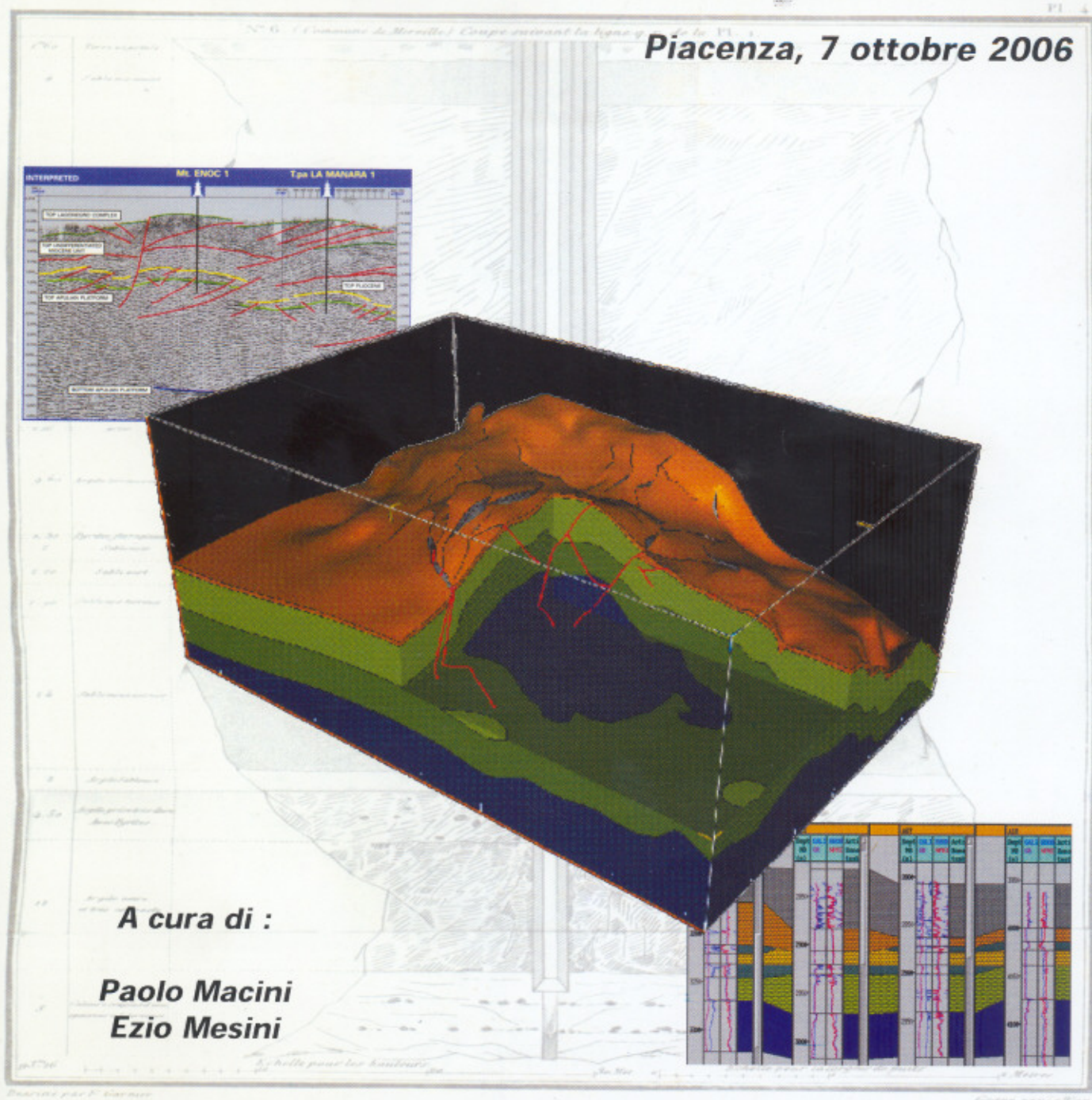


Problemi di Geoingegneria: estrazioni di fluidi e subsidenza

Piacenza, 7 ottobre 2006



DICMA

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna



**Associazione Nazionale Ingegneri Minerari,
delle Georisorse e delle Geotecnologie**

La subsidenza della pianura costiera veneta

Indagini e Risultati recenti

Laura Carbognin¹, Federica Rizzetto¹, Pietro Teatini², Luigi Tosi¹, Tazio Strozzi³

¹ Istituto di Scienze Marine (già ISDGM), C.N.R., San Polo 1364, 30125 Venezia

² Dipartimento di Metodi e Modelli Matematici per le Scienze Applicate, Università di Padova, Via Trieste 63, 35121 Padova

³ Gamma Remote Sensing, Worbstrasse 225, 3073 Gümligen, Svizzera

Riassunto

Dopo un breve richiamo all'abbassamento del suolo di Venezia, il lavoro illustra gli studi più recenti sulla subsidenza del comprensorio lagunare dove agiscono diversi fattori valutabili su scala regionale.

