			EL.	CON.	APP
REVISIONE		DESCRIZIONE			

MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI

MAGISTRATO ALLE ACQUE

NUOVI INTERVENTI PER LA SALVAGUARDIA DI VENEZIA

CONVENZIONE REP. 7025 DEL 15-12-1989
LEGGE 29-11-1984 N. 798

INTERVENTI PER IL RECUPERO MORFOLOGICO DELLA LAGUNA

PROGETTO DI MASSIMA

FASE PROGETTUALE FINANZIATA CON LA CONVENZIONE 7025

RAPPORTO FINALE - VOLUME 5

METODI DI VALUTAZIONE DEGLI INTERVENTI

ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
N ELABORATO VE3910		DATA 31 Gennaio 1992

CONSORZIO "VENEZIA NUOVA"

IL PRESIDENTE
Dr. L. ZANDA

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE	PROGETTAZIONE
CONSORZIO VENEZIA NUOVA	TECHNITAL INTERNATIONAL GENERAL ENGINEERING - ROMA
IL DIRETTORE : Ing. G. MAZZACURATI	IL RESPONSABILE : Ing. A. SCOTTI

Fascicolo X: 119

PROGETTO GENERALE DEGLI INTERVENTI SULLA MORFOLOGIA

RAPPORTO FINALE

VOLUME 5: Metodi di valutazione degli interventi

VOLUME 5: INDICE

1. PREMESSA

2. METODI PER VALUTARE GLI EFFETTI PRODOTTI DAGLI INTERVENTI MORFOLOGICI SUL SISTEMA NATURALE

2.1. Gli effetti sull'idrodinamica

2.2. Gli effetti sul moto ondoso

2.3. Gli effetti sulla morfologia

2.4. Gli effetti sulla qualità delle acque

2.5. Gli effetti sulla biologia

3. METODI PER VALUTARE GLI EFFETTI PRODOTTI DAGLI INTERVENTI MORFOLOGICI SULLE FUNZIONI SOCIO-ECONOMICHE

3.1. Premessa

3.2. Metodi di valutazione

1. PREMESSA

Questo volume è dedicato all'esposizione della metodologia che verrà utilizzata per valutare gli effetti degli interventi morfologici allo studio.

Coerentemente con l'intera esposizione del Progetto Morfologico, gli effetti presi in esame riguardano sia le componenti dell'ecosistema naturale (fisico, chimico e biologico) sia quello del sistema antropico (limitatamente alle attività umane che possono essere in qualche modo influenzate dagli interventi allo studio).

L'obiettivo di questo volume è quello di esporre le metodologie di calcolo utilizzate, ma soprattutto, la loro applicazione nell'ambito del programma di valutazione degli interventi morfologici: ci si concentra cioè non tanto sul valore degli strumenti in assoluto quanto sulla loro validità relativamente agli obiettivi del Progetto Morfologico.

L'inquadramento degli argomenti trattati nel volume nel Progetto è esposto nella fig. 1.1.

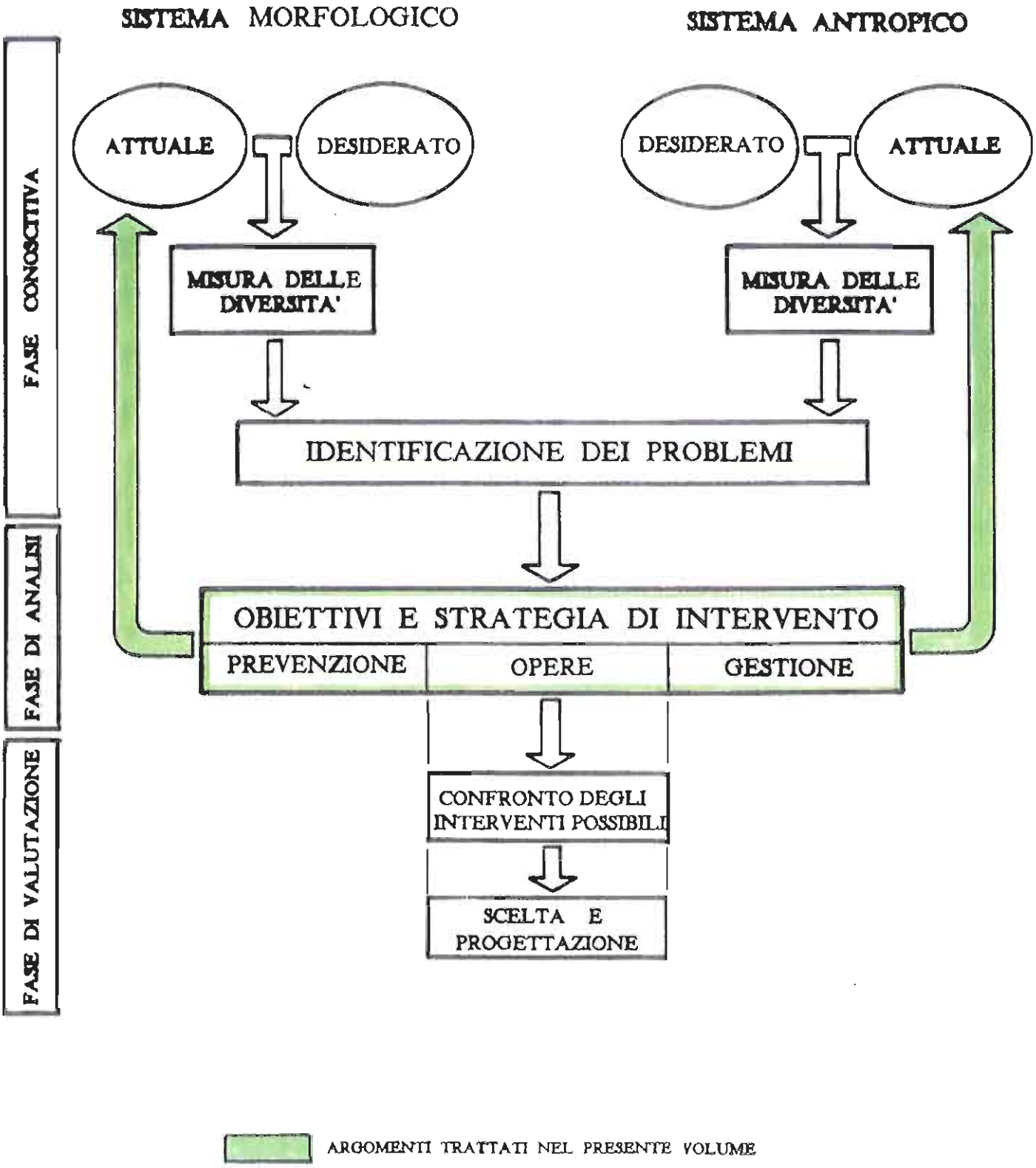


Fig. 1.1 - INQUADRAMENTO DEGLI ARGOMENTI TRATTATI NEL VOLUME.

2. METODI PER VALUTARE GLI EFFETTI PRODOTTI DAGLI INTERVENTI MORFOLOGICI SUL SISTEMA NATURALE

A livello teorico, il sistema naturale della laguna dovrebbe essere considerato nell'insieme di tutte le sue componenti, ovvero:

- componenti fisiche (parametri idrodinamici e parametri indicatori delle variazioni della morfologia);
- componenti chimiche (parametri indicatori della qualità dell'acqua e della qualità dei sedimenti);
- componenti biologiche (specie indicatrici del grado di sviluppo e/o di crisi delle diverse comunità biologiche).

Dati gli obiettivi e la natura del progetto, è stata sviluppata in particolare l'attività di simulazione degli effetti degli interventi sulle componenti fisiche, predisponendo e calibrando opportuni modelli idrodinamici, di calcolo del moto ondoso e di calcolo delle modifiche morfologiche.

Anche gli effetti sulla qualità dell'acqua e sulla biologia sono stati tuttavia tenuti in considerazione, pur essendo i modelli matematici dedicati a tali problemi ancora in fase preliminare e bisognosi di ulteriori approfondimenti e sviluppi, che saranno oggetto del Progetto dell'Arresto del Degrado e degli studi ad esso correlati.

2.1. Gli effetti sull'idrodinamica

Lo studio degli effetti degli interventi morfologici sull'idrodinamica lagunare costituisce la base di partenza delle attività di valutazione nel loro complesso: le modifiche al regime idrodinamico infatti, influenzano in pratica tutti gli aspetti ulteriori, dalla morfologia alla qualità delle acque alla biologia, fino alla stessa possibilità di esercitare la navigazione in condizioni di sicurezza.

Per queste ragioni è stato dedicato allo sviluppo e calibrazione dei modelli idrodinamici una parte importante delle attività mo-

dellistiche, svolte sia dal Consorzio nei suoi studi sia dalla Technital nella stesura del Progetto.

Altri elementi utili a valutare gli effetti degli interventi sull'idrodinamica sono stati ottenuti dall'esame del monitoraggio avvenuto a seguito degli interventi sperimentali di S.Spirito-Scoasse e Casse di colmata (vedi punto B).

A) Modelli idrodinamici

Vengono qui di seguito descritti i tre modelli matematici idrodinamici impiegati per lo studio degli interventi morfologici in laguna. Questi tre modelli sono:

- il modello matematico unidimensionale (nel seguito spesso brevemente indicato come 1D);
- il modello matematico bidimensionale agli elementi finiti (modello 2D-EF);
- il modello matematico bidimensionale alle differenze finite (modello 2D-DF).

Nel Progetto Morfologico sono state svolte, o sono in corso, attività di sviluppo dei due modelli bidimensionali, mentre il modello unidimensionale verrà impiegato nella versione già presentata nel Progetto REA (1).

Le caratteristiche principali e le attività di sviluppo in corso per i modelli idrodinamici sono descritte nel seguito.

Il modello matematico unidimensionale

La possibilità di riprodurre il comportamento idrodinamico della laguna con un modello unidimensionale, nel quale l'intero bacino viene descritto da una rete di canali interconnessi di opportune caratteristiche geometriche e di resistenza, deriva dalle particolarità della laguna.

La laguna di Venezia è infatti caratterizzata da una rete molto estesa e ben ramificata di canali, alcuni dei quali molto profondi, e da ampie zone di bassi fondali; i canali contribuiscono alla costituzione del volume complessivo del bacino lagunare per non meno del 60%.

Questo tipo di rappresentazione ha dei limiti tipici:

a) il modello si discosta maggiormente dalla realtà nelle zone dove il moto è prettamente bidimensionale, come accade ad esempio nella laguna centrale, caratterizzata da ampie zone a basso fondale prive di canali;

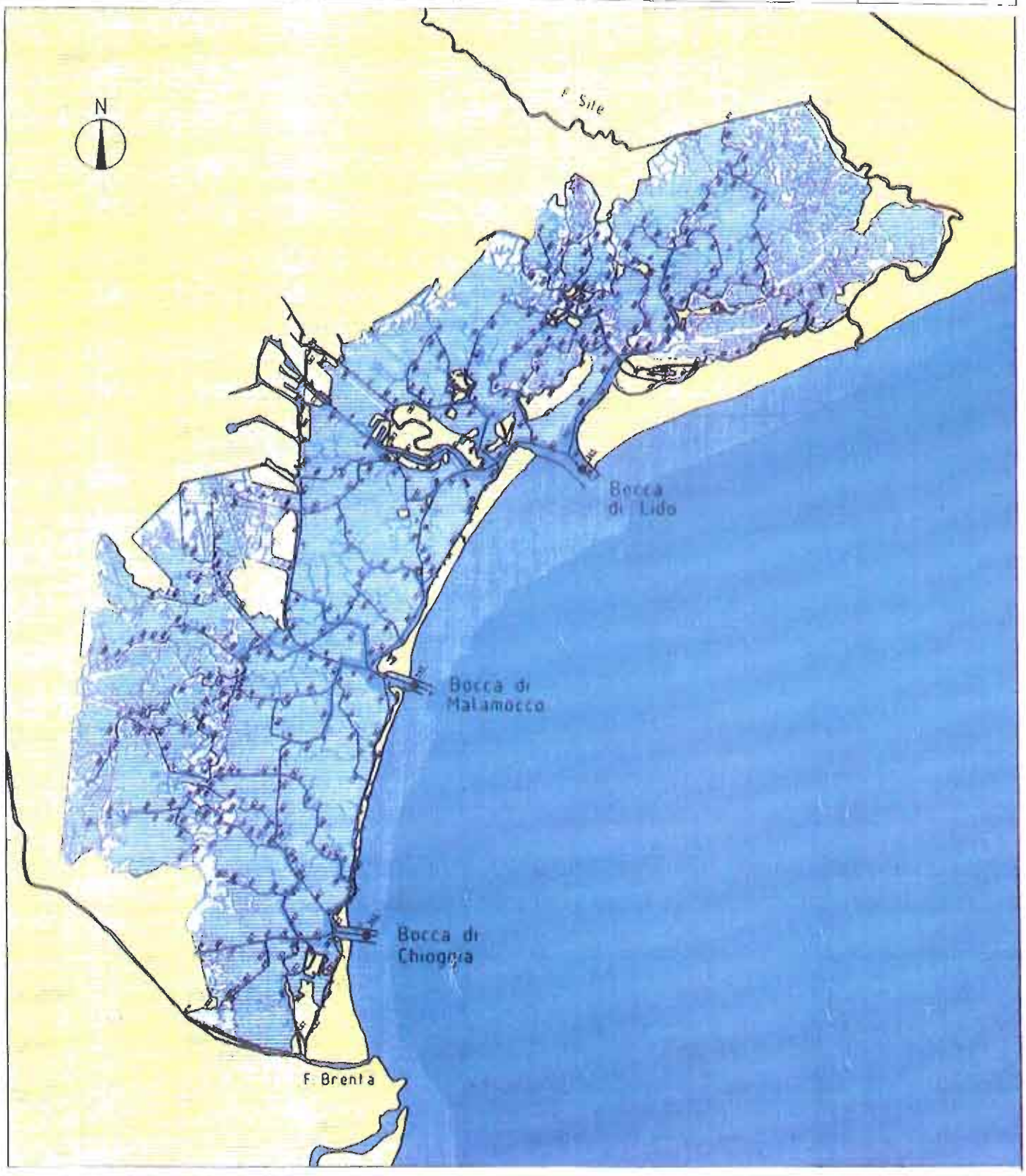
b) consente di rappresentare solo le perdite distribuite lungo i canali e non quelle concentrate in una particolare sezione, che devono essere introdotte trasformandole nelle perdite distribuite equivalenti;

c) rappresenta con difficoltà variazioni di sezione molto brusche. Inoltre non fornisce la distribuzione della velocità nella sezione trasversale dei canali, dei quali considera soltanto la velocità media.

Le caratteristiche della laguna di Venezia, ricordate più sopra, fanno tuttavia sì che il modello, nonostante queste limitazioni, risulti uno strumento di simulazione molto efficace. Esso inoltre, come già detto, è molto più maneggevole dei modelli bidimensionali, più sofisticati, e consente tempi di calcolo contenuti.

A conferma di tutto ciò lo studio dell'idrodinamica lagunare, in molte ricerche recenti, è stato affidato a modelli matematici unidimensionali.

Nel modello 1D utilizzato per il Progetto Morfologico (3), la laguna è schematizzata (fig.2.1.1) con una rete di canali formata da 323 tronchi a sezione composta.



LEGENDA

Fig. 2.1.1 - SCHEMATIZZAZIONE DELLA LAGUNA NEL MODELLO UNIDIMENSIONALE

Ogni tronco è diviso in tre parti: una parte centrale a sezione trapezoidale e due golene laterali (anche esse a sezione trapezoidale) che, a differenza di quanto consentito da altri modelli meno flessibili, possono essere poste a quota diversa in relazione ai diversi valori assunti dai fondali delle zone d'acqua o delle barene adiacenti a ciascun tronco.

Le caratteristiche geometriche dei canali e delle zone adiacenti sono state dedotte dalla cartografia dell'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque relativa al periodo 1968-72, che è il rilievo completo più recente dell'intero bacino lagunare.

Nei nodi di estremità lato mare della rete di canali, le condizioni al contorno imposte dalla marea possono essere definite in modo diverso per ciascuna bocca, in modo da tener conto di eventuali differenze del livello del mare. Il modello consente, pertanto, di evidenziare gli effetti dello sfasamento con cui l'onda di marea può presentarsi di fronte ai porti-canale di Lido, Malamocco e Chioggia.

Il modello offre, infine, la possibilità di inserire, in corrispondenza di alcuni nodi (10 complessivamente), elementi di sconnessione idraulica o fisica temporanea di una parte della rete di canali. Sono in tal modo simulabili, ad esempio, gli effetti dell'inserimento di dispositivi sfioranti a soglia fissa lungo gli argini delle valli da pesca, che mettano queste ultime in comunicazione con la restante parte della laguna quando il livello di marea supera la quota della soglia.

La verifica del modello è stata eseguita confrontando i valori calcolati con il modello con quelli misurati in corrispondenza di cinque maree: per un'analisi dettagliata di tali verifiche si rimanda ai rapporti redatti nell'ambito degli studi svolti per il C.V.N. (2).

I livelli calcolati e quelli misurati mostrano una buona rispondenza, soprattutto nei canali principali, e più in generale in tutte le zone dove i canali sono ben delineati.

Anche dai confronti delle portate alle bocche si osserva una rispondenza soddisfacente tra valori misurati e valori calcolati, nonostante alcune discrepanze relative alla bocca di Malamocco.

In generale comunque, si ritiene che il modello sia adeguato a valutare in termini relativi variazioni dovute all'effetto di interventi umani o al cambiamento di condizioni al contorno, mentre per ottenere indicazioni in termini assoluti (salvo l'esigenza di calcolare parametri statistici per lunghi periodi di tempo) si preferisce far riferimento ai modelli 2D.

Rimane infine da sottolineare che il modello unidimensionale qui sopra descritto viene impiegato come base idrodinamica del modello dispersivo undimensionale e quindi risulta indispensabile per ogni studio di valutazione della qualità delle acque nella situazione attuale ed a seguito di interventi.

Il modello bidimensionale alle differenze finite

Nella laguna di Venezia la circolazione dell'acqua è influenzata nel suo movimento dalla complessa morfologia dell'area caratterizzata da ampie zone a bassi fondali, da una fitta rete di canali naturali ed artificiali e da innumerevoli barene e velme. La circolazione è pertanto molto diversificata, l'acqua si incanala nei tratti rettilinei, ristagna tra le barene e crea leggeri ricircoli all'interno delle zone a basso fondale. Una simile situazione non viene descritta, con sufficiente precisione, dal modello idrodinamico unidimensionale ed è quindi necessario ricorrere, se si vogliono ottenere risultati più precisi localmente, ad un modello matematico bidimensionale che riproduca meglio la complessa realtà batimetrica.

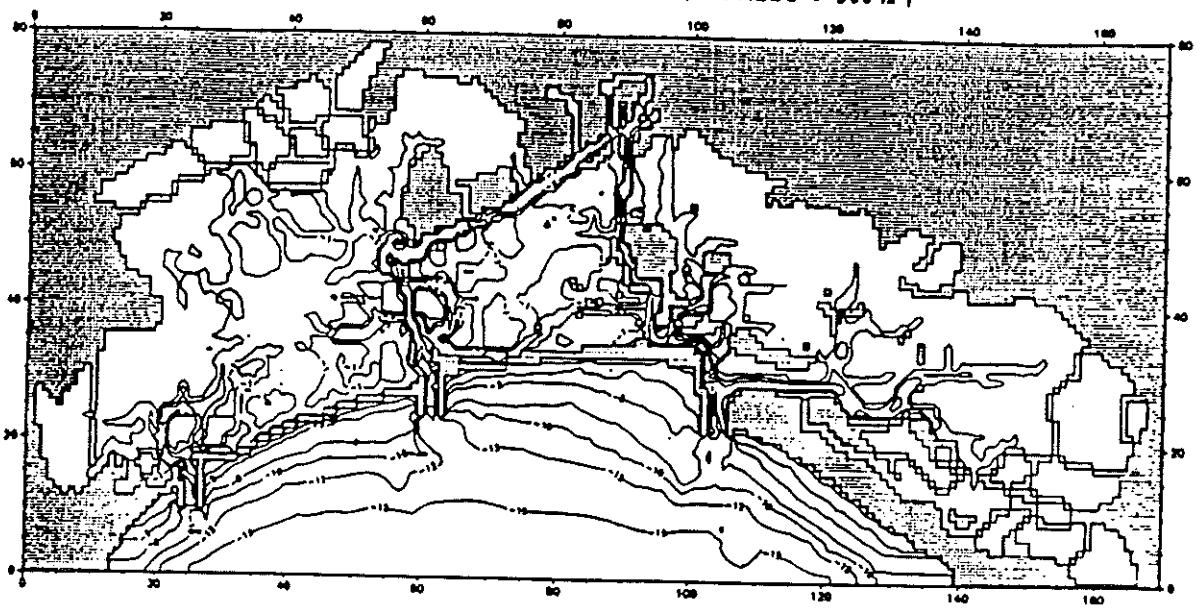
Il modello matematico idrodinamico bidimensionale presenta, rispetto all'unidimensionale, alcuni fondamentali vantaggi, che si possono così sintetizzare:

- la schematizzazione della batimetria è più vicina alla realtà;
- in zone di particolare interesse il modello consente di aumentare il dettaglio di rappresentazione sia della morfologia che delle grandezze e dei parametri idrodinamici;
- il modello riproduce il campo di moto reale con buona approssimazione; mentre infatti il modello unidimensionale descrive correttamente le correnti parallele all'asse del canale e valuta quelle trasversali solo in modo approssimativo, nel modello bidimensionale le correnti (e quindi le velocità e le portate) vengono rappresentate per ogni direzione nel piano.

Esteso all'intera laguna, il modello può quindi fornire le stesse informazioni idrometriche e idrodinamiche del modello unidimensionale, ma raggiunge precisione e definizione assai superiori soprattutto nelle zone prive di canali gerarchizzati; può inoltre individuare con la necessaria accuratezza le condizioni al contorno di zone particolari che occorra studiare in dettaglio con altri modelli.

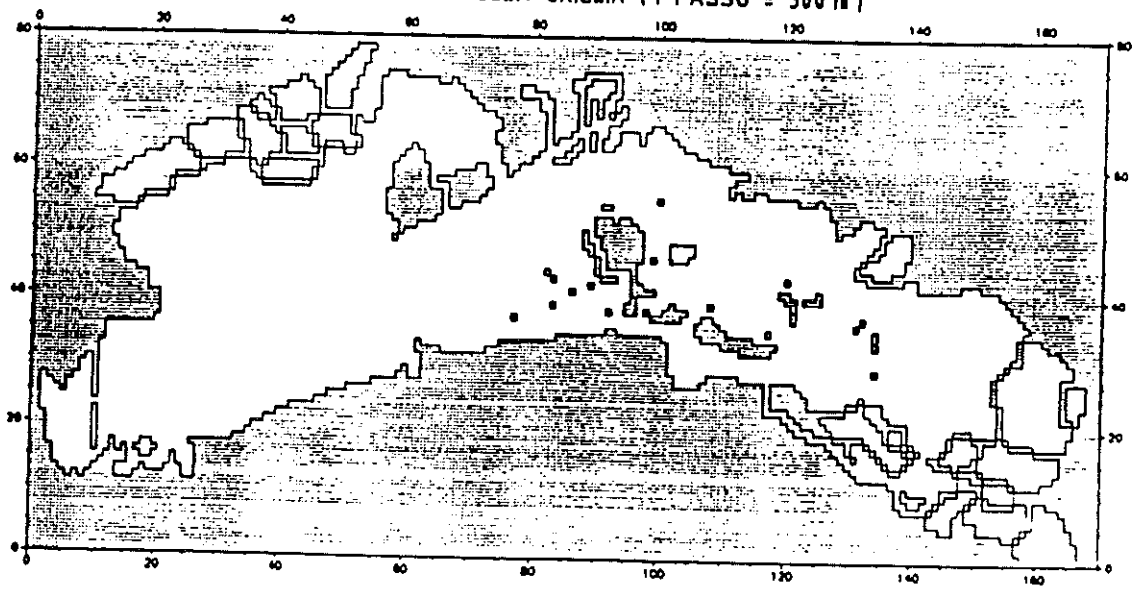
Il primo modello bidimensionale che viene qui preso in esame è quello alle differenze finite messo a punto dal Danish Hydraulic Institute nell'ambito dello studio A.2.8 (8). In fig. 2.1.2A) viene riportata la schematizzazione della batimetria riprodotta da tale modello, mentre in fig. 2.1.2B) viene presentata l'area di calcolo presa in esame. Tale batimetria è ricavata dalla carta del Magistrato del 1970. In essa sono state riprodotte anche le valli da pesca e una porzione di mare aperto che consente di differenziare le caratteristiche della marea entrante alle tre bocche. Il DHI, nell'ambito dello studio A.2.14 - 2ª fase, ha provveduto ad un aggiornamento di tale batimetria (42), tenendo conto dei risultati ottenuti nei nuovi rilievi batimetrici (bocche 1989 e laguna 1990) riportati nello studio A.2.7 - 2ª fase.

N° PASSI DELLA GRIGLIA (1 PASSO = 300 m)



A) BATIMETRIA

N° PASSI DELLA GRIGLIA (1 PASSO = 300 m)



B) AREA DI CALCOLO

Fig. 2.1.2 - SCHEMATIZZAZIONE DELLA LAGUNA NEL MODELLO BIDIMENSIONALE ALLE DIFFERENZE FINITE

Il modello utilizzato è il programma principale di un sistema integrato (SYSTEM 21) per la simulazione di variazioni di livello e portate in estuari, baie ed aree costiere e lagunari.

Per un approfondito esame delle caratteristiche generali del modello, delle equazioni e delle tecniche risolutive adottate si rimanda alla letteratura, alla documentazione specifica esistente e, soprattutto, alla relazione conclusiva dello studio A.2.8 predisposta dal laboratorio danese DHI per conto del Consorzio Venezia Nuova (8) e al rapporto intermedio dello studio A.2.14/2ª fase (42).

Il modello risolve le equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto per un moto vario bidimensionale usando un metodo di risoluzione implicito: tiene conto anche del campo di vento e fornisce i valori di tutte le grandezze caratteristiche: portate, velocità, livelli e volumi idrici. Il passo temporale di integrazione varia da 20 a 40 secondi in funzione della più o meno fitta schematizzazione impiegata.

La laguna viene descritta come un insieme di celle quadrate interconnesse, nelle quali il flusso può variare in direzione parallela ai due assi; ciascuna cella è caratterizzata da una profondità e da una scabrezza equivalenti.

Questo tipo di schematizzazione riproduce in maniera corretta bassifondi e canali che abbiano dimensioni in pianta almeno uguali a quelle della maglia, e che non siano eccessivamente ruotati rispetto ai lati di ciascuna cella.

Con una maglia di 300 m come quella approntata per il modello generale della laguna si ottengono risultati corretti in termini di velocità, portate e livelli in corrispondenza di tutti i canali principali. Nelle zone dove la rete di canali è più fitta, o la morfologia lagunare più tormentata, il modello simula ancora accuratamente i livelli, mentre non riproduce con sufficiente attendibilità velocità e portate.

Un limite così evidente impedisce la rappresentazione in dettaglio della morfologia lagunare, il modello è stato quindi messo in grado di ingrandire qualsiasi zona della laguna, cioè di infittirne la maglia. Questo accorgimento consente di ottenere, per aree di particolare interesse, anche i campi di velocità passando a una maglia con lato di 100 m o anche minore (il lato della maglia può essere ridotto di un fattore 3 per quante volte lo si ritenga necessario): tale raffittimento (maglie 100x100) è stato per ora applicato solo alle bocche (9).
È importante notare che l'applicazione del modello a zone di laguna molto estese, e ancor più l'infittirsi della maglia, comportano cospicui aumenti del tempo di calcolo.

La taratura e la verifica del modello sono state eseguite utilizzando tre maree per le quali erano disponibili rilievi idrometrici e correntometrici: i dati utilizzati sono quelli rilevati nelle campagne eseguite per conto del Consorzio Venezia Nuova nell'ambito degli studi A.2.3 e A.2.7 (4), relativi a misure topobatimetriche e correntometriche nelle bocche ed in laguna.

Per un'analisi dettagliata delle simulazioni di taratura e verifica si rimanda ai rapporti redatti nell'ambito degli studi svolti per il Consorzio Venezia Nuova (8) e (9).

Si osserva comunque che la riproduzione dei livelli è del tutto soddisfacente.

Per quanto riguarda le portate si osserva una rispondenza soddisfacente fra valori misurati e calcolati, anche se in generale è leggermente sovrastimata la portata massima a Malamocco e sottostimata quella della bocca di Chioggia. Tale discrepanza potrebbe anche derivare da un errore nelle misure o dal fatto che, mentre la schematizzazione si rifà alle batimetrie del periodo 1968-1972, le correntometrie risalgono al periodo 1985-86. L'andamento delle portate nel tempo e la concordanza della fase risultano più che soddisfacenti.

Nell'ambito dello studio A.2.14/2^ fase si è riprodotta la schematizzazione della batimetria del 1990 (6). In fig. 2.1.3 sono riportate le variazioni in termini di velocità di corrente all'interno della laguna utilizzando la batimetria del 1970 e del 1990 per un periodo di 4 cicli di marea con escursione media di 0,60 m.

Sempre nello stesso studio si è tarato nuovamente il modello tenendo conto, da un lato dei nuovi dati di corrente e livello ottenuti dallo studio C.2.3 e dall'altro dell'introduzione degli effetti del vento.

La verifica dell'inserimento del vento è stata effettuata sulla batimetria del 1970 considerando due tipiche condizioni di burrasca (velocità vento >10 m/s): quella di scirocco (vento caldo umido che soffia da sud-est (30°÷100°) e quella di bora (vento freddo e secco che soffia principalmente da nord-est (110°÷170°).

Si sono considerati tre diversi periodi di simulazione:

- 11/3 ÷ 13/3/1990 (assenza di vento);
- 25/3 ÷ 28/3/1990 (vento di bora, velocità massima 18,5 m/s);
- 26/4 ÷ 28/4/1990 (vento di scirocco, velocità massima 11 m/s).

In fig. 2.1.4A sono riportate le ubicazioni dei mareografi della laguna per cui sono stati confrontati i livelli misurati con quelli calcolati dal modello nelle tre diverse situazioni.

In fig. 2.1.4B viene riportato il confronto dei risultati per la stazione di Petta di Bo, sita in una delle zone più esposte al moto ondoso, in condizioni di assenza di vento. In fig. 2.1.5A viene invece considerata la situazione con vento di bora; come si può notare, l'inserimento degli effetti del vento consente un'approssimazione molto migliore dei dati misurati rispetto alla simulazione in cui tali effetti non sono stati inclusi. Questo miglioramento è invece meno rilevante per il caso dello scirocco (fig. 2.1.5B), ma ciò può essere dovuto al fatto che l'evento di scirocco analizzato non è molto significativo (max 11 m/s).

