le superfici fortemente dolcificate dalle acque del fiume (Fig. 12). Di qui la progressiva e preoccupante estensione del canneto, spinto sul finire del XV secolo fino a lambire l'abitato di Venezia, della quale si trova notizia in molti documenti del tempo e sono testimonianza indiretta alcuni toponimi lagunari: basti fra tutti ricordare quello di *Cannaregio*, che è uno dei sestieri di Venezia. All'epoca il fenomeno era così preoccupante che ripetutamente il governo di Venezia prese specifiche delibere per monitorarlo, ordinando ai propri savi sopra le acque che fossero infissi dei pali ai limiti del canneto per poterne misurare periodicamente e senza incertezze o errori di valutazione l'eventuale avanzamento.

Poiché le acque dolci di origine fluviale in condizioni di piena sono cariche di sedimenti, i risultati delle simulazioni numeriche sulla loro espansione in laguna sono in qualche modo indicativi anche di quanto potessero essere estese le zone nelle quali si risentivano pesantemente gli effetti degli interramenti. Pur sviluppandosi con modalità diverse rispetto a quelle che controllano il trasporto e la dispersione delle acque dolci, per il ruolo non trascurabile esercitato dalla gravità sui sedimenti trasportati in sospensione dalla corrente, secondo il calcolo il materiale più fine aveva ampie possibilità di giungere fino a Venezia e oltre, interrando gli specchi d'acqua adiacenti alla città e i canali che la circondavano (Fig. 13).

Alla luce di questi risultati, l'idea di Alvise Cornaro, che erroneamente attribuiva alle correnti indotte dal Brenta in laguna un ruolo determinante per la vivificazione e il ricambio delle sue acque, appare in parte comprensibile. Gli effetti macroscopici e inconfutabili riconducibili ai fiumi che sfociavano in laguna, osservati con riferimento all'evoluzione morfologica della laguna stessa e soprattutto alle condizioni che si determinavano durante gli stati di piena pronunciati del Brenta, erano confusi dal celebre idraulico con l'intensità delle cause che li producevano. E per questo, forse, Alvise Cornaro fu portato ad attribuire ad essi in generale, e al Brenta in particolare, un ruolo importante e in qualche modo insostituibile per il buon regime delle correnti in laguna, diversamente da quanto aveva acutamente intuito Cristoforo Sabbadino. Egli, paragonando le portate del fiume a quelle introdotte dal mare attraverso le bocche, le definiva con arguzia come "*una pulze a par di un elefante*", inessenziali quindi per assumere

