

ANALISI DEL PROCESSO DI SUBSIDENZA
NELL'AREA VENEZIANA
E SUA SIMULAZIONE CON UN MODELLO
TRIDIMENSIONALE NON LINEARE

L. CARBOGNIN - G. GAMBOLATI - F. MARABINI
G. TARONI - P. TEATINI - L. TOSI

Estratto da:

LA RICERCA SCIENTIFICA PER VENEZIA

Il Progetto Sistema Lagunare Veneziano

Vol. II, Tomo II

Modellistica del Sistema Lagunare
Studio di Impatto Ambientale

30124 VENEZIA

ISTITUTO VENETO DI SCIENZE, LETTERE ED ARTI
CAMPO S. STEFANO, 2945 (PALAZZO LOREDAN)
TELEFONO 041.2407711 - TELEFAX 041.5210598
e-mail: ivsla@unive.it
<http://www.ivsla.unive.it>

ANALISI DEL PROCESSO DI SUBSIDENZA NELL'AREA VENEZIANA E SUA SIMULAZIONE CON UN MODELLO TRIDIMENSIONALE NON LINEARE

Laura Carbognin*, Giuseppe Gambolati**, Francesco Marabini***,
Giancarlo Taroni*, Pietro Teatini** e Luigi Tosi*

* CNR, Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Venezia

** Università di Padova, Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate

*** CNR, Istituto di Geologia Marina, Bologna

ABSTRACT

This paper describes the studies performed and the results obtained under the framework of the Project "Sistema Lagunare Veneziano", Research Line 2.7.

A short review of the land subsidence evolution is first presented, including the more recent period (1950 - 1970) of human induced land sinking. The altimetrical situation of the entire venetian territory is then analysed in detail for the last twenty years through the comparison of two precise regional levelling carried out in 1973 and 1993. This twenty-year period is quite significant to evaluate the present trend of land subsidence after the cessation of human-induced process measured in 1973 and completely verified in 1975. Different behaviours in altimetrical evolution have clearly come out. A ground stability belongs to the zones in mainland, Venice and its surroundings, while a certain subsidence still occurs at the northern and southern extremities of the lagoon's edge and along the littoral where the natural compaction of recent deposits is more active than elsewhere and the rate of natural subsidence is greater. The degenerative state of the venetian littoral strips has worsen in the recent past by land sinking. In the last twenty years the relatively slight subsidence has helped in permanently establishing the de-stabilisation of the submerged littoral zone that is evidenced by the deepening of the near shore bottom slope.

In order to analyse in-depth the subsidence process, more theoretical studies have been performed.

New appropriate and complex statistical methodologies useful in formulating a judgement on the linearity of the dependence between groundwater withdrawal and land subsidence were elaborated.

A new 3-D non linear finite element model was developed for the simulation and prediction of land subsidence due to intensive groundwater exploitation. The model is based on a quasi 3-D approach for flow and makes use of a 1-D vertical compaction model. The overall modelling approach, solved with an original block SOR iterative procedure, is applied to the regional aquifer-aquitard system underlying the venetian lagoon. The flow and consolidation models, suitably calibrated, have allowed to well reproduce the phenomenon.

SOMMARIO

Questo lavoro presenta la sintesi degli studi effettuati in tema di subsidenza nell'ambito della linea di ricerca 2.7 del Progetto Sistema Lagunare Veneziano, prima fase.

I risultati qui descritti si basano sostanzialmente sull'analisi comparata delle altimetrie 1973 e 1993 risultanti dalle livellazioni di alta precisione (effettuate con gli stessi criteri dal CNR, ISDGM Venezia) che partendo dai capisaldi base di Rua di Feletto e Treviso hanno quotato 208 capisaldi stabiliti lungo le direttrici Conegliano-Treviso-Venezia e circumlagunare. L'analisi relativa all'arco di tempo ventennale ha permesso di confermare la stabilità delle zone di terraferma, nonché del centro storico di Venezia. Le aree più subsidenti sono risultate essere quelle alle estremità lagunari nord e sud e lungo i litorali. L'esame di alcuni profili batimetrici ha evidenziato che in corrispondenza delle zone di maggior perdita altimetrica del litorale emerso si è verificata una certa destabilizzazione del litorale sommerso con un incremento della pendenza media.

Ai rilievi di campagna sono stati affiancati studi più teorici.

L'interdipendenza esistente tra depressurizzazione del sistema acquifero e subsidenza è stato analizzato con i più recenti criteri statistici evidenziando una relazione lineare tra la causa e l'effetto.

Il fenomeno è stato simulato con un nuovo modello matematico tridimensionale non lineare agli elementi finiti formato da un modulo idrologico "quasi 3-D" ed un modulo di consolidazione monodimensionale verticale in cui le caratteristiche idrogeologiche degli aquitard dipendono dalla tensione intergranulare efficace. La non-linearità è stata risolta con uno schema iterativo che, per la particolare struttura del modello, è equivalente ad uno schema di

sovrarilassamento a blocchi. La calibrazione del modello ha consentito di riprodurre il fenomeno in modo soddisfacente dal 1930 al 1973, durante il periodo più critico per il sistema lagunare.

1. INTRODUZIONE

La subsidenza del suolo, sia nella sua componente naturale che in quella antropo-indotta, è ovunque il risultato in superficie di processi che si esplicano nel sottosuolo e che sono correlabili alla storia geologica del territorio.

La subsidenza naturale ha una evoluzione lenta avvertibile in tempi storici o addirittura geologici mentre l'incidenza antropica si esplica nell'arco di una o due generazioni con effetti gravi e quindi avvertibili in tempi brevi.

La subsidenza di Venezia, pur essendo attiva da sempre nel territorio, è diventato uno dei più gravi problemi ambientali dagli anni cinquanta, in concomitanza al ripetersi anomalo di eventi di acqua alta. Fu chiaro, come peraltro suggerito dalla casistica mondiale, che la causa prima del fenomeno era l'estrazione intensiva di acque sotterranee, che aveva dato un impulso notevole all'abbassamento naturale.

Nell'area veneziana il consolidamento dei sedimenti fini di recente deposito è la causa primaria di subsidenza naturale; in misura decisamente inferiore contribuiscono le deformazioni tettoniche del substrato. Fino ad oggi non è stato però possibile valutare separatamente i due contributi ed è altresì risultato difficile accertarne l'entità complessiva considerati gli esigui valori in gioco ed i disturbi che vi si possono sovrapporre. Stime medie del fenomeno sono possibili per gli ultimi sei-settemila anni, ossia dall'origine della laguna ad oggi. Dagli studi effettuati^{1,2,3} è emerso che la subsidenza del bacino lagunare e dei territori circostanti si è esplicata in modo differenziale nel tempo e nello spazio, in relazione ai diversi eventi deposizionali succedutesi e ai complessi fenomeni di collasso dei sedimenti fini avvenuti con la sostituzione delle originarie acque interstiziali dulcicole con quelle saline.

La prima stima di 1 mm/anno, dedotta dalla profondità di reperti archeologici in laguna⁴, rappresenta un valore abbastanza coerente con quello ottenuto dalle radiodazioni di resti organici della serie olocenica (1-2 mm/anno)^{5,6,7}. Il tasso medio di subsidenza del periodo evolutivo della laguna prima dell'intervento dell'uomo sarebbe stato pertanto dell'ordine di 1,5 mm/anno. L'abbassamento naturale del suolo è comunque nettamente differenziato dalla terraferma al mare con valori massimi nelle aree costiere, nelle zone di Chioggia e deltizie.

La laguna dopo essersi attestata grossomodo nell'attuale configurazione era destinata a scomparire, divenendo un'area continentale, a causa dei copiosi tributari solidi che riversavano nel suo interno i fiumi Adige, Bacchiglione, Brenta, Sile e Piave. Il tasso di sedimentazione era infatti di gran lunga superiore a quello di compattazione naturale e nemmeno il contributo di innalzamento eustatico del livello marino riusciva a compensare la tendenza evolutiva in atto.

Per conservare l'ambiente e le proprie attività marinare, la Serenissima eseguì a partire dal 1400 diversi interventi idraulici di "diversione a mare" dei fiumi immissari. Queste opere, che si protrassero sino a tutto il settecento, pur conservando come da programma gli specchi d'acqua lagunari, produssero grandi sconvolgimenti ambientali sia all'interno del bacino che lungo i litorali. La subsidenza naturale, non più compensata dagli apporti alluvionali dei fiumi, finì per prevalere favorendo lo sprofondamento del cratere lagunare e del suo territorio confinante, evento che si attenuò solo nell'ultimo secolo. Con la sottrazione delle acque dolci il carattere della laguna divenne progressivamente più salino. Inoltre dagli inizi del 1800 le trasformazioni effettuate alle bocche, dentro il bacino e lungo i litorali, si susseguirono in modo più frequente mescolando tra loro processi erosivi e di subsidenza.

Dopo i vari interventi antropici brevemente ricordati, la subsidenza, inizialmente più accentuata, è andata riducendosi. Il tasso medio di abbassamento calcolato per Venezia ed il suo entroterra per i primi decenni del novecento (fino al 1930, prima cioè degli sfruttamenti di acque sotterranee) risulta pari a 0.4 mm/anno.

Dal 1930 al 1973 la subsidenza antropica, sulla quale si è molto investigato e scritto^{8,9,10}, ha contribuito in modo marcato ad aggravare la precaria situazione veneziana. Si ritiene utile ricordare solo con cenni essenziali le tappe evolutive del fenomeno.

L'abbassamento antropico del suolo in questo periodo è stato causato in massima parte dagli emungimenti incontrollati delle sei falde artesiane che si susseguono fino a 320 metri di profondità, sistema acquifero studiato dal CNR, ISDGM con grande dettaglio¹¹.

Con lo sviluppo dal 1930 della zona industriale di Marghera il fabbisogno idrico fu soddisfatto con lo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee che si intensificò notevolmente nel periodo di massima espansione industriale postbellico. I sei acquiferi furono progressivamente depressurizzati ed alla fine degli anni sessanta il calo piezometrico medio fu di circa 2 atmosfere. Il cono di depressione aveva il suo apice nell'area industriale e coinvolgeva asimmetricamente il centro storico. Con stretta dipendenza fra causa ed effetto, la depressurizzazione indotta negli acquiferi accelerò il

naturale processo di consolidazione dei diaframmi argillosi (aquitard) provocando quindi una subsidenza in superficie che raggiunse i valori massimi a Marghera ma che fu altrettanto grave a Venezia malgrado i dimezzati cali piezometrici qui registrati. In particolare tra il 1968 e il 1969 furono registrati i tassi di subsidenza più critici di 17 mm a Marghera e 14 mm a Venezia. Anche il litorale di Lido subì un preoccupante abbassamento del suolo in questo periodo.

In sintesi dal 1952 (livellazione di riferimento) alla fine degli anni '60, il suolo risultava mediamente abbassato di 14 cm a Marghera (dove localmente furono raggiunti 18 cm) e di oltre 10 cm a Venezia. Questo abbassamento, modesto in valore assoluto, creò notevoli preoccupazioni data la già precaria altimetria della città lagunare sul livello del mare.

