ALBERTO SCOTTI*

PROGETTAZIONE DELLE OPERE DI DIFESA DALLE ACQUE ALTE · I

PREMESSA

Nella legislazione italiana dei Lavori pubblici è previsto che la progettazione di un'opera venga eseguita in due fasi: il progetto di massima e il progetto esecutivo.

Nel caso di progetti complessi e innovativi e, comunque, quando per l'elevato costo dell'opera si debbano mettere a confronto numerose soluzioni alternative prima di poter prendere decisioni operative, le due fasi progettuali vengono precedute da uno studio di fattibilità, denominato anche progetto preliminare di massima.

L'attività già svolta per la difesa di Venezia e della sua laguna dalle acque alte comprende il progetto preliminare di massima e il progetto di massima.

Il progetto preliminare di massima affronta la scelta della soluzione per la difesa dalle acque alte e dimostra che essa è fattibile, affidabile e rispetta nel migliore dei modi l'ambiente lagunare. Il progetto è stato approvato dal Comitato tecnico del Magistrato alle Acque e dal Comitato dei ministri previsto dalla legge, in base ai pareri espressi dal Consiglio Superiore dei Lavori pubblici, dal Comune di Venezia, dalla Provincia di Venezia, dalla Regione Veneto e dai Ministeri dell'Ambiente, dei Beni ambientali e della Marina mercantile.

Il progetto di massima, che sviluppa il dimensionamento delle opere e degli impianti anche in base alle prescrizioni formulate in sede di approvazione e che contiene la stima dei costi di costruzione, gestione e manutenzione, è stato approvato dal Comitato tecnico del Magistrato alle Acque. A questo Comitato partecipano a pieno titolo anche i rappresentanti del Comune, della Provincia, della Regione, e della Marina mercantile.

La progettazione è stata avviata nel 1986.

In questi sei anni sono stati eseguiti studi sui numerosi problemi della laguna e sono stati messi a punto i modelli matematici e fisici che consentono di riprodurli con un'elevata attendibilità e di valutare gli effetti degli interventi che si intendono realizzare.

Sono state inoltre fornite risposte circostanziate alle innumerevoli prescrizioni formulate dal Consiglio Superiore dei Lavori pubblici nel 1982, quando venne per la prima volta approvata, con prescrizioni, l'idea di realizzare la difesa dalle acque alte mediante opere mobili alle bocche di porto.

Le attività svolte nei primi tre anni di lavoro hanno consentito di selezionare la tipologia di intervento più valida e compatibile con l'ambiente lagunare e

* *Amministratore delegato di Technital, società progettista per conto del Consorzio Venezia Nuova*

con gli altri interventi di salvaguardia (il progetto preliminare di massima).

I tre anni successivi, dal 1989 al 1992, sono stati dedicati allo sviluppo, al livello di progetto di massima, della soluzione indicata nella fase preliminare e al dimensionamento delle strutture e degli impianti.

Le attività svolte in questo periodo hanno anche permesso di mettere in evidenza che i problemi della laguna vanno studiati e risolti in modo unitario per evitare effetti indesiderati e per ottenere risultati migliori nel modo più economico. Proprio per assicurare questa unitarietà di azione, nei sei anni in cui è stato portato avanti il lavoro delle opere mobili, sono state anche sviluppate le progettazioni degli altri interventi che realizzano la salvaguardia di Venezia, dando la precedenza alle opere più tradizionali per la laguna (ricostruzione dei marginamenti, ricostruzione morfologica e difesa dei litorali).

Le attività relative alla sola progettazione delle opere mobili hanno richiesto più di 450.000 ore di ingegneria e sono state svolte con la collaborazione dei principali Istituti universitari nazionali e con la consulenza degli uffici tecnici del Ministero dei Lavori pubblici olandese e di numerosi specialisti inglesi, danesi, olandesi e statunitensi. Ogni consulente, ogni istituto, è stato selezionato tra quelli che nel proprio campo di specializzazione avevano già acquisito un'indiscussa posizione di leader a livello internazionale.

A supporto della progettazione, e per rispondere alle richieste formulate in sede di approvazione degli elaborati progettuali, sono stati eseguiti più di 100 studi dedicati agli approfondimenti di numerosi argomenti: l'idrodinamica, la morfologia della laguna, dei litorali e delle bocche, la qualità delle acque e dei sedimenti, le condizioni meteomarine e meteorologiche, la geotecnica, il comportamento delle opere mobili, la portualità, la pesca.

Questo lavoro è di gran lunga più vasto e meticoloso di quello che viene normalmente eseguito anche per progetti di grandi dimensioni e di grande importanza per un territorio.

Ne sono testimonianza i particolari approfondimenti e le analisi di dettaglio svolte e l'attenzione posta anche su questioni apparentemente di scarso rilievo. Tutto ciò è risultato necessario per la particolarità del caso Venezia, per la fragilità dell'ambiente lagunare e per i valori storici, monumentali e ambientali da preservare.

L'illustrazione di un progetto così ampio, che coinvolge difficili questioni ingegneristiche e altrettanto complesse questioni ambientali economiche e sociali, non può essere sintetizzato in poche pagine.

Si dovrebbero trascurare spiegazioni che è giusto vengano portate a conoscenza di quanti sono interessati alle sorti di Venezia affinché gli stessi possano giudicare in modo autonomo la validità delle scelte e valutare le opinioni e le proposte che spesso vengono presentate dalla stampa e nei convegni nazionali ed internazionali. Nei "Quaderni Trimestrali" l'illustrazione del progetto viene divisa in due parti.

La prima parte, che viene presentata in questo numero, contiene la descrizione del problema e delle attività svolte per giungere alla scelta della soluzione per la difesa dalle acque alte.

La seconda parte conterrà la descrizione degli studi e delle analisi svolte per definire il comportamento e il dimensionamento delle opere mobili e per acquisire certezze sulla loro affidabilità. Inoltre conterrà la descrizione delle opere da realizzare alle bocche lagunari e la previsione dei costi di costruzione, gestione e manutenzione.

DIMENSIONE DEL PROBLEMA DELLE ACQUE ALTE IN LAGUNA

Allagamenti nella storia di Venezia

L'intero territorio della laguna di Venezia è da secoli soggetto agli effetti della subsidenza e dell'eustatismo.

La subsidenza è un processo naturale di compattazione degli strati di terreno alluvionale che determina un lento ma continuo abbassamento dei suoli rispetto al livello del mare.

L'eustatismo è invece un processo di variazione del livello del mare per effetto dei cicli climatici del globo terrestre. Da alcuni secoli questo processo è associato a un naturale aumento della temperatura e a un conseguente aumento del livello del mare.

Dall'inizio del millennio, per effetto della subsidenza e dell'eustatismo, il suolo veneziano ha continuato ad abbassarsi rispetto al livello del mare. Ciò ha determinato un aumento della frequenza degli allagamenti di territori già molto bassi rispetto al livello del mare (fig. 1).

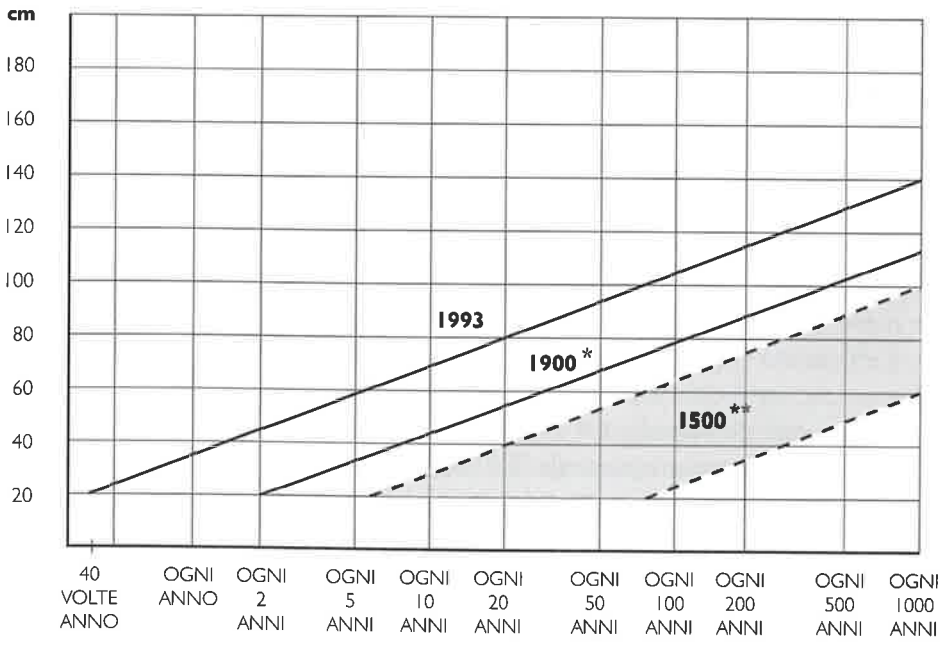


Fig. 1. Frequenza degli allagamenti nel centro storico di Venezia.
Va rilevato che a livelli di marea superiori al metro di 20, 40, 60, e 80 cm corrisponde l'allagamento rispettivamente dell'8%, del 40%, del 65% e dell'80% della superficie di Venezia
**In quest'ultimo secolo la distanza tra la terra emersa e il livello del mare si è ridotta di 23 cm*
***Per i quattro secoli precedenti si sono ipotizzati una subsidenza naturale di 4 cm/secolo uguale a quella attuale e un eustatismo naturale variabile tra 0 (ipotesi minima) e 10 cm (ipotesi massima) coincidente con la tendenza attuale senza l'effetto serra*

I veneziani hanno sempre cercato di ridurre gli effetti negativi prodotti dal fenomeno rialzando, quando possibile, le pavimentazioni delle calli e dei campi e modificando gli accessi alle abitazioni nei limiti consentiti dalle caratteristiche strutturali e architettoniche degli edifici.