E' noto che alla perdita altimetrica totale avvenuta a Venezia nel secolo scorso (≈ 23 cm) hanno contribuito, con diversa incidenza, la subsidenza geologica, la subsidenza indotta dai pompaggi di acque artesiane e l'innalzamento del livello del mare. Nell'ultimo decennio si sono approfonditi ed ampliati gli studi del processo subsidenziale riguardo alle sue cause quali:

- a) le componenti naturali a *breve* ed a *lungo* termine, ovvero la consolidazione dei depositi recenti e la neotettonica;
- b) l'eustatismo;
- c) l'influenza di potenziali sfruttamenti dei giacimenti gassiferi offshore;
- d) la subsidenza geochimica dovuta all'ossidazione dei suoli organici ed alla salinizzazione dei terreni argillosi che interessa in modo particolare il bacino scolante meridionale, incidendo sull'abbassamento del suolo con tassi che raggiungono anche 2 cm/anno.

Per l'analisi delle cause della subsidenza, per le conseguenze sull'ambiente e per gli sviluppi metodologici, la ricerca si è ampliata a livello regionale, dapprima verso il comprensorio meridionale Veneziano-Padovano, dove, per le caratteristiche geomorfologiche del territorio largamente bonificato ed in buona parte oggi sotto il livello del mare, la subsidenza in atto induce un serio impatto ambientale e socio-economico. In seguito gli studi hanno interessato le aree nord-orientali della Provincia di Venezia, dove il confronto spazio-temporale dei rilievi altimetrici 2000/1993 aveva evidenziato, tra l'altro, un aumento dei tassi di subsidenza nei settori litorali a vocazione turistica di Cavallino-Jesolo-Caorle (@ 4 mm/anno). Si presentano infine i risultati di un metodo originale di monitoraggio integra-

to, elaborato per ottimizzare le informazioni derivanti dalle livellazioni, GPS, Interferometria SAR convenzionale e su riflettori permanenti, in grado di fornire mappe sinottiche dei movimenti del suolo su scala regionale ad alta risoluzione spaziale (pixel 20x20m) e precisione verticale millimetrica.

1. Introduzione

Gli studi sperimentali e modellistici sulla subsidenza di Venezia, iniziati nel 1969 con la nascita dell'Istituto Grandi Masse del CNR, oggi Istituto di Scienze Marine, conclusero la prima complessa fase della ricerca negli anni '90, dimostrando, tra le altre cose, l'arresto del processo antropo-indotto imputabile agli sfruttamenti artesiani intensivi, operati, soprattutto per uso industriale, nel ventennio 1950-1970 e registrando un esiguo ma significativo *rebound* a Venezia nel 1975 (Carbognin *et al.*, 1977). L'avvenuta subsidenza geomeccanica aveva comunque provocato 10-14 cm di irreversibile abbassamento del suolo. Va precisato, però, che parlando di riduzione altimetrica totale si considera per Venezia quella relativa, riferita cioè al livello medio del mare. Tenuto perciò conto delle tre componenti che intervengono nel computo (subsidenza antropo-indotta, subsidenza geologica ed eustatismo), la città lagunare ha perduto 23 cm nell'ultimo secolo, il che equivale a dire che, rispetto al piano di calpestio dell'inizio del 1900, il livello dell'acqua si è innalzato di 23 cm.

Gli studi a carattere idro-morfo-geologico e geofisico, le analisi modellistiche, le misure *in situ* ed i rilievi altimetrici condotti, se da un lato rassicurarono sull'arresto della subsidenza indotta dai pompaggi di acque sotterranee e sulla stabilità della città lagunare, dall'altro attestarono la necessità di approfondire alcuni aspetti della ricerca ed evidenziarono che lungo certi tratti litoranei, alle estremità lagunari e zone limitrofe il fenomeno della subsidenza era ancora in atto con tassi non trascurabili (Fig. 1a) in relazione alla precarietà ambientale del territorio.⁽¹⁾

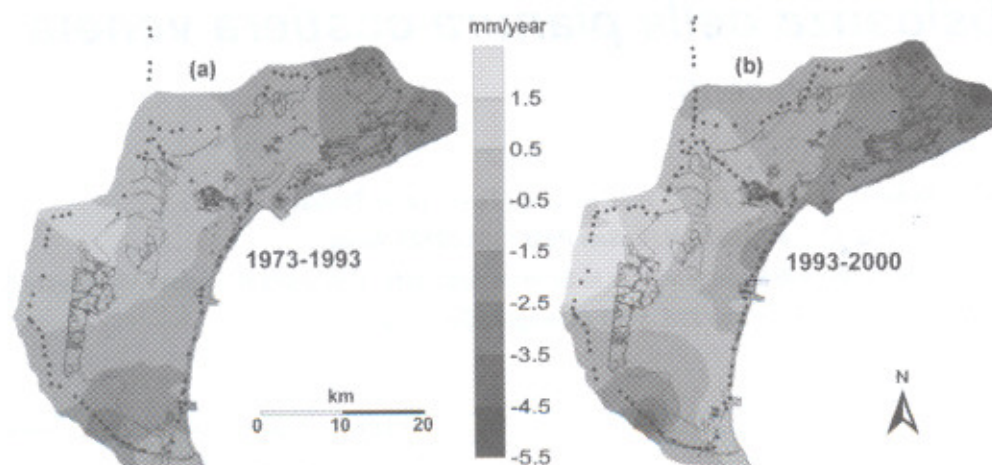


Figura 1 Mappe delle variazioni altimetriche (mm/anno) per i periodi 1973 - 1993 (a) e 1993-20(b) (da Carbognin et al., 2000a).