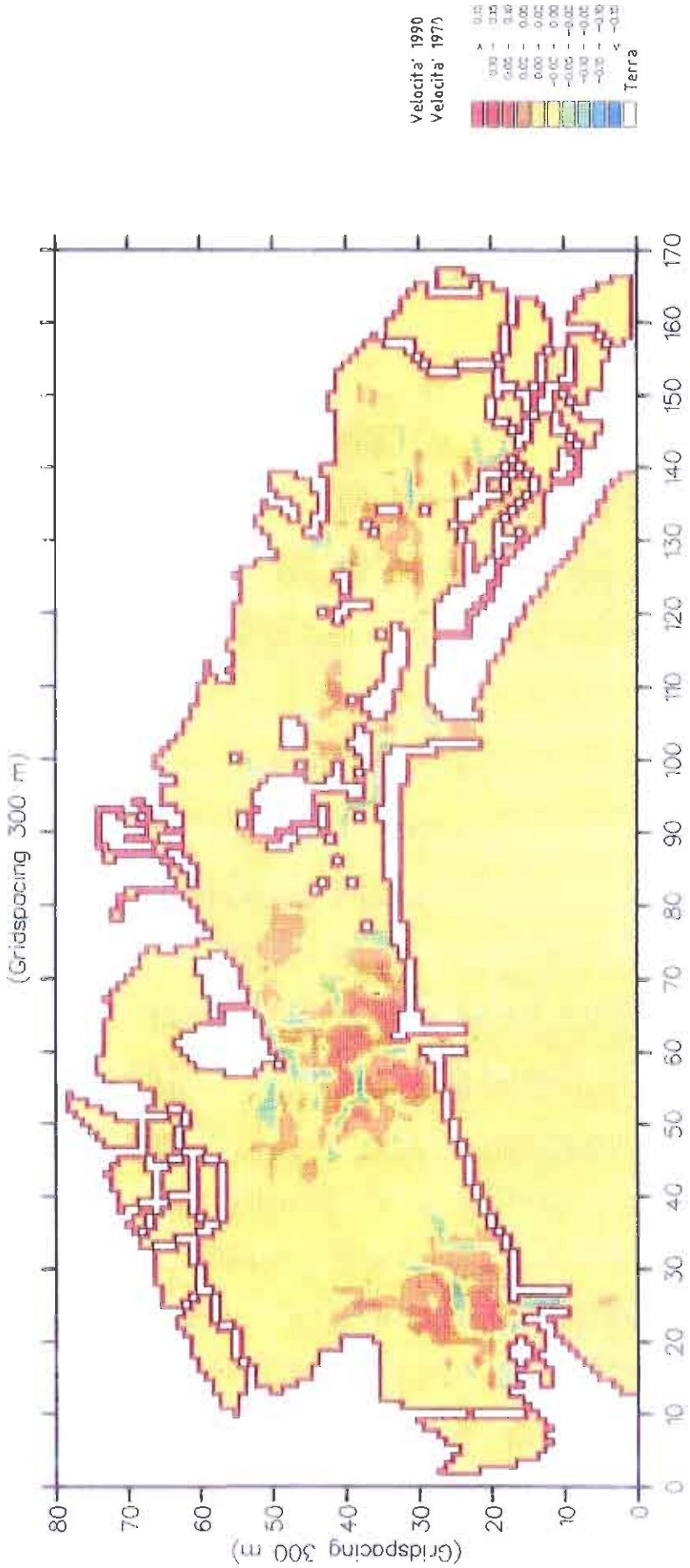


Fig.2.1.3 - MODIFICA DELLE VELOCITA' DELLE CORRENTI TRA IL 1970 E IL 1990

MODELLO DHI

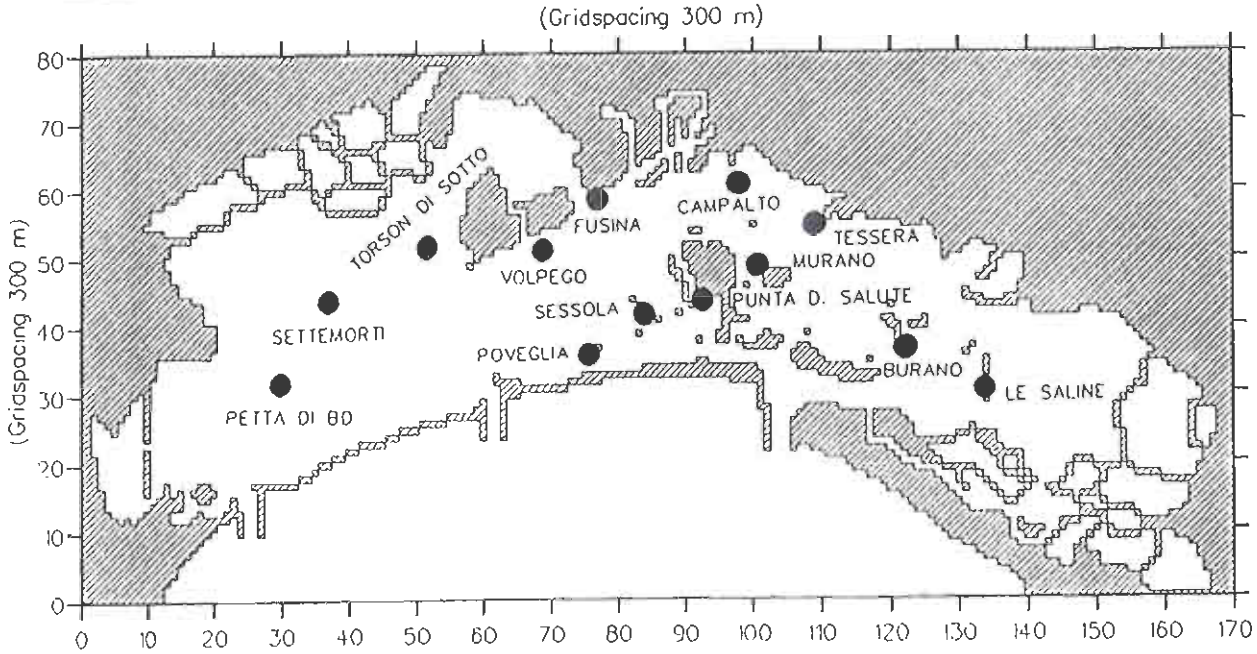


Fig. 2.1.4a - STAZIONI MAREOGRAFICHE UTILIZZATE PER LA TARATURA DEL MODELLO BIDIMENSIONALE ALLE DIFFERENZE FINITE.

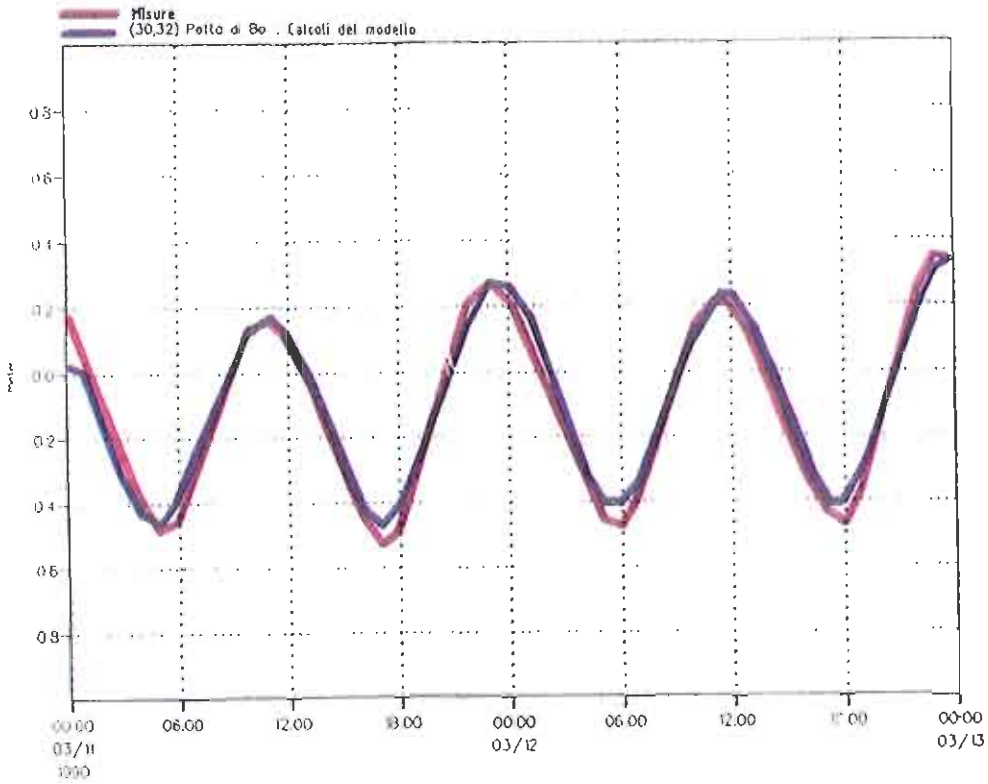


Fig. 2.1.4b - TARATURA MODELLO BIDIMENSIONALE ALLE DIFFERENZE FINITE IN ASSENZA DI VENTO.

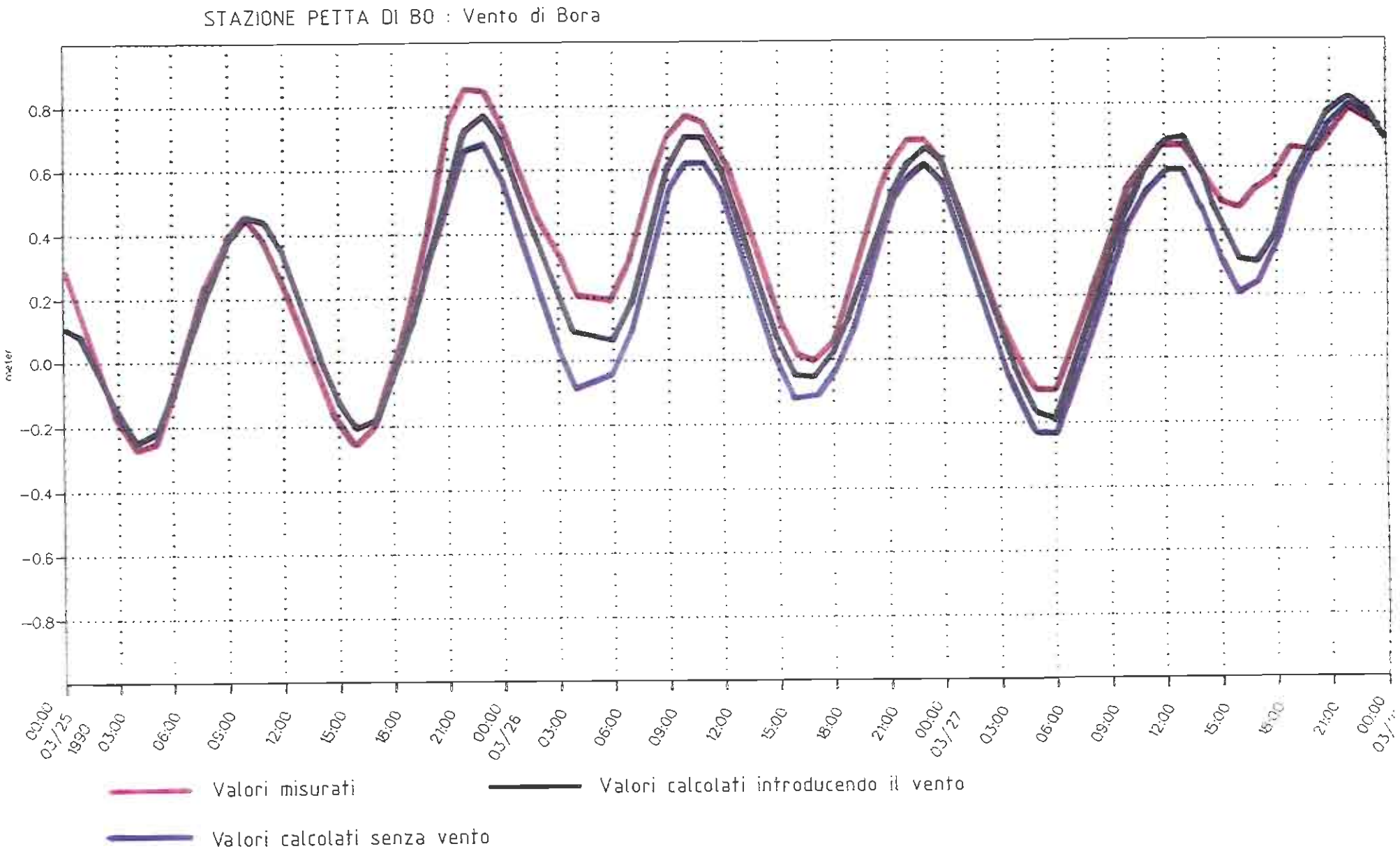


Fig. 2.1.5 - TARATURA DEL MODELLO IDRODINAMICO BIDIMENSIONALE ALLE DIFFERENZE FINITE: INTRODUZIONE DEL FATTORE DI VENTO..

Il modello bidimensionale alle differenze finite sopra esaminato, accoppiato anche al suo modulo dispersivo, è stato utilizzato dal DHI (studio A.2.14/2ª fase) per lo studio di alcuni interventi sulla morfologia (vedi Volume 7). Altri interventi sono stati parallelamente studiati da Technital con il modello bidimensionale agli elementi finiti, qui di seguito descritto.

Il modello bidimensionale agli elementi finiti

Le caratteristiche dei modelli matematici idrodinamici alle differenze finite, uni e bidimensionali, sono state esposte nei capitoli precedenti. Si è visto che il modello unidimensionale, utilizzabile per analisi statistiche a grande scala sull'idrodinamica lagunare, non riesce a schematizzare adeguatamente le ampie zone a basso fondale, e non rappresenta in dettaglio il campo di moto. Il modello bidimensionale alle differenze finite descrive in modo più accurato e preciso l'idrodinamica lagunare, anche se conserva alcuni limiti che derivano dall'impiego di una maglia quadrata equispaziata su tutta la superficie della laguna. Per riprodurre piccoli canali e dettagli batimetrici, infatti, è necessario infittire la maglia di calcolo su un'ampia area che circonda la zona di interesse; benchè questa procedura non comporti difficoltà teoriche particolari, i tempi di calcolo con il modello diventano particolarmente elevati, e non sempre proporzionati all'obiettivo dell'analisi.

Per ovviare a questi inconvenienti è stato realizzato il modello matematico bidimensionale agli elementi finiti (vedi fig. 2.1.6), che permette di affrontare più agevolmente queste situazioni e può essere inoltre utilizzato come strumento di supporto e di verifica di quello alle differenze finite. Con il modello agli elementi finiti (85) il numero dei nodi necessario per lo studio dettagliato di zone lagunari particolari può essere più contenuto rispetto al numero equivalente di nodi del modello alle differenze finite, con notevole vantaggio per i tempi di calcolo; inoltre, si può ottenere una schematizzazione delle batimetrie più aderente alla realtà, anche nelle zone morfologicamente più complesse.

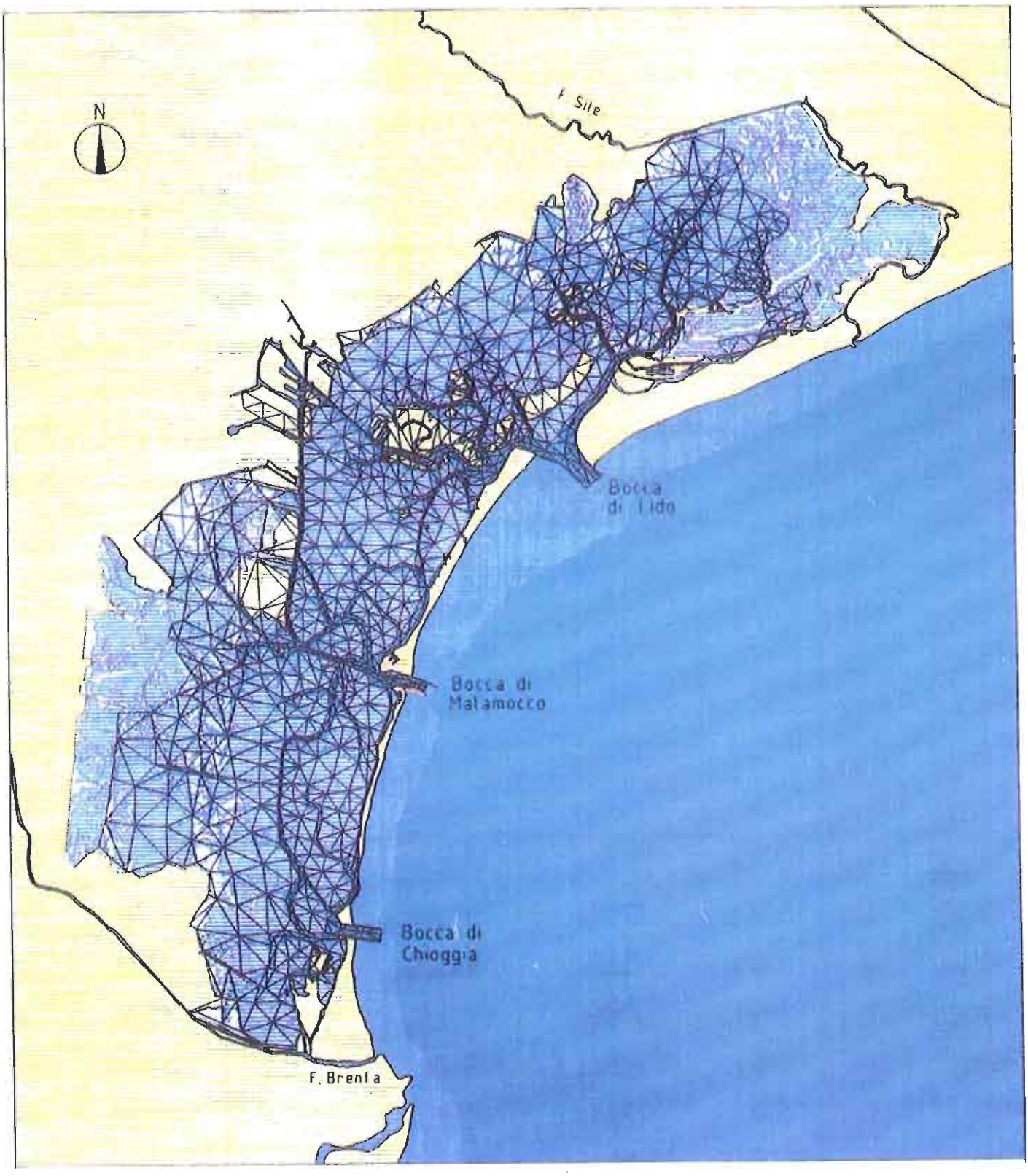


Fig. 2.1.6 - SCHEMATIZZAZIONE DELLA LAGUNA NEL MODELLO BIDIMENSIONALE AGLI ELEMENTI FINITI.
(GRIGLIA DI BASE : 2407 ELEMENTI)

Il modello consta di una serie di programmi di calcolo che risolvono agli elementi finiti le equazioni di continuità e di moto che regolano livelli e portate in aree costiere e lagunari, e utilizza uno schema semi-implicito per la risoluzione delle equazioni, in moto vario bidimensionale.

Per un esame delle equazioni poste a base della modellazione matematica e delle tecniche di risoluzione adottate, si rimanda alla letteratura esistente al riguardo, e in particolare ai lavori di Backhaus, Gray e Lynch (173)(174). Lo schema di risoluzione impiegato permette non solo di ridurre i tempi di calcolo, ma anche di utilizzare un passo di integrazione temporale elevato (300 secondi) senza ridurre la precisione dei risultati. La laguna viene schematizzata con triangoli che ne descrivono la geometria. La possibilità di definire liberamente le caratteristiche geometriche dei triangoli, che possono assumere qualsiasi forma e dimensione, permette di raggiungere in ogni zona il grado di risoluzione desiderato, con il solo limite pratico costituito dal tempo di calcolo, che aumenta con legge esponenziale al crescere nel numero dei triangoli. Nei vertici dei triangoli, che sono i nodi delle maglie schematizzate, vengono definite profondità, scabrezze e condizioni al contorno.

Per rappresentare in modo soddisfacente anche le zone di barena che vengono invase dalle maree provocando notevoli variazioni di superficie del bacino di espansione, si è introdotta nel modello la possibilità di variare la loro superficie al variare del livello raggiunto dall'acqua in laguna.

La fig.2.1.6, già richiamata, riporta la "griglia di base" utilizzata per il modello agli elementi finiti, corrispondente alla versione già presentata nel Progetto REA. La rappresentazione della maglia, anche se priva delle quote batimetriche, rappresenta in modo convincente l'aspetto morfologico della laguna. Nelle aree dove le proprietà geometriche non cambiano, come nei vasti bassifondi delle zone lontane dalle bocche, sono stati adoperati ele-

menti a grande superficie; dove, invece, le profondità o i contorni variano rapidamente, come ai bordi dei canali, triangoli di piccola dimensione ne seguono il tracciato, riuscendo a descrivere con fedeltà anche geometrie molto complesse.

La cartografia di base utilizzata per la schematizzazione è quella rilevata negli anni 1968-72 da parte dei ricercatori del Magistrato alle Acque (a tutt'oggi è ancora la rappresentazione più recente dell'intera laguna).

La taratura è stata effettuata su due maree (ottobre '86 - marzo '85) delle tre già utilizzate per la verifica del modello bidimensionale alle differenze finite.
Si è riscontrata un'ottima corrispondenza fra valori misurati e calcolati, per quanto riguarda sia l'ampiezza che la fase. I risultati sono ampliamente riportati nel cap. 6 del REA.

Per le portate si è osservata una leggera sovrastima del valore massimo a Malamocco, e una sottostima dello stesso ordine di grandezza a Chioggia, fatto questo già osservato in occasione della taratura del modello bidimensionale alle differenze finite.

Tale modello, con la schematizzazione sopra indicata, viene utilizzato come base per il modello morfologico MORMOD che considera la laguna divisa in 86 celle (vedi par. 2.3). Per lo studio specifico di modifiche idrodinamiche locali causate da alcuni degli interventi morfologici, si è invece ritenuto necessario infittire ulteriormente la schematizzazione per rappresentare in maniera più precisa alcune zone di interesse. La schematizzazione adottata è fondalmentalmente quella del modello bidimensionale agli elementi finiti della IPROS (7), con alcune variazioni per la zona delle casse di colmata, in cui sono stati introdotti, ad esempio, i canali Fiumesino e Volpego e per la zona di Millecampi.

In fig. 2.1.7 viene riportata questa schematizzazione raffittita.

Nonostante l'infittimento della rete rispetto alla schematizzazione precedente (fig. 2.1.6), si è verificata la possibilità di mantenere lo stesso passo di integrazione temporale (300 secondi): così facendo il tempo di calcolo, che pure è aumentato di un fattore 2, è comunque rimasto entro limiti ritenuti accettabili.

A seconda degli interventi morfologici previsti verranno inoltre effettuate modifiche alla schematizzazione che riguardano per lo più i livelli ai nodi, per poter tener conto di nuove barene, di tombamenti o approfondimenti di canali, ecc.; tali variazioni verranno indicate esaminando singolarmente i diversi interventi. Volta per volta si procederà anche a verificare che variazioni locali della schematizzazione non vengano a modificare le condizioni idrodinamiche in zone ragionevolmente lontane.

La taratura del modello in questa nuova schematizzazione è stata svolta inizialmente con la marea del 14-16 settembre 1970, per cui si hanno a disposizione i valori delle portate alle tre bocche misurati dal Magistrato.

La scelta della marea del 1970 come riferimento per la taratura dipende anche dal fatto che la batimetria del modello è ricavata dal rilievo batimetrico svolto in quella data.

I risultati, riportati in figura 2.1.8 sono stati soddisfacenti.

Per la bocca di Chioggia si ha una differenza fra valore misurato e valore calcolato inferiore all'1% in flusso e al 6% in riflusso, per Malamocco al 9% in flusso e al 6% in riflusso e per Lido infine, si ha una differenza inferiore al 4% in flusso e allo 0,5% in riflusso.

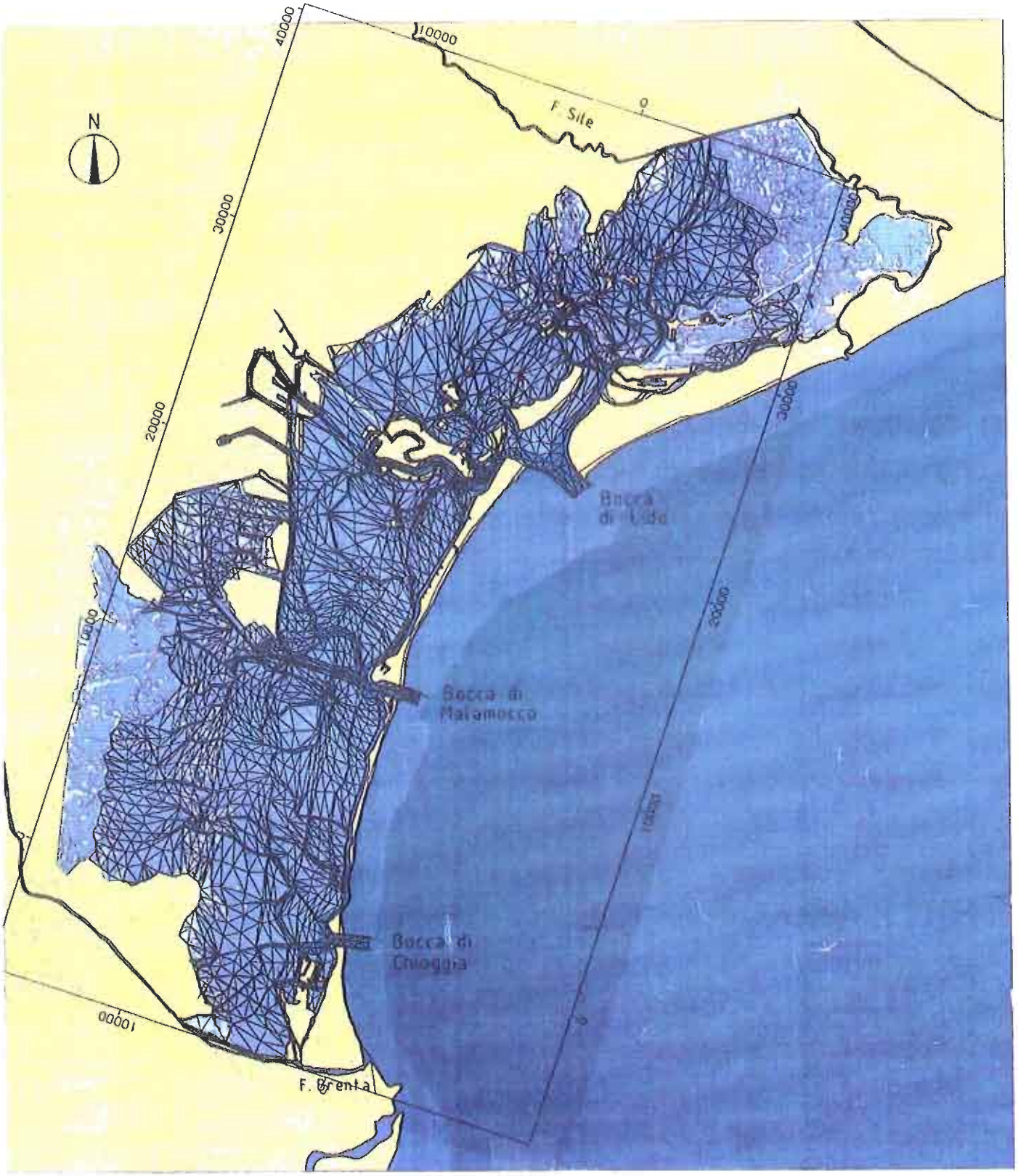
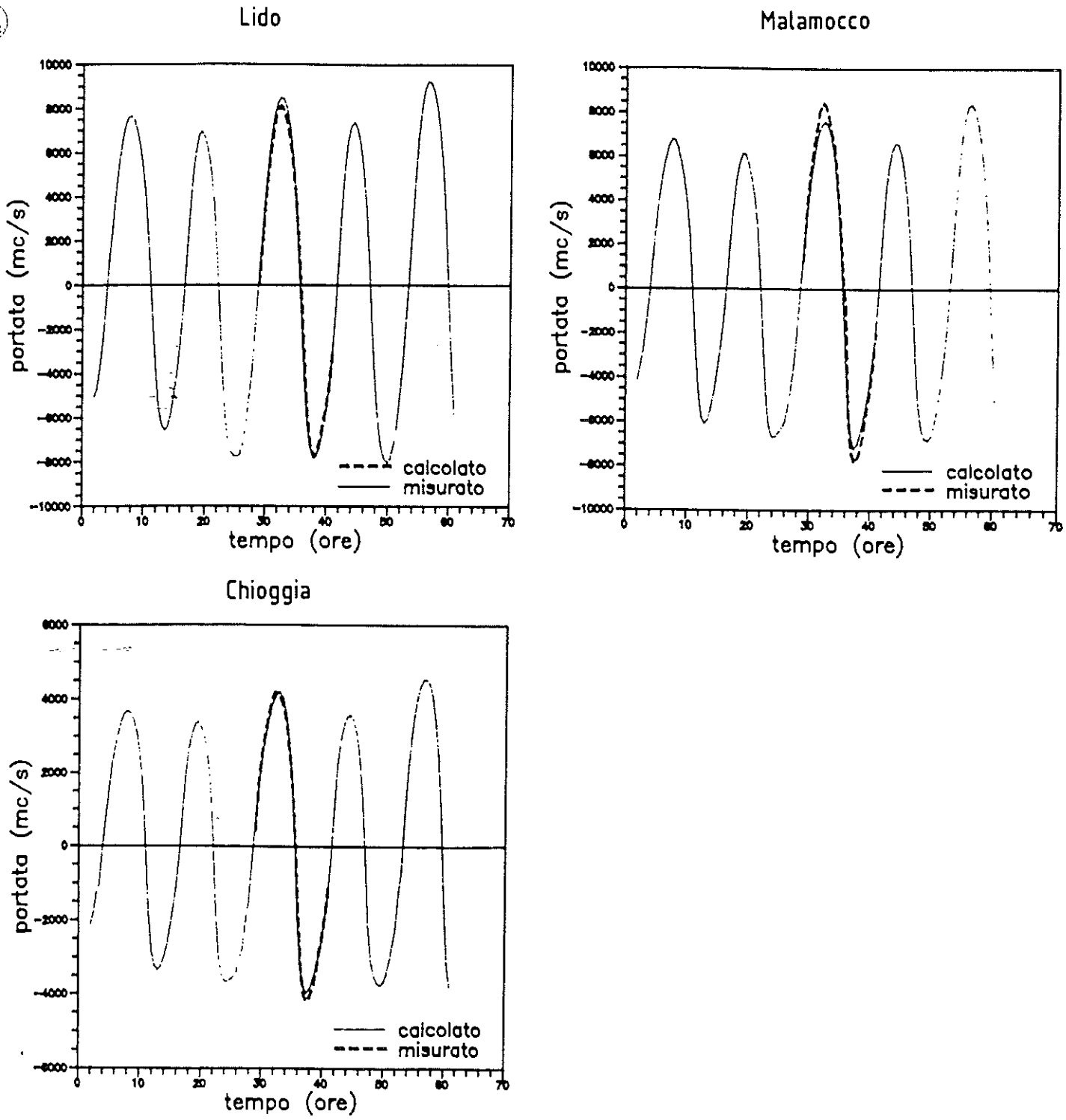


Fig. 2.1.7 - SCHEMATIZZAZIONE DELLA LAGUNA NEL MODELLO BIDIMENSIONALE AGLI ELEMENTI FINITI.
(GRIGLIA RAFFITTATA: 5304 ELEMENTI)



Nota: marea 14-16 set 1970

Fig. 2.1.8 - TARATURA MODELLO BIDIMENSIONALE AGLI ELEMENTI FINITI (GRIGLIA RAFFITTITA)
CONFRONTO TRA PORTATE MISURATE E CALCOLATE ALLE 3 BOCCHE.

Un'ulteriore verifica è stata svolta confrontando i risultati del modello con i dati di portata misurati nel periodo 1+3 marzo '85: si è ottenuto un'ottima corrispondenza tra valori misurati e calcolati alle bocche di Chioggia e Malamocco, mentre a Lido il modello sovrastima le portate di colmo; questa sovrastima si riscontra, per la stessa marea, anche nel modello alle differenze finite, e può essere in parte attribuita alle modifiche morfologiche avvenute alla bocca di Lido fra il 1970 ed il 1985 (sedimentazione di circa il 4%).

Poichè il modello verrà comunque utilizzato per confronti "relativi" (situazione con interventi rispetto a quella precedente agli interventi stessi) si ritiene comunque accettabile il grado di precisione raggiunto, rimandando l'aggiornamento delle batimetrie del modello alla fase esecutiva.

B) Dati degli interventi sperimentali

Nell'ambito degli interventi sperimentali effettuati da CVN sono stati finora conclusi:

- lavori di ripristino dei canali preesistenti nella cassa di colmata B;
- lavori di recupero morfologico-biologico dell'area compresa tra il canale delle Scoasse, il canale S.Spirito ed il canale Lazzaretto.

Il primo intervento consiste nel riaprire canali esistenti precedentemente ai lavori di colmata allo scopo di migliorare la circolazione correntizia nella zona retrostante le casse di colmata.

Lo scavo è iniziato in prossimità del lago di Corbole, tra le casse di colmata D-E e B, e proseguito verso l'interno della cassa B per circa 500 m per poi dividersi in due diramazioni, canale Volpego e canale Fiumesino che sfociano entrambe nella zona a Nord della cassa verso il lago dei Teneri.

Il secondo intervento riguarda la costruzione di velme nella zona compresa tra i suddetti canali, sia allo scopo di ripristinare un ambiente ormai scomparso, sia per favorire le correnti nei canali stessi.

Per entrambi gli interventi sono state eseguite campagne di misure correntometriche al fine di ottenere indicazioni sulle modifiche apportate alla circolazione della corrente dai nuovi lavori.

Sia per l'uno che per l'altro intervento è stata effettuata una prima campagna precedente l'inizio dei lavori, ed altre campagne posteriormente la fine dei lavori a diversi mesi di distanza per confrontare e valutare le variazioni ottenute.

Tutte le campagne sono state eseguite da Ipros per conto di CVN.

Zona cassa di colmata (fig. 2.1.9)

In questa zona sono state individuate, prima dello scavo, quattro sezioni su tre canali, interessanti la zona retrostante le casse, esattamente il canale Cunetta, il canale Lago di Console e il canale Tagliata Nuova, sul quale sono state poste due sezioni, una in prossimità di Porto S.Leonardo, l'altra in vicinanza del Lago dei Teneri, denominate rispettivamente Tagliata Nuova Sud e Tagliata Nuova Nord.

Prima di ogni campagna di misura delle portate le sezioni sono state rilevate topobatimetricamente, per valutarne le modifiche nel tempo.

Per l'acquisizione dei dati di velocità sono state individuate numerose verticali equidistanziate su cui sono stati posti un numero di punti sufficiente a fornire un adeguato profilo di velocità di corrente.