Anche attraverso questi interventi la difesa completa dei centri abitati non è stata mai raggiunta nei secoli della storia della città di Venezia.

La situazione di disagio prodotta dagli allagamenti venne comunque sempre accettata per i notevolissimi vantaggi che derivavano dal vivere in laguna e che rendevano Venezia diversa da ogni altra città. La laguna per molti secoli ha infatti rappresentato una difesa naturale dagli attacchi militari da terra e da mare, ha rappresentato un sistema naturale di depurazione degli scarichi di Venezia quando ancora nessuna altra città ne era munita, e ha rappresentato un porto naturale per lo sviluppo commerciale e marittimo.

Ancora oggi molti interventi realizzati per ridurre i disagi prodotti dagli allagamenti sono ben visibili, o sono ricostruibili attraverso un esame dei documenti storici. Anche Piazza S. Marco ne è un esempio. Il selciato è stato ricostruito nei secoli a una quota più alta della precedente su tutta la Piazza, fatta eccezione per la zona attorno alla basilica che infatti oggi appare depressa rispetto alla Piazza.

Nonostante questi interventi, che hanno evidentemente dei limiti dettati dalla statica e dall'estetica degli edifici, l'esposizione della città agli allagamenti, nel tempo, si è aggravata. Nell'ultimo secolo ha assunto un carattere di vero e proprio rischio per le attività lagunari e per la sopravvivenza della città di Venezia.

Cause più recenti dei fenomeni di acqua alta

I motivi che a partire dai primi anni del 1900 hanno trasformato il disagio prodotto dagli allagamenti dei centri abitati lagunari in un rischio reale sono i seguenti:

- il prelievo delle acque di falda lungo la conterminazione lagunare, che ha accompagnato lo sviluppo dell'entroterra e in particolare la creazione della zona industriale di Marghera, ha determinato una forte accelerazione del fenomeno di abbassamento dei terreni lagunari rispetto al livello del mare. Nell'arco di 70 anni (dal 1900 al 1970) tutto il territorio lagunare si è abbassato rispetto al livello del mare di ben 23 cm di cui: 3-4 centimetri sono da attribuire alla subsidenza naturale e cioè al cedimento naturale dei terreni alluvionali; 7-8 centimetri sono da attribuire all'eustatismo e cioè all'innalzamento naturale del livello del mare in conseguenza dei cicli climatici che interessano il globo terrestre; 12 centimetri sono da attribuire al pompaggio delle falde e al conseguente aumento del cedimento dei terreni alluvionali, per cause del tutto artificiali.
- Per effetto di questo abbassamento dei terreni rispetto al livello del mare,

la frequenza degli allagamenti di tutti i centri abitati lagunari è aumentata in modo sensibile.
Piazza S. Marco, che all'inizio del secolo veniva allagata 5-7 volte all'anno, oggi viene allagata 40-60 volte all'anno.
Un'alluvione con caratteristiche analoghe a quella del 1966 (Piazza S. Marco è stata sommersa da più di un metro d'acqua), ha più che quadruplicato le probabilità di verificarsi (fig. 2).

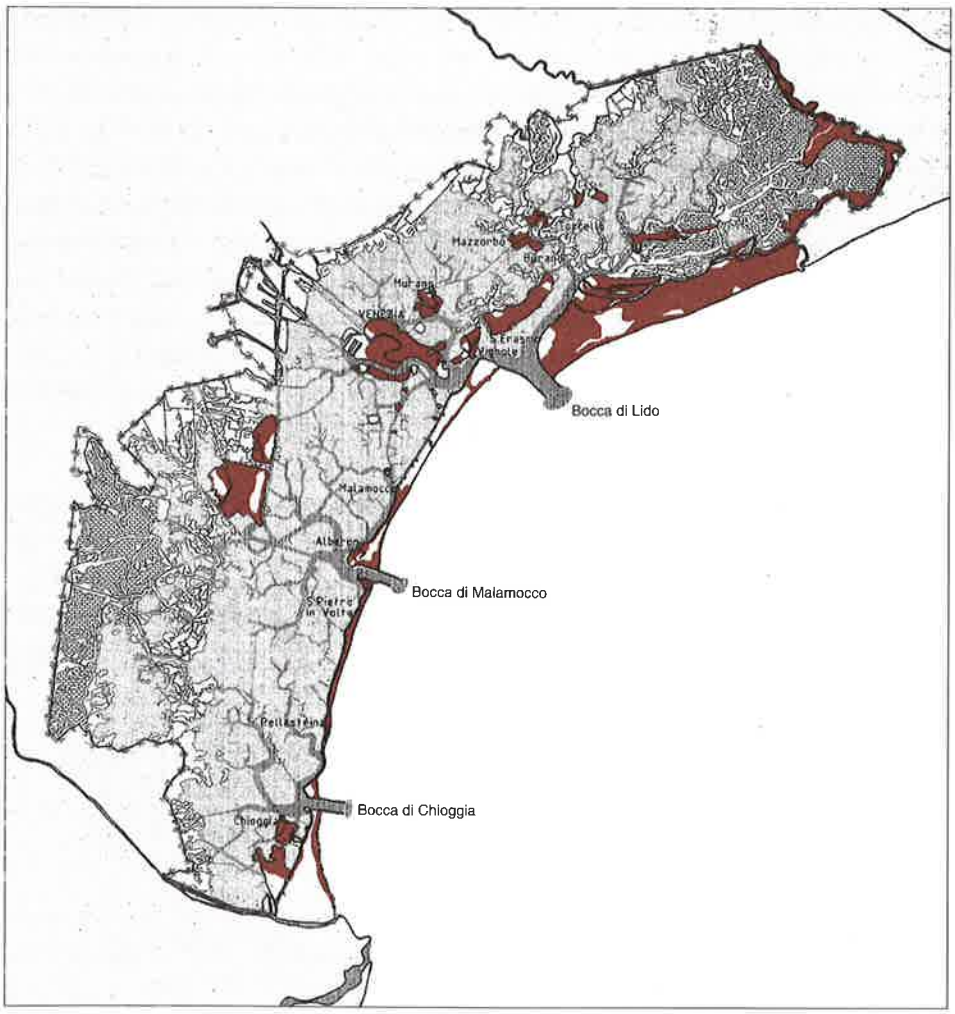


Fig. 2. Territori della laguna allagati durante l'alluvione del novembre 1966

La frequenza degli allagamenti e la loro maggiore intensità rispetto al passato pone ogni struttura, ogni edificio e ogni costruzione di valore storico, monumentale e architettonico in una situazione nuova e sensibilmente più critica rispetto al passato.
Nella cultura veneziana la difesa delle strutture dalle acque lagunari è sempre stata considerata di primaria importanza. Le parti di struttura che

potevano essere lambite dall'acqua venivano realizzate in pietra d'Istria, resistenti all'azione meccanica e all'azione disgregatrice della salsedine, in modo da ottenere un isolamento tra le parti immerse dell'edificio e quelle superiori.

Questo accorgimento che ha protetto gli edifici per molti secoli non è oggi più sufficiente. Con una frequenza sempre crescente le acque alte arrivano a lambire le parti in mattoni le cui caratteristiche di resistenza sono ben inferiori a quelle della pietra d'Istria. I mattoni non costituiscono un elemento strutturale isolante all'acqua, non offrono un'adeguata resistenza alle azioni meccaniche del moto ondoso e si degradano nel tempo a causa dell'assorbimento di acqua salata, dell'esposizione al sole, delle variazioni termiche ed eventualmente del gelo.

Attraverso dettagliate analisi di stabilità si è anche potuto verificare che, in conseguenza del nuovo rapporto tra le quote dei centri abitati e la quota del livello del mare, in particolari condizioni di marea eccezionale concomitante a forte vento e quindi anche a moto ondoso in laguna, le onde che investono le pareti degli edifici possono causare danni ingenti e crolli. Eventi di questo tipo sono per fortuna da annoverare tra quelli non frequenti, ma non possono certo essere trascurati nel valutare la gravità del problema delle acque alte (fig. 3).