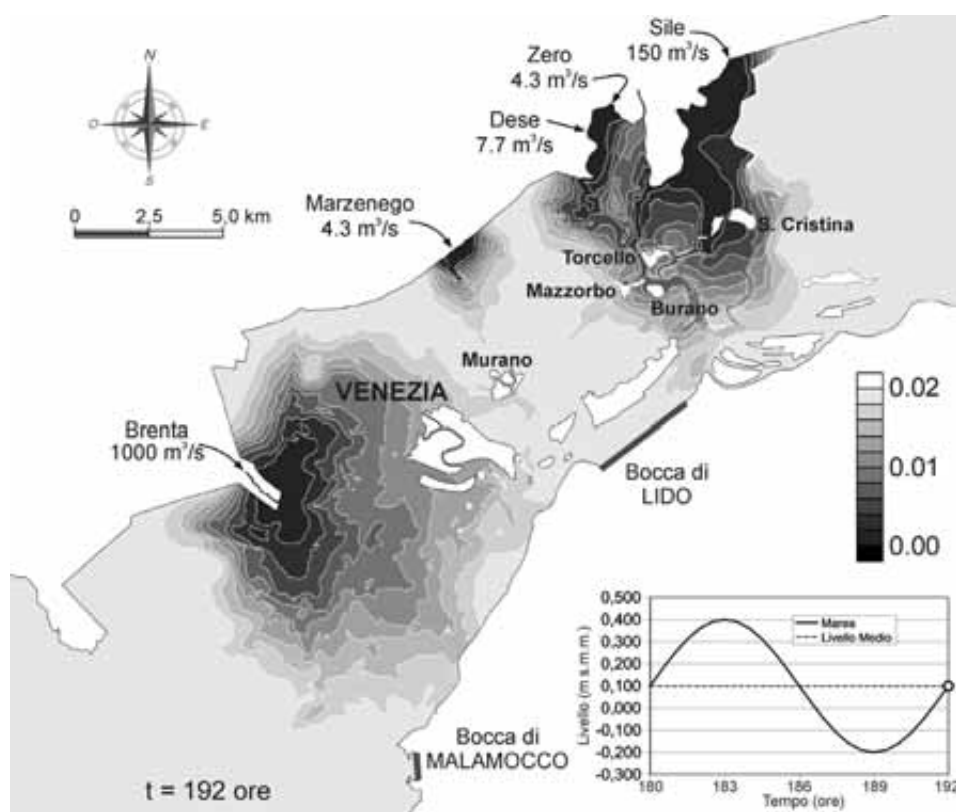


Fig. 13 – Distribuzione spaziale della salinità (valori espressi in ‰) dello strato d’acqua superficiale dopo 16 cicli di marea dall’istante iniziale, nell’ipotesi di incrementare le portate di acqua dolce immesse dal Sile e dal Naviglio Brenta fino ai valori di piena (150 m³/s per il Sile e 1000 m³/s per il Naviglio Brenta).

un qualche ruolo significativo nell’azione vivificatrice delle correnti e nel ricambio delle acque della laguna.

Parimenti evidenti, sulla base dei risultati delle simulazioni condotte, i motivi della scarsa efficacia dell’argine di intestadura e in prosecuzione a questo del parador, costruito nella seconda metà del XVI secolo con l’obiettivo di difendere Venezia dagli interramenti e dalla eccessiva dolciificazione delle acque a opera dei fiumi.

Modificato il reticolo di calcolo per introdurre le due strutture e inserito a ridosso dell’argine di intestadura il canale scavato per convogliare a Bocca di Lama le acque del Brenta e degli altri fiumi minori che sfociavano di fronte a Venezia, mantenendo invariate tutte le altre condizioni, il provvedimento risulta efficace solamente per le portate minori (40 m³/s) tra quelle considerate. In condizioni di piena, invece, le acque, contenute inizialmente dall’argine di intestadura e guidate in prosecuzione dal parador, aggirano la testata di quest’ultima opera, espandendosi egualmente verso Venezia, sen-

za che si riscontrino in pratica modificazioni significative della salinità dello strato più superficiale, rispetto alla situazione in cui l'opera in questione non è presente.

Nell'analizzare questi risultati non si devono dimenticare due circostanze importanti, che riducono fino ad annullarla l'efficacia dell'argine di intestadura e del parador, anche per valori di portata normali. Innanzitutto la relativa modestia dell'altezza dell'onda di marea considerata (0.30 m s.m.m.), che consente alle acque del Brenta di essere indirizzate dall'argine di intestadura verso Bocca Lama e di fluire senza sormontare la difesa per effetto del rigurgito. Ciò non accadrebbe se si analizzasse il comportamento delle opere con livelli di marea al colmo superiori, tipici delle condizioni di "acqua alta", alle quali anche in quei tempi la laguna era esposta. In secondo luogo l'inadeguatezza tecnica della soluzione individuata rispetto agli inevitabili fenomeni di interrimento ai quali il canale retrostante l'argine di intestadura era esposto. Prova ne sia che fin da subito nel canale in questione, si produssero vistosi fenomeni di deposito dei sedimenti, che ne portarono rapidamente i suoi fondali verso condizioni inadeguate rispetto ai problemi che si volevano fronteggiare.

Le difficoltà accennate sul corretto funzionamento dell'argine di intestadura sono del resto storicamente documentate, essendo ripetutamente richiamate nelle numerose delibere assunte dalla Repubblica prima dell'allontanamento a Conche della foce del Brenta-Bacchiglione. Diversamente da oggi, si tratta di problemi che non erano facilmente inquadrabili alla luce delle conoscenze di allora nel campo dell'idraulica. Gli interrimenti che si manifestavano lungo il canale retrostante l'argine di intestadura ne riducevano fatalmente le sezioni e ne innalzavano, a parità di altre condizioni, i livelli idrometrici, producendo sormonti locali e la conseguente possibile formazione di brecce nella struttura arginale, nonostante le protezioni realizzate a difesa dell'opera.

