			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 2

IL SISTEMA MORFOLOGICO: TENDENZE EVOLUTIVE

ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO
N. ELABORATO VE3910		DATA 31 Gennaio 1992

CONSORZIO "VENEZIA NUOVA"

IL PRESIDENTE
Dr. L. ZANDA

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE

CONSORZIO VENEZIA NUOVA

IL DIRETTORE • Ing. G. MAZZACURATI

PROGETTAZIONE

PROGETTAL
INTERNATIONAL GENERAL ENGINEERING - ROMA

IL RESPONSABILE • Ing. A. SCOTTI

PROGETTO GENERALE DEGLI INTERVENTI SULLA MORFOLOGIA

RAPPORTO FINALE

VOLUME 2: Il sistema morfologico: Tendenze evolutive

VOLUME 2: INDICE

IL SISTEMA MORFOLOGICO: TENDENZE EVOLUTIVE

1. DESCRIZIONE DEL SISTEMA MORFOLOGICO

2. LE TENDENZE EVOLUTIVE DELLA MORFOLOGIA: INTRODUZIONE

3. VARIAZIONI DELLE SUPERFICI

3.1. Terre emerse

3.2. Barene

3.3. Velme

3.4. Zone d'acqua ad espansione di marea

3.5. Valli da pesca

4. VARIAZIONI DELLE PROFONDITÁ DEI BASSIFONDI

5. VARIAZIONI DELLE SEZIONI DEI CANALI

5.1. Canali lagunari

5.2. Canali di bocca
5.2.1. Le sezioni della bocca di Lido
5.2.2. Le sezioni della bocca di Malamocco
5.2.3. Le sezioni della bocca di Chioggia

6. MORFOLOGIA DEI CANALI LAGUNARI

6.1. Gerarchizzazione

6.2. Meandrizzazione
6.2.1. Gerarchizzazione dei canali lagunari
6.2.2. I meandri dei canali lagunari

1. DESCRIZIONE DEL SISTEMA MORFOLOGICO

Questo volume 2 e il successivo volume 3 sono dedicati allo studio del sistema morfologico, nella sua tendenza evolutiva (volume 2) e nelle cause di tale tendenza (volume 3).

La fig. 1.1 mostra l'inquadramento del contenuto dei 2 volumi nell'ambito del Progetto: la casella "identificazione dei problemi" è colorata solo ai bordi per indicare che potrà essere completata solo dopo aver considerato anche i problemi del sistema antropico.

La laguna di Venezia è il residuo più importante dell'arco lagunare che, fino a epoche non remote, si stendeva da Ravenna fino a Monfalcone e che si era formato, in seguito all'aumento del livello del mare, dall'interazione tra il moto ondoso, le correnti del mare Adriatico e il flusso dei numerosi corsi d'acqua che in esso sfociano.

La laguna ha una struttura morfologica articolata: una fitta rete di canali, con sezioni che vanno diminuendo dalle bocche verso lo interno, convoglia le correnti di marea fino alle parti più interne. I fondali tra un canale e l'altro sono bassi e caratterizzati da alcuni tratti morfologici particolari, che conferiscono alla laguna la sua unicità ambientale: le barene ("isole" di terra normalmente emerse, che vengono sommerse solo nel caso di maree sizigiali o eccezionali) e le velme (che per contro sono aree di norma sommerse, che emergono solo durante le basse maree maggiori). Entrambe hanno un ruolo importante nell'equilibrio dell'ecosistema.

Questa morfologia ha subito nel tempo profonde modifiche, dipendenti da un lato dalle variazioni dei fattori naturali che su di essa agiscono (ad esempio il livello medio del mare o i volumi di sedimenti apportati dai fiumi), dall'altro lato dall'azione diretta dell'uomo che, abitando la laguna da più di un millennio, l'ha trasformata in modo sempre più profondo, adattandola via via alle sue esigenze.

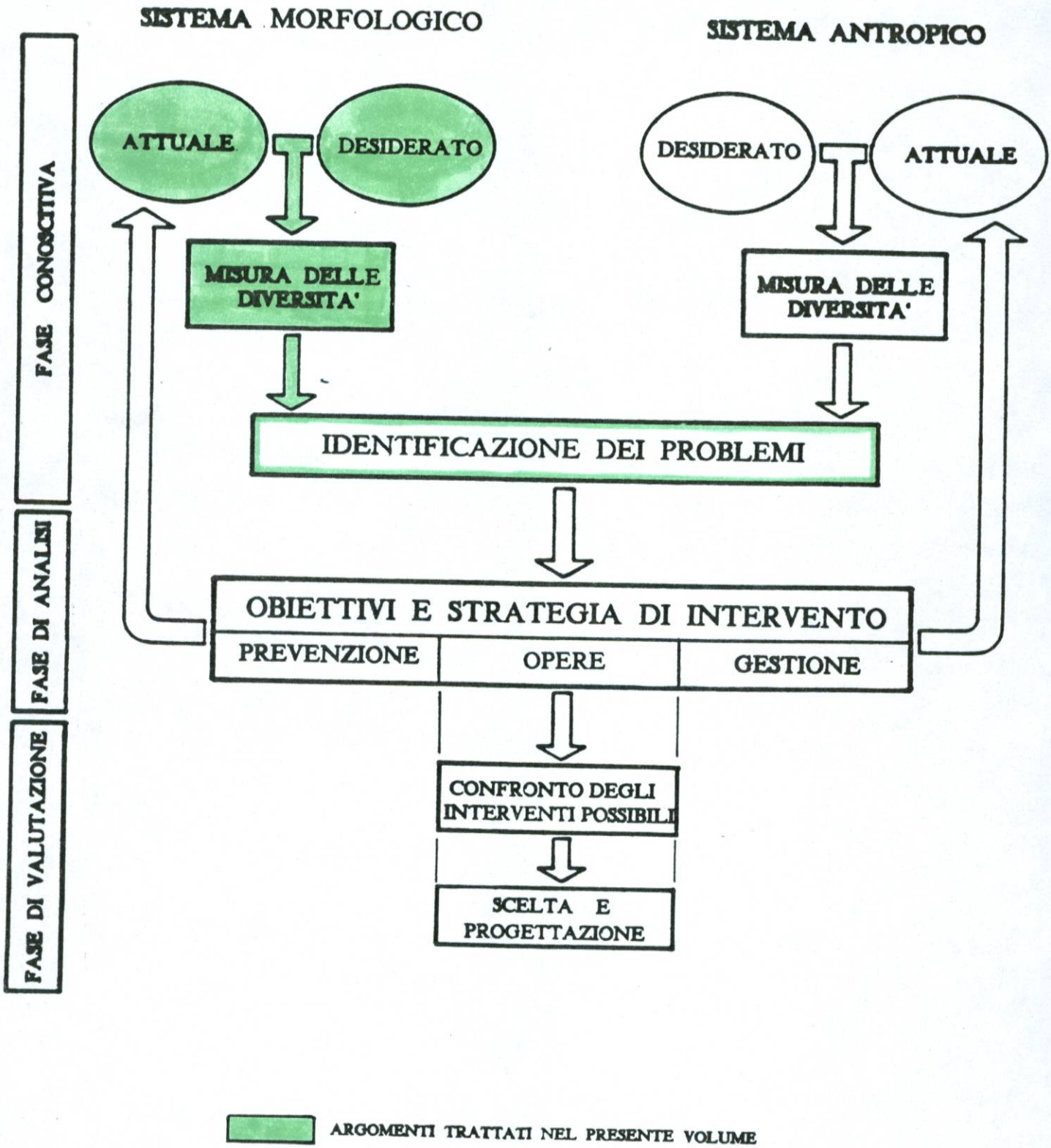


Fig. 1.1 - INQUADRAMENTO DEGLI ARGOMENTI TRATTATI NEL VOLUME.

Le reciproche correlazioni tra fattori naturali e azioni dell'uomo agenti sulla morfologia sono riportate nello schema della fig.1.2.

Questo schema costituisce il riferimento per l'esposizione delle tendenze evolutive della morfologia e delle cause che le hanno determinate, argomenti trattati rispettivamente in questo volume 2 e nel volume 3: esso viene ripetuto quindi all'inizio di ogni capitolo di questi due volumi, mettendo in luce l'argomento via via trattato.

Come si osserva dallo schema si può ritenere che un determinato stato della morfologia (profondità dei bassifondi, sezioni dei canali, ecc.) rappresenti una condizione di equilibrio dinamico tra agenti dell'erosione e del trasporto che tendono a movimentare i sedimenti di fondo, agenti stabilizzanti che si oppongono a tale movimentazione, apporti esterni di sedimenti e variazioni di livello relativo: su tutti questi fattori ha un'influenza più o meno rilevante l'attività dell'uomo, che a sua volta può modificare la morfologia in modo diretto (ad esempio realizzando colmate su zone di barene).

Tra gli agenti dell'erosione e del trasporto, o forze attive, le principali di natura fisica sono: moto ondoso, vento e correnti, mentre altre sono provocate direttamente dall'azione dell'uomo (per esempio dal transito di barche a motore).

Le forze stabilizzanti sono rappresentate dalla coesione e l'attrito dei sedimenti di fondo e dalla vegetazione con apparato radicale; essendo quest'ultima condizionata da fattori di natura antropica, come il carico dei nutrienti, si può considerare che la attività dell'uomo influisca anche sulle forze di resistenza.

Gli apporti dei sedimenti esterni avvengono dai fiumi o dal mare: in entrambi i casi, come già detto, gli interventi umani ne hanno determinato nel tempo una notevole riduzione.

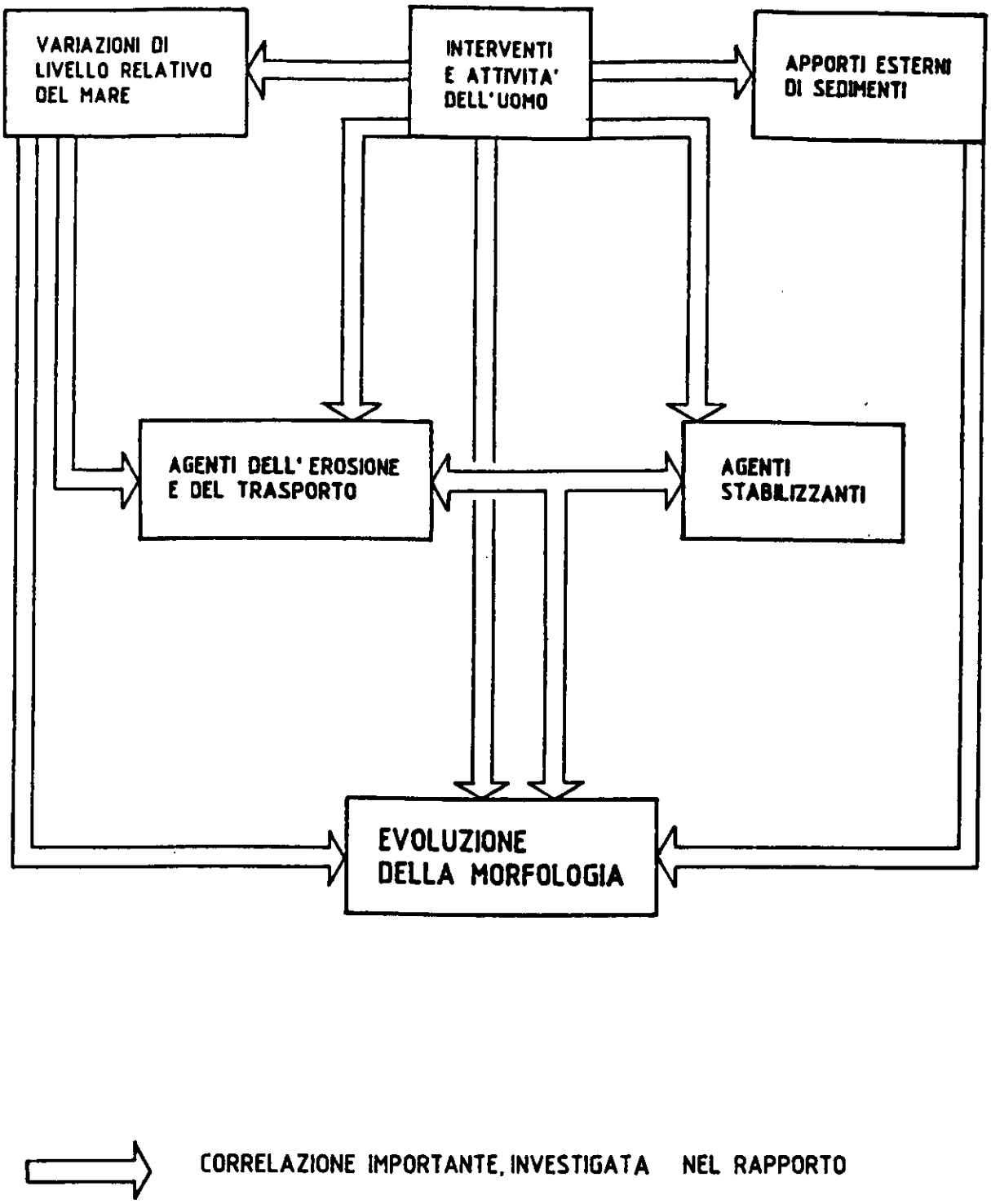


Fig. 1.2 - SCHEMA PER LO STUDIO DEL SISTEMA MORFOLOGICO

Le variazioni di livello (subsidenza ed eustatismo) richiedono un apporto continuo di sedimenti per ripristinare le condizioni precedenti, e quindi agiscono in senso contrario rispetto agli apporti esterni.

L'equilibrio tra questi fattori è di natura prettamente dinamica: una modifica di uno dei molteplici fattori in gioco sposta infatti il punto di equilibrio, determinando in pratica un'evoluzione continua.

E' evidente che l'azione dell'uomo determina direttamente o indirettamente una modifica di questi fattori, come è avvenuto storicamente per quanto riguarda gli apporti di sedimenti con la diversione dei fiumi e la costruzione delle dighe alle bocche e per quanto riguarda i livelli con l'estrazione di acqua da falda che ha provocato l'abbassamento del suolo per subsidenza.

A loro volta, tra i diversi fattori esistono correlazioni reciproche: ad esempio un aumento del tirante d'acqua per eustatismo e subsidenza modifica gli agenti dell'erosione e del trasporto, aumentando sia il moto ondoso che i volumi di marea.

Come già detto, l'impostazione dei Volumi 2 e 3 segue lo schema della fig. 1.1.

Viene anzitutto trattata l'evoluzione della morfologia, ricavabile dai confronti cartografici e batimetrici (volume 2).

Di seguito (volume 3) vengono quindi studiate le cause di questa evoluzione, esaminando i diversi fattori su di essa influenti, e cioè gli interventi ed attività dell'uomo, le variazioni di livello, gli apporti esterni di sedimenti, gli agenti dell'erosione e del trasporto e gli agenti stabilizzanti.

2. LE TENDENZE EVOLUTIVE DELLA MORFOLOGIA: INTRODUZIONE

Questo volume descrive le variazioni dei principali elementi della morfologia lagunare ricavate dall'esame della cartografia storica: la sua collocazione all'interno dello schema di riferimento è riportata in fig. 2.1.

L'obiettivo del volume è quello di esporre le informazioni disponibili sull'evoluzione della morfologia, mentre gli effetti che su tale evoluzione hanno avuto i diversi fattori vengono qui solo accennati, e solo per gli aspetti più evidenti.

La quantità di informazioni sull'argomento è notevole, in quanto gli interventi associati alle attività umane in laguna sono da sempre sottoposti a un lungo iter che ne prevede la discussione (e l'eventuale approvazione) appunto sulla base di riferimenti cartografici.
In questa sede vengono analizzate solo le informazioni strettamente connesse con gli obiettivi del progetto, e ciò quelle che riguardano:

- le variazioni della superficie delle aree sommerse (specchi d'acqua);
- variazioni della superficie delle barene;
- variazioni della superficie delle aree emerse;
- variazioni delle profondità di bassifondi;
- variazioni delle sezioni dei canali interni e dei canali di bocca.

Lo studio è stato svolto con dettaglio maggiore ed a livello anche quantitativo per il solo periodo successivo al 1810.

Nel periodo prima del 1800 infatti, dalle rappresentazioni cartografiche disponibili si ricavano solo informazioni qualitative, la cui corretta interpretazione richiede approfondite ricerche storiche: per tale periodo si è preferito pertanto limitarsi a raccogliere e analizzare le informazioni riportate in letteratura (53). Per il periodo successivo è stata invece analizzata direttamente la cartografia storica esistente.

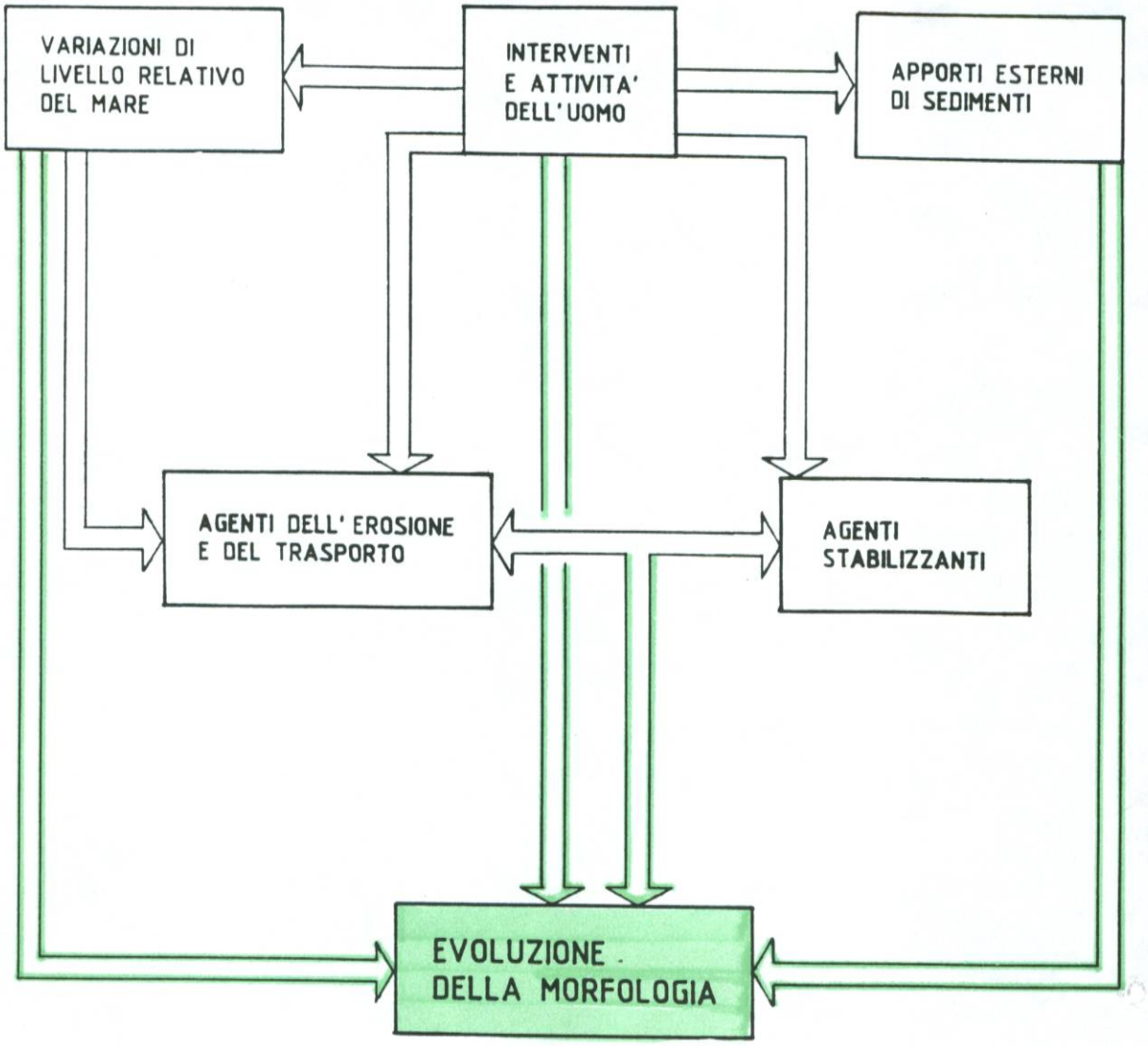


Fig. 2.1
INQUADRAMENTO DEL CAPITOLO

Le rappresentazioni cartografiche complete della laguna (comprendenti cioè sia l'indicazione delle superfici che la profondità dei fondali) sono quelle degli anni 1901, 1930, 1970; la carta del 1810 (Denaix) fornisce informazioni sulle superfici di specchi di acqua e barene e sulle profondità dei soli canali principali. Le fig. 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5, riportano la schematizzazione della laguna ricavata dalle quattro cartografie citate.

I dati sulle superfici possono essere ricavati anche dalla Carta della Marina Austriaca del 1860.: essa è stata utilizzata per avere un'informazione ulteriore sullo sviluppo dell'estensione delle barene.

Per le zone delle bocche sono disponibili cartografie ulteriori, realizzate nel tempo a fini prevalentemente navigazionali: esse sono citate nel paragrafo 5.2 dedicato a tale argomento.

Per la situazione più recente si dispone dei profili nei bassifondi e sezioni dei canali eseguiti per conto del Consorzio Venezia Nuova nel 1984 e 1985 (4) e, con maggior dettaglio, nel 1990 (6), del rilievo batimetrico svolto alle bocche dallo stesso Consorzio nel 1989 (20), e delle informazioni ricavabili dalle foto aeree e dai sopralluoghi.

Prima di poter confrontare le diverse cartografie è stato necessario introdurre correzioni di quota, poichè erano stati adottati riferimenti diversi. Tutte le quote sono state anzitutto rese omogenee rispetto al livello medio mare della data del rilievo (prescindendo quindi dal contributo dell'eustatismo); per l'esame delle cause delle modifiche delle profondità dei bassifondi sono stati poi distinti gli effetti separati dovuti all'erosione e alla subsidenza: quest'ultimo è stato valutato applicando a tutta la laguna il valore misurato a P.della Salute, procedimento questo giustificabile sulla base dei dati disponibili sulla distribuzione spaziale della subsidenza (vedi volume 4).

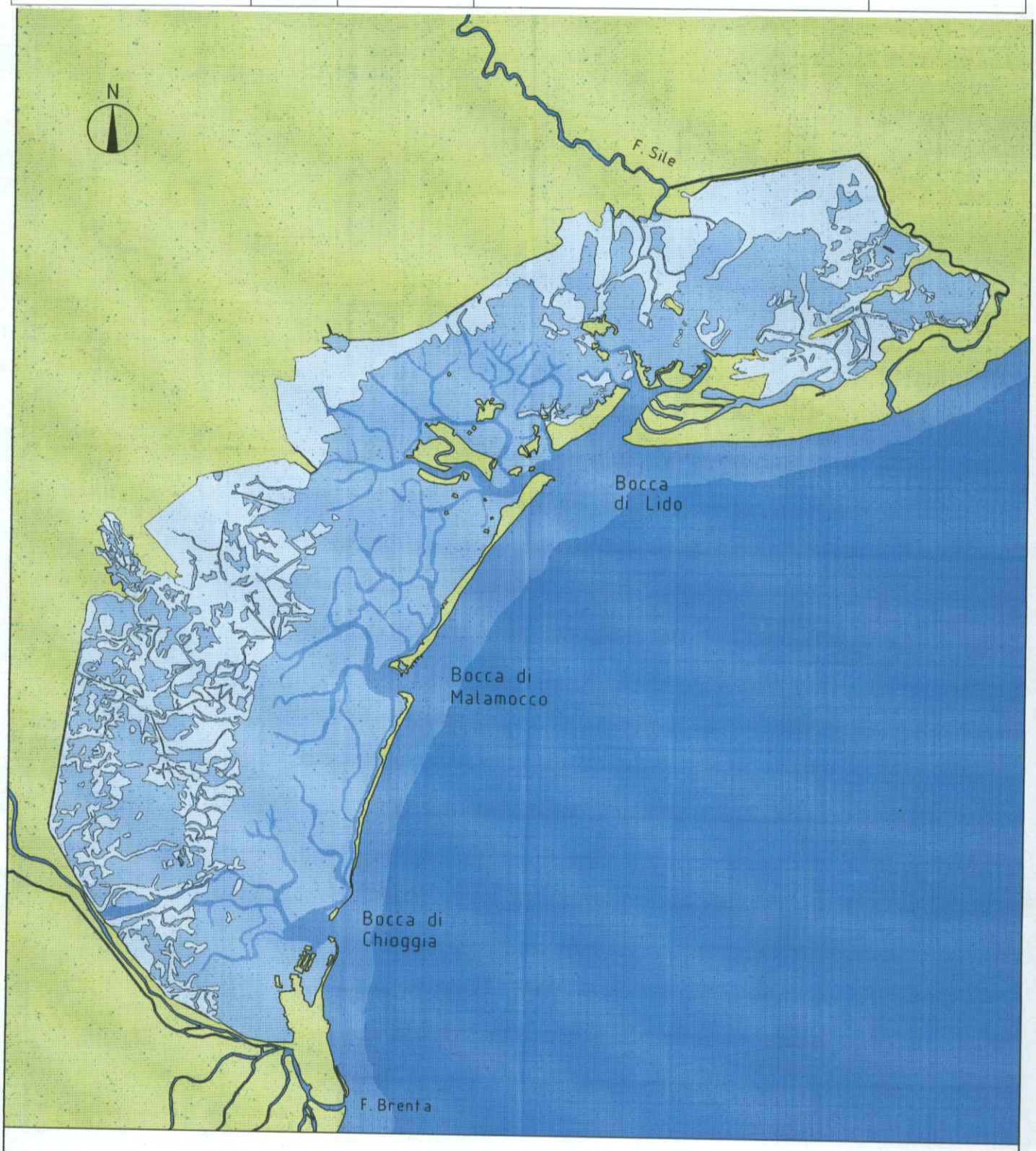


Fig. 2.2 LA LAGUNA DI VENEZIA NELLA CARTA DEL 1810
(RILIEVI DEL DENAIX)

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

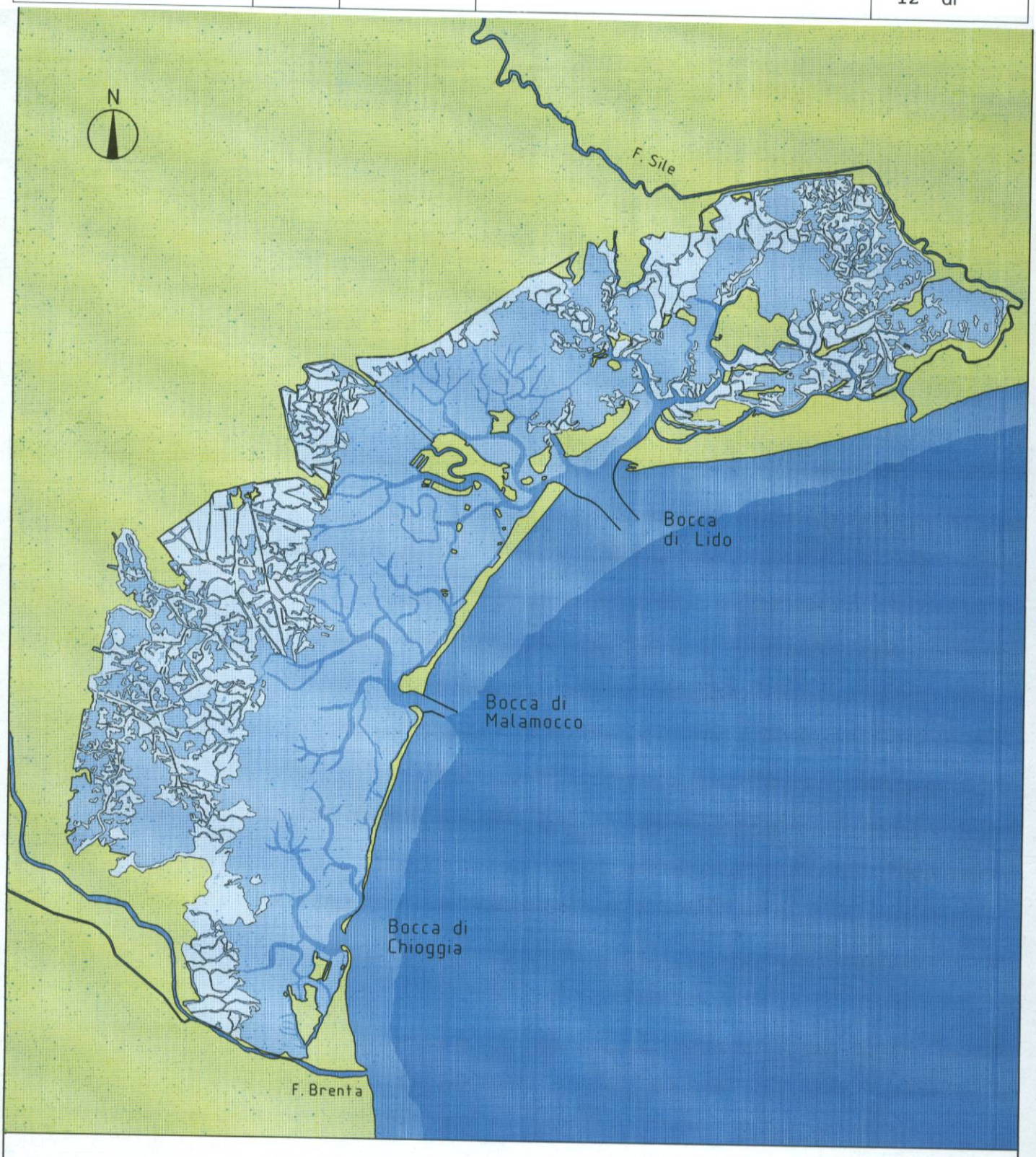


Fig. 2.3 LA LAGUNA DI VENEZIA NELLA CARTA DEL 1901

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

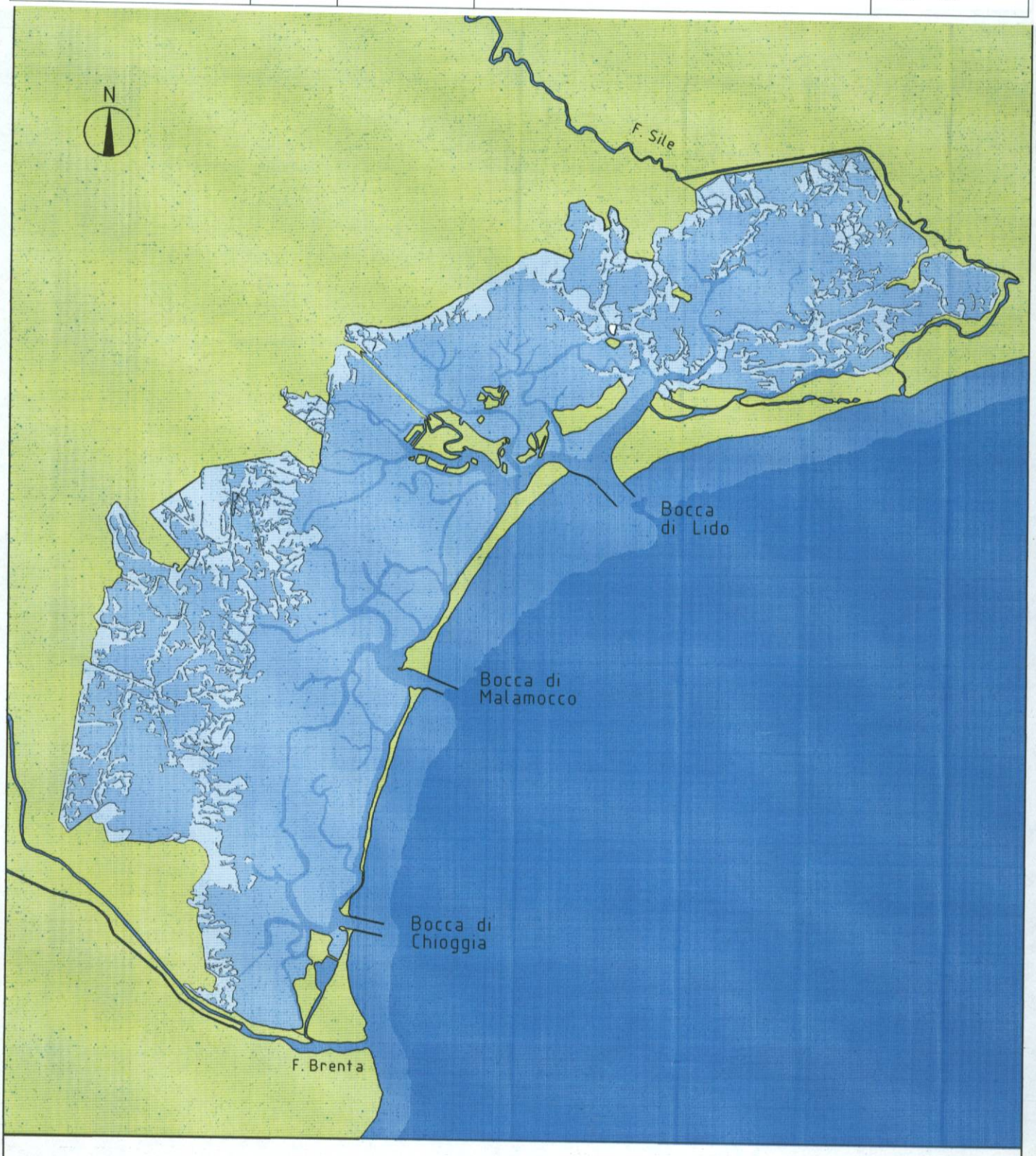


Fig. 2.4 LA LAGUNA DI VENEZIA NELLA CARTA DEL 1930
(RILIEVI DEL MAGISTRATO ALLE ACQUE)

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

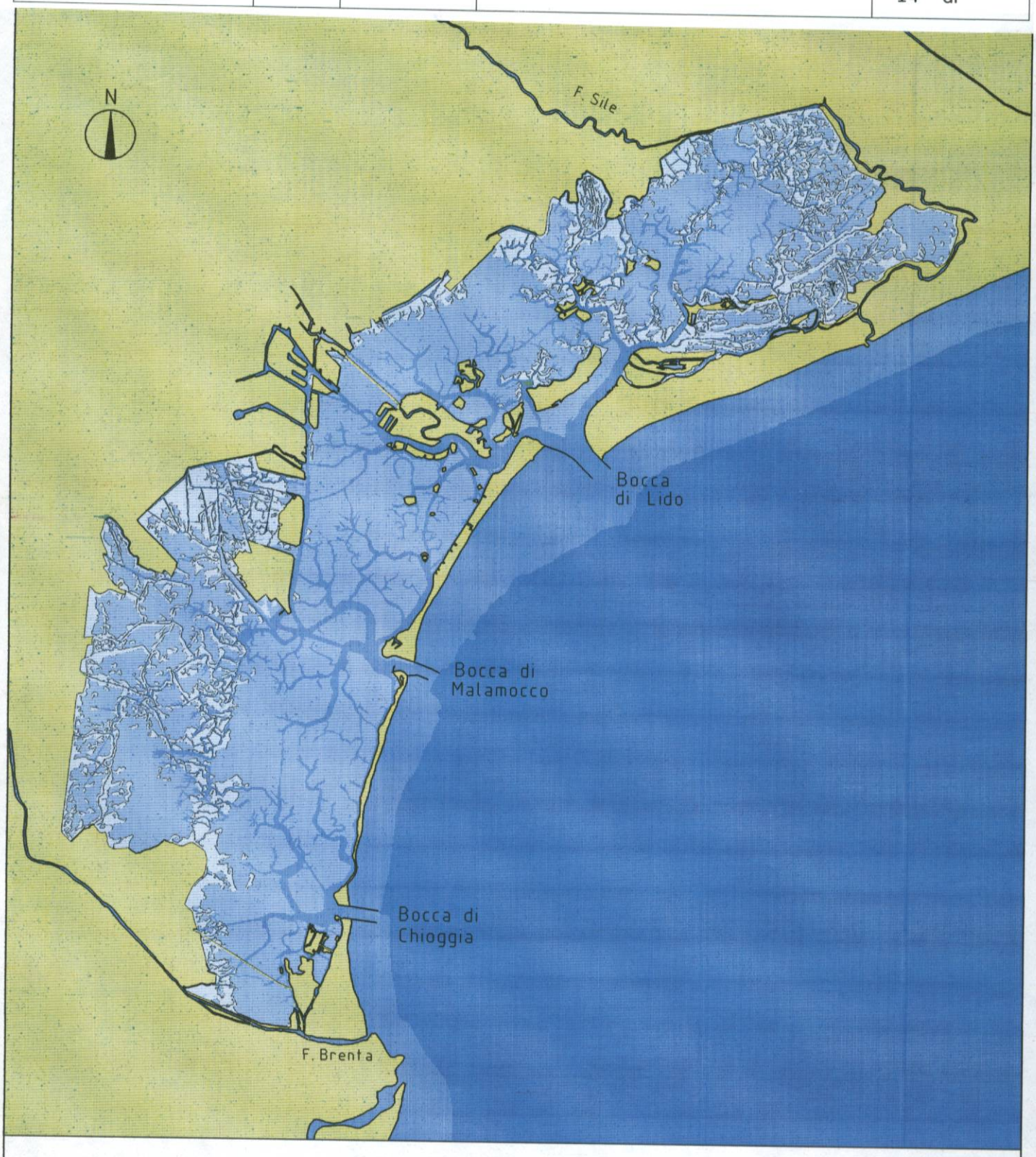


Fig. 2.5 LA LAGUNA DI VENEZIA NELLA CARTA DEL 1970
(RILIEVI DEL MAGISTRATO ALLE ACQUE)

3. VARIAZIONI DELLE SUPERFICI

L'analisi della variazione delle superfici è stata svolta prendendo come riferimento la conterminazione lagunare del 1900. All'interno di questi limiti l'intera superficie della laguna è stata schematizzata nelle seguenti zone:

- zone d'acqua (canali e bassifondi, comprendendo in queste ultime anche le velme, ovvero le zone che emergono durante le basse maree di sizigie);
- barene, ovvero zone sommerse durante alte maree di sizigie o eccezionali;
- valli da pesca arginate, ovvero escluse normalmente all'espansione della marea;
- terre emerse all'interno della laguna;
- terre emerse ai margini della laguna (facenti parte un tempo della laguna propriamente detta, e quindi bonificate).

L'evoluzione della superficie totale di ciascuna zona è sintetizzata nella fig. 3.1, in cui é riportata l'evoluzione dell'area delle superfici delle cinque zone per il periodo dal 1810 al 1970. Le informazioni riportate nella figura vengono di seguito discusse con maggior dettaglio, con riferimento alle diverse categorie.

3.1. Terre emerse

Le variazioni delle terre emerse, ovvero il loro progressivo incremento a partire dall'inizio del secolo, sono dovute quasi esclusivamente agli interventi dell'uomo.

Prima del 1930 prevalgono gli interventi che tendono a realizzare per scopi agricoli zone emerse sui margini lagunari (le bonifiche) mentre in una fase successiva gli interventi più importanti sono quelli volti a realizzare colmate artificiali all'interno del perimetro lagunare (ad uso industriale).

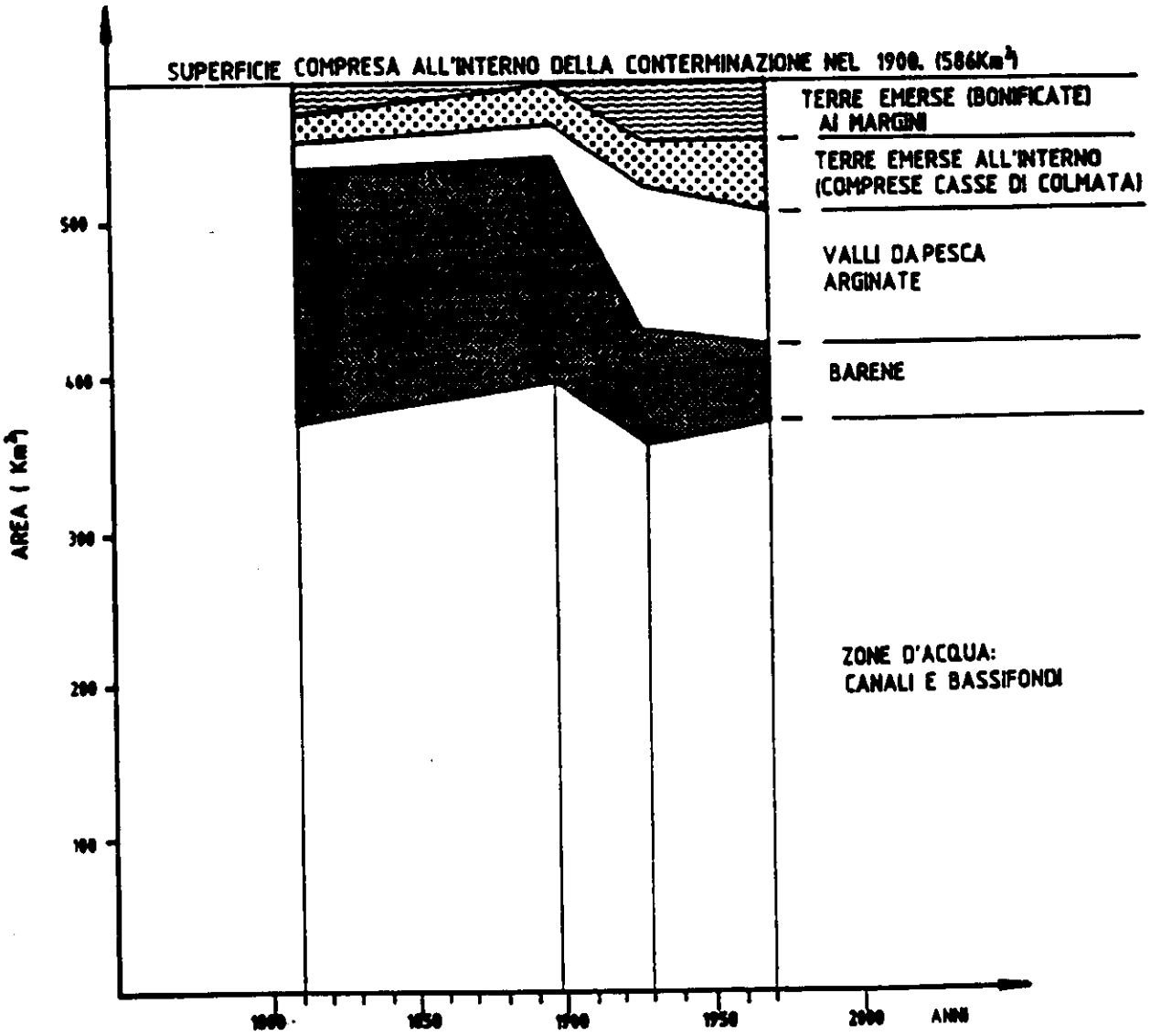


Fig. 3.1 - EVOLUZIONE DELLE SUPERFICI LAGUNARI

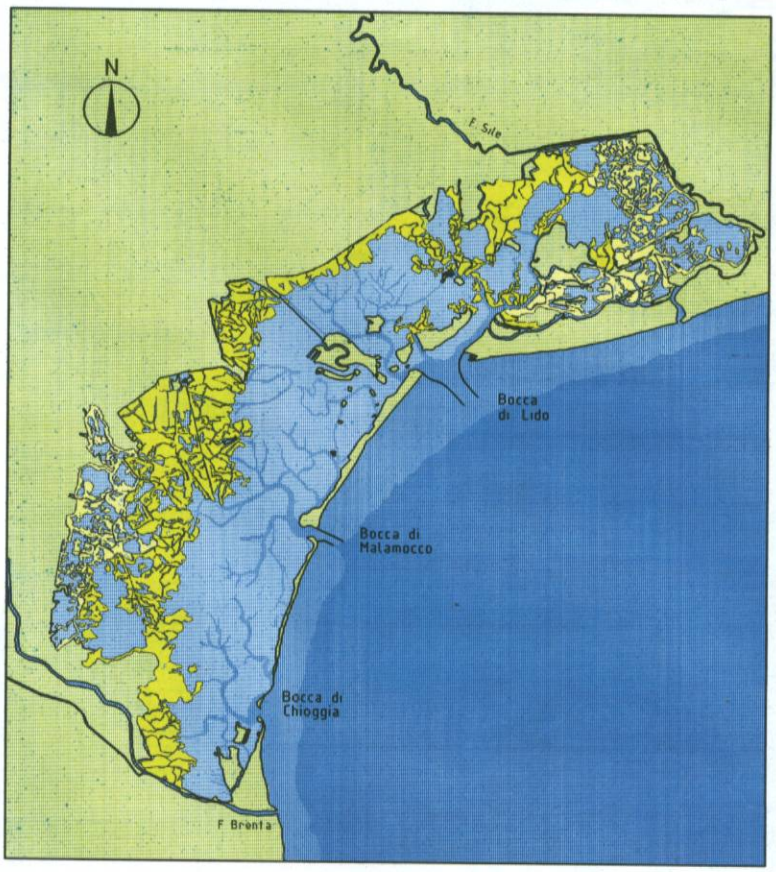
Dalle elaborazioni effettuate da Rusconi sulla base della carta del Magistrato alle Acque del 1970 (54) risulta che le zone bonificate ai margini della laguna risultano, a partire dal 1900, di circa 35 km^2, escludendo i quali la superficie della laguna si è ridotta dai 586 km^2 della conterminazione del 1900 agli attuali effettivi 551 km^2. Le terre emerse all'interno della laguna (isole, litorali e casse di colmata) sono oggi circa 48 km^2; di essi circa 10 km^2 sono occupati dalle casse di colmata realizzate nel dopoguerra [1,6 dalla cassa A, 2,35 dalla cassa B, 6,25 dalla cassa D-E (41)].