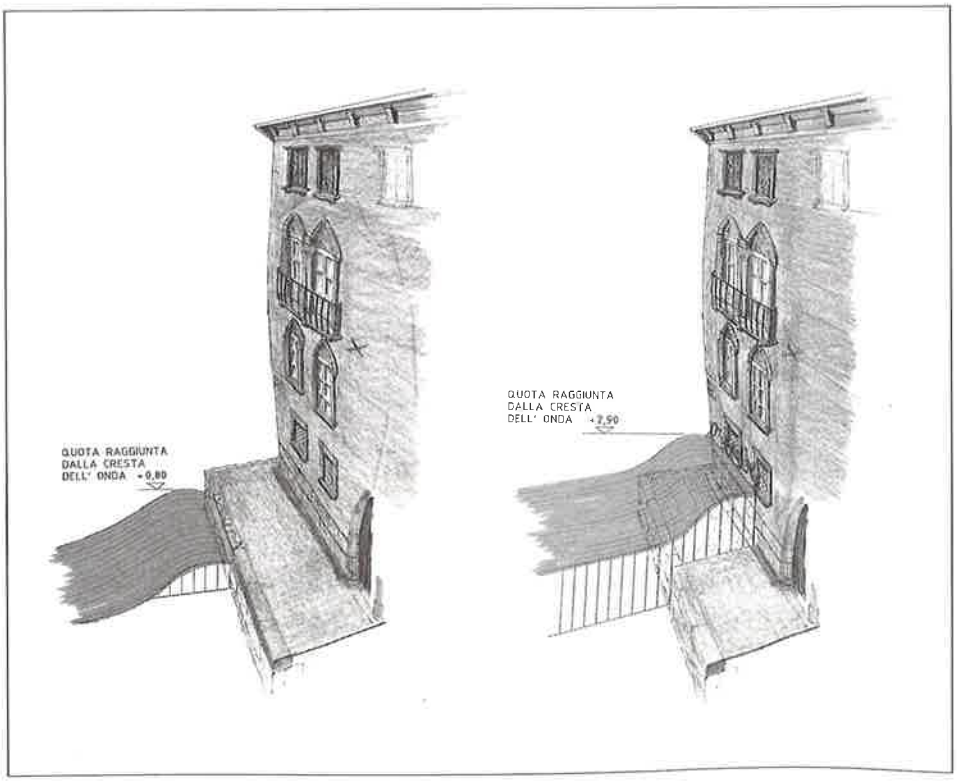


Fig. 3. Effetti del moto ondoso sugli edifici. In condizioni di marea normale, immagine a sinistra, la quota raggiunta dalla cresta dell'onda è di circa +0.80 m sul livello medio del mare. In condizioni di alta marea eccezionale, immagine a destra, la cresta dell'onda raggiunge circa +2.90 m

Queste condizioni, che non possono assolutamente più essere classificate come di semplice disagio e che rappresentano ormai un reale e grave rischio per la città di Venezia e per gli altri centri abitati lagunari, si inseriscono oggi in un contesto sociale ed economico ben diverso da quello esistente nei secoli passati. I vantaggi offerti dalla laguna, come la difesa militare, non sono più necessari, gli scarichi della città possono essere depurati anche senza fare affidamento sui flussi di marea, le dimensioni raggiunte dalle navi favoriscono lo sviluppo di altri porti dotati di fondali naturali più profondi.

Tra le cause che comunemente si crede abbiano prodotto l'aumento della frequenza degli allagamenti vanno elencati i grandi lavori di dragaggio eseguiti negli ultimi decenni (in particolare il canale Vittorio Emanuele e il canale dei petroli), o i grandi imbonimenti eseguiti nel medesimo periodo per la costruzione delle zone industriali, dell'aeroporto e della strada Romea, o ancora la chiusura delle valli da pesca.

Per tanti anni l'opinione corrente, sostenuta anche da una campagna stampa che si basava più sull'intuizione che su basi scientifiche, dava per certo che questi interventi erano stati la causa dell'aggravarsi degli allagamenti o ne erano una componente importante.

Le informazioni oggi disponibili, i risultati degli studi eseguiti dai maggiori esperti della materia a livello mondiale, hanno confermato quanto il mondo scientifico nazionale affermava già da diverso tempo. Questi interventi non hanno modificato l'aumento della frequenza delle acque alte. L'evoluzione degli allagamenti in laguna era già in atto negli stessi anni per le cause prima elencate.

Gli studi eseguiti in questi anni hanno peraltro dimostrato che questi stessi interventi hanno prodotto e continuano a produrre altri e altrettanto importanti effetti negativi in laguna. Hanno accelerato la perdita dei sedimenti dalla laguna verso il mare, hanno accelerato l'appiattimento della laguna, hanno ridotto i ricambi indotti dai flussi di marea nelle zone più lontane dalle bocche lagunari, hanno spostato lo spartiacque tra il bacino di Malamocco e quello di Lido riducendo i flussi di marea e quindi i ricambi nella zona della città di Venezia.

Evoluzione degli allagamenti prevista per il futuro

Le prospettive per il futuro non sono favorevoli e non consentono di immaginare una riduzione nel rischio di allagamenti e dei gravi danni che ne possono derivare.

I fenomeni naturali di subsidenza e di eustatismo continuano infatti a ridurre la quota dei territori veneziani rispetto al livello del mare. Nei prossimi 50 anni, per effetto di questi fenomeni assolutamente naturali che non è in alcun modo possibile contrastare, Venezia si abbasserà rispetto al livello del

mare di altri 5-6 centimetri. Questa variazione di quota è certamente modesta se confrontata con quella avvenuta quando ancora venivano prelevate le acque di falda. Tuttavia farà aumentare, a Piazza S. Marco, in modo sensibile il numero di allagamenti all'anno: dagli attuali 40-60, a circa 65-90.

Il mondo scientifico internazionale ha inoltre avanzato l'ipotesi che l'effetto serra, prodotto dall'aumento dell'anidride carbonica, aumento prevedibile anche in futuro in assenza di interventi che riducano l'emissione di questo gas a livello globale, possa produrre un innalzamento della temperatura terrestre e un conseguente ulteriore aumento del livello dei mari e degli oceani per effetto dello scioglimento dei ghiacciai e della dilatazione termica delle acque degli oceani stessi.

I complessi fenomeni che correlano il tasso di anidride carbonica con l'aumento del livello del mare non sono stati ancora compresi in modo completo e i modelli matematici in grado di riprodurli sono ancora alquanto imprecisi. Tuttavia, sulla base delle analisi preliminari già svolte, il mondo scientifico sembra concorde nel prevedere che il livello del mare aumenterà nei prossimi decenni a causa dell'effetto serra. Esistono invece ancora opinioni diverse sull'entità dell'aumento.

Gli effetti di questo fenomeno sono preoccupanti per tutti i territori bassi sul livello del mare e quindi in particolare per Venezia.

Eventi drammatici analoghi a quelli del novembre 1966 potrebbero accadere ogni 25 anni.

Questi scenari possono non essere molto lontani dalla realtà se si pensa che i modelli matematici, pur ancora imprecisi, indicano aumenti di 60 centimetri o valori ancora superiori, mentre il mondo scientifico indica come molto probabile un aumento del livello del mare di 30 centimetri.

Il grado di incertezza presente in queste previsioni è comunque ancora notevole. Benché quindi l'effetto serra non possa ancora essere preso come riferimento per le scelte politiche, economiche e tecniche di una nazione, è però indubbio che si debba considerare nella progettazione delle infrastrutture di grande importanza. Sembra infatti logico che le strutture da realizzare oggi siano studiate per poter essere adattate in futuro nel caso si dovessero verificare le ipotesi pessimistiche dell'innalzamento del livello del mare.

DIMENSIONE DEGLI ALTRI PROBLEMI DELL'AMBIENTE LAGUNARE

La conoscenza come base per la progettazione delle opere di difesa dalle acque alte

La laguna è un ecosistema complesso in cui gli aspetti ambientali, idraulici, morfologici, biologici, il paesaggio e le questioni di natura socioeconomica sono strettamente interconnessi.

L'ambiente lagunare che noi oggi conosciamo è il risultato di un'evoluzione naturale di tutte queste componenti, avvenuta lentamente nei secoli attra-

verso una loro mutua interazione, ma è anche il risultato di una lunga serie di interventi dell'uomo che ne hanno modificato le tendenze in atto.

Gli obiettivi perseguiti nei secoli sono stati molto diversi. Dalla difesa dalla malaria alla difesa militare. Dallo sviluppo dei commerci marittimi allo sviluppo di nuove zone industriali.

Non sempre però i risultati ottenuti con questi interventi sono stati quelli desiderati. In molti casi quando gli interventi vennero realizzati mancavano le conoscenze per effettuare previsioni realistiche; in altri casi, in tempi più recenti, si è concentrata l'attenzione sul solo problema che si doveva risolvere senza considerare le eventuali conseguenze negative, dirette o indirette.