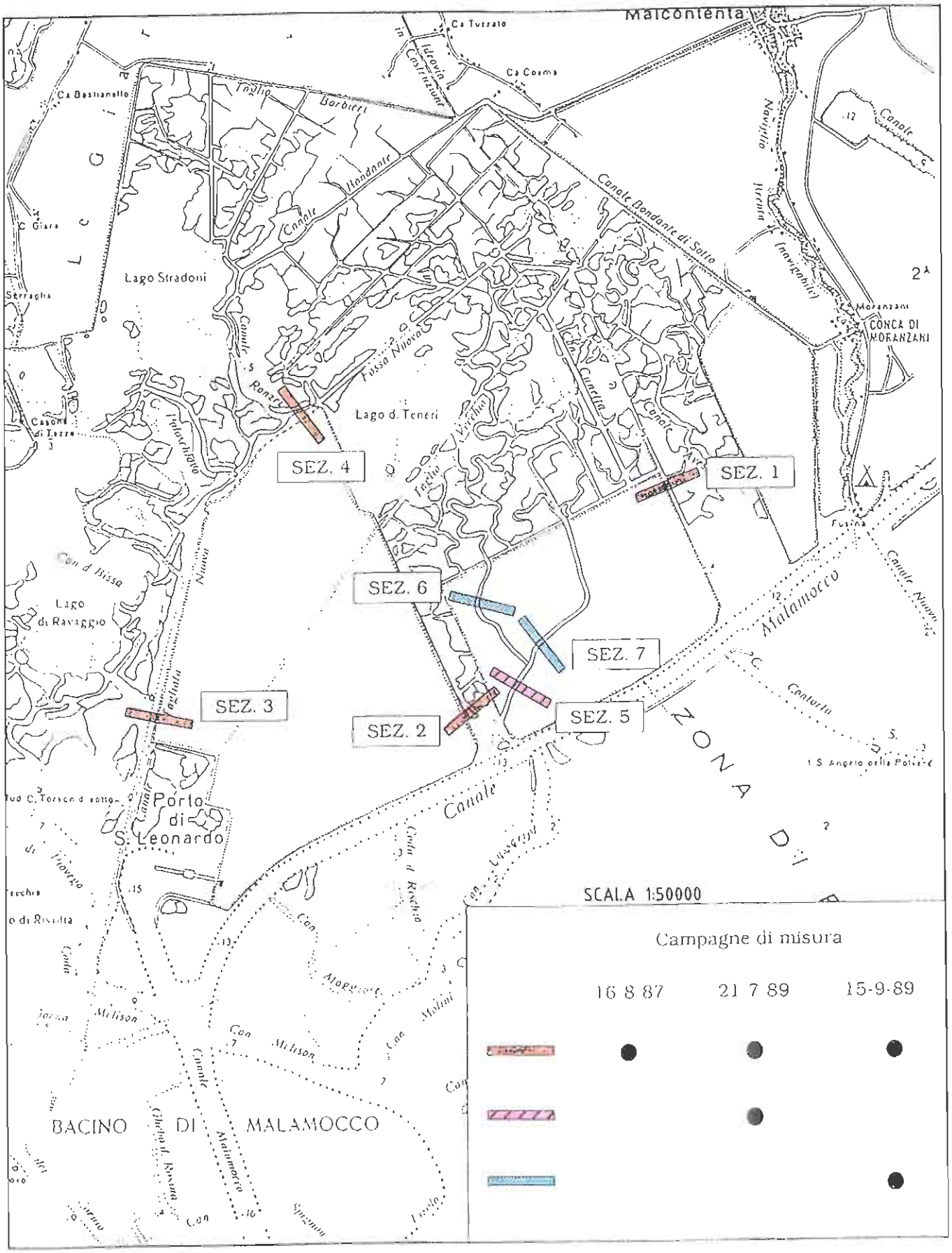


Fig. 2.1.9 - ZONA DEGLI INTERVENTI SULLE CASSE DI COLMATA: PLANIMETRIA DELL'AREA INTERESSATA DALLE CAMPAGNE DI MISURE CORRENTOMETRICHE.

Tali velocità, misurate con correntometri a mulinello, sono state rilevate per un intero ciclo di marea del periodo di sizigie, almeno 12 volte nell'arco di tale ciclo così da poter fornire con sufficiente attendibilità la curva delle portate.

Le campagne sono state svolte nelle date: 22/9/1987, 19/5/1989, 11/1/1990.

Zona Scoasse-S.Spirito (fig. 2.1.10)

Le campagne di misura di questa zona sono state eseguite contemporaneamente su cinque sezioni, due delle quali poste sul canale S. Spirito, due sul canale delle Scoasse e una sul canale Lazzaretto.

Lo scopo era quello di quantificare le portate fluenti nelle diverse fasi di marea in periodo di sizigie.

Effettuato il rilievo batimetrico delle sezioni, sono state individuate le posizioni delle verticali in cui eseguire i rilievi correntometrici, da svolgere con cinque barche.

Il numero delle verticali era non inferiore a cinque per ogni sezione di misura e le misure venivano effettuate ad intervalli non superiori a 1,5 m a partire da 0,5 m dal fondo fino a 0,5 m dalla superficie.

Ciascuna verticale è stata rilevata a scadenza di 1,5 ore per un periodo di 12 ore utilizzando correntometri a mulinello.

Le campagne sono state svolte nelle date 22/9/1987, 19/5/1989, 11/1/1990.

Risultati ottenuti

Nelle seguenti figg. 2.1.11a e b e nelle tabb. 2.1.1 e 2.1.2 sono sinteticamente riportati i risultati più significativi ottenuti dalle campagne, riguardanti le variazioni geometriche delle sezioni misurate e i parametri idrodinamici.

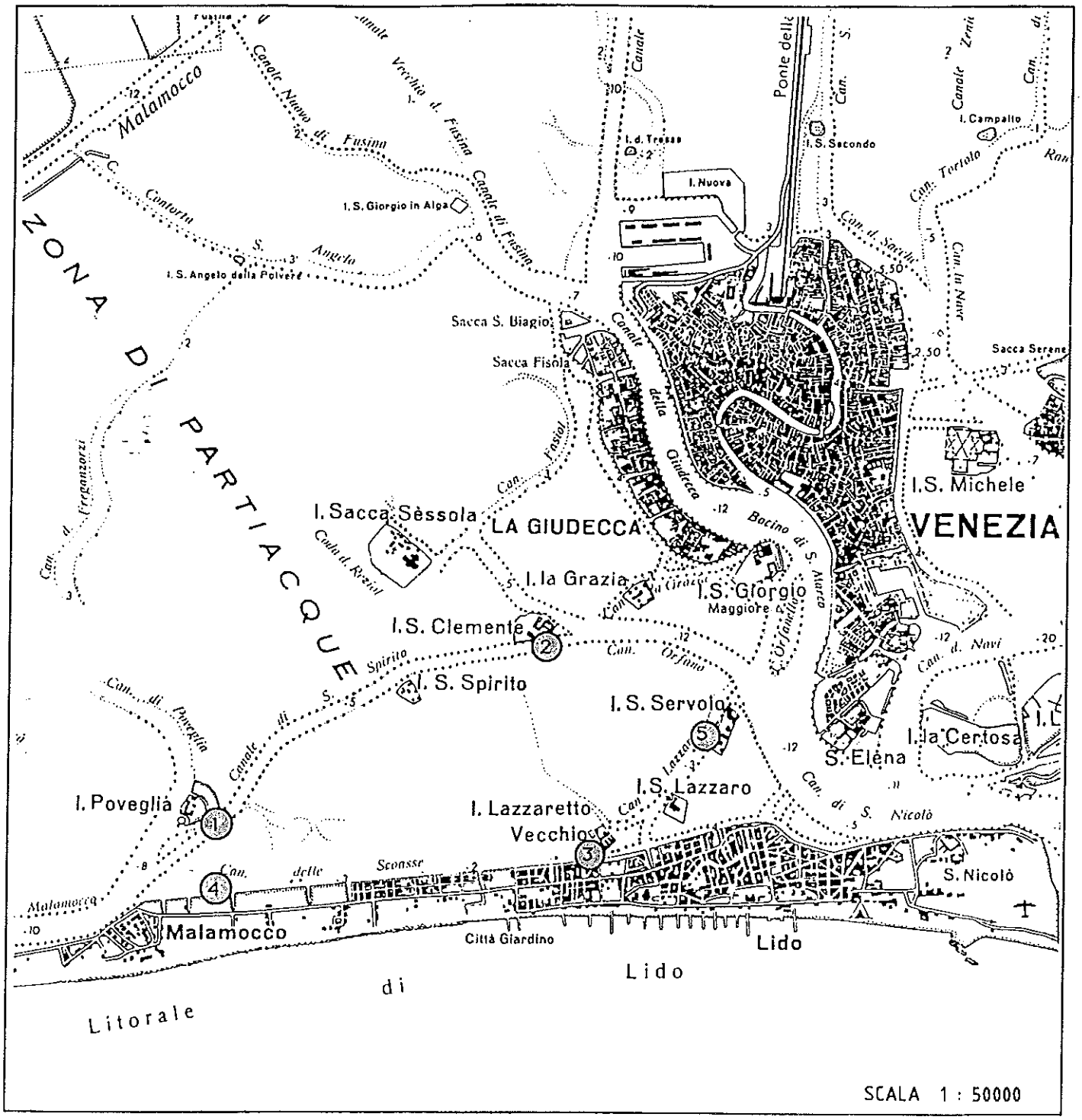


Fig. 2.1.10 - ZONA DEGLI INTERVENTI A S.SPIRITO/SCOASSE
PLANIMETRIA CON INDICATE LE SEZIONI DI MISURA.

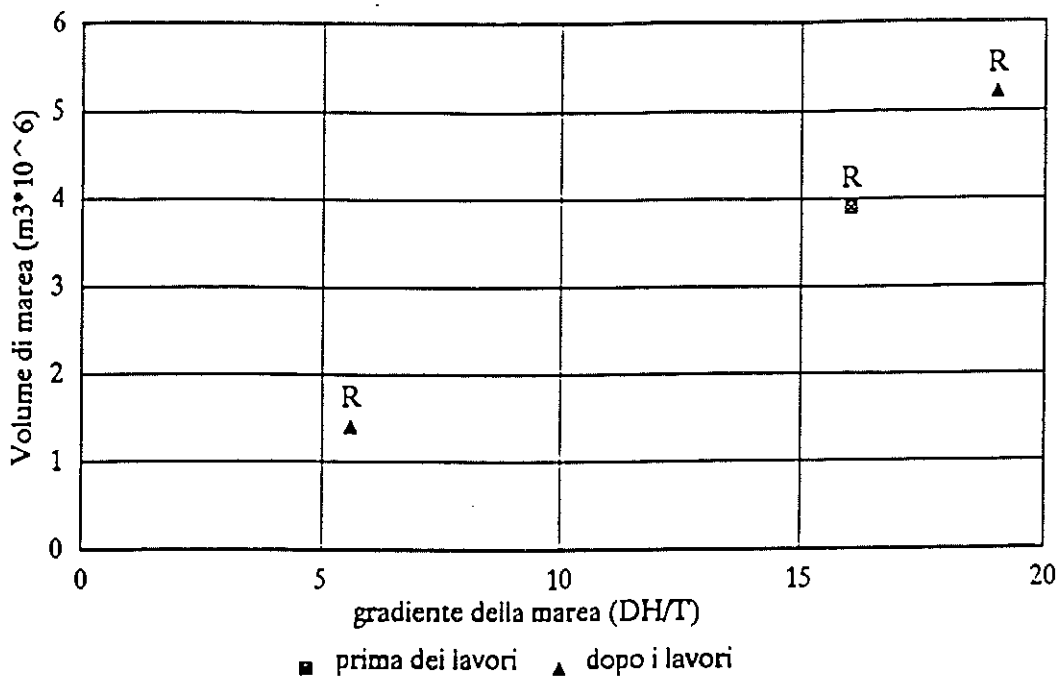
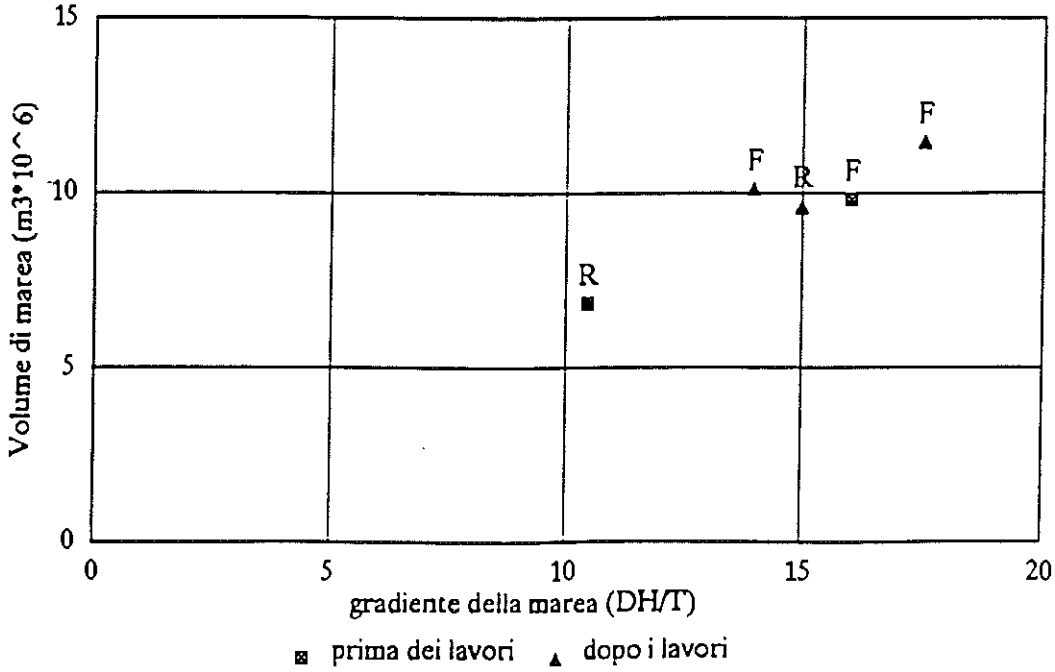


Fig. 2.1.11a - INTERVENTO SPERIMENTALE S.SPIRITO- SCOASSE
DATI DELLE CAMPAGNE DI MISURA



R = riflusso
F = flusso

Fig. 2.1.11b - INTERVENTO SPERIMENTALE CASSE DI COLMATA
DATI DELLE CAMPAGNE DI MISURA

Tab. 2.1.1: Variazione delle sezioni dei canali nella zona Santo Spirito-Scoasse (9/87-1/90)

	Sezione precedente (m^2)	Sezione attuale (m^2)	Variazione %
- Sezione 1	706	642	- 9%
- Sezione 2	556	498	-10%
- Sezione 3	172	150	-12%
- Sezione 4	229	157	-30%
- Sezione 5	233	179	-23%
Totale	1896	1626	-14%

Tab. 2.1.2: Variazione delle sezioni dei canali nella zona casse di colmata (8/87-9/89)

	Sezione precedente (m^2)	Sezione attuale (m^2)	Variazione %
- Sezione 1	258	271	+ 9%
- Sezione 2	39	29	-34%
- Sezione 3	530	493	- 8%
- Sezione 4	105	93	-13%
Totale	932	886	- 5%

Per questi ultimi sono riportati nelle figure i volumi di marea in funzione del gradiente di marea misurato per l'evento relativo.
Dai valori a disposizione per la zona di S.Spirito-Scoasse (vedi fig. 2.1.11A), relativi a fasi di riflusso, si nota, a seguito dei lavori, un leggero aumento del volume di marea scambiato a parità di gradiente; ciò in coerenza con l'obiettivo di incrementare i volumi scambiati.

Dall'esame dei dati riportati in tabella 2.1.1 si nota una riduzione media della sezione dei canali su cui sono state effettuate le misure del 14%. Non si può escludere che l'entità di questa sedimentazione sia stata incrementata da una certa dispersione dei materiali fini sversati all'interno della conterminazione delle nuove velme, durante eventi di tempesta. I canali, evidentemente

già in situazione di potenziale disequilibrio, hanno "catturato" gran parte di questi sedimenti resi disponibili dall'intervento dell'uomo. Nella fase esecutiva di nuove velme bisognerà perciò sottolineare la necessità di utilizzare materiali sabbiosi, che riducano al minimo la percentuale dei sedimenti asportati nel caso di tempesta.

Per quanto riguarda la zona delle casse di colmata, la campagna ha riguardato 5 eventi (relativi sia alla fase di flusso che a quella di riflusso) di cui due precedenti i lavori.

Dall'analisi del grafico riportato nella fig. 2.11.B è appena percettibile una lieve modifica della situazione idrodinamica in fase di flusso, modifica che comunque è nella direzione dell'obiettivo progettuale di aumentare i volumi entranti) mentre in fase di riflusso la situazione non presenta evidenti variazioni.

Interessante risulta anche l'analisi della tabella 2.1.2 in cui sono riportate le aree delle sezioni misurate durante le varie campagne. Complessivamente, le aree dei canali affluenti la zona sono diminuite di circa il 5% con una punta del 34% per il piccolo canale lago di Corbole a cui viene sottratta grande quantità di portata con l'escavo del nuovo canale che si immette nello stesso punto del Canale Malamocco tra le casse di colmata D-E e B.

L'unica sezione contro tendenza è la sezione 1, Cunetta che aumenta la propria area del 9%.

2.2. Gli effetti sul moto ondoso

Essi saranno valutati con modelli matematici le cui finalità sono essenzialmente due:

- calcolo delle altezze d'onda (nella situazione attuale e a seguito di interventi) in corrispondenza di manufatti particolarmente soggetti all'attacco ondoso: in quest'ambito il moto ondoso può essere considerato il risultato finale dell'indagine;

- calcolo su tutta la laguna delle altezze d'onda, considerate come "forza attiva" per il sollevamento dei sedimenti: qui il calcolo del moto ondoso costituisce in pratica un dato di input per la modellazione del trasporto solido e quindi dell'evoluzione morfologica.

Anche nel caso dei modelli di moto ondoso, come per i modelli idrodinamici, vengono sviluppati nell'ambito del progetto strumenti con diverso grado di dettaglio.

In particolare, sono previsti due modelli:

- un modello semplificato (preparato da Technital) che calcola il moto ondoso all'interno della laguna sulla base di soli tre parametri: l'intensità del vento, la lunghezza del fetch nella direzione di provenienza del vento stesso e la profondità media della laguna nella stessa direzione;
- un modello più sofisticato (preparato dal DHI nell'ambito dello studio A.2.14/2ª Fase) che tiene conto del fenomeno di generazione e propagazione del moto ondoso lungo tutti i punti della direttrice di propagazione, considerando localmente i fenomeni di attrito sul fondo, generazione dovuta al vento, rifrazione dovuta al fondale e alle correnti.

I due modelli e le loro previsioni di impiego sono nel seguito descritti.

Modello TCH (WASH = WAve in SHallow water)

Questo modello semplificato si può considerare un modello di tipo statico: calcola infatti la distribuzione del moto ondoso su tutta la laguna al termine di una determinata situazione di vento, senza ricostruire nel tempo l'evoluzione del moto ondoso stesso. Ci si riferisce in altri termini ad una condizione che si potrebbe nominare, mutuando dal termine inglese "Full arisen sea", "laguna pienamente sviluppata".

Le equazioni su cui si basa il modello sono le seguenti:

- equazioni SPM per il calcolo del fetch efficace nella direzione del vento, a partire dalla "rosa" delle lunghezze del fetch geografico;
- equazioni di Bretschneider, sempre proposte dallo SPM, per il calcolo di altezza d'onda e periodi significativi nelle zone a basso fondale, a partire dalla lunghezza del fetch efficace, dalla profondità media della laguna lungo il fetch stesso e dall'intensità del vento;
- equazioni di Stokes, al primo ordine di approssimazione, per il calcolo delle caratteristiche idrauliche dovute al moto ondoso sul fondale;
- equazioni di Jonsson per il calcolo della tensione tangenziale sul fondale, a partire dalla scabrezza del materiale di fondo e dalle condizioni idrauliche sopra calcolate.

La successione delle quattro equazioni sopra riportate viene gestita da un processo in automatico, impostato sulla stessa griglia coordinate-profondità predisposta per il modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti, facilitando così il processo di verifica di configurazioni susseguenti ad interventi: gli interventi stessi infatti potranno venire riprodotti su una sola schematizzazione utilizzata poi per diversi modelli.

La gestione automatica del modello "WASH" può prevedere il calcolo del modo ondoso in una griglia di punti fitta a piacere: come esempio, si riporta nella figura 2.2.1 una griglia di calcolo i cui punti sono equidistanziati di 2000 metri (87 punti di calcolo sull'intera laguna).

Si ricorda, per concludere, che le equazioni fondamentali del modello (quelle di Bretschneider per il calcolo del moto ondoso) sono state positivamente verificate con dati sperimentali ottenuti dalle campagne di misura della primavera del 1990 (Studio C.2.3), come dimostra l'esame della figura 2.2.2 che ripropone dati già presentati nel capitolo 2.

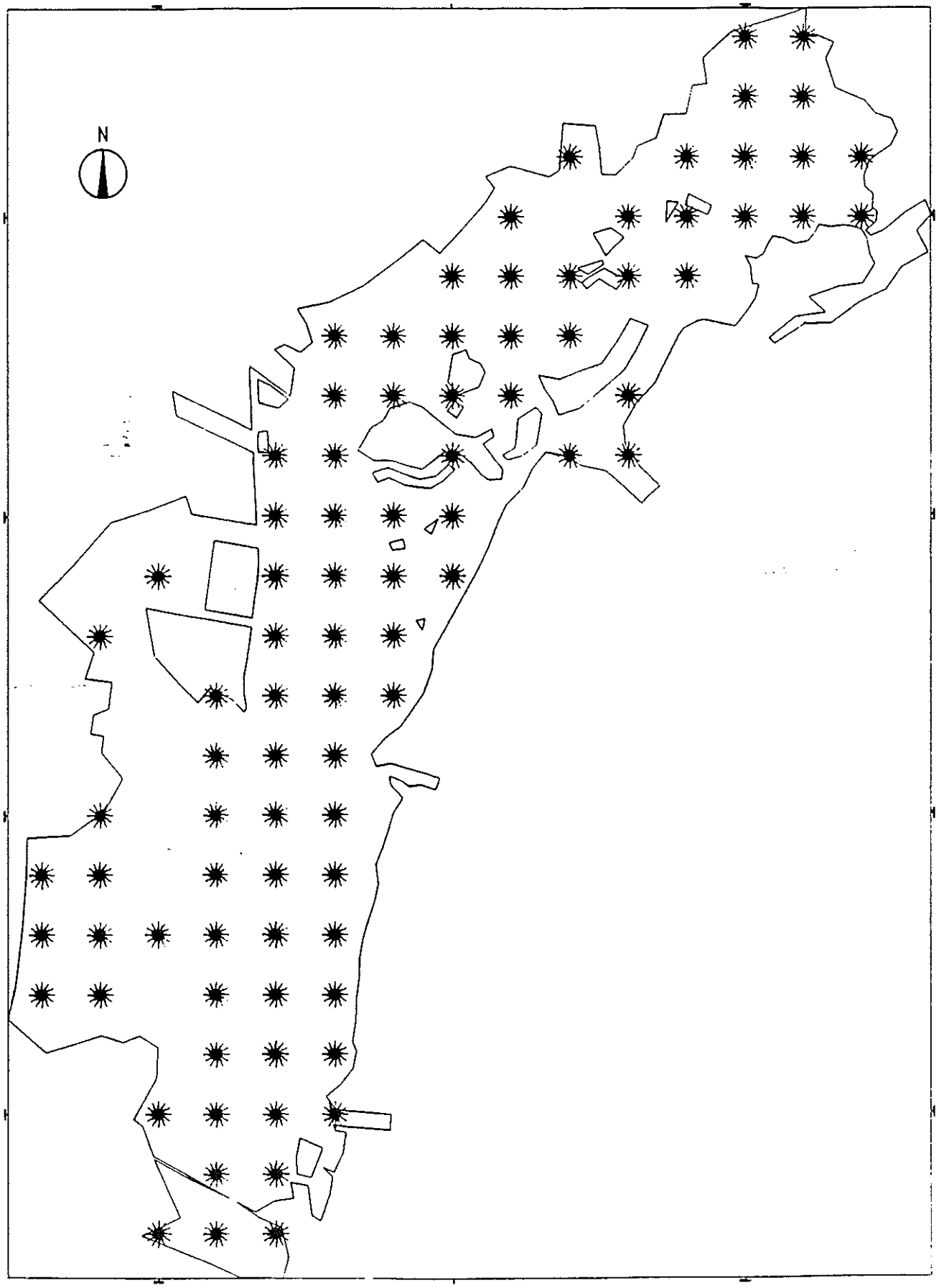
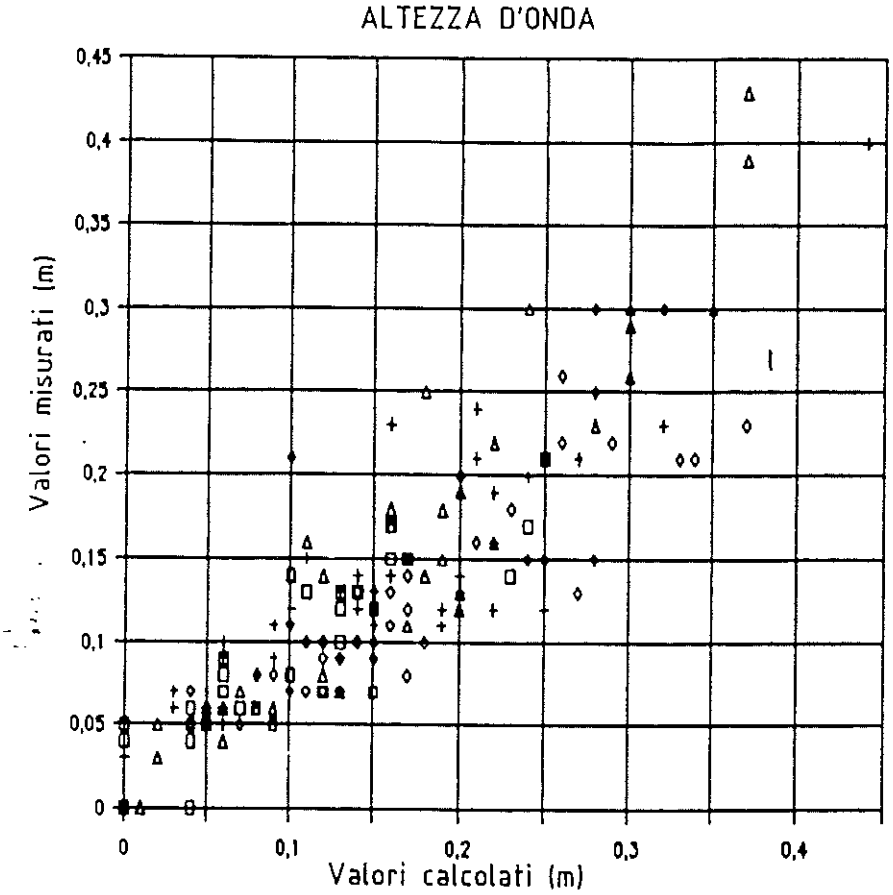
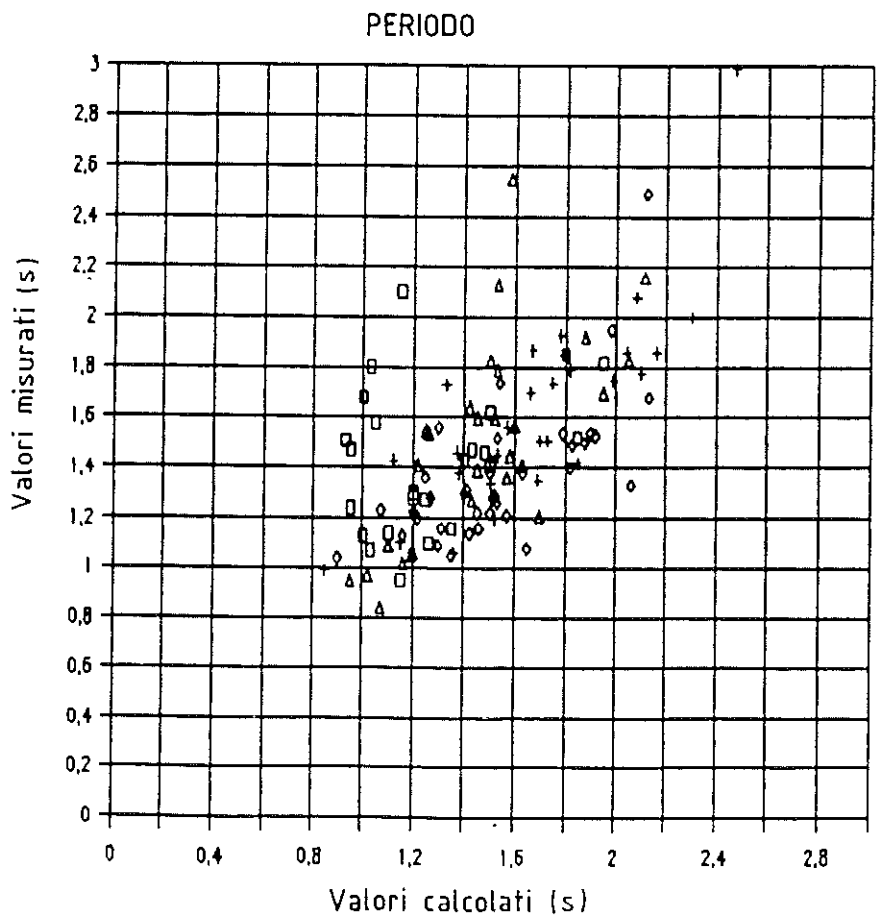


Fig. 2.2.1 - GRIGLIA DEI PUNTI DI CALCOLO PER IL MODELLO WASH





LEGENDA:

- □ ZONA 1
- + ZONA 2
- ◊ ZONA 4
- Δ ZONA 5

NOTA:
Per la localizzazione vedi volume 3

Fig. 2.2.2 - CONFRONTO TRA RISULTATI DEL MODELLO "WASH" E VALORI MISURATI

Modello DHI (MIKE20 NS)

Si tratta di un modello sofisticato, in grado di calcolare nel tempo la crescita e quindi il decadimento del moto ondoso, tenendo conto degli effetti di generazione per il vento, rifrazione, shoaling, frangimento e dissipazione sul fondo.
Il modello è di tipo spettrale: tiene conto quindi dell'interazione di onde aventi differenti frequenze.

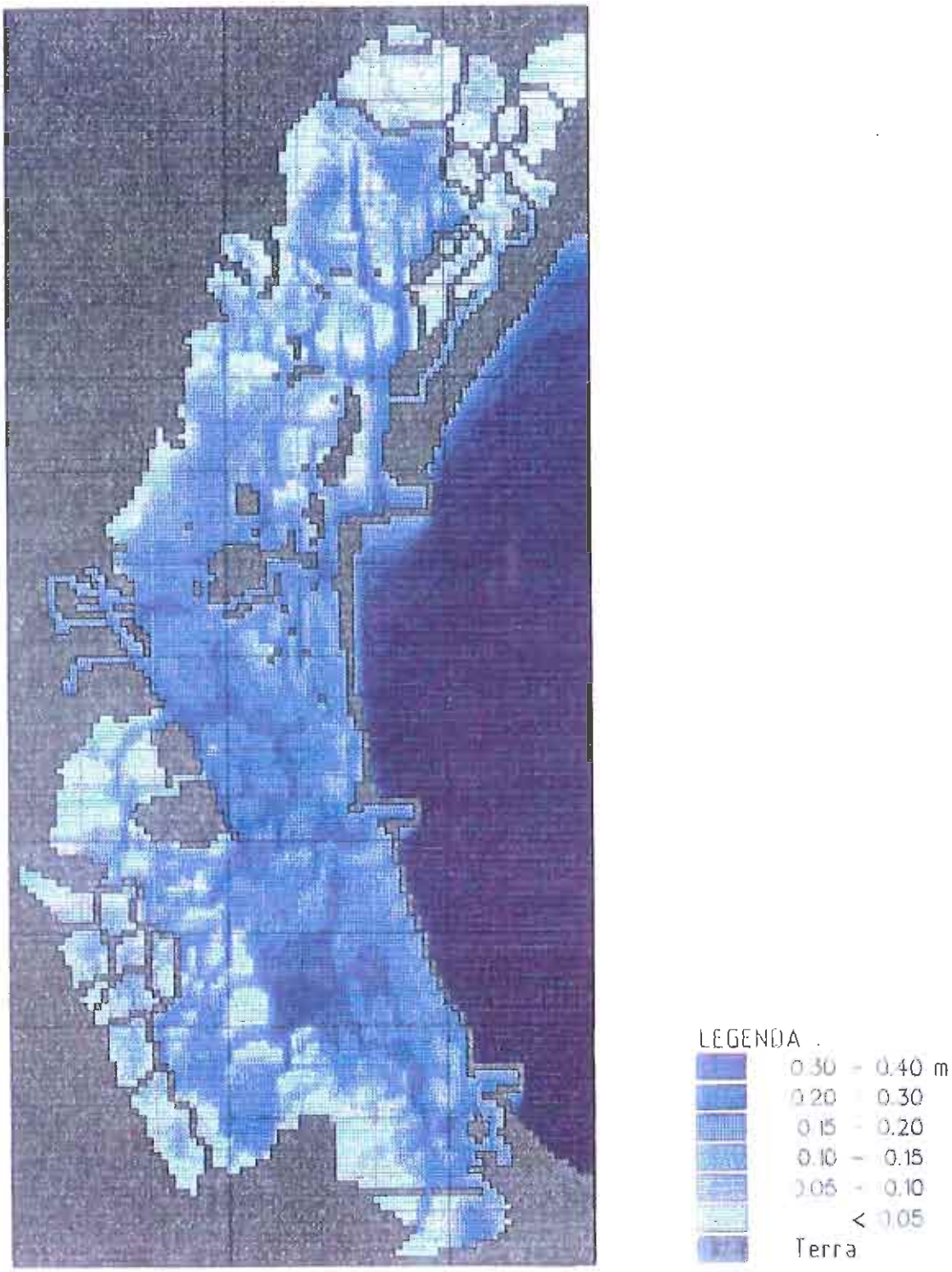
I parametri di "input" al modello sono la batimetria, la scabrezza dei fondali, il campo di vento e le condizioni di moto ondoso al contorno. I parametri di "output" sono l'altezza d'onda significativa, il periodo medio dell'onda e la direzione media dell'onda.