3.2. Barene

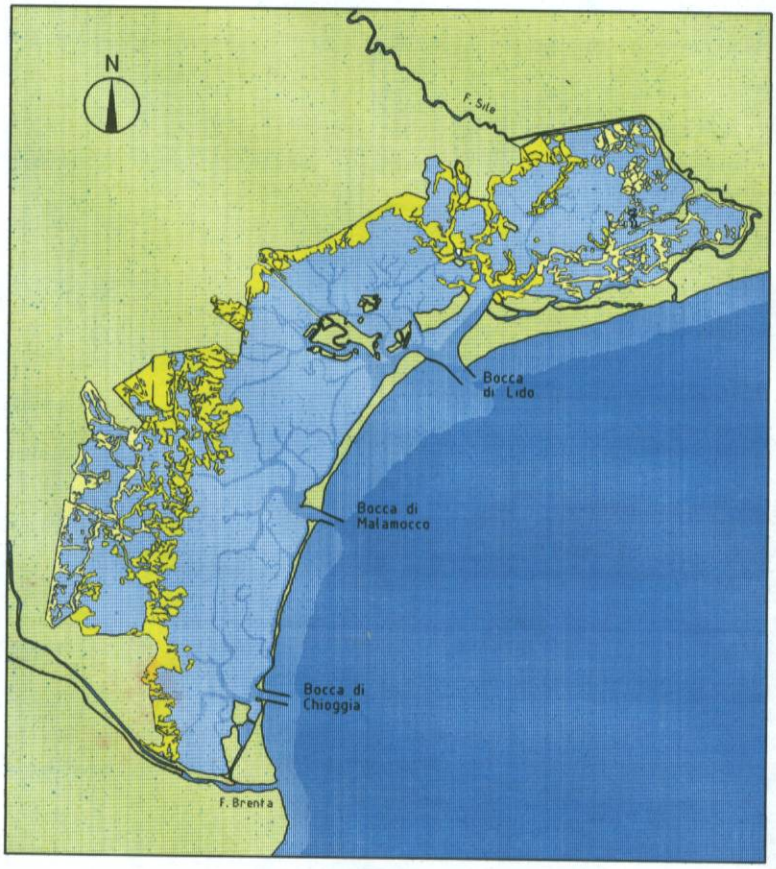
Secondo gli studi svolti (55), l'erosione delle barene è iniziata dopo i grandi interventi di diversione fluviale: il trasporto solido dei fiumi era infatti il principale agente di formazione di queste particolari strutture morfologiche, che si sono formate ai margini dei delta.

Il trend del fenomeno erosivo si accelera a partire dal 1900, come si può osservare dall'esame delle figure 3.2 e 3.3, in cui è ben visibile la progressiva scomparsa delle barene in questo secolo. Nelle figure vengono distinte le barene poste all'interno delle valli da pesca da quelle situate in zone ad espansione di marea: le caratteristiche del sistema biologico sono infatti differenti, mancando nelle barene all'interno delle valli, gli eventi di sommersione di marea che sono determinanti per lo sviluppo delle comunità biologiche tipiche delle barene.

Si osservi inoltre che, per le informazioni più recenti (1987), non essendo disponibile un rilievo completo, sono riportate informazioni ricavate dall'analisi di foto aeree eseguite per conto della Regione Veneto: il valore assoluto delle informazioni così ricavate è pertanto da considerare con cautela, anche se l'indicazione della continuazione della tendenza erosiva è ritenuta attendibile.



ANNO 1901



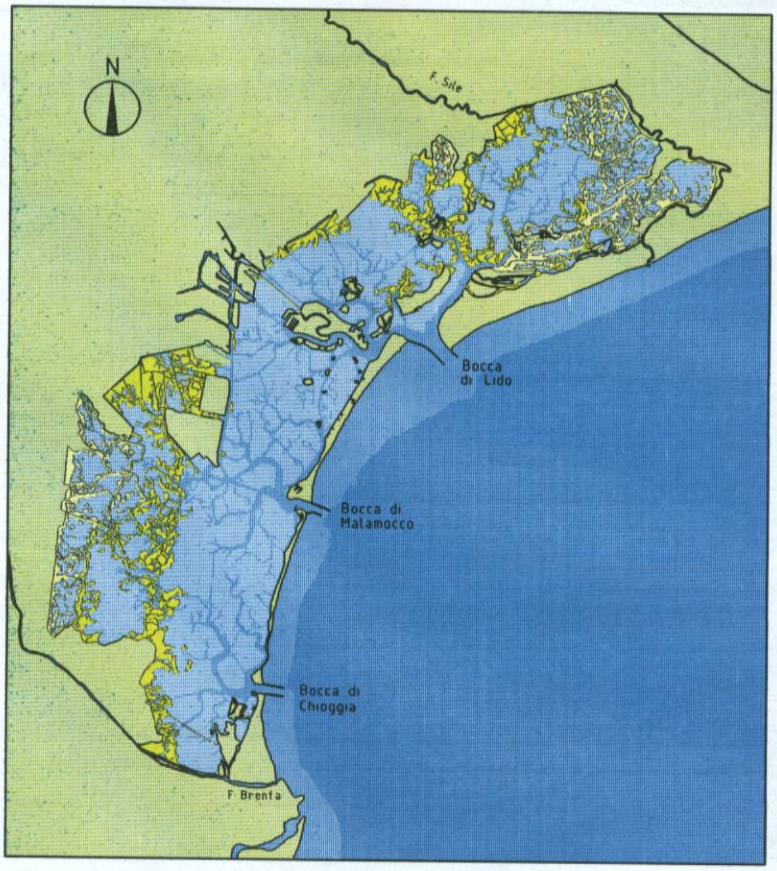
ANNO 1930

FIG. 3.2 SUPERFICI DELLE BARENE NEL 1901 E 1930

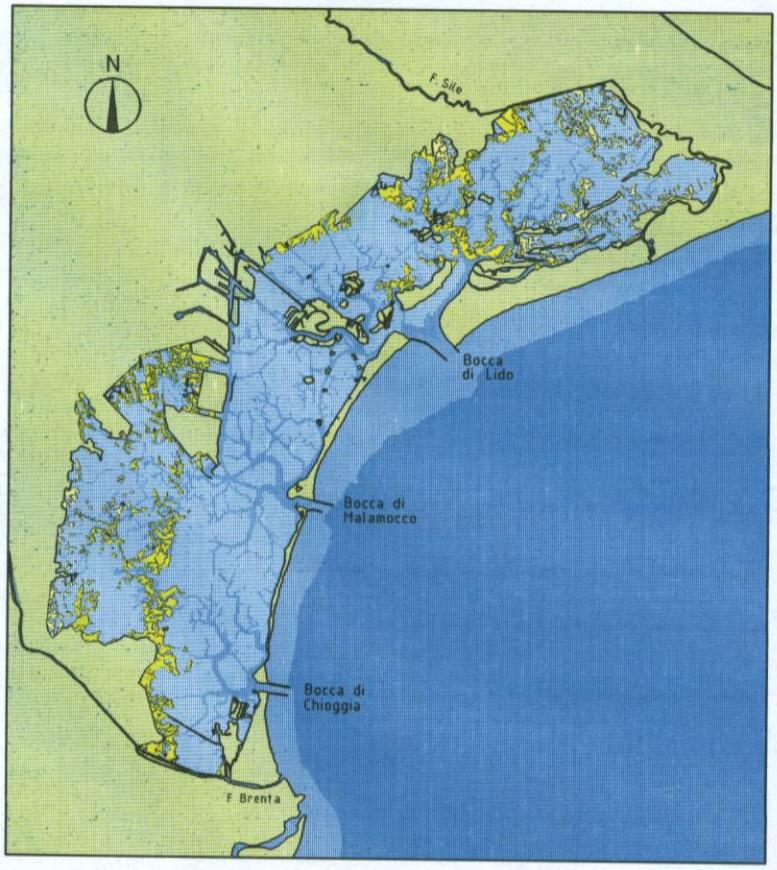
ALL'INTERNO DELLE VALLI DA PESCA

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

IN ZONA AD ESPANSIONE DI MAREA



ANNO 1970



ANNO 1987

FIG. 3.3 SUPERFICI DELLE BARENE NEL 1970 E 1987

ALL'INTERNO DELLE VALLI DA PESCA

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

IN ZONE AD ESPANSIONE DI MAREA

Dal confronto tra la situazione del 1987 e quelle precedenti è evidente la perdita di vaste aree di fronte alla bocca di Malamocco, nel bacino interno di Treporti, e, rispetto al 1900, nella zona antistante l'attuale bonifica del Brenta, dove fino al 1895 era situata la foce del fiume.

Dopo il 1930, le perdite delle superfici di barene nelle zone non interessate da interventi umani appaiono più modeste e distribuite: in questo periodo la riduzione delle superfici dipende principalmente dall'azione diretta dell'uomo, e cioè dai riempimenti per le casse di colmata e dalla rimozione delle barene all'interno delle valli da pesca, per ampliare gli specchi d'acqua o realizzare vasche.

In termini assoluti, la superficie delle barene nelle zone ad escursione di marea, si è ridotta dai circa 170 km^2 del 1810 ai circa 145 km^2 del 1901, 72 km^2 del 1930 e 48 km^2 del 1970. Nel 1987 è stata valutata una superficie attorno ai 40 km^2.

Per individuare la componente "naturale" dell'evoluzione delle barene, e quindi ottenere utili indizi sugli sviluppi futuri di queste importanti componenti della morfologia lagunare, è stata calcolata l'evoluzione delle superfici di barene nelle sole zone non soggette ad interventi umani.

In questo modo è stato possibile sottrarre dall'evoluzione complessiva delle barene la componente dovuta ad interventi umani diretti, ottenendo così la componente dell'evoluzione dovuta a soli fenomeni fisici (erosione o subsidenza). I risultati ottenuti sono riportati nella fig. 3.4. Dall'esame della figura si nota, già a partire dal periodo 1810-1860, la tendenza alla diminuzione delle superfici. Nel periodo tra il 1860 e il 1900 si registra invece una provvisoria inversione di tendenza, mentre la tendenza alla riduzione ritorna accentuata tra il 1900 ed il 1930, per poi proseguire (con un rateo minore) negli anni più recenti.

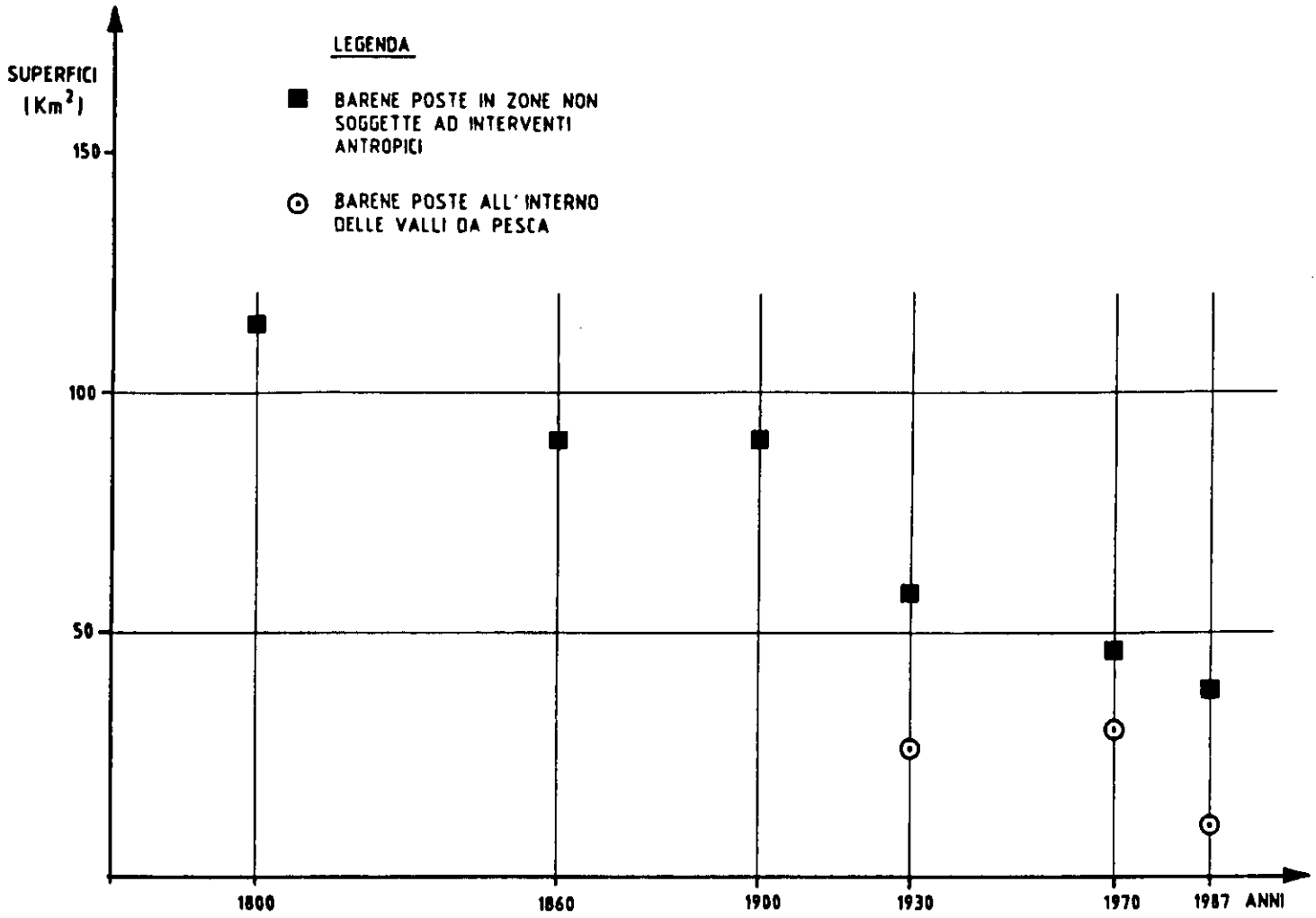


Fig. 3.4 - EVOLUZIONE DELLA SUPERFICIE DELLE BARENE.

Queste diminuzioni delle aree delle barene possono essere attribuite principalmente alla riduzione degli apporti esterni di sedimenti e alla variazione del livello relativo dovuta a subsidenza ed eustatismo, che può determinare la scomparsa delle superfici barenicole poste a quote più basse o la ridistribuzione dei sedimenti dai margini alle zone centrali delle barene stesse.

Nel periodo 1810-1860 la riduzione degli apporti di sedimenti è il fattore più rilevante: gli effetti della diversione dei fiumi non si sono ancora esauriti e, dopo il 1840, viene ridotto anche l'apporto dal mare con la costruzione dei moli di Malamocco.

L'inversione di tendenza nel periodo 1860-1900 è da associare alla reimmissione del Brenta in laguna avvenuta tra il 1852 ed il 1896, cui va fatta risalire la formazione di circa 15 km^2 di nuove barene.
Il successivo incremento del trend erosivo nel periodo 1900-1930 può derivare invece sia dalla rapida erosione di queste nuove barene dopo la definitiva diversione del Brenta, sia dall'ulteriore diminuzione dei sedimenti in sospensione provenienti dal mare, verificatasi dopo la costruzione dei moli di Lido e Chioggia.

Nel periodo dopo il 1930 il contributo della subsidenza è invece da ritenersi come quello dominante.

In totale, nel periodo 1810-1970, è risultato che la riduzione delle superfici di barena è attribuibile in parti più o meno uguali rispettivamente a interventi diretti dell'uomo e all'azione di fattori naturali.

Nei due periodi più recenti (1930-70 e 1970-85) la tendenza evolutiva della superficie delle barene (al di fuori delle zone occupate dalle casse di colmata) è stata analizzata anche distinguendo il comportamento dei tre sottobacini lagunari ad espansione di marea (Lido, Malamocco e Chioggia) e delle due aree settentrionale e

centro-meridionale in cui le barene sono poste all'interno delle valli da pesca arginate.

I risultati sono esposti nella figura 3.5, in cui sono riportati i valori del rateo medio di riduzione delle superfici nelle cinque zone e nei due periodi.

Si può osservare come le barene risultino oggi in una situazione quasi stabile a Chioggia, mentre a Lido e soprattutto a Malamocco, prosegua la tendenza alla riduzione delle superfici. Tale tendenza appare però ancora più vistosa e in deciso aumento all'interno delle due aree di valli da pesca, dove la scomparsa così drastica delle barene può essere causata soltanto da interventi diretti dell'uomo, essendo il regime idrodinamico in quelle zone caratterizzato da un'energia molto limitata.

3.3. Velme

Si definiscono velme quelle parti dei bassifondi che possono emergere in occasioni delle basse maree sizigiali e quindi con profondità compresa circa tra lo 0,00 e -0,50 m (con riferimento al livello medio mare I.G.M.).

Pur rientrando quindi le velme, a rigor di termini, nell'ambito delle zone d'acqua, si è ritenuto utile considerare a parte la loro evoluzione, per la loro peculiarità dal punto di vista sia biologico che morfologico.

In particolare, dal punto di vista morfologico le velme sono una categoria particolarmente significativa nell'ambito dei bassifondi: esse si trovano infatti generalmente di fronte alle barene, in zone in cui il ciglio di queste ultime è costituito da una scarpata a pendenza dolce, oppure ai lati dei canali. Nel primo caso contribuiscono a ridurre l'energia del moto ondoso sulle barene, nel secondo ad avviare il flusso della marea nei canali stessi e quindi a conservare la struttura morfologica "dendritica" tipica della laguna.

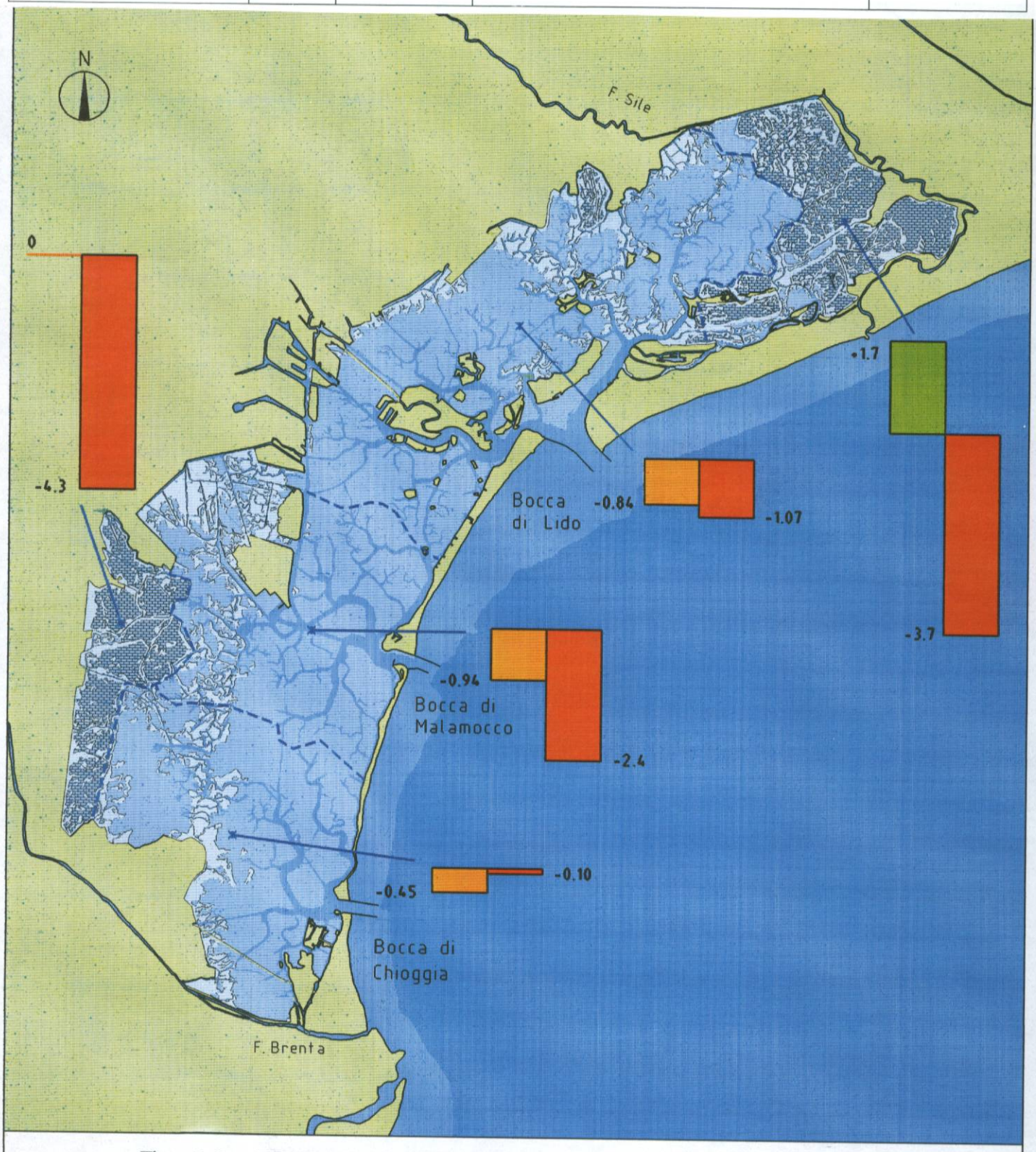
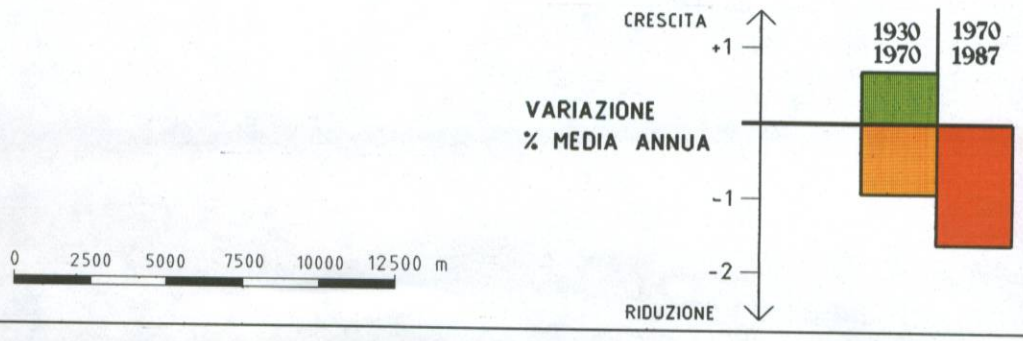


Fig. 3.5 TENDENZA EVOLUTIVA DELLA SUPERFICIE DELLE BARENE IN DIVERSE ZONE DELLA LAGUNA



La superficie delle velme ha subito anch'essa, come quella delle barene, una progressiva riduzione nel tempo, soprattutto per quanto riguarda le velme del secondo tipo (ai lati dei canali) ormai praticamente scomparse dalla laguna centrale.

Per quantificare questa tendenza, richiamata da molti studi disponibili sull'evoluzione della laguna (56), nella fig. 3.6 sono riportate le zone che hanno subito una riduzione delle velme più superficiali (tra 0 e -0,25 m) nel periodo 1930-1970: i dati sulla base dei quali è stata realizzata la figura sono quelli esposti in una recente pubblicazione di Rusconi (4). Nella figura sono distinte zone caratterizzate da diversi ratei di riduzione della superficie delle velme, espressi come chilometri quadri di velma persi per un chilometro quadrato di territorio.

In fig. 3.7 sono inoltre indicati i canali ai lati dei quali è stata registrata, esaminando i diversi rilievi batimetrici, la scomparsa delle velme, sia nel periodo 1930-70 che nel successivo periodo 1970-85. Alcune incongruenze riscontrabili tra le due figure possono essere spiegate ricordando che la riduzione riportata in fig. 3.6 è relativa alle sole velme più superficiali.

Si osserva comunque dalle figure che la riduzione delle superfici di velme è stata particolarmente marcata nella laguna centrale, e principalmente nel periodo prima del 1970.

Sulla base di queste indicazioni, si può ritenere che le cause maggiori della scomparsa delle velme lungo i canali siano state la subsidenza (che, determinando un approfondimento diffuso, ha certamente facilitato il deflusso della marea su tutti i bassifondi) e l'erosione dovuta al transito di barche a motore nei canali corrispondenti.

L'importanza di quest'ultimo fenomeno, che è intuitiva, è confermata dalla localizzazione delle zone di maggior riduzione delle velme (fig. 3.6) che coincidono con quelle a maggior traffico di imbarcazioni all'interno della laguna.

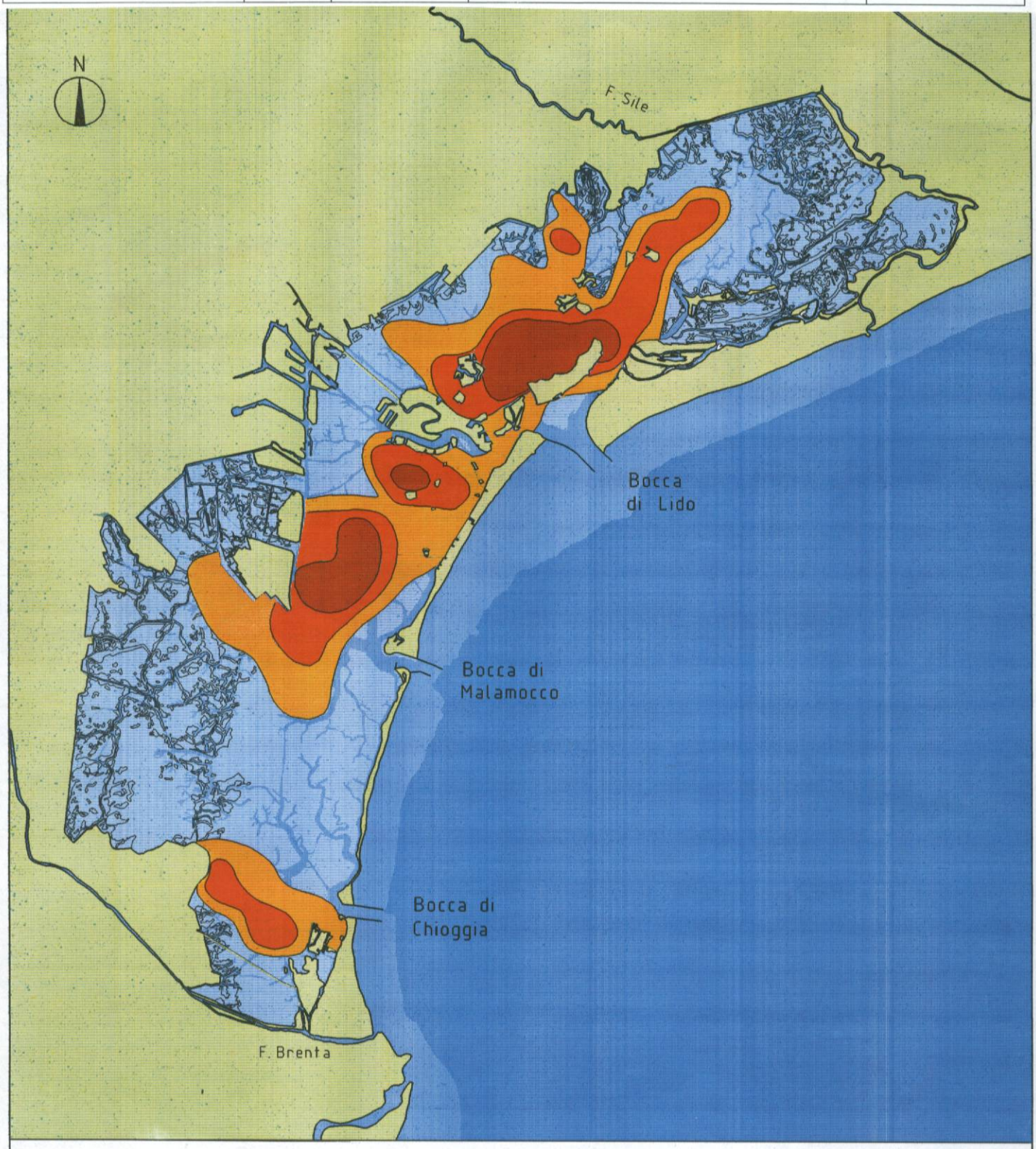


Fig. 3.6 TENDENZA EVOLUTIVA DELLA SUPERFICIE DELLE VELME TRA 0 E - 0.25 m. NEL PERIODO 1930 - 1970

FONTE : MAGISTRATO ALLE ACQUE 1987 (54)
ELABORAZIONE TECHNITAL

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

LEGENDA

RIDUZIONE MEDIA NEL PERIODO

0.008 ÷ 0.04 Km^2 di velma / Km^2 di territorio

0.04 ÷ 0.08 Km^2 di velma / Km^2 di territorio

> 0.08 Km^2 di velma / Km^2 di territorio

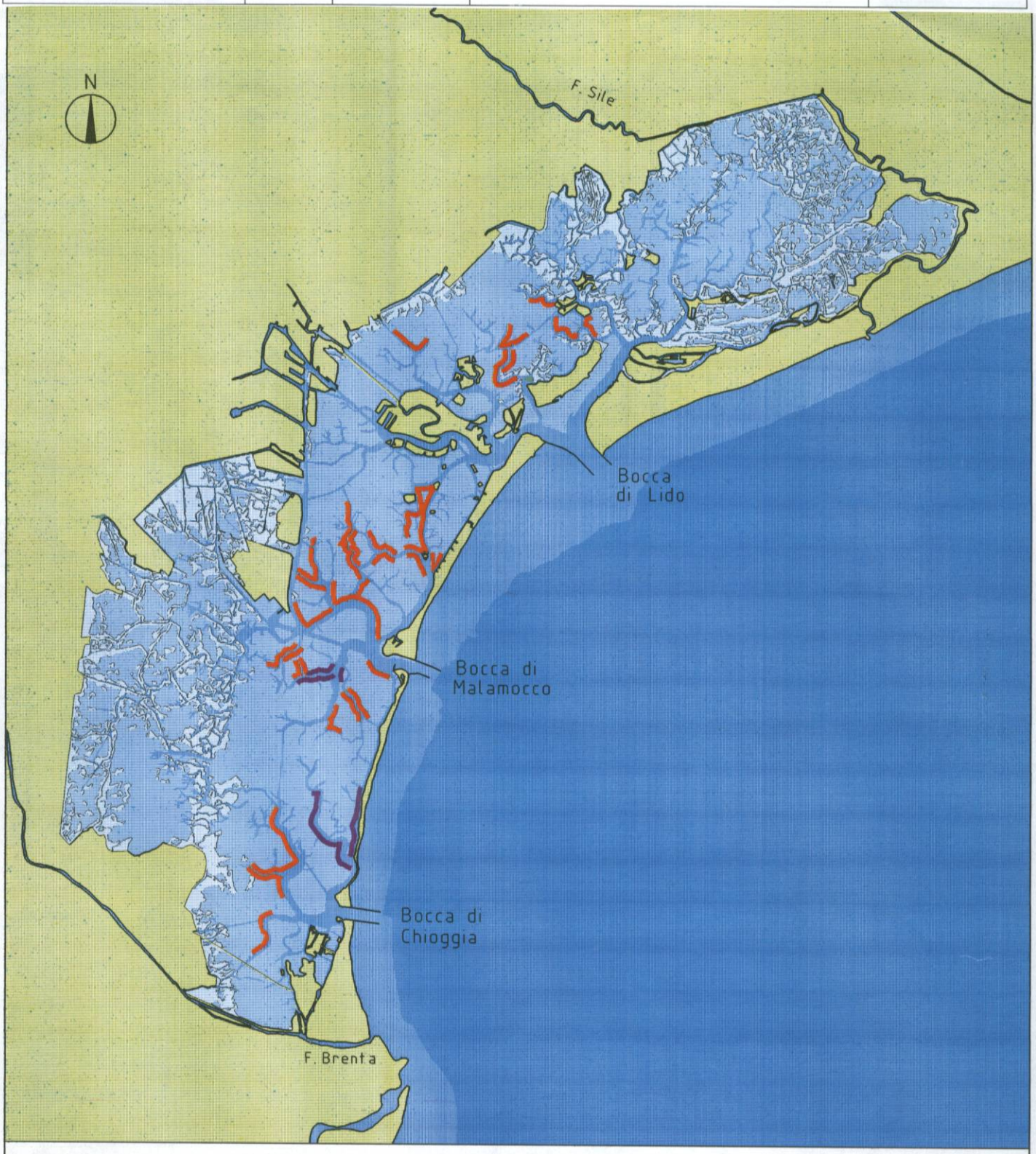


Fig. 3.7 SCOMPARSA DELLE VELME AI LATI DEI CANALI

L E G E N D A

PERIODO 1930 - 1970

PERIODO 1970 - 1985

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

3.4. Zone d'acqua ad espansione di marea

Comprendono canali e bassifondi (incluse le velme). La superficie delle zone d'acqua nel periodo è rimasta sostanzialmente la stessa (vedi la fig. 3.1 già presentata): questa stabilità è però determinata dal succedersi di periodi caratterizzati da tendenze contrapposte.

In particolare, nel periodo 1930-1970, si rileva una tendenza all'incremento (vedi anche le fig. 3.8 e 3.9, che sono elaborazioni dei dati del Magistrato alle Acque riportati in (54)) associata a un approfondimento del fondale, soprattutto nel bacino di Malamocco e Chioggia.

La variazione della superficie d'acqua aperta alla marea può essere dovuta sia a processi naturali (aumento per l'erosione delle barene o delle terre emerse, diminuzione per processi di sedimentazione) sia all'intervento dell'uomo.

Per isolare l'effetto dei processi naturali anche in questo caso sono state considerate solo le zone non interessate dalle attività o dagli interventi dell'uomo, escludendo cioè, ad esempio, le casse di colmata e le valli da pesca. Così facendo, sono stati ottenuti i valori riportati nella tabella seguente.

Tab. 3.1: Evoluzione delle superfici di canali e bassifondi: valori complessivi e valori ottenuti escludendo le zone affette da interventi umani

	1900	1930	1970
Valori complessivi delle superfici di canali e bassifondi (km^2)	394	353	367
Valori ottenuti escludendo le zone affette da interventi umani (km^2)	323	350	367

BACINO LAGUNARE COMPLESSIVO

ANNI DEI RILIEVI	SUPERFICI IN Km^2		
	CANALI (PROFONDITA' OLTRE 1 m)	BASSIFONDI	BARENE
1930	56.60	296.60	72.50
1970	62.00	305.10	67.60

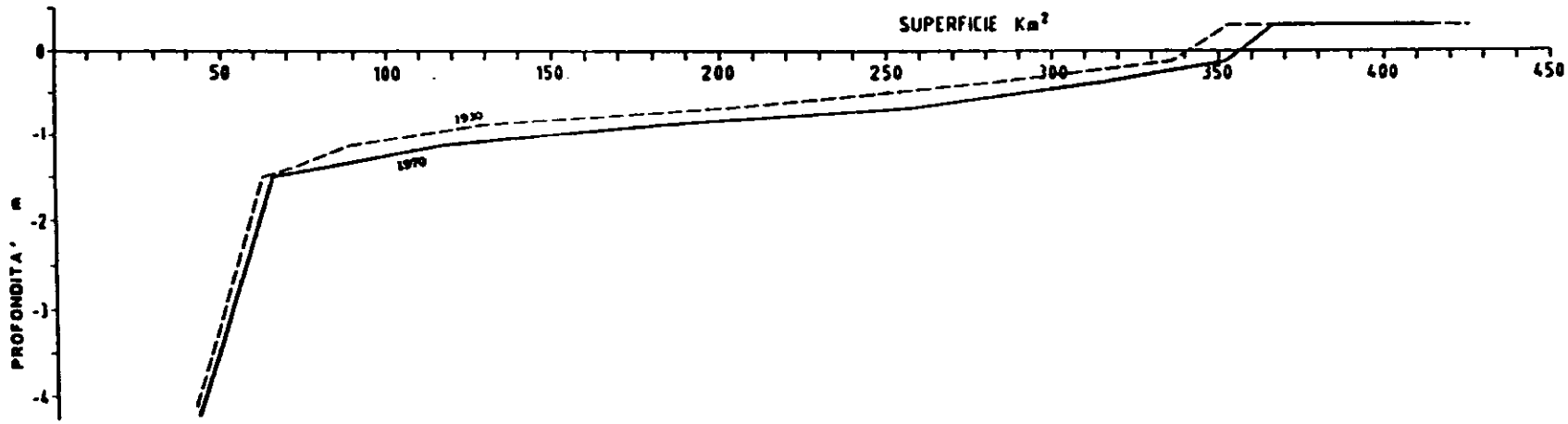
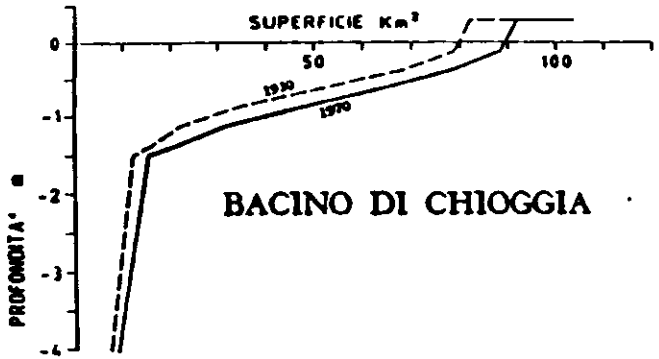


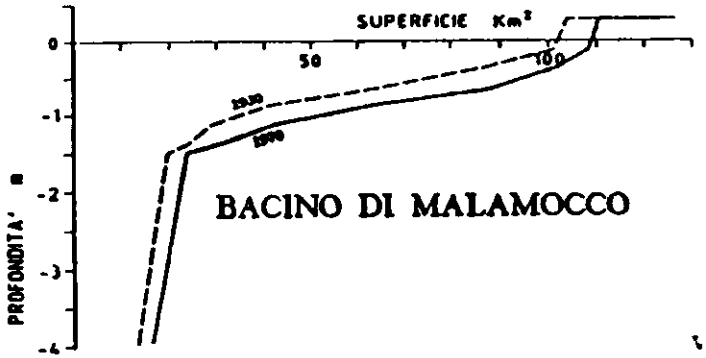
Fig. 3.8
DIAGRAMMI SUPERFICIE - PROFONDITA'
INTERA LAGUNA

Fonte : Magistrato alle Acque (54)

ANNI DEI RILIEVI	SUPERFICI IN Km²		
	CANALI (PROFONDITA' OLTRE 1m)	BASSIFONDI	BARENE
1930	18.10	72	14.20
1970	12	79.98	11.90



ANNI DEI RILIEVI	SUPERFICI IN Km²		
	CANALI (PROFONDITA' OLTRE 1m)	BASSIFONDI	BARENE
1930	16.70	87.40	22.60
1970	19.60	91.15	13.50



ANNI DEI RILIEVI	SUPERFICI IN Km²		
	CANALI (PROFONDITA' OLTRE 1m)	BASSIFONDI	BARENE
1930	29.80	137.10	35.70
1970	31.10	138.20	22.30

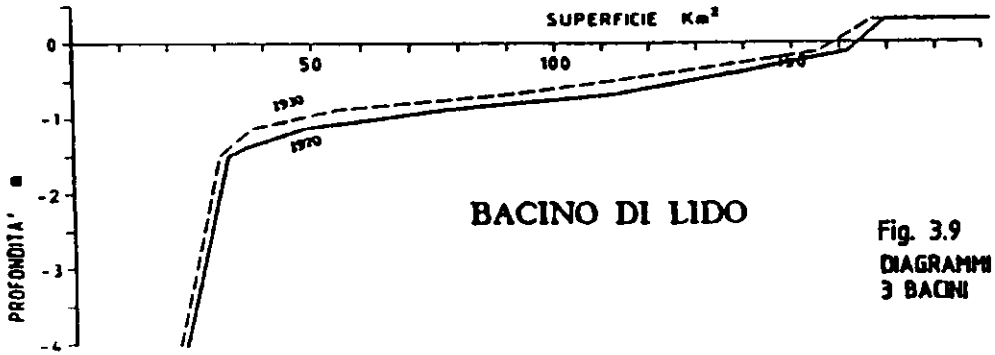


Fig. 3.9
DIAGRAMMI SUPERFICIE - PROFONDITA'
3 BACINI

Fonte : Magistrato alle Acque (54)

Si osserva che, mentre il valore assoluto delle superfici d'acqua si riduce nel periodo 1900-1930 (nel quale vengono arginate molte valli da pesca e realizzate alcune importanti bonifiche) e aumenta nel periodo 1930-1970, il valore "depurato" dagli interventi umani aumenta in entrambi i periodi. Questo aumento, essendo "speculare" alla contemporanea riduzione delle superfici di barena, è in pratica determinato proprio dalla erosione delle barene.

3.5. Valli da pesca arginate

La fig. 3.1 evidenzia un notevole aumento delle superfici delle valli da pesca arginate tra il 1900 e il 1930. Fino al 1900, infatti, le valli da pesca erano quasi tutte aperte alle maree: nel 1900 su una superficie totale di valli di 125 km^2 solo 26 km^2 circa erano completamente arginate (51).

Nel 1930, furono avviati i lavori di arginatura per aumentare la produttività delle valli, e la superficie completamente arginata salì così a circa 100 km^2.

A partire dal 1930 si è avuta una lieve contrazione della superficie delle valli arginate, che è passata a circa 88 km^2 nel 1970 e, più di recente, a circa 86 km^2.

4. VARIAZIONE DELLA PROFONDITÁ DEI BASSIFONDI

L'approntamento dei bassifondi delle zone lagunari più prossime alle bocche è una delle modifiche morfologiche più rapide e preoccupanti avvenute nel periodo recente.

Il fenomeno è stato quindi studiato con particolare cura dal Consorzio Venezia Nuova, che ha eseguito allo scopo due rilievi batimetrici di controllo nel 1984-85 e nel 1990.

Le profondità dei bassifondi sono state valutate, nel corso di questo Progetto, con molta cautela, in quanto esse sono dello stesso ordine di grandezza del possibile errore di misura dei rilievi. É stata anzitutto operata una valutazione critica delle fonti di informazioni disponibili.

Le uniche informazioni estese all'intera area lagunare derivano dalla cartografia e, dal momento che la carta del Denaix (1810) non fornisce dati sulle profondità dei bassifondi, le prime informazioni utilizzabili per questa analisi sono contenute nella carta del 1900. In essa i dati relativi ai bassifondi sono riferiti soltanto ad alcune sezioni.

Le cartografie relative al 1930 e al 1970 sono invece più complete, e sono già state due anni fa oggetto di uno studio da parte dell'Ufficio Idrografico del Magistrato alle Acque (4) in cui per entrambe le carte è stata calcolata la distribuzione delle aree della laguna al di sopra di quote assegnate.

I dati ottenibili dal rilievo svolto da Ecomar per conto del Consorzio negli anni 1984-85 (4) riguardano nuovamente alcune sezioni prevalentemente ubicate nelle zone prossime alle bocche: il grado di completezza di queste informazioni è quindi inferiore a quello dei precedenti rilievi del 1930 e 1970.

L'esame di questi dati, presentato nel capitolo 10 del Progetto REA (1), aveva portato ad identificare, come noto, una tendenza erosiva molto accentuata, soprattutto per i bassifondi di Chioggia e Malamocco: per verificare questa tendenza, i cui riflessi sul progetto sono fondamentali, è stato quindi ripetuto da Ecomar nel 1990 un nuovo rilievo, sempre secondo sezioni, ma raffittite rispetto al rilievo 1984-85, e soprattutto con una metodologia sofisticata di rilievo e di calcolo della correzione di marea (per i dettagli vedi la Relazione Finale dello studio A.2.7/2^ fase (6)).

La griglia delle sezioni del rilievo 1990 è riportata nella fig. 4.1. Data la maggior estensione spaziale e la maggior precisione del nuovo rilievo rispetto a quello concluso solo 5 anni prima, i dati del 1990 sono stati scelti come il riferimento recente per lo esame delle tendenze evolutive della profondità dei bassifondi.

Per ciascuno dei rilievi prescelti (1901, 1930, 1970, 1990) sono stati valutati quindi i valori della profondità media dei bassifondi, nell'intera laguna e per ogni sottobacino.

Per far ciò, i dati di ogni rilievo sono stati anzitutto riferiti al livello medio mare della data del rilievo, depurandoli cioè del contributo dell'eustatismo e da quello degli spostamenti dei caposaldi di riferimento.