¹ Un lavoro di sintesi degli studi e dei risultati della prima fase di ricerca fu presentato in occasione della "Giornata di studio A.N.I.M. - Problemi di Geoingegneria: Estrazioni di fluidi e Subsidenza. Associazione Nazionale Ingegneri Minerari, Geofluid Piacenza 3 ottobre 1998 (La Subsidenza veneziana. Attuali tendenze ed implicazioni a cura di Carbognin e Tosi).

Da allora vi fu un ampliamento degli studi, sia dal punto di vista areale, sia delle componenti, che metodologico. Vennero investigate dapprima le aree litoranee e meridionali della laguna in cui si trovano alcune zone estreme delle province di Venezia e Padova, che risultano particolarmente fragili dal punto di vista ambientale e dove il processo di *subsidenza geochimica* è particolarmente rilevante; di qui l'approfondimento degli studi sulla subsidenza indotta dall'ossidazione delle torbe e dalla salinizzazione del suolo.

Fu altresì effettuata una previsione modellistica sull'eventuale subsidenza indotta dai prospettati sfruttamenti dei giacimenti di gas metano, ubicati grossomodo di fronte a Chioggia, a circa 10 km dalla costa.

Venne analizzato, con analisi statistiche di dettaglio, l'andamento secolare del livello medio del mare a Venezia e Trieste, per meglio valutare il *trend* eustatico dell'alto Adriatico. In seguito l'area di indagine fu estesa alle zone del settore regionale nord-orientale ed infine, ma non da ultimo, particolare attenzione fu rivolta al "miglioramento" del monitoraggio utilizzando l'interferometria satellitare convenzionale (InSAR), l'analisi interferometrica su riflettori permanenti (IPTA), prima separatamente, poi in associazione, e quindi sviluppando un sistema di monitoraggio integrato tra livellazioni, misure con GPS differenziale ed in continuo, InSAR e IPTA, ottenendo una mappa sinottica dei movimenti del suolo su scala regionale con elevata accuratezza e risoluzione spaziale. Il presente lavoro fornisce una revisione di queste tematiche oggetto di studio nell'ultimo decennio, rimandando ai lavori specifici citati in bibliografia per una trattazione di maggiore dettaglio.

2. Studi di approfondimento sulla subsidenza

Gli approfondimenti degli studi sul processo subsidenziale, riguardo alle sue cause e al coinvolgimento territoriale, sono interconnessi, per cui la loro descrizione non può che avvenire in modo integrato.

2.1. Subsidenza naturale ed eustatismo

La subsidenza naturale è un processo che nel corso dei tempi geologici ha interessato la pianura costiera veneta in modo più o meno significativo secondo la causa prevalente (attività tettonica e consolidamento dei sedimenti).

Le stime dei tassi di subsidenza naturale (η) si basano su analisi di vario tipo condotte sia sulla serie quaternaria carotata in continuo attraverso il pozzo VE 1 CNR, spinto alla profondità di 950 m, sia sui campioni di sedimenti tardo-pleistocenici ed olocenici provenienti da numerosi sondaggi geognostici terebrati nel comprensorio veneziano.

Uno studio integrato di analisi magneto-biostratigrafiche, di facies e climatico-palinologiche (Kent et al., 2002) attribuisce alla subsidenza geologica pleistocenica totale, riferibile agli ultimi 1,8 milioni di anni circa, un valore compreso $0.24 \leq \eta \leq 0.48$ mm/anno. Gli Autori ritengono che questi valori siano rappresentativi della subsidenza geologica di lungo periodo, ascrivibile all'attività tettonica regionale; si tratta di tassi notevolmente inferiori a quello medio calcolato con *trend* lineare per l'intervallo deposizionale tardo pleistocenico - olocenico ($\eta \cong 1.3$ mm/a; Bortolami et al., 1984), imputa-