Il dettaglio spaziale dei parametri calcolati è lo stesso del modello idrodinamico del DHI, ovvero con distanze di 300 metri tra due punti attigui. Questo notevole dettaglio è reso necessario anche perchè i dati di moto ondoso costituiscono, insieme a quelli di corrente, direttamente l'input per i successivi modelli di trasporto solido, basati sulla stessa griglia.

La calibrazione del modello è stata effettuata utilizzando i rilievi ottenuti nella campagna di misura intensiva eseguita nello studio C.2.3. Il parametro valido nella calibrazione è stato la scabrezza dei fondali.

La verifica è stata eseguita per differenti eventi di bora con velocità del vento variabili da 4 m/s a 20 m/s: i risultati ottenuti dalle simulazioni risultano in buon accordo con i dati sperimentali. Le figure 2.2.3 e 2.2.4 mostrano i risultati del modello rispettivamente per un evento di bora (velocità del vento 14 m/s) e di scirocco (13 m/s).

Una descrizione più dettagliata di questo modello è riportata nel Rapporto intermedio dello studio A.2.14/2^ fase (42).



Nota : Simulazione effettuata con il modello di moto ondoso del DHI MIKE 20NS

Fig.2.2.3- DISTRIBUZIONE IN LAGUNA DELLE ALTEZZE D'ONDA NEL CASO DI UN EVENTO DI BORA.

LEGENDA :

- 0.30 - 0.40 m
- 0.20 - 0.30
- 0.15 - 0.20
- 0.10 - 0.15
- 0.05 - 0.10
- 0.05
- Terra

Nota : Simulazione effettuata con il modello di moto ondoso del DHI MIKE 20 NS

Fig. 2.2.4 - DISTRIBUZIONE IN LAGUNA DELLE ALTEZZE D'ONDA NEL CASO DI UN EVENTO DI SCIROCCO.

Modalità d'uso dei due modelli

A grandi linee, si prevede di utilizzare il modello semplificato TCH per tutte le analisi di sensibilità svolte durante il lavoro di scelta della soluzione progettuale, dedicando invece il più sofisticato ed oneroso modello DHI alla verifica delle configurazioni di progetto.

Ovviamente, come già detto, il modello DHI sarà impiegato anche, in cascata con altri modelli, per i calcoli svolti dal DHI stesso del trasporto solido in laguna durante alcuni eventi tipici da bora e da scirocco.

2.3. Gli effetti sulla morfologia

L'importanza della valutazione degli effetti dei diversi interventi sulla morfologia ha determinato l'esigenza di predisporre una serie di strumenti matematici in grado di quantificare tali effetti con crescenti gradi di approssimazione, applicabili via via che sarà dettagliata la fase progettuale.

Sono stati messi a punto sia strumenti semplificati, in grado di fornire indicazioni valide in prima approssimazione e a grandi linee, sia modelli matematici più dettagliati, di cui alcuni preparati dal Danish Hydraulic nell'ambito dello studio A.2.14/2^ fase, in grado di calcolare fenomeni di trasporto ed evoluzione dei fondali con maggior precisione spaziale.

Gli strumenti sono:

- un modello semi-empirico ("EVOSEC") che considera correlazioni su basi sia teoriche che sperimentali tra Q_{max} e A (portata massima nel ciclo di marea sizigiale/area delle sezioni) per le bocche ed i canali interni;
- un modello di bilancio dei sedimenti a tre celle ("EVOLAG-3") riguardanti le principali categorie morfologiche lagunari (bas-

sifondi, canali e bocca), ciascuna delle quali considerata come un'unica cella all'interno di ogni sottobacino lagunare;

- un modello di bilancio di sedimenti multicelle ("MORMOD"), in grado di seguire l'evoluzione di diverse zone aventi, dal punto di vista dell'idrodinamica e della morfologia, caratteristiche omogenee;
- un modello di trasporto di sedimenti e, in cascata, un modello di bilancio (messi a punto dal DHI) che si basano su una griglia di 300 m, quindi con un grado di dettaglio spaziale più elevato rispetto ai modelli sopraelencati.

I modelli sono nel seguito brevemente descritti.

A) Modello TCH di calcolo dell'evoluzione delle sezioni dei canali "EVOSEC"

Riferimenti teorici e sperimentali

La sperimentata esistenza di correlazioni tra le sezioni delle bocche o dei canali lagunari e i volumi di marea transitanti in tali sezioni in condizioni erosive 'ricorrenti' (ovvero nella marea ordinaria di sizigie) costituisce un esempio tipico di come le categorie morfologiche tendano ad adeguarsi a una situazione di equilibrio dinamico tra forze attive e forze di resistenza.

Tali correlazioni sono state dapprima ipotizzate e quindi sperimentalmente verificate per le bocche lagunari.

Storicamente, la prima pubblicazione al riguardo è stata quella di O'Brien del 1969 (153) in cui fu presentata la relazione $A=K\ V^{0.85}$ con A area della sezione di bocca in m^2, V volume di marea in m^3 e K coefficiente da definire in base ad altri parametri, quali il trasporto litoraneo e le caratteristiche dei sedimenti.

Questa relazione, ottenuta per via teorica in riferimento a una schematizzazione molto semplificata, è stata confermata da una

estesa ricerca sperimentale svolta da Jarrett ((154) 1976), su numerose bocche lagunari delle coste americane dell'Atlantico, del Pacifico e del Golfo del Messico. In base a questi dati sperimentali, Jarrett ha stabilito una relazione corrispondente a condizioni medie tra tutti i casi esaminati, ottenendo:

$$A = 9 \times 10^{-4} \times V^{0,85}$$

con A espressa in metri quadri e V in metri cubi a ciclo mareale.

La legge indicata fornisce, in modo chiaro, una sicura dipendenza fra le due grandezze, mentre in termini assoluti le stime che se ne traggono sono da considerare con estrema cautela: la dispersione dei dati sperimentali è infatti notevole (il rapporto tra il valore inferiore e il valore superiore della fascia fiduciaria che contiene l'80-85% dei dati sperimentali è circa 2.5), dal momento che la legge non tiene conto:

- del trasporto litoraneo;
- del coefficiente di resistenza idraulica della bocca che in generale dipende dalla particolare forma della bocca, dalla scabrezza del fondo e, in misura più limitata, dall'attrito laterale causato dall'eventuale presenza di dighe. Poichè le forme di fondo che determinano la scabrezza della bocca sono poco variabili da luogo a luogo, Bruun ha espresso il coefficiente di resistenza in funzione dei soli parametri geometrici;
- della granulometria dei materiali di fondo. Questa limitazione non ha probabilmente effetti importanti per le bocche che hanno materiali di fondo relativamente simili (sabbia), mentre è molto più importante per i canali interni.

Inoltre il volume del prisma di marea per ciascuno dei casi esaminati da Jarrett è stato calcolato in modo approssimato moltiplicando l'escursione di marea per la superficie della laguna. Si osserva infine che la legge di Jarrett descrive situazioni di equilibrio senza fornire alcuna indicazione sul tempo richiesto per raggiungere l'equilibrio. Quest'ultima grandezza, come si è visto nell'esame dell'evoluzione storica delle bocche lagunari, è forte-

mente influenzata, tra l'altro, dalle caratteristiche del materiale che costituisce il fondale.

Un'impostazione più completa a livello teorico della correlazione tra sezione di bocca e volume di marea è stata recentemente proposta da Marchi (69) sulla base dell'ipotesi che il fondale di una bocca lagunare sia, mediamente, in equilibrio quanto la tensione tangenziale al fondo (τ_o) in condizioni di massima capacità erosiva ricorrente (corrispondente al massimo di velocità in maree di sizigie), eguagli la tensione limite di trascinamento (τ_{cr}) del materiale che costituisce il fondale.

Nelle ipotesi che l'andamento delle maree segua una legge sinusoidale, e che la sezione della bocca sia molto larga (larga al punto da poter esprimere il raggio idraulico come rapporto tra l'area e la larghezza della sezione) si ottiene il seguente rapporto fra la area della sezione A (m^2) e il volume del prisma di marea V (m^3):

$$A = K\ V^{0,857} \qquad (1)$$

con:

$$K = \left(\frac{\pi^2\ \gamma\ b^{1/3}}{K_s^{\ 2}\ \ T^2\ \tau_{cr}}\right)^{3/7} \qquad (2)$$

dove:

b = larghezza della sezione

K_s = coefficiente di scabrezza di Strickler

T = periodo della marea

γ = peso specifico dell'acqua.

E' interessante rilevare come la formula fornisca risultati molto vicini all'espressione suggerita da Jarret per valori dei parametri rappresentativi di condizioni locali molto comuni nelle bocche lagunari. Per esempio, con b = 500 m, T = 12 ore = 43200 s, τ_{cr} = 4 N m^2 si ottiene:

Per $K_s = 30\ m^{1/3}\ s^{-1}$ $\qquad K = 10,6 \times 10^{-4}\ m^{-4/7}$

Per $K_s = 35\ m^{1/3}\ s^{-1}$ $\qquad = 9,4 \times 10^{-4}\ m^{-4/7}$

Per $K_s = 40\ m^{1/3}\ s^{-1}$ $\qquad = 8,3 \times 10^{-4}\ m^{-4/7}$

mentre per Jarrett il valore medio è $K = 9 \times 10^{-4}\ m^{-4/7}$.

La formula, inoltre, fornisce indicazioni significative sulla sensibilità della sezione di bocca alle variazioni dei parametri cosiddetti 'secondari' (nell'ipotesi cioè di mantenere costante il volume di marea, ritenuto parametro 'primario'). Si ottiene ad esempio che:

- un incremento della scabrezza del 16% (K_s da 35 a 30) comporterebbe un incremento della sezione di circa il 12%;
- una riduzione della larghezza da 700 m a 500 m (del tipo di quella verificatasi a Malamocco e a Chioggia con la costruzione dei moli) comporterebbe una diminuzione della sezione del solo 5%;
- una riduzione del trasporto solido litoraneo da valori importanti a valori trascurabili (in grado di determinare, secondo Bruun (152), una riduzione della tensione limite di trascinamento fino al 20%) comporterebbe un aumento della sezione dell'8%.

Sulla base delle indicazioni sopra riportate, le variazioni dei parametri secondari provocate, non dovrebbero comportare una modifica della sezione d'equilibrio superiore al 10-15%, e ciò comunque solo nel caso di interventi importanti, come la costruzione dei moli alle bocche. Ciò conferma la validità dell'impiego della formula di Jarrett per individuare la tendenza associabile a una variazione importante del volume di marea.

Per interpretare l'evoluzione delle bocche nel passato, quindi anche in periodo in cui il trasporto litoraneo aveva la sua importanza, è utile ritornare sulla formulazione teorica di Marchi, approfondendo l'analisi delle possibili variazioni della tensione tangenziale sul fondo, τ_o.

La tensione tangenziale al fondo (τ_o), come è noto, è legata al coefficiente di resistenza di Chezy (C) attraverso la relazione:

$$\tau_o = V^2/C^2 \cdot \rho g$$

dove:

V = velocità massima in condizione di sizigie (superata nell'1% dei casi);

ρ = densità del fluido

g = accelerazione di gravità

Secondo Bruun (152), in analogia con il risultato della già citata trattazione di Marchi, la sezione della bocca è determinata dalla tensione limite di trascinamento (tensione critica) che dipende dalle caratteristiche del materiale di fondo.

Anche il valore del coefficiente di Chezy, d'altra parte, viene fatto dipendere, da Bruun, dalla sezione della bocca A adottando:

$$C = 30 + 5 \log_{10} A$$

La possibilità di esprimere il fattore di Chezy solo in funzione della sezione della bocca, già discussa precedentemente, è stata evidenziata da Bruun a partire dall'osservazione che per molte bocche lagunari alcuni parametri che intervengono nel calcolo di C siano costanti, e in particolare:

- il fattore C dipende principalmente dalla granulometria del materiale di fondo, dall'eventuale ondulazione del fondale in presenza di corrente, dall'allineamento del canale e dalla sua profondità;
- i tratti di canali di accesso alla laguna sono in genere relativamente rettilinei, e sono composti da materiali di fondo con una distribuzione granulometrica poco variabile attorno al valore tipico;
- il fondale dei canali delle bocche presenta in genere formazioni di fondo molto simili.

Se si applicano le due precedenti relazioni alle attuali sezioni delle bocche della laguna introducendo i valori di velocità media massima ottenuti dai modelli matematici idrodinamici, si ottengono i valori della tensione tangenziale al fondo di tab. 2.3.1.

Tab.2.3.1: Confronto della tensione tangenziale al fondo τ_o calcolata con i valori di equilibrio proposti dal Bruun

Bocca	τ_o Flusso (N/m^2)	τ_o Riflusso (N/m^2)	Range dei valori di equilibrio proposti da Bruun
Lido	3	3.6	a) Trasporto litoraneo nullo o limitato: 3.5÷4.5
Malamocco	4.1	4.4	
Chioggia	3.7	3.9	b) Trasporto litoraneo importante: 5-5.5

Nella medesima tabella è anche indicato il "range" dei valori di tensione tangenziale che secondo Bruun definiscono lo stato di equilibrio delle bocche lagunari che hanno sedimenti con granulometria di 0,15 ÷ 0,3 mm.

Dall'esame della tabella si rileva che, nei periodi in cui il trasporto litoraneo invece era maggiore (ad esempio a Lido prima dei moli) la tensione tangenziale d'equilibrio era maggiore e quindi, sulla base delle formulazioni di Marchi, la sezione in equilibrio con il volume di marea era più piccola, dato questo confermato dai rilievi sperimentali.

L'esame della struttura della formula teorica ricavata da Marchi ha fatto ritenere che lo stesso tipo di approccio potesse essere esteso dalle bocche lagunari (per le quali, come visto, si dispone già di numerosi dati sperimentali a conferma) all'insieme dei canali interni.

Anche per i canali infatti vale, in linea di principio, l'ipotesi in base alla quale la profondità della sezione tenderà a disporsi in modo da determinare uno stato di equilibrio tra tensioni tangenziali al fondo e tensioni critiche.

Nel caso dei canali interni non può essere più valida però l'assunzione che le tensioni critiche mantengano valori pressochè costanti, assunzione che per le bocche era motivata dalla sostanziale uniformità dei sedimenti di fondo.

Per i canali invece, che hanno granulometrie tra loro molto diverse si è ritenuto indispensabile integrare le formule (1) e (2) esprimendo la tensione critica in funzione di un parametro sperimentale di facile determinazione, ovvero il granulo medio del materiale di fondo D_{50}.

Su questo approccio è stato costruito un modello matematico semplificato per il calcolo dell'evoluzione delle sezioni dei canali a seguito di variazioni idrodinamiche, modello denominato "EVOSEC".

Tale modello consente di calcolare l'area di equilibrio dei canali interni A, tenendo conto sia dei volumi di marea in essa transitanti in condizioni di sizigie, sia degli altri parametri considerati influenti, e cioè:

- la larghezza del canale
- il coefficiente di scabrezza di Strickler
- la granulometria dei sedimenti. Essa, tramite formule analitico-sperimentali ottenute dalla letteratura più recente (91), è stata legata direttamente allo sforzo tangenziale critico, mediante una relazione del tipo

$$\tau_{cr} = K_1 + K_2 D_{50} \qquad (3)$$

in modo da introdurre il parametro nella formulazione desunta da Marchi.

Per calibrare le formule costituenti il modello, è stata condotta un'analisi per le bocche e per i principali canali lagunari distinti per bacino di appartenenza, mettendo in correlazione la portata massima nel ciclo di marea e l'area di equilibrio così calcolata.

Per il calcolo della portata massima si è utilizzato il modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti con una marea sinusoidale di 1 m di ampiezza e di periodo 12 ore.

I dati sono riportati nella fig. 2.3.1, separatamente per le 3 bocche, mentre nella fig. 2.3.2 la fascia dei valori calcolati è posta in confronto con la relazione suggerita da Jarret per le bocche: si osserva in particolare che le sezioni di equilibrio di tutti e tre i bacini si dispongono in una fascia abbastanza ristretta e secondo una linea tendenziale leggermente al di sotto di quella di Jarret.

Interpretazione dell'evoluzione passata

Bocche lagunari

La discussione è svolta separatamente per le tre bocche, con riferimento ai rilievi sperimentali descritti nel Volume 2.

Per le bocche l'interpretazione dell'evoluzione è fattibile sulla base della sola formula di Jarrett, tenendo presente le correlazioni tra trasporto litoraneo e tensione critica esposte da Bruun.

Bocca di Lido

L'andamento della sezione della bocca di Lido nel tempo può essere ben motivato con riferimento alle considerazioni teoriche sullo equilibrio dinamico tra volumi di marea e sezioni riportate nei paragrafi precedenti.

Nel periodo 1800-1871, infatti, delle condizioni al contorno rimangono sostanzialmente invariate, e la sezione di gola della bocca di Lido non subisce modifiche significative.

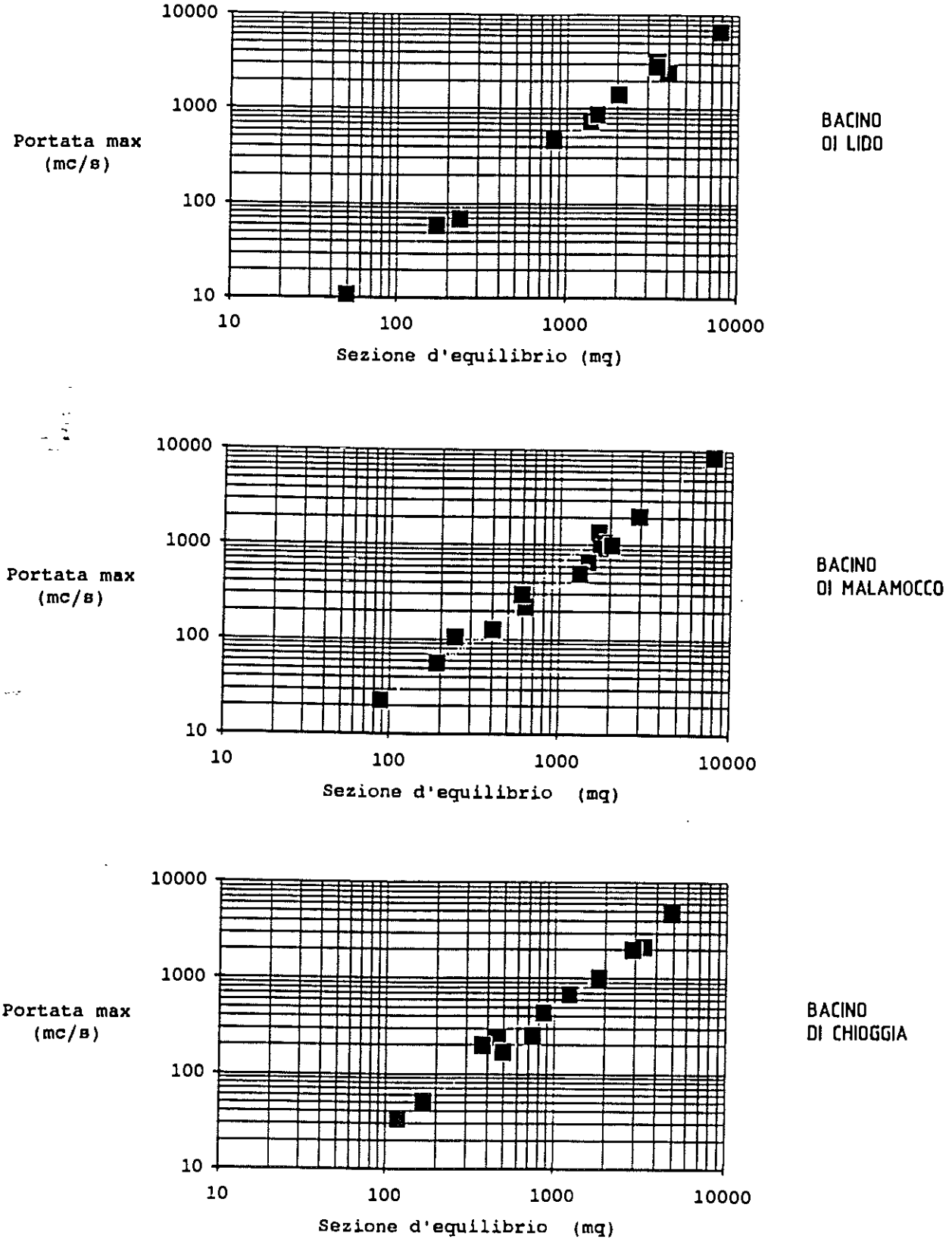


Fig. 2.3.1 - MODELLO EVOSEC-RELAZIONE TRA PORTATA MASSIMA E SEZIONI D'EQUILIBRIO DEI PRINCIPALI CANALI INTERNI DISTINTI PER BACINO DI APPARTENENZA

NOTA : PORTATA MASSIMA IN CONDIZIONI DI MAREA TIPICA DI SIZIGIA (ΔH= 1m e T= 12 ore)

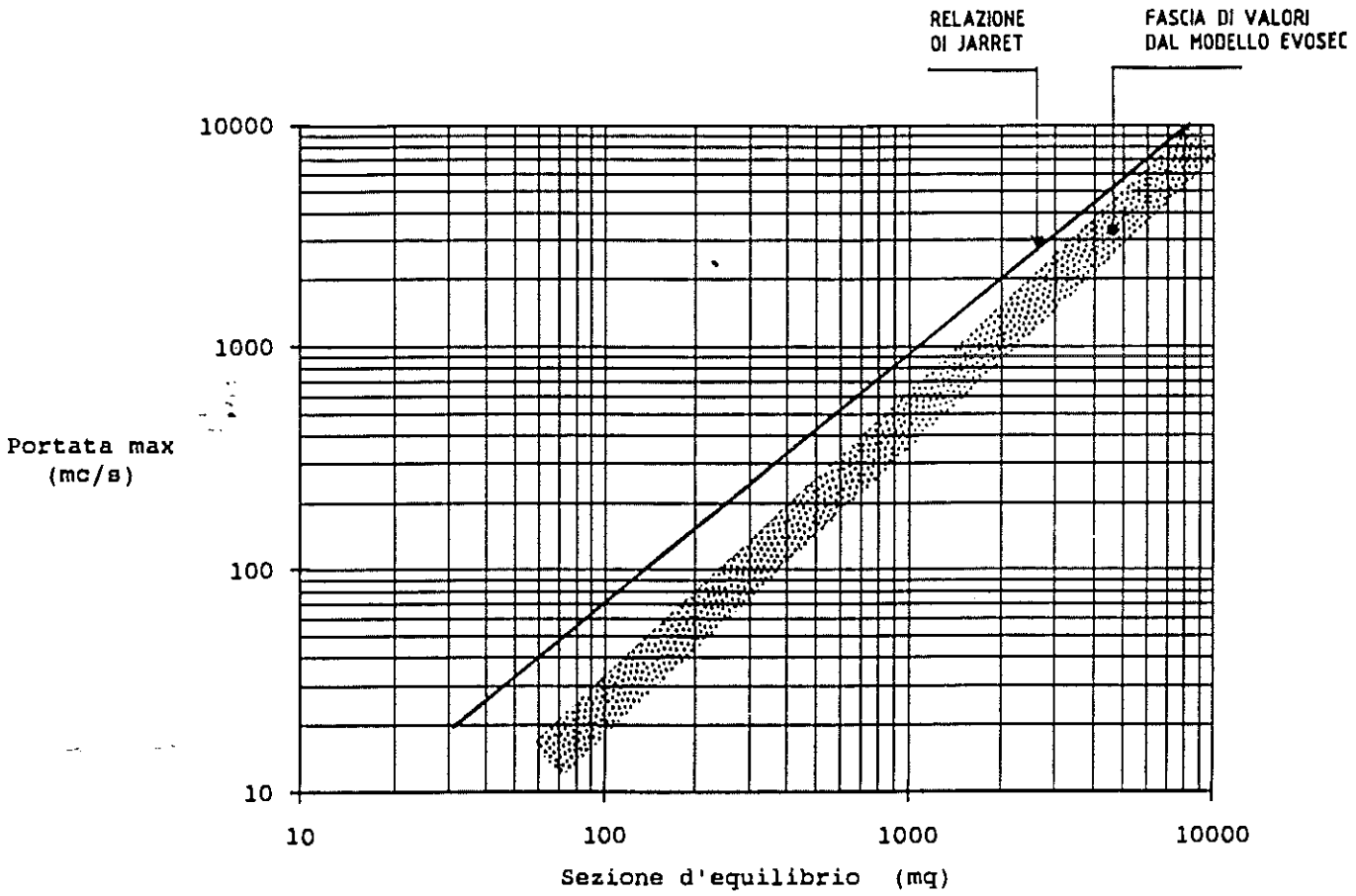


Fig. 2.3.2

CONFRONTO TRA LA RELAZIONE DI JARRET PER LE BOCCHE LAGUNARI E LA FASCIA DI VALORI OTTENUTI DAL MODELLO EVOSEC PER LE BOCCHE E I PRINCIPALI CANALI LAGUNARI

I rilievi effettuati durante la costruzione delle nuove dighe indicano chiaramente che, a causa del posizionamento delle dighe stesse su barre sabbiose poste a profondità limitata, la nuova sezione di gola ha un'area decisamente inferiore a quella preesistente, e cioè circa 2000 mq contro i circa 6000 dei due canali preesistenti (S.Nicolò e Treporti): dopo la costruzione dei moli la sezione di gola viene progressivamente erosa, finchè nel 1910 circa (dopo cioè 20 anni) riprende la dimensione originaria.

Negli anni successivi la sezione di gola aumenta ulteriormente, raggiungendo nel 1970 un valore massimo di poco superiore a 8000 m^2, con un incremento quindi di oltre il 20% rispetto alla sezione precedente alla costruzione dei moli.

Tale incremento è spiegabile solo in parte con l'aumento del volume di marea entrante in laguna che si è verificato prima del 1970, con ogni probabilità a causa del dragaggio del canale Vittorio Emanuele e dell'abbassamento del suolo per subsidenza (aumento comunque valutabile in meno del 10%).

Oltre all'aumento del volume di marea, ha quindi esercitato la sua influenza anche la diversa entità del trasporto litoraneo prima e dopo la costruzione dei moli.

Un trasporto litoraneo importante, infatti, determina un apporto continuo di sedimenti, e di conseguenza si rende necessaria una tensione tangenziale di fondo superiore alla media per rimuovere i sedimenti stessi e assicurare al volume di marea una sezione corrispondente alle condizioni di 'equilibrio dinamico'.

L'analisi comparativa svolta da Bruun (vedi tab. 2.3.1) tra bocche lagunari non protette da moli (caratterizzate quindi da un importante trasporto litoraneo) e altre invece protette (nelle quali il trasporto litoraneo scende a valori quasi nulli) ha mostrato che tra il primo e il secondo scenario vi può essere mediamente una

riduzione della tensione tangenziale di circa il 18-20%. In base alle formule teoriche a una diminuzione di quest'ordine della tensione tangenziale dovrebbe corrispondere un incremento della sezione del 7-8%.

La somma dei due fattori (aumento del volume e riduzione del trasporto litoraneo) consente quindi di giustificare l'entità dello incremento rilevato per le sezioni.

Dall'analisi dei dati sperimentali dell'ultimo periodo (1970-1989) si osserva una riduzione media della sezione di circa il 3%, sia nella bocca che nel complesso dei canali lagunari adiacenti. Tale riduzione è spiegabile in base al verificarsi di:

- una riduzione del volume di marea: dalle analisi con il modello bidimensionale, infatti, risulta che gli interventi realizzati nel periodo '68-70 (casse di colmata e dragaggio canale Petroli) hanno ridotto il volume d'acqua entrante nel bacino di Lido;
- una ripresa dell'influenza del trasporto litoraneo, dovuta al progressivo avanzamento della linea di costa di P.Sabbioni, ormai giunta in prossimità della testata del molo nord.

Dallo studio dell'evoluzione delle sezioni ubicate quasi alle estremità lato laguna dei canali che convergono alla bocca risulta un comportamento simile a quello delle sezioni di bocca di Lido. Dall'esame dei dati si rileva che anche i canali hanno risentito, seppure in modo meno vistoso, della notevole riduzione di sezione subita dalla bocca con la costruzione dei moli e delle conseguenti disponibilità di sedimenti erosi tra i moli stessi. Per quanto riguarda le differenze introdotte dai moli, si osserva che l'area delle sezioni dei canali prima della loro costruzione era maggiore di quella delle sezioni di bocca, mentre nella fase successiva le aree sembrano convergere verso valori molto simili, fatto questo spiegabile con l'incidenza del trasporto litoraneo sulle sezioni della bocca nel periodo prima dei moli.

Bocca di Malamocco

Durante la costruzione dei moli anche la bocca di Malamocco ha subito una riduzione della sezione di gola, cui ha fatto seguito un successivo incremento che tendeva a una nuova configurazione di equilibrio dinamico. La nuova sezione di equilibrio, secondo le analisi riportate prima, dovrebbe essere compresa entro un campo di variabilità del 10-15% in più od in meno rispetto al valore precedente, in quanto la sezione di equilibrio dipende in primo luogo dal volume di marea (che si può ipotizzare sia rimasto su valori poco diversi prima e dopo i moli), e solo secondariamente da altri fattori quali l'entità del trasporto litoraneo, i coefficienti di scabrezza, le dimensioni della bocca, fattori che nel loro insieme possono dare luogo solo a variazioni contenute (si considera anche che, per Malamocco, il trasporto litoraneo era modesto anche prima della costruzione dei moli).

Dall'esame dei rilievi risulta che sino al 1930, e cioè a 70-80 anni di distanza dalla costruzione dei moli, la sezione di bocca era ancora inferiore a quella originaria di circa il 20%. Questa singolarità può essere spiegata dall'esame delle condizioni geotecniche: la tendenza evolutiva che, dopo la costruzione delle dighe, avrebbe dovuto far raggiungere alla sezione il nuovo valore di equilibrio dinamico, è stata fortemente ostacolata dalla presenza di strati argillosi e di caranto, almeno fintanto che questi strati non sono stati rimossi dai lavori di dragaggio iniziati nel 1960.

D'altra parte proprio i lavori di dragaggio hanno determinato un incremento dei volumi di marea dopo il 1970, motivando così l'ulteriore incremento delle sezioni nel periodo 1970-89.

L'andamento nel tempo della somma delle sezioni sui canali interni è da ritenersi meno significativo almeno nel periodo dopo la costruzione dei moli, in quanto numerosi escavi artificiali non consentono di riconoscere con certezza una tendenza naturale.

Bocca di Chioggia

Per il periodo precedente la costruzione dei moli sono disponibili tre rilievi, che mettono in evidenza una sostanziale stabilità della bocca, con un'area delle sezioni di gola molto simile a quelle dei canali interni.

Dopo la costruzione dei moli la sezione di gola, ridottasi a meno del 50% per via delle nuove opere, subisce una lenta evoluzione, che tende a raggiungere una nuova situazione di equilibrio.

I rilievi effettuati fino al 1970 mostrano che nei 50-60 anni successivi alla costruzione dei moli, la sezione di bocca ha raggiunto un'area che è ancora inferiore (di circa il 15%) a quella preesistente alla costruzione dei moli.

Questa situazione, che non è dovuto a una particolare resistenza al taglio dei materiali di fondo (le stratigrafie mostrano infatti assenza di argille o caranto), può essere una conseguenza degli interventi di bonifica della foce del Brenta, nel periodo 1926-1930, coi quali la superficie del bacino di Chioggia è stata ridotta del 15% circa; data la vicinanza dell'area di bonifica alla bocca, si può ipotizzare che una analoga riduzione sia intervenuta anche sul volume di marea, e quindi sulle sezioni. Si può quindi ritenere che la bocca di Chioggia nel 1970, circa 30÷40 anni dopo la costruzione delle dighe (in un arco di tempo cioè confrontabile con l'analogo alla bocca di Lido), abbia raggiunto la sezione di equilibrio con il suo volume di marea.