Nei rilievi 1901 e 1990, in cui sono disponibili dati solo lungo le sezioni, le profondità medie sono state calcolate estrapolando ai tre sottobacini (e quindi all'intera laguna) i ratei di variazione calcolati sulle stesse sezioni nelle cartografie del 1930 e del 1970.

Per ogni periodo sono state infine definite tanto la variazione totale delle profondità quanto la sua variazione netta, depurata cioè dall'abbassamento del fondo causato dalla subsidenza (ottenendo così l'erosione media effettiva).

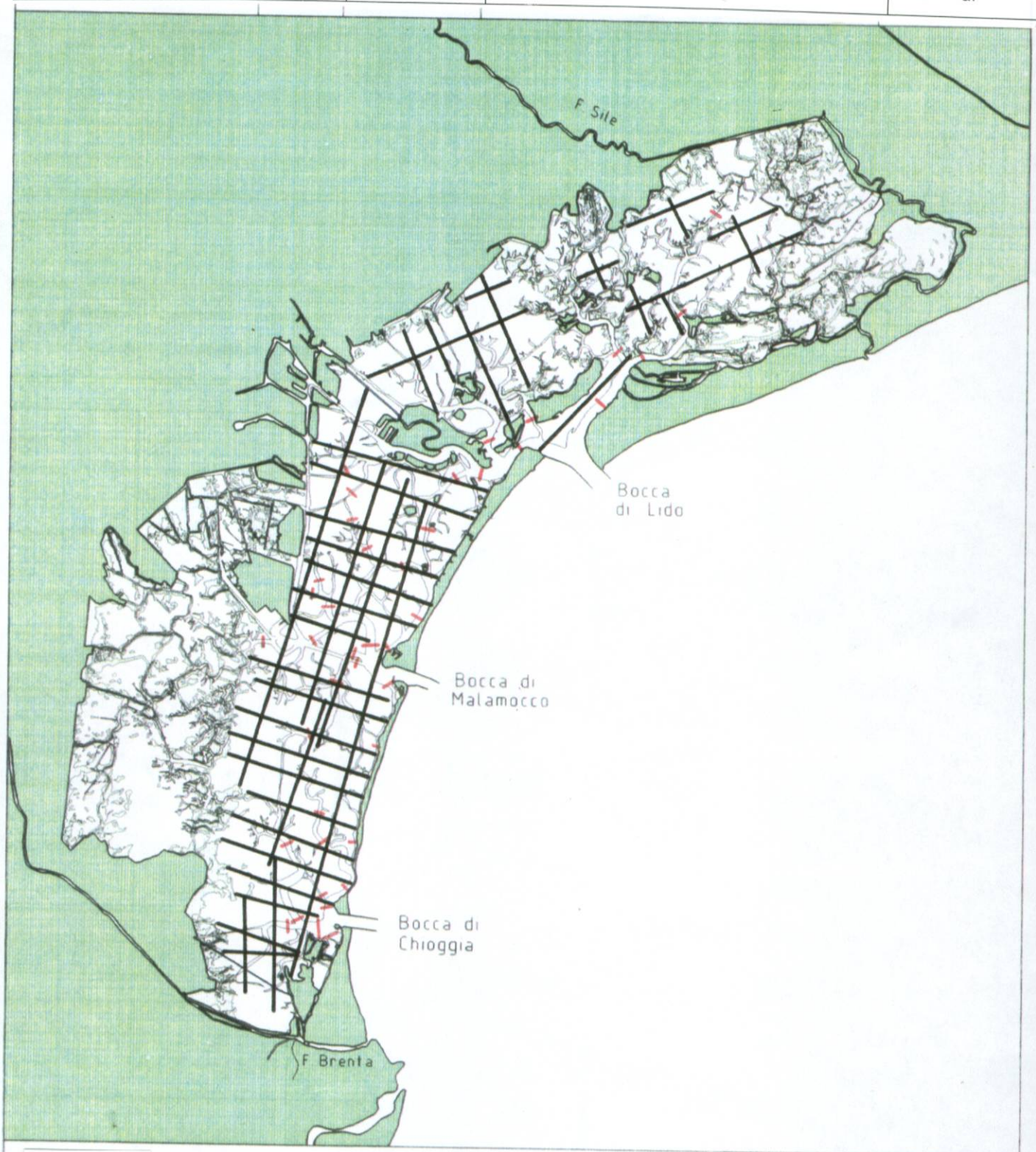


Fig. 4.1 - UBICAZIONE DELLE SEZIONI DEL RILIEVO BATIMETRICO DEL 1990.

LEGENDA

SEZIONI SUI BASSIFONDI

SEZIONI SUI CANALI

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

L'abbassamento del fondo dovuto alla subsidenza è stato assunto, come detto nel paragrafo 2, uniforme su tutta la superficie lagunare e pari al valore misurato a Punta della Salute.

I risultati delle elaborazioni sono riportati in termini di evoluzione della profondità media nelle figg. 4.2 e 4.3, relative rispettivamente all'intera laguna ed ai tre bacini, mentre le figg. 4.4 e 4.5 riportano la distribuzione spaziale dei ratei di approfondimento o sedimentazione nei due periodi 1930-70 e 1970-90.

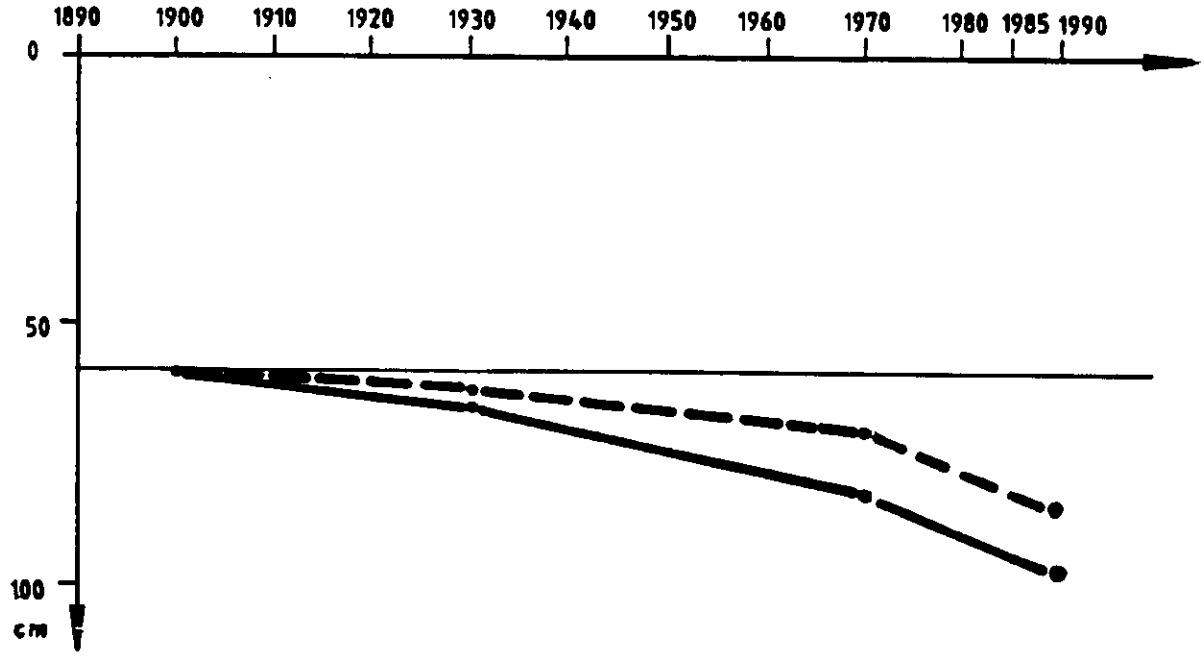
Come si osserva dalle figure, nel periodo 1900-1930 si ha una tendenza erosiva modesta, dello stesso ordine di grandezza dell'incremento di profondità dovuto alla subsidenza: la velocità media di abbassamento totale del fondale è di circa 2.5 mm/anno, di cui circa 1 mm/anno per erosione.

L'erosione più forte si è verificata nel bacino di Lido, mentre nel bacino di Chioggia il fenomeno è pressochè nullo, e l'abbassamento è imputabile alla sola subsidenza.

La maggior erosione del bacino di Lido si ritiene un effetto della costruzione dei moli: i moli di Lido sono stati infatti costruiti proprio all'inizio del periodo in esame e hanno ridotto di molto la quantità di sedimenti che attraverso la bocca confluiva in laguna.

La stabilità dei fondali di Chioggia si ritiene invece dovuta all'apporto dei sedimenti originati dall'erosione delle barene che si erano formate durante la provvisoria reimmissione in laguna del Brenta (1852-1896).

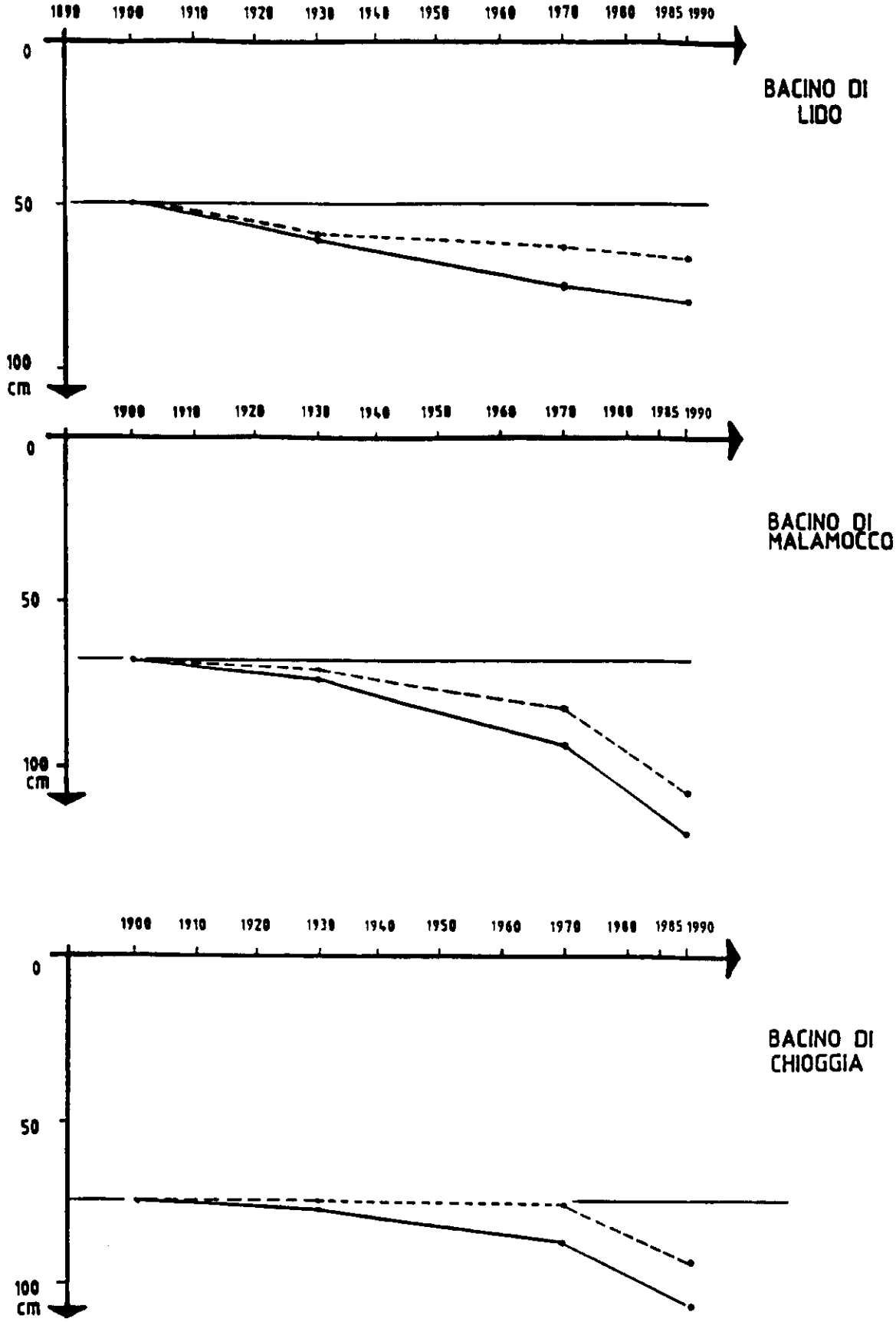
Nel periodo 1930-1970 si ha ancora una tendenza erosiva modesta per l'intera laguna, con una velocità media di abbassamento per erosione pressochè inalterata rispetto al periodo precedente (circa 1,5 mm/anno); l'incremento di profondità causato dalla subsidenza è però ben maggiore, ed è stato causato dalle attività dell'uomo, ovvero dall'emungimento dalla falda di grandi quantità d'acqua per usi industriali.



LEGENDA

ANDAMENTO 1900 - 1990	
———	VARIAZIONE RISPETTO AD UN LIVELLO ASSOLUTO DI RIFERIMENTO (L.M.M 1941)
— — —	VARIAZIONE DEPURATA DELLA SUBSIDENZA

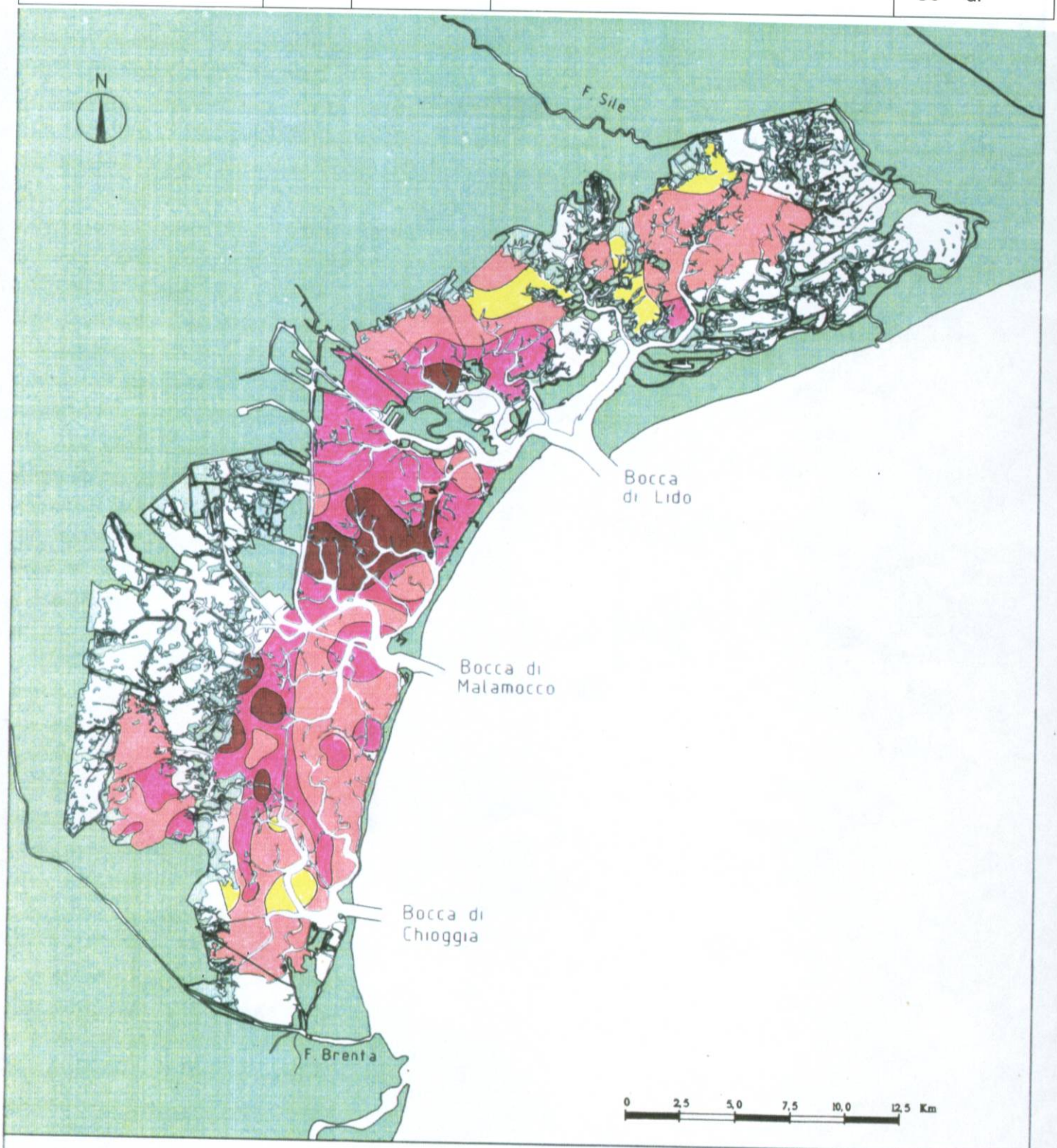
Fig. 4.2 - EVOLUZIONE DELLE PROFONDITA' MEDIE DEI BASSIFONDI - INTERA LAGUNA.



NOTA : PER LA LEGENDA

VEDI Fig. 4.2

Fig. 4.3 - **EVOLUZIONE DELLE PROFONDITA' MEDIE DEI BASSIFONDI LIDO, MALAMOCCO, CHIOGGIA**



LEGENDA :

SEDIMENTAZIONE

0 - 5 mm/anno

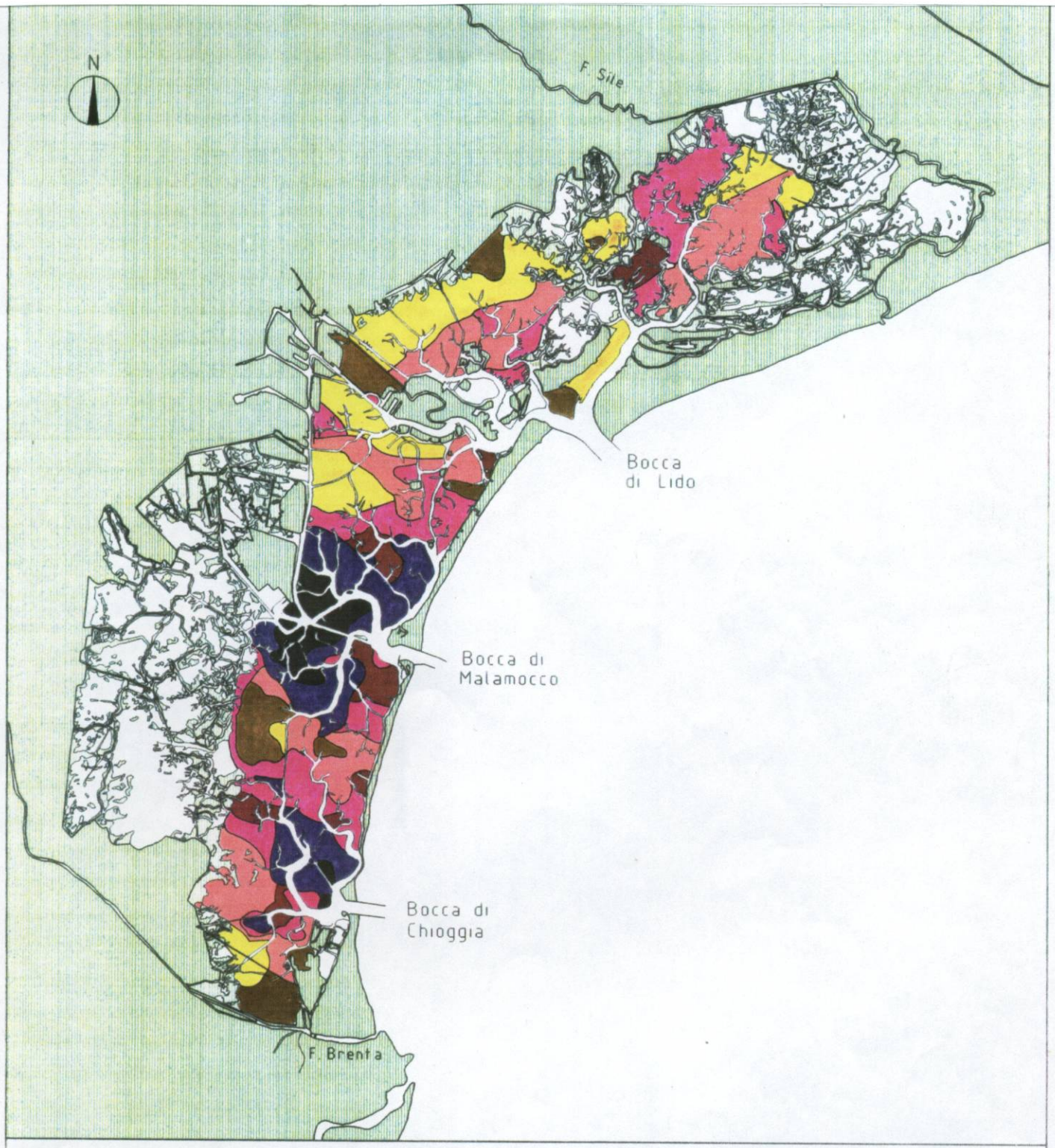
APPROFONDIMENTO

0 - 5 mm / anno

5 - 10 mm / anno

10 - 15 mm / anno

Fig. 4.4 - VARIAZIONE MEDIA DELLA PROFONDITA' DEI BASSIFONDI NEL PERIODO 1930 - 1970.



LEGENDA :

SEDIMENTAZIONE

- 0 - 5 mm/anno
- > 5 mm/anno

APPROFONDIMENTO

- 0 - 5 mm/anno
- 5 - 10 mm/anno
- 10 - 15 mm/anno
- 15 - 30 mm/anno
- > 30 mm/anno

Fig. 4.5 - VARIAZIONE MEDIA DELLA PROFONDITA' DEI BASSIFONDI NEL PERIODO 1970 - 1990.

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

Pertanto, la velocità media dell'approfondimento totale dei fondali risulta accresciuta (circa 4,5 mm/anno). Dall'analisi separata dei tre bacini si deduce come a Chioggia siano assenti veri e propri fenomeni erosivi; nel bacino di Malamocco il tasso di erosione si accentua pur restando su valori moderati, mentre a Lido si riduce, il che è comprensibile considerando in via d'esaurimento l'effetto della costruzione dei moli.

Si osservi inoltre che le zone a maggior rateo di approfondimento non sono quelle attigue alle bocche, ma quelle più interne, prossime allo spartiacque Lido-Malamocco e all'allineamento Bonifica del Brenta-Marghera (fig. 4.4): l'effetto predominante della subsidenza, più importante nelle zone citate e meno verso il litorale, spiega questa distribuzione.

Nel periodo 1970-1990, l'approfondimento medio delle zone dei bassifondi è di circa 26 cm per il bacino di Malamocco e 17 cm per il bacino di Chioggia, mentre nel bacino di Lido è limitato ad un valore dell'ordine dei 2 cm. Mediando tali valori sull'intera superficie dei bassifondi lagunari si ricava un approfondimento complessivo di circa 14 cm, corrispondenti ad un rateo medio di 7 mm all'anno.

Di essi, solo circa 0,5 mm possono essere assegnati alla subsidenza (essendosi ormai esaurita quella di origine antropica) mentre i restanti 6,5 mm sono da attribuire all'erosione vera e propria: l'ordine di grandezza del quantitativo di sedimenti asportato dai bassifondi è quindi, per l'intera laguna, di circa 2 milioni di metri cubi all'anno.

Molto interessante è l'analisi della distribuzione spaziale di questa erosione (vedi fig. 4.5): si osserva la concentrazione dei valori maggiori attorno alle bocche ma, soprattutto, attorno ai canali artificiali scavati nei periodi recenti.

Come si vedrà anche nel seguito del Progetto, l'effetto di "trappola" provocato da questi nuovi canali è la causa principale del fenomeno erosivo recente dei bassifondi lagunari.

5. VARIAZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI

I canali sono le zone d'acqua più profonde del bacino lagunare, nelle quali avviene prevalentemente il flusso della marea.

La transizione tra canali e bassifondi tuttavia, a seguito dei processi di "appiattimento" che attualmente interessano la laguna, non sempre è univocamente definita: nelle valutazioni che seguono, in assenza di un limite fisico chiaro dei canali (costituito ad esempio dai moli per i canali di bocca o dalle barene per molti canali in zone interne) è stata assunta, come confine tra canali e bassifondi, una profondità di 2 metri.

Nel capitolo viene esposta un'analisi separata per i canali interni alla laguna e per i canali di bocca.

5.1. Canali lagunari

I canali lagunari sono oggi in una situazione di pressochè generalizzata sedimentazione, con conseguenze negative sia sulla navigazione che sul ricambio idrico nelle zone interne.

Questa tendenza è però molto recente, ed è stata innescata dallo escavo in questo secolo dei grandi canali artificiali.

Nel periodo 1930-1970, ad esempio, il volume complessivo dei canali lagunari risulta ancora in aumento: sulla base dei rilievi del Magistrato esso è passato da 314 a 359 x 10^6 m^3, come risulta dalla seguente tabella:

Tab. 5.1: Volume dei canali naturali tra il 1930 e il 1970

Bacino	Volume (10^6 m^3) 1930	1970	Differenze %
- Lido	144	145	+ 0.7
- Malamocco	112	144	+ 28.5
- Chioggia	58	70	+ 20.6
Totale	314	359	+ 14.3

Si osserva che, dell'aumento del volume registrato nel periodo, circa 20 milioni di m^3 (cioè circa il 45%) può essere attribuito al solo escavo del canale Petroli (51), avvenuto nel periodo 1965-1968.

Il contributo di un' "evoluzione naturale" risulterebbe essere pertanto valutabile in circa il 7%. Questo numero è coerente con lo aumento dei volumi di marea valutati nello stesso periodo (1930-1970) soprattutto a seguito della subsidenza: si osservi che tra volumi di marea in transito in asse ai canali e sezioni dei canali stessi esiste una stretta correlazione, come più dettagliatamente esposto nel volume 5.

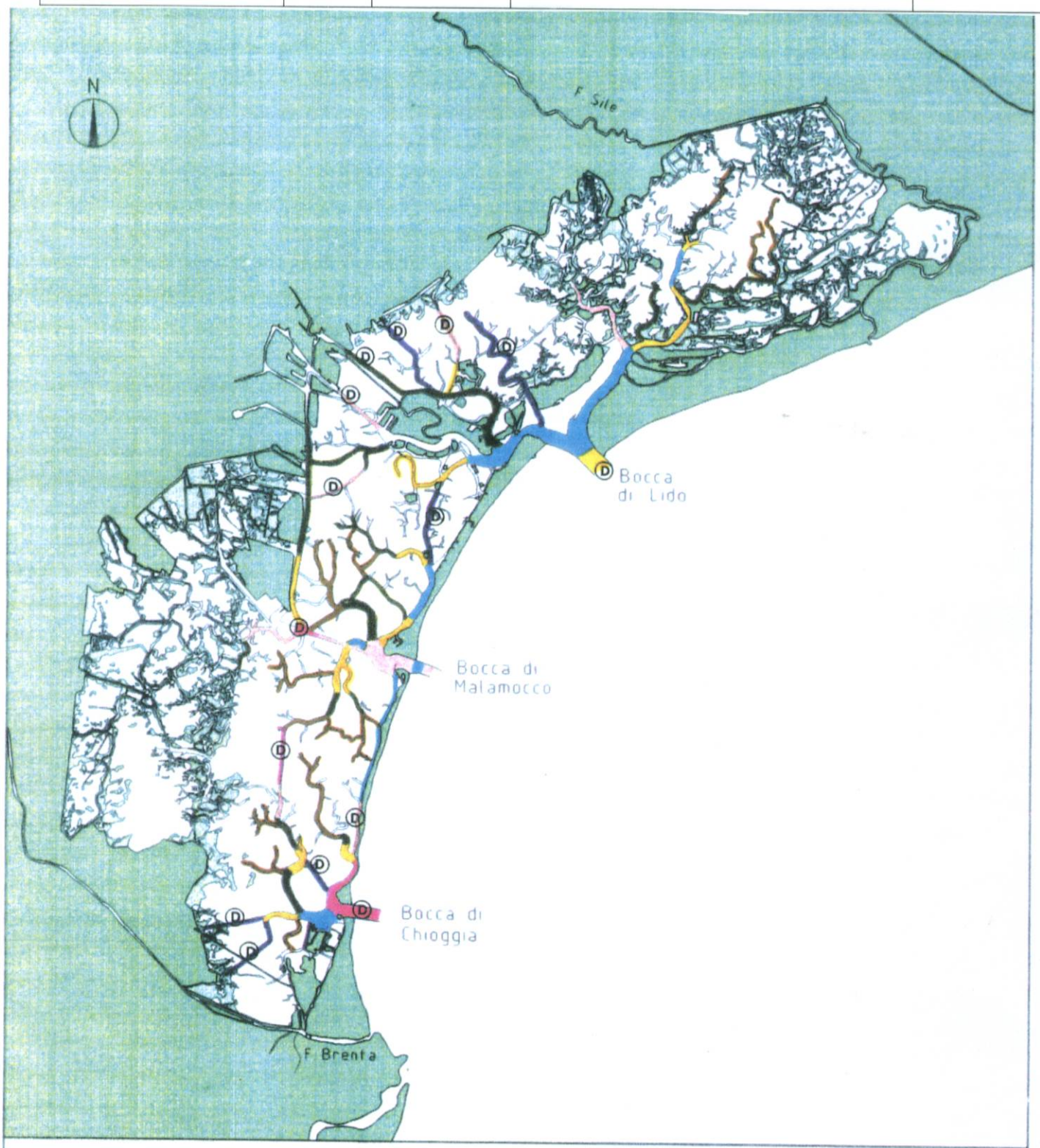
Nel periodo successivo al 1970 la tendenza evolutiva dei canali è stata opposta a quella sopra evidenziata, con prevalente sedimentazione, concentrata soprattutto nei canali naturali, all'interno dei bacini (come Malamocco e Chioggia) in cui l'escavo di nuovi canali artificiali ha causato una brusca mutazione dei regimi idrodinamici, riducendo la portata e quindi le sezioni di equilibrio di molti canali naturali.

La tendenza evolutiva più recente è esposta con riferimento ai dati del nuovo rilievo del 1990.

La figura 5.1 sintetizza con una scala cromatica le tendenze evolutive del periodo 1970-90; essa è stata elaborata a partire dai dati numerici riportati per esteso nella tab. 5.2 (per l'identificazione delle sezioni, vedi la fig. 4.1).

L'esame della fig. 5.1 consente di riconoscere tre comportamenti ben distinti:

- i canali naturali dei bacini di Malamocco, Chioggia e S.Nicolò sono pressochè tutti in sedimentazione, con tendenza che si accentua verso gli spartiacque. Ciò è motivato dal fatto che in tutti questi canali, a causa dell'escavo di nuovi canali artificiali, si è ridotto nel tempo il volume di marea, e quindi le sezioni tendono a ridursi di conseguenza;



LEGENDA : Tendenza evolutiva dell'area delle sezioni

- < - 20 % } SEDIMENTAZIONE
- - 10 / - 20% } SEDIMENTAZIONE
- - 3 / - 10 % } SEDIMENTAZIONE
- - 3 / - 3 % STABILITA'
- - 3 / - 10 % } EROSIONE E/O DRAGAGGIO
- - 10 / - 20 % } EROSIONE E/O DRAGAGGIO
- > - 20 % } EROSIONE E/O DRAGAGGIO
- (D) canali dragati nel periodo

Fig. 5.1 - EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI LAGUNARI NEL PERIODO 1970 - 1990

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

N°	canale	sezione liquida (mq)			
		1930	1970	1985	1990
	Bacino di Chioggia				
1	S.Domenico		819		722
2	Perognola		3799		3720
3	Poco Pesce		1051		974
4	Perognola		2133		1824
5	Caroman		1978		2798
6	Nuovo	70	520	850	820
7	Caroman		799		907
8	Pellestrina	280	280	300	405
9	Bombae	800	789	650	580
10	Bombae		831	650	646
11	Perognola	850	1134	1000	948
	Bacino di Malamocco				
12	S.Antonio		213		218
13	Valgrande		1082		807
14	Spignon		2077		1778
15	S.Pietro		783		716
16	Petroli		3458		3758
17	Spignon	1660	1899	1880	1875
18	Fisolo	3110	3727	3560	3084
19	Rocchetta		1821		1886
20	Melison	1300	1685	1250	1247
21	Piovego		1205		1005
22	Molini	1500	994	600	616
23	del Rischio		315		205
24	Lussariol		201		153
25	Malamocco		1775		1799
26	Poveglia	800	567	550	476
27	Freganzorzi	700	399	400	319
28	Freganzorzi		233		204
29	S.Angelo		478		414
30	Nuovo di Fusina		237		182
31	S.Spirito		123		149
	Bacino di Lido				
32	Orfano		934		952
33	S.Marco		4314		4269
34	Delle Navi		2663		2091
35	S.Niccolo'		3299		3217
36	S. Erasmo		355		458
37	Treporti	2480	3101	2920	3132
38	Burano	1000	1257	1260	1348
39	S.Felice	1300	1833	1760	1635
40	S.Felice		933		864
41	Cenesa		489		277

Tab. 5.2 Evoluzione delle sezioni dei canali lagunari

- molti canali artificiali utilizzati per la navigazione, come il canale Petroli, il canale Nuovo (sezione 6) o il canale Allacciante, presentano sezioni stabili o in aumento: i dragaggi di manutenzione e l'azione erosiva delle eliche delle navi sono i fattori che spiegano queste tendenze, che dipendono quindi dalla sola azione dell'uomo;
- i canali del bacino di Treporti risultano abbastanza stabili nelle aree prossime alla bocca; questa tendenza si spiega considerando che in questo bacino la portata dei canali è variata poco nel periodo più recente (non essendo stati escavati nuovi canali importanti), mentre non si può escludere per alcuni canali di maggior transito la già richiamata incidenza dei dragaggi di manutenzione. Nelle aree interne anche in questi canali si riscontra la tendenza alla sedimentazione, sempre rilevata nelle zone a bassa energia idrodinamica.

Ulteriori indicazioni sui fenomeni che governano la tendenza evolutiva dei canali si ricavano dalla sovrapposizione delle sezioni del 1970 e del 1990: nelle figure dalla 5.2 alla 5.12 sono riportate le 41 sezioni misurate nel rilievo recente con maggior dettaglio, precedute dalle relative piante-chiave.

Si noti come la sedimentazione nei canali è quasi sempre associata all'erosione dei bassifondi ai lati: quest'ultimo fenomeno è ancora più accentuato quando il canale in questione viene dragato (vedi ad esempio le sezioni 6, 8 e 16).

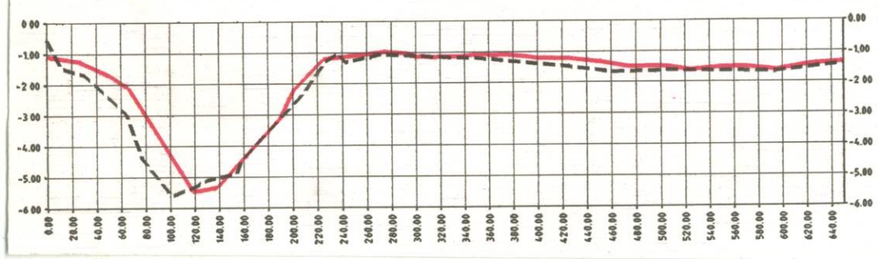
Un'ulteriore elaborazione grafica qui presentata riguarda l'esame della evoluzione di alcune sezioni in un periodo più lungo, che tiene conto anche del rilievo del 1930 e di quello intermedio del 1985. Essa è riportata nelle figure dalla 5.13 alla 5.16; è facilmente rilevabile l'inversione di tendenza tra i due periodi 1930-70 (aumento delle sezioni) e 1970-90 (riduzione delle sezioni stesse) già segnalata nel testo.

Fig. 5.2 - EVOLUZIONE DEI CANALI: PIANTA CHIAVE DELLE SEZIONI BACINO DI CHIOGGIA

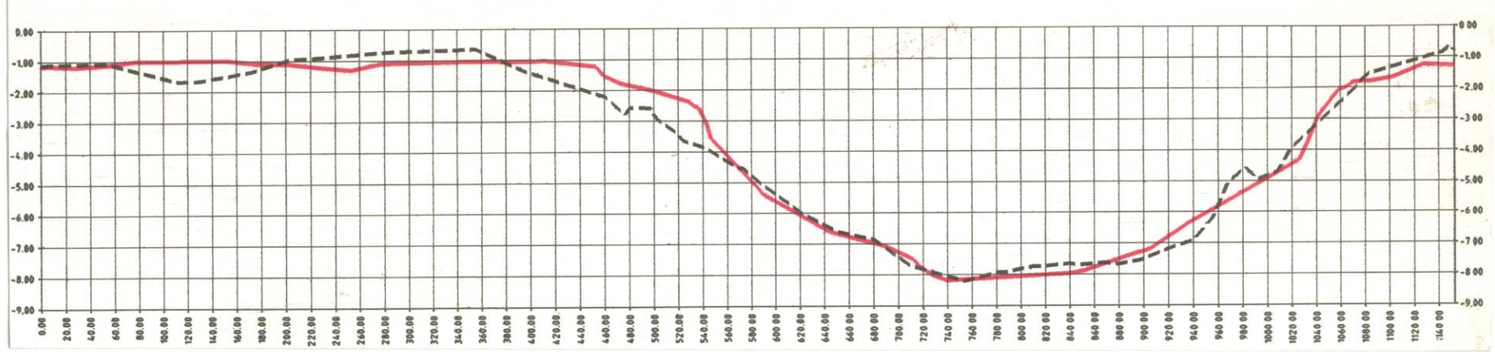
Fig. 5.3 - CONFRONTO SEZIONI DEI CANALI 1970/1990
- BACINO DI CHIOGGIA-

------ 1970
——— 1990

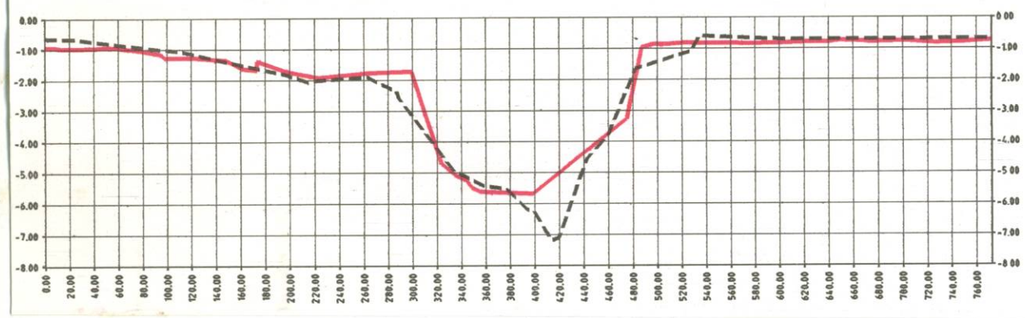
SEZIONE N. 1
CANALE S.DOMENICO



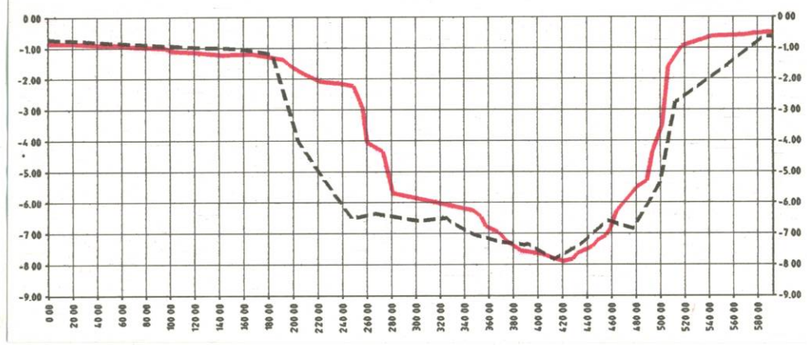
SEZIONE N. 2
CANALE PEROGNOLA



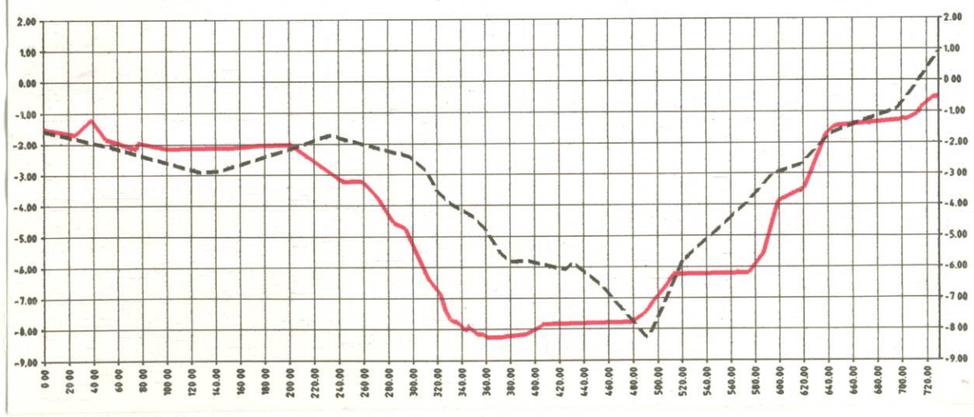
SEZIONE N. 3
CANALE POCO PESCE



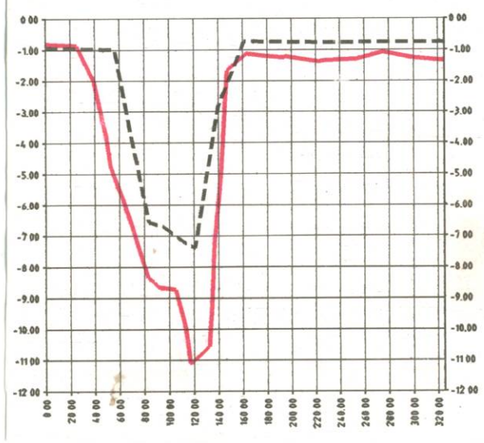
SEZIONE N. 4
CANALE PEROGNOLA



SEZIONE N. 5
CANALE CAROMAN



SEZIONE N. 6
CANALE NUOVO



SEZIONE N. 7
CANALE CAROMAN

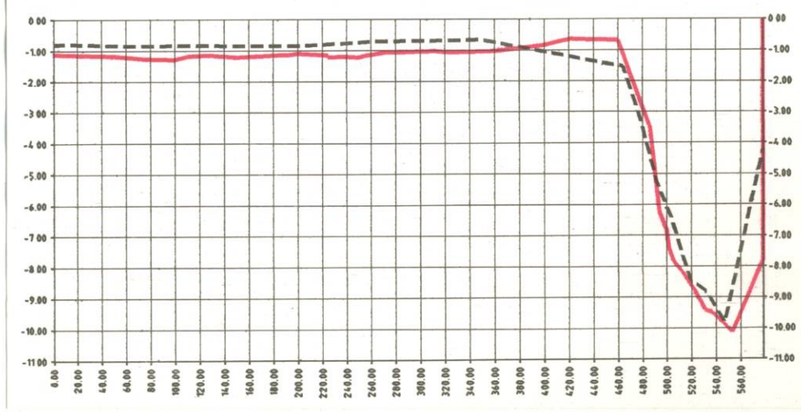
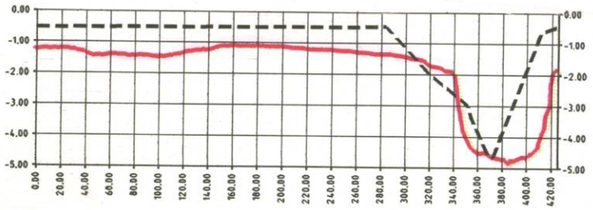


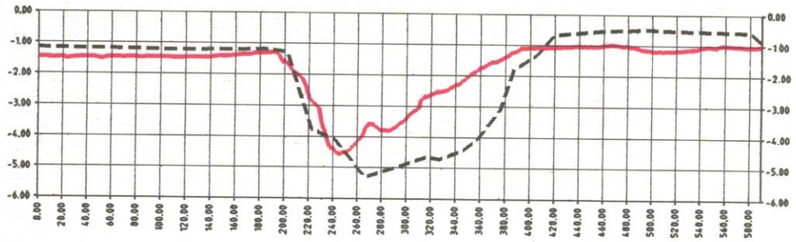
Fig. 5.4 - CONFRONTO SEZIONI DEI CANALI 1970/1990
- BACINO DI CHIOGGIA-