Sempre con riferimento all'argine di intestadura, va ricordato, infine, che ai problemi legati alla sua inadeguatezza funzionale intrinseca, si aggiunsero nel XIV e XV secolo ripetuti interventi, autorizzati e non, con l'apertura e la richiusura in più punti lungo l'argine stesso di numerose bocche, attraverso le quali parte delle acque deviate da Fusina ritornavano ad essere direttamente rilasciate verso la laguna prima di giungere a Bocca di Lama. Testimonianza inequivocabile questa delle molte incertezze che gravarono sulla validità del provvedimento adottato per difendere gli specchi d'acqua intorno a Venezia dagli interrimenti e, più in generale, dalle acque dei fiumi.

5. INCREMENTO DELLE PORTATE DI ACQUA DOLCE INTRODOTTE IN LAGUNA

Le condizioni ambientali della laguna e la qualità delle sue acque, sono state radicalmente modificate dall'allontanamento dei fiumi, perseguito con determinazione dai Veneziani pur tra molti contrasti. Quei provvedimenti, decisivi per i fenomeni che in quei secoli si dovettero fronteggiare, valutati alla luce dei problemi attuali della laguna sono stati, tuttavia, troppo drastici per gli effetti sul lungo periodo e sono da considerare senza dubbio all'origine dell'evoluzione in senso negativo che da alcuni decenni ormai travolge il delicato sistema lagunare.

Tralasciando la questione, grave e non più differibile, di reintrodurre nuovamente in laguna sedimenti di origine fluviale in misura sufficiente per mitigare l'intensità dei processi erosivi in atto, l'intervento sul quale si vuole richiamare l'attenzione, prendendo lo spunto anche dai risultati delle simulazioni numeriche qui illustrate, è meno importante e in qualche modo complementare rispetto a quel provvedimento, ma non per questo da sottovalutare.

Si tratta di considerare la possibilità e l'utilità di incrementare gli apporti di acqua dolce al bacino lagunare, in modo da ricreare in alcune zone poste ai margini della laguna quell'ambiente che, salvo aree di modestissima estensione, è quasi scomparso per la pressoché totale marinizzazione delle acque.

Anche se la proposta non sembra essere accolta favorevolmente dagli organi competenti, come del resto quella di riportare in laguna durante gli stati di piena sedimenti del Brenta attraverso il completamento dell'idrovia Padova-Venezia (D'Alpaos 2006), nonostante entrambe rivestano quei caratteri di gradualità, sperimentabilità e reversibilità che la Legge Speciale su Venezia indica per i provvedimenti rivolti alla salvaguardia della laguna, può valere egualmente la pena soffermarsi su di essa, illustrando gli aspetti positivi dell'intervento, la sua compatibilità rispetto alle motivazioni che portarono i Veneziani a estromettere dalla laguna la quasi totalità delle acque dolci e gli effetti attesi dal punto di vista ambientale.

Una prima significativa sperimentazione in questa direzione potrebbe riguardare la laguna settentrionale, che dal punto di vista morfologico è la parte meglio conservata del sistema lagunare e potrebbe trarre dal provvedimento benefici di diverso ordine.

Rispettando la struttura idrografica attuale dei fiumi che ancora confluiscono in laguna, i punti nei quali recapitare al bacino lagunare maggiori portate di acqua dolce potrebbero essere da una parte la foce del Dese-Zero, dall'altra le foci del Silone e dei canali ad esso collegati, alle quali pervengono le acque del Sile attraverso un'opera di presidio, detta Businello, che