Il successivo aumento del periodo 1970-89, potrebbe derivare da un incremento dei volumi di marea dovuto per esempio alla graduale scomparsa delle barene (ma ciò non sarebbe sufficiente a spiegare l'entità relativamente importante di tale aumento), oppure a lavori di dragaggio.

Anche nel bacino di Chioggia, come a Malamocco, i canali interni hanno subito l'impatto di modifiche locali anche rilevati, e di conseguenza la loro evoluzione non può essere utilizzata per verificare le modalità generali con cui i vari interventi sulla bocca hanno influito sui canali interni.

Canali lagunari

Per i canali lagunari, l'interpretazione dell'evoluzione viene svolta mediante il modello EVOSEC, tenendo conto di tutte e tre le relazioni (1), (2) e (3) presentate in precedenza.

Lo studio dell'evoluzione è reso più difficile dalla presenza dei dragaggi, per i quali non è sempre agevole ricostruire i tempi di esecuzione ed i quantitativi rimossi; nelle analisi svolte di seguito non si considerano quindi canali interessati dai dragaggi per cui non si hanno informazioni certe.

I risultati dell'analisi sono esposti nelle figg.2.3.3+2.3.5 in cui sono stati presi in considerazione i principali canali lagunari raggruppati secondo il bacino di appartenenza.

Per il calcolo della portata massima nel ciclo di marea, si è utilizzato, come già detto, il modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti, con riferimento ad una marea sinusoidale semidiurna di 1 m di ampiezza: le caratteristiche di questa marea tipica di sizigie consentono infatti di ottenere per i canali una portata massima che presenta una probabilità di superamento dell'1%, che è quella suggerita in letteratura (152).

I risultati esposti nelle figure mettono in rilievo una tendenza generalizzata alla sedimentazione ed in particolare per i canali del bacino di Malamocco, per i quali il fenomeno è in gran parte correlabile con l'entità della riduzione del volume di marea nei canali naturali susseguente allo scavo del canale Petroli.

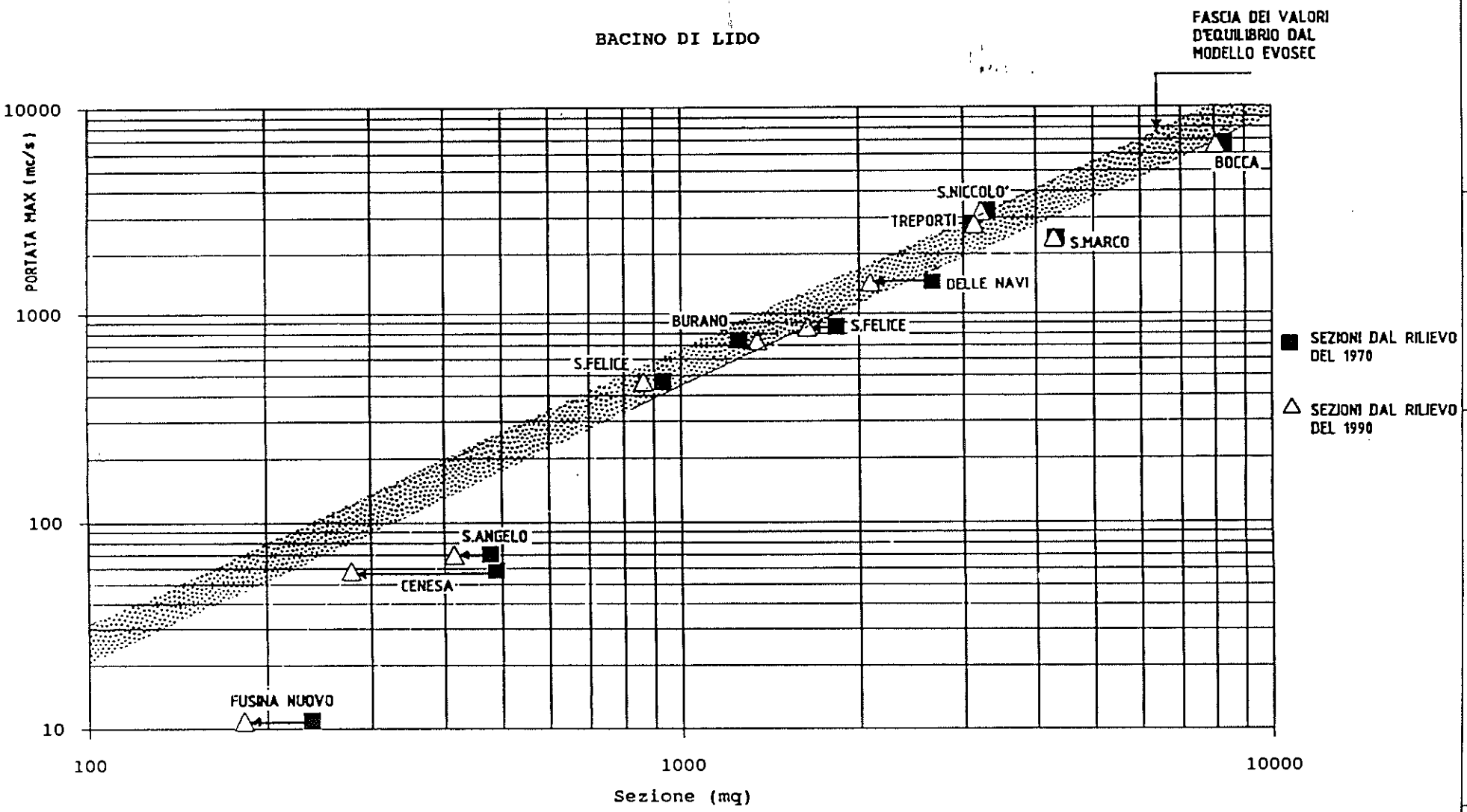


Fig. 2.3.3 - EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI PRINCIPALI CANALI DEL BACINO DI LIDO CONFRONTATE CON LA FASCIA DI SEZIONI D'EQUILIBRIO OTTENUTE DAL MODELLO EVOSEC

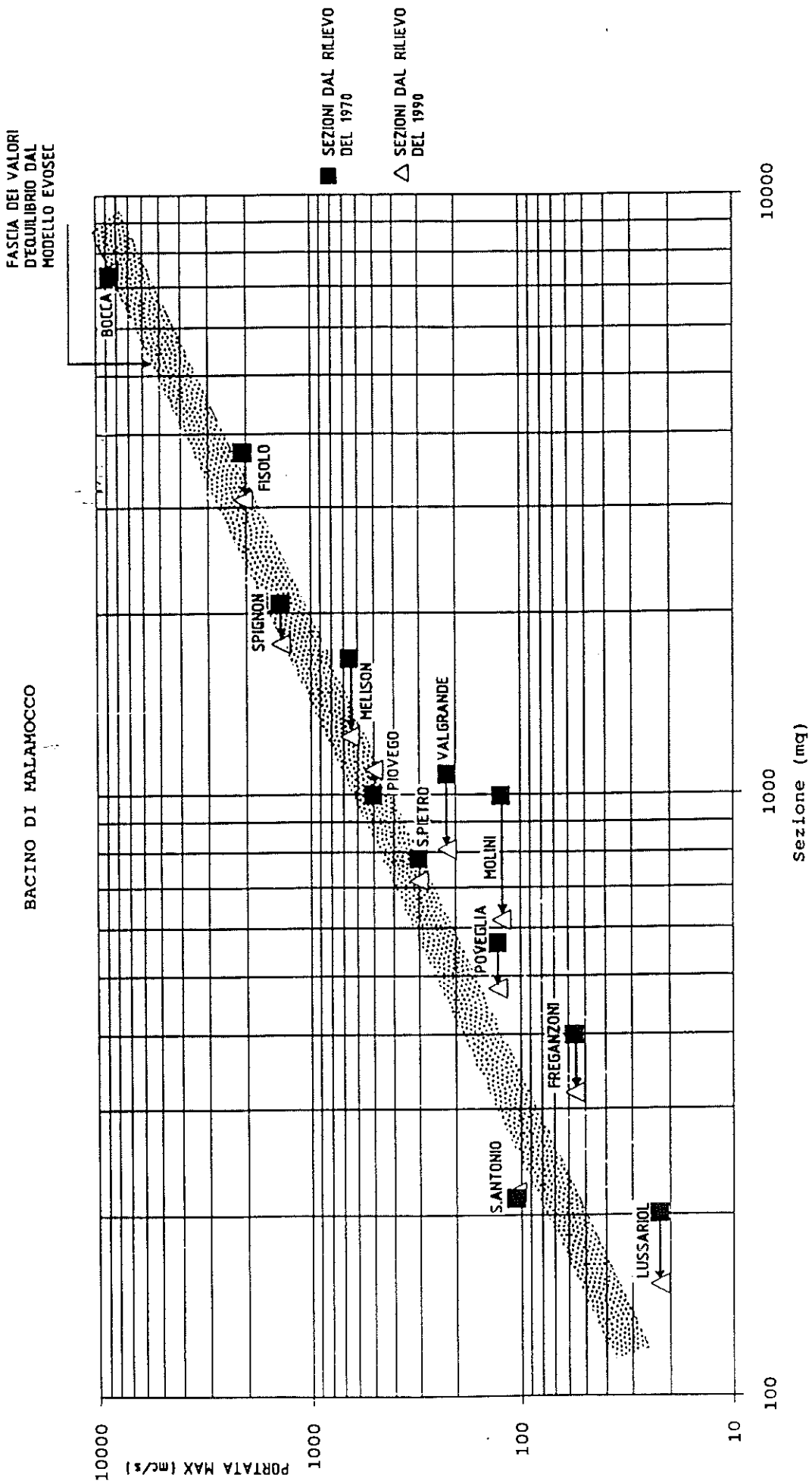


Fig. 2.3.4 -EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI PRINCIPALI CANALI DEL BACINO DI MALAMOCCO CONFRONTATE CON LA FASCIA DI SEZIONI D'EQUILIBRIO OTTENUTE DAL MODELLO EVOSEC

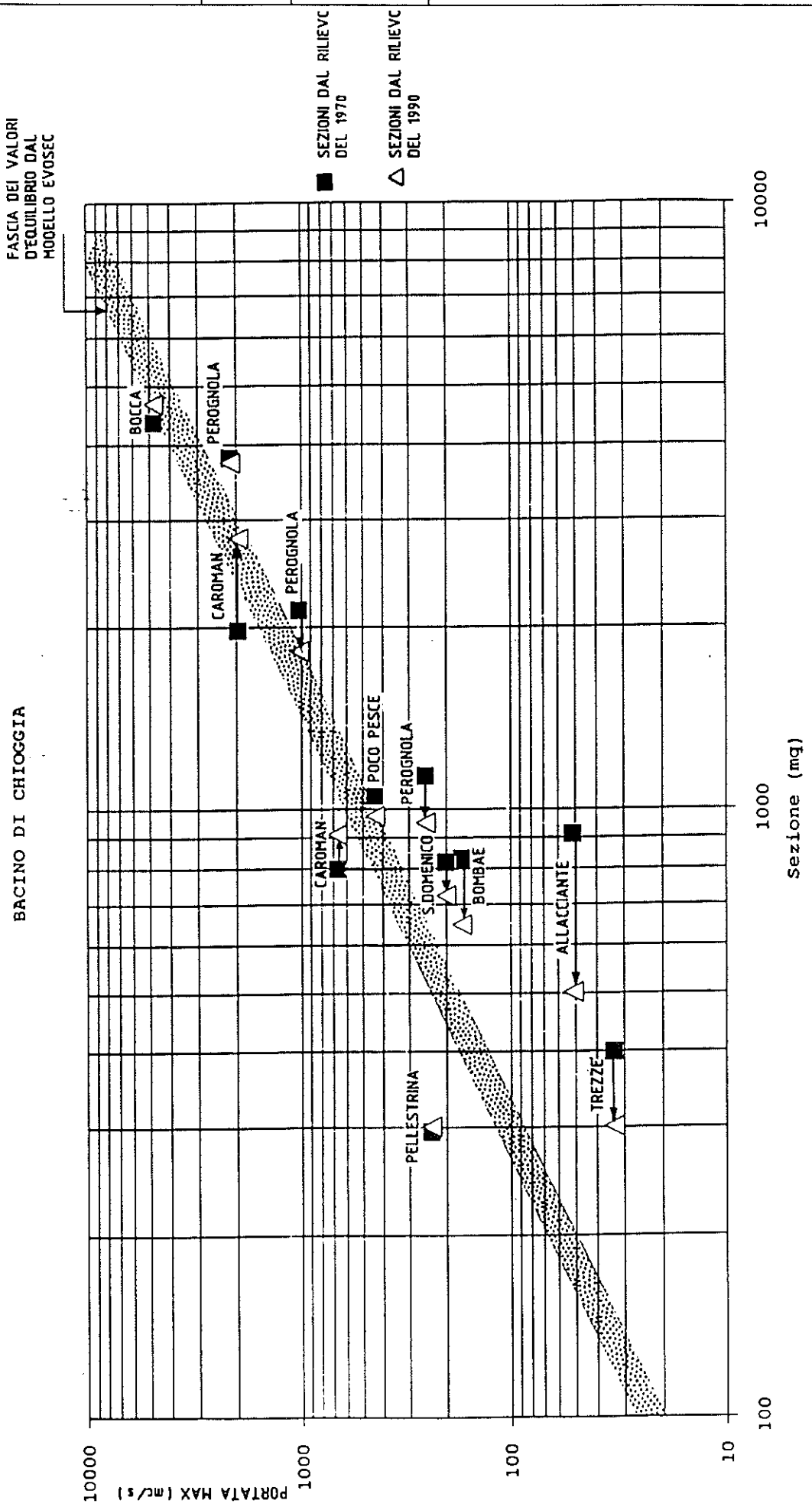


Fig. 2.3.5 -EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI PRINCIPALI CANALI DEL BACINO DI CHIOGGIA CONFRONTATE CON LA FASCIA DI SEZIONI D'EQUILIBRIO OTTENUTE DAL MODELLO EVOSEC

L'aspetto più interessante che si ricava dall'esame delle tre figure è però il fatto che la tendenza evolutiva di pressochè tutte le sezioni esaminate è coerente con le previsioni che sarebbe stato possibile formulare a partire dalla "fascia d'equilibrio" calcolata da EVOSEC. Si osservi infatti che tutte le sezioni tendono ad avvicinarsi a tale fascia, riducendo così lo squilibrio tra sezione reale e sezione teorica d'equilibrio, innescato da vari fattori esterni (escavo canali artificiali, subsidenza, riduzione bacino lagunare, ecc.).

Dalle informazioni fin qui esposte è finora escluso il parametro "tempo". Se infatti da grafici come quelli presentati è possibile ricavare il grado di squilibrio della sezione di un canale, non derivano invece dal loro esame informazioni sul tempo necessario alla sezione per recuperare tale squilibrio.

Con l'obiettivo di ottenere almeno un ordine di grandezza relativo a questo parametro, è stata svolta un'ulteriore analisi per individuare una legge matematica del tipo

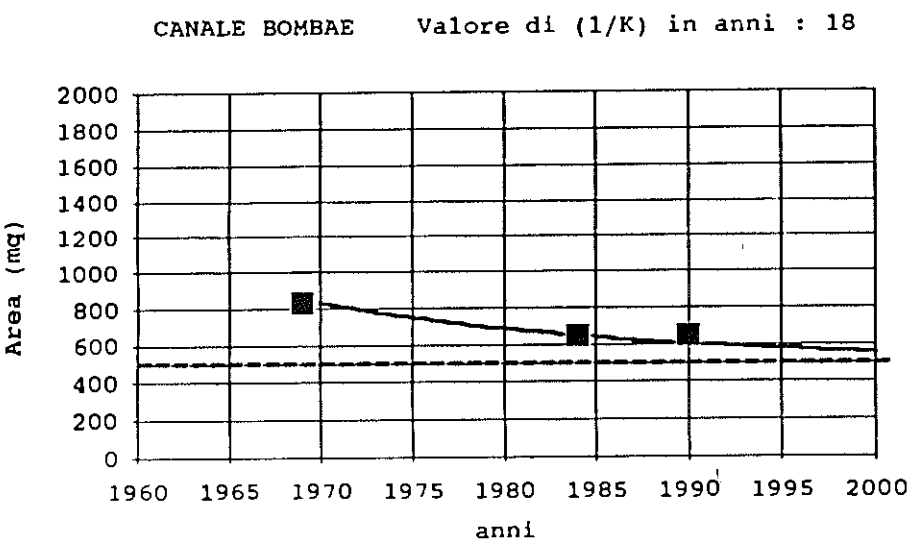
$$A(t) = Ae + (Ai - Ae) + \exp(-Kt)$$

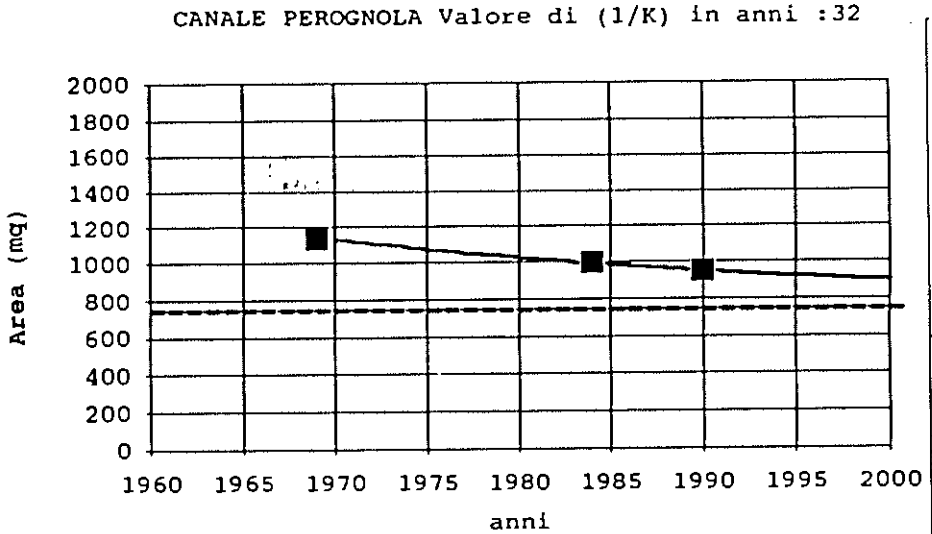
dove: Ae = Area d'equilibrio
Ai = Area iniziale (1970)

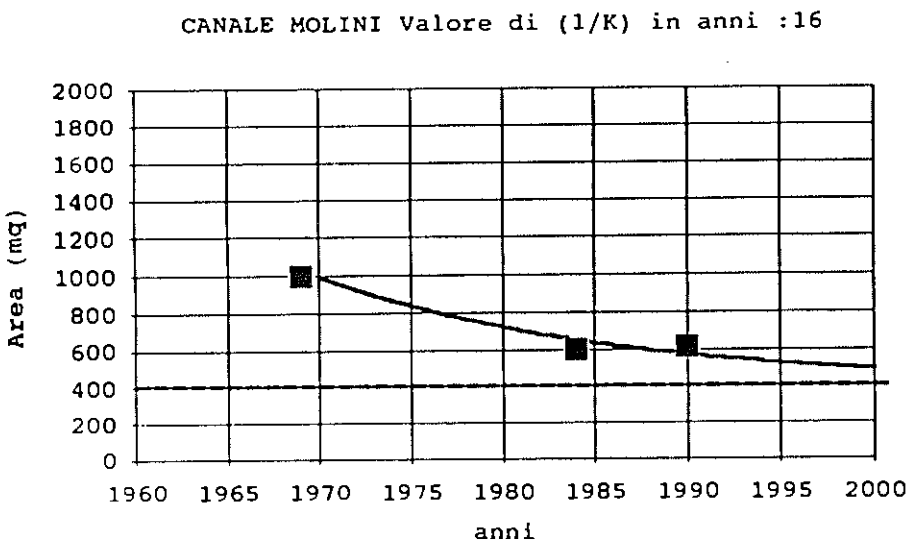
adeguata a ricostruire l'evoluzione delle sezioni dei canali sulla base dei dati sperimentali del 1970, 1985 e 1990.

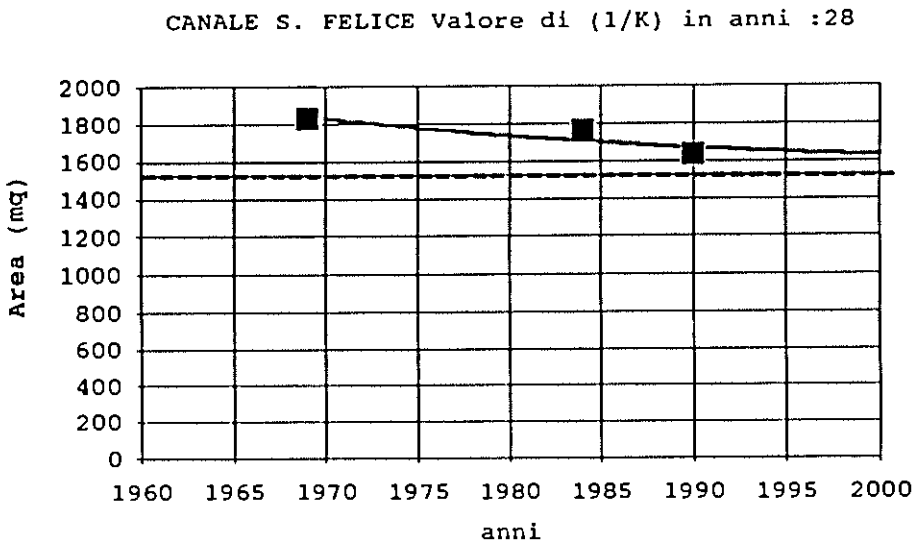
In fig. 2.3.6 sono riportate alcune delle sezioni considerate: il canale Bombae e Perognola del bacino di Chioggia, il canale Molini del bacino di Malamocco e il S.Felice del bacino di Lido. Il coefficiente K è stato definito "tarando" la formula sulla base dei dati sperimentali.

Si può notare come la legge esponenziale ottenuta riproduca abbastanza bene per tutti i canali l'andamento sperimentale delle sezioni dei canali.









Misure

Area di equilibrio

Ateorica=Ae-(Ai+Ae)*exp(-Kt)

Fig. 2.3.6 - RICOSTRUZIONE DELL'EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI BOMBAE, PEROGNOLA, MOLINI E S.FELICE. SECONDO UNA LEGGE ESPONENZIALE.

Nella stessa fig. 2.3.6 sono anche indicati i valori ottenuti per la costante 1/K (espressa in anni) che rappresenta l'intervallo di tempo per cui la sezione del canale raggiunge un valore pari al 66% della differenza tra la sezione iniziale e quella di equilibrio.

La serie di valori della costante 1/K indica sostanzialmente che i tempi di risposta delle sezioni dei canali sono compresi tra i 15 ed i 30 anni.

B) Il modello di bilancio a 3 celle, EVOLAG-3

Introduzione e descrizione del modello

Come già ampliamente documentato nel corso dei capitoli precedenti, i cambiamenti della morfologia sono spesso causati da interventi nel passato, i cui effetti si prolungano negli anni in proporzione al tempo di risposta del sistema.

Nella laguna di Venezia i tempi di risposta sono dell'ordine delle decine di anni: poichè negli ultimi 150 anni sono stati molti gli interventi umani che hanno avuto un effetto sui processi morfologici, le variazioni dei diversi parametri allo studio (profondità dei bassifondi, sezioni dei canali, ecc.) sono state determinate dall'accumulo degli effetti di differenti interventi.

A livello quantitativo, associando l'esame dei dati sperimentali alla tempistica degli interventi umani, una discussione delle cause principali delle variazioni riscontrate è stata già esposta.

Al fine di distinguere i diversi contributi, anche a livello quantitativo, e soprattutto di effettuare previsioni sul comportamento del sistema nel futuro, al variare di qualcuno dei parametri in gioco, è però indispensabile ricostruire le variazioni della morfologia con un modello matematico. In particolare, un modello di bilancio dei sedimenti, è lo strumento più semplice e normalmente

utilizzato per la trattazione di problemi di questa natura su ampie scale spazio-temporali, con lo scopo di ottenere risultati e linee di tendenze validi in prima approssimazione.

Con questi obiettivi, nell'ambito del Progetto Generale degli Interventi di Recupero Morfologico sono stati pertanto predisposti e verificati due modelli di bilancio dei sedimenti: uno a 3 celle descritto in questo paragrafo, il secondo "multicelle" presentato nel paragrafo successivo.

Il modello di cui si tratta ora è il più semplificato, ed è stato preparato con l'obiettivo di ottenere risposte a grande scala e, in prima approssimazione, sulla tendenza evolutiva innescata in laguna da importanti interventi sulla morfologia. Esso schematizza la laguna in 3 celle (bassifondi, canali e bocca) per ciascuna delle quali viene calcolato nel tempo un bilancio dei sedimenti (fig. 2.3.7).

In questo paragrafo vengono descritti i principi di funzionamento, la struttura del modello e i risultati ottenuti dalle simulazioni di verifica.

Principali fattori agenti sulla morfologia rappresentati nel modello

Le formazioni costiere delle pianure alluvionali, quali i delta, gli estuari, le lagune, gli stagni costieri, sono sostanzialmente il prodotto dell'interazione di quattro agenti naturali: il moto ondoso (esterno e interno al sistema), i corsi d'acqua che vi si immettono, le correnti di marea, in particolare le lagune sono controllate da tutti e quattro gli agenti fisici prima menzionati.

Il moto ondoso in mare solleva dal fondo e trasporta lungo costa i sedimenti che le correnti di marea alle bocche lagunari trasportano, almeno in parte, in laguna.

LEGENDA

PARAMETRI GEOMETRICI

Hi PROFONDITA' DELLE BOCCHE E DEI BASSIFONDI

Ac SEZIONE DEI CANALI

Lc LUNGHEZZE DEI CANALI

S SUPERFICI

SIMBOLI INDICATI IN FIGURA

Vm VOLUME DI MAREA ENTRANTE

Vbc VOLUME DI MAREA CANALI-BASSIFONDI

Dr DRAGAGGI

Tf APPORTI FLUVIALI

αe, αs EUSTATISMO E SUBSIDENZA

Z,ZX,X,Y CONCENTRAZIONI A MARE, SULLA BOCCA, SUI CANALI E SUI BASSIFONDI.

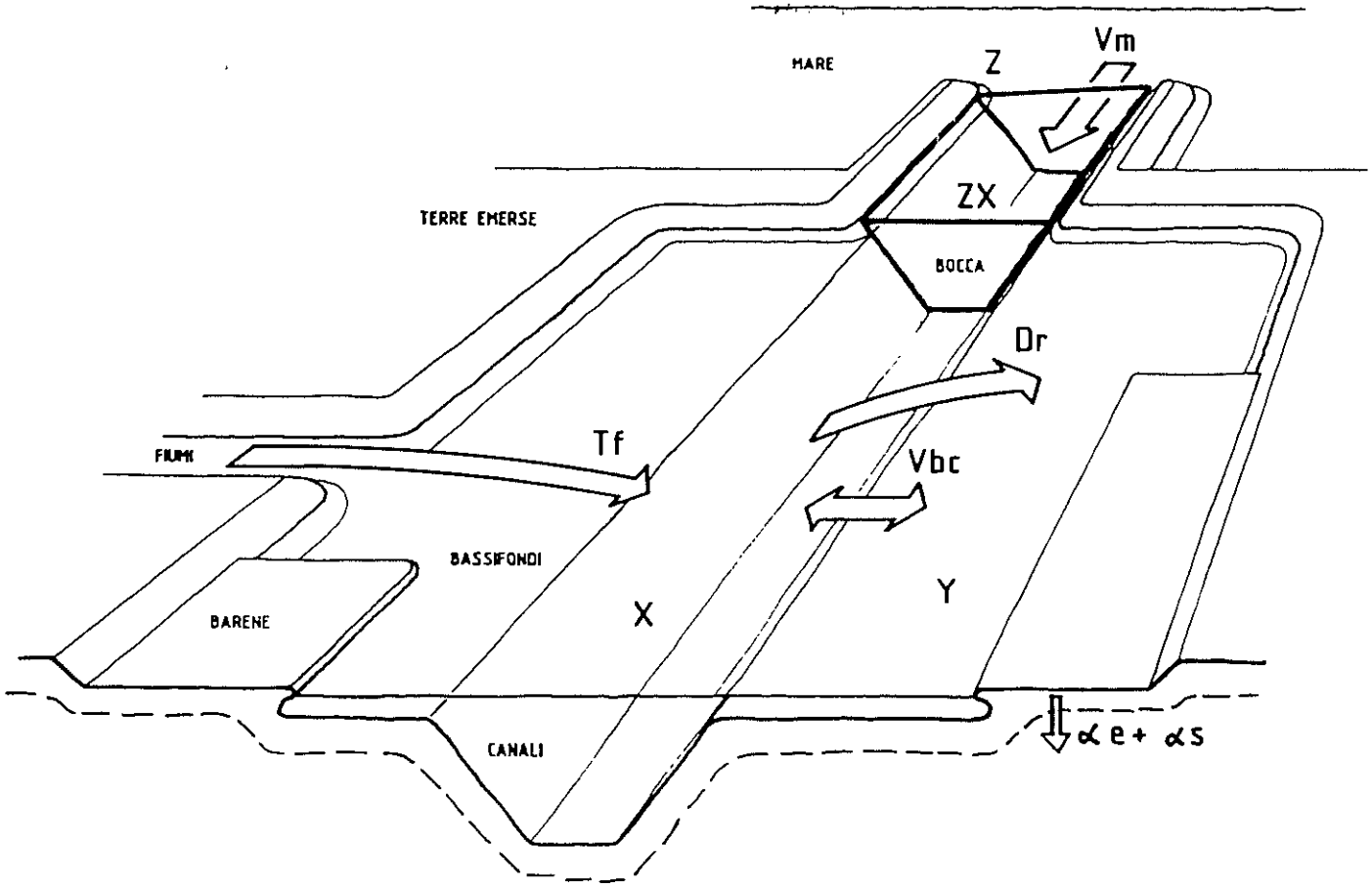


Fig. 2.3.7- RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL MODELLO DI BILANCIO " EVOLAG - 3 "

Il moto ondoso all'interno della laguna, pone in sospensione sedimenti che le correnti di riflusso possono trasportare in mare; esso svolge quindi, nei confronti della laguna, un'azione erosiva.

I fiumi entranti in laguna possono apportare nuovi sedimenti, che distribuendosi contribuiscono alla formazione delle barene ed al ripascimento dei bassifondi.

Le correnti di marea distribuiscono all'interno della laguna i sedimenti apportati dal mare e dai fiumi e disperdono verso il mare, in fase di riflusso, i sedimenti posti in sospensione all'interno della laguna.

Agli effetti contrastanti di questi agenti fisici principali si aggiungono quelli della variazione di livello relativo per subsidenza ed eustatismo, effetti indotti dall'inquinamento delle acque (che come si vedrà più avanti contribuiscono all'erosione di bassifondi e barene) nonchè altri effetti connessi con le attività umane (dragaggio di nuovi canali, attività da pesca, ecc.).

L'azione congiunta di questi fattori determina l'equilibrio morfologico di un sistema lagunare, equilibrio da intendersi in senso dinamico, come continuo adeguamento ad una variazione dei fattori descritti, in continua evoluzione.

Tali fattori sono quelli introdotti nel modello di bilancio, che simula l'azione di ciascuno di essi attraverso formulazioni matematiche, integrando poi i diversi apporti in un bilancio complessivo.

Principi del modello di bilancio

Il modello di bilancio si basa sui principi di seguito elencati (per una descrizione più dettagliata vedi (157)):

a) il meccanismo di trasporto dominante è la successione delle correnti di flusso e riflusso, che determinano uno scambio di

volumi d'acqua tra le diverse celle in cui la laguna è schematizzata. Poichè ogni volume idrico è caratterizzato da una concentrazione di sedimenti in sospensione, tale scambio si traduce in un trasporto netto di sedimenti;

b) il volume d'acqua scambiato è calcolato mediante una formula approssimata: V = 700 am Sm dove 700 è il numero di cicli mareali in un anno, "am" è l'ampiezza di marea che presenta una probabilità di superamento del 50% e "Sm" la superficie della laguna al livello medio del mare;

c) le forze determinanti il sollevamento dei sedimenti riprodotte nel modello, sono le correnti nel caso delle bocche e dei canali, il moto ondoso sui bassifondi e in mare;

d) gli effetti di subsidenza, eustatismo, apporti fluviali e dragaggi sono direttamente incorporati nelle equazioni di bilancio.

La formulazione matematica

Il modello di bilancio è costituito da equazioni differenziali che caratterizzano il bilancio di ogni cella.
Esse sono le seguenti:

Bocche:

$$Si \frac{d\,hi}{dt} = Vm\,(2\,zx - x - z) + Dr$$

Canali:

$$lc \frac{d\,Ac}{dt} = Vbc\,(x-y) + Vm\,(x-zx) + (Dr - Tf) - cb\,\sqrt{Ac}\,(\alpha_e + \alpha_s)$$

Bassifondi:

$$Sb \frac{dh}{dt} = Vbc\,(y - x) + Sb\,(\alpha_e + \alpha_s)$$

dove:

Si, Sb, = superfici del canale di bocca e dei bassifondi
hi, h = profondità delle bocche e dei bassifondi

Ac, lc = sezione e lunghezza dei canali interni

cb . $\sqrt{Ac}$ = larghezza dei canali interni (Cb ≈ 10)

Vm = volume di marea entrante

Vbc = volume di marea dai canali ai bassifondi

Dr = dragaggi

Tf = apporti fluviali

α_e, α_s = eustatismo e subsidenza

z, zx, x, y = concentrazioni a mare, sulla bocca, sui canali e sui bassifondi.