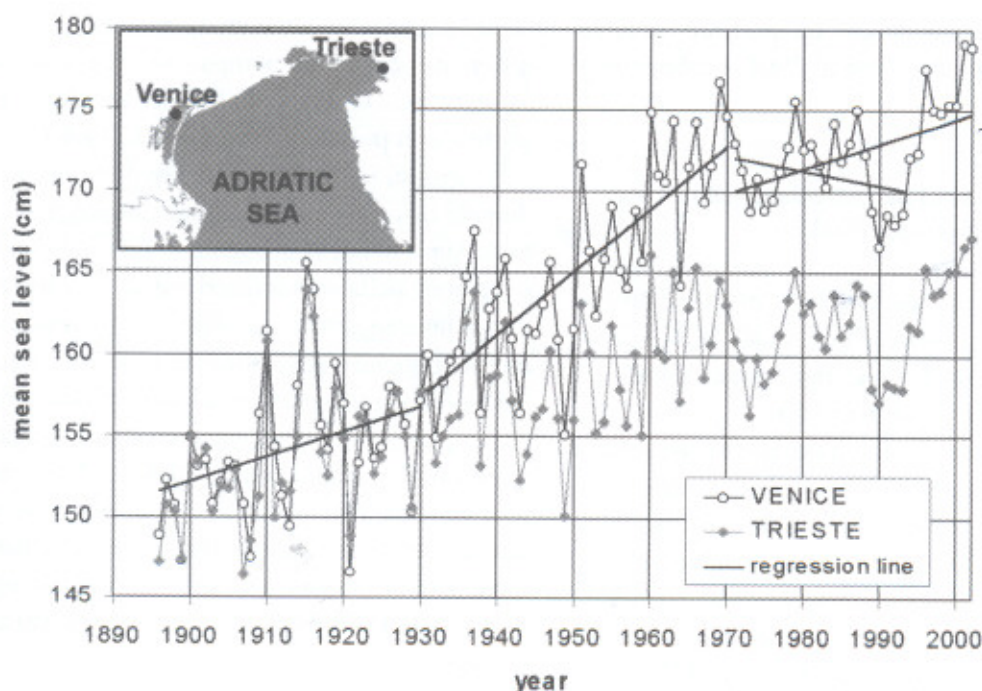


Figura 2. Andamento del livello medio mare a Venezia e Trieste dal 1896 al 2002 (aggiornato e modificato da Carbognin & Taroni, 1996). Fino al 1930 le due curve erano coincidenti; dal 1930 al 1970 evidenziano una "anomala" crescita del mare a Venezia corrispondente alla subsidenza antropica; tornano ad avere uguale trend dopo il 1970, con differenza corrispondente alla subsidenza irreversibile (da Carbognin et al., 2004).

² Entro la sequenza a grande scala, significativi sono gli anni 1950-1970, periodo freddo-umido, con alluvioni anche disastrose (F. Po 1954, 1956, 1966; Firenze 1966), forti mareggiate ed estreme acque alte a Venezia (novembre 1966 la più famosa); il ventennio seguente è stato un periodo caldo-secco, caratterizzato da scarsa piovosità, ridotta frequenza di forti mareggiate e assenza o quasi di acque alte a Venezia congiuntamente alla stabilità del l.l.m. Dai primi anni '90 si è instaurato un nuovo ciclo freddo-umido, testimoniato dall'aumento delle piene dei fiumi e della ripresa di forti mareggiate lungo le coste Adriatiche, nonché dalla maggior frequenza di acque alte a Venezia e dal nuovo innalzamento del livello marino.

bile alla consolidazione naturale e rappresentativo della subsidenza geologica di breve periodo. Tali stime sono in accordo con i risultati ottenuti sia attraverso analisi modellistiche (Gambolati e Teatini, 1998) che di carattere geodinamico (Carminati et al., 2003). La consolidazione, che ha giocato un ruolo primario nelle fasi evolutive della laguna di Venezia, iniziò a decrescere intorno ai 5,000 anni B.P., assumendo importanza sempre minore negli ultimi secoli, fino a raggiungere i valori attuali $\eta \leq 0.5$ mm/anno (Gatto e Carbognin, 1981; Brambati et al., 2003; Carbognin et al., 1995a). Questo tasso si riferisce al bacino lagunare centrale, dove sorge come meglio descritto in seguito.

Parallelamente alle stime sulla subsidenza geologica, gli studi di Bortolami et al. (1984) e Kent et al. (2002) forniscono le evidenze delle variazioni eustatiche e geoclimatiche pleistoceniche e oloceniche e la loro influenza sui cicli deposizionali/erosivi veneziani e sui tassi di accumulo sedimentario (v. anche Serandrei-Barbero et al., 2006). Stime attendibili sul trend eustatico sono quelle calcolate su serie storiche sufficientemente lunghe da non risentire dei cicli climatici di breve periodo, evidenziati da un'alternanza di periodi freddo-umidi e

caldo-seccchi con durata variabile tra 15 e 30 anni circa ("cicli di Brückner": Veggiani, 1987; Marabini e Veggiani, 1991)⁽²⁾, e quindi in grado di fornire in modo oggettivo un trend secolare significativo.

La stima sul trend eustatico dell'Alto Adriatico dal 1896 al 1993 (Carbognin e Taroni, 1996), ricavata dalle registrazioni mareografiche di Venezia e Trieste e svincolata dagli effetti della subsidenza, è risultata pari a 1.13 mm/a, in accordo con altri tassi eustatici misurati in diverse stazioni del Mediterraneo (Co.Ri.La., 1999). L'aumento del livello medio marino è stato calcolato con trend lineare, benché vi siano state variazioni cicliche nel secolo considerato (Fig. 2) riferibili ai cicli climatici di breve periodo (v. nota 2) (Carbognin e Tosi, 2002). La serie storica veneziana riportata in Fig. 2 evidenzia chiaramente che durante il periodo 1930-1970 si è esplicitata la subsidenza antropica, corrispondente all'apparente crescita del l.m.m. rispetto a Trieste, non misurata nel periodo precedente né in quello successivo.