Dopo il 1970 iniziò una fase di regolamentazione e diversificazione degli approvvigionamenti idrici. La ripresa piezometrica fu generale e relativamente rapida. Parallelamente alla ripressurizzazione delle falde la subsidenza rallentò progressivamente fino ad annullarsi (livellazione del 1973) e nel 1975 si registrò un esiguo ma significativo ricupero altimetrico che nel centro storico fu di circa 2 cm. Questo *rebound*, dell'ordine del 20% della deformazione totale subita dal sistema, rappresenta la risposta elastica dei sedimenti finì ripressurizzati ed era stata prevista dal primo modello matematico sviluppato per simulazione del fenomeno^{12,13}.

2. LA SUBSIDENZA NEL VENTENNIO 1973-1993

Dopo aver verificata l'arrestarsi del processo antropico di subsidenza, mentre le campagne piezometriche di controllo da parte del CNR ISDGM^{14,15,16} proseguirono negli anni, solo alcuni rilievi altimetrici furono effettuati da Enti diversi in modo parziale e sporadico (causa principale la limitata disponibilità finanziaria). Nel 1993, nell'ambito del "Progetto Sistema Lagunare Veneziano"⁽¹⁾ è stato possibile eseguire una livellazione di alta precisione che, seguendo le linee Treviso - Mestre - Venezia - centro storico - circumlagunare, ha effettuato lo stesso percorso della livellazione CNR 1973, l'ultima ad avere coperto l'intero comprensorio⁽²⁾.

(1) La livellazione 1993 è stata curata dalla Linea di Ricerca 2.7 "Modellistica della Subsidenza Veneziana". responsabile dott. Laura Carbognin.

(2) La livellazione ha percorso separatamente anche le tratte Conegliano-Treviso-Venezia, come il rilievo 1975 per un più completo confronto e per la verifica della stabilità del caposaldo di partenza a Treviso¹⁷.

2.1 Elaborazione ed analisi dei dati

Il confronto dell'altimetria attuale con quella del 1973, permette di fare un'analisi completa sulla subsidenza esplicitasi nel territorio veneziano negli ultimi vent'anni^{17,18,19}.

Una prima visione sinottica del fenomeno ci è fornita dalla mappa delle linee di isosubsidenza 1973-1993, ricostruita con il metodo di interpolazione stocastica del Kriging per l'intero comprensorio (Fig. 1). Appare evidente che esiste un'area stabile, comprendente le zone di terraferma da Treviso a Mestre, quelle di gronda nonché il centro storico, e un'area più propriamente lagunare-litorale dove l'abbassamento del suolo non è trascurabile, benché i tassi di subsidenza relativi al periodo '73-'93 non siano paragonabili per gravità a quelli del precedente ventennio critico '50-'70.

Un riassunto dei valori caratteristici delle variazioni altimetriche del periodo 1953-1973 è fornito in Tabella 1.

LINEE DI LIVELLAZIONE	VARIAZIONI ALTIMETRICHE (cm) 1973-1993			
	VALORE MEDIO	MEDIA ANNUA	VALORI MASSIMI	VALORI MINIMI
TREVISO-MESTRE	-0.55	-0.03	-2.90	0.39
MESTRE-VENEZIA	0.27	0.01	-0.91	1.62
VENEZIA (centro storico)	0.30	0.02	-3.58	1.64
MESTRE-BRONDOLO	-1.51	-0.08	-10.04	1.93
MESTRE-JESOLO	-2.40	-0.12	-7.97	0.30
LITORALE DI CHIOGGIA	-3.08	-0.15	-4.78	-1.83
LIT. DI PELLESTRINA	-3.01	-0.15	-5.39	-0.95
LITORALE DI LIDO	-2.49	-0.12	-4.45	-0.21
LIT. CAVALLINO-JESOLO	-4.44	-0.22	-9.40	-2.04

Tab. 1: Statistiche elementari della subsidenza nel periodo 1973-1993.

Per visualizzare con maggior dettaglio l'altimetria relativa a singole linee di livellazione o specifiche località si sono prodotti diversi profili e mappe di subsidenza. Prima di analizzarli, si ritiene opportuno spiegare la presenza di isolati picchi di subsidenza, più o meno importanti, registrati lungo il bordo lagunare e lungo i litorali. I primi sembrano imputabili a sfruttamenti artesiani molto localizzati, i secondi a situazioni particolari quali i dissesti delle strutture foranee alle bocche di porto in atto al momento della misura (lavori di ripristino e consolidazione dei moli sono in corso dal 1994).

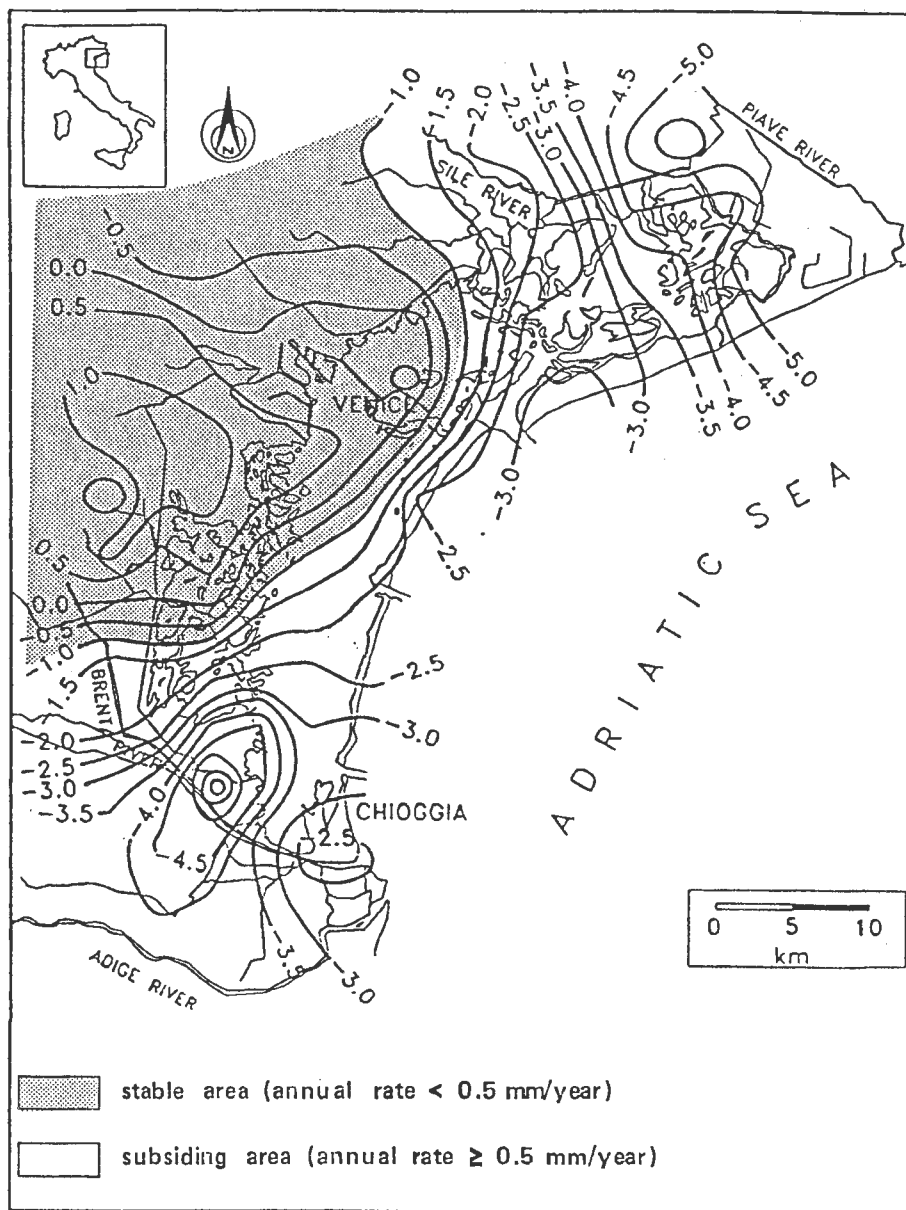


Fig. 1:-Mappa della subsidenza (cm) dal 1973 al 1993 nel comprensorio lagunare.

Treviso - Venezia

In Figura 2 è riportata l'altimetria del percorso Treviso-Venezia (Punta della Dogana) che, per un confronto temporale completo, ha come base di riferimento le quote della livellazione del 1952. Si può osservare come l'altimetria del 1993 ricalchi grossomodo quella del 1973 a dimostrazione che queste aree non sono più subsidenti. In particolare nel tratto Treviso-Mestre l'abbassamento medio annuo del periodo 1973-1993 è stato di 0.3 mm/anno e lungo la linea che attraversa il centro storico la media è addirittura positiva indicando così la totale stabilità del suolo di queste zone. Resta comunque la depressione altimetrica precedentemente formatasi con apice nella zona industriale, a comprova della quasi totale irreversibilità della compattazione dei diaframmi argillosi e della conseguente subsidenza superficiale.

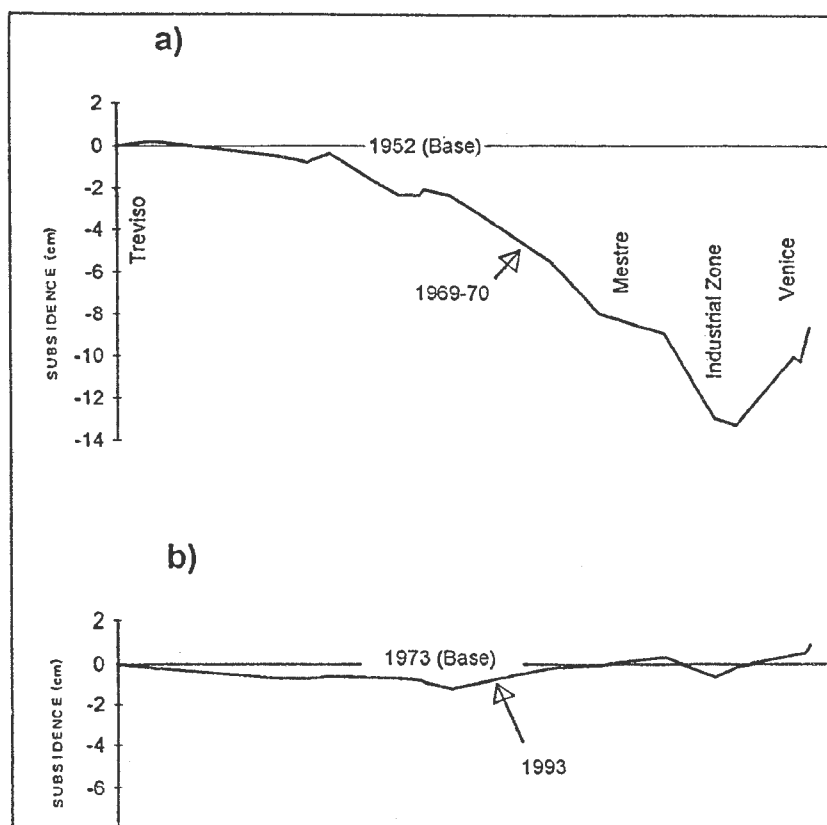


Fig. 2- Grafico comparativo dell'altimetria da Treviso a Venezia (P.ta della Dogana) dal 1952 (base) al 1993.

Venezia centro storico

A Venezia, che per importanza e precarietà è sempre stata l'area più studiata e controllata, esiste una fitta rete di capisaldi (123 su 8 Km², 65 dei quali confrontabili sin dal 1961) che ha permesso di delineare con grande dettaglio la situazione altimetrica cittadina.