Oggi il livello di conoscenza raggiunto nelle scienze ambientali e nell'ingegneria non consente più di affrontare un problema complesso in modo parziale. I monitoraggi ci forniscono una fotografia della situazione, i modelli consentono di riprodurre questa fotografia e di prevedere come potrà essere modificata in futuro senza e con interventi, le esperienze e le ricerche svolte con ritmo e con precisione crescenti a partire dagli anni '50 ci hanno posto nella condizione di poter valutare e proporre soluzioni sicure e affidabili.

Uno studio parziale non sarebbe neppure accettabile per la profonda maturazione culturale in materia di difesa dell'ambiente in atto a livello nazionale e in particolare nel mondo veneziano.

Da qui l'esigenza di studiare le soluzioni per la difesa dall'acqua alta considerando in modo unitario l'insieme dei problemi della laguna e individuando le connessioni reciproche, le connessioni che esistono tra le cause che li hanno prodotti e ogni possibile effetto incrociato ottenibile attraverso ciascuno degli interventi.

Trasformazioni morfologiche della laguna

Come già accennato, la configurazione della laguna e le sue caratteristiche morfologiche sono il risultato dei continui interventi dell'uomo che, dalla fine del primo millennio, sono stati rivolti a modificare la naturale tendenza all'interrimento della laguna.

La deviazione dei fiumi ha dato un contributo essenziale per ridurre l'interrimento della laguna ma ha di fatto invertito il fenomeno, innescando un processo di graduale erosione.

Molti anni dopo, la costruzione dei moli alle bocche e, più recentemente, il dragaggio dei profondi canali per la navigazione hanno ulteriormente contribuito ad accelerare l'erosione e a innescare il fenomeno dell'appiattimento della laguna, nelle zone più prossime a tali canali, il cui effetto peraltro è decrescente nel tempo ed è stato massimo dopo la costruzione di questi canali.

Si è inoltre verificato che anche la crescente pressione esercitata dalle attività dell'uomo tende ad accelerare i processi di erosione della laguna; i frequenti passaggi di imbarcazioni da pesca e di battelli per i trasporti in laguna sollevano dal fondo e disperdono i sedimenti, mentre l'inquinamento

provoca la graduale scomparsa di alcune specie vegetali che, con i loro apparati radicali, aumentano la resistenza naturale dei fondali.

Gli interventi dell'uomo sono inoltre la causa principale della subsidenza (dovuta al prelievo delle acque delle falde superficiali) che ha contribuito in modo rilevante all'approfondimento dei fondali riscontrato negli ultimi decenni.

Dall'inizio del secolo la laguna ha subìto un approfondimento medio di 30-40 centimetri, di cui circa 23 sono attribuibili alla subsidenza e all'eustatismo, e ha perso circa il 50% delle barene (escludendo dal conto quelle inglobate nelle casse di colmata).

Si stima che attualmente la laguna stia perdendo circa un milione di metri cubi di sedimenti ogni anno, cifra che equivale a un approfondimento generalizzato dell'ordine di 15 centimetri in 50 anni e a un'ulteriore riduzione delle barene, difficilmente quantificabile ma certo notevole e pericolosa.

In conseguenza dell'approfondimento dei fondali, infatti, aumenterà il moto ondoso in laguna e quindi il rischio di danni alle strutture di difesa esistenti e ai centri abitati lagunari.

Le modifiche inoltre tendono a cancellare le caratteristiche tipiche di una zona umida che, ancora oggi, nonostante il gravissimo degrado di cui si è detto, fanno della laguna veneta un ambiente pregiato e raro, unico al mondo.

Si è del resto verificato che la trasformazione della morfologia lagunare non può essere modificata agendo sui flussi di marea.

Una riduzione permanente dei flussi infatti determinerebbe solo una riduzione molto poco significativa della perdita dei sedimenti verso mare e determinerebbe invece una ripresa del fenomeno di appiattimento dei fondali soprattutto, e in modo marcato, nelle zone adiacenti ai canali principali.

Un aumento dei flussi di marea determinerebbe un incremento, sempre limitato, della perdita di sedimenti e nessun altro vantaggio.

Si è anche verificato che il problema non è oggi risolvibile immettendo in laguna i fiumi o modificando i moli per poter facilitare l'immissione in laguna dei sedimenti dei litorali.

I fiumi trasportano ormai volumi molto ridotti di sedimenti e i litorali sono già in erosione. La quantità di sedimenti molto modesta che potrebbe essere introdotta in laguna con questi interventi non sarebbe sufficiente né per invertire il fenomeno né per giustificare le conseguenze negative su altri fronti (peggioramento della qualità delle acque e accelerazione dell'erosione dei litorali) e i costi elevatissimi di costruzione.

La soluzione a questo problema è stata trovata su due fronti: da una parte aumentando la resistenza dei fondali all'erosione attraverso il miglioramento della qualità delle acque e dei sedimenti e il ripristino in laguna della vegetazione sommersa con apparato radicale; dall'altra assicurando che i materiali provenienti dai dragaggi lagunari vengano riutilizzati in laguna per la costruzione e ricostruzione di velme e barene.

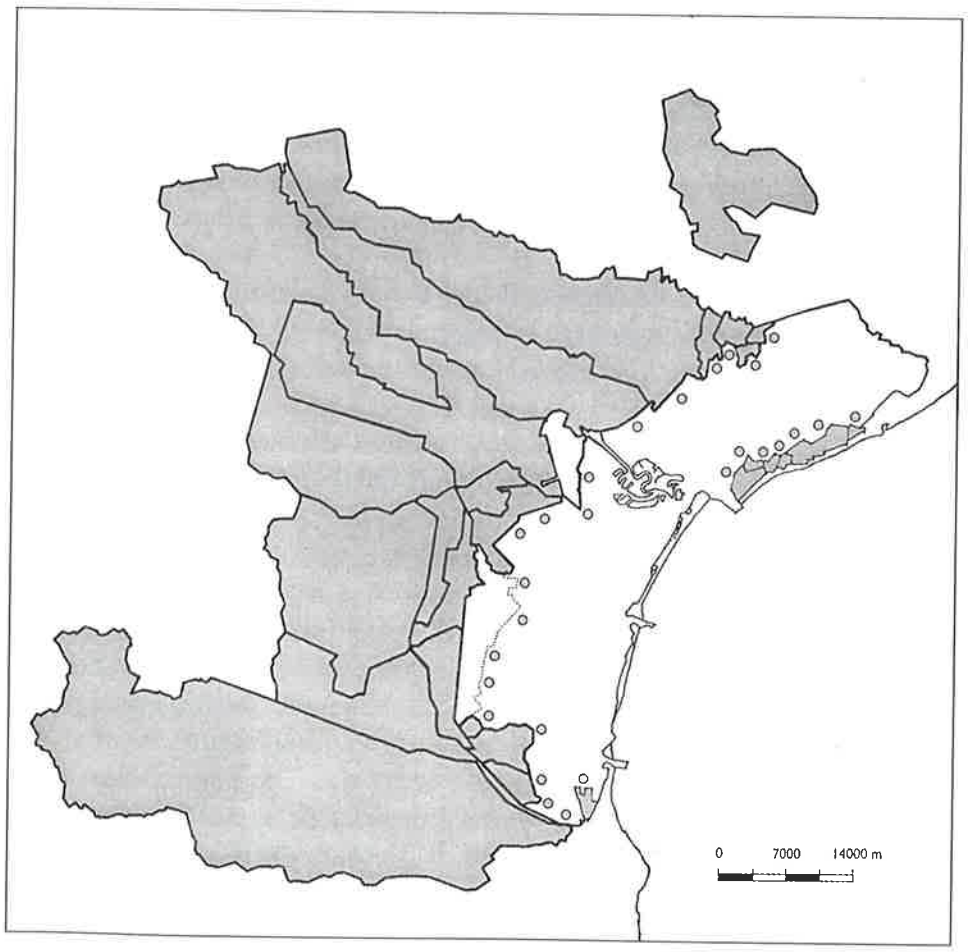
Inquinamento di origine urbana, industriale e agricola e degrado del sistema biotico lagunare

L'inquinamento della laguna ha raggiunto livelli molto elevati. Dall'inizio del secolo l'apporto di inquinamento organico è triplicato, anche se negli ultimi anni sono entrati in funzione numerosi impianti di depurazione, e il carico di nutrienti (fosforo e azoto) è addirittura quintuplicato.

Si sono già verificate condizioni critiche in cui l'acqua, in vaste zone della laguna, ha avuto un grave deficit di ossigeno con conseguente moria di pesci. In pratica tutti gli anni si ha una fortissima produzione di alghe nitrofile, stimata nell'ordine di un milione di tonnellate, e una conseguente pericolosa emissione di anidride solforosa.