Le registrazioni mareografiche mostrano inoltre il brusco incremento del livello del mare in atto dopo il 1993; benché sia doveroso ricordare che un decennio non rappresenta un periodo significativo per parlare di

nuova tendenza, va segnalato che un aumento di circa 6.8 cm è stato misurato dal 1994 al 2004 (Carbognin *et al.*, 2004).

2.2. Subsidenza geochimica per intrusione salina e ossidazione dei suoli organici superficiali

La perdita altimetrica ascrivibile a processi diversi dalla compattazione geomeccanica, quali la salinizzazione dei suoli e l'ossidazione dei terreni torbosi, è oggetto di studio da circa un decennio.

E' noto che le caratteristiche meccaniche dei terreni argillosi sono fortemente influenzate dalla composizione dell'acqua interstiziale; pertanto la diffusione di acque salate in formazioni argillose originariamente sature di acqua dolce comporta una consolidazione della matrice porosa la cui entità, benché dipenda dal tipo di argilla, è comunque significativa (Di Maio, 1996). Studi specifici non sono mai stati condotti nel sottosuolo veneziano per cui non è possibile ad oggi quantificare il contributo di tale processo geochimico alla subsidenza complessiva.

Un grosso sforzo è stato invece condotto dagli anni '90 (3) per valutare l'estensione areale e la profondità dell'intrusione salina sotterranea nel comprensorio veneziano.

³ Nell'ambito del Progetto Strategico del CNR AMBIENTE E TERRITORIO (1994-1997), fu affrontata la problematica della salinizzazione degli acquiferi sia freatici che artesiani, attraverso indagini di campagna e studi modellistici. Nel 1998 iniziò il progetto CUNEO SALINO, promosso dalla Provincia di Venezia, per indagini nel comune di Chioggia che poi, nel 1999, vennero convogliate nel più ampio Progetto ISES (acronimo per Intrusione Salina e Subsidenza); questo fu istituito per approfondire lo studio a seguito dei risultati già ottenuti, dai quali era emersa la grave situazione altimetrica e idrologica in cui si trovano tuttora le zone del bacino scolante meridionale prospicienti il margine lagunare, ed in particolare nei settori interessati dalle più recenti bonifiche. L'area di studio ISES ha coperto circa 400 km² ricadenti nella bassa padovana e nel basso veneziano. Il Progetto è stato finanziato dal CNR, dalle Province di Venezia e Padova, dal Comune di Chioggia, dal Magistrato alle Acque di Venezia, dai Consorzi di Bonifica Adige-Bacchiglione, Bacchiglione-Brenta e Delta Po-Adige. Gli studi sono tuttora in corso nell'ambito di altri progetti di ricerca finanziati dal Co.Ri.La.

Fu dapprima investigato il settore centro-settentrionale, dove l'approvvigionamento idrico, più o meno intenso, ha sempre interessato il sistema acquifero multistrato che si sviluppa tra 55 e 340m di profondità ed il cui sfruttamento intensivo fu la causa primaria della subsidenza veneziana della seconda metà del 1900.

Il rischio dell'intrusione salina per gli acquiferi arte-

siani fu analizzato attraverso simulazioni numeriche per differenti scenari di pompaggio ed i risultati ottenuti assicurarono la trascurabilità del problema nelle falde profonde in pressione (Bixio *et al.*, 1998).

A seguire, lo studio è stato condotto nel settore meridionale dove la salinizzazione coinvolge seriamente le falde superficiali (Carbognin e Tosi, 2003). La caratterizzazione della contaminazione salina è avvenuta attraverso investigazioni ed elaborazioni litostratigrafiche, idrogeologiche e geoelettriche: sono stati elaborati circa 700 sondaggi geognostici selezionati (dati stratigrafici e prove penetrometriche) integrati da 25 eseguiti ad *hoc*, a profondità variabile da 15 a 100 m, 250 sondaggi elettrici verticali (SEV) di cui 170 di nuova esecuzione e, per ottenere una maggior risoluzione in situazioni anomale, sono state effettuate anche alcune tomografie elettriche (ERT) con profondità di indagine variabile da 70 a 100 m.

Si è istituita una fitta rete di monitoraggio della piezometria e del tenore salino nelle acque di falda.

Parallelamente sono state eseguite misure di salinità delle acque superficiali (fiumi, canali, scoli) in 400 siti per verificare la connessione tra le acque della rete scolante e della falda freatica e per monitorare la risalita della marea lungo le aste terminali di fiumi.

I risultati ottenuti hanno permesso di identificare l'estensione della contaminazione salina e di suddividere il territorio in classi di criticità, in relazione alle attività prevalentemente agricole ed orticole che in esso si esercitano, visualizzando alla fine il fenomeno mediante due mappe che forniscono rispettivamente la giacitura del tetto e del letto del cuneo salino (Fig. 3).

In generale la profondità dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata si trova tra circa 2 e 30 m dal piano campagna e subisce variazioni più sensibili dalla superficie fino a -10 m.

Si osserva che la base della contaminazione salina, la cui morfologia dipende principalmente dallo sviluppo, dalla permeabilità, dallo spessore e dalla continuità degli orizzonti argillosi sottostanti, si approfondisce da nord a sud, partendo da una profondità media di 15-30 m fino ad arrivare a 60-75 m e localmente anche a più di 100m.