Le linee di isosubsidenza relative al ventennio 1973-1993, confrontate con quelle del periodo più critico 1961-1969 (Fig. 3), confermano la situazione di stabilità del suolo verificata dai rilievi 1973 e 1975 e offrono altresì spunti per interessanti interpretazioni. Innanzitutto, i valori di subsidenza relativi all'area più vicina alla terraferma evidenziano per il periodo 1961-1969 il coinvolgimento del centro storico nel cono di abbassamento della zona industriale; tuttavia nella stessa zona occidentale (Marittima-Tronchetto) e in quella orientale (S. Elena-Giardini), entrambe di recente interrimento, si riscontra anche nel periodo 1973-1993 un locale abbassamento che induce a ritenere che questi terreni non si siano ancora completamente consolidati. Questo processo di consolidazione, che indubbiamente si esplicava anche in passato, venne "mascherato" nel periodo critico dal più consistente processo indotto. Abbassamenti ancora più localizzati, sia pure di scarsa entità, sono misurati attorno ad alcuni canali principali ad indicare, secondo gli Autori, l'influenza delle correnti che possono qui indurre modesti fenomeni erosivi.

Resta comunque il fatto che la subsidenza non è più oggi "il problema ambientale" di Venezia, benché la città subisca tuttora gli effetti prodotti sulla sua già precaria situazione dal passato abbassamento.

Mestre - Brondolo e Mestre - Jesolo

Si era precedentemente messa in risalto la presenza nel comprensorio di due aree a diverso comportamento altimetrico (Fig. 1). L'evidenza di questa affermazione è riscontrabile dai grafici relativi alle linee di livellazione circumlagunari e entroterra (Fig. 4a). L'andamento dell'altimetria 1993 riferita a quella del 1973 dimostra come procedendo sia da Mestre a Jesolo (circumlagunare Nord) che da Mestre a Brondolo (circumlagunare Sud) si passi gradualmente a valori di subsidenza più elevata.

Brondolo - Jesolo

L'abbassamento riscontrato nei tratti estremi delle linee circumlagunari interessa anche l'intero tratto costiero (da Brondolo-Chioggia ai litorali di Cavallino e Jesolo) con valori grossomodo comparabili (Fig. 4b). Non si evidenzia cioè un trend diverso per i singoli cordoni litoranei lagunari dove mediamente i valori di abbassamento sono analoghi malgrado la variabilità

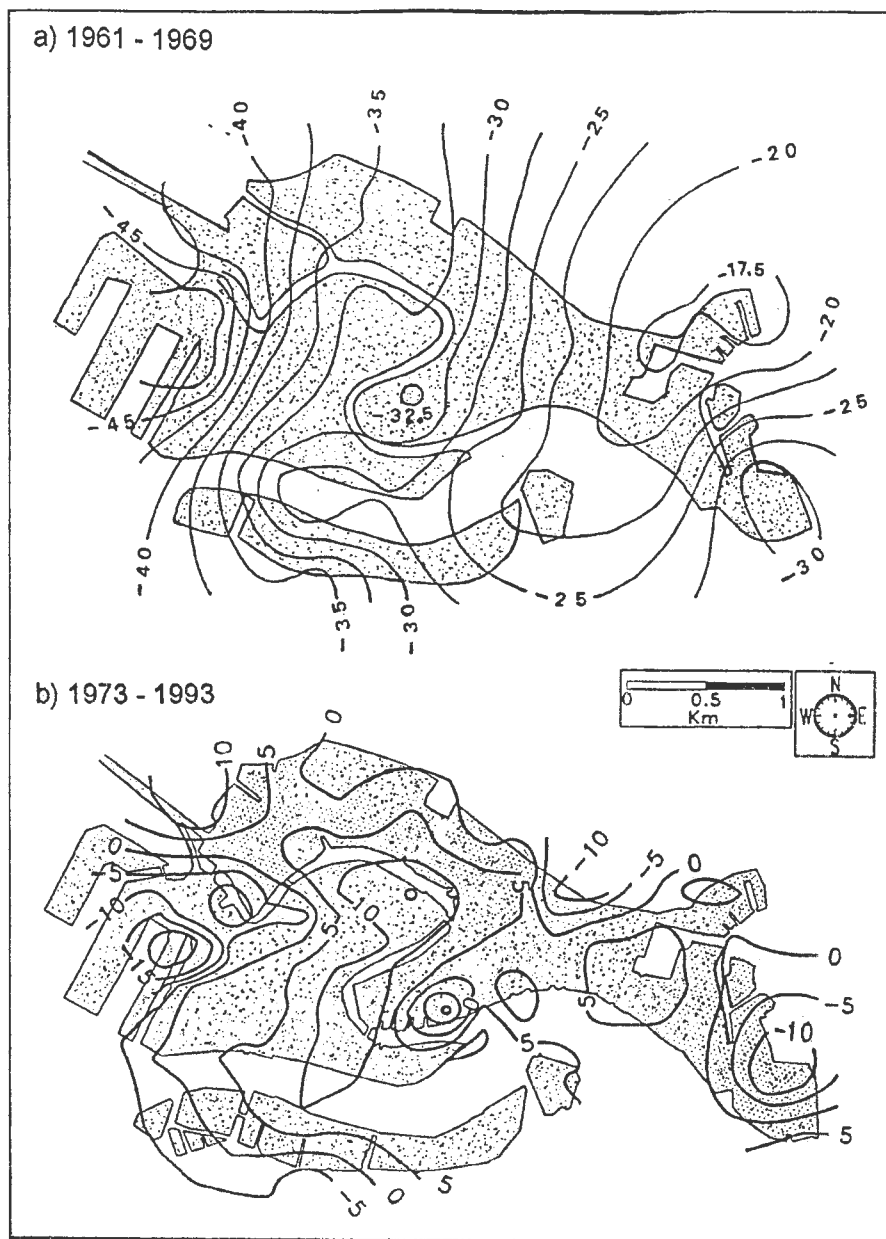


Fig. 3- Subsidenza a Venezia: mappa delle isocinetiche (mm) (a) 1961-1969 e (b) 1973-1993.

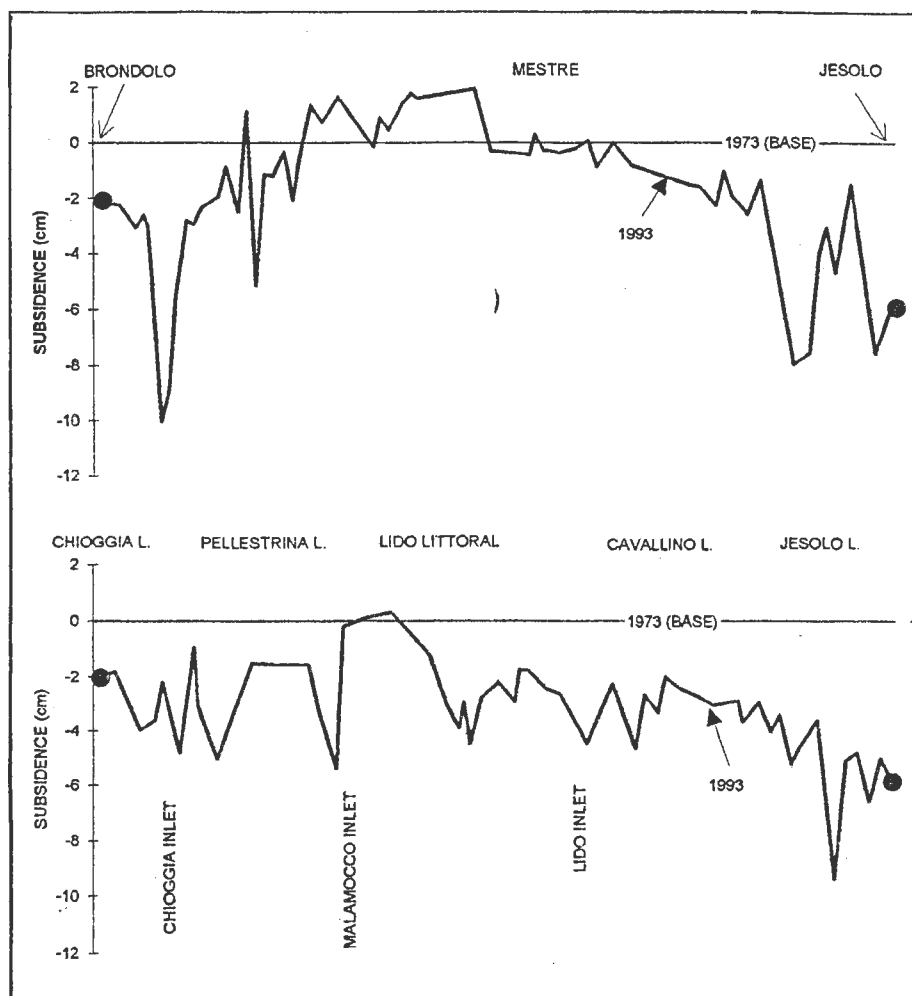


Fig. 4- Profilo altimetrico 1973-1993 delle linee di livellazione circumlagunari.

delle quote dei singoli capisaldi. Proseguendo verso Jesolo invece, area che appartiene più propriamente all'estremo bordo lagunare Nord, gli abbassamenti del suolo aumentano progressivamente. Il litorale veneziano ha infatti subito un abbassamento medio del tutto simile e dell'ordine di circa 0.15 cm/anno, mentre tale valore aumenta a 0.22 nel tratto Cavallino-Jesolo dove sono stati misurati i maggiori abbassamenti litoranei (v. Tab. 1).

L'analisi grafica separata dei singoli lidi porta ad interessanti osservazioni.

A *Sottomarina* (Fig. 5a), lido senza problemi ambientali (geomorfologici) particolari, il tasso di abbassamento medio rientra in quello naturale, tenendo presente che ci si trova in aree di recente deposizione e prossime a zone di delta.

Pellestrina (Fig. 5b) è viceversa il tratto costiero più precario in assoluto e la sua "cronica" precarietà è ben nota. Per questo l'attenzione qui rivolta deve essere maggiore. In questo tratto appare particolarmente significativo rispetto agli altri lidi l'abbassamento di circa 5 cm in corrispondenza di Cà Roman dove il litorale è costituito da soli murazzi. Di notevole importanza sono anche gli abbassamenti (massimo assoluto e massimo relativo) dei capisaldi infissi sui moli foranei della Bocca di Chioggia (c.s. 6\CDV2=-4.78 cm) e di Malamocco (c.s.18\CDV2=-5.39 cm) imputabili a locali cedimenti delle strutture.

Lungo il litorale di *Lido* (Fig. 5c) si può osservare la stabilità altimetrica dell'estremità Sud e un generale abbassamento che mediamente aumenta, anche se non è presente un trend ben delineato, a partire dal settore centrale fino all'estremità Nord. In particolare, è emerso che gli abbassamenti più sensibili si sono registrati nelle aree un tempo adibite a coltivazione agricola che a partire dagli anni '80 hanno completamente modificato la loro destinazione d'uso in zona residenziale.

Il litorale nord, *Cavallino-Jesolo*, presenta come detto in precedenza valori ventennali di abbassamento più elevati nella zona di Jesolo rispetto a quella del Cavallino (Fig. 5d).