Il degrado del sistema biotico lagunare è una diretta conseguenza dell'inquinamento generato dal carico organico e dai nutrienti smaltiti in laguna. La varietà delle specie, che è l'indicatore più significativo di una situazione ecologica equilibrata, è fortemente diminuita rispetto ai valori preindustriali e in alcune zone questa diversità tipica della laguna veneziana è andata perduta.

La causa principale di queste gravi modifiche è certamente l'apporto di sostanze inquinanti dal bacino scolante (fig. 4).



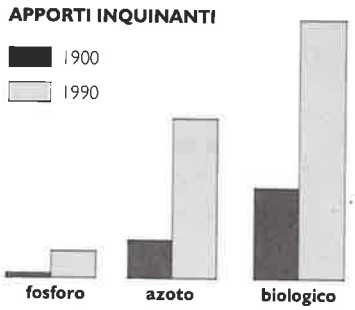


Fig. 4. Bacino idrografico della laguna. L'area in grigio rappresenta la superficie del bacino scolante: circa 188.000 ha. Nella figura sono indicati anche i 27 scarichi che sfociano in laguna immettendovi sostanze inquinanti prodotte dagli insediamenti urbani e dalle attività agricola, industriale e zootecnica

Il fenomeno è tuttavia aggravato dalla trasformazione morfologica della laguna. La notevole riduzione dell'estensione delle barene ha limitato l'habitat per quelle specie la cui vita è legata alle caratteristiche ambientali tipiche delle zone di transizione tra mare e terra. Anche l'approfondimento e l'appiattimento dei fondali ha creato caratteristiche fisiche uniformi che favoriscono lo sviluppo solo di alcune specie. Questi effetti sono aggravati dal disturbo causato dall'intensa attività venatoria e dalla pesca quando è praticata in zone e con sistemi vietati.

Si è anche verificato che il livello di qualità dell'ambiente lagunare è strettamente connesso con l'idrodinamica: la qualità è migliore dove i ricambi dei flussi di marea sono maggiori. Ogni riduzione dei flussi di marea deve quindi essere evitata.

Il rispetto di questo criterio è oggi assolutamente indispensabile in relazione all'elevato grado di inquinamento della laguna. È tuttavia necessario che tale criterio venga osservato anche in futuro perché la laguna rimane un ambiente fortemente antropizzato e, a depurazione avvenuta, proprio la circolazione idraulica diventerà l'elemento cardine per ridurre al minimo le condizioni di crisi ambientale in laguna.

Variazioni dei fondali alle bocche lagunari

Le zone delle bocche sono quelle che, a partire dalla fine del secolo scorso, hanno subìto le maggiori e più vistose variazioni morfologiche sia in larghezza sia in profondità. La profondità a Malamocco ad esempio è passata da 4-5 metri a circa 15 metri (valore medio, dato che la profondità massima arriva a 19 metri).

La causa principale è stata individuata nella costruzione dei moli che hanno ridotto considerevolmente la larghezza originaria delle bocche. Queste ultime, che hanno una loro naturale tendenza a mantenere una sezione costante, si sono conseguentemente approfondite.

Si è anche verificato che i dragaggi eseguiti alle bocche per consentire l'accesso in laguna di navi sempre più grandi non sono stati la causa dei vistosi approfondimenti dei canali di bocca. I dragaggi hanno infatti solo accelerato l'evoluzione iniziata con la costruzione dei moli.

Attualmente le bocche hanno raggiunto una sostanziale condizione di equilibrio. Ogni intervento per tentare di ripristinare la situazione esistente prima della costruzione dei moli avrebbe un notevole impatto sul territorio, sarebbe completamente artificiale e non avrebbe inoltre alcuna conseguenza positiva sugli allagamenti in laguna.

Erosione dei litorali e indebolimento delle difese dal mare

Tutto il fronte di costa che separa il mare dalla laguna è in condizioni critiche a causa di un progressivo approfondimento dei fondali e di un arretramento della linea dei litorali. In assenza di interventi, questi fenomeni sono destinati a produrre effetti sempre più critici per la laguna.

In alcuni tratti, e in special modo lungo il litorale di Pellestrina, le difese esistenti, già nella situazione attuale, non proteggono efficacemente la laguna e i centri abitati del litorale anche in occasione di eventi meteorologici non particolarmente gravosi.

Si ricorda che durante l'alluvione del novembre del 1966 le difese dei litorali cedettero in più punti e che essi mantennero la separazione tra mare e laguna solo perché le condizioni di moto ondoso non erano eccezionali.

L'indebolimento del cordone litoraneo è tra le cause della situazione di rischio in cui versa attualmente l'ecositema lagunare.

Transito in laguna di navi commerciali e industriali

Il porto di Venezia ha costituito per secoli il cardine dell'economia della città e ancora oggi rappresenta una realtà assai importante, con un bacino di utenza che oltrepassa ampiamente i confini regionali.

Oggi giungono al porto di Venezia poco meno di 5000 navi all'anno, per un traffico annuo complessivo di 25 milioni di tonnellate che colloca il porto di Venezia al quinto posto nella graduatoria nazionale.

Poco più del 20% delle navi che giungono a Venezia, cioè circa 1100 navi all'anno, trasportano prodotti petroliferi e, di queste, 220 circa all'anno sono di grandi dimensioni, superiori alle 40.000 tonnellate. Se si aggiungono le bettoline che trasportano prodotti petroliferi da Marghera alle idrovie, si ricava che la laguna ogni anno è attraversata complessivamente più di 4000 volte (conteggiando sempre i percorsi di andata e di ritorno) da navi con carichi petroliferi.

Il livello di rischio cui la laguna è sottoposta appare evidente da questi numeri e dalla possibilità, remota o meno che sia, di un incidente delle navi di maggiori dimensioni che sono in grado di trasportare più di 100.000 tonnellate di prodotto altamente inquinante.

CRITERI DI SCELTA DELLE OPERE CHE REALIZZANO LA DIFESA DEI CENTRI ABITATI DAGLI ALLAGAMENTI

La legge 798 del 1984, approvata all'unanimità dal Parlamento, ha stabilito l'assoluta necessità di "porre al riparo gli insediamenti urbani lagunari dalle acque alte eccezionali" e ha indicato i criteri da adottare nella scelta delle opere e nella loro progettazione.

La legge ha precisato che la difesa dalle acque alte dovrà essere attuata mediante opere mobili alle bocche di porto, adottando cioè la soluzione studiata per il Ministero dei Lavori pubblici nel 1981 e che il suo Consiglio Superiore aveva approvato con prescrizioni nel 1982.

Mentre le prime indicazioni sono state considerate vincolanti per la progettazione delle opere, prima di passare allo studio delle opere mobili si è

voluto ancora una volta verificare l'ipotesi di un possibile controllo dell'acqua alta con interventi alternativi alle opere mobili.

Il lavoro svolto negli anni, nella fase preliminare di massima, comprende quindi anche un'approfondita verifica della possibilità di difendere Venezia dagli allagamenti con svariati tipi di interventi, tra i quali le opere mobili alle bocche, gli interventi per eliminare gli effetti prodotti in laguna dal dragaggio dei canali o dalla realizzazione della zona industriale, o ancora le difese locali dei centri abitati con interventi tipo "insulae".

I criteri per lo studio di queste soluzioni e il loro confronto sono quelli richiamati nella legge del 1984 che possono essere così sintetizzati:

- gli interventi non possono dividere la laguna;
- le eventuali difese locali nel centro storico di Venezia devono tenere conto del valore storico e monumentale della città e dei singoli edifici. La Soprintendenza ha successivamente tradotto questa esigenza fissando in 10-20 centimetri i massimi sopralzi ammissibili, a seconda del contesto in cui si attua l'intervento;
- nel caso di opere mobili alle bocche, non sono ammesse pile intermedie, sovrastrutture aeree e in ogni caso opere che per caratteristiche e dimensioni introducono un grave impatto ambientale;
- le difese non devono produrre effetti negativi sull'ambiente lagunare che già si trova in condizioni critiche. Esse non devono quindi aumentare l'erosione e l'appiattimento dei fondali lagunari e non devono peggiorare il livello di qualità delle acque e dei sedimenti. In base alle ampie conoscenze acquisite sull'ambiente lagunare questo criterio si traduce nel non modificare in modo permanente i flussi di marea in laguna;
- le difese non devono costituire pericolo o danno per la pesca e devono assicurare continuità al transito attraverso le bocche dei mezzi marittimi di soccorso, durante la chiusura delle paratoie (fig. 5).