------ 1970
——— 1990

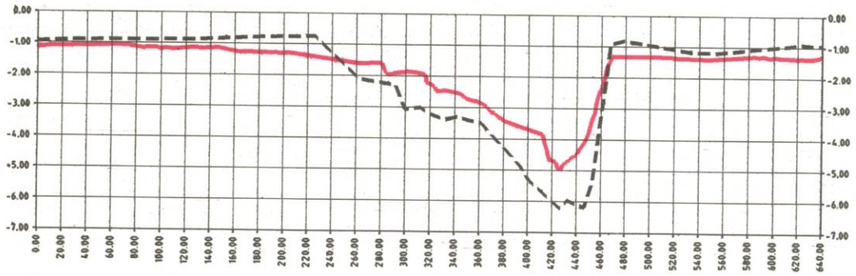
SEZIONE N. 8
CANALE DI PELLESTRINA



SEZIONE N. 9
CANALE BOMBAE



SEZIONE N. 10
CANALE BOMBAE



SEZIONE N. 11
CANALE PEROGNOLA

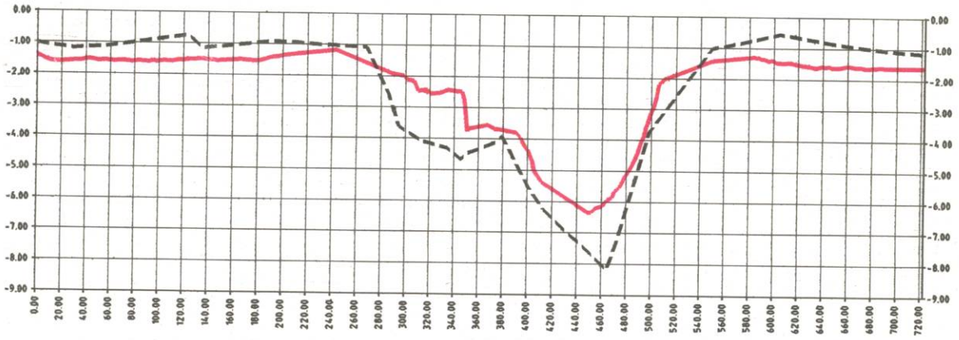
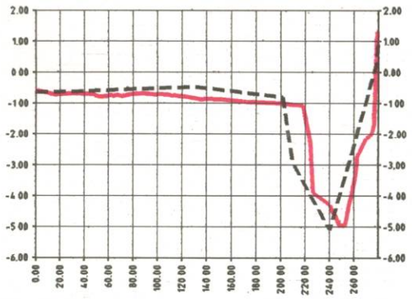


Fig. 5.5 - EVOLUZIONE DEI CANALI: PIANTA CHIAVE DELLE SEZIONI BACINO DI MALAMOCCO

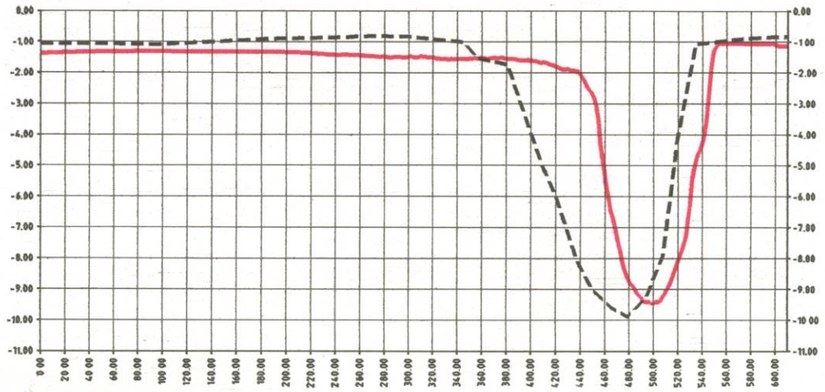
Fig. 5.6 - CONFRONTO SEZIONI DEI CANALI 1970/1990
-BACINO DI MALAMOCCO-

------- 1970
——— 1990

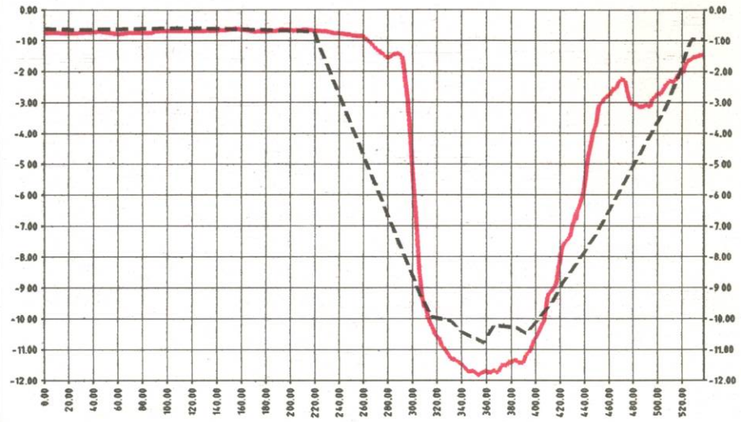
SEZIONE N. 12
CANALE S. ANTONIO



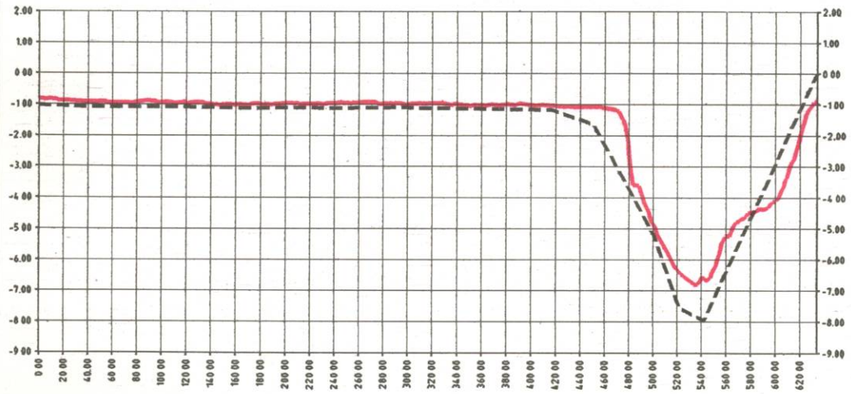
SEZIONE N. 13
CANALE VALGRANDE



SEZIONE N. 14
CANALE SPIGNON

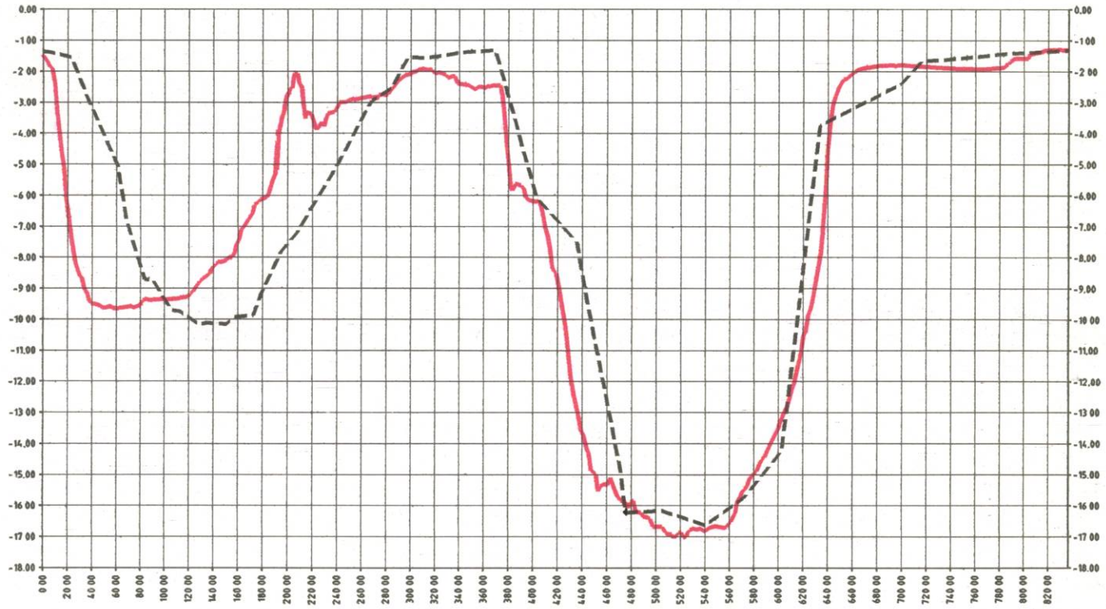


SEZIONE N. 15
CANALE S. PIETRO

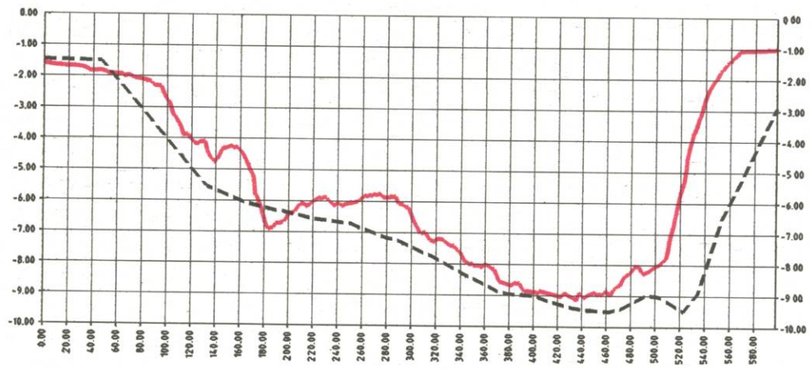


SEZIONE N. 17
CANALE SPIGNON

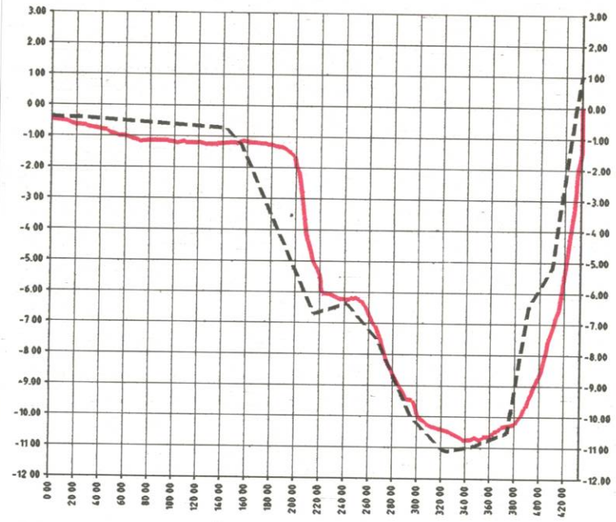
SEZIONE N. 16
CANALE PETROLI



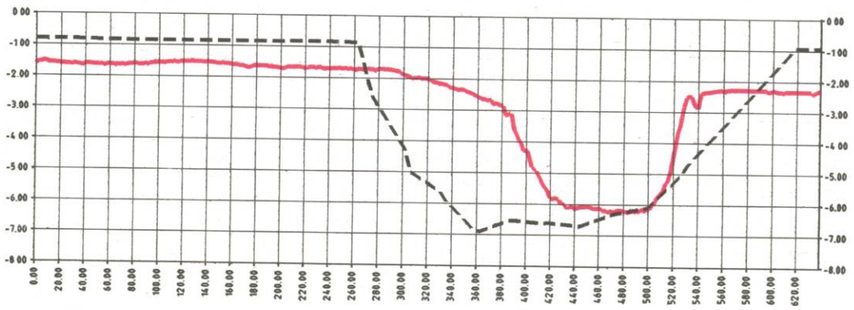
SEZIONE N. 18
CANALE FISOLO



SEZIONE N. 19
CANALE ROCCHETTA



SEZIONE N. 20
CANALE MELISON



SEZIONE N. 21
CODA MELISON

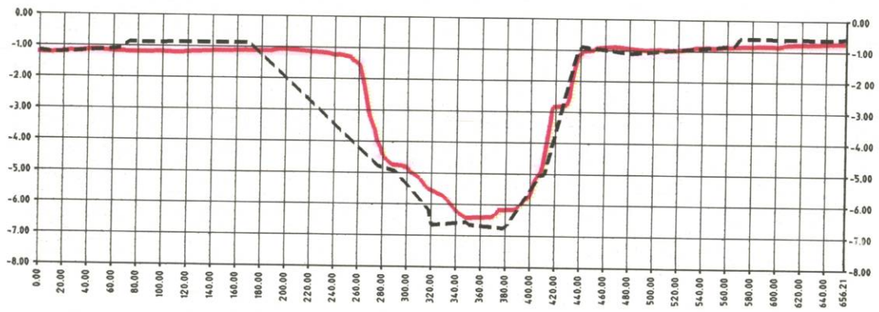
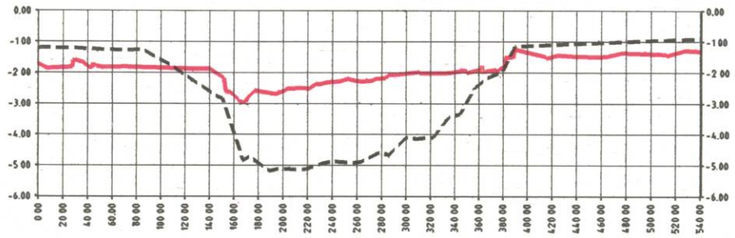


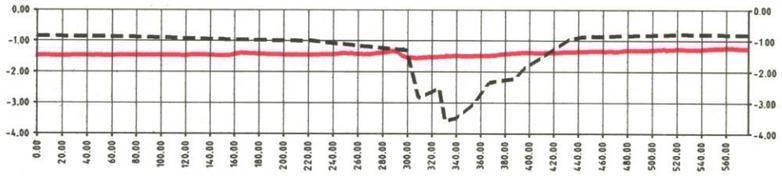
Fig. 5.8 - CONFRONTO SEZIONI DEI CANALI 1970/1990
-BACINO DI MALAMOCCO-

------- 1970
——— 1990

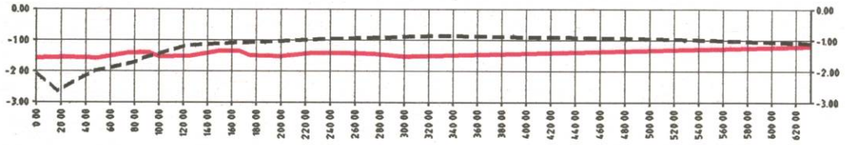
SEZIONE N. 22
CANALE MOLINI



SEZIONE N. 23
CODA DI RISCHIO



SEZIONE N. 24
CANALE LUSSARIOL



SEZIONE N. 25
CANALE MALAMOCCO

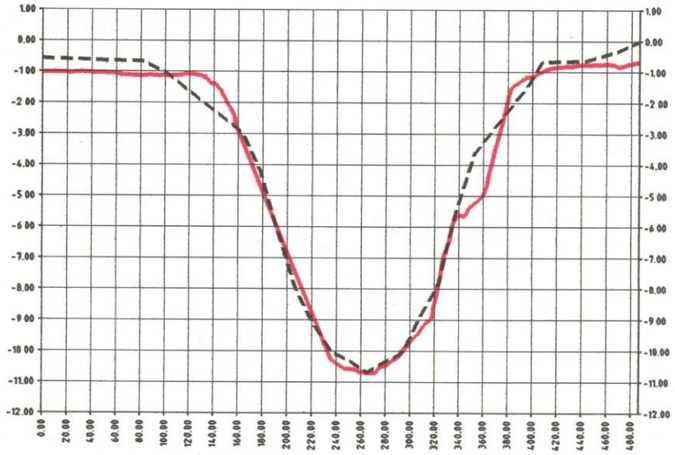
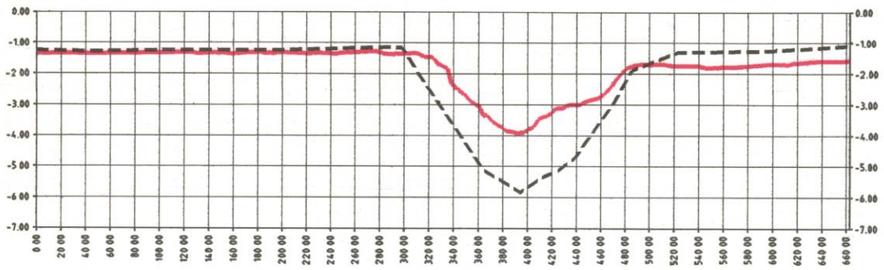


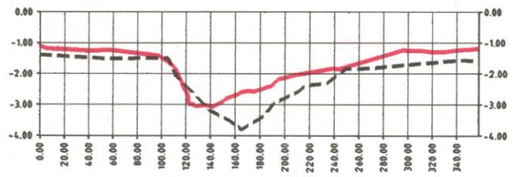
Fig. 5.9 - CONFRONTO SEZIONI DEI CANALI 1970/1990
-BACINO DI MALAMOCCO-

------- 1970
——— 1990

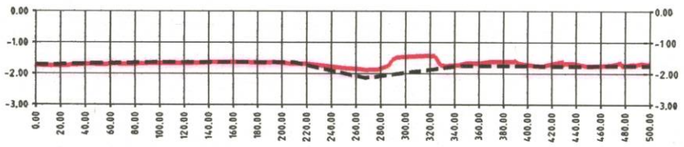
SEZIONE N. 26
CANALE POVEGLIA



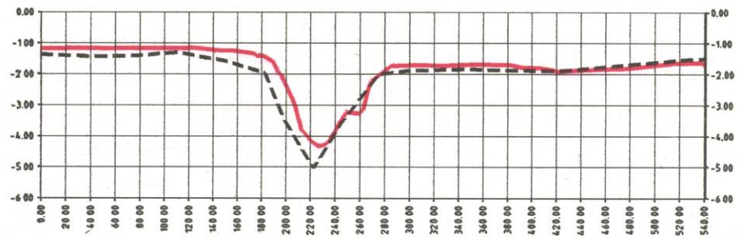
SEZIONE N. 27
CANALE FREGANZONI



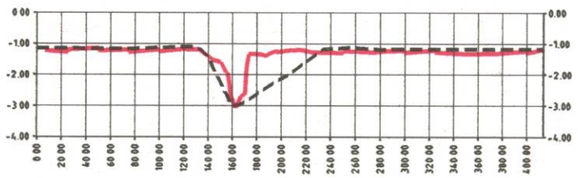
SEZIONE N. 28
CANALE FREGANZORZI



SEZIONE N. 29
CANALE S. ANGELO



SEZIONE N. 30
CANALE NUOVO DI FUSINA



SEZIONE N. 31
CANALE S. SPIRITO

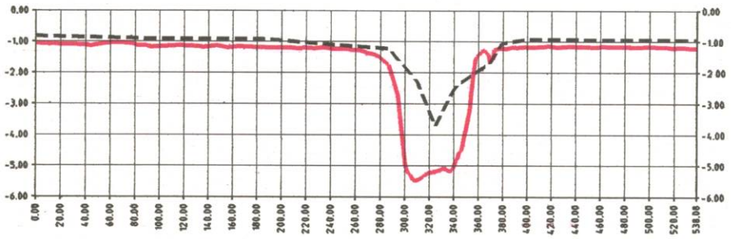
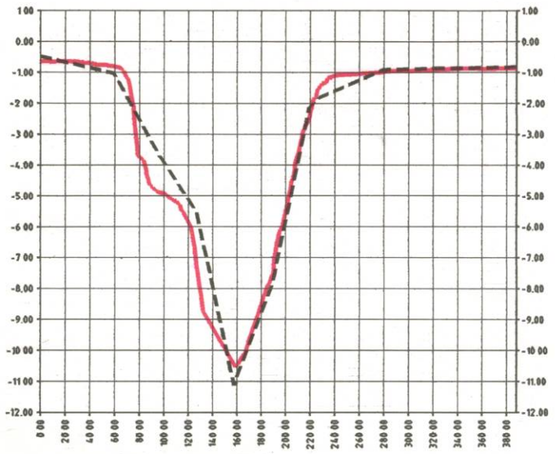


Fig. 5.10 - EVOLUZIONE DEI CANALI: PIANTA CHIAVE DELLE SEZIONI BACINO DI LIDO

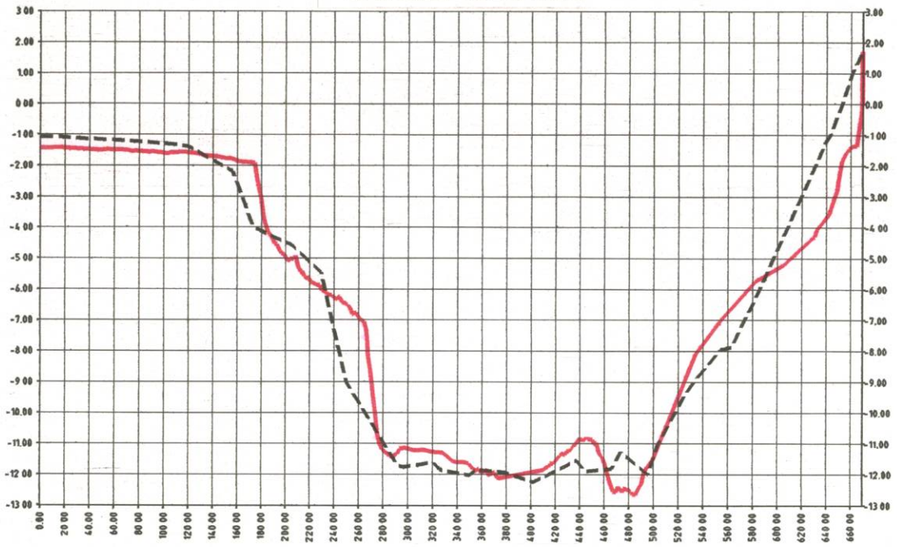
Fig. 5.11 - CONFRONTO SEZIONI DEI CANALI 1970/1990
-BACINO DI LIDO-

-------- 1970
——— 1990

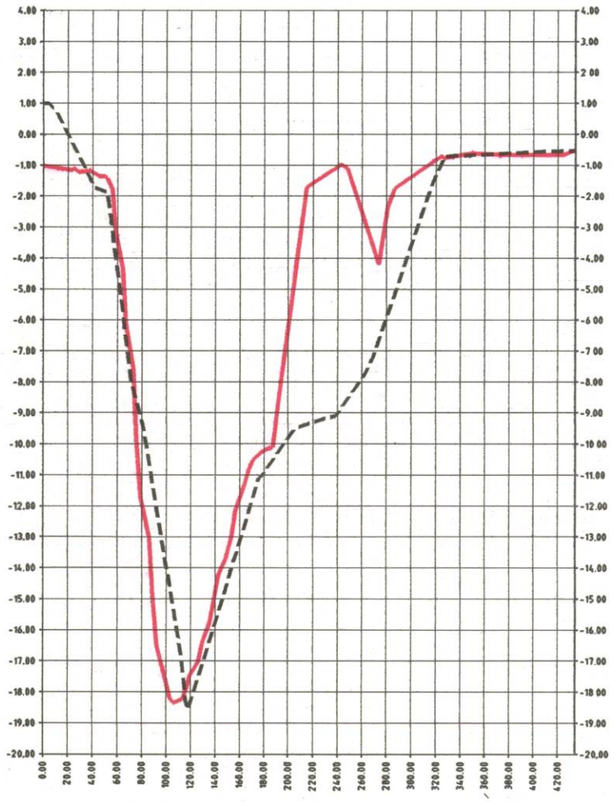
SEZIONE N. 32
CANALE ORFANO



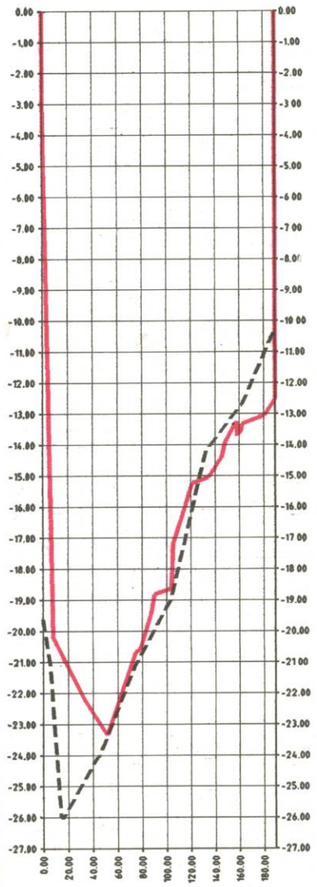
SEZIONE N. 33
CANALE S. MARCO



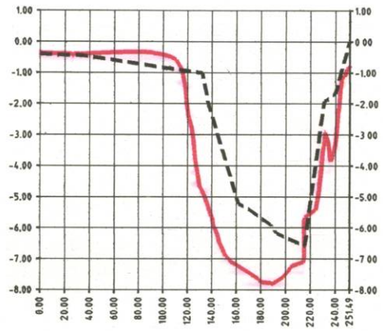
SEZIONE N. 34
CANALE DELLE NAVI



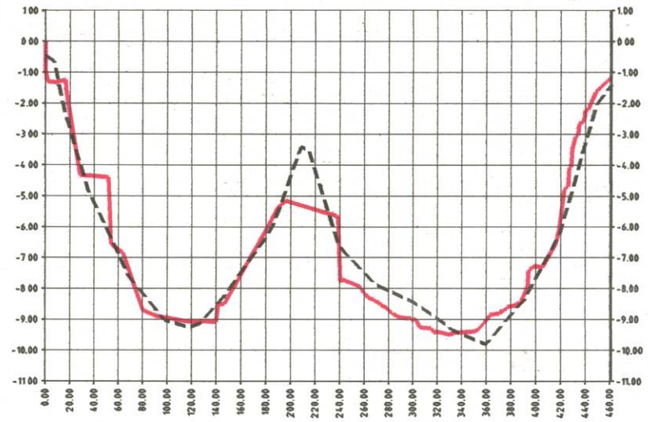
SEZIONE N. 35
CANALE S. NICOLO'



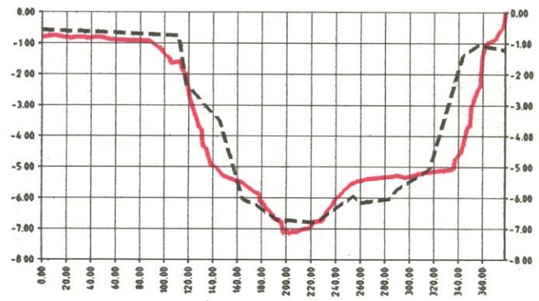
SEZIONE N. 36
CANALE S.ERASMO



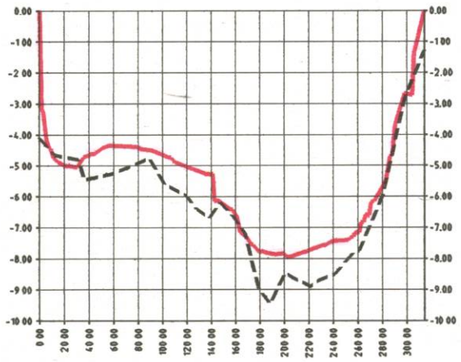
SEZIONE N. 37
CANALE TREPORTI



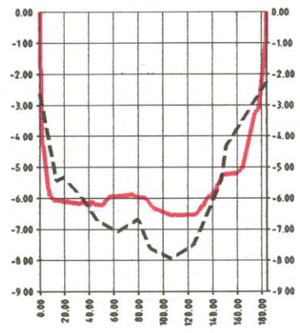
SEZIONE N. 38
CANALE BURANO



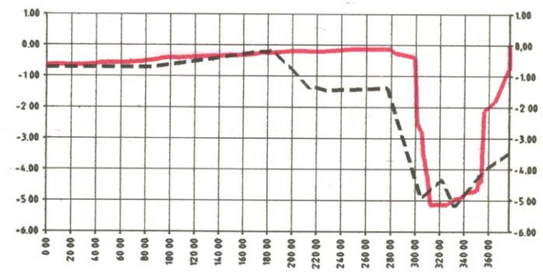
SEZIONE N. 39
CANALE S.FELICE

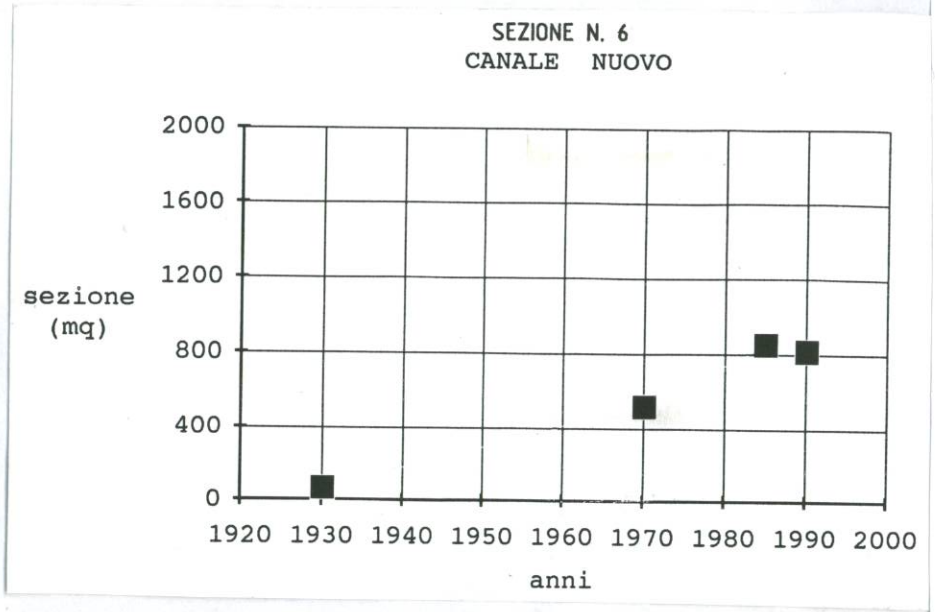


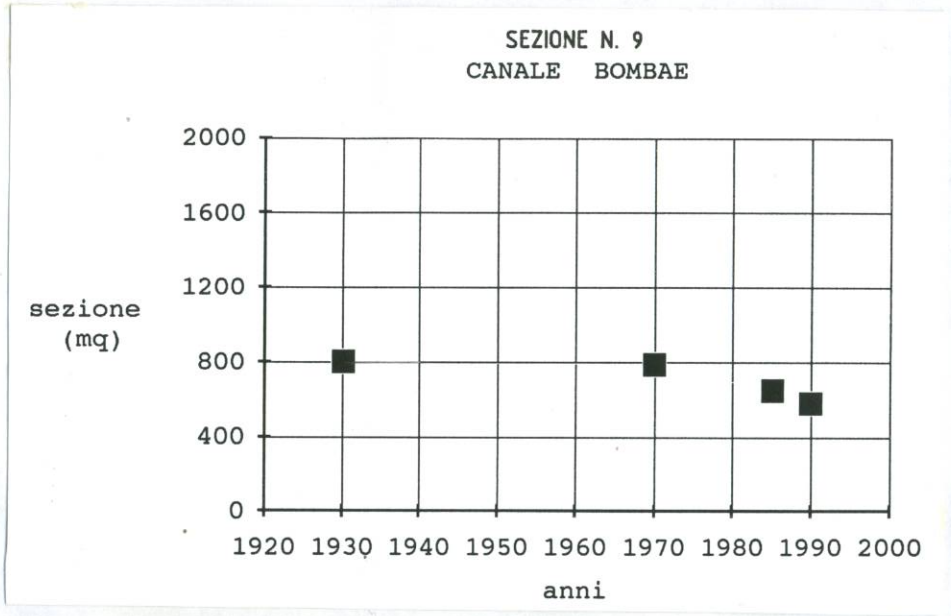
SEZIONE N. 40
CANALE S.FELICE



SEZIONE N. 41
CANALE CENESA







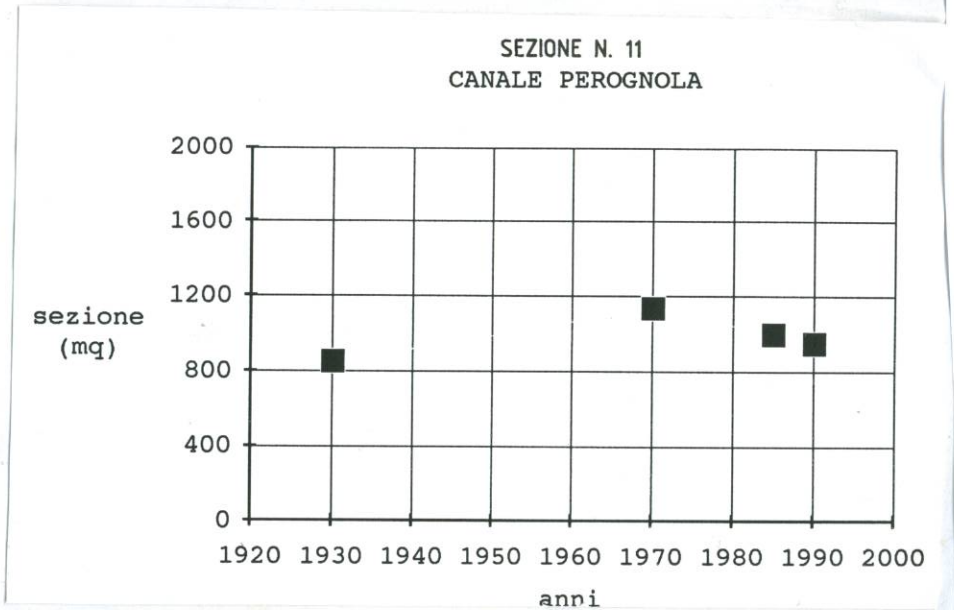
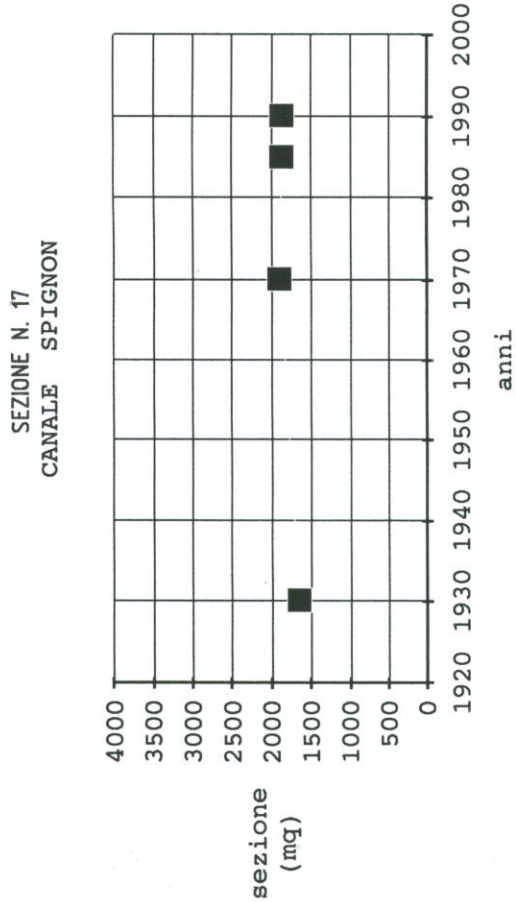
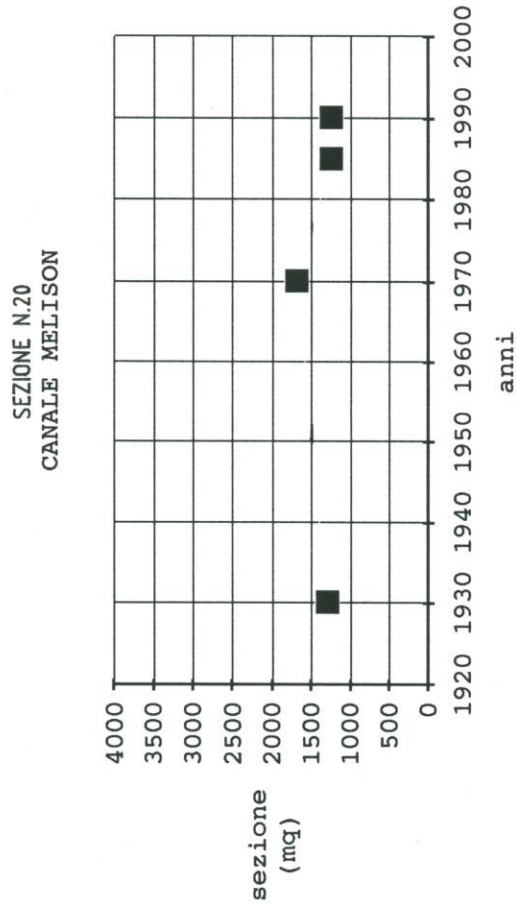


Fig. 5.13 -BACINO DI CHIOGGIA: EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI NUOVO, BOMBAE, PEROGNOLA





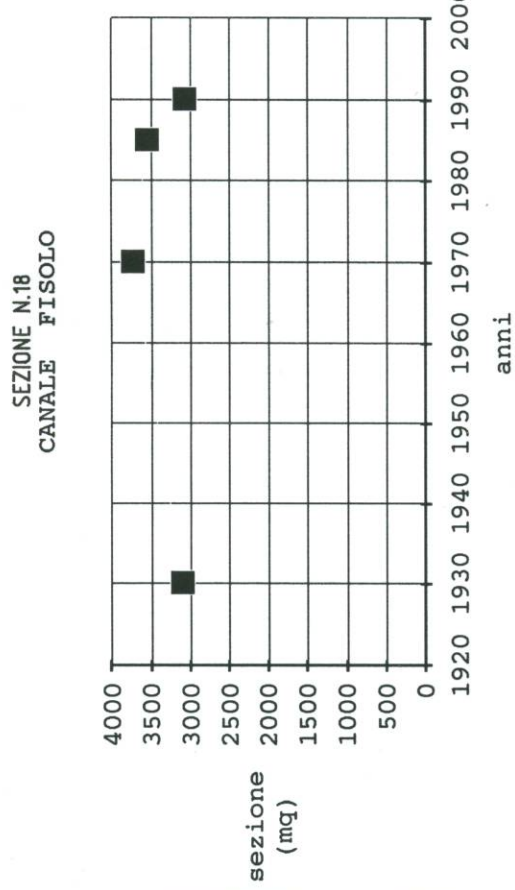
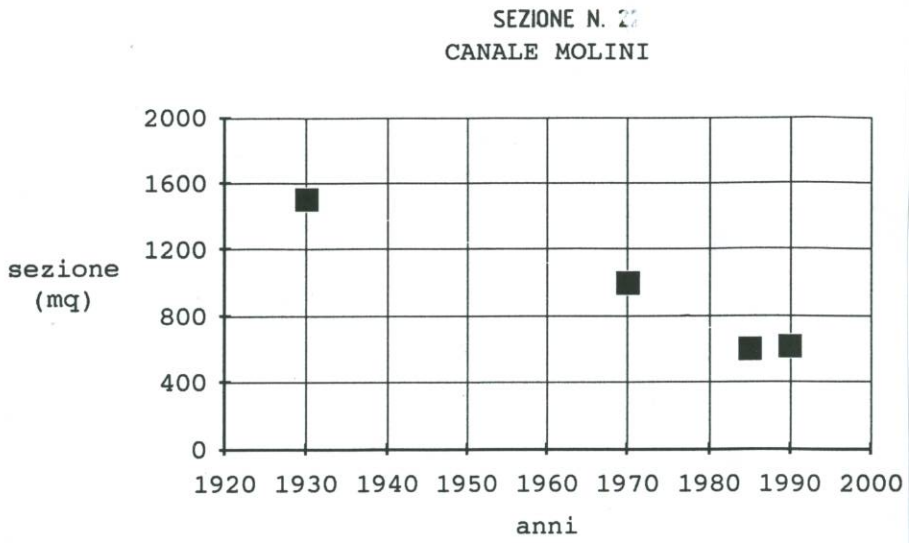
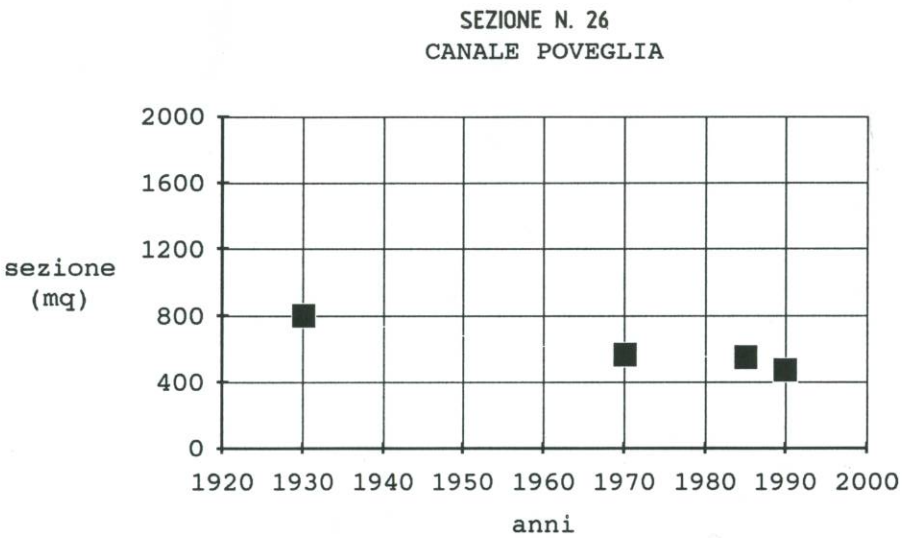


Fig. 5.14 -BACINO DI MALAMOCCO: EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI SPIGNON, FISOLO, MELISON





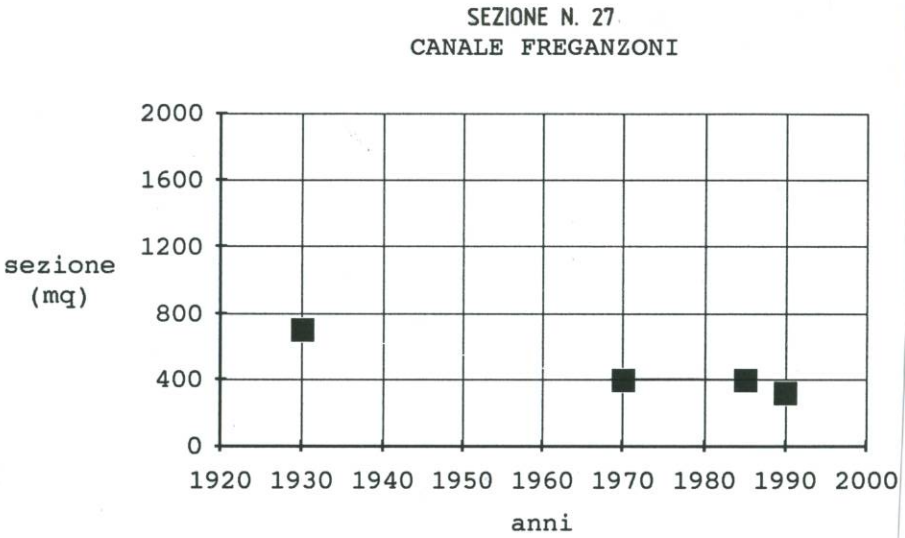
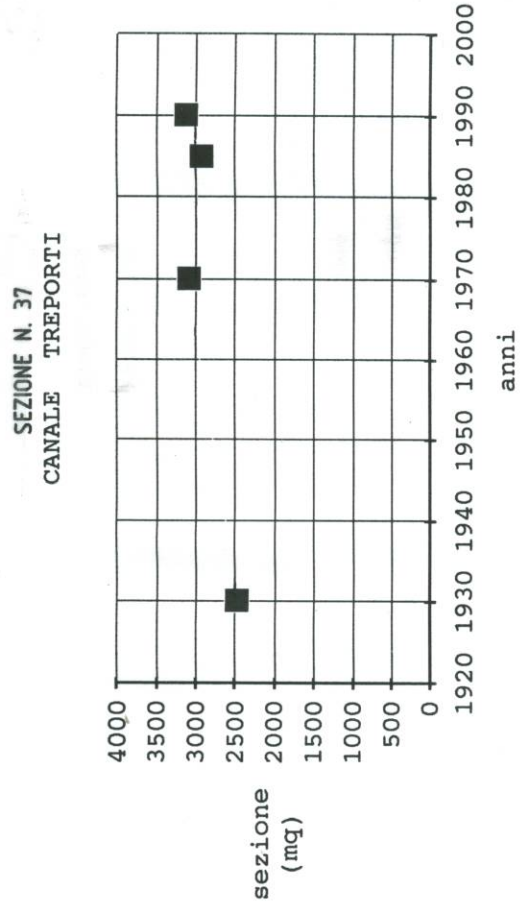
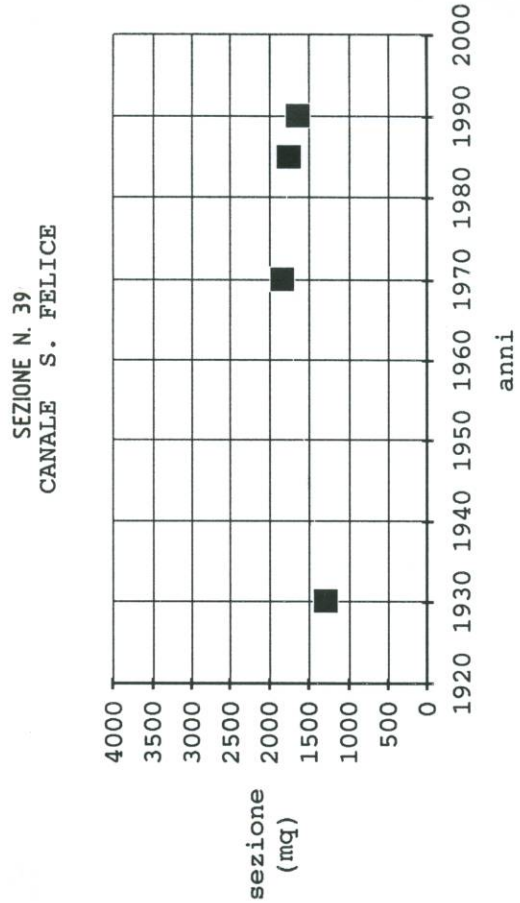


Fig. 5.15 - BACINO DI MALAMOCCO : EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI MOLINI, POVEGLIA, FREGANZONI





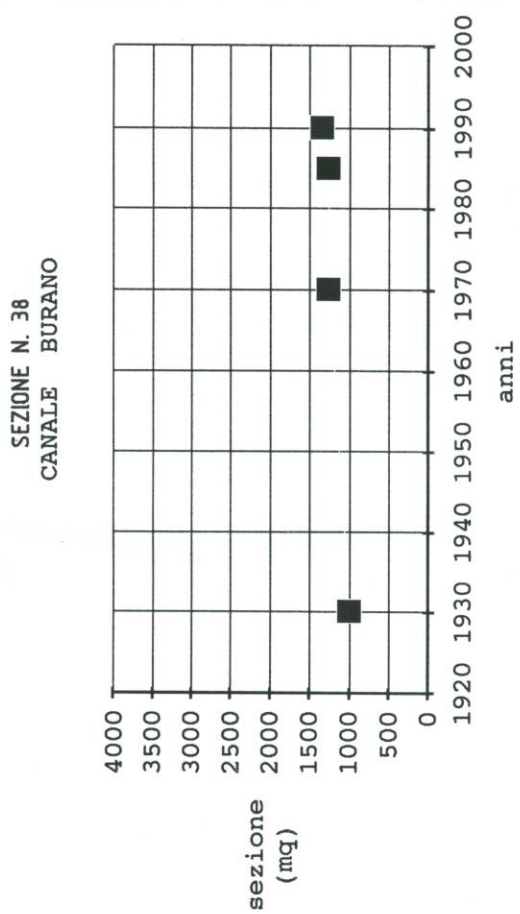


Fig. 5.16 - BACINO DI LIDO: EVOLUZIONE DELLE SEZIONI DEI CANALI TREPORTI, BURANO, S.FELICE

Per ricavare infine una valutazione quantitativa in termini complessivi dell'evoluzione dei canali nei 20 anni dal 1970 al 1990, si può estrapolare il rateo percentuale di variazione calcolato tenendo conto delle 41 sezioni già esposte e di altre 130 sezioni dei canali comprese nel rilievo dei bassifondi lagunari e ciò separatamente per i tre bacini di Lido, Malamocco e Chioggia: alle variazioni volumetriche così calcolate andranno aggiunti, per ottenere un indicatore della tendenza naturale alla sedimentazione, i volumi asportati nel periodo per dragaggio (vedi volume 4).