2.2 L'evoluzione dei fondali sottocosta

Alla precarietà del litorale la subsidenza ha contribuito in modo non trascurabile come dimostra l'evoluzione temporale dei fondali sottocosta. In generale la subsidenza in zone costiere basse come il litorale emiliano-romagnolo induce regressioni della linea di riva²⁰; questo non avviene lungo il litorale veneziano dove i "murazzi" agiscono come barriera fissa impedendo

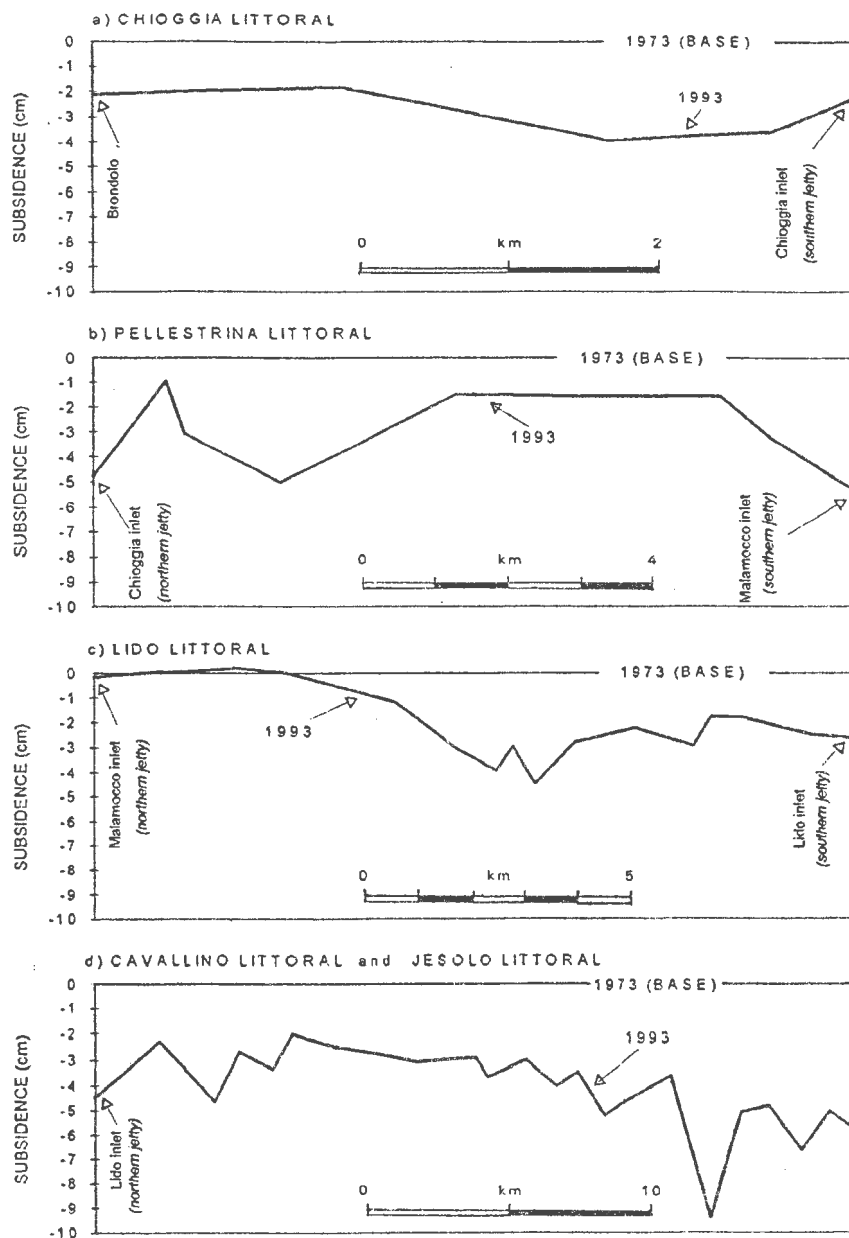


Fig. 5- Profilo altimetrico 1973-1993 delle linee di livellazione litoranee: (a) Chioggia, (b) Pellestrina, (c) Lido e (d) Cavallino ed il litorale di Jesolo.

l'ingressione del mare la cui azione distruttiva si sviluppa nella zona del litorale sommerso²¹.

Questo processo è bene evidenziato dal confronto temporale dei rilievi batimetrici eseguiti tra la linea di riva e l'isobata dei 5 m negli ultimi quarant'anni circa (Fig. 6)⁽³⁾. Il tratto di Chioggia, dal 1954 al 1982 mostra modeste variazioni e risulta il tratto costiero più stabile. Al contrario il tratto di Pellestrina presenta forti aumenti di pendenza con i massimi valori nel 1968. I rilievi 1988 e 1992, pur evidenziando modesti recuperi, mantengono sempre pendenze maggiori del 1%, indicative di forte degrado ambientale e instabilità. Il tratto di Lido, dopo gli aumenti mostrati nel 1968 rispetto al 1954, con pendenze che da minori di 0.50% arrivano a 0.50-0.75%, presenta anche nei rilievi 1982, 1988 e 1992 pendenza in lieve aumento con tratti compresi tra 0.75% e 1%. Il tratto del Cavallino mostra un più rapido aumento delle pendenze nel 1982, un parziale recupero nel 1988 (anche se non ritorna alla situazione 1954) ed un forte aumento di pendenza nel rilievo 1992 che è anomalo rispetto all'evoluzione degli altri tratti del lido veneziano.

In generale, gli approfondimenti dei bassi fondali osservati nel periodo 1954-1968 sono stati in massima parte indotti dalla subsidenza esplicatasi dopo gli anni '50 e dalla concomitanza di alta frequenza di mareggiate distruttive che hanno caratterizzato questo periodo.

Nel periodo 1968-1982 si osserva un rallentamento del precedente trend erosivo, sia pure non generalizzato, in coincidenza dell'arresto del processo di subsidenza e di condizioni meteomarine più favorevoli. Il perdurare di condizioni climatiche positive negli ultimi dieci anni non spiega il nuovo approfondimento dei bassi fondali localmente osservato con i rilievi del 1992. Viceversa la subsidenza rilevata soprattutto lungo il tratto Cavallino-Jesolo dal 1973 al 1993 potrebbe in parte giustificare la nuova evoluzione negativa del litorale stesso. A riprova di ciò, analizzando i 35 profili batimetrici eseguiti nel 1992 lungo i cordoni litoranei²² si è osservato che gli incrementi di pendenza, più o meno modesti corrispondono ai punti di maggior subsidenza litoranea.

In ogni caso, considerati i modesti valori in gioco, la correlazione riscontrata tra i due processi è solo qualitativa.

(3) L'analisi delle batimetrie è frutto della collaborazione con la Linea di Ricerca 2.5 responsabile dott. Francesco Marabini.

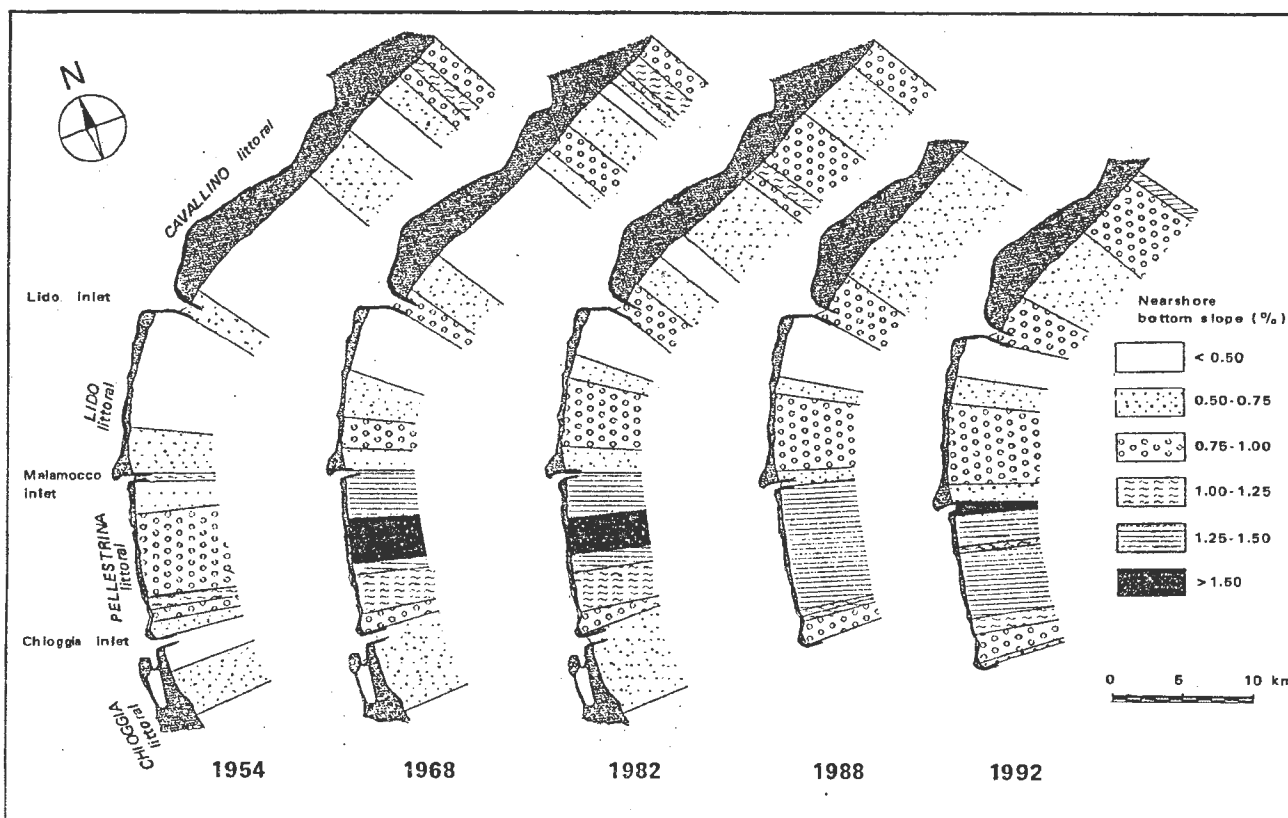


Fig. 6- Variazioni di pendenza del basso fondale (fino all'isobata 5 m) antistante la laguna di Venezia dal 1954 al 1992.

3. METODOLOGIE DI STUDIO DELLA SUBSIDENZA ANTROPICA

Per una più completa analisi del processo di subsidenza, ai diversi rilievi di campagna e studi geologici sono stati affiancati studi più propriamente teorici di natura sia statistica che numerica.

3.1. Analisi statistica della dipendenza tra piezometria e subsidenza

L'interdipendenza esistente fra emungimenti (cali piezometrici) e subsidenza era emersa chiaramente in passato, sia nelle fasi negative dei processi che nella loro evoluzione positiva.

Nell'analisi della relazione causa-effetto⁹, dopo il semplice calcolo della correlazione lineare esistente fra le due quantità si era scritto che "il 70% circa delle variazioni altimetriche registrate fra il 1952 e il 1969 è spiegato dalle variazioni piezometriche. La varianza residua della subsidenza non imputabile agli emungimenti col modello lineare deve attribuirsi a fattori diversi e/o ad altre relazioni di tipo non lineare".

Lo scopo degli studi più recenti è stato quello di verificare, con adeguati criteri statistici, l'esistenza o meno di relazioni esclusivamente lineari.

Questa verifica si riconduce ad un equivalente controllo sulla normalità della distribuzione bivariata. E' infatti noto che l'unica forma di dipendenza esistente fra le due variabili normalmente distribuite non può che essere di tipo lineare altrimenti il fenomeno sarebbe retto da una diversa legge stocastica.