La concentrazione media a mare è stata calcolata in prima approssimazione applicando alla statistica del moto ondoso, per un'assegnata profondità media locale, la formula di Bijker.

Il processo di calibrazione del modello sulla base dei dati storici ha quindi portato ad una modifica dei valori così determinati, ma sempre entro un campo limitato, e corrispondente a valori realistici delle profondità di fronte alla bocca.

Le concentrazioni alla bocca e lungo i canali sono stati calcolati applicando la formula di Engelund-Hansen, assegnando valori medi del diametro dei sedimenti sul fondo ricavabili dai rilievi disponibili.

Nel campo di velocità e profondità di interesse pratico per la situazione della laguna, la concentrazione è risultata essere proporzionale alla velocità elevata alla quarta potenza e inversamente proporzionale alla profondità.

In particolare sono state determinate le seguenti formule:

$$x = \frac{Cf}{Cch\sqrt{A_c}} \left(\frac{Vm}{Cvt \cdot A_c}\right)^4$$

$$zx = \frac{Cf}{h_i} \left(\frac{Vm}{Cvt \cdot b_i \cdot h_i} \right)^4$$

con:

Cf = coefficiente sperimentale (ordine di grandezza 10^{-4})

Cvt = coefficiente sperimentale (10^{-7})

Cch = coefficiente, circa uguale a 0,19

bi = ampiezza della bocca

Vm = volume di marea

A_c = sezione dei canali

h_i = profondità della bocca

x = concentrazione nei canali

zx = concentrazione della bocca

La concentrazione sui bassifondi è stata calcolata con formule che correlano la concentrazione stessa all'azione del moto ondoso; per ottenere valori medi le concentrazioni così ottenute sono state "pesate" statisticamente sull'anno.

É stata ottenuta la seguente relazione:

$y = Cs \cdot Rb \cdot 1/h$

con:

y = concentrazione nei bassifondi

Cs = coefficiente funzione di fetch e caratteristiche dei sedimenti

Rb = coefficiente (compreso tra 1 e 1,5) dipendente dallo stato della vegetazione sui fondali

Anche per quanto riguarda i canali ed i bassifondi, i diversi coefficienti sono stati dapprima determinati per via teorica, a partire dai valori medi locali dei parametri. Durante la calibrazione, alcuni coefficienti sono stati quindi modificati, con il criterio di riprodurre al meglio l'evoluzione storica, senza però modificare l'ordine di grandezza determinato teoricamente per i coefficienti stessi.

Ricostruzione dell'evoluzione storica

Il confronto dei risultati del modello di bilancio con i dati storici ha consentito, come detto, il processo di calibrazione del modello stesso, eseguito operando opportuni ritocchi dei coefficienti. Tali aggiustaggi dei coefficienti sono stati effettuati, come già detto, senza modificare sensibilmente l'ordine di grandezza ottenuto per via teorica. L'evoluzione morfologica ricostruita con il modello è quella rilevata dall'esame cartografico negli ultimi due secoli, distintamente per i bacini di Lido, Malamocco e Chioggia.

In particolare per la descrizione dell'evoluzione morfologica sono stati presi in considerazione la sezione del canale di bocca, la sezione complessiva dei canali lagunari afferenti alla bocca e la profondità media dei bassifondi, ciascun parametro è rappresentativo di una delle celle secondo cui è stata schematizzata la laguna.

Come si può vedere dai grafici esposti nel seguito, i risultati, forniti dal modello di bilancio, ricostruiscono con buona approssimazione l'evoluzione morfologica dei tre bacini lagunari tra il 1800 e la situazione attuale identificando gli effetti dei diversi interventi antropici in modo quantitativamente abbastanza preciso.

Si osservano, tuttavia, limiti abbastanza evidenti nella stima dei tempi di risposta del canale di bocca, che a seguito di perturbazioni di una certa entità, risultano generalmente troppo rapidi rispetto a quanto sperimentalmente rilevato.

Nei paragrafi seguenti viene descritta in dettaglio la ricostruzione storica dell'evoluzione morfologica rispettivamente nei bacini di Lido, Malamocco e Chioggia.

Bacino di Lido

La ricostruzione storica dell'evoluzione del bacino di Lido riguarda il periodo dal 1860 alla situazione attuale che comprende:

- la costruzione dei moli alla bocca (1880-1890 circa)
- l'escavo del canale Vittorio Emanuele (circa 1920) e i conseguenti dragaggi di mantenimento dei canali navigabili;
- l'accentuarsi del fenomeno di subsidenza antropica dal 1930 al 1970.

Gli effetti della costruzione dei moli alla bocca sono stati ben riprodotti (come tendenza di equilibrio finale) assumendo una riduzione della concentrazione a mare da 80 p.p.m. a 25 p.p.m.; tuttavia risulta sovrastimato il tempo di reazione del canale di bocca alla perturbazione antropica (fig. 2.3.8).

Il fatto che la sezione di bocca presenti un valore superiore a quello precedente alla costruzione dei moli (confermato anche dai dati sperimentali) è spiegabile sia con l'aumento del volume di marea entrante per effetto del dragaggio del canale Vittorio Emanuele sia, soprattutto, con la riduzione della concentrazione di sedimenti provenienti da mare.

Un comportamento simile a quello della bocca è stato valutato per i canali interni lagunari, in accordo con i dati sperimentali. I bassifondi presentano un'accentuazione dell'approfondimento per effetto dell'intensificarsi del fenomeno di subsidenza antropica dal 1930 al 1970.

A partire dal 1970 i canali interni e la bocca risentono degli interventi realizzati nel bacino di Malamocco (realizzazione delle casse di colmata e dragaggi del canale Petroli) comportanti, come condizione al contorno per il bacino di Lido, una diminuzione del volume di marea entrante di circa il 4%: tale perturbazione, responsabile della tendenza alla sedimentazione dal 1970, si sta esaurendo nella situazione attuale, dove per i canali interni e la bocca si può riscontrare la tendenza ad una configurazione stabile. Per i bassifondi si è evidenziato nell'ultimo decennio un rallentamento del processo di approfondimento, sostanzialmente dovuto all'esaurirsi della subsidenza antropica.

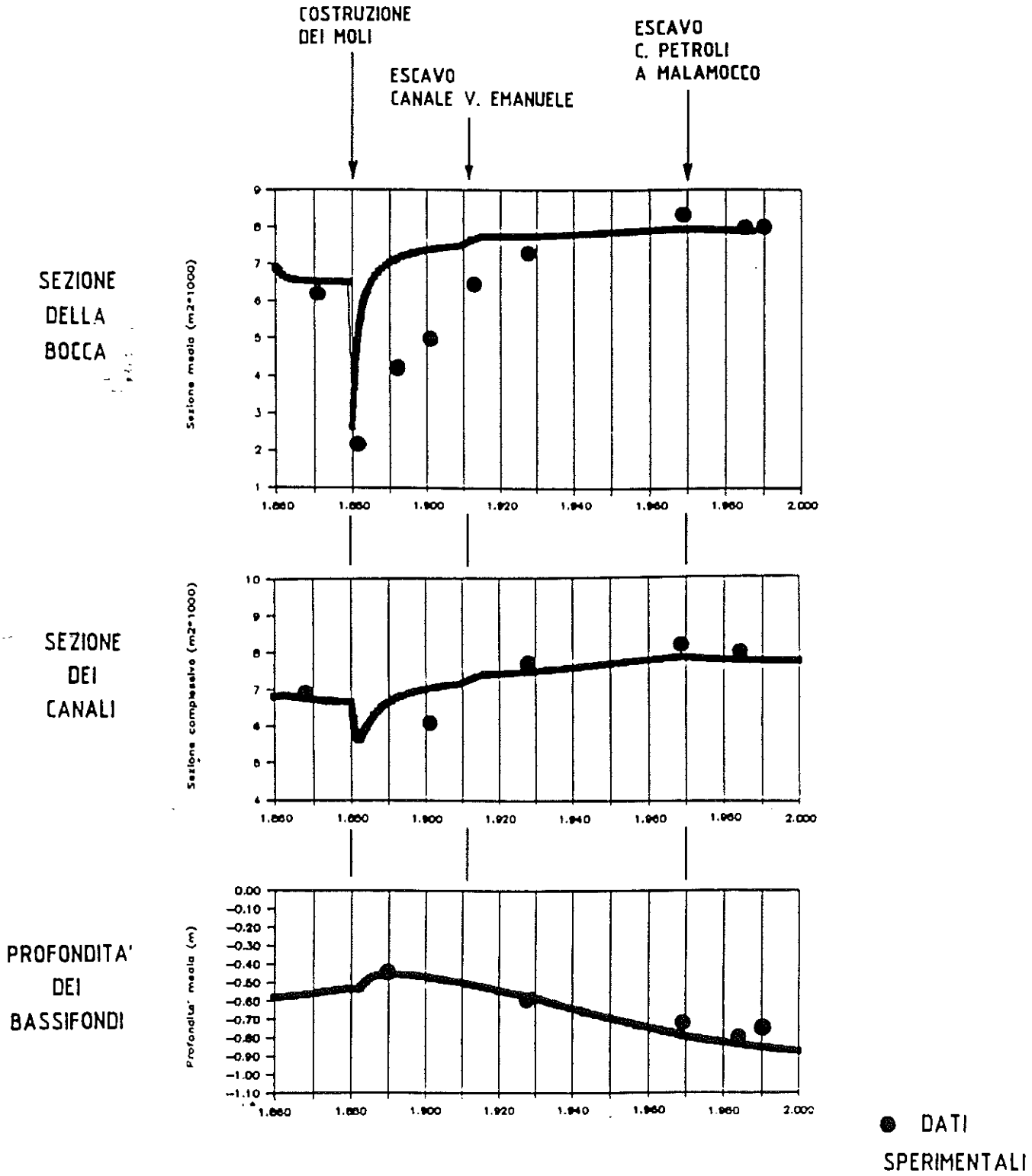


Fig. 2.3.8 - RICOSTRUZIONE DELL'EVOLUZIONE STORICA CON IL MODELLO DI BILANCIO: BACINO DI LIDO

Bacino di Malamocco

La ricostruzione dell'evoluzione del bacino di Malamocco, ottenuta dal modello di bilancio, ha interessato il periodo compreso tra il 1810 e la situazione attuale.

Gli interventi naturali ed antropici che hanno interessato questo periodo di tempo e di cui si è tenuto conto tra i dati di input al modello, sono di seguito indicati:

- la costruzione dei moli alla bocca, avvenuta a partire dal 1840;
- l'accentuarsi del fenomeno di subsidenza antropica negli anni 1930-1970;
- il dragaggio del canale Petroli negli anni 1965-1970 e i conseguenti dragaggi di mantenimento dei canali utilizzati per la navigazione.

I risultati ottenuti dal modello risultano sostanzialmente in buon accordo con i dati sperimentali e sono indicati in fig. 2.3.9.

La costruzione dei moli è stata messa in conto nella simulazione riducendo la concentrazione a mare da un valore di 30 p.p.m. a 15 p.p.m. e considerando la riduzione della sezione della bocca del 45% effettivamente determinatasi durante la costruzione.

I risultati ottenuti dal modello a seguito di questo intervento antropico mostrano, per quel che riguarda la sezione di bocca, sia un aumento troppo rapido in risposta alla perturbazione che il raggiungimento di una tendenza all'equilibrio su valori maggiori di quelli sperimentali. Ciò può essere spiegato, a parte le inevitabili imprecisioni insite nella schematizzazione, dall'esame delle condizioni geotecniche che mettono in risalto la presenza di strati di caranto difficilmente erodibili sul fondo del canale di bocca, strati rimossi poi con i lavori di dragaggio del 1965-1970.

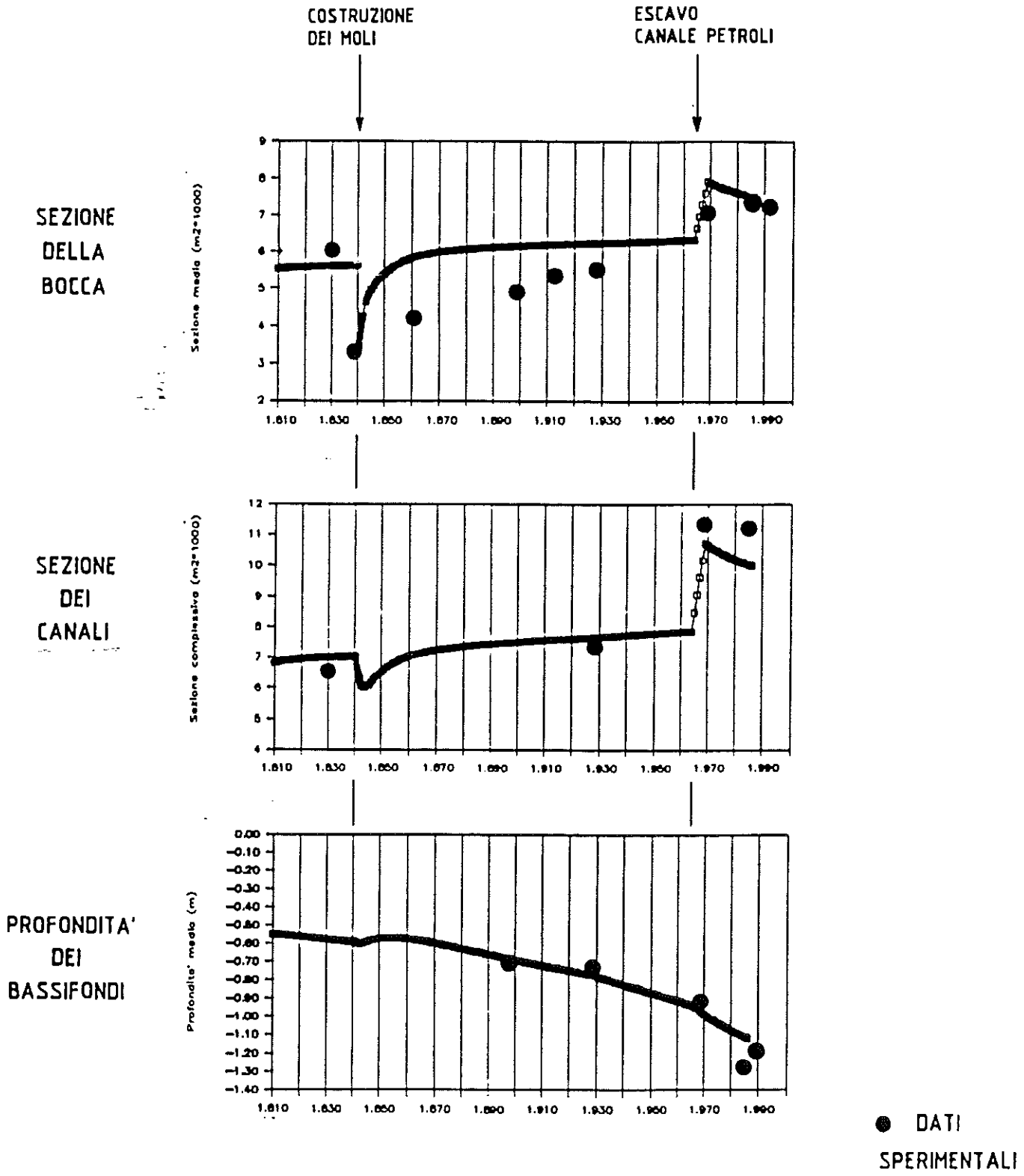


Fig. 2.3.9 - RICOSTRUZIONE DELL'EVOLUZIONE STORICA CON IL MODELLO DI BILANCIO: BACINO DI MALAMOCCO

I canali lagunari e i bassifondi, dopo la costruzione dei moli, inizialmente ricevono i sedimenti provenienti dall'erosione del canale di bocca, mentre successivamente comincia un processo erosivo per effetto della riduzione dei sedimenti provenienti da mare.

La tendenza all'approfondimento dei bassifondi si accentua notevolmente per via della subsidenza antropica.

A seguito dell'escavo del canale Petroli, che ha provocato un drastico aumento artificiale delle sezioni di bocca e canali, il modello evidenzierebbe l'innesco di un processo di sedimentazione delle sezioni con tendenza però a riportarsi a valori di equilibrio superiori a quelli prima dell'escavo.

Quest'ultimo fatto è motivato dall'aumento del volume di marea (circa il 9%).

Alla sedimentazione dei canali è associata un'accentuazione dei processi erosivi dei bassifondi.

Bacino di Chioggia

Il modello di bilancio ha consentito la ricostruzione dell'evoluzione morfologica del bacino di Chioggia dal 1880 fino alla situazione attuale.

Gli interventi antropici di quest'ultimo secolo, che hanno rappresentato la causa di una sensibile alterazione dell'equilibrio morfologico e di cui si è tenuto conto sono di seguito riassunti:

- la costruzione dei moli alla bocca a partire dal 1914;
- l'incremento del fenomeno di subsidenza antropica negli anni 1930-1970;
- gli interventi di bonifica della foce del Brenta negli anni 1926-1930;
- il dragaggio del canale Nuovo negli anni 1950-1955 ed i dragaggi di manutenzione dei canali navigabili.

I risultati ottenuti dal modello, messi a confronto con i dati sperimentali, sono esposti in fig.2.3.10 e riproducono con buona approssimazione le tendenze generali dell'evoluzione antropica della sezione della bocca, della sezione dei canali e della profondità dei bassifondi.

La costruzione dei moli è stata riprodotta considerando una riduzione della concentrazione di sedimenti a mare da 32 p.p.m. ad un valore di poco più della metà, in aggiunta alla riduzione della sezione del 50% determinatasi durante la costruzione.

Questa perturbazione antropica causa inizialmente una riduzione anche nella sezione dei canali interni, per effetto dell'apporto dei sedimenti in eccesso presenti nel canale di bocca: anche i bassifondi usufruiscono, anche se in minima parte, di tale apporto di sedimenti.

In una fase successiva, sia la bocca che i canali tendono a riportarsi a situazioni simili a quelle precedenti la costruzione dei moli (con trend, per la bocca, troppo ripido, a somiglianza di quanto già notato per gli altri due bacini): tale processo è tuttavia contrastato, dopo il 1925, dalla realizzazione della bonifica del Brenta e dalla conseguente riduzione dei volumi entranti (ipotizzata nel modello pari al 15%).

I bassifondi iniziano invece dopo la già citata e provvisoria fase di sedimentazione immediatamente dopo la costruzione dei moli, un processo di approfondimento, dovuto prima alla riduzione dei sedimenti provenienti dal mare e, dopo il 1930, anche alla subsidenza antropica. Questo effetto si risente anche sui canali interni nei quali s'interrompe il processo d'erosione e si tende ad una situazione d'equilibrio inferiore a quella precedente alla costruzione dei moli.

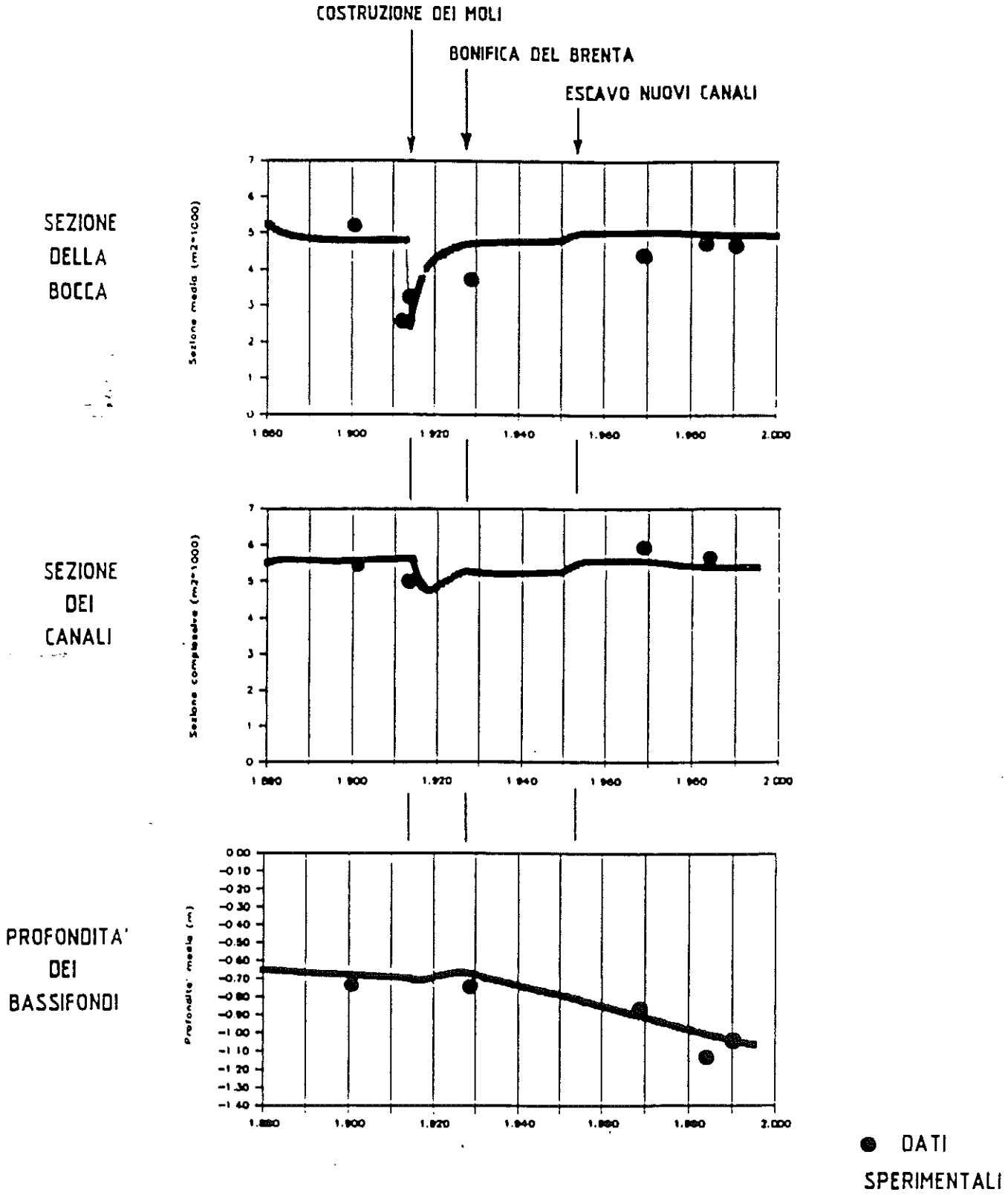


Fig. 2.3.10 - RICOSTRUZIONE DELL'EVOLUZIONE STORICA CON IL MODELLO DI BILANCIO: BACINO DI CHIOGGIA

Nel periodo compreso dal 1930 al 1970 si accentua il fenomeno della subsidenza antropica che spiega l'approfondimento dei bassifondi.

Il dragaggio di nuovi canali negli anni 1950-1960 comporta, oltre all'aumento della sezione dei canali interni, una lieve ulteriore accentuazione del processo di erosione nei bassifondi.

La recente tendenza ad una situazione di stabilità per la sezione della bocca e dei canali lagunari è confermata dai dati sperimentali.

C) Il modello di bilancio multicelle "MORMOD"

Introduzione e descrizione sommaria del modello

Il modello multicelle "MORMOD" è un modello matematico di bilancio predisposto e calibrato da Technital con lo scopo di riprodurre e prevedere le tendenze evolutive della morfologia lagunare, anche a seguito di interventi, con un dettaglio spaziale adeguato alle esigenze progettuali.

Nella configurazione qui presentata, il modello MORMOD suddivide la laguna di Venezia in 86 celle (fig. 2.3.11): la schematizzazione è stata inoltre costruita distinguendo gli elementi fisici della laguna che presentano analoghi comportamenti dal punto di vista idrodinamico e morfologico. Come si può notare dalla schematizzazione a celle della laguna, in generale si è seguito il criterio di separare i canali, i bassifondi e le barene. Si è ritenuto opportuno non avere un maggiore dettaglio spaziale visto lo obiettivo di utilizzare questo modello per ottenere valutazioni sulle tendenze evolutive a medio termine della morfologia in zone ben definite e di una certa ampiezza, e non su scala locale.

Fig. 2.3.11 - SCHEMATIZZAZIONE DEL MODELLO MORFOLOGICO MULTICELLE "MORMOD"

I principali fattori agenti sulla morfologia, rappresentati dal modello, sono gli stessi descritti per il modello di bilancio a 3 celle nel paragrafo precedente; la formulazione matematica, invece, pur basandosi sugli stessi principi, è stata adattata all'esigenza di applicarla ad un altro numero di celle, come di seguito esposto.

La formulazione matematica

Il modello di bilancio è costituito da equazioni differenziali che caratterizzano il bilancio di sedimenti per ogni cella.

Tutte le celle sono governate dalla stessa equazione di bilancio:

$$S_i = dhi/dt = \sum_{J=1}^{n} V_{ij} X_i - \sum_{J=1}^{n} V_{ij} X_j + S_i (\alpha_e + \alpha_{si}) + D_{Ri} + T_{fi} \qquad (1)$$

dove:

i = numero della cella
J = numero della cella adiacente alla cella i
n = numero delle celle adiacenti alla cella i
S_i = superficie della cella i (m^2)
hi = profondità media della cella i (m)
V_{ij} = volume di marea dalla cella i alla cella j (m^3/anno)
X_i = concentrazione media nella cella i (p.p.m.)
α_e = eustatismo (m/anno)
α_{si} = subsidenza per la cella i (m/anno)
D_{Ri} = volume di dragaggio (m^3/anno)
T_{fi} = apporto di sedimenti (m^3/anno).

I volumi di marea scambiati tra una determinata cella e quelle adiacenti ad essa secondo la successione di correnti di flusso e riflusso mareale, sono calcolati con il modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti.

Come input al modello idrodinamico si è utilizzata una marea sinusoidale semidiurna di ampiezza 60 cm (da -30 cm a +30 cm), il cui

gradiente medio presenta una probabilità di superamento del 50%; si è verificato inoltre che il volume scambiato alle bocche lagunari per effetto di questo evento mareale, nell'ipotesi già citata di 700 maree all'anno, è molto vicino al volume medio annuo calcolato dal modello 1D per il periodo 1979-83.

I valori di concentrazione dei sedimenti medi per ogni cella sono calcolati secondo la formula generale presentata di seguito in cui si tiene conto dell'effetto combinato delle correnti mareali e del moto ondoso:

$$X_i = C_{fi}\, v_i^4/h_i + R_{bi}/C_{si}\, h_i \qquad (2)$$

dove:

X_i = concentrazione media annua

h_i = profondità media della cella

v_i = velocità media annua

C_{fi} = coefficiente che regola l'erodibilità del fondale della cella soggetta alla corrente di marea e funzione dei parametri idrodinamici e delle caratteristiche dei sedimenti

C_{si} = coefficiente che regola l'erodibilità del fondale della cella soggetta al moto ondoso e funzione dei parametri di moto ondoso e delle caratteristiche dei sedimenti

R_{bi} = coefficiente che misura la resistenza all'erosione per effetto della vegetazione sui fondali delle celle.

Il primo termine della formula (2) riguarda l'effetto delle correnti mareali, mentre il secondo l'effetto del moto ondoso.

Nel caso di una "cella canale" risulterà predominante il primo termine, visti i più elevati valori di velocità dovuti alla corrente mareale mente nel caso di una "cella bassofondo" assume maggiore importanza l'effetto del moto ondoso visti i fondali più ridotti.

Si può notare che l'equazione di bilancio tiene conto come nel modello a 3 celle dei fenomeni di eustatismo e subsidenza, degli apporti fluviali e dei dragaggi.

La risoluzione delle equazioni differenziali (1) (una per ogni cella) consente di ottenere il fondale medio su ogni cella, una volta fissato l'intervallo di tempo su cui calcolare il bilancio di sedimenti: per le nostre elaborazioni che tengono conto di tempi di risposta del sistema naturale dell'ordine di decine di anni, è stato scelto un intervallo di tempo pari a un anno.

Struttura del modello

La struttura del modello matematico è rappresentata secondo lo schema a blocchi riportato in fig. 2.3.12.

Il modello consiste in una serie di programmi che preparano i files di input al programma principale (MORFO) che permette la risoluzione delle equazioni di bilancio dei sedimenti per ogni cella.

I files di input per il programma principale contengono:

- la schematizzazione a celle della laguna;
- i volumi scambiati tra le varie celle, la velocità media, il volume invasato, la profondità massima e media per ogni cella e i valori di concentrazioni a mare nelle zone antistanti le bocche lagunari;
- i parametri riportati nella formula (2) che calcola la concentrazione di sedimenti per ogni cella, i valori di subsidenza ed eustatismo, dragaggi ed apporti fluviali;
- i parametri che individuano le caratteristiche della simulazione in atto.

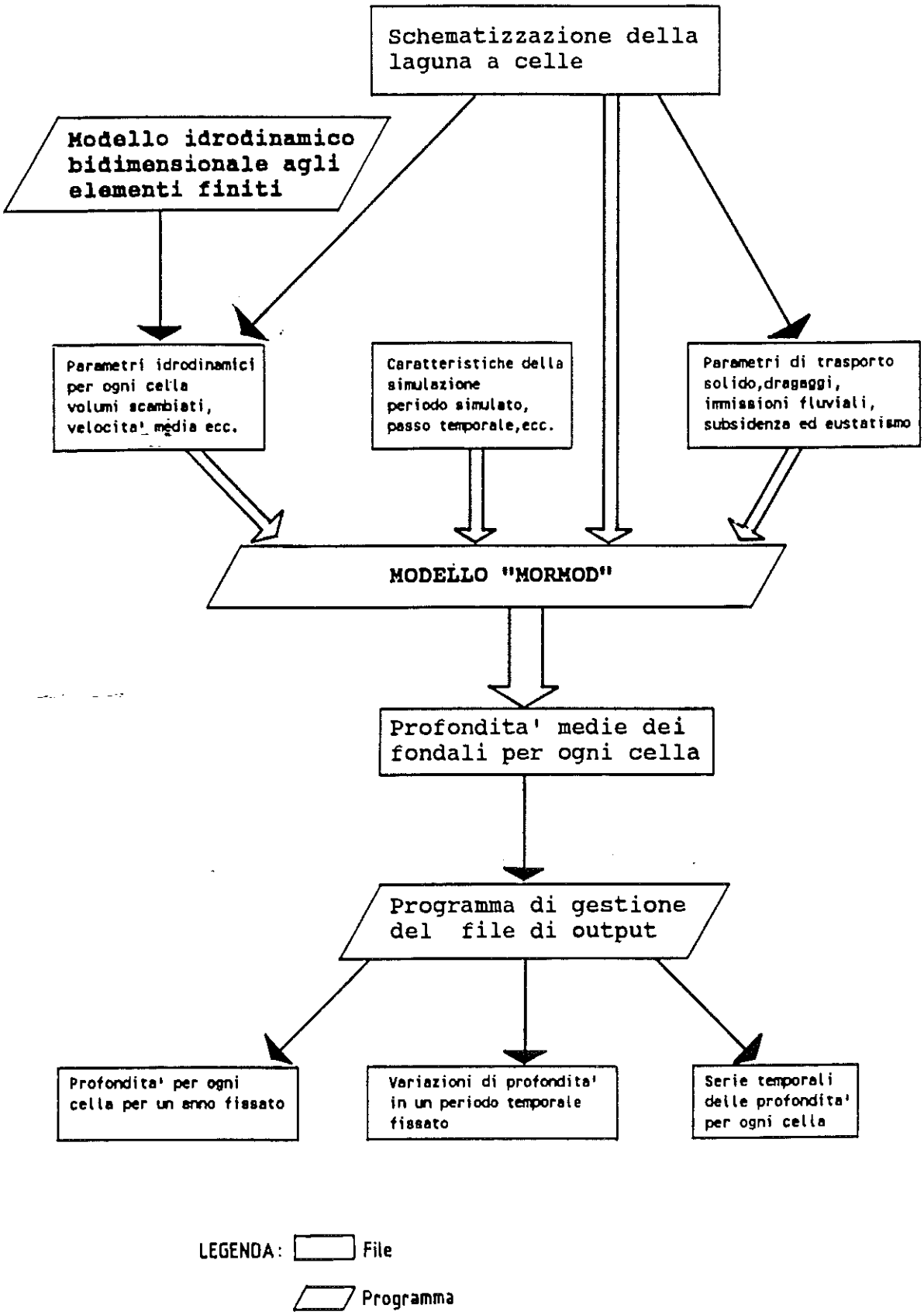


Fig. 2.3.12 - SCHEMA A BLOCCHI DEL MODELLO MORFOLOGICO DI BILANCIO "MORMOD"

Il file in uscita dal programma principale viene elaborato da un programma di plottaggi in modo tale da poter disporre di un file con la serie temporale dei fondali e del corrispondente "plot file" per ogni cella, e di un file che opportunamente trattato consente di avere la situazione dei fondali della laguna in un determinato anno o la differenza tra differenti situazioni.