I dati ottenuti sono esposti nella Tabella 5.3.

Tab. 5.3: Volume dei canali naturali nel 1970 e nel 1990

Bacino	Volume (10^6 m^3) 1970	1990(1)	Dragaggi 1970-90 (10^6 m^3)	Differenze 1970-1990 (10^6 m^3)	%
- Lido	145	139	2,9	8,9	6,1%
- Malamocco	144	129	3,1	18,1	12,6%
- Chioggia	70	67	2,3	5,3	7,6%
Totale	359	335	8,3	32,3	
Media					9%

(1) Ricostruito a partire dai ratei di variazione misurati su 171 sezioni

In sintesi, risulta dai dati una tendenza alla sedimentazione valutabile, in termini percentuali in circa lo 0,45% l'anno, in termini assoluti in circa 1.500.000 m^3/anno, di cui mediamente circa 400.000 sono rimossi per dragaggio, mentre il resto determina una generale riduzione del volume dei canali interni.

5.2. Canali di bocca

Le riproduzioni cartografiche delle tre bocche sono disponibili in una forma utilizzabile per un confronto delle sezioni a partire dal 1810.

Per ciascuna bocca sono state reperite e utilizzate le seguenti carte:

- per Lido 9 carte, riferite agli anni: 1810, 1871, 1882, 1887, 1892, 1901, 1913, 1930 e 1970;
- per Malamocco 6 carte, riferite agli anni: 1810, 1860, 1901, 1915, 1930 e 1970;
- per Chioggia ancora 6 carte, ma riferite agli anni: 1810, 1860, 1901, 1914, 1930 e 1970.

Sono inoltre stati utilizzati i dati di due rilievi appositamente effettuati da Ecomar per conto del Consorzio Venezia Nuova, rispettivamente negli anni 1984 (4) e, con maggior dettaglio, 1989 (20). L'ubicazione delle sezioni del rilievo del 1984 è stata presa come riferimento per i calcoli delle variazioni.

Il grado di precisione con cui furono effettuati i rilievi, ovviamente, decresce andando indietro nel tempo, ma rimane sempre, per i canali delle bocche, a un livello accettabile, tale cioè da consentire lo studio dell'equilibrio dei fondali. Ciò è dovuto al fatto che le bocche sono sempre state utilizzate per l'accesso delle navi, e di riflesso la conoscenza più precisa possibile dei fondali ha sempre avuto, per i veneziani, una notevole importanza.

In questo paragrafo viene considerata l'evoluzione delle sezioni dei canali di bocca, in particolare, prendendo in esame le sezioni di "gola" in corrispondenza delle quali si ha la massima velocità delle correnti di marea.

Queste sezioni costituiscono le zone di equilibrio dinamico tra la sedimentazione dei materiali trasportati dalle onde e dalle correnti marine e l'erosione indotta dalle correnti di marea.

L'identificazione delle sezioni di gola è delicata, e a volte problematica, soltanto nelle configurazioni precedenti la costruzione dei moli: dopo di essa, le sezioni di gola sono, in pratica, coin-

cidenti con quelle situate tra i due moli, nei tratti dove essi sono tra loro paralleli.

5.2.1. Le sezioni della bocca di Lido

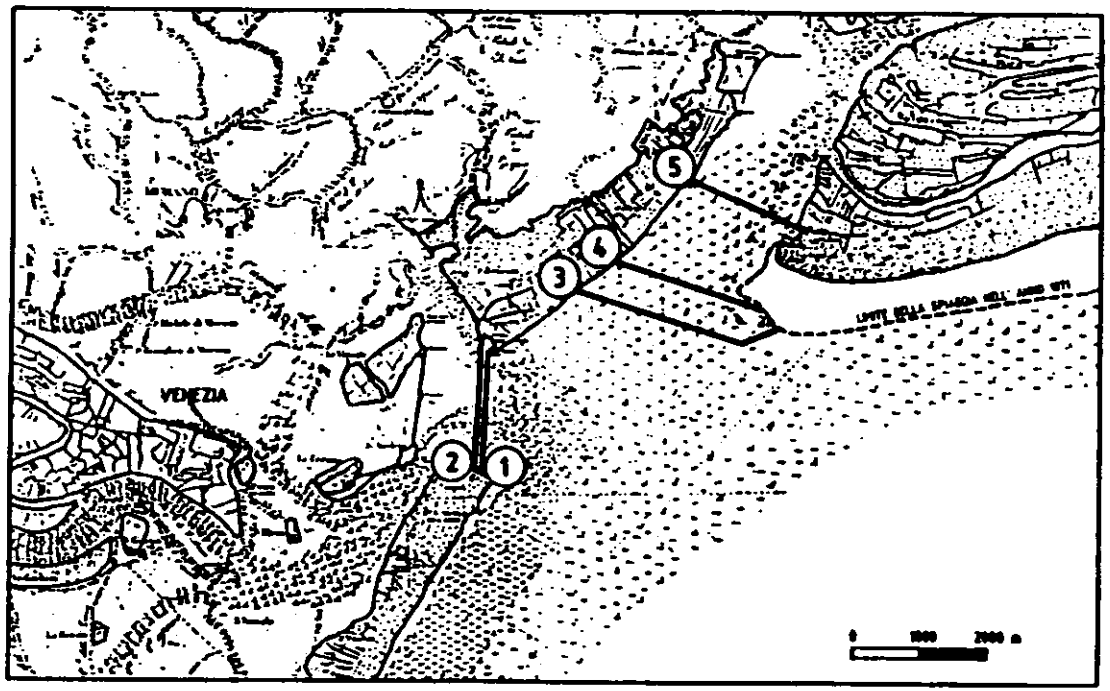
Per Lido, le sezioni che rappresentano le condizioni esistenti prima della costruzione delle dighe sono ubicate in corrispondenza della gola di ciascuno dei due canali originari. L'ubicazione delle sezioni e l'andamento delle stesse sono indicate nelle figure dalla 5.17 alla 5.24, dove viene descritta la situazione prima e dopo la costruzione delle dighe.

L'analisi è stata completata prendendo in considerazione anche un certo numero di sezioni dei canali adiacenti alle bocche, al fine di mettere in evidenza in che modo anch'essi abbiano risentito della costruzione delle armature. La sintesi delle variazioni delle sezioni, sia nella sezione di gola che in quelle più interne, è riportata nel grafico della fig. 5.25.

L'andamento della sezione nel tempo può essere motivato con riferimento a semplici considerazioni teoriche, esposte in dettaglio nel volume 5 e così riassumibili:

- l'area delle sezioni di bocca è strettamente correlata ai volumi di marea entranti;
- tali volumi sono direttamente influenzati, in più o in meno, dall'aumento o dalla riduzione delle superfici di espansione della marea, con effetto però sempre meno sensibile man mano che tale variazione avviene in zone più distanti dalle bocche;
- tali volumi aumentano con l'escavo dei canali artificiali e lo approfondimento dei fondali;
- l'area delle sezioni di bocca è inversamente correlata, infine, con l'entità del trasporto solido.

Queste considerazioni sono sufficienti a giustificare l'evoluzione sperimentale delle sezioni.



BOCCA DI LIDO			
ANNO	SEZIONI MINIME PRIMA DEI MOLI (m^2)		
	S. NICOLO'	TREPORTI	TOTALI
1910	3700	2300	6000
1971	3800	2400	6200
NOTA: I VALORI SOTTOLINEATI SONO QUELLI PRESI A RIFERIMENTO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE			

Fig. 5.17 — LIDO
UBICAZIONE ED AREE DELLE SEZIONI DI CONFRONTO PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI

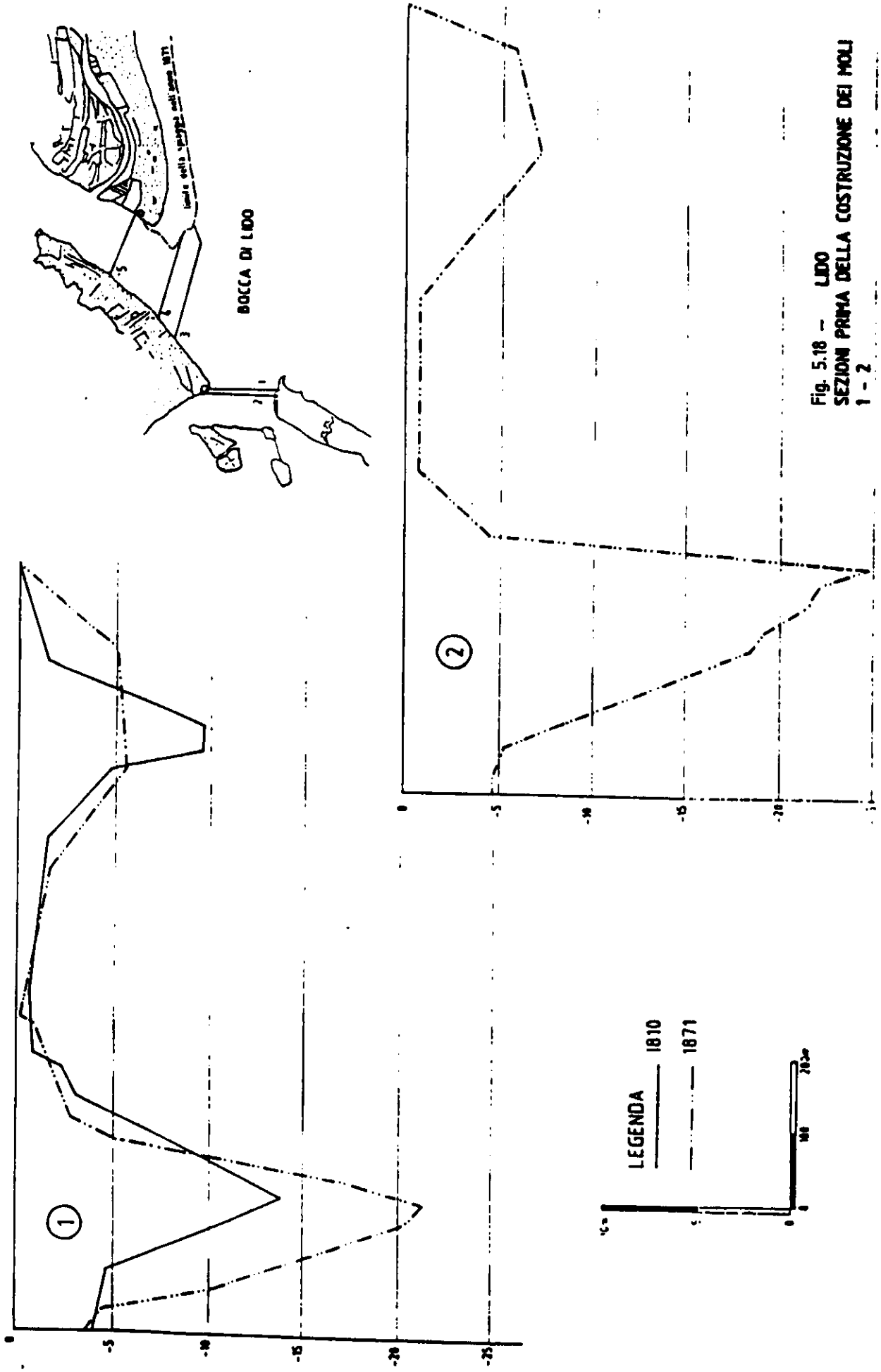
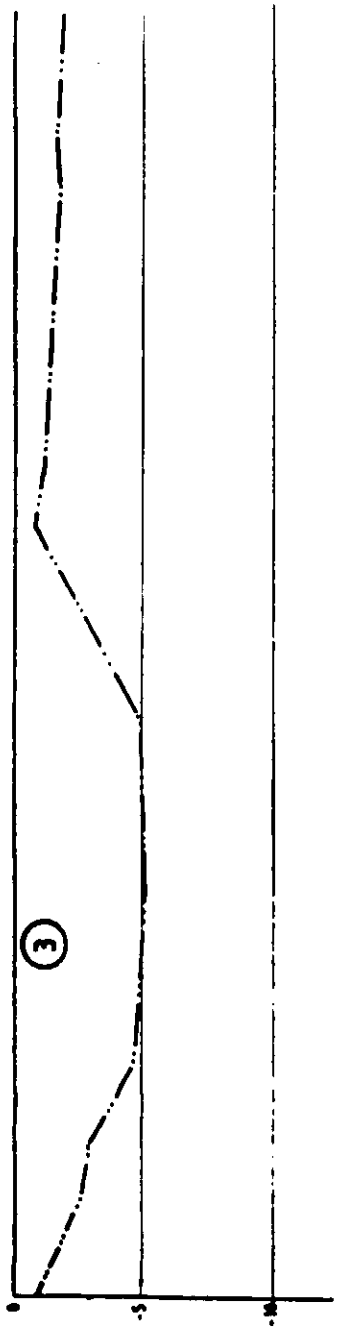
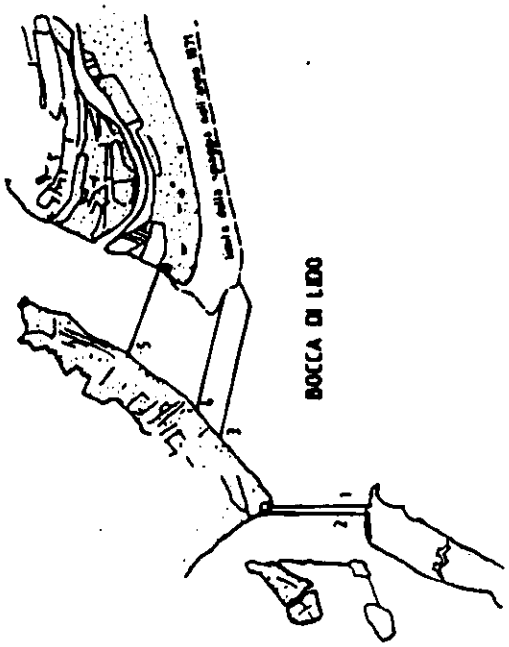
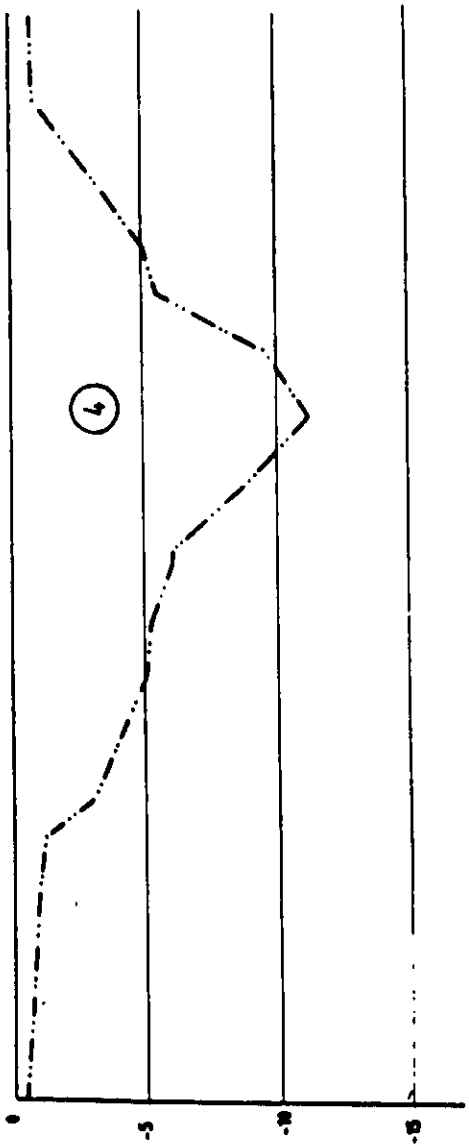


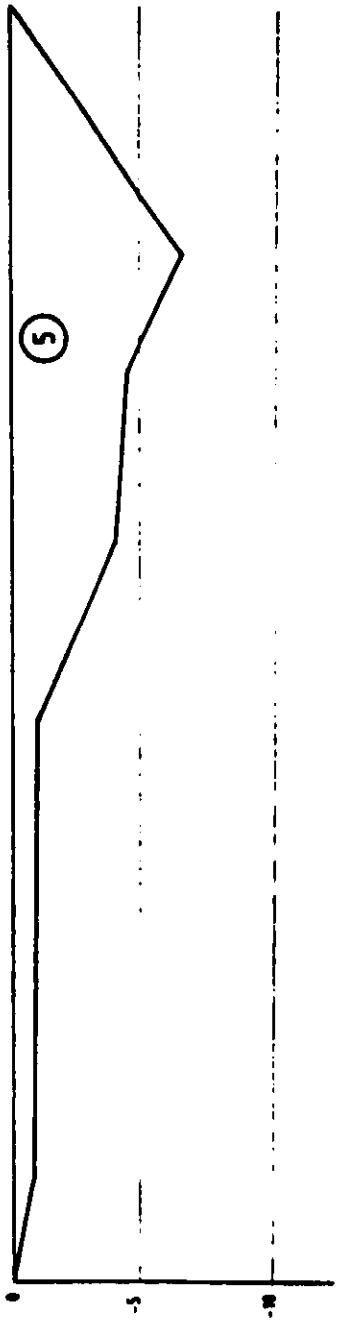
Fig. 5.18 – LIDO
SEZIONI PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI
1 - 2

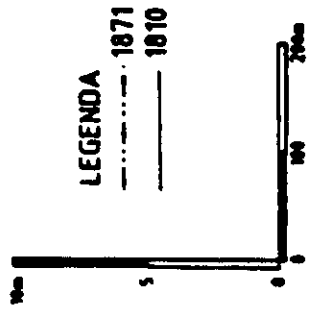
Fig. 5.19 - LIDO
SEZIONI PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI
3 - 4 - 5

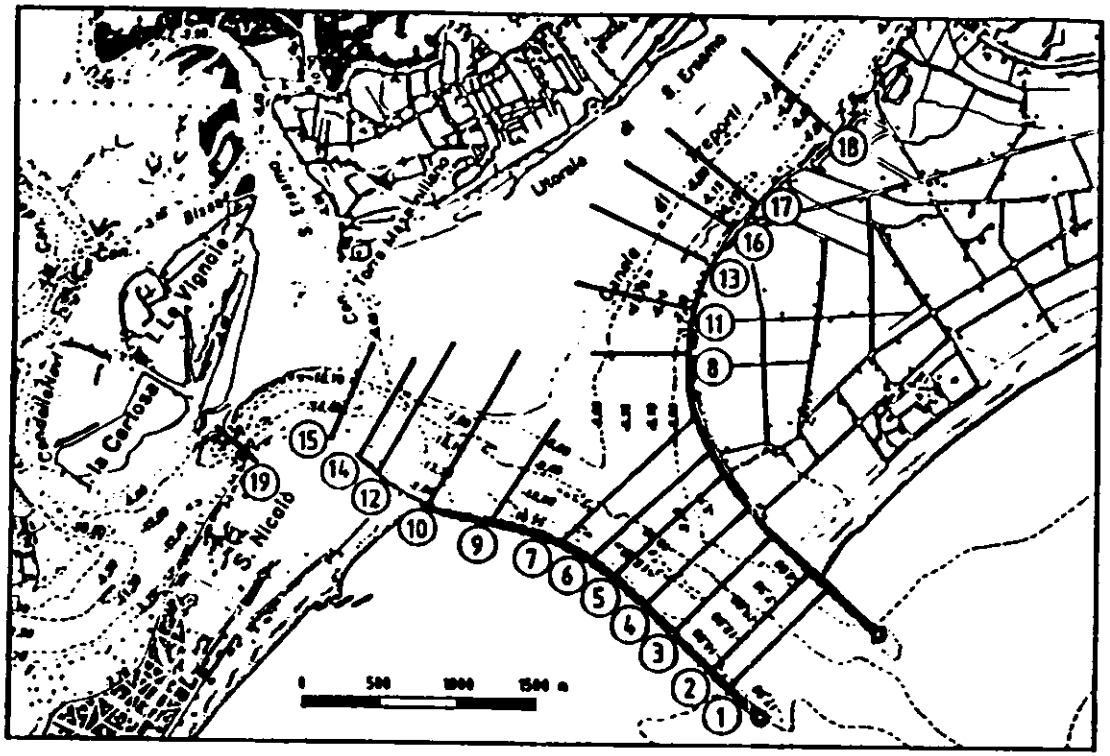












BOCCA DI LIDO							
ANNI	SEZIONI TRA I MOLI (m^2)						
	1	2	3	4	5	6	MEDIA
1871							2470 (2)
1882							2110 (3)
1887							2024 (3)
1892							4205 (3)
1901	4840	4960	5035	5130	5100	4505	4928
1913	6450	6350	6000	6250	6500	6500	6375
1930	7000	7200	7300	7500	7600	7200	7300
1970	8300	8500	8100	8000	8100	8400	8233
1984	8100	8300	7600	7700	7800	8000	7916
1989	7970	8040	7840	8020	7960	8400	8040

NOTE: I VALORI SOTTOLINEATI SONO QUELLI PRESI A RIFERIMENTO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE
(2) SEZIONE TEORICA NELL' IPOTESI DI POSIZIONARE I MOLI SUL FONDALE PREESISTENTE ALLA LORO COSTRUZIONE
(3) SEZIONE TRA I MOLI DURANTE LA LORO COSTRUZIONE

Fig. 5.20 – LIDO
UBICAZIONE ED AREE DELLE SEZIONI DI CONFRONTO DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI

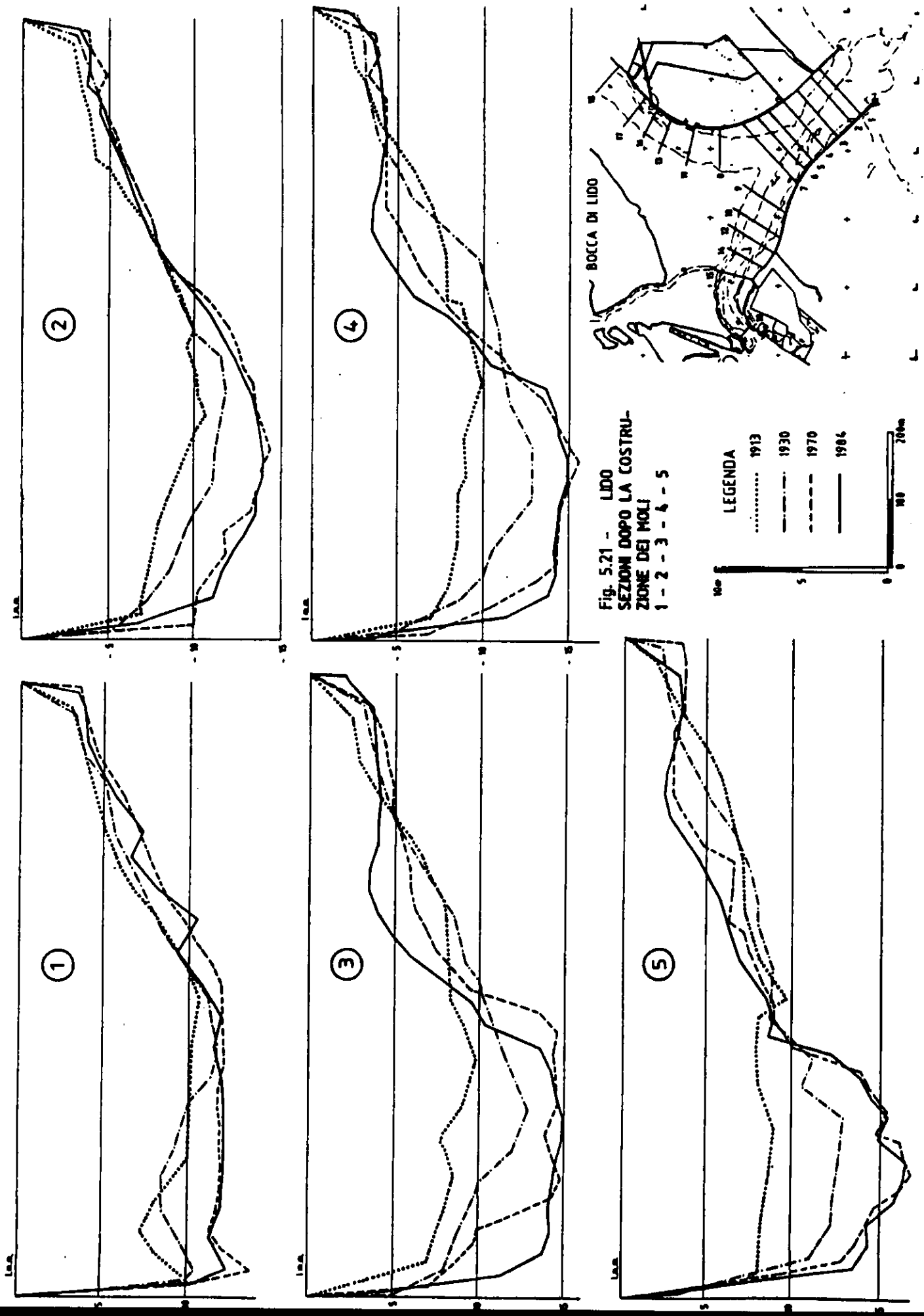


Fig. 5.21 - LIDO
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
1 - 2 - 3 - 4 - 5

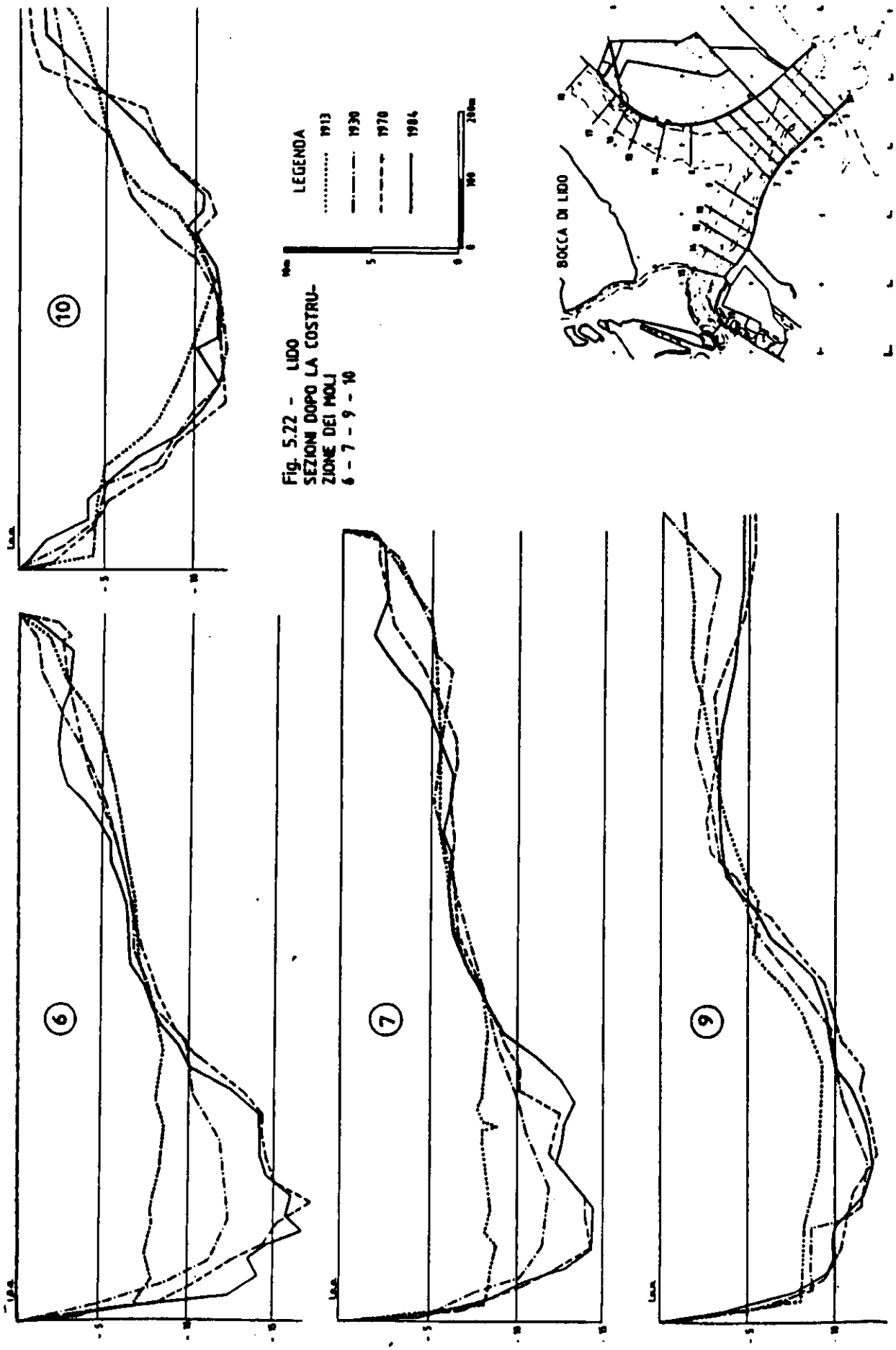
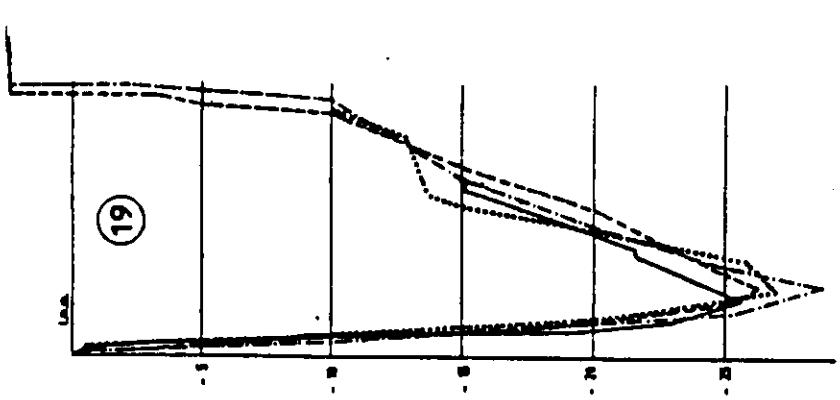
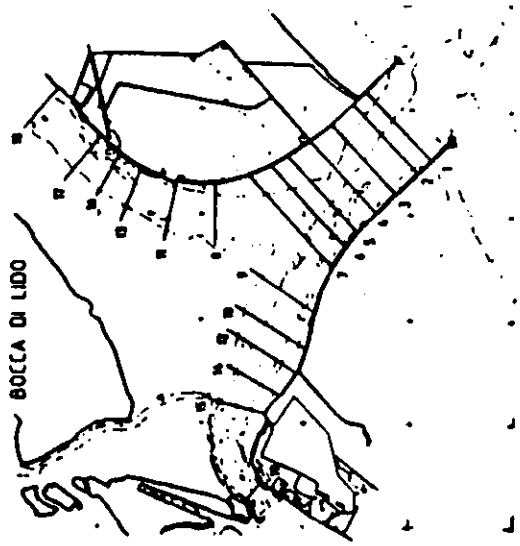


Fig. 5.22 - LIDO
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
6 - 7 - 9 - 10





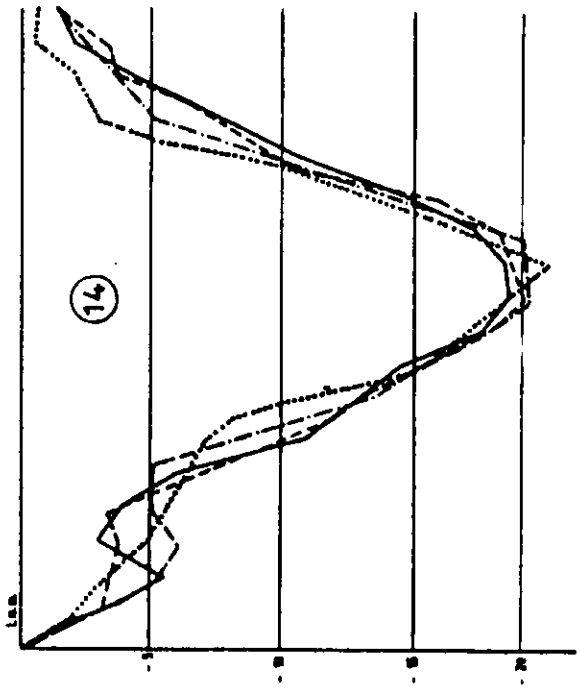
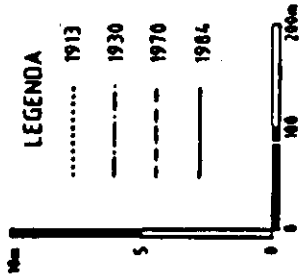
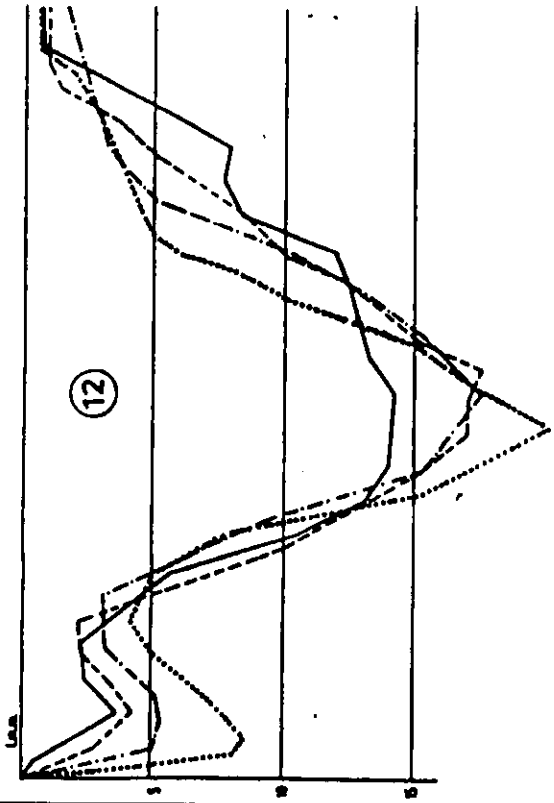
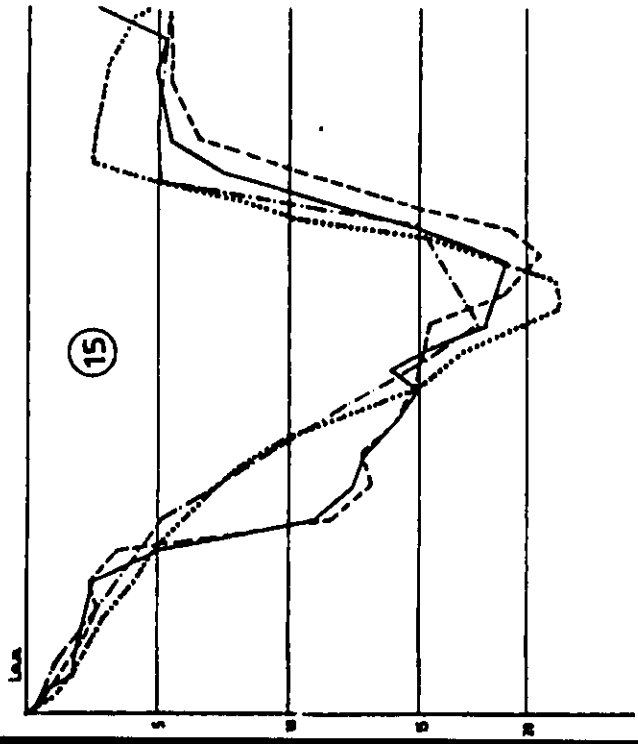


Fig. 5.23 - LIDO
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
12 - 14 - 15 - 19







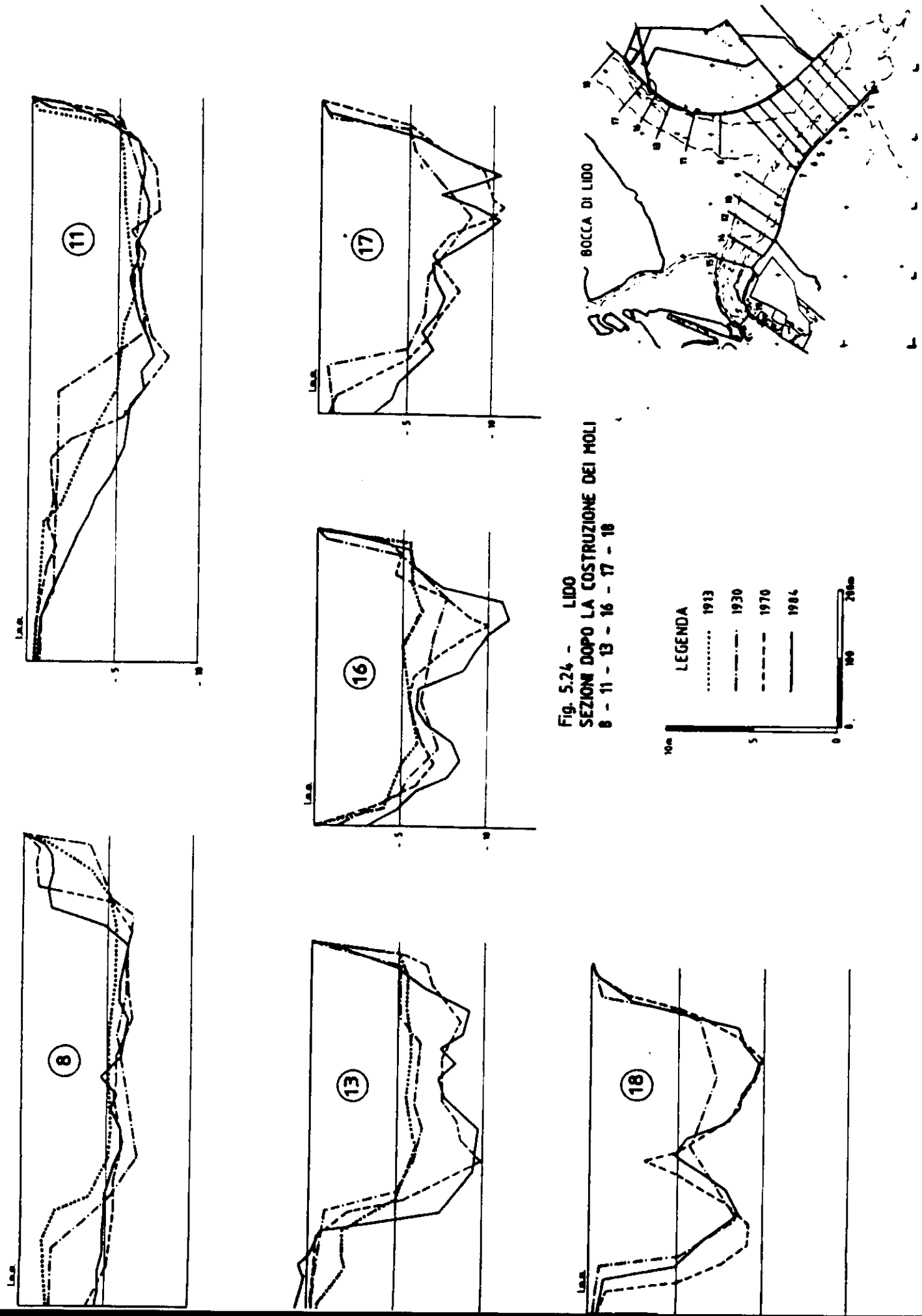
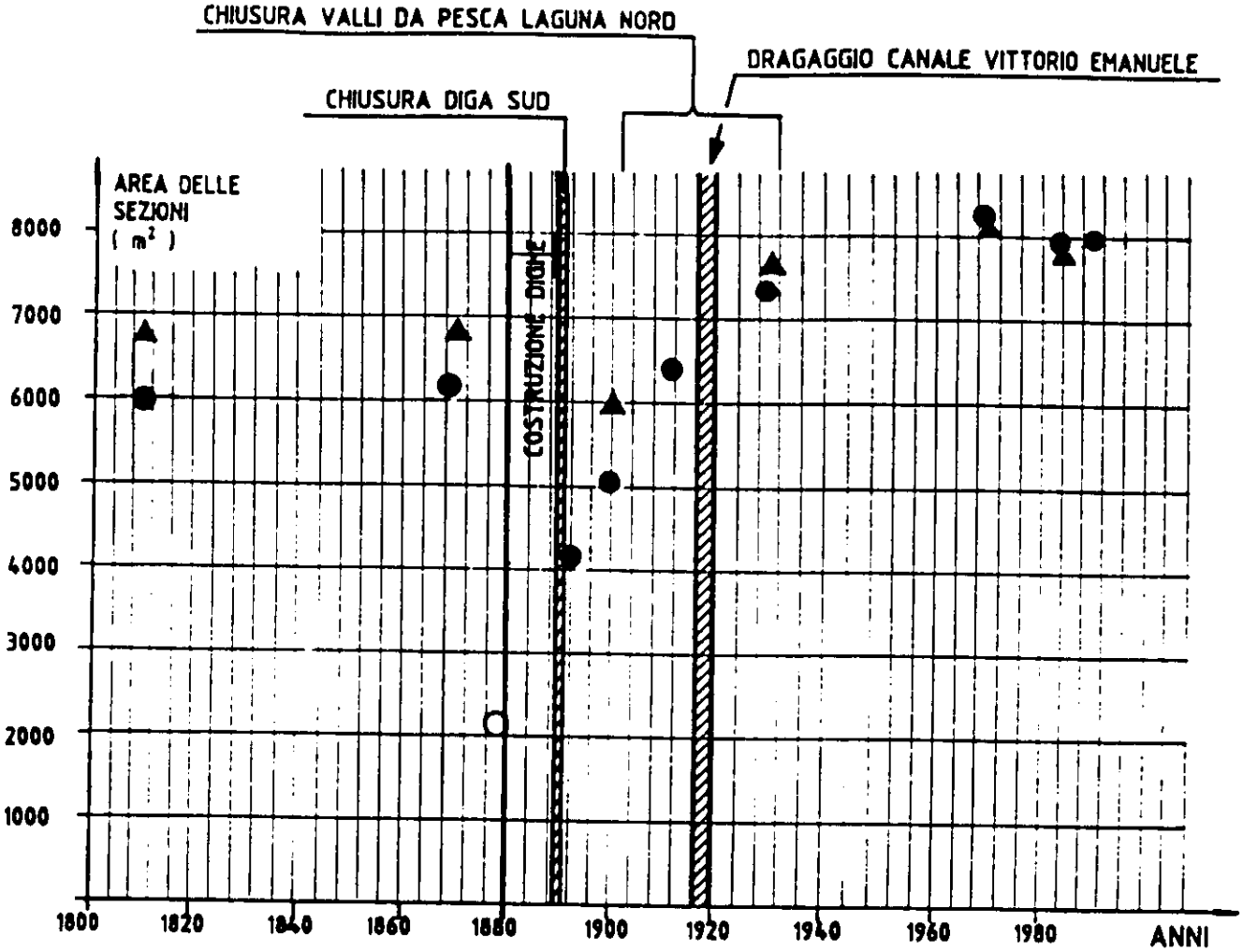


Fig. 5.24 - LIDO
SEZIONE DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
8 - 11 - 13 - 16 - 17 - 18



LEGENDA		
SEZIONE MINIMA DELLA BOCCA	●	SEZIONE EFFETTIVA
	○	SEZIONE TRA I MOLI CON I FONDALI PREESISTENTI ALLA LORO COSTRUZIONE
SEZIONE DEI CANALI AFFERENTI	▲	SEZIONE TOTALE DEI CANALI PRIMA E DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI

Fig. 5.25 - BOCCA DI LIDO
ANDAMENTO NEL TEMPO DELLE SEZIONI DELLA BOCCA E DEI CANALI AFFERENTI

Nel periodo 1800-1871 le condizioni al contorno rimangono sostanzialmente invariate, e la sezione di gola della bocca di Lido non subisce modifiche significative. I rilievi effettuati durante la costruzione delle nuove dighe (58) 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 circa il 30% rispetto alla sezione precedente alla costruzione dei moli.