Le assunzioni necessarie per la verifica delle ipotesi di linearità-normalità si riferiscono esclusivamente alla presunta normalità delle variabili x e y separatamente considerate (marginali). Si ricorda che l'analisi della significatività del coefficiente di correlazione lineare r oltre a richiedere le stesse assunzioni sulle marginali, assume direttamente la normalità della bivariata, ed è quindi più restrittiva dei criteri di normalità qui proposti per la valutazione della linearità.

L'analisi in questione è stata svolta per fasi successive fino alla sua completa risoluzione facendo ricorso a test di normalità bivariata noti in letteratura, e a procedure ad hoc^{23,24,25,26,27,28}.

I nuovi criteri proposti utilizzano il test Tn ²⁹ applicato su opportune trasformazioni campionarie utili per ricondurre le variabili marginali a variabili note.

Per ottenere un giudizio sulla linearità del fenomeno si è utilizzato il criterio di indipendenza Tn in quanto, da studi precedentemente svolti da alcuni degli estensori della presente nota²³, è risultato più sensibile di altri test non parametrici fondati sui ranghi delle osservazioni bivariate.

Inoltre, se \underline{x} è tratto dalla v.c. normale m-variata, la v.c. Y_n descritta da \underline{y} (7) converge (per $n \rightarrow \infty$) alla legge normale multivariata di parametri $\mu = \theta$ e $\Sigma = I(N(\theta, I))$.

La trasformazione appena descritta, in *raggio-angolo* permette la conoscenza, sia pure approssimata, delle ripartizioni marginali. Nel nostro caso la distribuzione del raggio (d^2_j) segue la legge del χ^2 con due gradi di libertà, quella dell'angolo Θ è uniforme nell'intervallo $(0, 2\pi]$. Si possono così utilizzare su questa trasformazione i comuni test funzionali noti in letteratura per controllare la normalità delle singole variabili³³.

In sintesi i test di normalità e il criterio Tn utilizzati per lo studio del tipo di relazione intercorrente fra i cali piezometrici e la subsidenza hanno fornito risultati contrastanti.

Tutti i test funzionali descritti da³³ e utilizzati sulla trasformazione raggio-angolo³¹ per la normalità, hanno fornito risultati sempre significativi al livello di probabilità vicino all'1% indicando quindi l'esistenza di relazioni non lineari fra le due variabili.

Il test di indipendenza Tn , applicato secondo le due formulazioni descritte, invece non è mai risultato significativo. In particolare nella prima formulazione ha raggiunto il livello di probabilità del 20% e nella seconda il 17%.

L'analisi di questa risposta è di fondamentale importanza interpretativa in quanto questo criterio è l'unico che prescinde dalla normalità delle due marginali (nella versione applicata sulle permutazioni delle coordinate condizionatamente a $r=0$) ed è quindi applicabile più correttamente per la verifica di relazioni lineari.

Si ricorda inoltre che le due variabili in esame hanno la struttura di "medie" (per quanto riguarda la piezometria infatti, essa è la media delle diverse quote piezometriche di ogni singolo acquifero e, analogamente, la subsidenza misurata in superficie è la sommatoria delle compattazioni dei singoli diaframmi del sistema acquifero); perciò la normalità delle loro marginali dovrebbe essere garantita in virtù dei teoremi sulla somma di v.c. indipendenti. Viceversa, pur essendo statisticamente accettata causa la ridotta numerosità campionaria, appare poco plausibile dall'evidenza grafica: infatti i due istogrammi di frequenza presentano più mode ed una marcata asimmetria²⁸.

Da queste considerazioni si può supporre che la dipendenza non lineare, rilevata dai criteri bivariati, sia trascurabile rispetto a quella lineare e dipenda soprattutto dalle distribuzioni marginali univariate solo prossime alla normale.

Il livello di significatività del test T_n si stima tramite il metodo di Montecarlo con il rapporto tra il numero complessivo di test superiori o uguali al valore di T_n calcolato sulla permutazione campionaria iniziale (γ'', η'') ottenuta ponendo

$$\sigma_{p(i)=i, (i=1, \dots, n)} \quad (6)$$

e il numero complessivo di replicazioni effettuate.

In questo modo il criterio descritto non risulta sensibile all'effetto dell'eventuale dipendenza dovuta alla non normalità del campione originale.

Se le marginali si possono ritenere normali, l'ipotesi di linearità viene controllata tramite test bivariati di normalità.

Si è perciò verificata l'ipotesi di normalità bivariata con il metodo descritto da Gnanadesikan³¹ noto sotto il nome di "raggio-angolo", che in breve si può descrivere come segue: indicando con x_i il generico vettore m -variato di componenti (x, y) costituente \underline{x} ($i=1, \dots, n$), con \bar{x} il vettore medio, con \underline{S} la matrice di varianze e covarianze, con \underline{L} la matrice quadrata di ordine m tale che $\underline{L} \underline{L}' = \underline{S}^{-1}$, dove con \underline{S}^{-1} si indica l'inversa di \underline{S} e con $'$ la trasposta, posto

$$y_i = \underline{L}(x_i - \bar{x}) \quad (7)$$

è noto³¹ che se \underline{x} è tratto dalla v.c. multinormale, il quadrato della distanza (raggio): $d_i^2 = y_i' y_i$ si distribuisce asintoticamente (per $n \rightarrow \infty$) come la v.c. χ^2 caratterizzata da m gradi di libertà.

Negli studi citati si dimostra inoltre, nell'ipotesi di multinormalità, che la distribuzione dell'angolo Θ formato dal vettore y e il primo asse descrive una variabile equidistribuita nell'intervallo $(0, 2\pi]$ ed è indipendente dalla distribuzione del raggio. Ne segue che si possono applicare al raggio e all'angolo due test funzionali e combinare poi i risultati secondo i metodi di combinazione dei test indipendenti ottenendo così un giudizio complessivo sulla multinormalità che nel nostro caso si tradurrebbe immediatamente in ipotesi di linearità della relazione esistente tra le variabili campionate.

In particolare alcuni autori^{31,32} ritengono di potere utilizzare l'approssimazione per il caso bivariato ($m=2$) già da dimensioni campionarie dell'ordine della ventina.

- si considera un generico campione univariato x di n elementi che si suppone sia tratto dalla v.c. normale di ignoti parametri $N(\mu, \sigma)$.
- Si estrae dalla normale di parametri $\mu=0$ e $\sigma=1$ un campione ausiliario q di n elementi: (q_1, \dots, q_n)
- si indica con qm e qv rispettivamente la media del campione q e lo scarto quadratico medio, con xm e xv le stesse quantità calcolate sulle componenti di x ;
- il campione trasformato z ottenuto da:

$$z_i = (x_i - xm)qv/xv + qm \quad (3)$$

è tratto dalla variabile casuale normale standard.

Per le dimostrazioni si rimanda al lavoro citato³⁰.

Tramite la successiva trasformazione (2) si ottengono nuovi campioni bivariati (z, w) caratterizzati da $\rho=0$.

Inoltre, se il campione originale è a componenti x e y normali la v.c. (Z, W) descritta da (z, w) risulta normale bivariata caratterizzata da medie nulle, varianze pari a $(1+\rho), (1-\rho)$ e coefficiente di correlazione nullo.

Ne deriva che l'eventuale significatività del test di indipendenza T_n è attribuibile, accettando la normalità delle marginali, solo a relazioni "non lineari" tra le variabili originali.

La procedura descritta richiede campioni ausiliari ottenuti con numeri pseudo casuali e il test T_n può condurre a conclusioni difformi in termini di significatività anche se applicati sugli stessi dati.

Un ulteriore approccio al problema che non richiede casualizzazioni ausiliarie e non assume la normalità delle due marginali, consiste nella simulazione del test T_n condizionato a $r=0$ considerando le possibili permutazioni del campione y sul campione x . La tabulazione si può descrivere come segue:

- si standardizzano i due campioni ponendo:

$$x'_i = (x_i - xm)/xv \quad y'_i = (y_i - ym)/yv; \quad (4)$$

- si calcola il test generando permutazioni casuali $\sigma_{p(i)}$ dei primi n numeri naturali: $(x'_i, y'_{\sigma_{p(i)}})$
- su trasformazioni (γ'', η'') così definite:

$$\gamma''_i = x'_i + y'_{\sigma_{p(i)}} \quad \eta''_i = x'_i - y'_{\sigma_{p(i)}} \quad (5)$$

Questo criterio è fondato sulla differenza tra la funzione empirica bivariata $S_n(x,y) = \#(x_i \leq x, y_i \leq y)/n$ e il prodotto delle funzioni di ripartizione empiriche associate alle singole componenti del campione x : $S_n(x) = \#(x_i \leq x)/n$ e del campione y : $S_n(y) = \#(y_i \leq y)/n$:

$$T_n = \sup |S_n(x,y) - S_n(x)S_n(y)| \sqrt{n} \quad (1)$$

Per le sue caratteristiche questo test ammette distribuzione indipendente dalla struttura delle due variabili marginali.

Questo criterio è stato applicato per il controllo della linearità della bivariata (subsidenza e piezometria) secondo due distinte formulazioni che rispettivamente assumono e non la normalità delle marginali. Gli altri test qui presi in esame (test di normalità multivariati) invece presuppongono ovviamente la normalità delle singole variabili separatamente considerate.

Un noto teorema afferma:

Indicate con X e Y due v.c. arbitrarie con uguali medie, posto:

$$Z = (X+Y)/\sqrt{2}, \quad W = (X-Y)/\sqrt{2} \quad (2)$$

Se $E\{X^2\} = E\{Y^2\}$ le v.c. Z e W sono incorrelate ($\rho=0$)

Se (X,Y) è normale bivariata Z e W sono indipendenti.

Se le variabili Z e W sono indipendenti allora la coppia (X,Y) si distribuisce secondo la legge normale bivariata.

Il teorema è valido nell'ipotesi della normalità bivariata della v.c. (X,Y) che, come noto, implica la normalità delle singole v.c. marginali.

Per ricondurci nelle condizioni espresse dall'enunciato del teorema è necessario che le v.c. marginali abbiano i primi due momenti (media e varianza) uguali e che siano normali.

Assumendo la normalità delle marginali X e Y è possibile ricondurre il campione x e, separatamente, il campione y , tramite la trasformazione nota come "random substitution"³⁰, a campioni tratti da variabili normali con parametri noti (in particolare caratterizzate da media nulla e varianza unitaria) come richiede il teorema citato.

In breve la "random substitution" si articola come segue:

Come detto, solo il test Tn tabulato sulle permutazioni campionarie risulta completamente indipendente dalla marginali essendo condizionato ai dati del campione osservato.

Possiamo quindi affermare, sulla base dei risultati ottenuti, che la distribuzione bivariata della subsidenza e della piezometria è sicuramente di tipo non normale e caratterizzata comunque da significative relazioni lineari ($r=0,798$) fra le due variabili che assorbono tutta la dipendenza.

Non si è quindi in grado di imputare il residuo ($1-r^2$) di varianza delle relazione lineare ad ulteriori relazioni funzionali fra le due variabili bensì ad una *variabilità naturale* intrinseca al fenomeno.