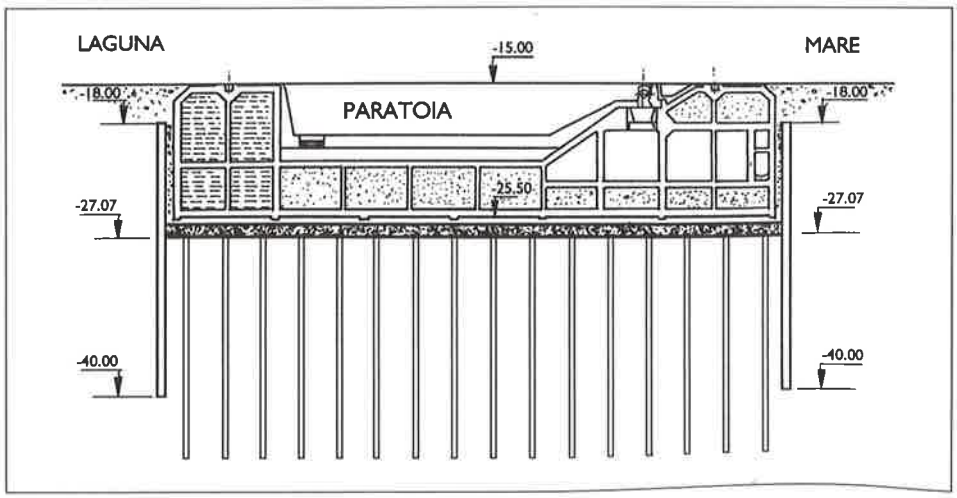


Fig. 5. Opere mobili alle bocche di porto. Sezione tipo della struttura di fondazione delle paratoie

SOLUZIONI ALTERNATIVE ESAMINATE

Studio degli effetti prodotti

Sono stati innanzitutto studiati gli effetti ottenibili con interventi che ripristinino la situazione morfologica della laguna esistente all'inizio del secolo e cioè prima che gran parte delle valli da pesca venissero chiuse all'espansione delle maree e prima degli imbonimenti e dell'escavo dei grandi canali lagunari per lo sviluppo della zona industriale e del porto.

Si è quindi studiata la possibilità di realizzare la difesa attraverso protezioni locali, mediante sopraelevazione dei marginamenti, delle calli e dei campi dei centri abitati.

Si sono infine studiati gli effetti prodotti dalle opere mobili con la soluzione studiata nel 1981 ("Progettone") caratterizzata da una riduzione permanente dei flussi di marea e gli effetti ottenibili ancora con opere mobili, ma con una soluzione che non modificasse in alcun modo il normale regime delle maree, ad eccezione che per i brevi periodi di chiusura delle paratoie.

Si è anche ipotizzato che ciascuno di questi interventi potesse essere realizzato singolarmente o con altri per raggiungere il miglior risultato possibile.

Per riprodurre l'idrodinamica lagunare e per conoscere l'effetto prodotto dai diversi interventi sono stati utilizzati i più sofisticati modelli matematici disponibili a livello internazionale. Gli effetti prodotti da ogni intervento sono stati inoltre sempre studiati con più di un modello per avere la massima sicurezza dei risultati ottenuti.

Interventi morfologici

Le analisi svolte hanno dimostrato che interventi atti a ripristinare la morfologia lagunare di inizio secolo (interramento del canale dei petroli, sollevamento dei fondali alle bocche, restringimento dei canali di bocca e apertura delle valli da pesca), sarebbero troppo costosi e di difficilissima realizzazione. Inoltre non produrrebbero una sostanziale riduzione dei livelli idrici nei centri abitati in occasione delle acque alte, tanto meno se eccezionali.

Anche se questo restauro morfologico venisse attuato in modo completo i livelli della marea a Venezia potrebbero essere ridotti solo di qualche centimetro e solo nel caso in cui la componente della marea dovuta alle condizioni meteorologiche fosse molto contenuta. In realtà è noto che la componente meteorologica è determinante negli allagamenti di Venezia. L'innalzamento del livello dell'acqua in laguna si produce in questi casi con una velocità piuttosto ridotta e si mantiene per diverse ore, rendendo vano ogni tentativo di ridurre l'entità del problema attraverso modifiche morfologiche.

Alcuni degli interventi morfologici sono tuttavia utili per ridurre l'erosione e l'appiattimento della laguna. Alcuni di essi contribuiscono anche al miglioramento della qualità delle acque lagunari. Molti interventi di restauro morfologico della laguna sono stati perciò esaminati, studiati ed elaborati nell'ambito dei progetti per il Recupero Morfologico e per l'Arresto del Degrado.

Difese locali denominate "insulae"

La prescrizione formulata dall'ufficio per la Soprintendenza ai Beni ambientali e culturali di Venezia di limitare gli eventuali innalzamenti dei marginamenti, delle calli e dei campi a 10-20 centimetri esclude la possibilità di utilizzare questo intervento per la difesa dalle acque alte eccezionali.

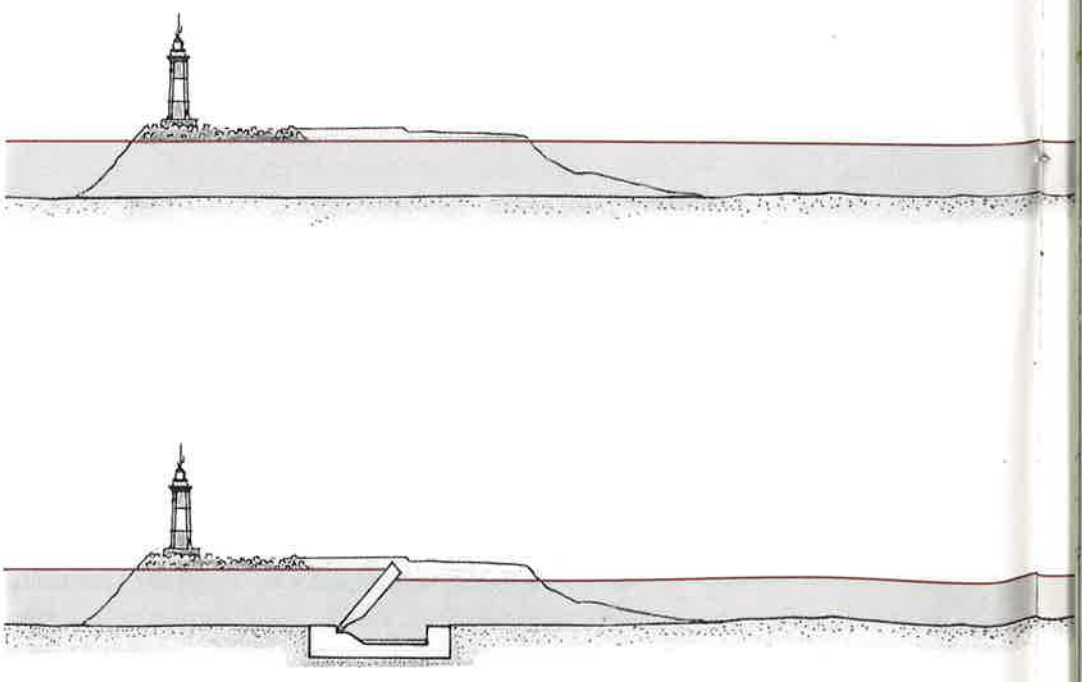
Si è per altro dimostrato che la soluzione è efficace ed è fattibile se limitata a difendere le zone di Venezia fino alla quota di +100 centimetri rispetto a Punta della Salute. Poiché le zone più basse di Venezia hanno una quota di +80 centimetri, questo intervento rispetterebbe anche le prescrizioni della Soprintendenza. Nel numero 2 dei "Quaderni Trimestrali" è illustrato il progetto di sopraelevazione delle pavimentazioni nell'area dei Tolentini.

L'intervento locale non può risolvere da solo il problema delle acque alte; esso però può essere adottato insieme ad altri interventi che eliminano gli allagamenti per livelli di marea superiori a quota +100. Ciò consente di ridurre da 60 a 6 volte l'anno la messa in esercizio delle paratoie (fig. 6).

Opere mobili alle bocche lagunari

L'efficacia di una chiusura delle bocche in occasione delle acque alte eccezionali è intuitiva. In previsione di una condizione di rischio per la città, la laguna verrebbe isolata dal mare impedendo al livello dell'acqua in laguna di aumentare oltre il valore desiderato, molto prossimo a quello di chiusura.

Non è invece intuitivo prevedere gli effetti permanenti delle opere fisse sull'ecosistema lagunare e gli effetti indiretti delle chiusure in occasione delle



acque alte. Non è neppure immediato stabilire se le opere mobili senza pile intermedie e senza sovrastrutture aeree (come prescritto dal Consiglio Superiore dei Lavori pubblici) siano fattibili.

Nello studio delle opere mobili ogni verifica è stata affrontata in modo dettagliato, usando modelli fisici bidimensionali e tridimensionali, modelli matematici idrodinamici, morfologici ed ecologici, modelli di simulazione dei traffici navali e un prototipo in scala reale del tipo di paratoia da adottare.

Gli studi eseguiti per la verifica delle paratoie saranno illustrati nel prossimo quaderno trimestrale. Si anticipa solo che gli studi hanno dimostrato che il tipo di paratoia selezionato (a spinta di galleggiamento) è in pratica l'unico che rispetta le prescrizioni della legge 798/84. Esso inoltre è certamente fattibile, ha un livello di affidabilità confrontabile con quello di altri tipi di paratoia e ha un costo di costruzione, di manutenzione e di gestione che complessivamente non è superiore a quello di altri tipi di paratoia.