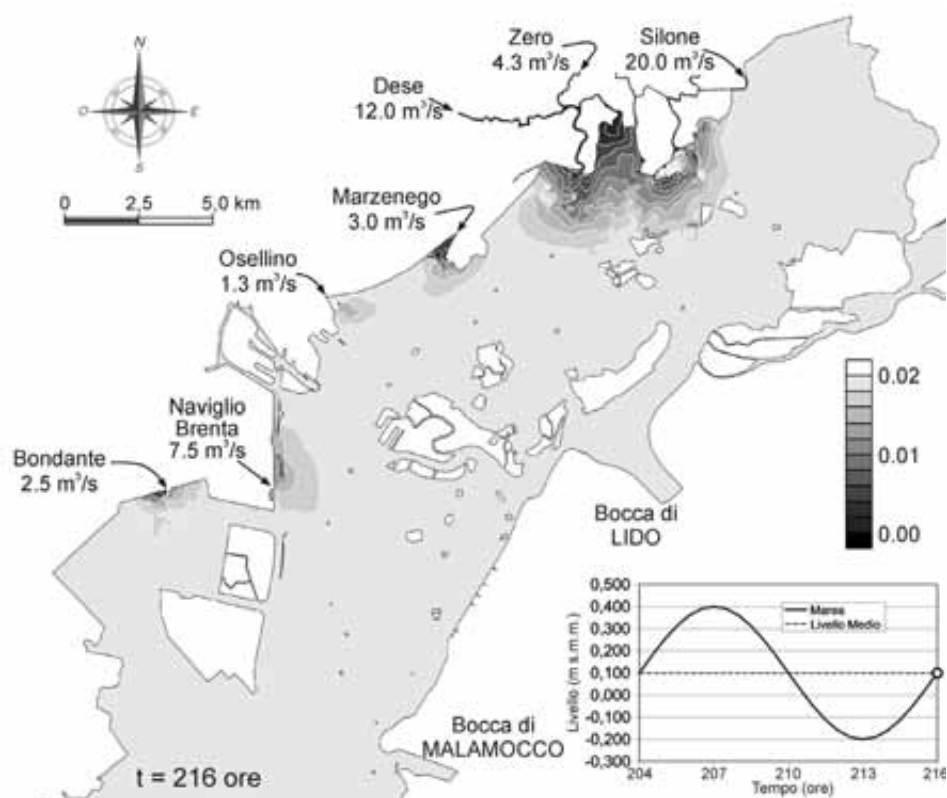


Fig. 14 – Distribuzione spaziale della salinità dello strato d'acqua superficiale dopo 18 cicli di marea dall'istante iniziale, nell'ipotesi di incrementare le portate di acqua dolce immesse dal Sile a 20 m³/s e del Dese 12 m³/s.

ne consente il controllo. Per non penalizzare eccessivamente le concessioni irrigue in atto, rilasciate a suo tempo senza minimamente considerare gli eventuali problemi ambientali che sarebbero potuti derivare alla laguna, a titolo esemplificativo si è ipotizzato di incrementare rispetto alla condizione attuale di poco più di 5 m³/s le portate del Dese-Zero e di circa 15 m³/s le portate derivate dal Sile, in modo da estendere significativamente, in prossimità delle foci dei due fiumi, gli specchi d'acqua interessati dalla presenza di acque con salinità più ridotta.

Ferme restando le altre forzanti esterne (marea alle bocche e portate immesse dagli altri corsi d'acqua), partendo dalla condizione ottenuta dopo 10 cicli di marea durante i quali sono immesse in laguna le attuali portate di acqua dolce (Fig. 11), nella Fig. 14 è illustrata la distribuzione della salinità nello strato superficiale della colonna d'acqua dopo ulteriori 8 cicli di marea, durante i quali le portate di acqua dolce del Dese-Zero e del Silone sono incrementate nella misura sopra indicata. Orientativamente, secondo il calcolo, l'estensione degli specchi d'acqua lagunari interessati dalla mag-

giore introduzione di acque dolci risulta all'incirca raddoppiata. I bassifondi intorno alle isole di Burano e di Torcello sono appena lambiti da acque con salinità più ridotta rispetto a quella attuale, ma si mantengono in condizioni ben lontane da quelle che si manifestavano prima dell'estromissione dei fiumi da parte della Repubblica (Fig. 13), quando l'eccessiva dolciificazione delle acque aveva comportato seri problemi di ordine igienico-sanitario nella laguna superiore.

Dal punto di vista ambientale la maggiore estensione degli specchi d'acqua dolciificati favorirebbe, come prima conseguenza, una potenziale progressione del canneto rispetto alla situazione attuale, che vede questo tipo di vegetazione presente solo in aree marginali, scarsamente significative.