Taratura del modello

La taratura del modello è consistita nella definizione dei parametri presenti nel calcolo della concentrazione di sedimenti in sospensione (vedi formula 2) per ogni cella della schematizzazione.

Più precisamente si è effettuata un'operazione di "tuning" dei vari parametri in modo da riprodurre l'evoluzione morfologica dal 1970 al 1990 ottenuta dai rilievi sperimentali.

Preliminarmente si è ritenuto opportuno procedere ad una definizione dei coefficienti attraverso relazioni analitico-sperimentali di trasporto solido. Più precisamente si sono definiti i coefficienti C_{fi} legati alle correnti mareali per le "celle canali", e i coefficienti C_{si} legati al moto ondoso e R_{bi} che misura l'effetto della vegetazione per le "celle bassifondi".

Per le celle canali sono stati utilizzati i dati ottenuti dallo Studio C.2.3 (Campagna di misure in laguna di dati anenometrici, ondametrici, correntometrici e di trasporto solido) e in particolare la correlazione tra la concentrazione di sedimenti in sospensione e la velocità della corrente mareale in corrispondenza delle stazioni prese in considerazione dallo studio.

Sulla base dei dati misurati, è stata tarata la formula di Engelund-Hansen per il calcolo del trasporto solido nei canali. A partire dai valori idrodinamici calcolati dal modello idrodinamico bidimensionale agli elementi finiti e dai valori locali del granulo medio dei sedimenti (D50), la formula di Engelund-Hansen ha

consentito di ottenere la concentrazione di sedimenti media annua per ogni "cella canale", e quindi calcolare il valore del coefficiente C_{fi}, di cui alla formula (2) del modello di bilancio.

Anche per le "celle bassofondo" si sono utilizzati i dati dello Studio C.2.3 ed in particolare:

- la correlazione tra velocità del vento ed altezza d'onda significativa per le stazioni prese in considerazione dallo studio;
- la correlazione tra concentrazione di sedimenti ed altezza d'onda significativa, sempre per le stazioni sopracitate, che ha permesso di tarare la formula di Engelund-Hansen per le zone di bassifondi.

Tenendo conto quindi della statistica della velocità del vento, della correlazione tra velocità del vento ed altezza d'onda, e dei risultati della formula di Engelund-Hansen che lega l'altezza d'onda alle concentrazioni di sedimenti, è stato possibile ottenere la concentrazione di sedimenti media annua, e quindi calcolare i valori dei parametri R_{bi}/C_{si} da inserire nella formula (2) del modello.

Riguardo ai valori medi di concentrazione a mare nelle zone antistanti le bocche lagunari, si è fatto riferimento alle elaborazioni statistiche svolte con la formula di Bijker calibrata con le misure a mare dello Studio A.1.3 (vedi paragrafo 2.3), tenendo conto delle profondità medie locali di fronte alle tre bocche.

In fig. 2.3.13 è riportata l'evoluzione dei fondali dal 1970 al 1990, dopo la taratura che tiene conto dei coefficienti teorici per ogni cella della schematizzazione a fianco di quella misurata dai rilievi.

Si può osservare la buona rispondenza come "linea di tendenza", che consente di riporre fiducia nel modello anche come strumento predittivo dell'evoluzione "a grande scala" a seguito di interventi importanti, in situazione di regime a bassa energia.

Fig. 2.3.13 - EVOLUZIONE DEI FONDALI TRA IL 1970 E IL 1990: CONFRONTO TRA I RILIEVI SPERIMENTALI E I RISULTATI DEL MODELLO "MORMOD"

VARIAZIONI OTTENUTE DAL RILIEVO BATIMETRICO

VARIAZIONI CALCOLATE CON IL MODELLO

BARENE

VALORI NON DISPONIBILI

La taratura del modello, inoltre, è stata completata attraverso un'ulteriore operazione di "aggiustaggio" ("tuning" nel termine inglese ormai di uso comune) dei coefficienti teorici, per meglio seguire l'evoluzione morfologica della laguna ottenuta dai rilievi del 1970 e 1990.

D) I modelli di trasporto e bilancio del sedimenti del DHI

Gli strumenti per la modellazione dell'evoluzione morfologica, predisposti nell'ambito dello studio A.2.14/2ª fase dal D.H.I. (42), completano il "set" di strumenti matematici disponibili e consentiranno di approfondire ulteriormente lo studio degli effetti degli interventi sulla morfologia svolto nel Progetto di Massima.

L'approccio del DHI si differenzia da quello TCH in quanto l'elaborazione statistica svolta per definire l'evoluzione media (e quindi per poter ottenere conclusioni in termini di bilancio) si pone "a valle" del complesso di simulazioni, che riproducono la evoluzione dei fondali in conseguenza di un particolare evento rappresentativo.

Nel modello TCH, invece, tale elaborazione avviene "a monte" del processo di calcolo, e cioè nella fase di calibrazione del modello e scelta dei coefficienti.

Da questo differente approccio deriva per il modello DHI un impegno molto maggiore in termini di tempi e costi di esecuzione, in quanto vanno riprodotti gli effetti di diversi eventi rappresentativi per poi pesare statisticamente i risultati.

Tale modello consente però di ottenere informazioni sugli effetti locali e sulle conseguenze di eventi estremi, svolgendo così una funzione molto importante rispetto al modello di bilancio prima esposto.

Il modello DHI, inoltre, (o meglio, il "set" di modelli disposti in cascata, come risulta dallo schema logico riportato nella fig. 2.3.14) consente di avere molte informazioni intermedie anche prima di pervenire al bilancio dei sedimenti, informazioni riguardanti gli aspetti idrodinamici, di dispersione delle sostanze inquinanti, di modifiche biologiche (modello bentonico), tutti in qualche modo collegati anche alle modifiche morfologiche.

Passando più in dettaglio alla descrizione del set di modelli, risulta evidente dalla fig. 2.3.14 che il modello di trasporto di sedimenti e il modello di bilancio utilizzeranno come input diretti i risultati ottenuti dal modello idrodinamico e dal modello di moto ondoso, a partire dagli eventi di progetto selezionati. Come dati di input sono inoltre utilizzati anche i risultati delle elaborazioni del modello delle comunità bentoniche, che a sua volta necessita dei risultati del modello dispersivo.

Il modulo più importante e innovativo del set di modelli, ovvero il modello di trasporto dei sedimenti, si basa su formulazioni del trasporto che, pur partendo da un approccio teorico, utilizzeranno in larga misura gli elementi sperimentali raccolti nell'ambito dello studio C.2.3 e più precisamente le misure di concentrazione dei sedimenti per diverse condizioni di corrente, moto ondoso, profondità, granulometria dei sedimenti e condizioni della vegetazione presente sul fondo.

La griglia di calcolo del trasporto è quella di 300 m, utilizzata anche per le simulazioni con il modello idrodinamico e con quello di moto ondoso: il vantaggio evidente che si ottiene nell'utilizzo di un griglia con tale definizione spaziale, è la possibilità di tenere conto degli effetti locali.

Il modello di bilancio vero e proprio, infine, costituisce l'ultima fase del processo di calcolo, direttamente in cascata rispetto al modello di trasporto di cui media i risultati utilizzando una combinazione statistica degli eventi di progetto.

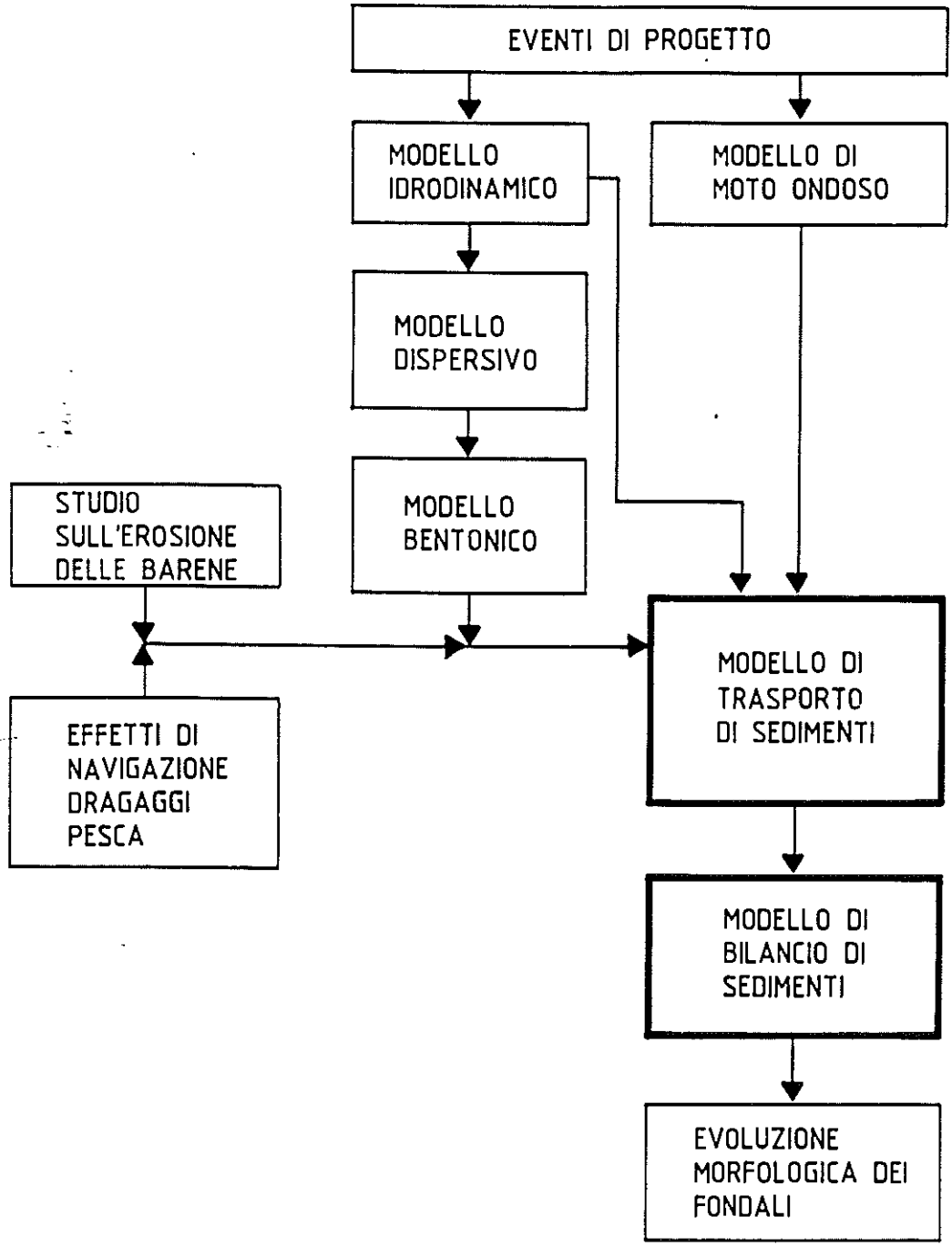


Fig. 2.3.14 - SCHEMA RAPPRESENTATIVO DEI MODELLI MATEMATICI UTILIZZATI NELLO STUDIO A.2.14 /2ª FASE (D.H.I)

Questo modello di bilancio, che è stato verificato e tarato (nella seconda fase dello studio A.2.14) e sarà utilizzato nella progettazione esecutiva degli interventi, è in grado di calcolare il movimento dei sedimenti in ingresso ed in uscita nelle celle di 300 metri in cui la laguna è stata suddivisa. I risultati ottenuti da questo modello forniranno informazioni più dettagliate, e si presentano quindi come complementari rispetto a quelli, più globali, ottenuti con il modello di bilancio multicelle "MORMOD" precedentemente descritto.

2.4. Gli effetti sulla qualità delle acque

Lo studio degli effetti degli interventi sulla qualità delle acque e, come esposto al paragrafo successivo, anche sulla biologia, verrà svolto con metodologie più semplificate rispetto allo studio degli effetti su idrodinamica e morfologia.

Ciò per due ragioni. Anzitutto l'obiettivo del recupero della morfologia è, per questo Progetto, primario rispetto a quello del miglioramento della qualità delle acque.

In secondo luogo, si tenga sempre presente che gli aspetti di qualità del sistema chimico e di quello biologico verranno trattati più specificatamente nel Progetto degli interventi per l'arresto del degrado, nell'ambito del quale è prevista anche una fase di sviluppo degli appositi strumenti di calcolo.

Per valutare gli effetti degli interventi sulla qualità delle acque, occorre anzitutto distinguere se gli interventi potranno avere effetti di tipo diretto (ovvero ridurre gli input di nutrienti in laguna) oppure soltanto indiretto (ovvero migliorare la qualità incrementando la circolazione idrodinamica, senza però intervenire sugli apporti di nutrienti).

Nel primo caso il miglioramento delle qualità verrà valutato applicando, agli scarichi interessati dagli interventi, coefficienti

di riduzione degli apporti di nutrienti desunti dalla letteratura, dall'esperienza o comunque derivanti da ipotesi considerate attendibili.

In questo modo si otterrà anzitutto l'informazione sulla riduzione delle concentrazioni di nutrienti all'ingresso della laguna: la successiva distribuzione spaziale delle concentrazioni in laguna verrà definita, a confronto con la situazione attuale, con i modelli dispersivi (spiegati nel seguito).

Per gli interventi che agiscono sulla qualità in modo solo indiretto, la valutazione partirà da calcoli di tipo idrodinamico, nella convinzione che una maggior circolazione correntizia costituisca un fattore positivo per migliorare anche le qualità dell'acqua.

La valutazione degli effetti sarà quindi approfondita utilizzando i modelli dispersivi: modello dispersivo 1D in fase preliminare (utilizzo da parte di TCH) e modelli dispersivi 2D per verifiche della configurazione finale: alle differenze finite (utilizzo da parte del DHI nell'ambito dello Studio A.2.14, 2^ Fase) e agli elementi finiti.

I modelli dispersivi

I modelli dispersivi costituiscono un passo successivo, rispetto a quelli idrodinamici, verso la riproduzione e la comprensione di modifiche più specificatamente relative alla qualità delle acque. Il loro obiettivo infatti, è quello di individuare come modifiche all'idrodinamica si traducano in differenze nella distribuzione spaziale di sostanze inquinanti.

Nel corso dell'esame delle diverse alternative allo studio, gli effetti degli interventi morfologici sulla qualità delle acque verranno esaminati principalmente utilizzando il modello dispersivo unidimensionale, messo a punto nello studio A.3.5.

La schematizzazione della laguna utilizzata per il modello dispersivo unidimensionale è la stessa del modello idrodinamico. Il principio di base del modello è quello di considerare il fenomeno della dispersione di una sostanza conservativa come la combinazione di due meccanismi: un trasporto convettivo accompagnato da un mescolamento.

Nel caso dello schema a rete di canali multiconnessi, con il quale è possibile simulare il comportamento idrodinamico dispersivo della laguna di Venezia, il principale responsabile della dispersione è rappresentato prevalentemente dal mescolamento che avviene in corrispondenza ai nodi della rete dove confluiscono due o più canali: nel modello si è ipotizzato che la sostanza entrante nel nodo generico in esso si mescoli, determinando una "concentrazione nodale" e un flusso uscente pari al prodotto di tale concentrazione per la portata totale che si allontana dal nodo.

Un secondo importante meccanismo di dispersione è rappresentato dallo scambio di massa tra il canale principale della rete stessa e le espansioni laterali a basso fondale ad esso adiacenti.

L'ipotesi introdotta è che la sostanza che entra nel canale proveniente dalle espansioni laterali o che si immette in queste dal canale principale si mescoli completamente, determinando nel canale stesso e nelle zone d'acqua adiacenti una concentrazione uniforme. Va detto, per inciso, che tale ipotesi appare corretta quando la sostanza proveniente dalle zone a basso fondale entra nel canale e qui si mescola; meno verosimile è in generale il funzionamento opposto, a causa della notevole estensione trasversale delle espansioni.

Come forzante idrodinamica, il modello dispersivo 1D utilizza i risultati (livelli e portate) ottenuti in ogni nodo della rete di canali del modello idrodinamico.

Per quanto riguarda la verifica di tale modello, nell'ambito dello studio A.3.5, sono stati messi a confronto i risultati da esso forniti con quelli ottenuti da rilievi sperimentali.

I dati calcolati dal modello sono risultati in buon accordo con i rilievi sperimentali (campagna di Rodamina del 1977, campagna di temperatura del 1985) e ciò ha confermato la validità del modello per simulare la propagazione e dispersione di un inquinante conservativo in laguna.

Per quanto riguarda, infine, la presentazione dei risultati ottenuti con il modello dispersivo 1D, sono state individuate due modalità di particolare interesse, che potranno essere impiegate, in alternativa o congiuntamente, a seconda del tipo di intervento allo studio.

La prima è la "classica" esposizione della distribuzione delle concentrazioni di equilibrio, a seguito dell'immissione a portata costante di una sostanza conservativa in una o più sorgenti, al termine di un periodo successivamente lungo per consentire di ottenere una situazione di regime. Come intervallo temporale è stato considerato al riguardo sufficiente un mese, ed è stato scelto di riprodurre, a partire dalle curve registrate di marea, il mese di febbraio 1985, mese per il quale i volumi di marea calcolati con il modello 1D hanno valori molto prossimi ai valori mensili medi. Questo tipo di risultato è riportato, a titolo di esempio, nella fig. 2.4.1.

La seconda modalità espositiva è connessa al concetto di tempo di dimezzamento delle concentrazioni: in pratica viene calcolato il tempo in cui una concentrazione iniziale, ipotizzata costante su tutta la laguna, viene dimezzata per effetto del ricambio con il mare, ipotizzato a concentrazione nulla.

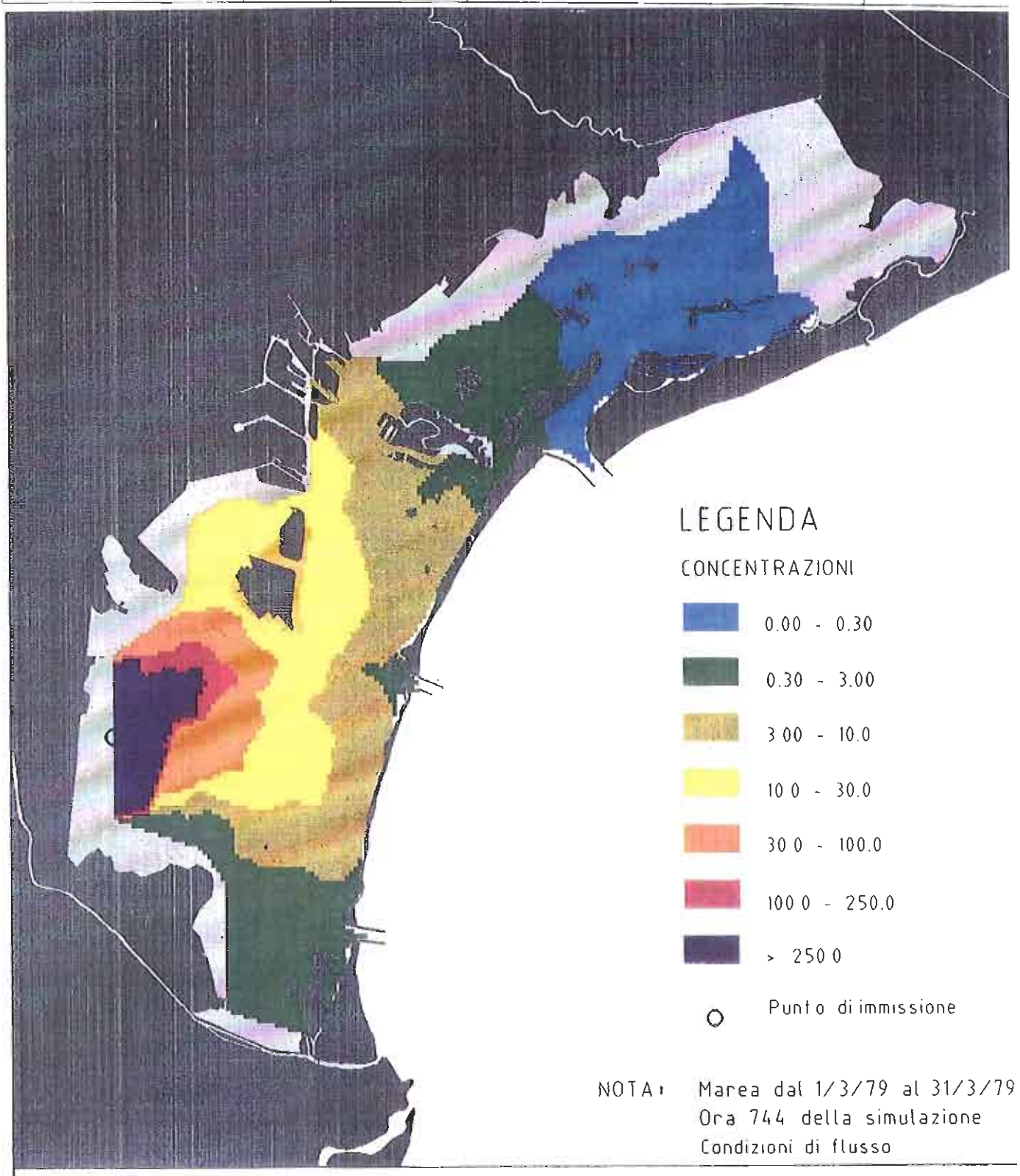


FIG. 2.4.1 MODELLO DISPERSIVO 1 D
Distribuzione in laguna delle concentrazioni di inquinante

STATO ATTUALE

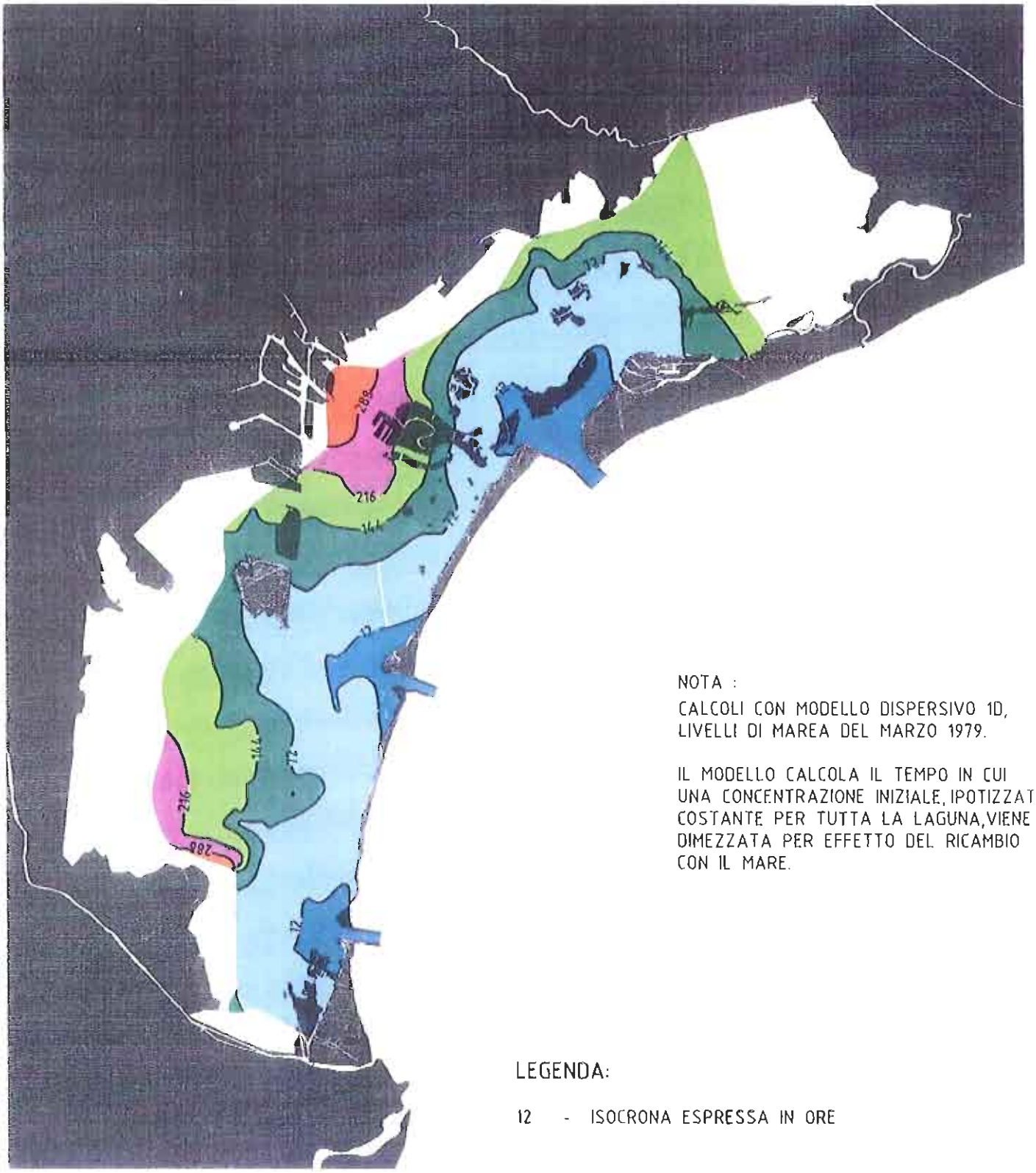
0 2500 5000 7500 10000 12500 m

Anche in questo caso il periodo di marea scelto per la simulazione è quello del febbraio 1985, mentre i risultati (vedi fig. 2.4.2), consistono in curve di dimezzamento delle concentrazioni di inquinante, indicative dei tempi di ricambio nelle varie zone lagunari. Si osserva come il tempo di dimezzamento vari da valori pari ad un ciclo di marea in un'area prossima alle bocche, a tempi almeno pari ad una decina di giorni nelle zone più interne lagunari. Da notare, inoltre, che nella zona di partiacque, a causa delle deboli correnti mareali, i tempi minimi di dimezzamento sono pari ad almeno 3 giorni.

Come già detto, le simulazioni sulla configurazione finale di progetto degli interventi influenti sulla qualità delle acque verranno svolte anche con il più sofisticato modello dispersivo bidimensionale alle differenze finite, del Danish Hydraulic Institute.

Il modello dispersivo bidimensionale risolve le equazioni di conservazione di massa per sostanze in soluzione o in sospensione, il cui trasporto viene determinato dal movimento delle correnti, calcolato con il modello idrodinamico alle differenze finite (di cui il modello dispersivo utilizza la stessa griglia spaziale e batimetrica).

Anche con questo modello è evidentemente possibile simulare l'introduzione di sostanze in laguna (ad esempio, nella fig. 2.4.3b il punto di immissione è la centrale di Fusina) e la loro conseguente dispersione in tutta la laguna, fino al raggiungimento di concentrazioni 'di equilibrio'. Le differenze con il modello unidimensionale riguardano la maggior precisione dei calcoli nelle zone di bassofondo e la possibilità di studiare anche i fenomeni di ricambio che si svolgono attorno alle bocche con l'apporto di acqua dal mare Adriatico (vedi figura 2.4.3a), possibilità legata all'inserimento nella schematizzazione anche di un'ampia zona litoranea all'esterno delle bocche.



NOTA :

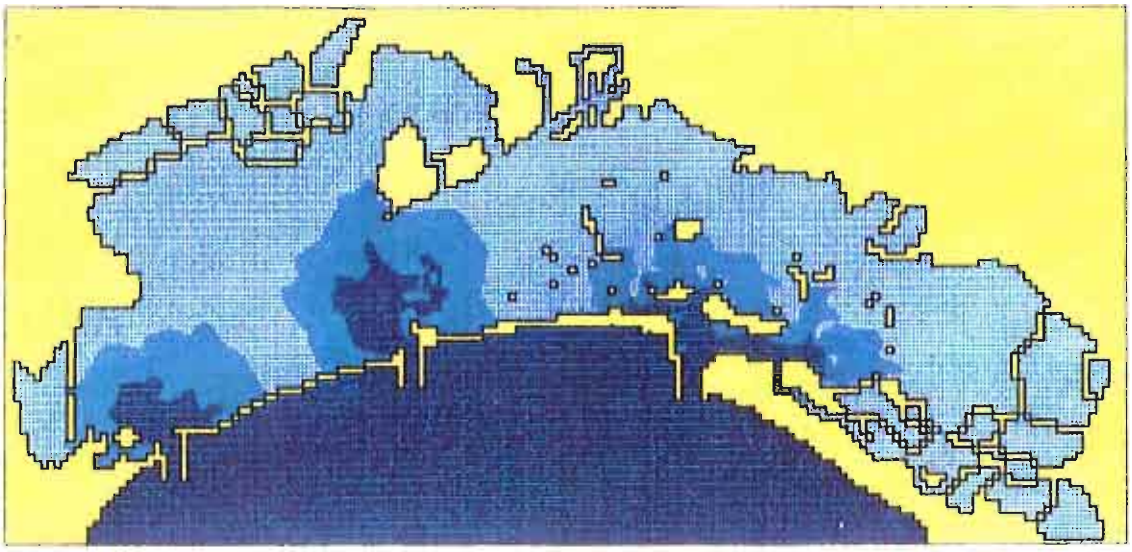
CALCOLI CON MODELLO DISPERSIVO 1D, LIVELLI DI MAREA DEL MARZO 1979.

IL MODELLO CALCOLA IL TEMPO IN CUI UNA CONCENTRAZIONE INIZIALE, IPOTIZZATA COSTANTE PER TUTTA LA LAGUNA, VIENE DIMEZZATA PER EFFETTO DEL RICAMBIO CON IL MARE.

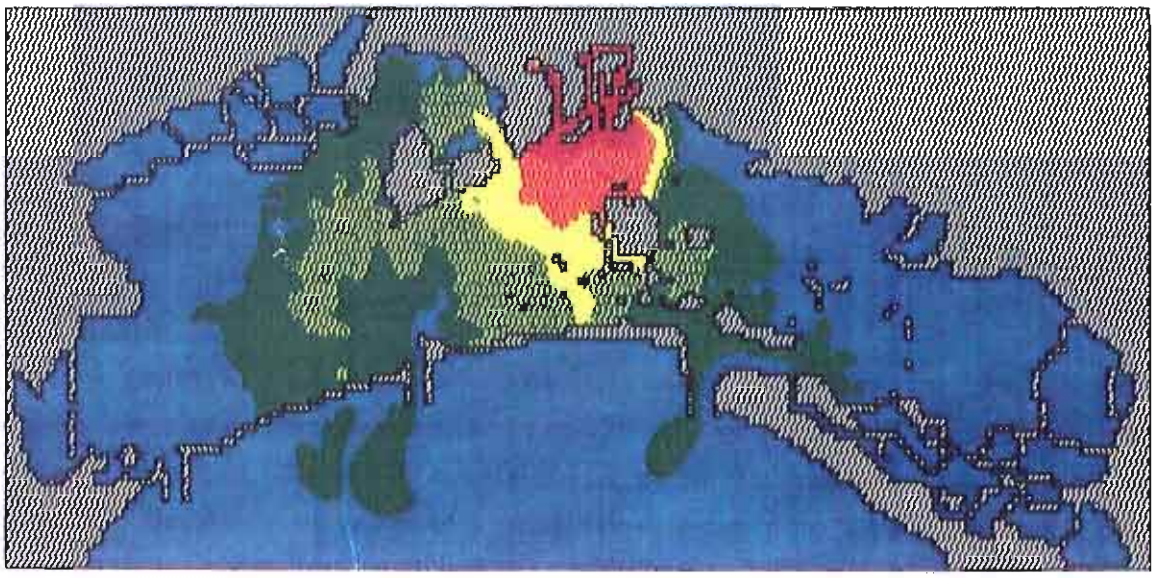
LEGENDA:

12 - ISOCRONA ESPRESSA IN ORE

Fig. 2 4.2 - TEMPI DI DIMEZZAMENTO DELLE CONCENTRAZIONI DI INQUINANTE IN LAGUNA



a) PERCENTUALI DI RICAMBIO DIRETTO



b) CAMPO DI CONCENTRAZIONE DI UNA SOSTANZA SCARICATA A MARGHERA

Fig. 2.4.3 - ESEMPI DI UTILIZZO DEL MODELLO DISPERSIVO BIDIMENSIONALE

Il modello dispersivo 2D agli elementi finiti, recentemente sviluppato da Technital, fornisce un risultato e un tipo di output molto simili al modello del DHI, con il vantaggio di poter essere applicato ad una schematizzazione batimetrica che consente una più accurata riproduzione di canali e barene.Nel modello TCH, le curve di uguale concentrazione degli inquinanti sono ottenute calcolando all'interno di ogni elemento della maglia il numero di particelle presenti, generate da un modello matematico lagrangiano di tipo diffusivo.

In tale modello gli inquinanti sono rappresentati come corpi puntiformi che si muovono trasportati dalla corrente su traiettorie assegnate, quindi tenendo conto del campo di corrente che si ottiene dal modello idrodinamico bidimensionale. La parte diffusiva delle particelle di inquinanti viene simulata con un modello statistico che tiene conto del moto casuale delle particelle per effetto della turbolenza su scala inferiore a quella del "grid".