Facendo riferimento alle relazioni sopra citate, l'incremento è spiegabile con l'aumento del volume di marea entrante in laguna (a causa del dragaggio del canale Vittorio Emanuele e dell'abbassamento del suolo per subsidenza) e con la riduzione del trasporto solido prima e dopo la costruzione dei moli.

Dall'analisi dei dati sperimentali del periodo 1970-1984 si osserva una riduzione media della sezione di circa il 4%, sia nella bocca che nel complesso dei canali lagunari adiacenti. La tendenza alla riduzione permane, seppur meno accentuata, anche valutando il periodo fino all'ultimo rilievo del 1989 (nel periodo 1970-89 è poco inferiore al 3%). Tale riduzione è spiegabile in base alla ripresa dell'influenza del trasporto litoraneo e alla riduzione del volume di marea causato dall'escavo del canale Petroli.

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 della conseguente 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 solido sulle sezioni della bocca nel periodo prima dei moli.

Il confronto dei due rilievi 1970 e 1989 è stato elaborato, infine, anche su base planimetrica, individuando spazialmente le zone caratterizzate dai diversi trends evolutivi: questa informazione è riportata sulla carta della fig. 5.26.

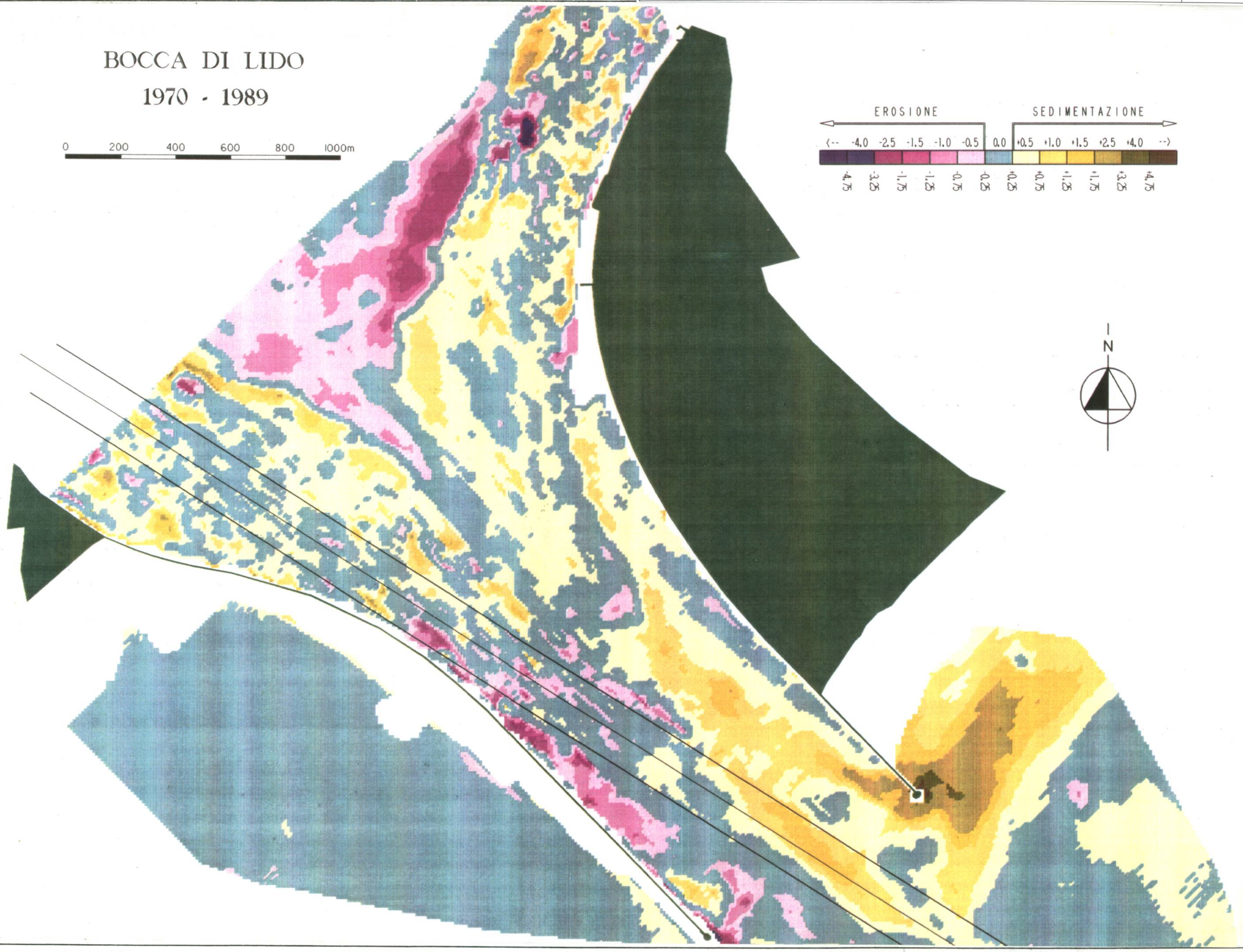
Si osserva la tendenza alla sedimentazione del "braccio" di Treporti, soprattutto in prossimità dell'imboccatura: l'entità crescente del trasporto litoraneo, che interessa il canale di bocca, scavalcando il molo nord di Lido, contribuisce a spostare il transito delle correnti (e quindi, nel tempo, l'asse delle sezioni della bocca) verso il molo sud.

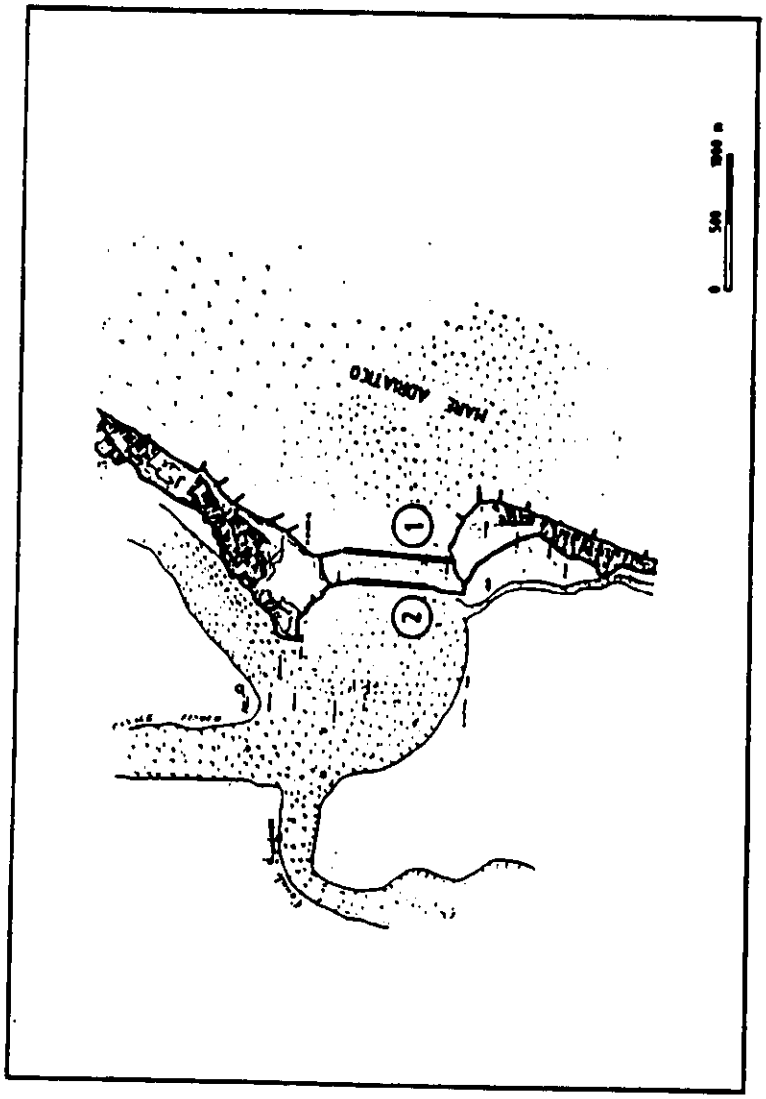
5.2.2. Le sezioni della bocca di Malamocco

Per questa bocca le informazioni attendibili sulla situazione prima della costruzione delle dighe foranee si basano sull'unico rilievo disponibile, che risale al 1810, e comprende sia le sezioni di bocca che quelle dei canali che allora vi convergevano.

In fig. 5.27 sono indicate l'ubicazione delle sezioni rappresentative della bocca a quell'epoca e le dimensioni delle stesse; l'andamento delle sezioni è rappresentato nella fig. 5.28. Le figure dalla 5.29 alla 5.31 illustrano lo stesso tipo di informazioni, relative questa volta al periodo successivo alla costruzione dei moli foranei e valide per tutto il canale di bocca (59).

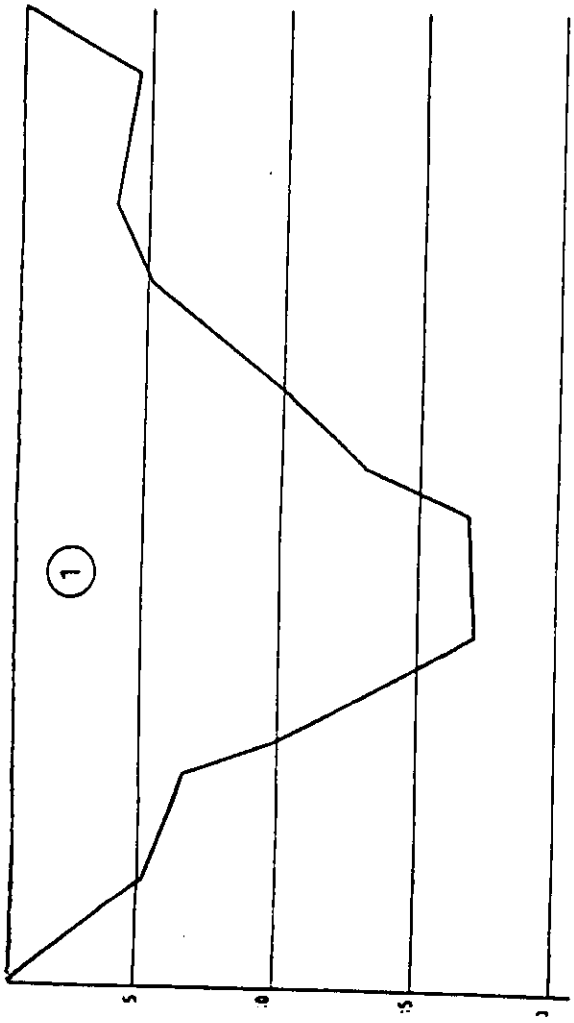
Fig. 5.26 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE MODIFICHE DEI FONDALI ALLA BOCCA DI LIDO

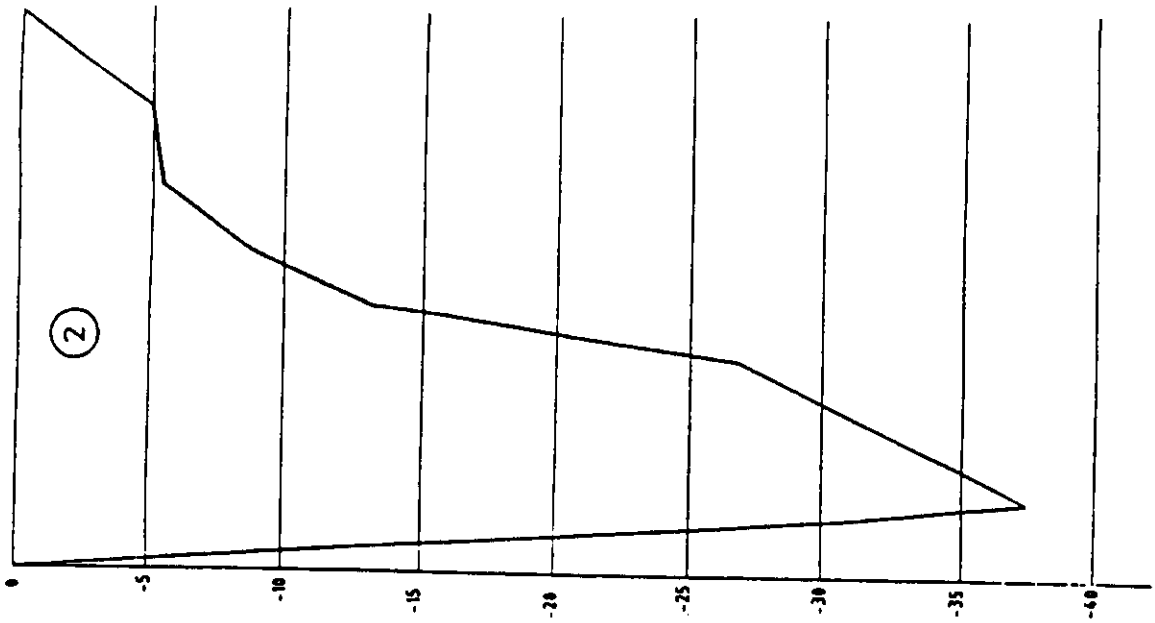


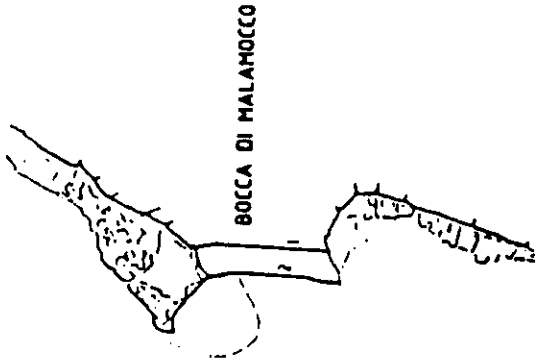


BOCCA DI MALAMOCCO		
ANNO	SEZIONE MINIMA ALLA BOCCA (m^2)	SEZIONE TEORICA VALUTATA TRA I MOLI PRIMA DELLA LORO COSTRUZIONE (m^2)
1810	6550	

Fig. 5.27 - MALAMOCCO
UBICAZIONE ED AREE DELLE SEZIONI DI CONFRONTO PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI







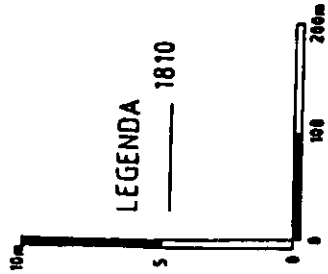
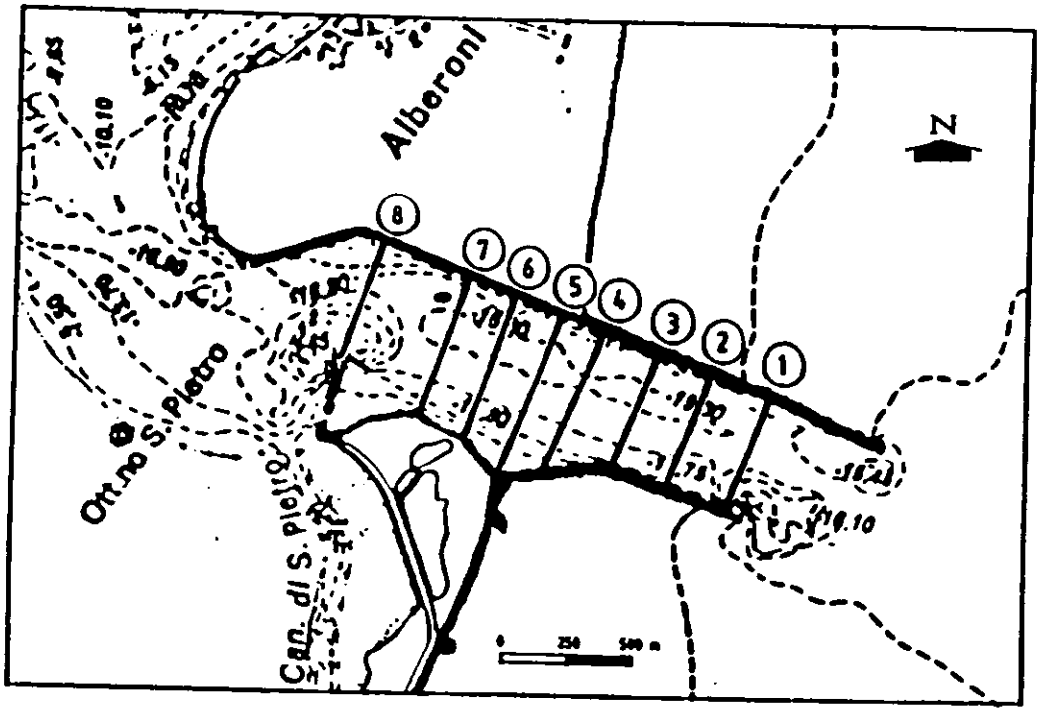


Fig. 5.28 - MALAMOCCO
SEZIONI PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI
1 - 2

PLANIMETRIA



BOCCA DI MALAMOCCO							
ANNI	SEZIONI TRA I MOLI (m^2)						
	1	2	3	4	5	6	MEDIA
1860							4200 (1)
1901		4580	4770	4994	4941	5297	4916
1915	6700	5000	4800	5500	5500	5700	5300
1930	7200	5100	5100	5400	5600	6500	5540
1970	8800	6700	6900	7300	7000	7200	7020
1984	9300	6900	7000	7500	7500	7700	7320
1989	9080	6920	6960	7450	7560	7670	7310

NOTE: I VALORI SOTTOLINEATI SONO STATI PRESI A RIFERIMENTO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI
(1) SEZIONE TRA I MOLI DURANTE LA COSTRUZIONE

Fig. 5.29 - MALAMOCCO
UBICAZIONE ED AREE DELLE SEZIONI DI CONFRONTO DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI

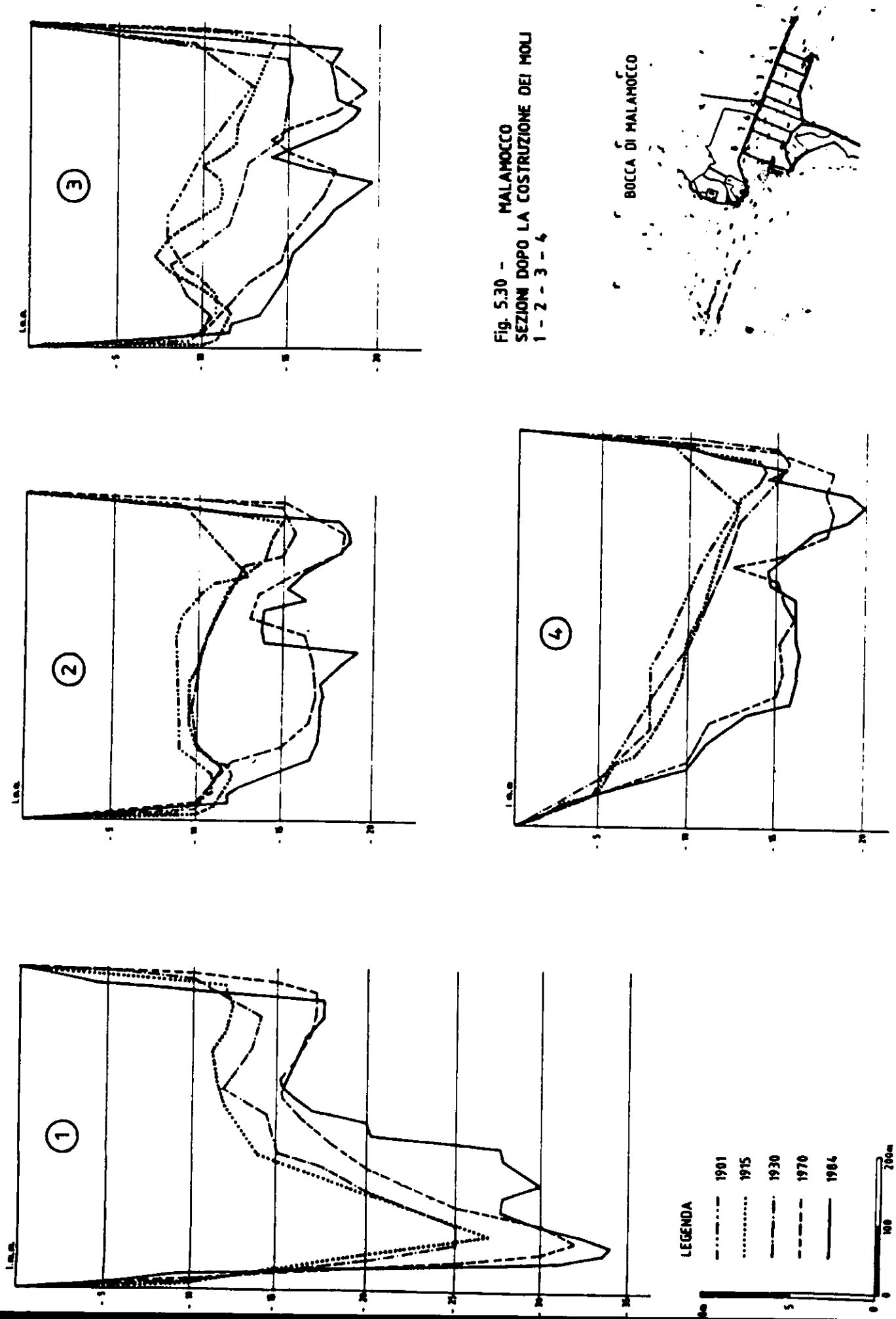


Fig. 5.30 - MALAMOCCO
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
1 - 2 - 3 - 4

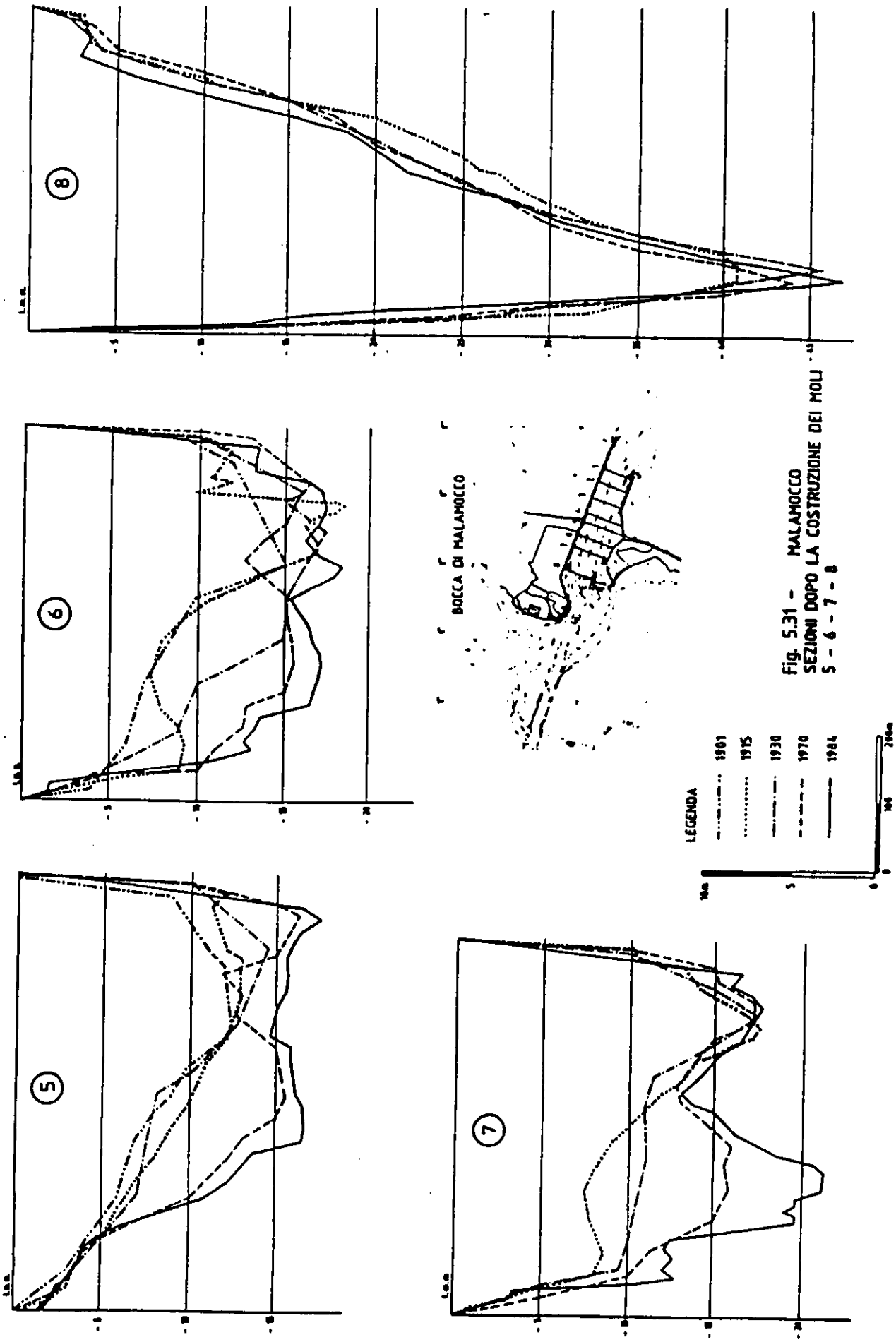


Fig. 5.31 - MALAMOCCO
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
5 - 6 - 7 - 8

Le aree delle sezioni sono diagrammate in funzione del tempo nella fig. 5.32, dove sono stati indicati anche i periodi in cui nel bacino di Malamocco sono stati eseguiti alcuni dei principali interventi.

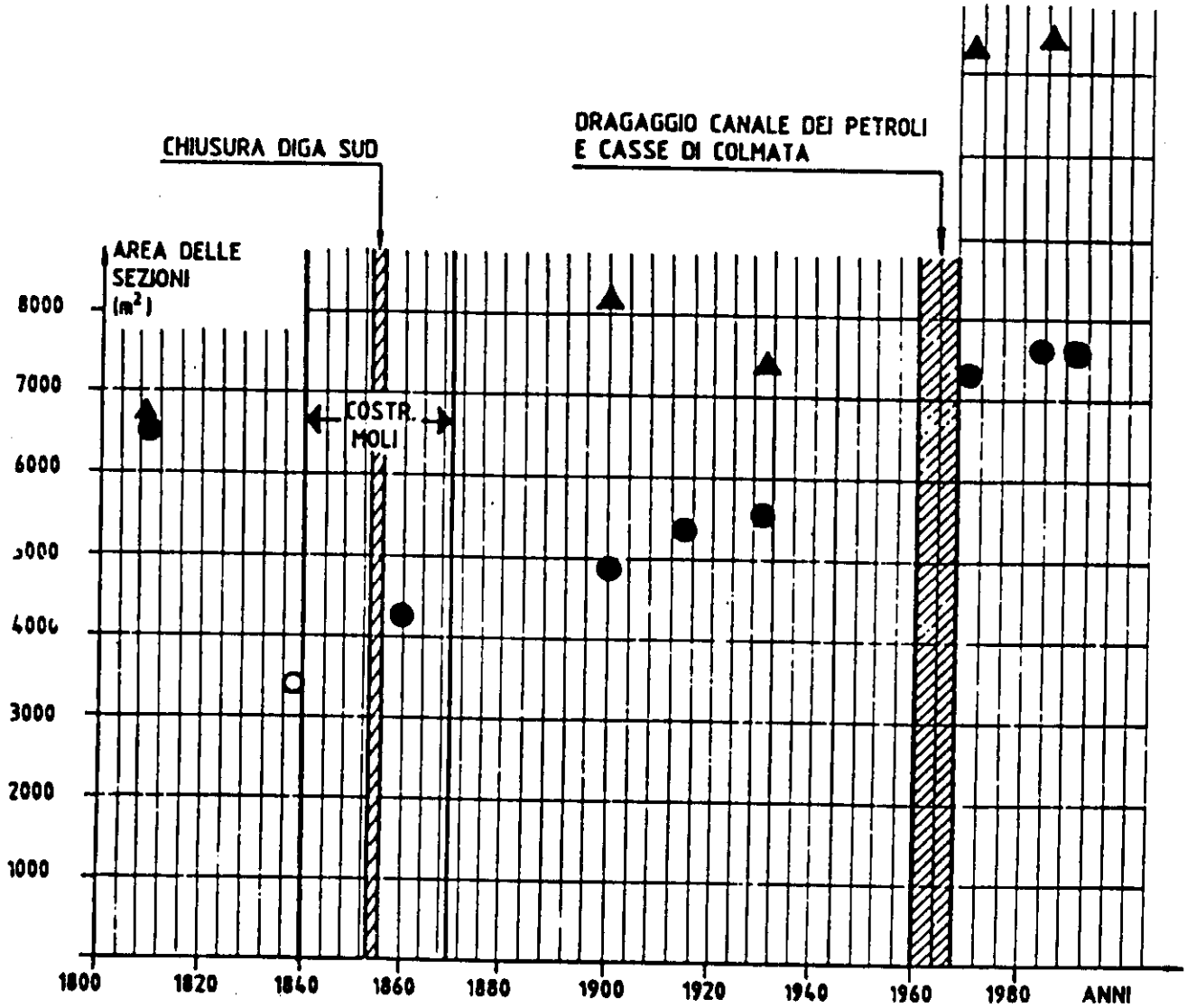
L'andamento nel tempo delle sezioni prese a riferimento è dovuto in gran parte ai continui interventi che, a partire dal 1870, sono stati attuati nel bacino di Malamocco, e alle particolari condizioni geotecniche.

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 non avrebbe dovuto teoricamente essere di molto inferiore rispetto al valore precedente.

Dall'esame dei rilievi risulta invece 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, e cioè dalla presenza di strati argillosi e di caranto, almeno fintanto che questi strati non sono stati rimossi dai lavori di dragaggio per l'apertura del canale Petroli, iniziati nel 1960.

D'altra parte proprio l'escavo del canale ha determinato un incremento dei volumi di marea dopo il 1970, motivando così l'ulteriore incremento delle sezioni nel periodo 1970-85. Nel periodo più recente, 1985-1989, le dimensioni delle sezioni della bocca sono invece pressochè stabili: in totale, l'incremento medio delle sezioni di bocca nei 20 anni 1970-1989 è stato di circa il 4%.

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.



LEGENDA		
SEZIONE MINIMA DELLA BOCCA	●	SEZIONE EFFETTIVA
	○	SEZIONE TRA I MOLI CON I FONDALI PREESISTENTI ALLA LORO COSTRUZIONE
SEZIONE DEI CANALI AFFERENTI	▲	SEZIONE TOTALE DEI CANALI PRIMA E DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI

Fig. 5.32 - BOCCA DI MALAMOCCO
ANDAMENTO NEL TEMPO DELLE
SEZIONI DELLA BOCCA E DEI CANALI AFFERENTI

La fig. 5.33 riporta infine la distribuzione spaziale dei trends evolutivi. Si osserva il concentrarsi dell'erosione nelle zone antistanti il molo sud di Malamocco e il molo delle Ceppe, dovuto probabilmente all'innesco di fenomeni vorticosi.

5.2.3. Le sezioni della bocca di Chioggia

Le informazioni disponibili per lo studio dell'evoluzione della bocca di Chioggia sono rappresentate nelle figg. 5.34÷5.39.
Per analogia con le analisi effettuate per le bocche di Malamocco e di Lido, anche per Chioggia ci si è riferiti alle sezioni di gola della bocca e alle sezioni dei canali interni, sufficientemente vicine alla bocca da essere, nel loro insieme, ancora influenzate dalla bocca.

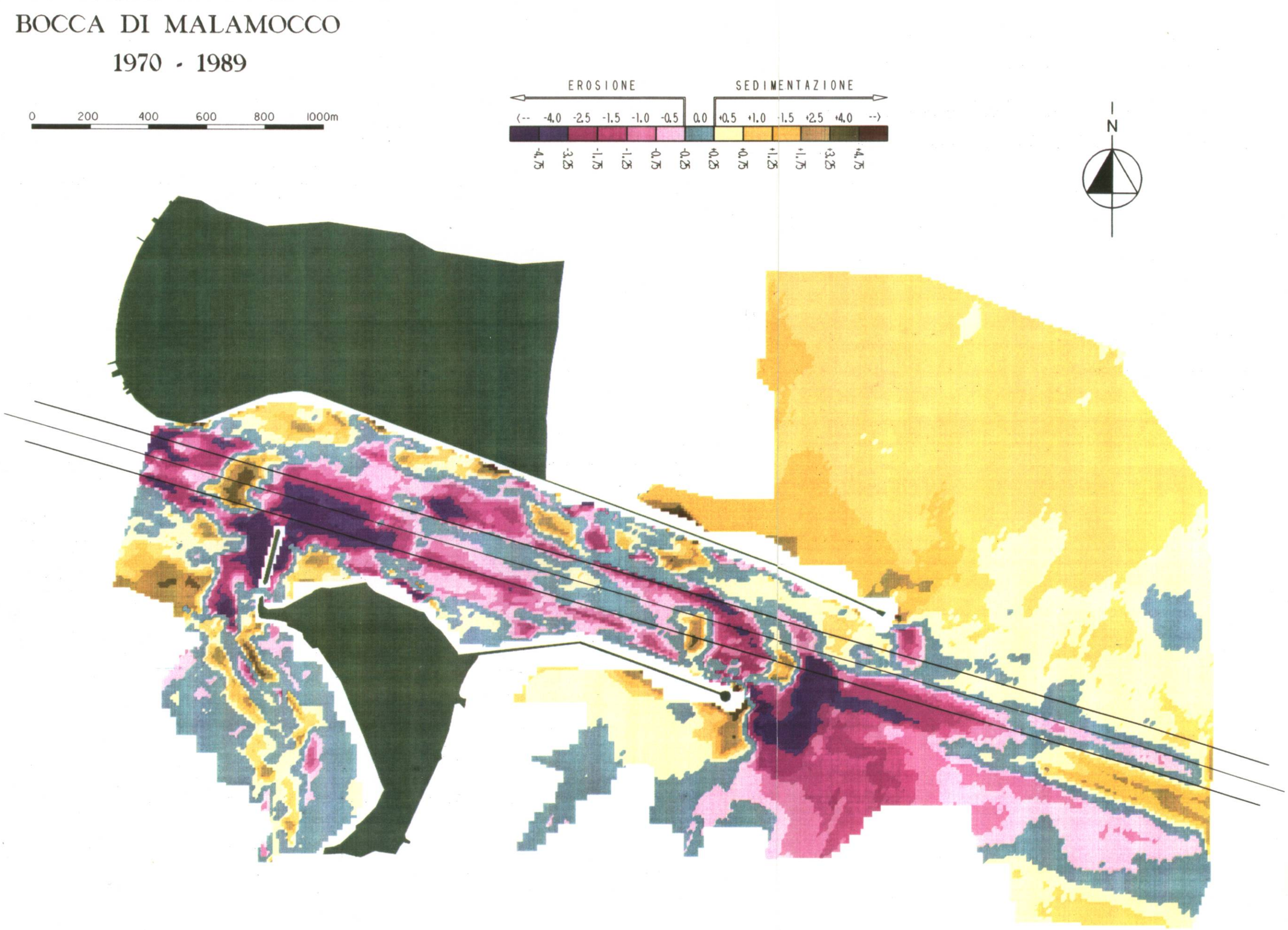
L'andamento delle aree delle sezioni in funzione del tempo è riportato nella figura 5.40, dove sono anche indicati i periodi in cui sono stati realizzati i principali interventi (alle bocche e in laguna) che possono avere influenzato l'evoluzione del canale di bocca. In fig. 5.41 è invece presentata la distribuzione spaziale delle variazioni nel periodo recente.

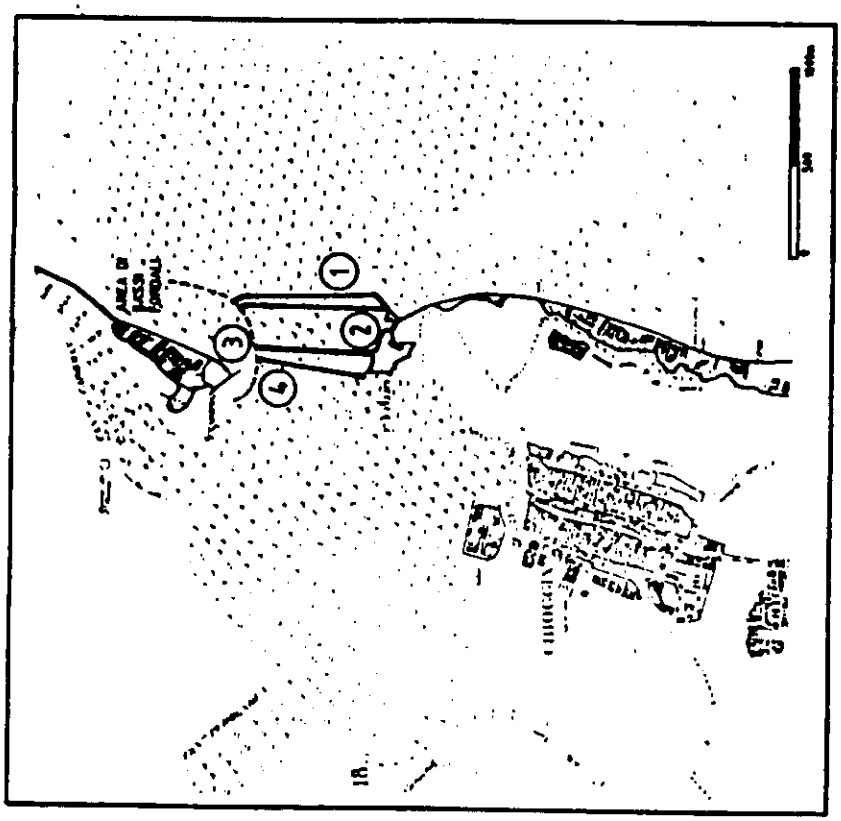
Per il periodo precedente la costruzione dei moli sono disponibili tre rilievi che mettono in evidenza una sostanziale stabilità della bocca, con un'area delle sezioni di gola molto simile a quelle dei canali interni.

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 è una conseguenza degli interventi di bonifica della foce del Brenta (nel periodo 1926-1930) con i quali la superficie del bacino di Chioggia è stata ridotta del 15% circa.

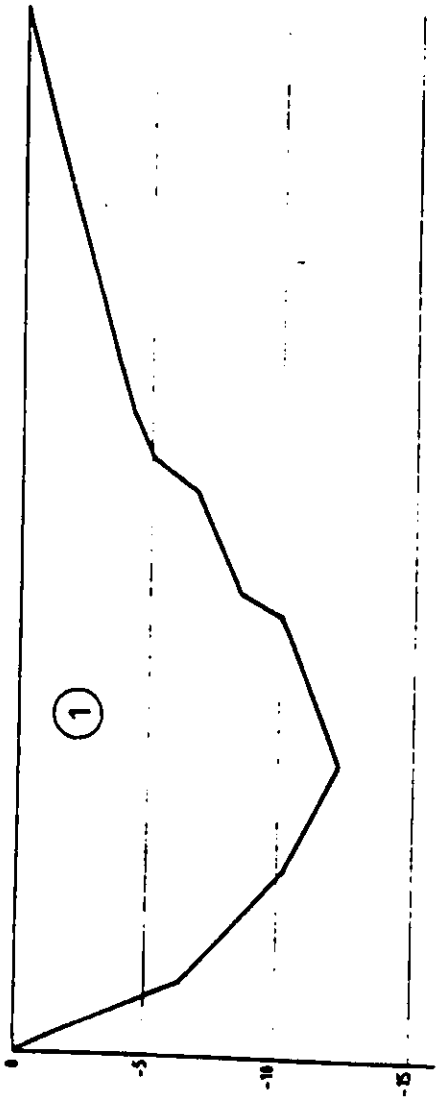
Fig. 5.33 - DISTRIBUZIONE SPAZIALE DELLE MODIFICHE DEI FONDALI ALLA BOCCA DI MALAMOCCO.