E' stato riscontrato che la propagazione spaziale e l'evoluzione temporale della contaminazione cambiano in funzione delle diverse condizioni idrauliche e meteorologiche, dei prelievi/rilasci di acqua dolce, e dell'attività delle idrovore.

Effetti non trascurabili sono prodotti anche dalla dispersione di acqua di marea dagli alvei, particolar-

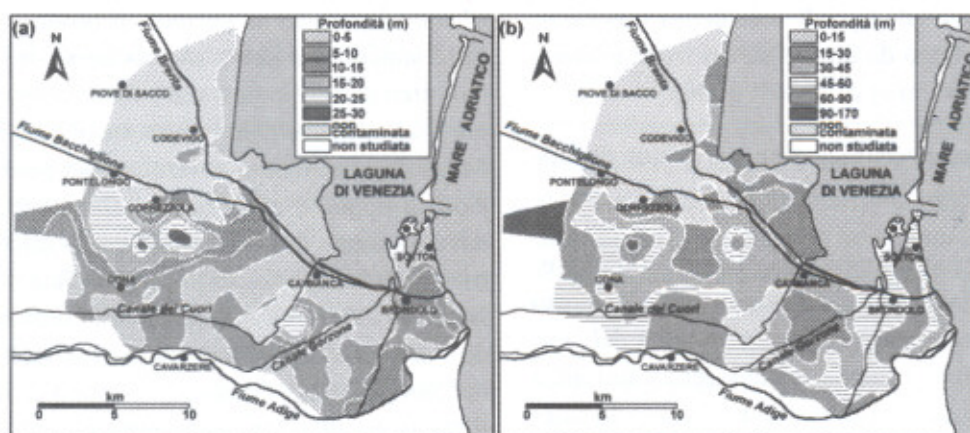


Figura 3. Assetto della contaminazione salina: (a) tetto e (b) letto (da Carbognin e Tosi, 2003).

mente influenzata dalle condizioni mareografiche e controllata dall'entità delle portate fluviali, tanto che in situazioni di magra può risalire le aste terminali di canali e fiumi (qui generalmente pensili) anche per 20 km a partire dalla foce (Carbognin *et al.*, 2005b).

Dall'analisi territoriale è emerso inoltre che il settore centro-meridionale del bacino scolante veneziano è quello più esposto al processo di salinizzazione, a causa delle numerose strutture geologiche e geomorfologiche sub-superficiali presenti nell'area, le quali svolgono un ruolo importante nella dinamica del processo poiché in alcuni casi rappresentano delle riserve di acqua dolce, in altri dirigono i flussi salati dalla laguna al bacino scolante (Rizzetto *et al.*, 2003).

In termini di altimetria, vaste zone del bacino scolante meridionale sono anche le più depresse (con quote fino a -4 m s.l.m.). Solo per gli ultimi 70 anni vi sono misure e testimonianze di una subsidenza anche superiore a 1 m (Fig. 4), soprattutto in corrispondenza delle

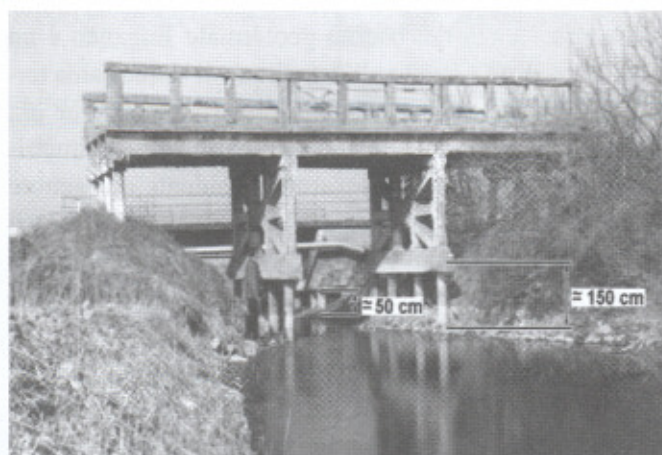


Figura 4. Effetti dell'abbassamento del suolo nel comprensorio meridionale della provincia di Venezia indotto principalmente dalla subsidenza geochimica e secondariamente dai pompaggi di acque sotterranee. In primo piano un vecchio ponte costruito negli anni '20 con i piloni estrusi per oltre 150 cm; sullo sfondo quello ricostruito negli anni '70 che mostra l'estrusione dei piloni di fondazione per circa 50 cm (da Gambolati *et al.*, 2005).