2.5. Gli effetti sulla biologia

A) Aspetti generali

La valutazione degli effetti degli interventi morfologici sulla biologia lagunare rappresenta un momento di verifica necessaria sia per ridurre e se possibile evitare gli eventuali impatti negativi di tali interventi sulle comunità vegetali e animali presenti, sia per evidenziare al contrario eventuali effetti positivi indotti da particolari interventi (come la piantumazione della zostera) sulla biologia lagunare.

L'analisi riguarderà essenzialmente gli organismi bentonici che sono più direttamente collegabili alle caratteristiche morfologiche.

Gli studi precedentemente realizzati (in particolare lo studio A.3.16) hanno approfondito le conoscenze relative alle comunità

vegetali ed in particolare per quanto riguarda le fanerogame marine si sono potute verificare delle correlazioni con alcuni fenomeni morfologici.

Per quanto riguarda invece le comunità biologiche animali attualmente il livello di conoscenza relativo alla loro distribuzione e funzione nell'ambito lagunare è ancora molto preliminare. Sono stati a tal proposito programmati alcuni studi, al termine dei quali sarà meglio possibile valutare gli effetti degli interventi su queste comunità.

Attualmente quindi ci si limiterà a due tipi di verifica. La prima sarà costituita dall'esame ragionato dei dati ottenuti con i modelli dispersivi, confrontati con le conoscenze già disponibili sulle correlazioni tra qualità dell'acqua e biologia. La seconda è riferita essenzialmente alle comunità di fanerogame marine per valutare le variazioni indotte su di esse dagli interventi morfologici. Si prevede, a tal proposito (ma solo a livello esecutivo), l'impiego di un modello ecologico semplificato (modello bentonico) focalizzato sulla distribuzione delle fanerogame presenti sui fondali lagunari e sugli effetti prodotti dagli interventi su tale distribuzione. Questi effetti possono dipendere sia da fattori di tipo diretto come l'alterazione delle profondità dei fondali, sia di tipo indiretto come la variazione della distribuzione delle concentrazioni inquinanti a seguito di modifiche all'idrodinamica.

B) Il modello bentonico

Appurato che le fanerogame marine hanno un'influenza diretta sulle modifiche morfologiche e dopo averle definite come indicatori biologici della qualità dell'ambiente dei bassifondi lagunari, l'obiettivo del modello sarà quello di individuare le loro aree di crescita potenziale, e in particolare la loro modifica a seguito di interventi sui carichi inquinanti e sull'idrodinamica.

Si tratta pertanto di un modello di tipo ecologico, ma molto semplificato, focalizzato soltanto su alcune comunità di specifico interesse per la morfologia e che quindi non pretende di costituire un primo passo per le future complesse attività di modellazione dell'ecologia lagunare, in previsione in studi appositi.

Il modello, estesamente denominato "modello di evoluzione delle comunità bentoniche", viene sviluppato in cooperazione dal Danish Hydraulic Institute e dal Water Quality Institute, nell'ambito della seonda parte del più volte citato Studio A.2.14, 2^ Fase.

La struttura di questo modello è stata impostata sulla base delle informazioni ottenute durante la prima fase dello Studio Morfologico della Laguna, A.2.14, che aveva messo in luce l'importanza della situazione delle comunità vegetali presenti nei sedimenti di fondo (comunità bentoniche) ai fini di contrastare i processi erosivi. La correlazione tra comunità biologiche e processi morfologici viene ora approfondita riproducendo, in modo anche quantitativo, i processi che governano lo sviluppo (o la riduzione) delle fanerogame stesse e delle altre comunità bentoniche e che consenta altresì di evidenziare anche gli effetti ottenibili con interventi (come ad esempio la riduzione del carico di nutrienti o la costruzione di opere che modifichino la circolazione correntizia).

Si osserva che, data la delicatezza dell'argomento e i lunghi tempi necessari a preparare il modello e soprattutto a calibrarlo con le informazioni sperimentali, i risultati del modello non potranno essere utilizzati nell'ambito del Progetto di Massima: il suo impiego è previsto pertanto nel corso dei Progetti esecutivi degli interventi.

Nel seguito vengono brevemente esposte le singole fasi previste per lo sviluppo e la verifica del modello.

Analisi dei dati sperimentali

Il modello delle comunità bentoniche si baserà in gran parte sui rilievi svolti nello studio A.3.16 sulle comunità biologiche, specie sui rilievi della presenza della zostera nei bassifondi e sui rilievi della vegetazione barenicola.

Prima di predisporre il modello, questi dati sperimentali saranno esaminati in modo critico, con particolare attenzione alla discussione della correlazione della composizione della vegetazione con la stabilità delle barene e dei fondali.

Preparazione

Il modello riprodurrà in modo molto semplificato i processi di base che governano le modifiche delle comunità biologiche di maggiore interesse per la morfologia, secondo lo schema riportato in fig. 2.5.1. La definizione spaziale del modello sarà per grandi celle (circa 20-30 in tutta la laguna) rappresentative di zone con condizioni simili.

Verifica della situazione attuale

Il modello sarà verificato riproducendo un anno tipico, nella situazione attuale; per tale 'test' verranno utilizzati i dati dei parametri ambientali (carichi di nutrienti, temperatura, insolazione, ecc.) disponibili da altri studi, mentre la distribuzione della vegetazione sul fondo sarà ottenuta dai rilievi svolti nello studio A.3.16 (nel periodo primavera '90).

Tests di sensibilità

Data la complessità dell'argomento in questione, si è ritenuto indispensabile svolgere, per questo modello, anche una serie di tests di sensibilità per valutare gli effetti di modifiche ai parametri di input (ad esempio, al carico di nutrienti o ai volumi di marea scambiati tra le celle).

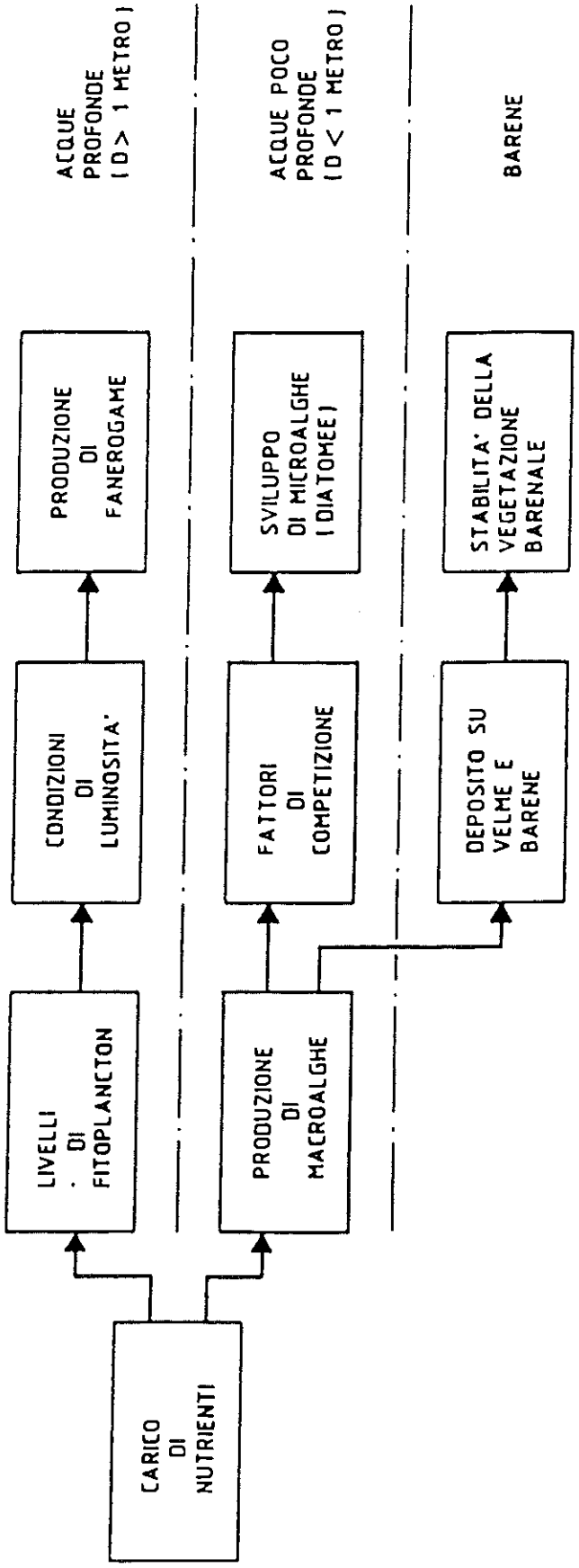


Fig. 2.5.1 - SCHEMA DELLE PRINCIPALI RELAZIONI ESAMINATE NEL MODELLO DI EVOLUZIONE DELLE COMUNITA' BENTONICHE

Tali tests consentiranno di ottenere risultati ritenuti 'ragionevoli' allo stato attuale delle conoscenze, anche valutando il confronto con situazioni in cui gli interventi associabili alle variazioni dei parametri di input sono stati già realizzati.

Valutazione degli interventi

Si prevede ovviamente di utilizzare il modello per valutare gli effetti degli interventi più direttamente influenti sul sistema biologico, attraverso la modifica delle condizioni di qualità dell'acqua.

3. METODI PER VALUTARE GLI EFFETTI PRODOTTI DAGLI INTERVENTI MORFOLOGICI SULLE FUNZIONI SOCIO-ECONOMICHE

3.1. Premessa

Tra le funzioni socio-economiche e morfologia sono possibili relazioni reciproche.

Da un lato l'esercizio delle funzioni e l'attuazione dei loro piani di sviluppo possono determinare un impatto sulla morfologia, da valutare caso per caso. Dall'altro lato, sono gli interventi morfologici ad avere possibili effetti, di segno di volta in volta positivo o negativo, su alcune funzioni sociali ed economiche svolte all'interno della laguna.

Le metodologia di studio individuata per tener conto, nella progettazione degli interventi, della presenza e dell'importanza delle attività umane, tiene conto di entrambi questi aspetti.

Per limitare il campo d'indagine è anzitutto parso essenziale identificare le correlazioni funzioni-morfologia e intervento morfologico-funzioni caratterizzate da un grado di impatto ritenuto importante.

Dallo studio delle funzioni sociali ed economiche presentato nel 2° Rapporto intermedio sono state anzitutto identificate le funzioni che, nel loro esercizio attuale o nei piani di sviluppo desiderati, hanno un impatto diretto sulla morfologia.

Il termine "impatto diretto" intende escludere dall'esame l'impatto "indiretto" dovuto all'apporto di sostanze inquinanti, che verrà esaminato nel Progetto degli Interventi per l'Arresto del Degrado.

Conseguentemente, è stata valutata le possibilità o meno che gli interventi morfologici allo studio influenzino (anche in modo marginale) una o più di una delle attività umane considerate.

Risulta evidente da quanto esposto che non è possibile in questa sezione prescindere dalla tipologia degli interventi morfologici in esame. Con riferimento agli interventi allo studio esposti nel successivo volume 6, sono state pertanto definite alcune tipologie generali di intervento, all'interno delle quali possono essere ricondotti in pratica tutti gli interventi allo studio.

Esse sono: ridefinizione di canali, ricostruzione di velme o barene, apporto di sedimenti, piantumazione delle fanerogame, modifica dei confini lagunari (in pratica, apertura delle valli da pesca).

La sintesi degli impatti valutati come più importanti è esposta nella tabella 3.3.1 alla pagina seguente, nella parte a sinistra rispetto all'elenco delle funzioni.

Risulta dall'esame della tabella che le funzioni socio-economiche che hanno gli effetti diretti più importanti sulla morfologia sono (nella situazione attuale): la pesca, la manutenzione dei canali e la navigazione.

La pesca è dannosa se esercitata con metodologie, per lo più non consentite (turbosoffianti) che causano una vera e propria "aratura" del fondo, sollevando i sedimenti e danneggiando la vegetazione con apparato radicale (zoostera). La quantificazione di questi fenomeni è pressochè impossibile per via diretta: una conferma indiretta della loro importanza è stata ottenuta dal rilievo della popolazione di zoostera ancora presente in laguna (Studio A.3.16, Composizione delle comunità biologiche).

La manutenzione dei canali ha un ruolo importantissimo di modifica dell'equilibrio morfologico e idrodinamico: importanti interventi di escavo (specie di canali artificiali) provocano infatti uno squilibrio tra la sezione complessiva dove transita la marea ed i volumi di marea in transito, con conseguente innesco di tendenza alla sedimentazione dei canali ed erosione dei bassifondi.

TAB. 3.3.1

IMPATTO DELLE FUNZIONI SOCIO-ECONOMICHE SULLA MORFOLOGIA
E DEGLI INTERVENTI MORFOLOGICI SULLE FUNZIONI

IMPATTO DIRETTO DELLA FUNZIONE SULLA MORFOLOGIA		FUNZIONE	IMPATTO DEGLI INTERVENTI SULLE FUNZIONI				
Situazione attuale	Piani di sviluppo		Ridefinizione canali	Ricostruzione velme-barene	Apporto sedimenti	Piantumazione fanerogame	Apertura valli da pesca
		ABITAZIONE					
		AGRICOLTURA					
●		PESCA		◑		+	
	◑	ACQUACOLTURA IN LAGUNA	◑	◑		◑	
		VALLICOLTURA					●
		TURISMO		+			
●	◑	NAVIGAZIONE INTERNA	●		◑		+
	◑	PORTO					
		INDUSTRIA					
●	●	MANUTENZIONE CANALI	+	◑	◑	+	+

note = ● impatto certo
◑ impatto possibile
+ effetti positivi

Il fenomeno si può ritenere ormai ben documentato sia a livello sperimentale (si veda ad esempio l'evoluzione di canali e bassifondi nel bacino di Malamocco dopo l'escavo del canale Petroli) sia a livello teorico (attraverso l'applicazione di modelli tipo "EVOSEC").

La navigazione a motore provoca un'azione erosiva sui bordi delle barene e sui fondali, per effetto delle onde trasversali e del getto dell'elica: dai sopralluoghi effettuati si ritiene che tali azioni siano dannose in particolare nei canali contornati da barene. Ciò è stato confermato dalle misure dirette di onde, correnti e sedimenti sospesi, a seguito del transito di imbarcazioni, svolte nello Studio C.2.3.

L'esame dei piani di sviluppo delle funzioni ha consentito di individuare altri impatti importanti, anche per funzioni che, nella situazione attuale, non costituiscono per la morfologia un problema particolare.

É il caso in particolare della portualità: il piano di sviluppo del porto di Chioggia a Val di Rio, con l'escavo di ampi bacini di evoluzione a fondali di oltre sette metri, è destinato a ripercuotersi sulla stabilità dei bassifondi e delle barene circostanti, innescando un processo di deposito dei sedimenti sul fondale dei nuovi bacini.

Anche i piani di sviluppo dell'acquacultura lagunare (molluschicultura) sono da confrontare con grande attenzione con la situazione della morfologia: è essenziale, in particolare, che le nuove concessioni per le coltivazioni di vongole sui bassifondi siano circoscritte ad aree dove non sono presenti le fanerogame, per evitare di causare, con lo sfalciamento delle fanerogame stesse, processi di degrado del sistema biologico e di aggravamento della erosione.

Per quanto riguarda la navigazione interna, il piano di sviluppo con maggior impatto sulla morfologia è di gran lunga il completamento dell'idrovia Padova-Venezia, previsto proprio nella zona barenicola retrostante le casse di colmata interessate dal progetto di un Parco. L'impatto in questo caso è costituito dalla rimozione diretta di ampie superfici di barena, tra le più preziose dal punto di vista naturalistico e paesaggistico.

Da valutare anche con molta attenzione i futuri programmi delle manutenzione dei canali: l'ipotesi di dragaggi esuberanti rispetto alle reali esigenze della navigazione è destinata a far procedere indefinitamente il processo di appiattimento dei fondali lagunari.

Per quanto riguarda l'effetto degli interventi morfologici previsti sulle funzioni, le correlazioni possibili sono riportate sulla parte destra della stessa tabella: esse verranno discusse in dettaglio nel successivo paragrafo 3.2.

3.2. Metodi per valutare gli effetti degli interventi sulle attività umane

Per valutare gli effetti determinati dagli interventi morfologici sulle attività umane non è, in generale, possibile ricorrere a modelli matematici come nel caso degli effetti sul sistema naturale.

L'argomento è stato perciò affrontato principalmente analizzando attentamente e valutando gli elementi di conoscenza delle attività umane e dei loro piani di sviluppo (contenuti nel Volume 4) con le caratteristiche degli interventi morfologici allo studio.

Le correlazioni più importanti (vedi le valutazioni di impatto riportate nella tab. 3.1) sono di seguito discusse.

Gli effetti su pesca e acquacoltura

E' opportuno ricordare che gli effetti, che verranno presi in considerazione, riguardano le attività di pesca e acquacoltura che si svolgono nella laguna aperta, dal momento che le problematiche connesse con l'apertura delle valli da pesca sono oggetto di uno studio apposito, svolto da FISIA.

Gli effetti di ogni intervento proposto verranno valutati sia in termini di occupazione di aree già dedicate alle attività di pesca o acquacoltura, sia in termini di effetti (diretti o indiretti) sulle specie di interesse commerciale.

E' chiaro infatti che la scelta di dedicare un'area alla ripiantumazione delle fanerogame al fine di smorzare il moto ondoso, comporta l'impossibilità di utilizzarla per l'allevamento di vongole, che necessita di fondali puliti; allo stesso modo, una modifica del regime delle correnti (connessa ad esempio a modifiche nella rete dei canali o nei fondali delle velme poste a lato di essi) potrebbe penalizzare o favorire le attività di mitilicoltura a seconda che riduca o aumenti il flusso d'acqua.

E' ovvio che la valutazione degli effetti sarà tanto più pecisa quanto più si disporranno di informazioni esaurienti sulla metodologia di pesca e allevamento e sulle specie impiegate.

Per questo, prima di procedere alla fase esecutiva, saranno eventualmente avviati contatti ulteriori con le associazioni di categoria interessate.

Gli effetti sul turismo

L'aumento di superficie di barena e in generale ogni miglioramento della qualità delle acque sono elementi che potrebbero, in teoria, favorire il decentramento dei flussi turistici verso zone interne e oggi in genere trascurate della laguna.

E' evidente però che tali positivi effetti non dipendono tanto dagli interventi in quanto tali, quanto da una riorganizzazione dei flussi turistici, dei metodi per la gestione e la visita delle diverse zone, dalle opportunità create o favorite per lo svolgimento di un turismo di tipo ecologico, ecc.

Gli effetti sul turismo saranno in definitiva soltanto segnalati come possibile, positivo effetto complementare di alcuni interventi.

Gli effetti sulla navigazione

Gli interventi che possono avere effetti sulla navigazione sono evidentemente quelli che modificheranno, in modo diretto o indiretto, le caratteristiche della rete dei canali, e cioè:

- la ridefinizione rete di canali (in questo caso l'influenza è palese e diretta);
- l'apporto artificiale di sedimenti (l'influenza possibile è di tipo indiretto, ovvero esterna alle finalità dell'intervento: è possibile che l'intervento stesso determini, oltre al rifornimento dei bassifondi che ne è lo scopo, anche un interrimento di alcuni canali e quindi un impatto sulla navigazione);
- l'apertura delle valli da pesca: le maggiori portate di marea ottenute con l'intervento potranno consentire la navigazione in alcuni canali interni oggi quasi interriti.

Per i tre interventi citati, la valutazione degli effetti sulla navigazione comprende due attività.

La prima, svolta in tutti i casi, consiste nel determinare, sulla base delle nuove profondità susseguenti agli interventi e della statistica del naviglio operante in laguna, la quota parte del naviglio stesso che verrà (a seconda dell'intervento) esclusa da al-

cuni percorsi o a cui verrà al contrario consentito l'accesso su canali prima interdetti.

La seconda attività verrà svolta solo per gli interventi che modifichino in modo sostanziale i percorsi principali della navigazione maggiore, e cioè per la ridefinizione della rete dei canali a Malamocco. Essa consiste nell'utilizzo del modello matematico di navigazione "SHIPMA".

Per l'intervento citato non si prevede infatti soltanto la modifica delle profondità ma anche del tracciato della via navigabile, tra l'altro di una via di grande importanza come quella che connette la bocca di Malamocco a Marghera. E' quindi essenziale verificare sul modello matematico SHIPMA, già sperimentato nel progetto REA con riferimento all'accessibilità delle bocche, le condizioni di navigabilità lungo il nuovo tracciato per il tipo di naviglio che si prevede di accogliere nei programmi futuri del porto.

Il modello matematico SHIPMA è stato sviluppato da Delft Hydraulics per simulare le manovre di conduzione di una nave, con l'obiettivo di verificare la possibilità di esercitare la navigazione in condizioni di sicurezza in corrispondenza di accessi portuali oppure (ed è il nostro caso) di canali navigabili.

Il modello calcola la rotta e la direzione di corsa del naviglio, tenendo conto degli effetti del vento, delle onde, delle correnti, dei bassi fondali e del risucchio dovuto alle sponde o alle secche.

Le relazioni alla base del modello sono sintetizzate nello schema indicato nella fig. 3.3.1 seguente, e di seguito brevemente esplicitate.

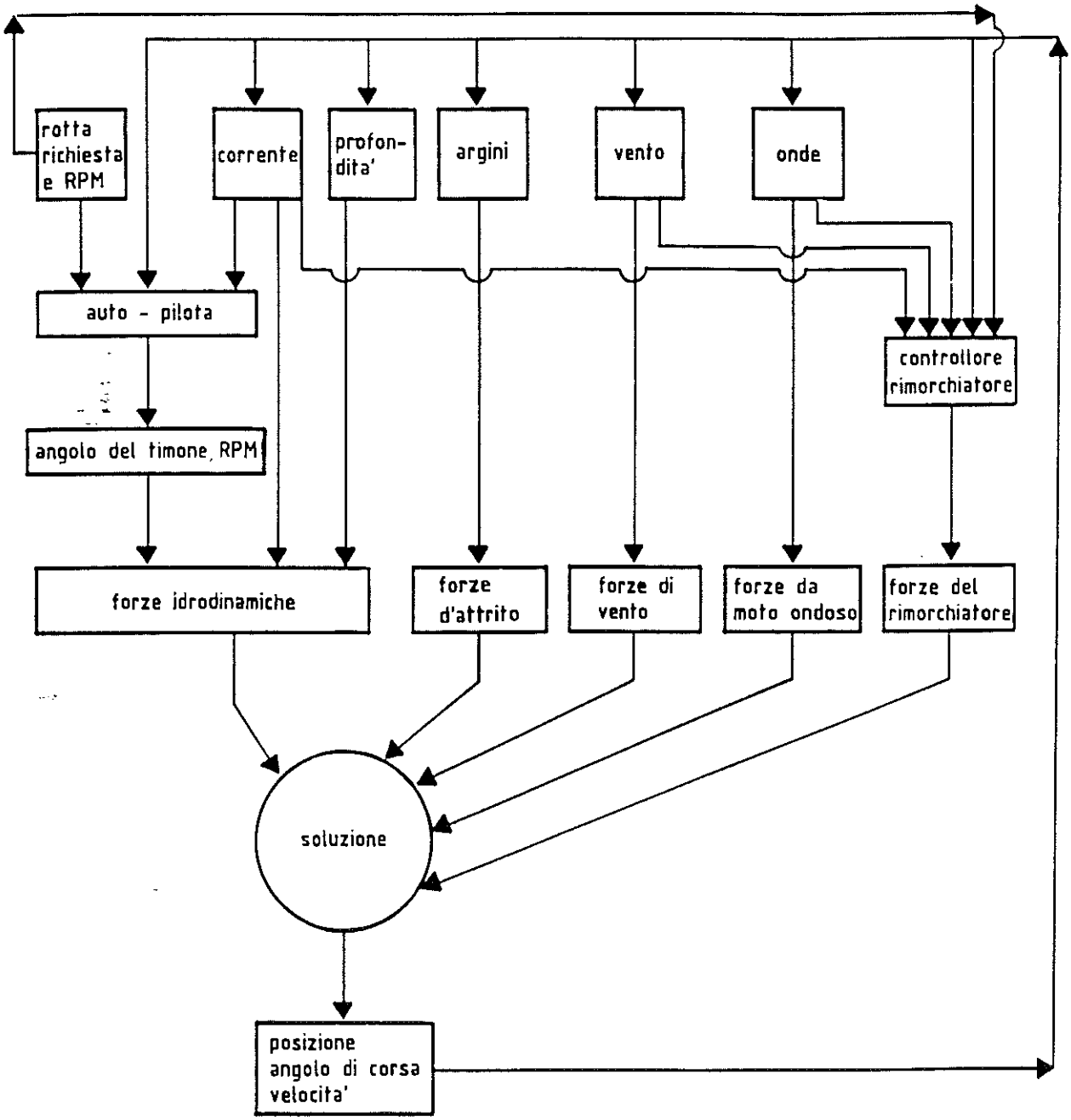


Fig. 3.3.1 - SCHEMA A BLOCCHI DEL MODELLO DI NAVIGAZIONE SHIPMA

I controlli del timone, del motore e dei rimorchiatori sono effettuati da un pilota-automatico che anticipa e corregge le deviazioni da una predeterminata rotta tenendo anche conto dei cambiamenti delle correnti.

Fisicamente e matematicamente le forze idrometriche ed i momenti agenti nella fase di manovra di una nave sono espressi in forze d'inerzia (come aumento di massa) e in forza di portanza e di resistenza (dipendenti dalla velocità della nave).

Anche le forze dovute al motore e al timone possono essere incluse in quest'ultimo tipo di forze.

Le equazioni del movimento della nave pilotata, che stanno sul lato a sinistra dello schema già citato, contengono le forze ed i momenti presenti in accordo con la legge di Newton e con le leggi sulle forze d'inerzia idrodinamiche.

I files di input necessari alle elaborazione con il modello Shipma sono i seguenti:

- un file contenente i dati riguardanti la manovra, la rotta desiderata, la presenza o meno del pilota automatico, il passo temporale, la posizione di partenza;
- alcuni files in cui è descritta la nave, in termini di dimensioni, massa, area sottoposta all'azione del vento, caratteristiche di manovrabilità;
- alcuni files per la descrizione delle condizioni esterne come:
  . profondità e livello del mare
  . posizione degli argini
  . circolazione delle correnti
  . campo di vento
  . campo di moto ondoso
  . numero di rimorchiatori e tensione delle bitte d'ormeggio
  . presenza ed eventuale descrizione dell'assistenza disponibile al rimorchiatore.

Gli outputs del modello consistono invece in serie temporali, relative a:

- rotta, posizione, percorso e direzione della nave
- deviazione dal percorso e distanza della rotta desiderata
- velocità della nave
- angolo del timone e numero di giri del motore
- profondità relativa al centro di gravità della nave
- velocità della corrente sulla nave
- forze agenti sullo scafo dovute al vento
- forze dovute a risucchio agenti sulla nave
- forze dovute ai rimorchiatori agenti sulla nave.

Dall'insieme di queste informazioni, spetta evidentemente al progettista ricavare il giudizio finale sulla possibilità o meno di prevedere la navigazione in sicurezza nelle condizioni in esame.

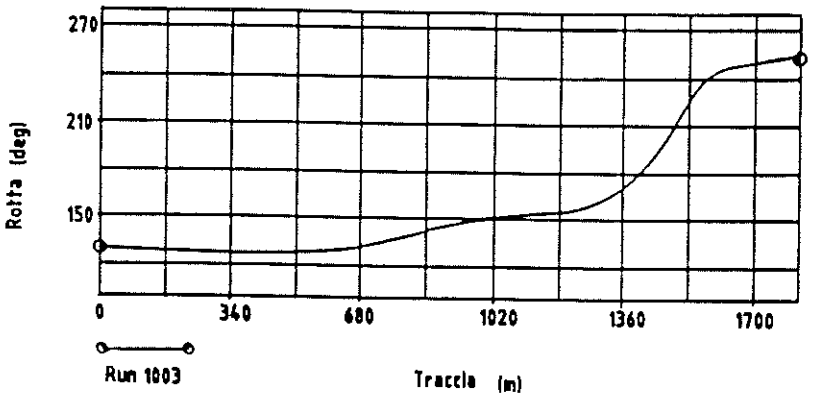
Nella fig. 3.3.2 sono descritti, a titolo di esempio, alcuni outputs grafici riguardanti la direzione della nave, la deviazione rispetto alla rotta desiderata e gli angoli cui è stato posizionato il timone.

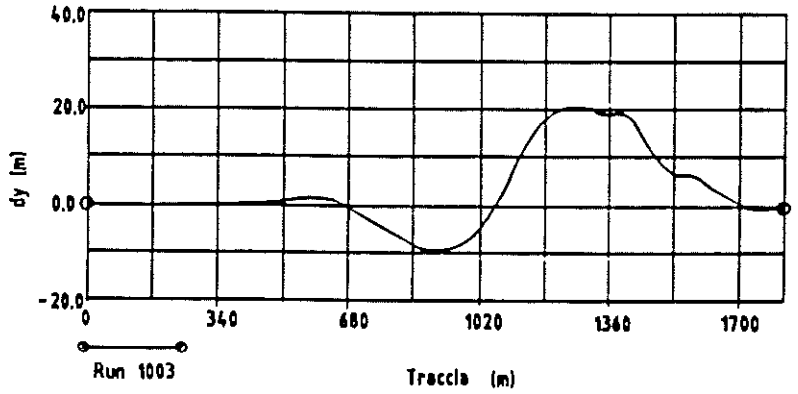
Gli effetti sulle portualità e sull'industria di Marghera

Questi effetti dipendono strettamente dalle conclusioni ottenute dalla verifica precedente, limitatamente agli effetti sulla navigazione di grandi navi adibite a traffico commerciale e/o industriale.

La discussione sarà quindi svolta solo per la ridefinizione della rete dei canali a Malamocco e sulle conseguenti modifiche del tipo di naviglio servito.

Si osservi però che, in questo caso particolare, non è tanto un intervento morfologico a determinare un impatto su un'attività umana (nel caso, portualità e industria): è piuttosto al contrario una scelta socio-politica di indirizzo dell'attività umana a consentire o meno l'effettuazione dell'intervento morfologico.





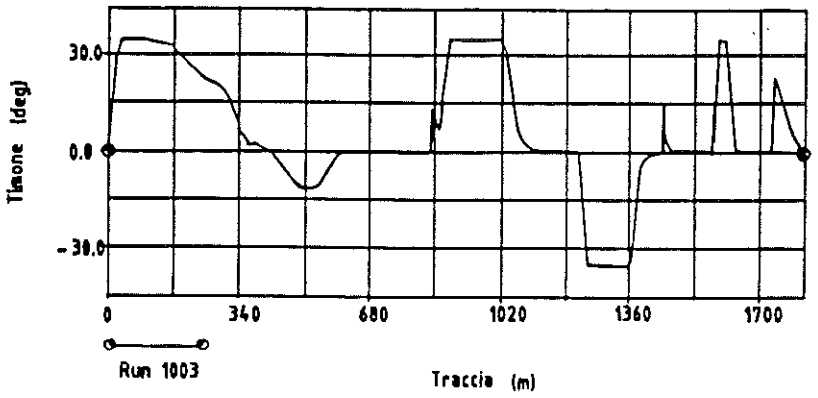


Fig. 3.3.2 - ESEMPI DI OUTPUT GRAFICI DEL MODELLO SHIPMA

Nel concreto, potrà essere la scelta socio-politica di estromissione dalla laguna delle grandi petroliere (con le conseguenti inevitabili ripercussioni sull'industria di Marghera) a permettere lo spostamento del traffico delle più maneggevoli porta-contenitori su nuove direttrici e quindi l'esecuzione dell'intervento morfologico di ridefinizione della rete dei canali: non potranno certo essere attribuite a questo intervento le ripercussioni sull'industria di Marghera sopra citate e conseguenti alla decisione di estromettere le grandi petroliere.

Di queste considerazioni andrà tenuto conto in sede di valutazione degli effetti dell'intervento su porto e industria: tale valutazione si presenta quindi, più che altro, come una discussione di un quadro di riferimento prevedibile, comparato al quadro di riferimento attuale.

Gli effetti sulle attività di manutenzione dei canali

Obiettivo degli interventi morfologici a riguardo di queste attività è quello della minimizzazione dei costi di gestione, e quindi dei quantitativi da dragare necessari per mantenere i fondali richiesti dalla navigazione.

Questo obiettivo viene ottenuto definendo una rete di canali il più possibile vicina ad una configurazione d'equilibrio, ovviamente, si ripete, compatibilmente con l'esigenza di disporre dei fondali necessari alla navigazione.

Da ciò si deduce che tutti gli interventi che contrastano l'attuale tendenza alla sedimentazione in atto nei canali sono da considerare positivi nei confronti di quest'attività umana, mentre sono attentamente da valutare quelli che (come la costruzione di velme o l'apporto dei sedimenti) potrebbero anche localmente incrementare questa tendenza.

Per valutare gli effetti degli interventi ai sensi delle modifiche degli oneri di manutenzione, si potrà utilizzare il modello EVOSEC, già presentato nel paragrafo relativo alla valutazione degli effetti degli interventi sulla morfologia.

Con questo modello è infatti possibile calcolare non solo la sezione d'equilibrio dei canali ma anche il tempo in cui questa sezione viene raggiunta o avvicinata, a partire da una sezione iniziale maggiore di quella d'equilibrio che, nel nostro caso, può essere identificata come la sezione immediatamente successiva all'operazione di dragaggio.