Gli studi hanno evidenziato che le opere permanenti connesse con l'esecuzione delle opere mobili possono essere un elemento di rischio per questo tipo di soluzione. Si è infatti verificato che le opere permanenti proposte nel progetto di massima e di fattibilità ("Progettone") del 1981 avrebbero introdotto un'importante riduzione dei volumi d'acqua scambiati per ogni ciclo di marea, valutata nel 10-12% del volume attuale, e avrebbero prodotto effetti negativi sulla morfologia e sulla qualità delle acque lagunari.

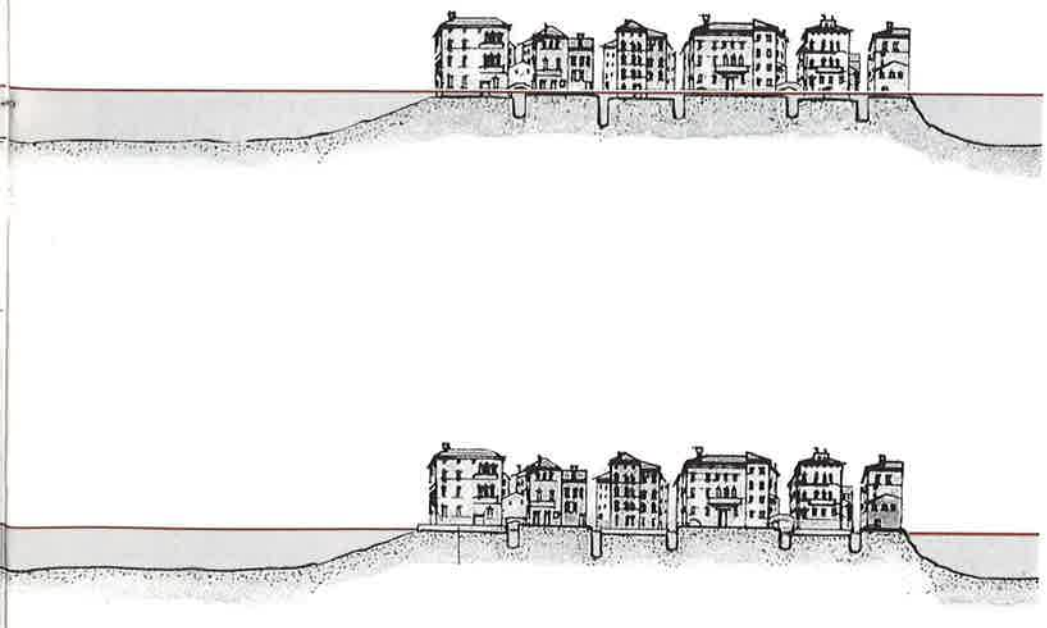


Fig. 6. Sistema di difesa dei centri lagunari dalle acque alte. Nella prima immagine è rappresentata la situazione attuale. Nella seconda immagine i centri abitati sono difesi da interventi locali tipo "insulae", fino alla quota di marea di +1 m sul livello medio del mare, e dalle paratoie mobili alle bocche di porto, in occasione di maree superiori a tale quota

Nel caso della soluzione ora adottata, invece, la schiera delle paratoie mobili non restringe in alcun modo la sezione esistente del canale di bocca. Ciò esclude qualsiasi diminuzione degli scambi mare - laguna.

SOLUZIONE PROPOSTA

Tutte le analisi svolte hanno dimostrato, senza lasciare alcun dubbio, che la difesa della laguna dalle acque alte eccezionali può essere ottenuta solo con paratoie mobili alle bocche e che questo tipo di intervento, se realizzato senza ridurre le attuali sezioni dei canali di bocca, è anche congruente con l'altro importante obiettivo di arrestare il degrado ambientale e di invertirne l'attuale tendenza.

La soluzione con le opere mobili estese quindi all'intera larghezza delle bocche lagunari costituisce la scelta di base per la difesa dalle acque alte.

La necessità di mettere in esercizio le paratoie è stata limitata al massimo, e quindi il loro funzionamento ottimizzato, associando le opere mobili alle difese locali tipo "insulae".

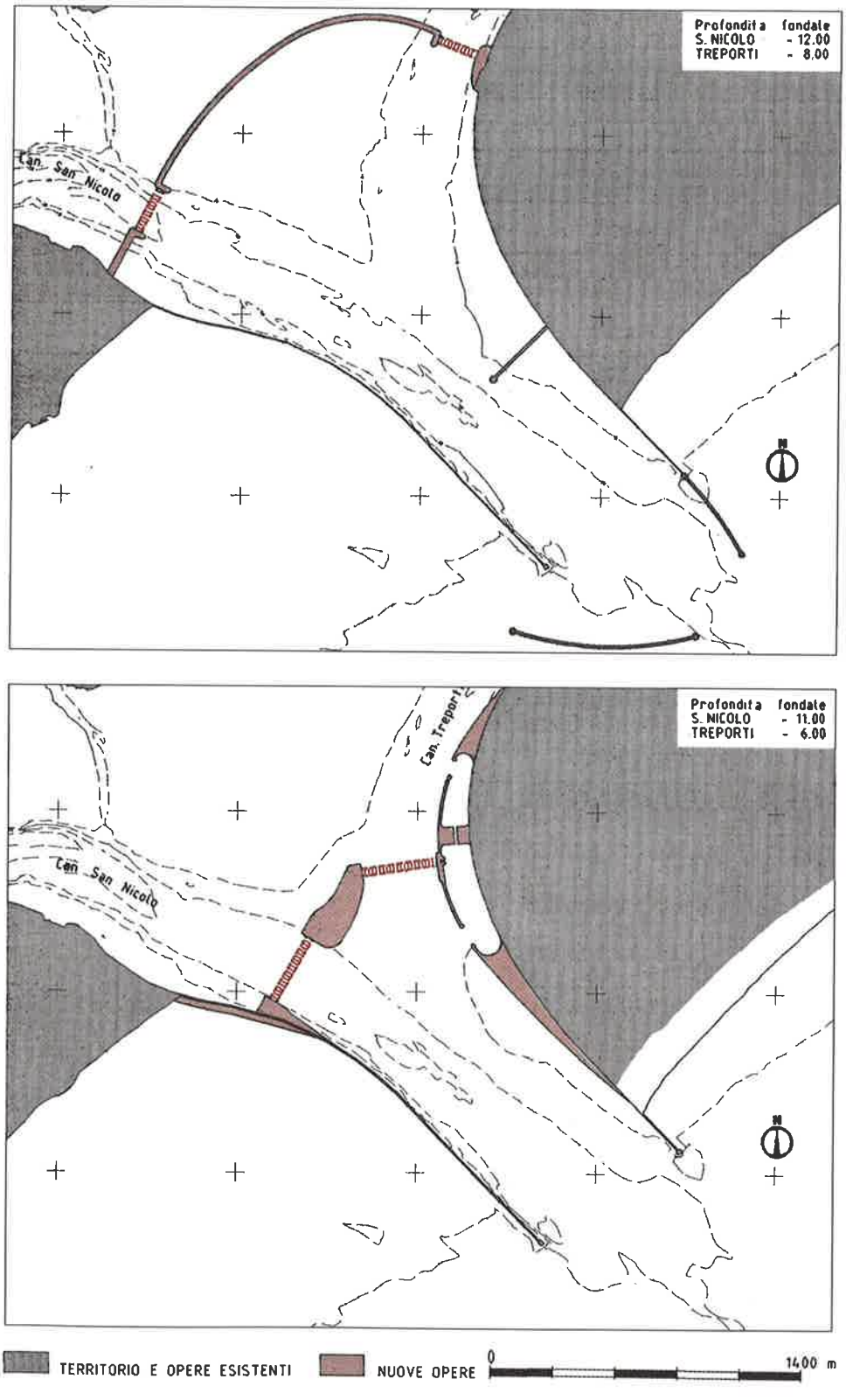
Con questa soluzione la difesa fino a quota +100 rispetto a Punta della Salute viene garantita dalle difese locali. Quando la marea raggiunge livelli più alti entrano in funzione le opere mobili isolando la laguna dal mare. È previsto che ogni anno si debbano effettuare 6-9 chiusure delle opere mobili per una durata media di circa 3 ore per evento.

Il sistema è stato comunque dimensionato per poter funzionare con la medesima efficacia per un intervallo molto ampio di condizioni.