aree bonificate in presenza di terreni torbosi superficiali, molto estesi in quest'area, ed il cui spessore non supera oggi i 2 m. La subsidenza è infatti una delle conseguenze ambientali più comuni della bonifica e del drenaggio dei terreni organici. Nelle zone temperate e tropicali la subsidenza dei suoli torbosi avviene principalmente per perdita di massa di terreno sotto forma di CO_2 rilasciato in atmosfera. Il fenomeno avviene attraverso il processo di ossidazione biochimica del materiale organico presente nel terreno. Essendo un processo aerobico, l'ossidazione richiede la presenza di ossigeno nel sottosuolo e la cinetica di reazione è tanto più veloce quanto più elevata è la temperatura. Alcune attività agronomiche possono accelerare in modo significativo il processo quando richiedono franchi di bonifica elevati, con un conseguente limitato contenuto d'acqua nel terreno più superficiale, e quando portano in superficie strati di materiale torboso non ancora mineralizzato. L'analisi della subsidenza per ossidazione dei suoli organici nell'area lagunare veneta è stata studiata nell'ambito di un progetto di ricerca specifico⁽⁴⁾, che viene presentato in questa sede dal suo responsabile scientifico prof. Giuseppe Gambolati, per cui si sintetizzano di seguito i risultati salienti solo per completezza di trattazione. Attraverso un apparato assestometrico progettato e realizzato ad hoc per la misura degli spostamenti della superficie della torba e misurazioni dei flussi di CO_2 emessi in atmosfera è stata quantificata in

⁴ Il Progetto VOSS (Venice Organic Soil Subsidence) ha preso avvio nel 2001 nell'ambito delle ricerche di interesse del Co.Ri.La. (Consorzio per la Gestione del Centro di Coordinamento delle Attività di Ricerca Inerenti il Sistema lagunare Di Venezia) che è un'associazione tra le Università Cà Foscari e IUAV di Venezia, Università di Padova, Consiglio Nazionale delle Ricerche e Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, vigilata dal Ministero dell'Istruzione Università e Ricerca.

2 cm/anno l'entità di tale tipo di subsidenza geochimica. Il dato è confermato da numerose evidenze presenti sul territorio (Gambolati *et al.*, 2005; 2006).

2.3. Subsidenza geomeccanica per estrazione di fluidi dal sottosuolo

La drastica riduzione a partire dagli anni '70 dei prelievi di acque di falda nella zona industriale di Porto Marghera ha prodotto una sostanziale stabilità del centro storico veneziano. Tuttavia la subsidenza antropica per estrazione di fluidi dal sottosuolo continua ad interessare varie parti della pianura costiera veneta. Diversi studi a tale riguardo sono stati condotti nell'ultimo decennio.

in considerazione un periodo di produzione pianificato in 13 anni ed una fase post-produttiva di 12 anni. I risultati ottenuti nell'ipotesi più conservativa (Fig. 5) hanno previsto una subsidenza massima di 12 cm in corrispondenza del giacimento al termine del periodo di coltivazione e dopo 25 anni, con un abbassamento di circa 1 cm sul litorale di Chioggia e nessun effetto sull'altimetria di Venezia (Baù *et al.*, 2000; Teatini *et al.*, 2000). Nessuno ulteriore sviluppo ha fatto seguito a questo studio, in quanto il progetto di coltivazione del giacimento *Chioggia Mare* è stato accantonato visto che nel 2000 il Ministero dell'Ambiente ne ha proibito lo sfruttamento.

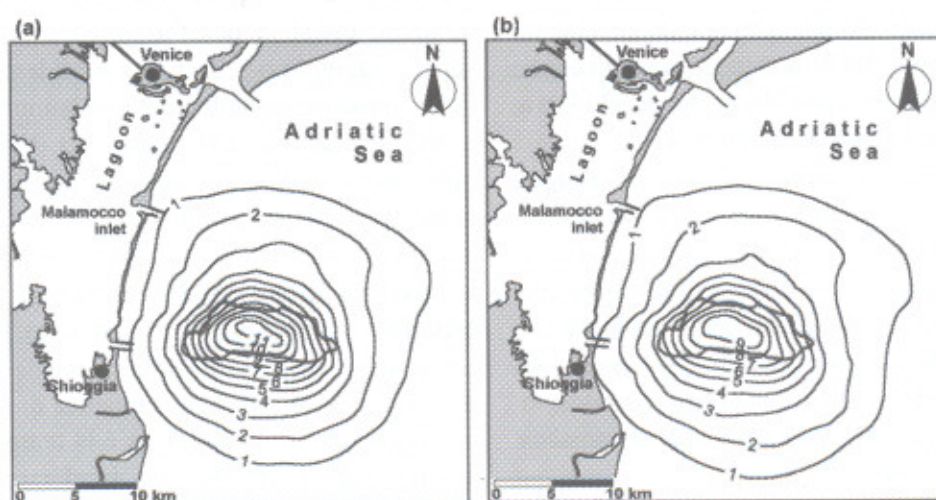


Figura 5. Giacimento a gas *Chioggia Mare*. Subsidenza in superficie (cm) attesa a seguito dell'estrazione di gas: (a) dopo i 13 anni del periodo produttivo e (b) dopo 25 anni, considerando 12 anni di fase post-produttiva (da Teatini *et al.*, 2000).