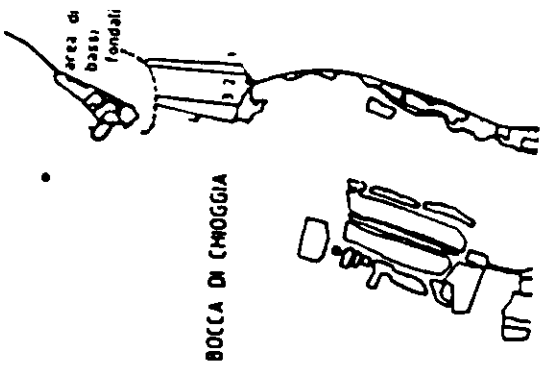


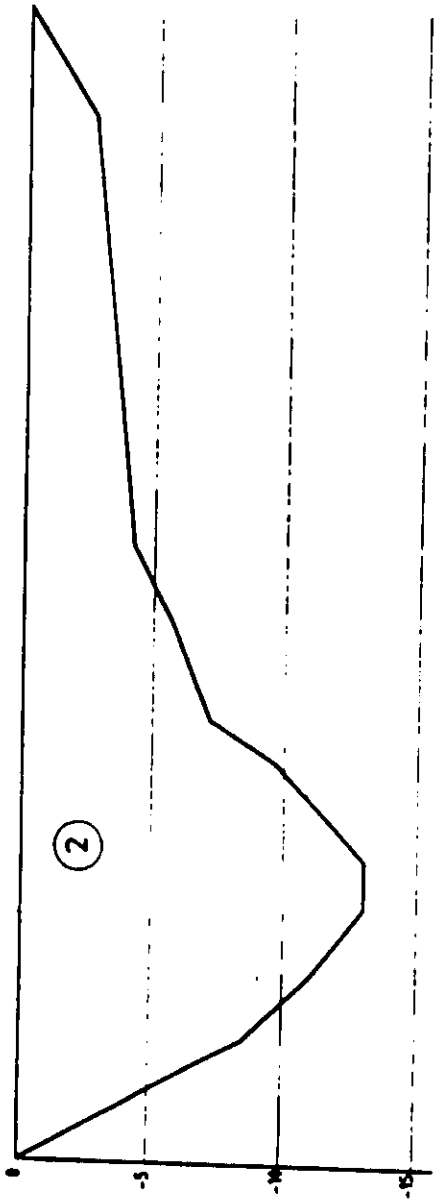


BOCCA DI CHIOGGIA		
ANNI	SEZIONE MINIMA TRA I MOLI (m^2)	SEZIONE TEORICA IN CORRISPONDENZA DELLA LORO COSTRUZIONE (m^2)
1810	5900	
1860	5500	
1901	5200	2600

Fig. 5.34 - CHIOGGIA
UBICAZIONE ED AREE DELLE SEZIONI DI CONFRONTO PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI







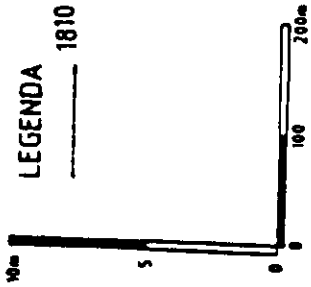
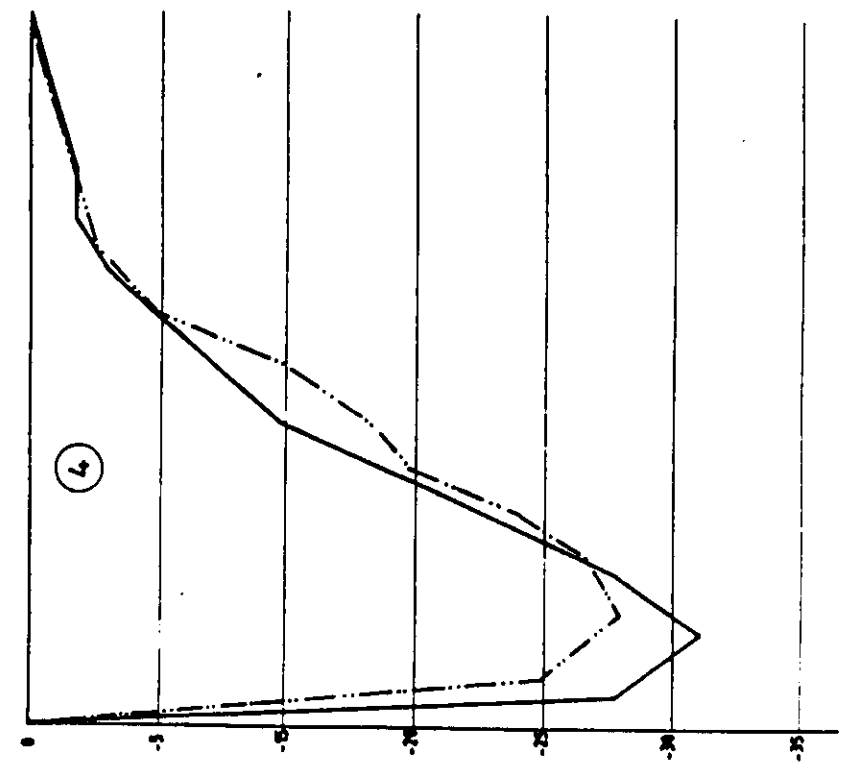
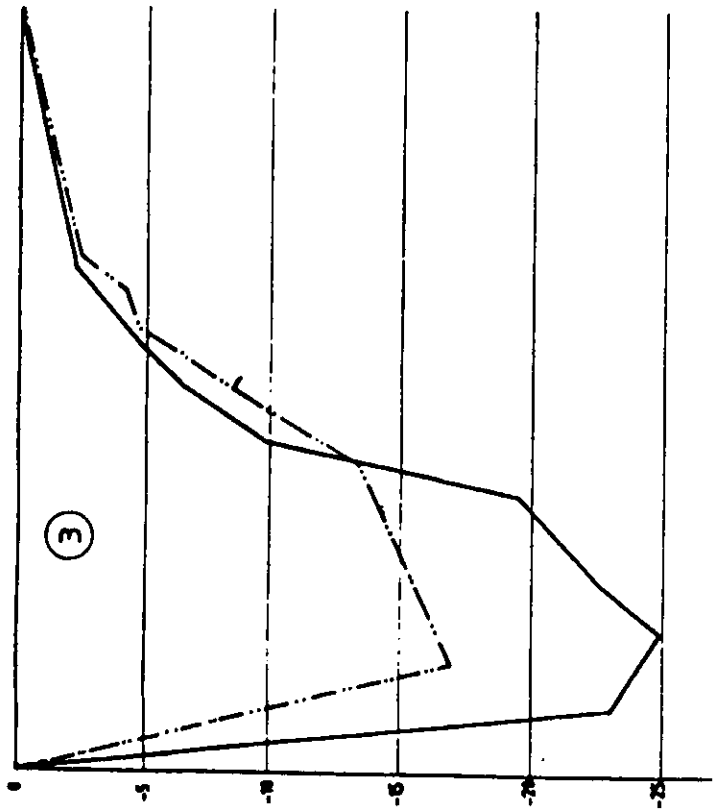
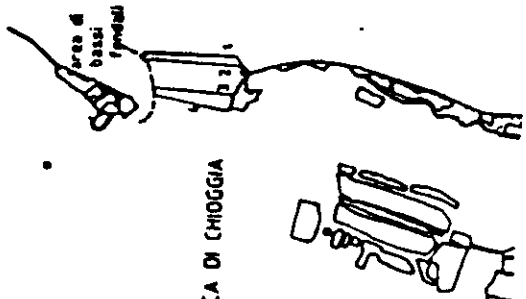


Fig. 5.35 - CHIOGGIA
SEZIONI PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI
1 - 2







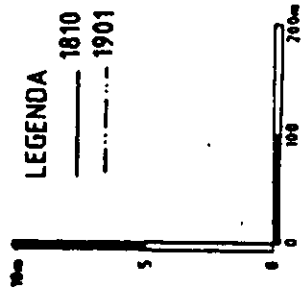
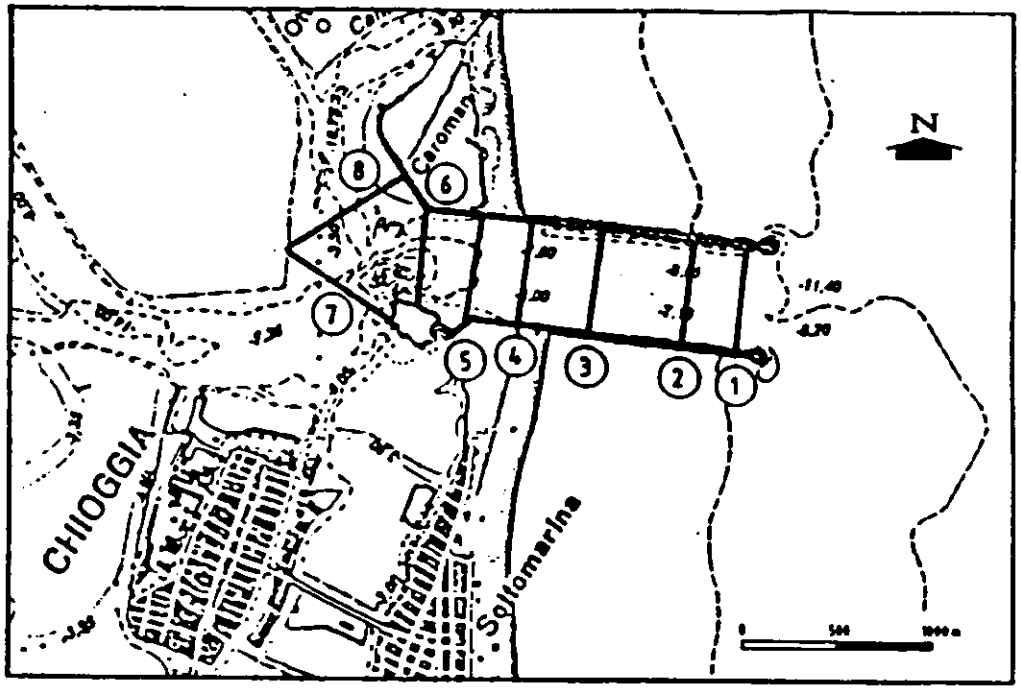


Fig. 5.36 - CHIOGGIA
SEZIONI PRIMA DELLA COSTRUZIONE DEI MOLI
3 - 4

PLANIMETRIA



BOCCA DI CHIOGGIA							
ANNI	SEZIONI TRA I MOLI (m2)						
	1	2	3	4	5	6	MEDIA (1-5)
1914	2600	3000	3300	3700	3700	4800	3260
1930	4300	3900	3400	3500	3600	5100	3740
1970	4200	4300	4200	4500	4600	6100	4360
1984	5000	4700	4500	5000	5000	6400	4840
1989	4740	4670	4520	4740	4920	-	4680

NOTE: I VALORI SOTTOLINEATI SONO STATI PRESI A RIFERIMENTO PER LO STUDIO DELL'EVOLUZIONE DEI FONDALI

Fig. 5.37 - CHIOGGIA
UBICAZIONE ED AREE DELLE SEZIONI DI CONFRONTO DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI

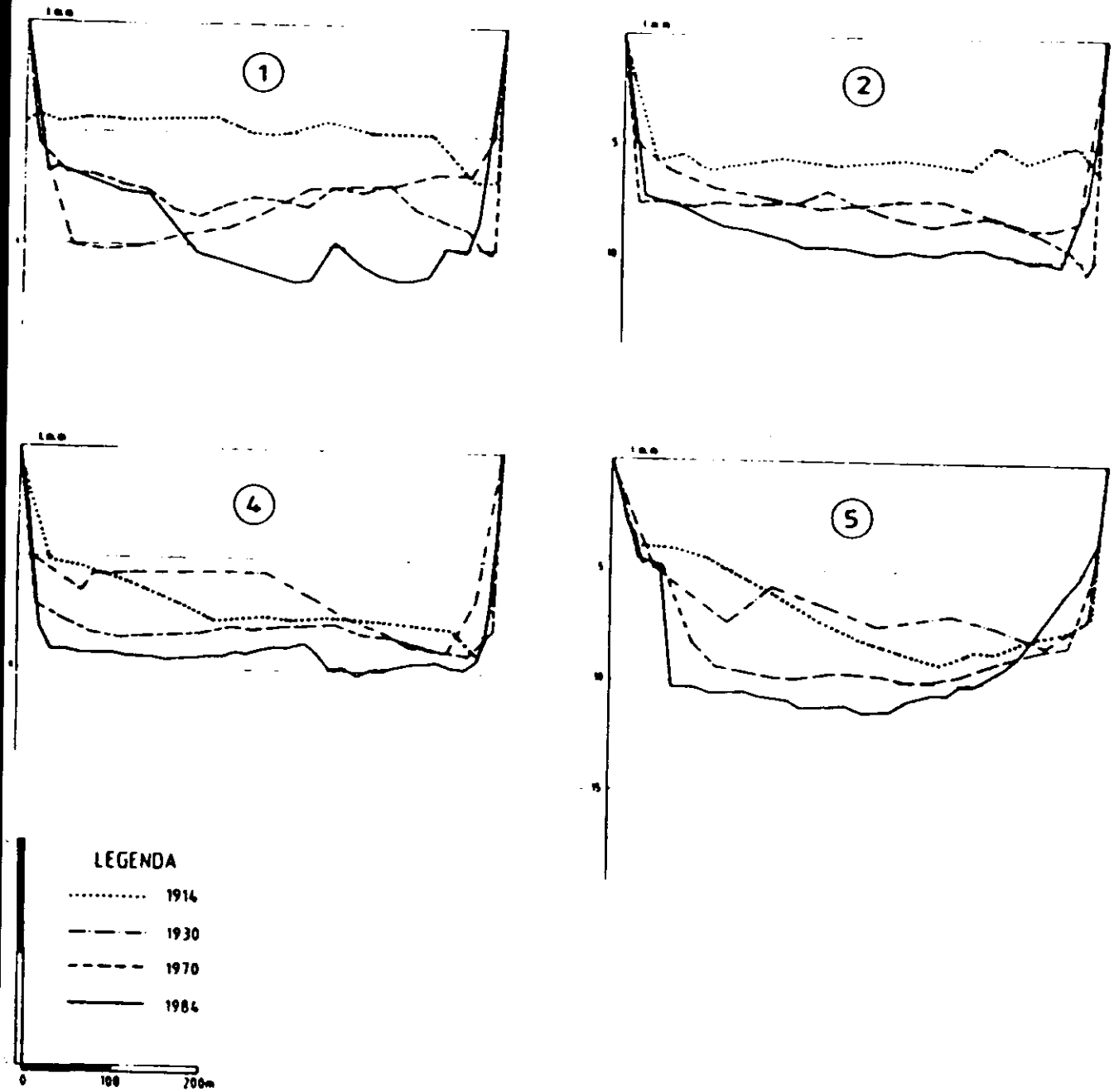


Fig. 5.38 - CHIOGGIA
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
1 - 2 - 3 - 4 - 5

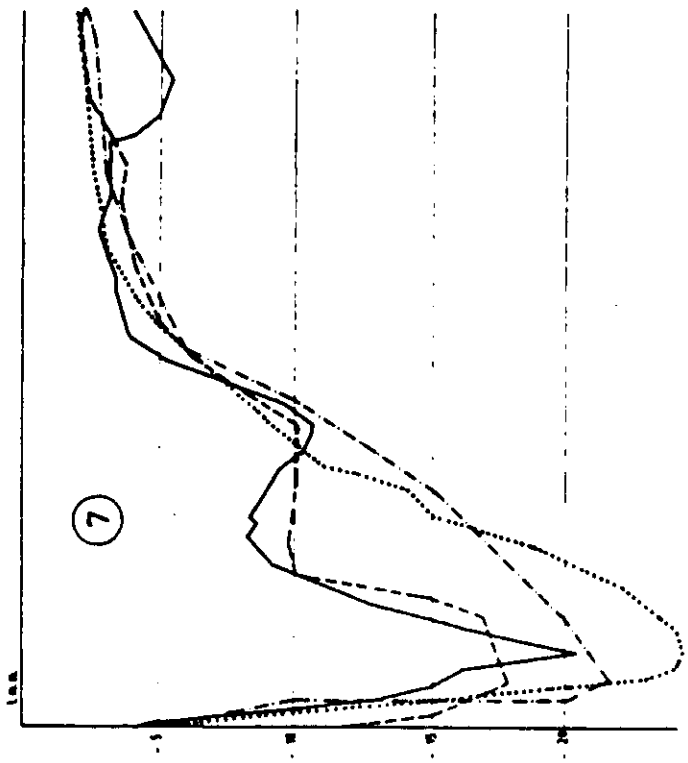
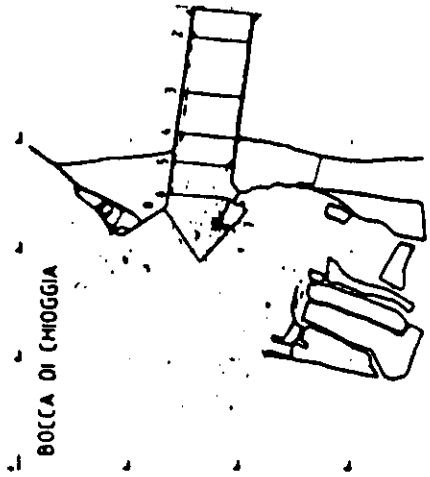
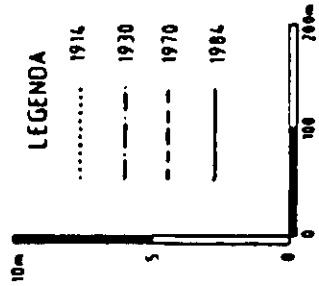
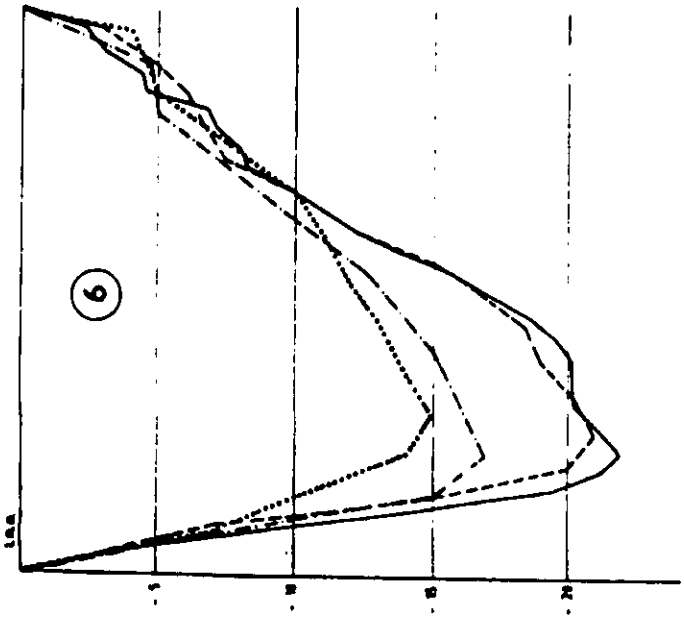
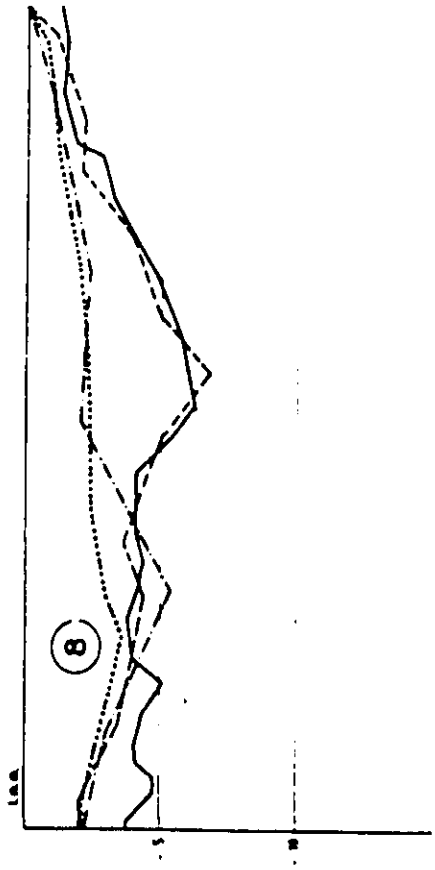


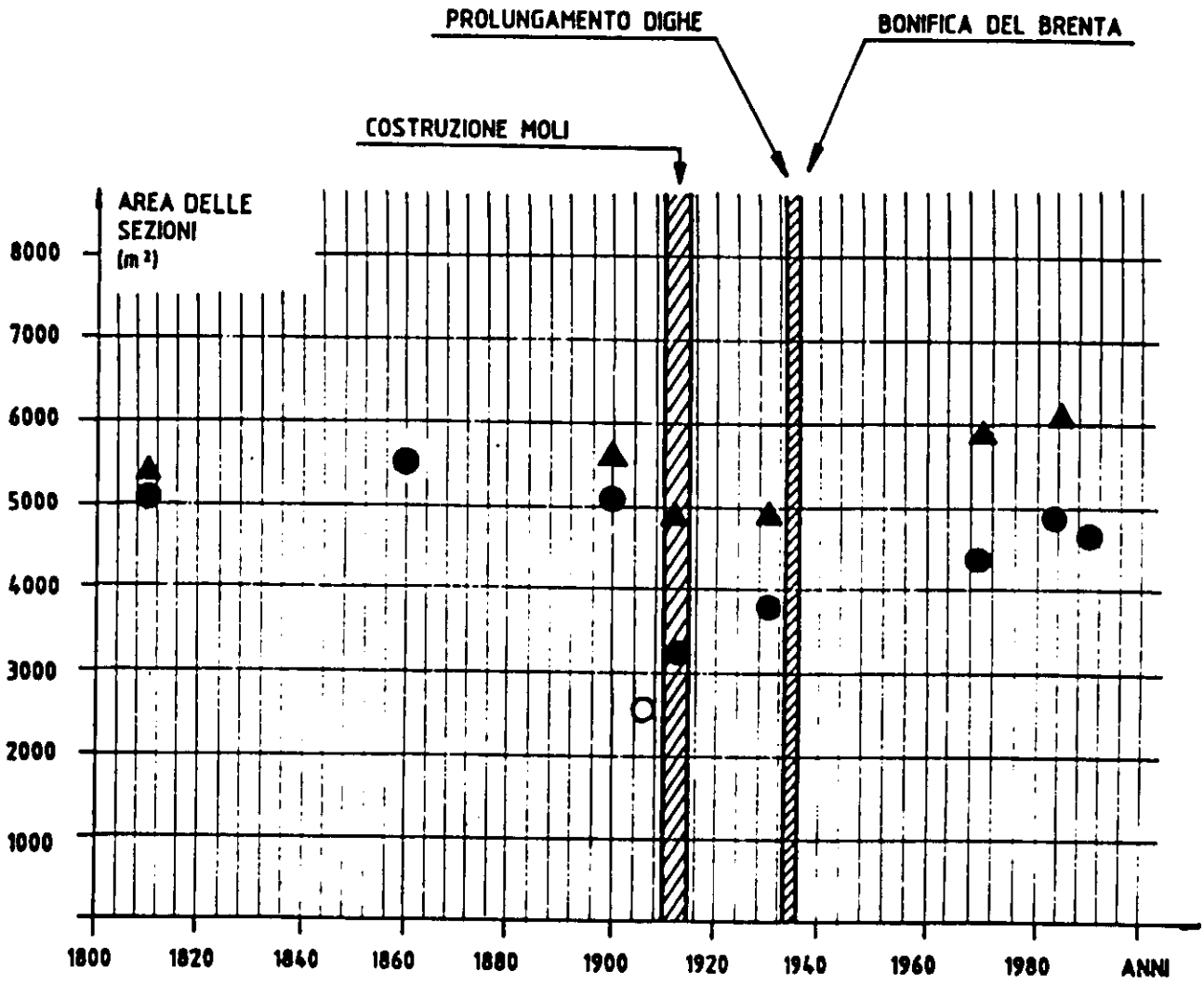
Fig. 5.39 - CHIOGGIA
SEZIONI DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI
6 - 7 - 8





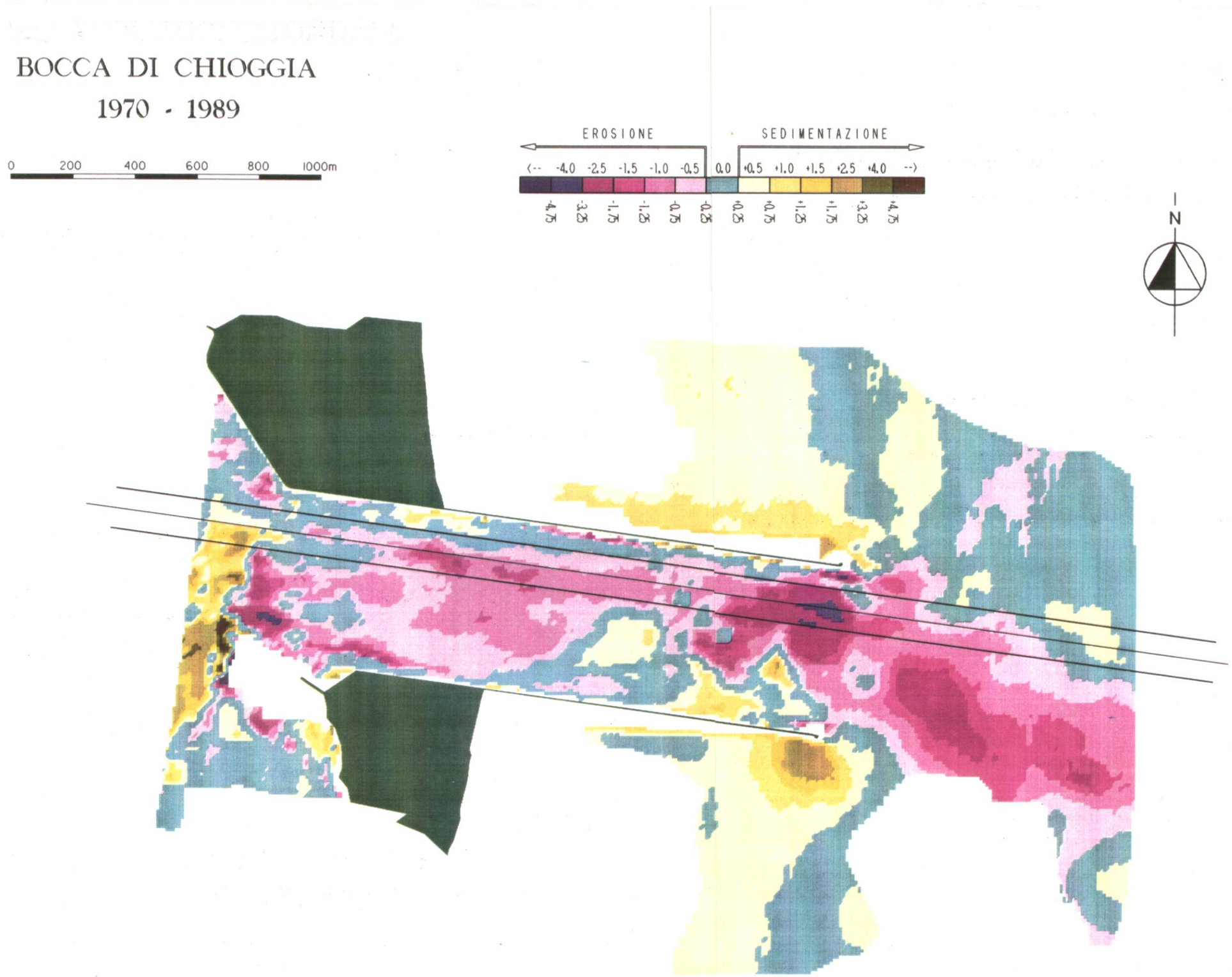






LEGENDA		
SEZIONE MINIMA DELLA BOCCA	●	SEZIONE EFFETTIVA
	○	SEZIONE TRA I MOLI CON I FONDALI PREESISTENTI ALLA LORO COSTRUZIONE
SEZIONE DEI CANALI AFFERENTI	▲	SEZIONE TOTALE DEI CANALI PRIMA E DOPO LA COSTRUZIONE DEI MOLI

Fig. 5.40 - BOCCA DI CHIOGGIA
ANDAMENTO NEL TEMPO DELLE
SEZIONI DEI CANALI


BOCCA DI CHIOGGIA
1970 - 1989
0 200 400 600 800 1000m
EROSIONE
SEDIMENTAZIONE
<-- -4.0 -2.5 -1.5 -1.0 -0.5 0.0 +0.5 +1.0 +1.5 +2.5 +4.0 -->
-4.75 -3.25 -1.75 -1.25 -0.75 -0.25 +0.25 +0.75 +1.25 +1.75 +3.25 +4.75
N

Il successivo aumento, che risale al periodo 1970-84, potrebbe derivare da un incremento dei volumi di marea dovuto per esempio alla graduale scomparsa delle barene, oppure da lavori di dragaggio; il rilievo 1989 non conferma comunque la tendenza all'aumento del periodo precedente. Nel periodo 1970-1989 l'aumento complessivo è stato di circa il 7%.

Questo incremento delle sezioni è abbastanza distribuito sull'intera superficie della bocca, come mostra l'esame della fig. 5.41. Solo all'estremità del molo sud è riscontrabile una zona con tendenza alla sedimentazione, spiegabile con l'incidenza del trasporto litoraneo proveniente da Sottomarina.

6. MORFOLOGIA DEI CANALI LAGUNARI

Nell'ambito dell'analisi conoscitiva della laguna è importante esaminare anche la morfologia dei canali che la percorrono, intendendo con questo termine le caratteristiche desumibili dall'esame del loro corso planimetrico (con esclusione cioè della profondità, già trattata in precedenza).

Per quest'analisi ci si è riferiti ai canali naturali per i quali nell'ultimo secolo non si sono riscontrate, o appaiono trascurabili, variazioni e modifiche dovute ad interventi antropici.

Questi canali sono stati caratterizzati secondo un duplice aspetto morfologico: quello della gerarchizzazione e quello della meandrizzazione.

I due concetti, in generale, derivano dalla morfologia e dalla idraulica dei fiumi e dei loro affluenti, in particolare di quelli con scarsa o limitata pendenza per i quali si riscontra la classica conformazione meandriforme.

Per quanto riguarda l'ordine "gerarchico" della rete di canali, si è fatto riferimento alla trattazione di Horton (159), una tra le più complete esistenti in letteratura, modificata secondo l'impostazione di alcuni autori successivi; il problema dei meandri è stato affrontato tenendo conto della vasta letteratura esistente (vedi riferimeti dal 16 al 166), soprattutto per un'analisi da un punto di vista geometrico e morfologico. Le teorie più recenti, peraltro, utilizzano anche l'approccio modellistico, tenendo conto dell'idrodinamica e dei fenomeni di trasporto solido; come verrà esposto nei paragrafi successivi, non è risultato possibile applicare tali metodologie di analisi più raffinate alla rete dei canali lagunari e ci si è pertanto limitati all'esame delle loro caratteristiche morfometriche.

Nel presente paragrafo vengono presentate le teorie e le impostazioni teoriche impiegate per i canali lagunari, analizzati i riscontri ottenuti e valutati i risultati oltre che dal punto di vista conoscitivo anche per le impostazioni progettuali che ne possono scaturire.

Si osserva infatti che canali eseguiti nel rispetto dei parametri morfometrici tipici dei canali lagunari naturali, risulterebbero più stabili nel tempo e quindi preferibili rispetto a canali eseguiti con andamento rettilineo.

6.1. Gerarchizzazione dei canali lagunari

Nell'analisi idrologica e morfometrica dei corsi d'acqua fluviali, da parte di alcuni studiosi, è stata posta l'attenzione sulle caratteristiche della struttura gerarchica di tali reti naturali, nell'ipotesi di bacini in equilibrio dinamico e senza vincoli geologici (158, 159, 160).

Considerato un bacino ed individuata l'origine di un corso d'acqua, viene definito tronco di 1° ordine il tratto fra l'origine e la prima confluenza; tronco di 2° ordine quello a valle, fino alla confluenza successiva, e così via.

La trattazione di Horton, successivamente messa a punto da altri autori (160), prende in esame per ciascun tronco i seguenti parametri, dove per tronco si intende il tratto di corso d'acqua fra due nodi o punti d'immissione:

- il numero d'ordine (n)
- il numero di tronchi per ciascun ordine (N_n)
- il dislivello medio dei tronchi di uno stesso ordine (Y_n)
- la lunghezza media dei tronchi di uno stesso ordine (L_n)
- la pendenza media dei tronchi di uno stesso ordine (S_n)
- l'area media del bacino contribuente di tronchi dello stesso ordine (A_n).

L'analisi, effettuata in alcuni corsi d'acqua americani, individuava alcuni rapporti significativi e che potevano essere assunti come rappresentativi e caratteristici, quali ad esempio:

- il rapporto di biforcazione $R_b = (N_n/N_{n+1})$;
- il rapporto delle lunghezze $R_L = (L_n/L_{n+1})$;
- la concavità $C = (S_n/S_{n+1})$.

I risultati ottenuti per i bacini americani studiati mostrano una buona corrispondenza fra le teorie a base dell'analisi ed i riscontri sperimentali.

Anche alla luce di un primo studio (61) tendente ad applicare tali teorie alla morfologia dei canali lagunari, sono stati presi in esame alcuni canali non alterati da interventi antropici, per verificare se e in che termini è riscontrabile una rispondenza con le reti naturali di canali.

Prendendo in considerazione i parametri sopra citati è emersa la grossa difficoltà di definire per ciascun tronco considerato grandezze quali dislivello medio, pendenza media e area media del bacino contribuente.

In tab. 6.1 sono riportati, a titolo esemplificativo, i valori ottenuti nello studio citato a confronto con quelli ricavati dalla morfologia fluviale.

Tab. 6.1: Confronto fra alcuni parametri caratteristici della gerarchizzazione dei fiumi e dei canali lagunari (valori medi)

	R_b	σ_{Rb}	R_L	σ_{RL}	C	σ_C	R_LC	σ
Fiumi	4,05	0,38	0,463	0,045	2,17	0,26	0,994	0,04
Canali lag.	3,55	0,73	0,403	0,178	2,62	2,16	0,798	0,183

I valori di R_b, R_L, C e R_LC sono i valori medi dei parametri già citati mentre le σ_i rappresentano gli scarti quadratici medi dei

parametri stessi. Tramite le σ_i si possono interpretare le forme delle gaussiane di probabilità.

La gerarchizzazione dei canali appare chiara da un punto di vista planimetrico e di numero d'ordine e mostra una certa concordanza con i rapporti significativi ricavati per i fiumi; si nota, però, per i canali lagunari, una notevole dispersione dei valori di tali rapporti che non consentono una caratterizzazione nè in termini conoscitivi nè a fini progettuali. Si è preferito pertanto proseguire l'analisi morfometrica focalizzando l'interesse sulle caratteristiche dei meandri dei canali lagunari.

6.2. Meandrizzazione dei canali lagunari

6.2.1. Introduzione - La meandrizzazione dei fiumi

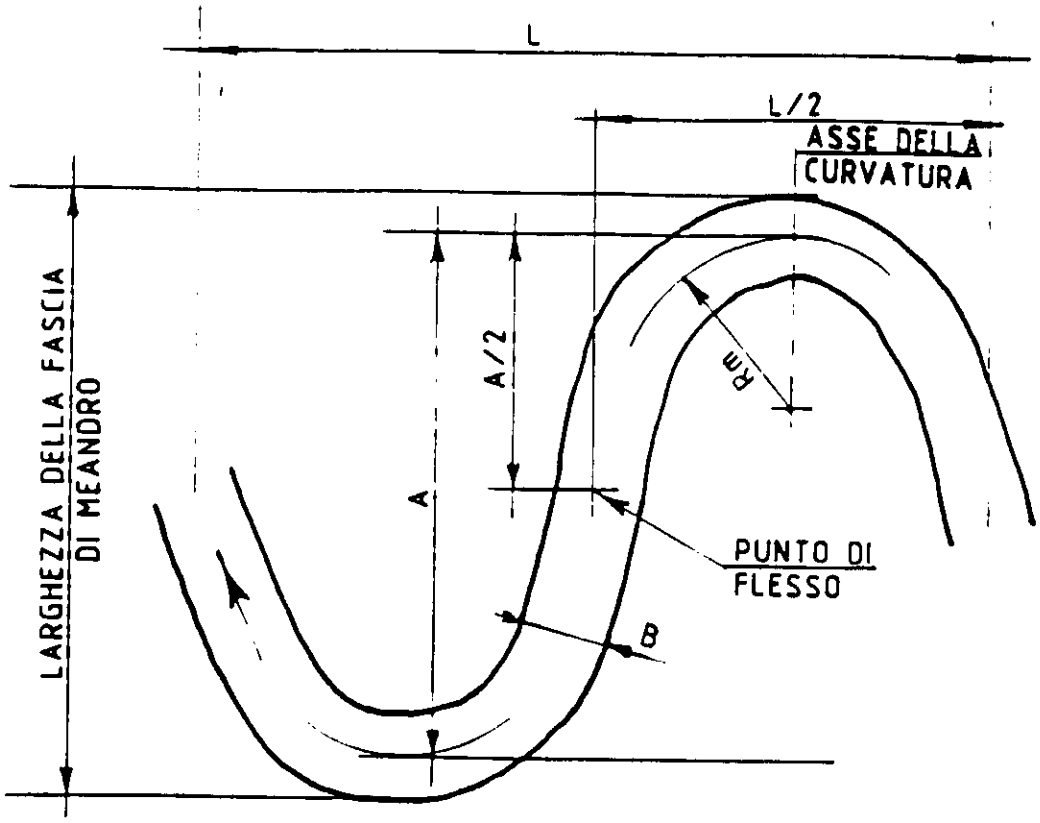
I fiumi, per quanto riguarda la meandrizzazione, sono caratterizzati dalle correlazioni fra diversi parametri, geometrici, idraulici ed idrodinamici (161÷166).

La geometria dei meandri è stata oggetto di molti studi statistici effettuati per lo più su fiumi che attraversano piane alluvionali e per i quali era ragionevole ritenere che la natura e la conformazione del fondo non condizionassero il tracciato planimetrico degli stessi.

Mentre si rimanda alla letteratura specifica, riportata in bibliografia per una trattazione più approfondita e dettagliata, si richiamano di seguito alcuni concetti che si sono rivelati di possibile transposizione ai canali lagunari.

Nelle tabelle in fondo alla fig. 6.1 sono rappresentate le grandezze ed i termini usati nella descrizione delle caratteristiche geometriche dei meandri: lunghezza del meandro; ampiezza del meandro; raggio medio e larghezza media del fiume.

Fig. 6.1 SCHEMA DI UN MEANDRO CON INDICATI I TERMINI USATI PER CARATTERIZZARLO



B = LARGHEZZA DEL MEANDRO
L = LUNGHEZZA D'ONDA DEL MEANDRO
A = AMPIEZZA DEL MEANDRO
Rm = RAGGIO MEDIO DI CURVATURA

Tabella: Relazioni empiriche fra i parametri geometrici di meandri dei fiumi in piane alluvionali

Autore			
Inglis (dati Jefferson)	$L = 6,5\ B^{0,99}$	$A = 18,4\ B^{0,99}$	
Inglis (dati Bates)		$A = 11,4\ B^{1,04}$	
Leopold e Wolman	$L = 11,0\ B^{1,01}$	$A = 3,0\ B^{1,1}$	$L = 4,6\ R_m^{0,98}$

Più in generale per i fiumi si può considerare:

$L/B = 7 \div 11$; $R/B = 2 \div 3$; $L/R = 3 \div 6$

Gli studi effettuati, di cui si trova riscontro in letteratura, basati su dati rilevati sperimentalmente in pianure alluvionali incise da corsi d'acqua con meandri, hanno fornito correlazioni fra diversi parametri (vedi la tabella della fig. 6.1) abbastanza simili, pur essendo le zone di rilevamento lontane fra loro ed appartenenti a bacini idrografici geologicamente ed idrologicamente diversi.

L'intervallo indicato comprende per ciascun parametro circa il 50% dei punti sperimentali. Di particolare interesse è il fatto che le relazioni sopra indicate sono rappresentative non solo dei meandri di fiumi in piane alluvionali, ma anche delle curve che l'acqua forma sulla superficie dei ghiacciai a seguito dello scioglimento del ghiaccio stesso.

Da diversi autori sono state ricercate anche delle relazioni fra i parametri geometrici delle curve dei fiumi e la portata, o il trasporto solido. Interessanti teorie e modelli matematici sono stati inoltre formulati per spiegare il movimento e la trasformazione dei meandri (165, 166).

A riguardo è ormai dato per acquisito che un canale naturale, con il letto in materiale sciolto, non può, in generale, presentare un corso rettilineo per una lunghezza superiore a 10 volte la sua larghezza.

La generalità delle leggi e delle correlazioni riscontrate e verificate per i corsi d'acqua ha fatto ritenere opportuno applicare lo stesso approccio metodologico all'analisi dei meandri dei canali lagunari.

6.2.2. I meandri dei canali lagunari

Introduzione

Nell'affrontare un'analisi conoscitiva sui canali lagunari secondo l'impostazione utilizzata in letteratura per i meandri dei fiumi,

è opportuno porre l'accento su alcune differenze che, per quanto ovvie, sono da tenere presenti per valutare le conclusioni della analisi stessa.

La prima differenza sostanziale è relativa al verso del flusso, che nei fiumi è sempre unidirezionale, mentre nelle laguna si inverte periodicamente con cadenze e tempi ben precisi. Il movimento di flusso e riflusso della marea fa sì che, innanzitutto, le curve dei canali si mantengano pressochè immutate senza presentare il fenomeno di evoluzione dei meandri ben noto in idraulica fluviale; si è verificato infatti a riguardo che per i canali non interessati da interventi antropici non sono intervenute variazioni apprezzabili nelle caratteristiche geometriche dei meandri fra il 1930 ed il 1970.

Un altro elemento da tener presente è la pendenza del fondo. Nei fiumi questa è infatti strettamente correlata alla portata, in particolare quando il deflusso non è fortemente rigurgitato e quindi la linea dell'energia si può ritenere segua l'andamento del fondo. Nella laguna invece, o più genericamente in un delta con forte escursione di marea, la pendenza motrice (idraulicamente intesa) è data dal gradiente del pelo liquido che non è normalmente parallelo al fondo.

Un ulteriore problema nel trasferire ai canali lagunari la metodologia applicata ai fiumi, deriva dalla difficoltà di definire la larghezza idraulicamente attiva di ciascun canale lagunare, in particolare in quei tratti in cui ai lati del canale stesso non si presentano barene o terre emerse ma velme e bassifondi.

Scelta dei canali

Tenendo conto di quanto riportato in letteratura, sinteticamente esposto nei paragrafi precedenti, sono stati individuati i criteri sulla base dei quali scegliere i canali lagunari da esaminare.

Utilizzando la cartografia del 1900, del 1930 e del 1970, sono stati individuati i canali più "naturali", scegliendone alcuni in ciascuno dei tre bacini afferenti le singole bocche.

Non sono stati presi in considerazione quei canali che risentono di interventi antropici sia per quanto riguarda il tracciato che la profondità, nè quelli con una non chiara ramificazione gerarchica "ad albero", nè infine, i canali per cui non poteva essere definito con una certa precisione il bacino afferente.

Per poter contare su una più vasta casistica, sono stati inclusi nell'analisi sia canali importanti che piccoli ghebi, sia canali contornati da barene che canali su bassi fondali, sia vicino alle bocche che prossimi alle zone di spartiacque (fig. 6.2).