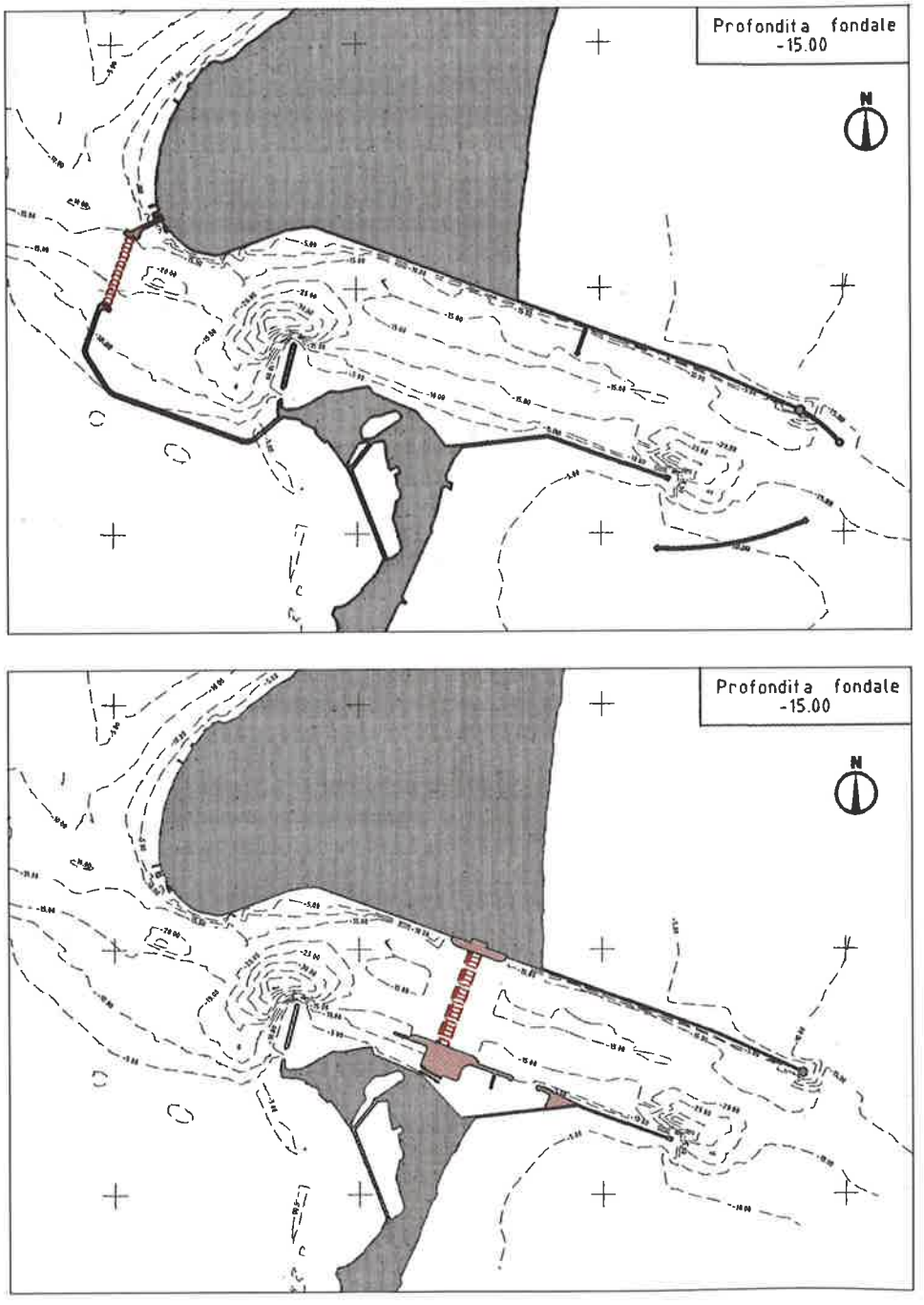
I varchi possono essere chiusi per quote variabili tra +80 (in pratica tutti gli abitati si trovano oltre questa quota) e +140 (valore superiore quasi teorico perché già a questa quota buona parte della città di Venezia è allagata).

Le opere rimangono funzionali anche se si dovesse avverare l'ipotesi di un innalzamento del livello del mare a causa dell'effetto serra. Esse non modificano la loro efficacia e non influenzano la portualità di Venezia anche nel caso di uno sviluppo dei traffici marittimi diverso da quelli attuali. Il pescaggio massimo delle navi che possono accedere in laguna è infatti limitato dai fondali dei canali lagunari molto meno profondi dei canali di bocca.

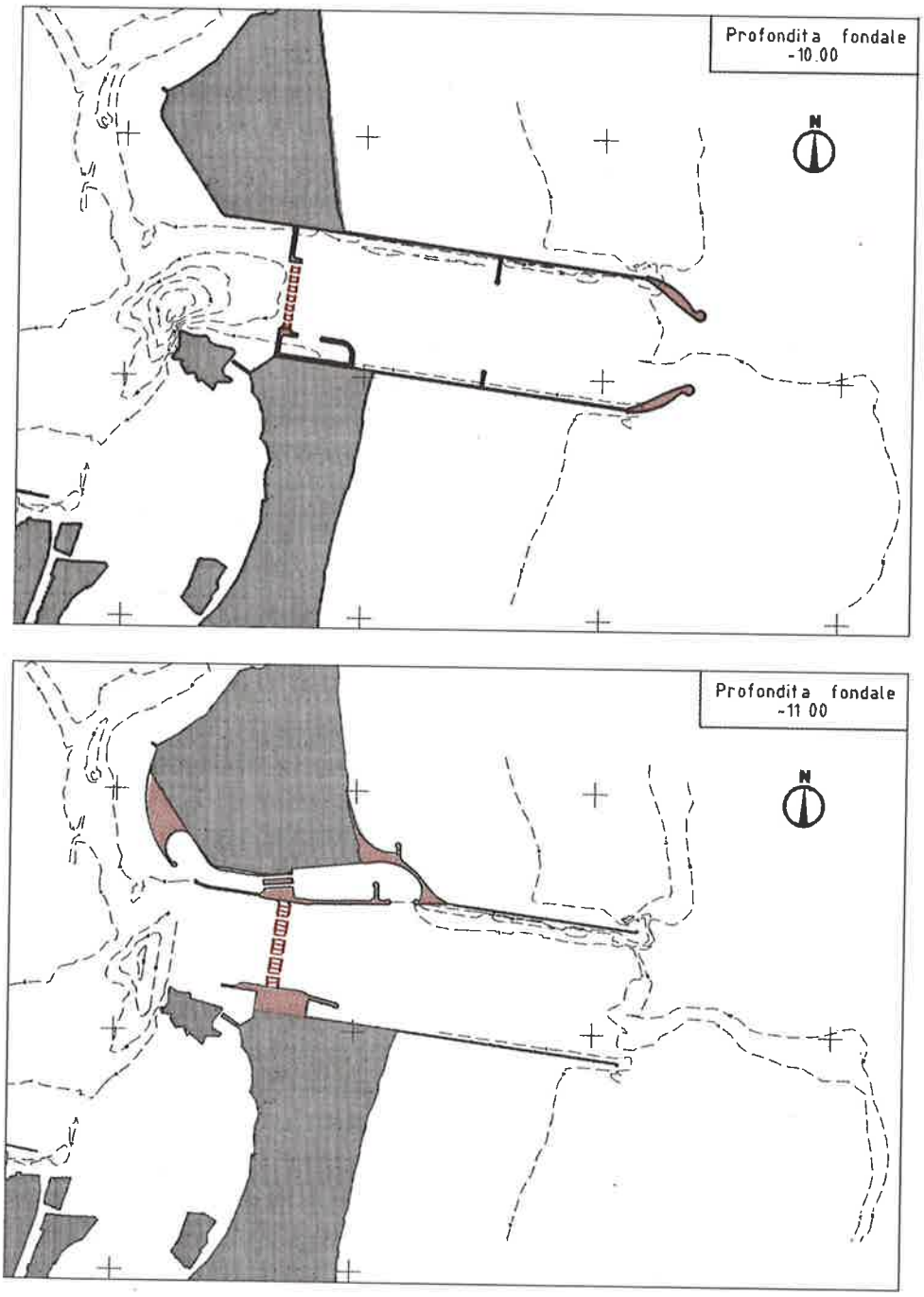
La configurazione delle opere da realizzare alle tre bocche lagunari dimensionate per rispettare i criteri esposti in precedenza sono indicate nelle figure che seguono. Ciascuna configurazione è messa a confronto con quelle del "Progettone" per mettere in evidenza come, per rispettare il criterio di non ridurre gli scambi mare - laguna, nelle nuove configurazioni siano state ridotte in modo sensibile le dimensioni delle opere permanenti (figg. 7-12).



Figg. 7-8. Bocca di Lido. La configurazione delle opere mobili alle bocche di porto nella soluzione prevista dal progetto di massima e di fattibilità del 1981 ("Progettone") e in quella prevista dal progetto di massima elaborato dal Consorzio Venezia Nuova



Figg. 9-10. Bocca di Malamocco. La configurazione delle nuove opere nella soluzione prevista dal "Progettone" e in quella elaborata dal Consorzio Venezia Nuova



Figg. 11-12. Bocca di Chioggia. La configurazione delle nuove opere nella soluzione prevista dal "Progettone" e in quella elaborata dal Consorzio Venezia Nuova