Una più estesa presenza del canneto comporterebbe, inoltre, un apprezzabile incremento della produzione di suolo organico, che andrebbe ad aggiungersi con effetti positivi agli eventuali apporti di sedimenti provenienti dall'esterno della laguna. Al riguardo si segnala che, secondo recenti indagini, in un ambiente pressoché totalmente marinizzato la vegetazione che è tipica delle barene comporta una produzione di suolo organico nella misura di 100, a fronte di un consumo di sostanze minerali pari a 60. Nel caso, invece, di ambienti dolciificati che favoriscono la presenza del canneto, il rendimento del ciclo vegetativo in termini di produzione di suolo è decisamente più elevato. Si stima, infatti, una produzione di suolo pari a 100, con un consumo di sostanze minerali di appena 40.

Trovano spiegazione in questi dati i problemi del lontano passato, quando estese superfici della laguna idraulicamente lontane dalle bocche erano dominate dagli effetti dovuti all'introduzione di cospicue portate fluviali e dai processi della loro dispersione nelle acque più salate residenti in laguna, pur essendo le portate dei fiumi coinvolti decisamente inferiori a quelle introdotte dall'alternarsi delle maree negli stessi specchi d'acqua. È probabile, quindi, che, accanto ai problemi igienico-sanitari ripetutamente richiamati in molti documenti storici, all'epoca delle diversioni fosse soprattutto l'avanzamento del canneto a richiamare l'attenzione del governo veneziano e a destare le maggiori preoccupazioni. Il fenomeno dell'"impaludamento" conseguente all'abbondante presenza di acque dolciificate giunse, infatti, a minacciare da vicino alcuni dei più importanti insediamenti storici della laguna e la stessa Venezia.

Sempre con riferimento ai problemi attuali di conservazione di molte delle residue forme lagunari non possono essere ignorati da una parte il ruolo attivo esercitato dal canneto nella difesa delle forme stesse rispetto ai processi erosivi che si sviluppano in senso orizzontale, dall'altra la sua capacità di catturare i sedimenti fin rimessi in sospensione dal moto ondoso e trasportati dalle correnti di marea, favorendone la rideposizione sul fondo e sottraendoli ai meccanismi che, in caso contrario, li porterebbero a fluire

verso i canali e ad essere inesorabilmente convogliati verso le bocche ed espulsi in mare per frazioni significative.

L'efficacia del canneto come naturale dissipatore dell'energia trasportata dalle onde, siano esse generate dal vento o dai natanti in navigazione, è dimostrata dall'osservazione sperimentale, che evidenzia la sostanziale stabilità delle sponde dei canali lagunari presidiate da questo tipo di vegetazione, anche nei casi in cui esse siano interessate da un moto ondoso incidente particolarmente intenso.

Si tratta di un risultato confermato da molte indagini di laboratorio, non ultime quelle recentemente condotte presso il Dipartimento IMAGE dell'Università di Padova nell'ambito di una tesi di laurea (Visentin 2007), che confermano l'efficacia della vegetazione come smorzatore del moto ondoso, nello specifico di una vegetazione simulata con elementi in materiale plastico molto flessibili distribuiti con diversa densità sul fondo di un canale ed investiti da un treno di onde che si propaga su differenti valori del tirante d'acqua indisturbato. A parità di altre condizioni, è dimostrato in particolare dai risultati delle indagini sperimentali che, quando la vegetazione non è sommersa da tiranti d'acqua indisturbati eccessivamente superiori all'altezza della vegetazione, con le maggiori densità sperimentate è sufficiente un tratto vegetato di lunghezza pari a 2-3 volte la lunghezza d'onda per ottenere il quasi totale smorzamento del moto ondoso incidente.

Nelle parti marginali della laguna conseguentemente, dove le forme residue lagunari sono ancora presenti, il canneto, estendendosi per l'aumentata introduzione di acque dolci, potrebbero fungere da efficace elemento di difesa delle forme stesse e favorire la loro ricostituzione.