3.2. Modello numerico 3-D non lineare di subsidenza antropica

La simulazione della subsidenza antropica verificatasi nel comprensorio veneziano a seguito dell'intensivo sfruttamento del sistema acquifero multistrato è stata eseguita tramite un nuovo modello matematico agli elementi finiti che ha consentito di superare le principali limitazioni dell'analisi modellistica svolta negli anni settanta^{9,12,13,34}: la simmetria assiale del dominio di integrazione dell'equazione di flusso e la linearità dei parametri idrogeologici.

3.2.1 Il modello matematico agli elementi finiti

Il modello matematico sviluppato per simulare a scale regionale il campo di flusso che si instaura in un sistema filtrante multistrato, la compattazione degli strati argillosi presenti nel sistema stesso e la subsidenza in superficie è formato da un modello "quasi 3-D" di flusso ed un modello 1-D verticale di consolidazione, ed utilizza il principio della tensione intergranulare effettiva di Terzaghi con alcune leggi costitutive empiriche per la descrizione del comportamento del terreno.

Il campo di moto che si instaura all'interno di un sistema filtrante multistrato (formato da m acquiferi e $m-1$ aquitard) a seguito dell'estrazione d'acqua è fortemente dipendente dal contrasto tra le permeabilità degli acquiferi e degli strati argillosi interposti che, se elevato, consente di assumere come orizzontale la direzione del flusso negli acquiferi e verticale quella negli aquitard (approccio "quasi 3-D"). In questo caso, le equazioni di flusso nell'acquifero i -esimo (confinato tra gli aquitard j e $j+1$) e nell'aquitard j possono essere scritte, rispettivamente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xi} \frac{\partial h_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yi} \frac{\partial h_i}{\partial y} \right) = S_i \frac{\partial h_i}{\partial t} + q_j - q_{j+1} \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zj}(n) \frac{\partial h_j}{\partial z} \right) = S_{sj}(n, \sigma') \frac{\partial h_j}{\partial t} \quad (2)$$

dove T_{xi} , T_{yi} , S_i , K_{zj} e S_{sj} sono le componenti della trasmissività ed il coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero i , la permeabilità verticale ed il coefficiente di immagazzinamento specifico dell'aquitard j , q_j e q_{j+1} rappresentano il contributo di "leakage" degli aquitard sovrastante e sottostante l'acquifero i , h è il potenziale idraulico, t il tempo, x , y , e z il sistema di coordinate spaziali. K_{zj} è funzione della porosità n e S_{sj} è funzione di n e della tensione intergranulare efficace σ' .

Le equazioni (1) e (2) sono accoppiate imponendo la continuità del potenziale idraulico e del flusso su ciascuna interfaccia acquifero-aquitard e sono risolte numericamente con il metodo degli elementi finiti discretizzando gli acquiferi con triangoli e gli aquitard con elementi monodimensionali verticali. L'applicazione dello schema di Crank-Nicolson per l'integrazione nel tempo genera un sistema sparso di equazioni non lineari in quanto K_{zj} e S_{sj} dipendono da h_j . Noto il valore iniziale della permeabilità K_{z0} e della porosità n_0 , calcolato il valore iniziale di σ' nel punto di interesse tramite la legge di Terzaghi, le relazioni empiriche non lineari che legano i parametri idrogeologici degli aquitard a σ' (con $\sigma' > \sigma'_{pre}$ di preconsolidazione) utilizzate nel modello sono³⁵:

$$n = n_0 - 0.434C_c(1 - n)^2 \frac{d\sigma'}{\sigma'} \quad (3)$$

$$K_z(n) = K_{z0} \left[\frac{n(1 - n_0)}{n_0(1 - n)} \right]^g \quad (4)$$

$$S_s(n, \sigma') = \gamma_w \left(0.434C_c \frac{1 - n}{\sigma'} + n\beta \right) \quad (5)$$

dove g è un coefficiente che dipende dal tipo di materiale, γ_w e β sono il peso specifico e la compressibilità dell'acqua e l'indice di compressione C_c deve essere sostituito da quello di ricompressione C_s se $\sigma' < \sigma'_{pre}$.

La non-linearità del sistema algebrico ottenuto dall'integrazione numerica delle equazioni di flusso è risolta con un'originale procedura iterativa^{36,37,38} suggerita dalla struttura geologica dell'acquifero multistrato e dalla discretizzazione in elementi finiti adottata che producono una matrice dei coefficienti del sistema algebrico tri-diagonale a blocchi. Tale procedura è equivalente allo schema iterativo di Gauss-Seidel a blocchi ed è stato generalizzato nello schema di sovrarilassamento (SOR) a blocchi in cui il valore ottimo del fattore di rilassamento ω è calcolato numericamente per tentativi. Suddivisa la matrice del sistema in $N \times N$ blocchi, dove ciascun blocco è relativo all'equazione di flusso di un'unità stratigrafica e quindi $N = m + m - 1 = 2m - 1$, l'algoritmo di SOR a blocchi può essere espresso come³⁹.

$$D_{i,i} \mathbf{h}_i^{k+1} = D_{i,i} \mathbf{h}_i^k + \omega \left\{ -L_{i,i-1} \mathbf{h}_{i-1}^{k+1} - U_{i,i+1} \mathbf{h}_{i+1}^k + \mathbf{b}_i - D_{i,i} \mathbf{h}_i^k \right\} \quad (6)$$

$$1 \leq i \leq N, \quad k \geq 0$$

dove k è il numero dell'iterazione, $D_{i,i}$ è un blocco diagonale quadrato contenente i termini della matrice relativa allo strato i , $L_{i,i-1}$ e $U_{i,i+1}$ sono matrici rettangolari extra-diagonali contenenti i termini di accoppiamento tra lo strato i -esimo e quelli a contatto soprastante e sottostante rispettivamente, \mathbf{h}_i e \mathbf{b}_i contengono i valori nodali del potenziale idraulico ed i termini noti dello strato i -esimo. Quando lo schema (6) è riferito ad un blocco relativo ad un acquifero (i dispari), la matrice $D_{i,i}$ del sottosistema generato dalla (6) è sparso e la soluzione viene ottenuta con il metodo del gradiente coniugato modificato⁴⁰; se i è pari (blocco aquitard), $D_{i,i}$ è tri-diagonale ed il sottosistema viene risolto con l'algoritmo di Thomas⁴¹. Dopo ciascuna iterazione, i coefficienti delle matrici relative agli aquitard vengono aggiornate per tener conto della dipendenza di K_z e S_s dalla tensione efficace che, a sua volta, è collegata al potenziale h .

Quando la variazione Δh che avviene nell'intervallo temporale Δt è calcolata, la subsidenza η che si manifesta nello stesso intervallo temporale è calcolata con un modello 1-D non lineare di consolidazione che fornisce l'abbassamento del suolo come somma della compattazione di ciascuno strato argilloso tramite l'equazione ($\sigma' > \sigma'_{pre}$)³⁵:

$$\eta(\Delta t) = \sum_{j=1}^{m-1} \sum_{k=1}^l 0.434 \gamma_w (1-n) \frac{C_c}{\sigma'} \Delta h_{k,j} \Delta b_{k,j} \quad (7)$$

dove l è il numero di elementi verticali con cui ciascun aquitard è discretizzato e $\Delta b_{k,j}$ è la lunghezza del k -esimo elemento finito dell'aquitard j .

3.2.2 La ricostruzione 3-D geologica del sistema multistrato veneziano

Il sistema filtrante multistrato veneziano ha la sua area di ricarica nella zona che si estende dalle Alpi fino all'allineamento Cittadella-Castelfranco-Treviso; da qui il sistema di acquiferi artesiani diventa ben sviluppato fin a raggiungere la linea di costa. Gli altri limiti naturali del sistema possono essere collocati verso Est e Sud-Ovest nel fiume Piave e nei fiumi Brenta, Bacchiglione e Adige, rispettivamente (Fig. 7).

La ricostruzione geologica a scala regionale dei sei acquiferi sfruttati è stata eseguita sulla base di alcune ricostruzioni stratigrafiche (Fig. 7) ottenute dai molti pozzi artesiani distribuiti nella zona^{11,42,43} e dall'accurato profilo stratigrafico del pozzo profondo VE1 CNR eseguito a Venezia al Tronchetto⁴⁴.

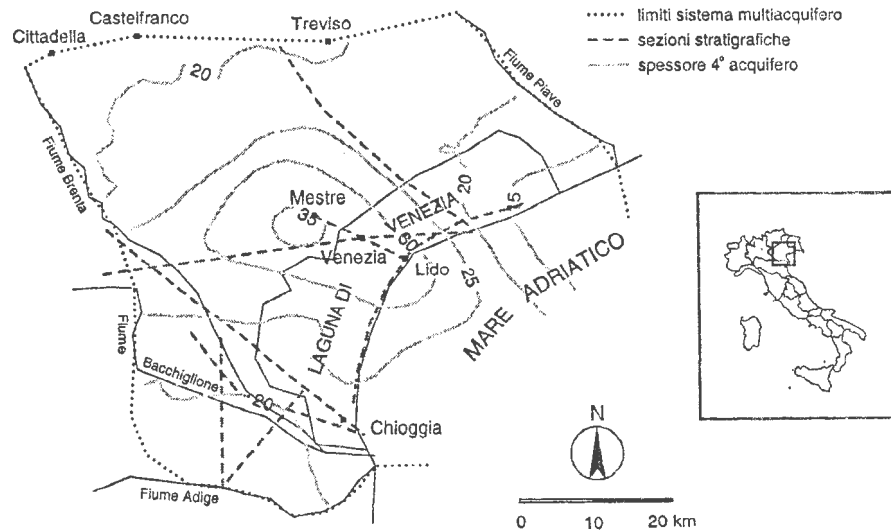


Fig. 7- Mappa del sistema multiacquifero veneziano; sono riportate la traccia delle sezioni stratigrafiche disponibili e le curve di livello di eguale spessore (m) del 4° acquifero.

Utilizzando una procedura di interpolazione bilineare, sono state create delle mappe degli spessori e delle profondità del top e del bottom di ciascuno dei livelli di interesse ed utilizzate nelle simulazioni. A titolo di esempio, sono riportate in Figura 7 le curve di eguale spessore del 4° acquifero, mentre la Figura 8 presenta una visione prospettica globale del modello regionale agli elementi finiti utilizzato nella simulazione del sistema multistrato veneziano.

Per quanto riguarda le proprietà idrogeologiche delle formazioni geologiche sono stati in generale adottati i valori utilizzati da Gambolati *et al.*¹². I valori di trasmissività degli acquiferi sono stati integrati con quelli ottenuti da recenti indagini sperimentali⁴⁵ mentre gli indici di compressione e ricomprensione sono stati calcolati rianalizzando i risultati delle prove di consolidazione eseguite sui campioni prelevati dal pozzo profondo VE1 CNR.