Nelle figg. 6.3, 6.4 e 6.5 sono riportati i canali oggetto dell'analisi per ciascun bacino:

A) bacino di Chioggia:
- canale Bombae e ghebi confluenti
- ghebo di S.Vito
- canale Perognola e ghebi confluenti
- canale Brenta Vecchia e sue ramificazioni

B) bacino di Malamocco:
- canale di Poveglia e sue ramificazioni
- canale Bastia dal Casone Barenon alla confluenza con il Piovego
- canale Piovego dal Casonetto Zappa
- canale Raina dal Lago Raina alla confluenza nel Piovego

C) bacino di Lido
- canale Mazzorbo dall'isola Buel del Lovo alla confluenza con il canale Borgognoni
- canale dei Sette Soleri e Ponte fino alla confluenza con il canale della Dolce; canale della Dolce e canale di Burano per i loro tratti terminali

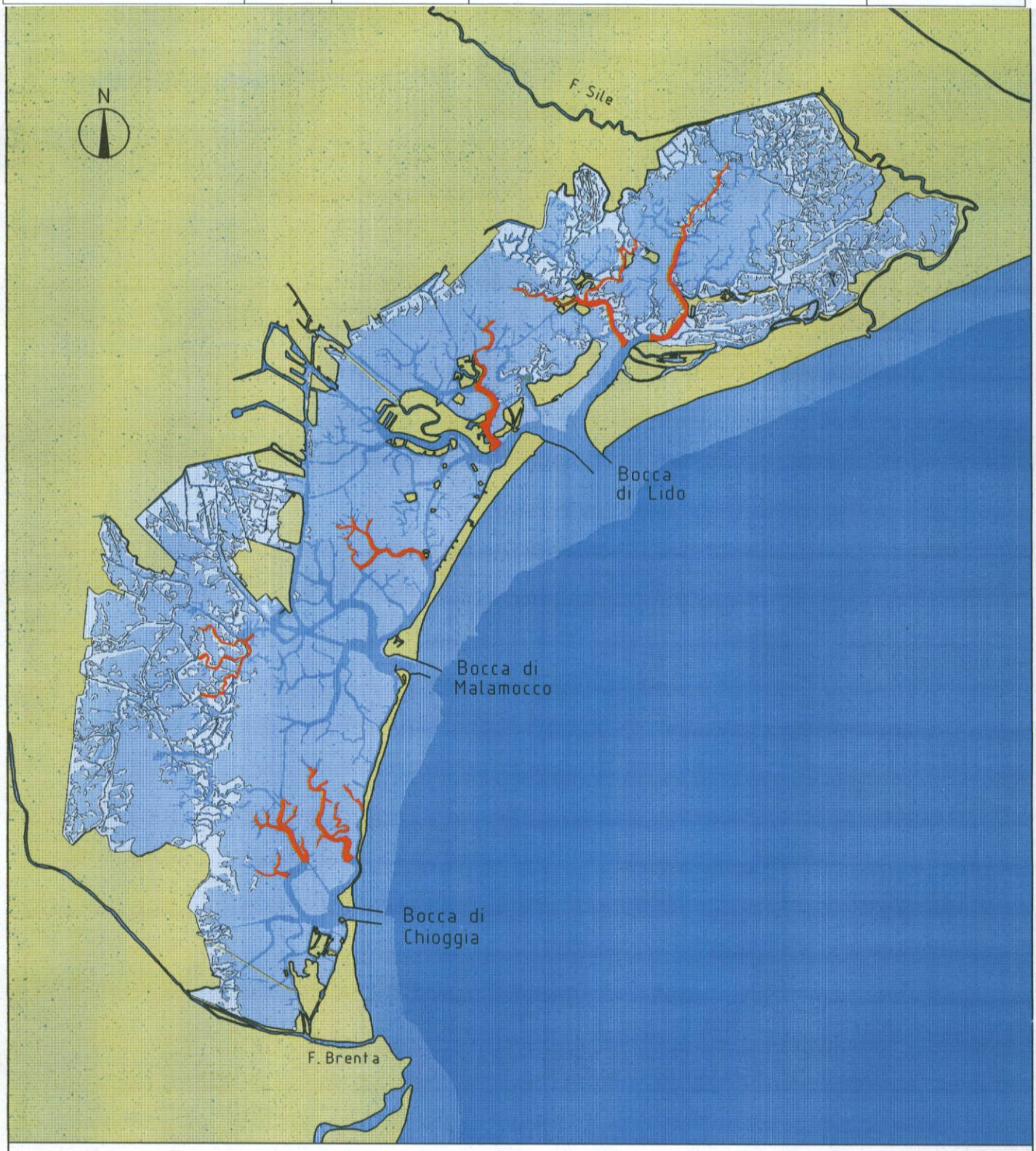


Fig. 6.2 CANALI PRESI IN CONSIDERAZIONE PER L'ANALISI DEI MEANDRI LAGUNARI

0 2500 5000 7500 10000 12500 m

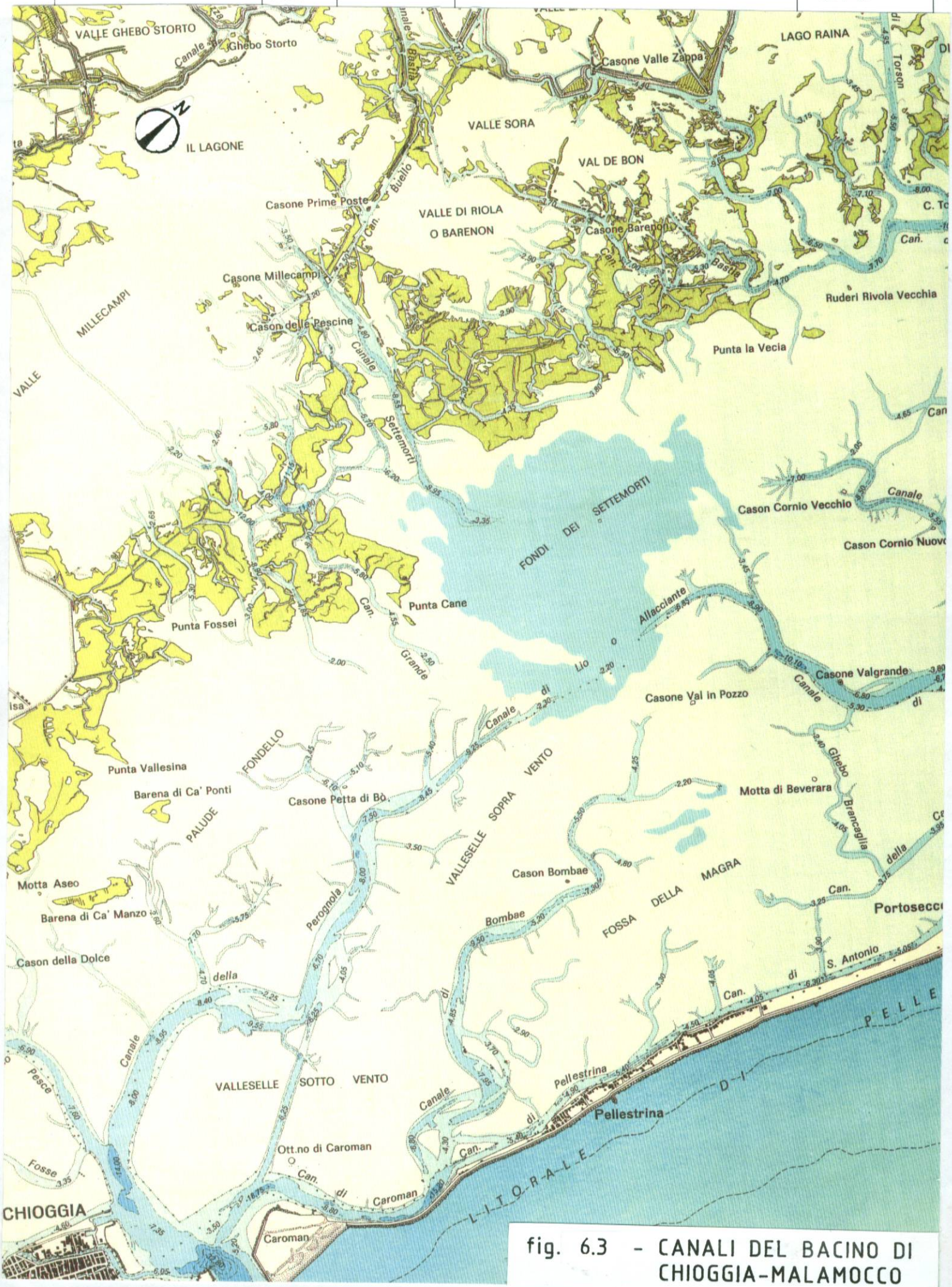


fig. 6.3 - CANALI DEL BACINO DI CHIOGGIA-MALAMOCCO

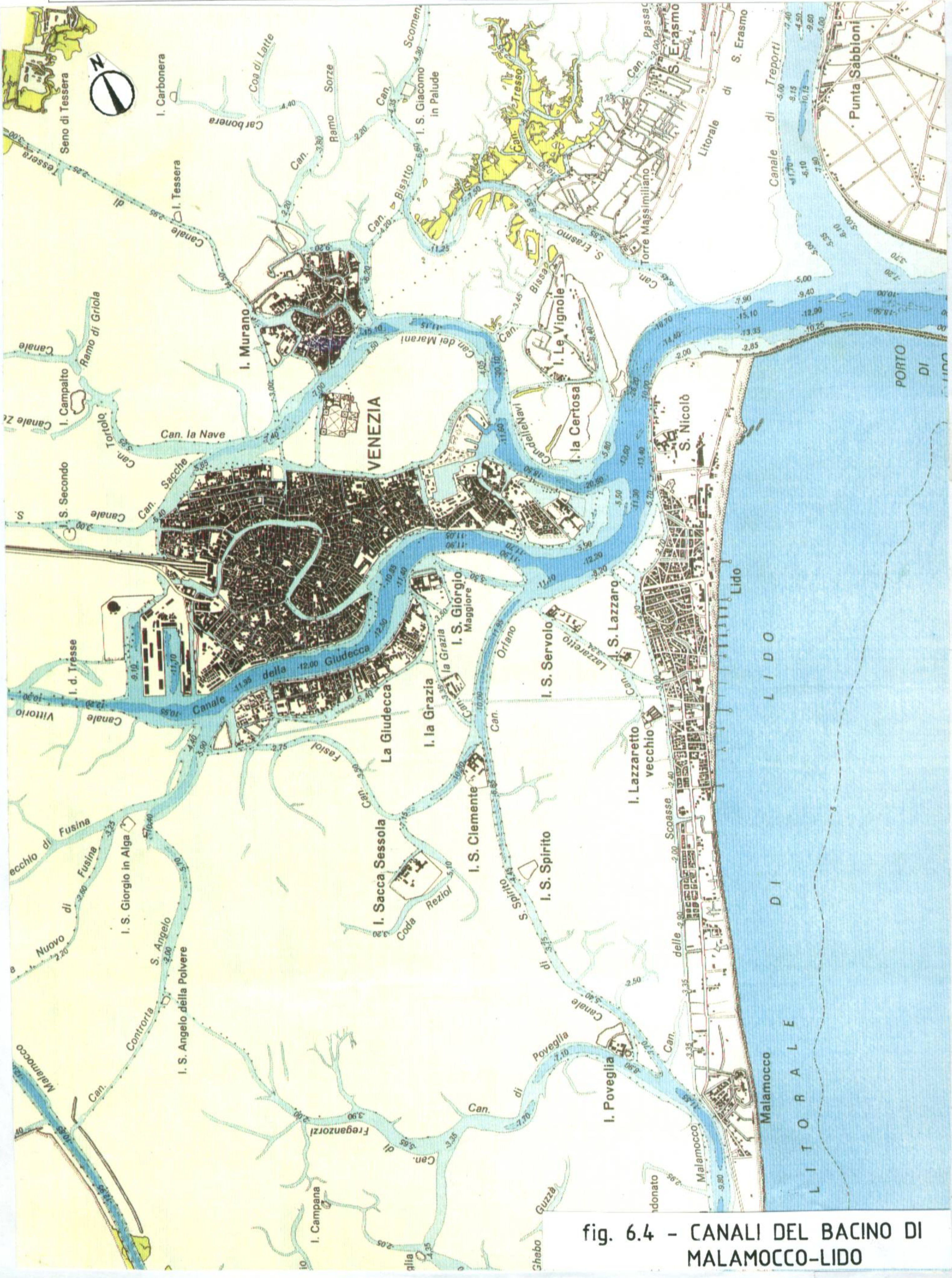


fig. 6.4 - CANALI DEL BACINO DI MALAMOCCO-LIDO

fig. 6.5 - CANALI DEL BACINO DI TREPORTI-LIDO

- canale Gaggian (S.Lorenzo)
- canale S.Felice e canale Cenese
- canale dei Marani, Ondello, Carbonera e delle Latte.

L'analisi è stata effettuata prendendo in considerazione quei parametri che in ambito fluviale presentavano significative correlazioni e cioè: la larghezza del meandro, la larghezza del canale, l'ampiezza ed il raggio di curvatura (vedi fig. 6.1).

I valori utilizzati per l'analisi sono in realtà leggermente diversi avendo preso in considerazione, anzichè la lunghezza d'onda del meandro e la sua ampiezza, rispettivamente la semi-lunghezza e la semi-ampiezza (indicati con l e a).

La curva di un canale è stata considerata meandro quando l'ampiezza è maggiore di un decimo della lunghezza d'onda.

Risultati dell'analisi

Sintetizzando i risultati ottenuti si possono indicare le seguenti correlazioni medie fra i parametri geometrici presi in considerazione:

$l/B = 3 \div 6$; $R/B = 1,5 \div 4$; $l/R = 1,25 \div 3,5$;

che, se riportate alla lunghezza d'onda utilizzata per i parametri geometrici dei fiumi, divengono:

$L/B = 6 \div 12$; $R/B = 1,5 \div 4$; $L/R = 2,5 \div 7,0$;

valori che sono molto simili a quelli riscontrati per i fiumi.

Analogamente a quanto rilevato per i fiumi, inoltre, i rapporti fra i parametri significativi risultano indipendenti da alcune caratteristiche morfologiche ed idrauliche che potrebbero a riguardo apparire importanti: è il caso dell'esistenza o meno delle barene ai lati del canale, della "importanza" del canale e della estensione del suo bacino di influenza. I rapporti appaiono inoltre del

tutto indipendenti dal bacino di appartenenza dei canali, come è evidenziato, a titolo di esempio, nella fig. 6.6.

Nelle figg. 6.7, 6.8 e 6.9 sono riportati i dati sperimentali relativi alla correlazione l/R; R/B e l/B.

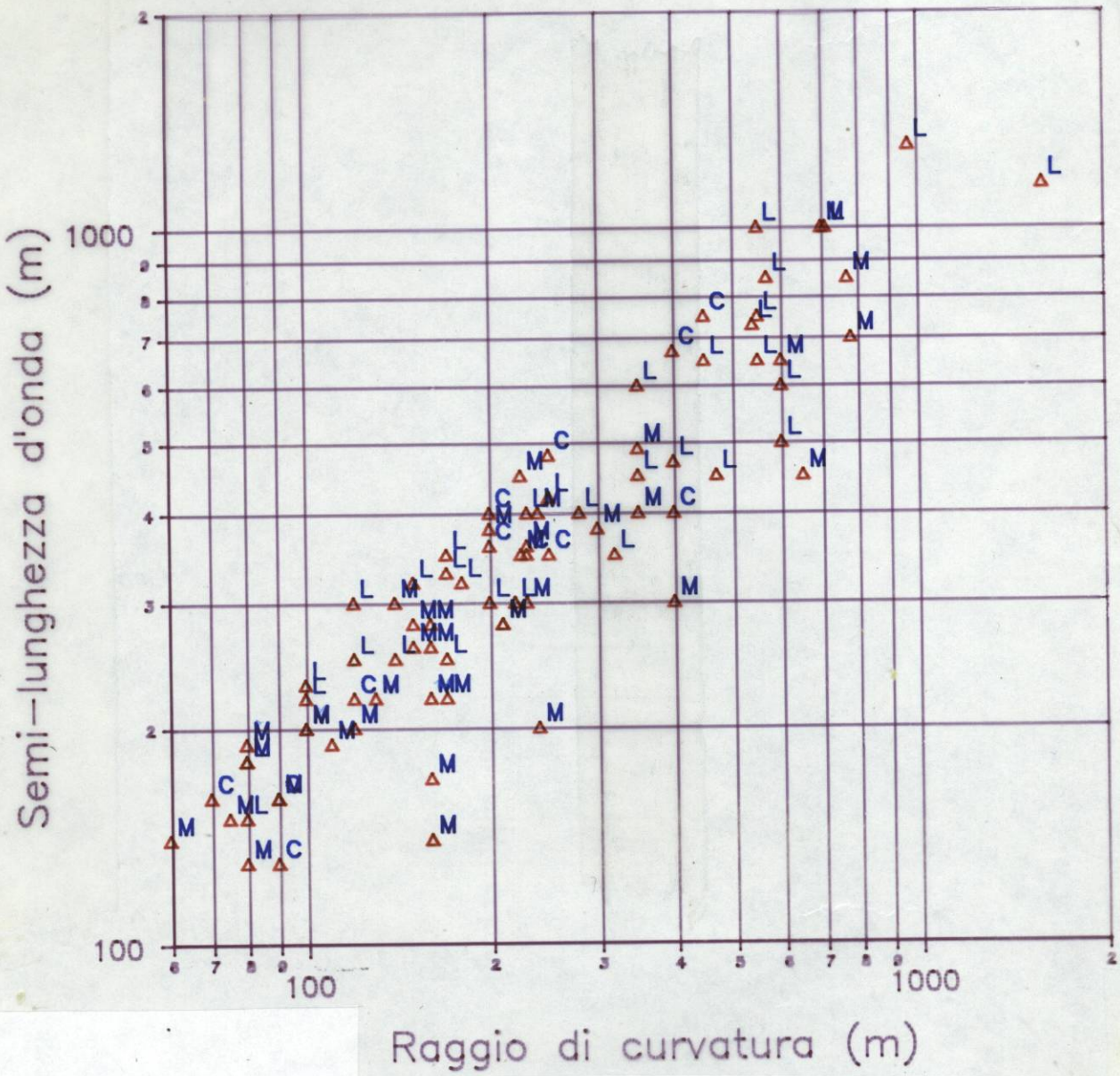
In ciascuna figura è riportata anche la distribuzione dei valori di ciascun rapporto suddivisa in classi. Questa rappresentazione può essere utile nella ricostruzione di canali "naturali" all'interno della laguna.

E' da notare che la minor dispersione di dati si ha per il rapporto l/R, mentre le altre correlazioni presentano andamenti molto meno precisi, fatto questo probabilmente dovuto alla difficoltà di determinare esattamente, come è stato detto sopra, le larghezze idraulicamente attive dei canali lagunari. Anche altre relazioni quali fra semi-ampiezza e larghezza (a/B) o fra semi-lunghezza d'onda e semi-ampiezza (l/a) non si sono rivelate particolarmente significative (figg. 6.10 e 6.11).

Per aggiungere un ulteriore elemento alla fase conoscitiva e fornire elementi utili per la progettazione è stata esaminata la relazione esistente fra lo sviluppo (S) di ciascun canale preso in considerazione e la sua corda sottesa (C), intendendo con ciò la distanza in linea d'aria della sua origine dalla sezione terminale.

Il risultato, che appare di un qualche interesse, mostra (fig. 6.12) un naturale allineamento dei punti, indipendentemente dall'importanza "gerarchica" del canale considerato e della sua appartenenza a bacini diversi, secondo il rapporto:

$$S/C = 1,27$$



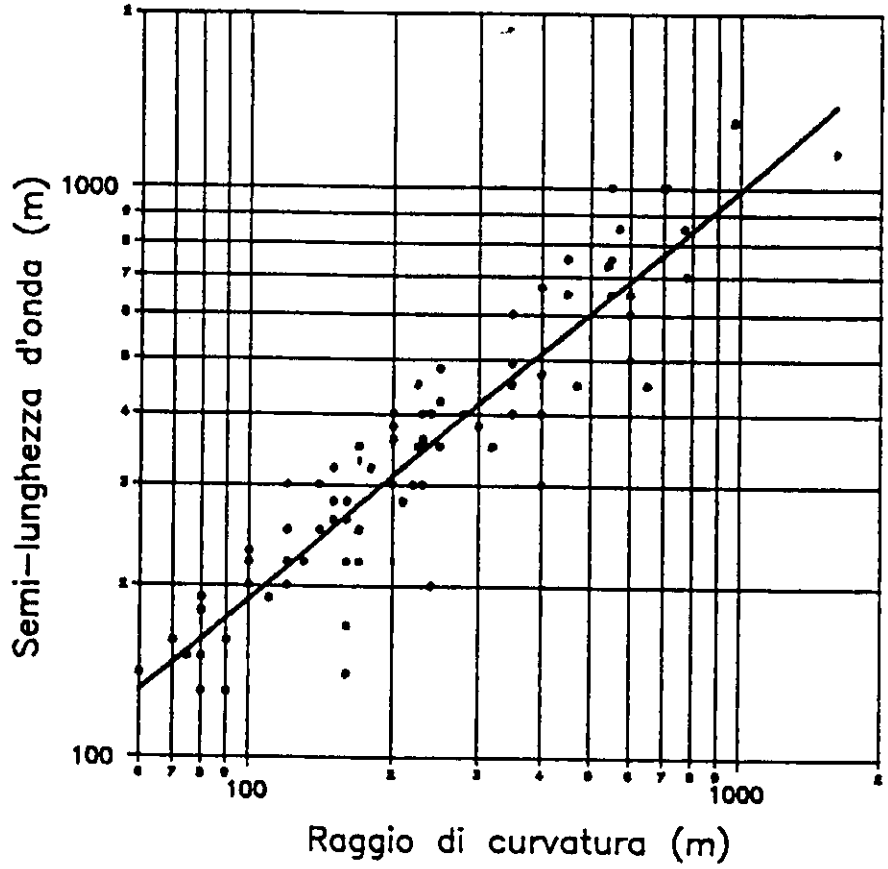
LEGENDA:

L meandro nel bacino di Lido

M meandro nel bacino di Malamocco

C meandro nel bacino di Chioggia

Fig. 6.6 - SUDDIVISIONE PER BACINI DI APPARTENENZA DEI DATI RICAVATI PER LA CORRELAZIONE SEMI-LUNGHEZZA D'ONDA - RAGGIO DI CURVATURA.



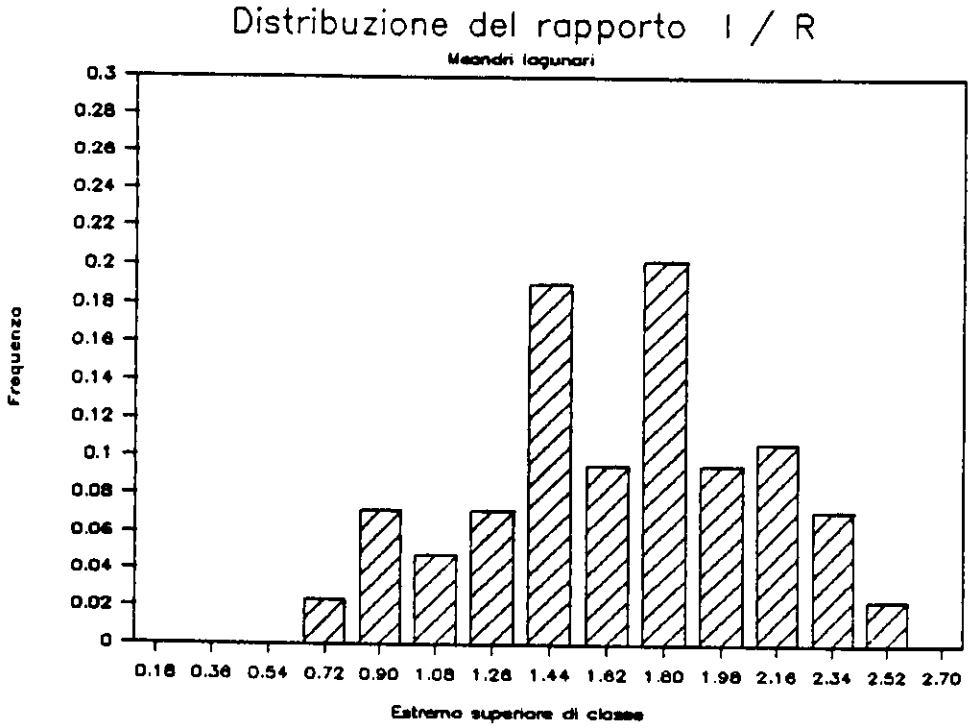
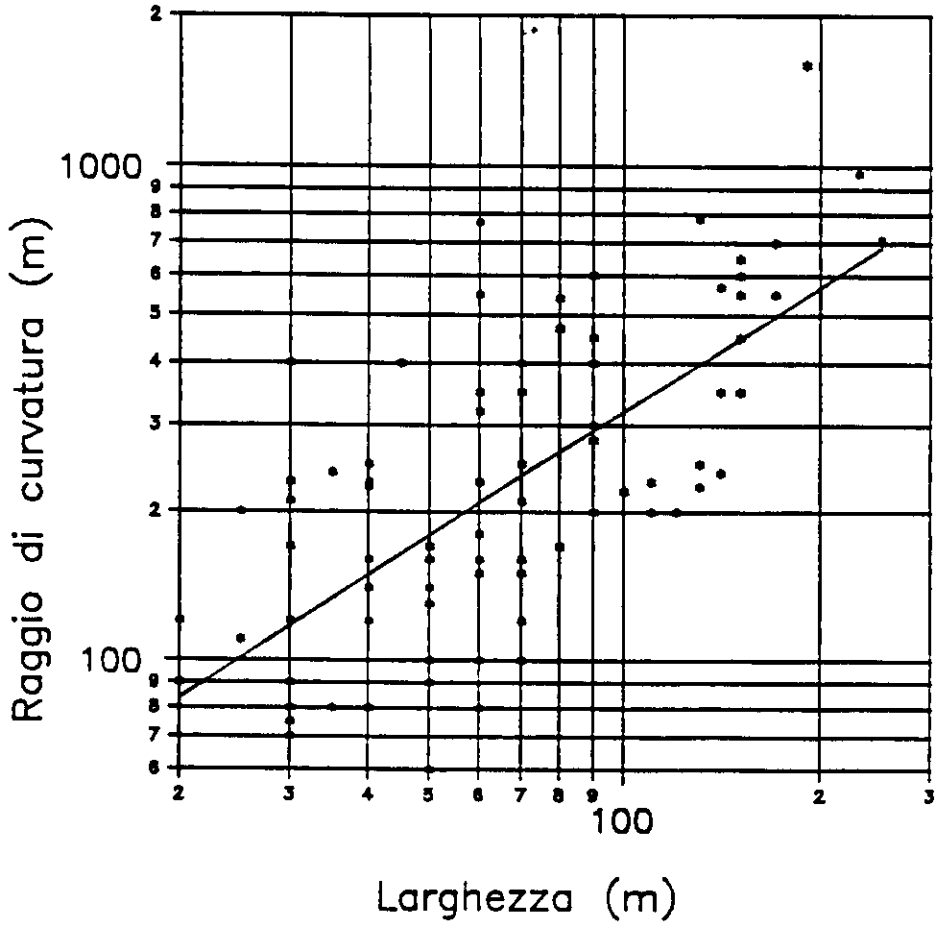


Fig. 6.7 - CORRELAZIONE FRA SEMI-LUNGHEZZA D'ONDA E RAGGIO DI CURVATURA PER I MEANDRI LAGUNARI.



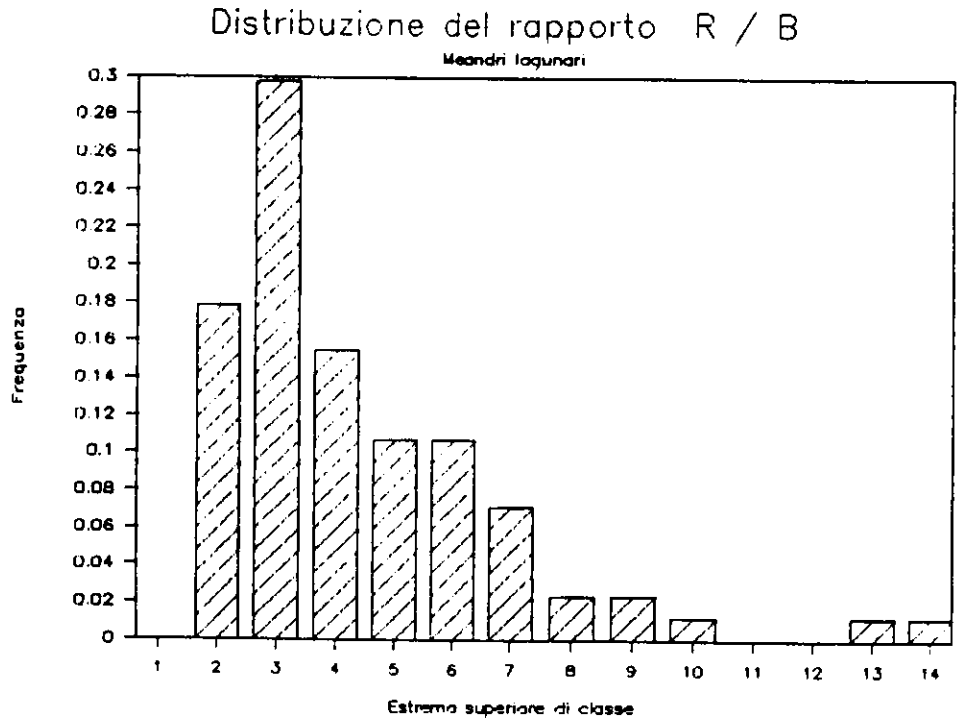
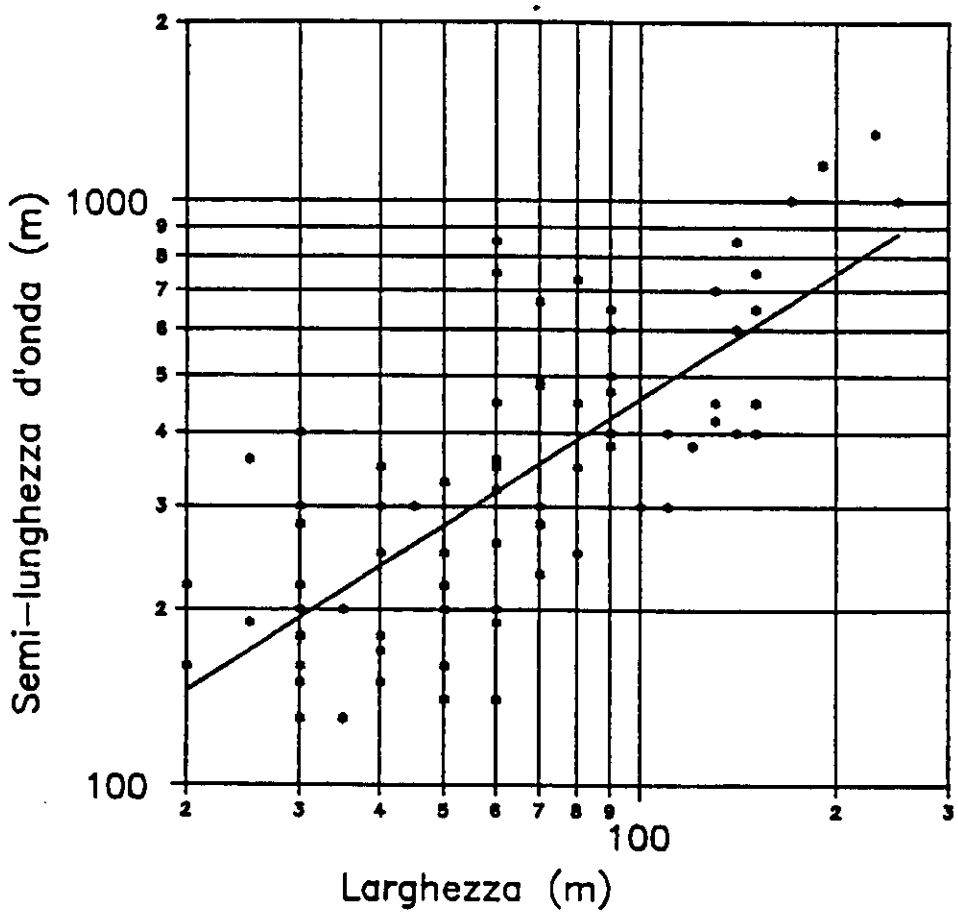


Fig. 6.8 - CORRELAZIONE FRA RAGGIO MEDIO DI CURVATURA E LARGHEZZA MEDIA PER I MEANDRI LAGUNARI.



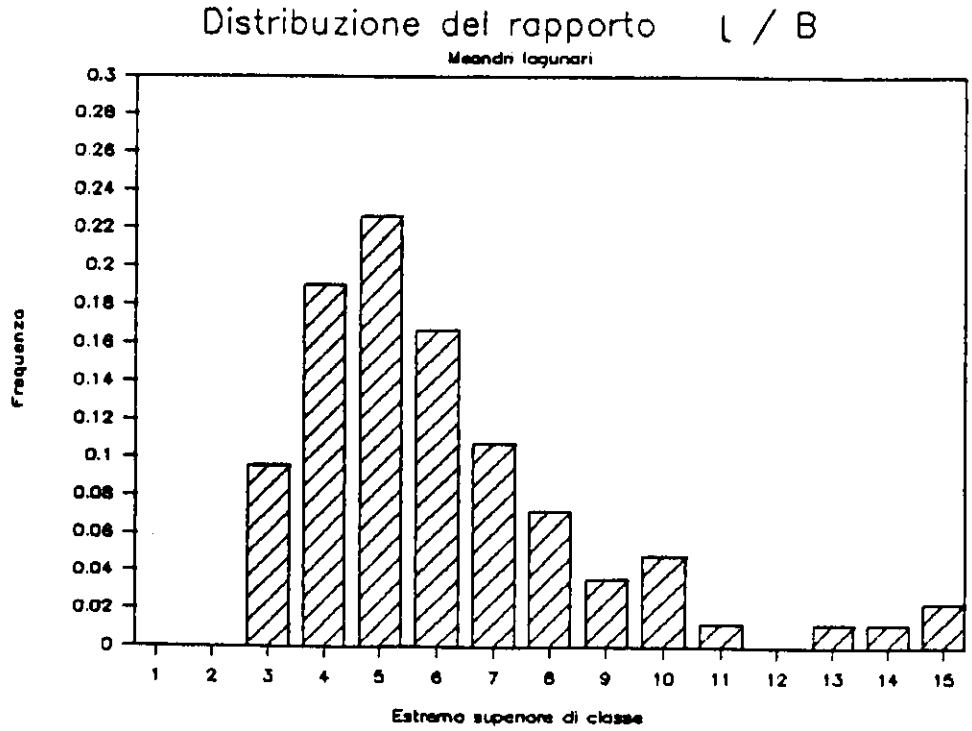
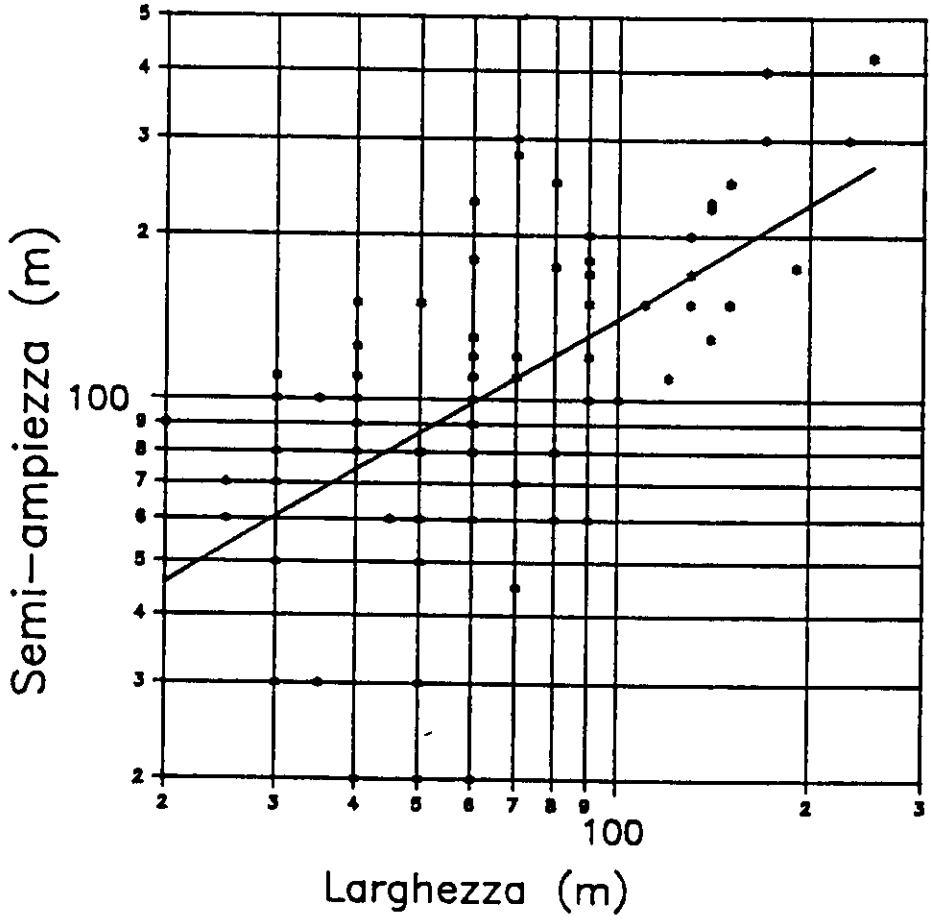


Fig. 6.9 - CORRELAZIONE FRA SEMI-LUNGHEZZA D'ONDA E LARGHEZZA MEDIA PER I MEANDRI LAGUNARI.



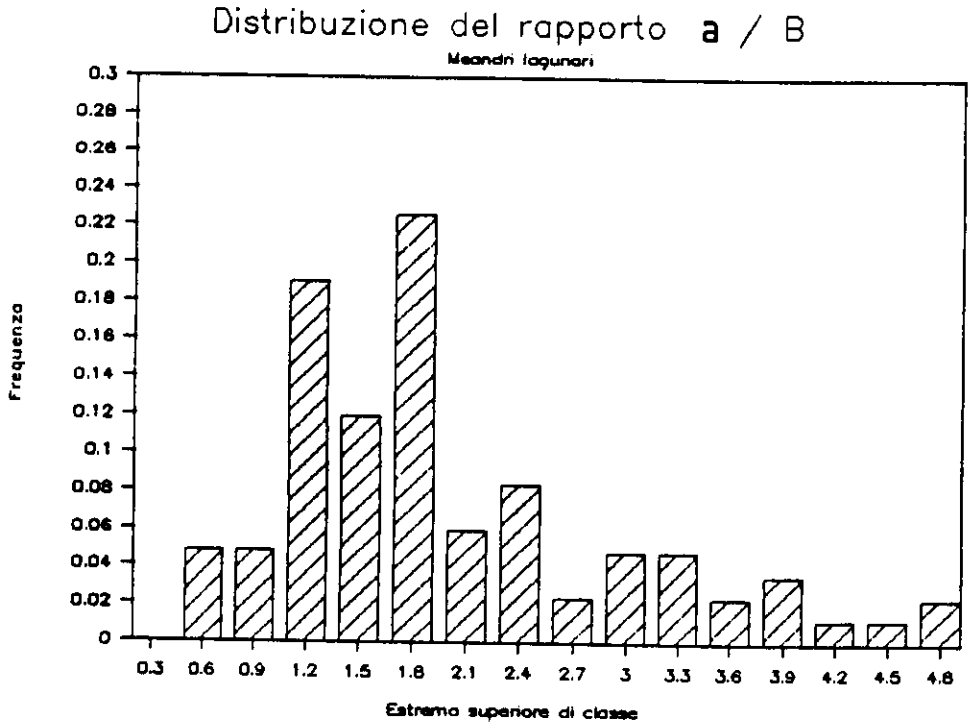
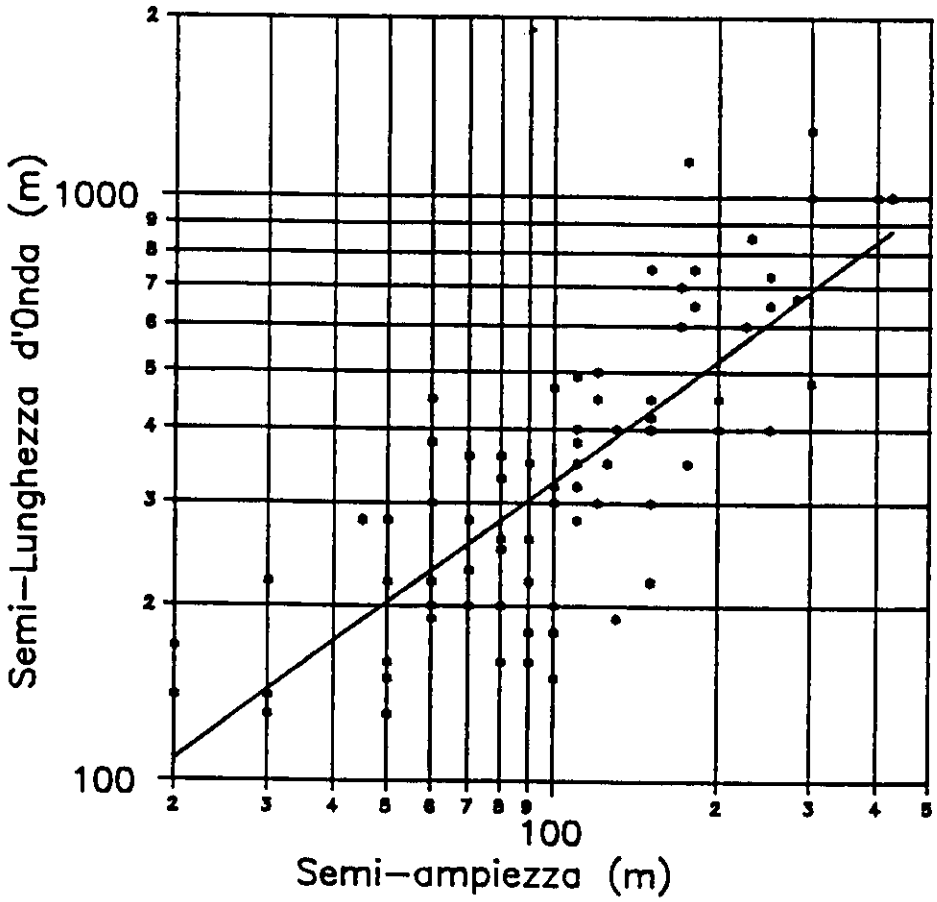


Fig. 6.10 - CORRELAZIONE FRA SEMI-AMPIEZZA E LARGHEZZA MEDIA PER I MEANDRI LAGUNARI.



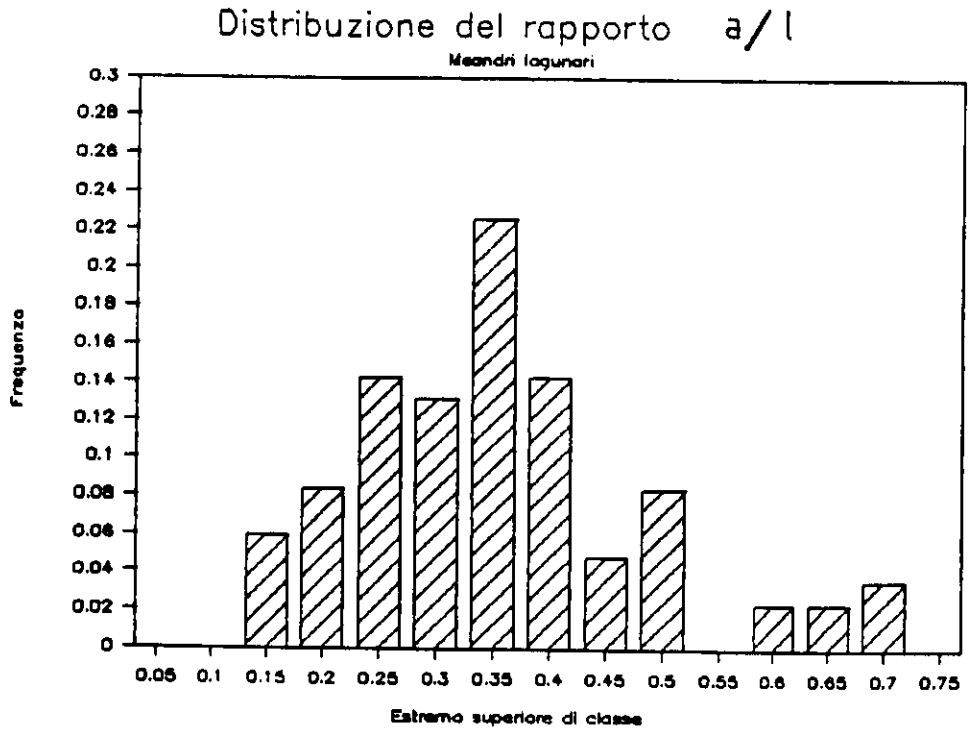
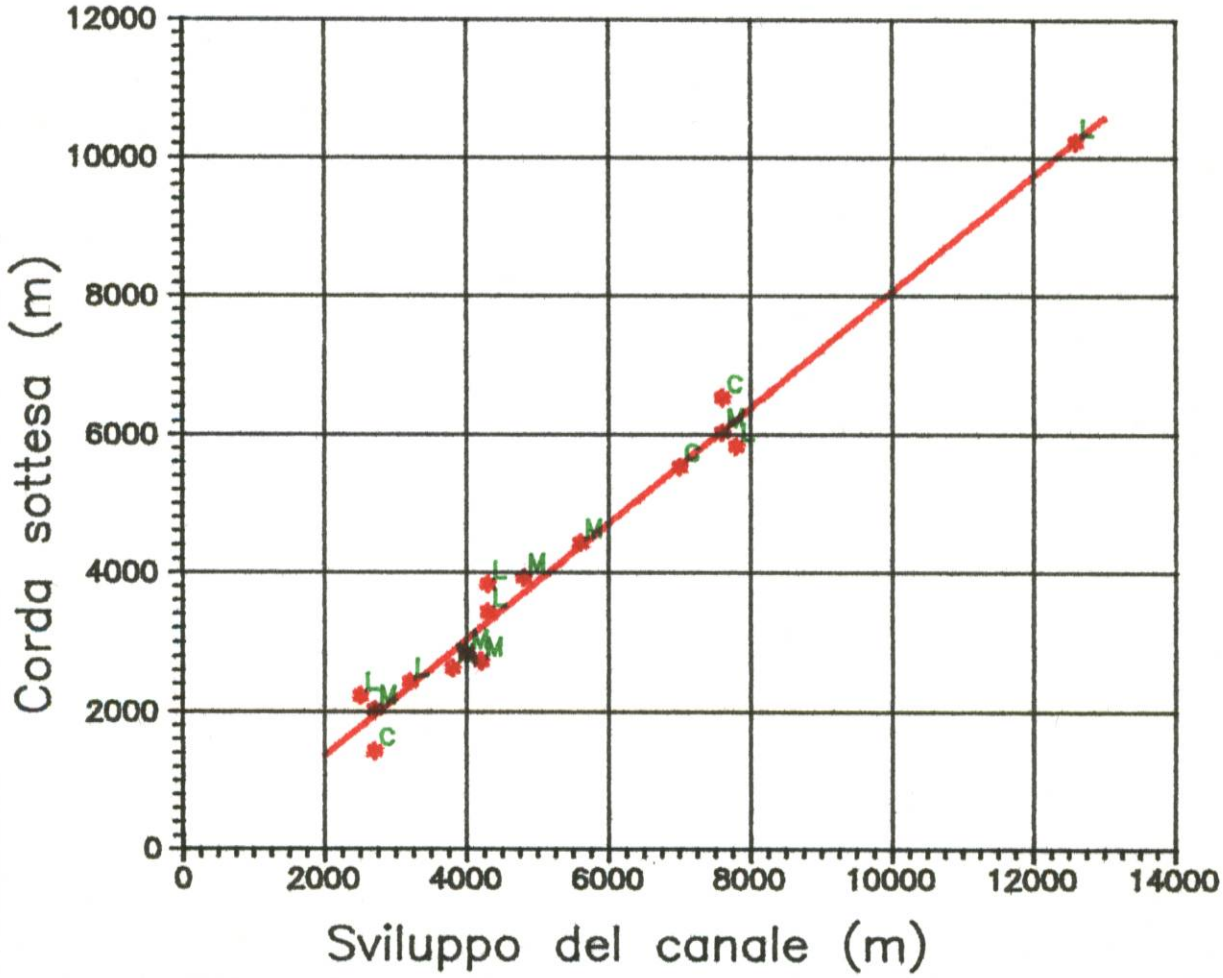


Fig. 6.11 - CORRELAZIONE FRA SEMI-LUNGHEZZA D'ONDA E SEMI-AMPIEZZA PER I MEANDRI LAGUNARI.



LEGENDA:

L canale nel bacino della bocca di Lido
M canale nel bacino della bocca di Malamocco
C canale nel bacino della bocca di Chioggia

Fig. 6.12 - CORRELAZIONE FRA LO SVILUPPO DEL CANALE E LA CONGIUNGENTE L'INIZIO ED IL TERMINE DELLO STESSO (CORDA SOTTESA).

Utilizzando i modelli matematici idrodinamici unidimensionale e bidimensionale agli elementi finiti per la determinazione delle portate nei canali, è stata anche ricercata una correlazione fra la portata ed i parametri geometrici significativi del meandro, in analogia a quanto effettuato per i fiumi.

La estrema varietà di configurazioni che si riscontrano in ciascun canale non ha portato però a risultati di un qualche interesse.

Conclusioni

Le analisi effettuate e le correlazioni evidenziate, hanno mostrato una notevole analogia fra i meandri lagunari e quelli fluviali. La difficoltà di determinare con precisione alcuni parametri morfometrici dei canali lagunari rende più limitato il campo di ricerca di correlazioni fra le diverse grandezze.

Sono comunque emerse utili indicazioni sia per quanto riguarda lo aspetto conoscitivo sia per la possibilità di disporre di diversi elementi per la progettazione di nuovi canali lagunari.