In questa prospettiva di introduzione di nuove acque dolci in laguna, assumerebbe un significato non marginale l'idea di riaprire alcune valli da pesca alla libera espansione delle maree. Non con l'obiettivo tecnicamente inconsistente, indicato dalla Legge Speciale su Venezia e purtroppo supinamente accettato da coloro che operano sul sistema lagunare, di contribuire all'abbattimento dei colmi di marea all'interno della laguna, ma, in una progettazione di ben più ampio respiro, con le finalità di ricreare ai suoi margini, o almeno in una sua parte, quell'ambiente di transizione che un tempo esisteva e che si è perso, a causa di processi naturali e degli interventi attuati dall'uomo per adattare alle sue particolari necessità l'evoluzione della laguna stessa.

L'idea di associare a una maggiore introduzione di acque dolci l'eventuale riapertura di almeno alcune delle valli da pesca esistenti potrebbe essere facilmente perseguita in modo sperimentale, flessibile e reversibile, come previsto dalla legislazione speciale su Venezia, sia nella laguna superiore sia nella laguna centro-meridionale, in questo ultimo caso deviandovi una frazione più cospicua delle portate fluviali raccolte dal Taglio di Mirano, prima, e dal Taglio Novissimo del Brenta, poi.

Dal provvedimento e da quello decisamente più importante di riportare in laguna acque fluviali cariche di sedimenti potrebbe trarre vantaggio l'intero sistema lagunare, che vedrebbe mitigati i fenomeni erosivi ora in atto, che lo stanno inesorabilmente trasformando in un braccio di mare, facendogli perdere quelle che erano state le sue originali caratteristiche.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'idea qui brevemente illustrata, considerando solo alcuni dei molteplici aspetti legati ad una eventuale reintroduzione di più consistenti portate fluviali in laguna, ancorché bisognosa di ulteriori approfondimenti e di una più accurata messa a punto della modellazione matematica utilizzata per indagare i fenomeni che si determinano nel contatto tra acque dolci e acque salate, potrebbe contribuire a mitigare i drammatici processi erosivi che il sistema lagunare veneziano sta sperimentando ormai da molti decenni. Se perseguita assieme ad altrettanto auspicabili provvedimenti di reintroduzione in laguna di sedimenti di origine fluviale, essa potrebbe contribuire a salvaguardare le residue forme lagunari che, in caso contrario, sarebbero destinate a scomparire totalmente, banalizzando un ambiente che era e dovrebbe restare unico nel suo genere.

Allo stato attuale, tuttavia, la prospettiva di ridare centralità alla salvaguardia della laguna nel suo insieme, come per molti secoli accadde al tempo della Repubblica, non sembra concretizzabile in tempi brevi, essendo i gravi problemi dell'ambiente lagunare, se non ignorati, posti decisamente in subordine rispetto alla questione della difesa della città di Venezia dalle "acque alte", verso la quale molti hanno interesse di attirare l'attenzione dell'opinione pubblica, non ultimo per evidenti ragioni di convenienza economica dei gruppi finanziari impegnati nella realizzazione delle opere alle bocche di porto.

Forse per questo motivo i provvedimenti orientati alla salvaguardia complessiva della laguna, e tra questi quelli di reintrodurvi importanti apporti di sedimenti di origine fluviale e di immettere, come un tempo, ai margini del bacino lagunare portate di acqua dolce decisamente superiori a quelle attuali, non trovano grande sostegno da parte di coloro ai quali è affidata la realizzazione delle barriere mobili destinate a separare la laguna stessa dal mare in caso di necessità. Anzi, tali provvedimenti sono spesso contrastati con frettolose quanto immotivate critiche.

Ciononostante per quanti si occupano di ricerca in campo lagunare, e nello specifico di ricerca applicata alla soluzione dei problemi che affliggono la laguna di Venezia, non può venir meno l'impegno per tentare di far crescere l'interesse verso idee che al momento sembrano non inquadarsi

tra quelle condivise dagli organi preposti al controllo degli interventi. Tanto più se queste idee sono sostenibili alla luce delle moderne conoscenze dell'idraulica dei bacini a marea e, per le loro caratteristiche peculiari, possono trovare conforto in una sperimentazione attuabile sul campo senza eccessivi oneri finanziari, in modo da fornire ampie garanzie di tutela dell'ambiente sul quale si intende operare, permettendo in qualsiasi momento di ritornare allo stato iniziale, qualora dovessero emergere impreviste evoluzioni in senso negativo dell'ambiente stesso.