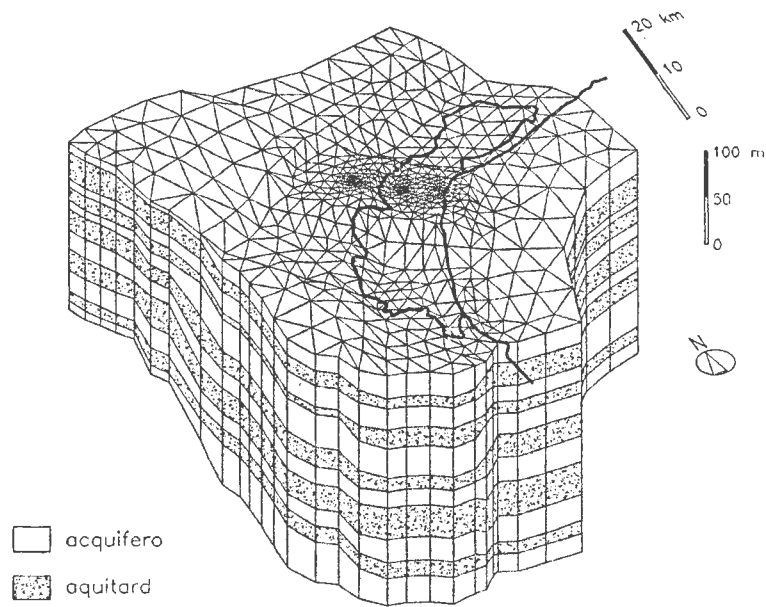


Fig. 8- Prospettiva tridimensionale del modello regionale agli elementi finiti utilizzato per la simulazione idrologica del sistema multiacquifero veneziano.

3.2.3 La simulazione del fenomeno nel periodo 1930-73

Il modello non lineare è stato calibrato sul periodo 1930 al 1973³⁵, il più critico per il sistema filtrante lagunare, utilizzando le misurazioni del carico piezometrico e della subsidenza disponibili in letteratura.

Assumendo impermeabili il top ed il bottom del sistema multiacquifero ed utilizzando condizioni al contorno di Dirichlet (il livello medio del mare sul boundary in mare, il livello del terreno sulla linea che separa il sistema multistrato dalla zona di ricarica ed i livelli medi dell'acqua lungo i contorni coincidenti con i fiumi), il modello di flusso è stato calibrato in modo da riprodurre la piezometria media prima dell'inizio dell'estrazione intensiva d'acqua (Fig. 9) e la piezometria di ciascun acquifero nel 1973. Come esempio, la Figura 10 mostra le linee di uguale carico idraulico nel 4° acquifero ricostruite a partire dai dati misurati⁴⁶ e fornite dal modello.

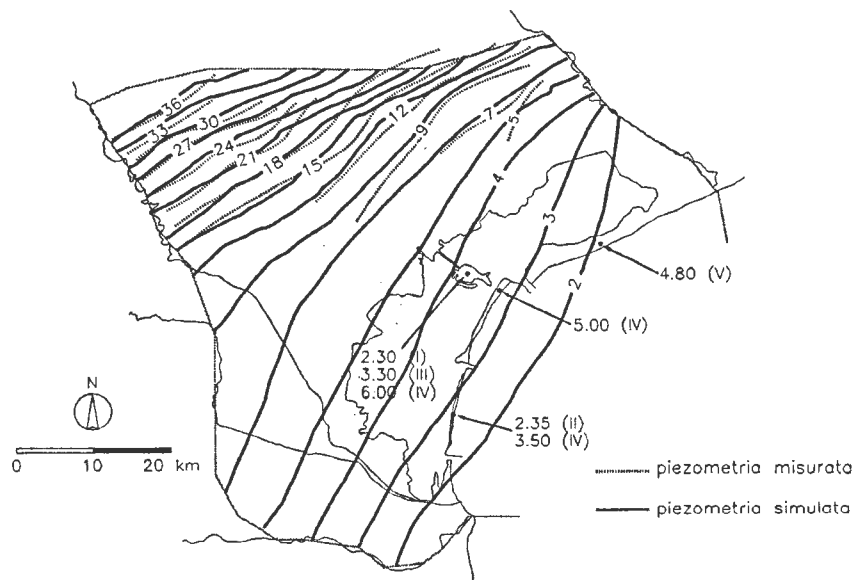


Fig. 9- Potenziale idraulico medio (m s.l.m.) nel sistema multistrato veneziano nel 1930 prima dell'inizio dell'estrazione d'acqua basato sulle piezometrie osservate e fornito dal modello.

La validazione del modello di consolidazione è stata eseguita per il periodo 1952-73 in quanto le livellazioni altimetriche di precisione iniziarono nel 1952. La Figura 11a mostra i risultati del modello come curve di livello di

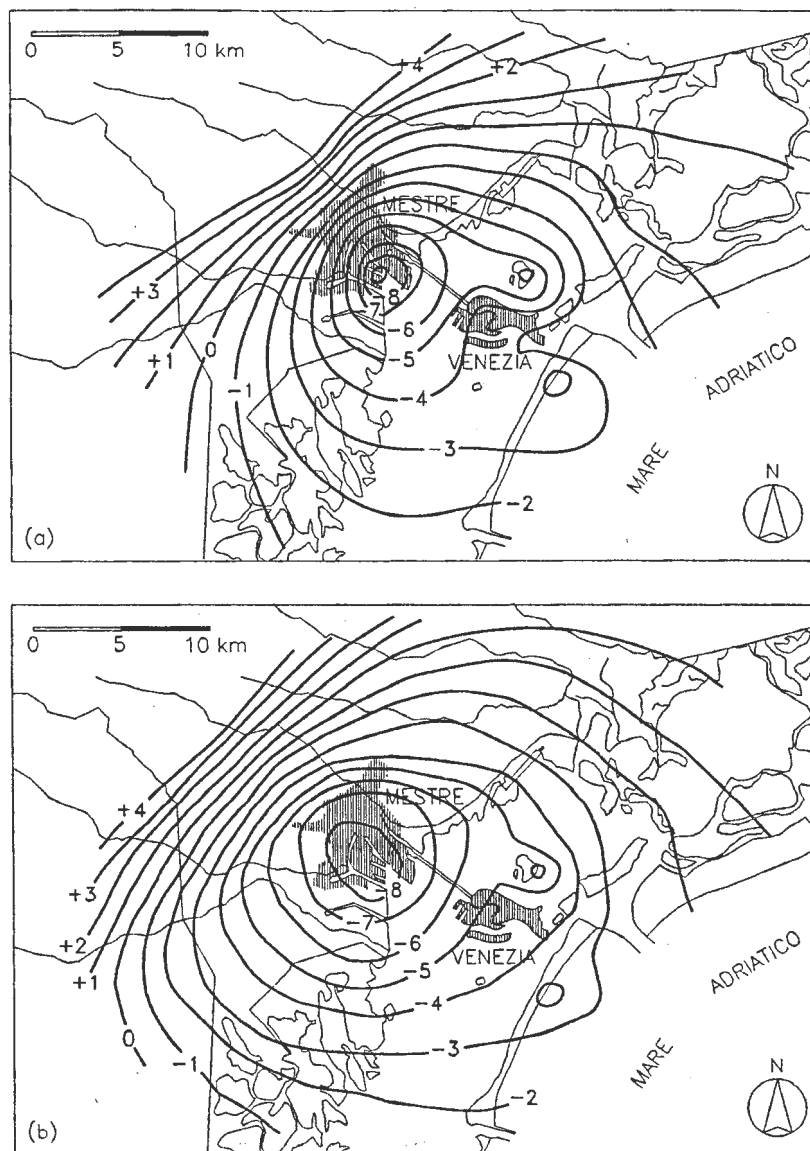


Fig. 10- Curve di livello di uguale potenziale idraulico (m s.l.m.) nel 4° acquifero veneziano nel 1973 (a) ricostruite sulla base delle piezometrie misurate e (b) fornite dal modello di flusso.

uguale subsidenza nel comprensorio di interesse e la Figura 11b confronta l'abbassamento del terreno simulato e misurato lungo la linea passante per Mestre-Venezia-Lido. I risultati ottenuti ricostruiscono i fenomeni osservati in modo soddisfacente.

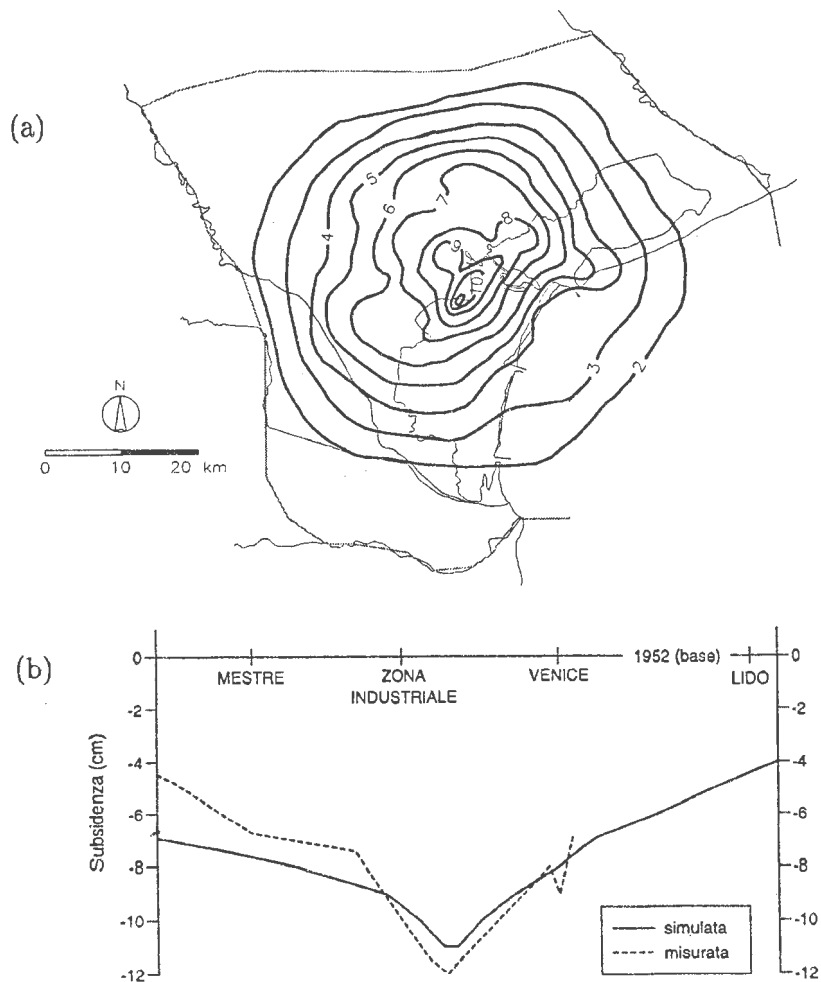


Fig. 11- (a) Curve di livello di uguale subsidenza (cm) nell'area veneziana tra il 1952 ed il 1973 fornite dal modello di consolidazione e (b) confronto tra l'abbassamento osservato e simulato lungo la linea che collega Mestre-Venezia-Lido.

4. CONCLUSIONI

Lo studio dell'evoluzione altimetrica del comprensorio veneziano negli ultimi vent'anni ha permesso di valutare in modo più completo la subsidenza naturale dal momento che dagli anni '70 non è più attiva la componente dovuta agli emungimenti intensivi di acque artesiane.

Il confronto dei risultati della livellazione 1993 con quelli dell'analogo rilievo 1973, ha evidenziato una ideale "linea di demarcazione" che separa due zone a differente tendenza. La prima include le aree di terraferma e quelle di gronda lagunare ad essa più prossime nonché la stessa città di Venezia che possono ritenersi stabili (range di abbassamento da positivo a $-0,5$ mm/anno); la seconda comprende le zone ai bordi lagunari Sud e Nord e i litorali, cioè quelle di più recente formazione dove la compattazione naturale dei sedimenti olocenici è ancora attiva (subsidenza media $1,4$ mm/anno).

In particolare per quanto riguarda i litorali è stato dimostrato che la subsidenza ha concorso ad aggravare la precarietà litoranea contribuendo sensibilmente all'approfondimento dei fondali sottocosta. Questo fenomeno evidente soprattutto nel periodo di massima subsidenza (1950-'70) si è verificato anche negli ultimi vent'anni in corrispondenza dei punti di maggior abbassamento; i valori in gioco permettono comunque valutazioni esclusivamente qualitative.

Nuove metodologie statistiche sono state elaborate ed utilizzate per lo studio del tipo di relazione intercorrente tra la subsidenza (Y) e i cali piezometrici (X). Dai risultati ottenuti si è concluso che l'unica forma di dipendenza interessante il fenomeno bivariato è di tipo lineare e che il coefficiente di correlazione $r \cong 0.80$ spiega tutta la dipendenza tra le due variabili in esame. Il residuo di varianza ($1-r^2$) non è quindi ascrivibile ad altre relazioni funzionali tra le due componenti (X, Y) non spiegate dalla regressione lineare.

Un nuovo modello "quasi 3-D" di flusso è stato sviluppato per la simulazione del sistema multiacquifero regionale veneziano. Il modello utilizza un'aggiornata ricostruzione tridimensionale della geologia del comprensorio e descrive il comportamento idraulico e meccanico delle formazioni argillose mediante leggi costitutive non lineari. La soluzione è ottenuta con il metodo degli elementi finiti ed un'originale procedura iterativa SOR a blocchi. L'applicazione del modello per il periodo 1930-73, il più critico per il sistema multistrato veneziano, mostra un buon accordo sia in termini di piezometria che di subsidenza tra i valori simulati e quelli osservati.

BIBLIOGRAFIA

1. Gatto P., Previatello, *Significato stratigrafico, comportamento meccanico e distribuzione nella laguna di Venezia di un'argilla sovraconsolidata nota come "caranto"*, T.R. no. 70, CNR, ISDGM, Venezia, 1974.
2. Gatto P., Carbognin L., *The lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification*, «Hydrological Sciences Bull.», Vol. 26, no. 4, 379-391, 1981.
3. Carbognin L., *Venezia, La Sua Laguna, I Suoi Problemi.*. Atti. del VI Congresso Nazionale dell'Ordine dei Geologi, Venezia, Fondazione Cini, 240-255, 1987.
4. Leonardi P., *Cause geologiche del graduale sprofondamento di Venezia e della sua laguna*, Istituto Veneto di Lettere Scienze ed Arti, Venezia, 1960.
5. Fontes J.Ch., Bortolami G., *Subsidence of the area of Venice during the past 40000 years*, T.R. no. 54, CNR, ISDGM, Venezia, 1972.
6. Gatto P., *Il sottosuolo del litorale veneziano*, T.R. no. 108, CNR, ISDGM, Venezia, 1980.
7. Bortolami G., Carbognin L., Gatto P., *The natural subsidence in the Lagoon of Venice, Italy*, in «Land Subsidence» (Proc. 3rd Int. Symp. on Land Subsidence, Venice, March 1984), eds. A.I. Johnson *et al.*, IAHS Publ. no. 151, 777-785, 1985.
8. Caputo M., Folloni G., Gubellini A., Pieri L., Unguendoli M., *Survey and geometric analysis of subsidence in the region of Venice and its hinterland*, T.R. no. 9, CNR, ISDGM, Venezia, 1972.
9. Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., Gambolati G., Ricceri G., *New trend in the subsidence of Venice*, in «Land Subsidence» (Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, December 1976), ed. J.C. Rodda, IAHS Publ. no. 121, 65-81, 1977.
10. Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., *La riduzione altimetrica del territorio veneziano e le sue cause*, Istituto Veneto di Lettere Scienze ed Arti, «Rapporti e Studi», Vol. VIII, 55-83, 1981
11. Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., *Situazione idrogeologica del sottosuolo di Venezia - Ricostruzione degli acquiferi soggetti a sfruttamento sulla base dei dati relativi ai pozzi artesiani*, T.R. no. 32, CNR, ISDGM, Venezia, 1974.
12. Gambolati G., Gatto P., Freeze R.A., *Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 2. Results*, «Water Resour. Res.», Vol. 10, no. 3, 563-577, 1974.
13. Gambolati G., Gatto P., *Simulazione della subsidenza di Venezia*, in «Venezia e i problemi dell'ambiente», ed. Il Mulino (Bologna), 299-360, 1975.
14. Dazzi R., Gatto P., Mozzi G., Rusconi A., Zambon G., *Rete idrometrografica per il controllo delle pressioni di strato degli acquiferi sotterranei di Venezia e del suo entroterra*, Gruppo Naz. Dif. Cat. Idrogeol. - Prog. Spec. SCAI, Pubbl. no. 130, Venezia, 1988.
15. Dazzi R., Gatto P., Mozzi G., Zambon G., *La rete di monitoraggio delle pressioni di strato, parte seconda*, in «Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e i suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo», Progetto Sistema Lagunare Veneziano, Linea di Ric. 2.8, CNR, ISDGM, Venezia, 1994.

16. Dazzi R., Gatto P., Mozzi G., Zambon G., *Andamento evolutivo delle pressioni di strato, parte terza*, in «Lo sfruttamento degli acquiferi artesiani di Venezia e i suoi riflessi sulla situazione altimetrica del suolo», Progetto Sistema Lagunare Veneziano, Linea di Ric. 2.8, CNR, ISDGM, Venezia, 1994.
17. Carbognin L., Marabini F., Taroni G., Teatini P., Tosi L., *Altimetria recente del comprensorio lagunare veneziano. Un'analisi critica*, T.R. no. 193, CNR, ISDGM, Venezia, 1994.
18. Carbognin L., Tosi L., *Situazione altimetrica attuale del comprensorio veneziano e i suoi riflessi sull'ambiente lagunare*, «Geologia Applicata e Idrogeologia.» (Atti del 1° Convegno del Gruppo Nazionale di Geologia Applicata: La Città Fragile in Italia), ed. Cotecchia, Vol. XXX, 303-313, 1995.
19. Carbognin L., Tosi L., Teatini P., *Analysis of the actual land subsidence in Venice and its hinterland*, in «Land Subsidence» (Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, The Hague, October 1995), eds. F. Barends *et al.*, Balkema, Rotterdam, 129-137, 1995.
20. Carbognin L., Gatto P., Marabini F., Mozzi G., Zambon G., *Influenza dell'abbassamento del suolo sull'evoluzione del litorale emiliano-romagnolo*, T.R. no. 121, CNR, ISDGM-Venezia, IGM-Bologna, 1982.
21. Carbognin L., Marabini F., Tosi L., *Land subsidence and degradation of the venetian littoral*, in «Land Subsidence» (Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, The Hague, October 1995), eds. F. Barends *et al.*, IAHS Publ. no. 234, 391-402, 1995.
22. Ruol P., *Batimetrie del litorale veneziano rilievo 1992 e confronto con il 1988*, T.R. no. 35, CNR, IGM, Bologna, 1992.
23. Taroni G., Carbognin L., *Geometria dei confronti tra alcuni test a distribuzione libera per la verifica dell'indipendenza tra due variabili*, «Statistica», L, 3, 411-423, 1990.
24. Taroni G., *Verifica statistica dell'ipotesi di indipendenza tra due variabili tramite test funzionali*, «Statistica Applicata», 2, 175-185, 1991.
25. Carbognin L., Taroni G., *Correlation between percentage matrices: a new approach*, «Computer & Geoscience», 17, 4, 477-488, 1991.
26. Carbognin L., Taroni G., *A new method to investigate the equality of bivariate dependence: Application to Sediment Samples Study.*, «Computer & Geoscience», 19, 4 547-566, 1993.
27. Penada A., Taroni G., *Verifica statistica di ipotesi funzionali multivariate*, «Statistica», Vol. 7, 243-250, 1993.
28. Carbognin L., Taroni G., *Linearità tra due variabili: piezometria e subsidenza nell'area veneziana*, Atti dell'Ist. Ven. SS. LL. AA., Tomo CLIV, Classe di Sc. Fis. Mat. e Nat., 33-52, 1996.
29. Blum J.R., Kiefer J., Rosenblatt M., *Distribution free tests of independence based on the sample distribution function*, «Annals of Mathematical Statistics», Vol. 32, 485-498, 1961.
30. Durbin J., *Some methods of constructing exact tests*, «Biometrika», Vol. 41, 203-214, 1961.

31. Gnanadesikan R., *Methods for statistical data analysis of multivariate observations*, John Wiley & Sons, New York, 1977.
32. Small N.J.H., *Plotting squared radii*, «Biometrika» 65, 657-658., 1978.
33. Stephens M.A., *EDF statistics for goodness-of-fit and some comparisons*. Jour. Amer. Statist. Ass. 69, 730-737, 1974.
34. Gambolati G., Freeze R.A., *Mathematical simulation of the subsidence of Venice, 1. Theory*, «Water Resour. Res.», Vol. 9, no. 3, 721-733, 1973.
35. Teatini P., Gambolati G., Tosi L., *A new three-dimensional nonlinear model of the subsidence at Venice*, in «Land Subsidence» (Proc. 5th Int. Symp. on Land Subsidence, The Hague, October 1995), eds. F. Barends *et al.*, IAHS Publ. no. 234, 353-361, 1995.
36. Teatini P., Gambolati G., *A decoupled solution strategy for quasi-3D finite element model of flow in multiaquifer systems*, in «Computational Methods in Water Resources» (Proc. X Int. Conf.), eds. A. Peters *et al.*, Kluwer Academic, 107-114, 1994.
37. Gambolati G., Teatini P., *Block iterative strategies for multiaquifer flow models*, in «Advanced Methods for Groundwater Pollution Control», eds. G. Gambolati *et al.*, CISM Courses and Lectures no. 364, Springer-Verlag, 25-44, 1995.
38. Gambolati G., Teatini P., *A block iterative finite element model for nonlinear leaky aquifer systems*, «Water Resour. Res.», Vol. 32, no. 1, 199-204, 1996.
39. Varga R.S., *Matrix iterative analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1962.
40. Gambolati G., Perdon A.M., *The conjugate gradients in flow and land subsidence modeling*, in «Fundamentals of transport phenomena in porous media», Vol. 82, eds. J. Bear *et al.*, NATO ASI Ser. Appl. Sci., Martinus Nijhoff B. V., 953-984, 1984.
41. Westlake J.R., *Numerical matrix inversion and solution of linear equations*, John Wiley, New York, 1968.
42. Gatto P., *Ricostruzione litostratigrafica del sottosuolo della zona di Venezia sulla base della documentazione di 120 artesiani e geotecnici*, T.R. no. 33, CNR, ISDGM, Venezia, 1973.
43. Regione Veneto, *Carta regionale delle acque*, Giunta Regionale, Segreteria Regionale del Territorio, Venezia, 1984.
44. CNR, *Relazione sul pozzo VE1 CNR*, T.R. no. 14-21, CNR, ISDGM, Venezia, 1971.
45. Tosi L., *Caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi sfruttati nel comprensorio lagunare. Valutazione sperimentale delle caratteristiche di trasmissività*, T.R. no. 189, CNR, ISDGM, Venezia, 1994.
46. Volpi G., Gambolati G., Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., *Groundwater contour mapping in Venice by stochastic interpolators, 2. Results*, «Water Resour. Res.», Vol. 15, no. 2, 291-297, 1979.