Così è per la reintroduzione di acque dolci in laguna qui prospettata, proposta alla quale alcuni guardano con malcelata sufficienza, ma che sicuramente va nella direzione di favorire il ripristino nel sistema lagunare veneziano di condizioni non nuove, interessanti per la salvaguardia del suo ambiente.

BIBLIOGRAFIA

- BLONDEAUX P., DE BERNARDINIS B., SEMINARA G., 1982. *Correnti di marea in prossimità di imboccature e loro influenza sul ricambio lagunare*. Atti del XVIII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bologna, Italy, 21-23 Sept.
- CARNIELLO L., DEFINA A., D'ALPAOS L., 2009. *Morphological evolution of the Venice lagoon: evidence from the past and trend for the future*, J. Geophys. Res. 114, F04002, doi: 10.1029/2008 JF001157.
- D'ALPAOS L., DEFINA A., 1993. *Venice Lagoon Hydrodynamic Simulation by Coupling 2D and 1D Finite Elements Models*. VII International Conference on Finite Elements in Fluids, Barcelona.
- D'ALPAOS L., DEFINA A., MATTICCHIO B., 1996. *A multi-layer model for shallow water flows and density currents applied to a lagoon in the Po river delta*, "11th Int. Conf. on Computational Methods in Water Resources", Cancun, Mexico. Ed. A.A. Aldama, J. Aparicio, C.A. Brebbia, W.G. Gray, I. Herrera, G.F. Pinder, pubblicato da Computational Mechanics Publications, Southampton, Boston.
- D'ALPAOS L. 2004. *Conoscere il comportamento idrodinamico della laguna del passato per progettare la laguna del futuro*, Atti dell'Istituto Veneto di SS.LL. AA., Tomo CLXII (2003-2004) Classe di scienze fisiche, matematiche e naturali, Venezia.
- D'ALPAOS L., 2006. I rischi di inondazione nella Provincia di Padova. Padova e il suo territorio. Anno XX, 119.
- D'ALPAOS L., 2009. *Fatti e misfatti di idrodinamica lagunare - Breve storia idraulica della laguna di Venezia*. Istituto Veneto di SS.LL.AA. In corso di stampa.
- DEFINA A., CARNIELLO L., FAGHERAZZI S., D'ALPAOS L., 2007. *Self organization of shallow basins in tidal flats and salt marshes*, J. Geophys. Res. 112 F 03001 doi: 10.1029/2006 JF000550.
- DEFINA A., 2000. *Two-dimensional shallow flow equations for partially dry areas*, Water Resources Research 36, (11): 3251-3264.
- DENAIX, A., 1811. *Carta Topografica Idrografica Militare della Laguna di Venezia e del Littorale compreso tra l'Adige e la Piave eseguita sotto i Ministeri de' Signori Generali Divisionarj Conti Caffarelli e Fontanelli negli anni 1809-10 e 11*. Biblioteca Querini Stampalia - Castello 5252, 30122 Venezia, Italy.
- FAGHERAZZI S., CARNIELLO L., D'ALPAOS L., DEFINA A., 2006. *Critical bifurcation of shallow microtidal landforms in tidal flats and salt marshes*, PNAS 103 (22): 8337-8341, doi: 10.1073/pnas. 0508379103.
- IMBERGER J., 1991. *Dynamics of the Venice Lagoon*. CWR, University of Western Australia.
- MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI E MINISTERO DELL'AGRICOLTURA E FORESTE, 1937. *Bonifica e Vallicoltura nei riguardi idraulici-igienici ed economici*, Roma.
- TAMBRONI N., SEMINARA G., 2006. *Are inlets responsible for the morphological degradation of Venice Lagoon?*, J. Geophys. Res. 111, F03013, doi: 10.1029/2005 JF000334.

VISENTIN E., 2007. *Effetti della vegetazione sull'attenuazione del moto ondoso*.
Tesi di laurea, Dipartimento IMAGE dell'Università di Padova, relatore L.
D'Alpaos.

ZENDRINI B., 1811. *Memorie storiche dello stato antico e moderno delle lagune di Venezia*. Tomo I e II, Tip. del Seminario, Padova.