2.3.1. Subsidenza per estrazione di gas

Nella seconda metà degli anni '90 è stata presa in considerazione la possibilità di produrre gas metano dal giacimento *Chioggia Mare*, il più vasto campo a gas scoperto da ENI in Alto Adriatico. Questo giacimento, profondo 1000-1400 m, si trova in mare a circa 10 km al largo del litorale di Chioggia e a 25 km da Venezia (Fig. 5). Dopo un'accurata ricostruzione della complessa struttura geologico-sedimentaria regionale dell'area veneziana e degli acquiferi profondi in connessione idraulica con il giacimento (AGIP, 1996) è stato sviluppato un modello 3-D agli elementi finiti per simulare la compattazione profonda a seguito dell'estrazione di gas e la subsidenza attesa in superficie.

La previsione è stata effettuata secondo due diversi scenari operativi: a) con iniezione di acqua marina per mantenere le pressioni di strato sottocosta e b) senza nessun intervento mitigativo. La simulazione ha preso

2.3.2. Subsidenza per estrazioni di acque termali

La subsidenza del bacino geotermale Euganeo è un fenomeno noto e legato all'estrazione di acqua calda termale dal sottosuolo (Brighenti, 1991; Gottardi *et al.*, 1995). Nell'ambito degli studi sull'evoluzione altimetrica spazio-temporale delle aree subsidenti del settore veneto centro-settentrionale (Carbognin e Tosi, 2003), il tasso di subsidenza storica più elevato risultò essere proprio quello relativo al bacino Euganeo (1.6 cm/anno nel periodo 1970-1986).

Le livellazioni di alta precisione ripetute tra il 1985 ed il 1995 mostravano un ridimensionato abbassamento del suolo ad Abano Terme con un massimo di 10 cm in 10 anni. I rilievi altimetrici più recenti, condotti con l'Interferometria SAR convenzionale, indicano ancora un picco di subsidenza in corrispondenza delle aree termali pari a 3-4 mm/anno tra il 1992 e il 1996 (Strozzi *et al.*, 1999) e tassi medi di abbassamento in calo dopo il

1996 (Strozzi et al., 2003a). Una nuova inedita elaborazione IPTA a scala locale e a dettaglio maggiore "individua" in particolare un leggero sollevamento pari a circa + 2 mm/anno ad ovest della depressione di Abano Terme e abbassamenti rilevanti (anche maggiori di 5 mm/anno) nelle zone più a sud. Mentre per la zona ad ovest di Montegrotto Terme i tassi di abbassamento sembra siano in calo dopo il 1996, a sud-est essi appaiono costanti tra il 1992 e il 2000. Approfondimenti per quantificare i rapporti causa-effetto sono necessari per completezza di ricerca; allo stato attuale sembra ipotizzabile un'influenza tettonica per i tassi positivi e, sempre, una estrazione termale intensa per quelli negativi.

2.3.3. Subsidenza nelle zone nord-orientali

I risultati dei confronti altimetrici ISES 2000 e CNR 1993 avevano evidenziato un aumento dei tassi di subsidenza, nell'ordine dei 4-5mm/anno, nei settori litorali di Cavallino-Jesolo, lungo la gronda lagunare settentrionale e fino al F. Tagliamento (Fig. 1b). La criticità degli abbassamenti in atto lungo il litorale regionale e in alcuni centri urbani del settore nord orientale della Provincia di Venezia, era emersa dalle prime elaborazioni InSAR (Strozzi et al., 2003b; 2003c). Di qui la necessità di approfondire lo studio del processo subsidenziale e poter valutare accuratamente la gravità della situazione. In generale le aree potenzialmente a rischio sono quelle interessate da emungimenti di acque per diverso uso, quelle caratterizzate da sedimentazione recente deltizia e le bonifiche, spesso soggiacenti il livello marino. In

relazione alla prima causa, si ricorda che in tale porzione del territorio veneto sono presenti importanti e ricche risorse idriche sotterranee sfruttate da pozzi la cui profondità varia da 10 m a 600 m; di particolare importanza l'area settentrionale dove si localizzano a profondità superiori ai 400 metri acque termali contenute in acquiferi in pressione. Era inoltre necessario istituire una adeguata rete di monitoraggio della subsidenza, ad integrazione di quella esistente (le sole linee di livellazione circumlagunari e linea IGM "Mestre-Trieste"), quale strumento di supporto per i piani di gestione del territorio e per le varie opere ingegneristiche, idrauliche e marittime⁵.

⁵ Per iniziativa congiunta della Provincia di Venezia e del CNR-ISDGM (oggi CNR-ISMAR) nasce il progetto IRMA (Integrazione della Rete di Monitoraggio Altimetrico) per lo studio del fenomeno della subsidenza nel territorio nord-orientale della Provincia di Venezia. Questo progetto rappresenta il completamento degli studi e monitoraggi compiuti nelle aree del bacino scolante meridionale della laguna di Venezia con il progetto ISES (v. nota 2).

La nuova rete di monitoraggio altimetrico IRMA, che si sviluppa per un totale di circa 480 km con 530 capisaldi di livellazione, 44 dei quali idonei a misure GPS, integra verso nord-est la rete ISES, contribuendo a costituire un set di capisaldi omogenei e quindi un unico quadro di riferimento plano-altimetrico (Tosi et al., 2006 in press). Lo sviluppo complessivo della rete regionale così integrata è di oltre 1200 km, comprende circa 1400 capisaldi dei quali 160 costituiscono la rete GPS (Fig. 6).

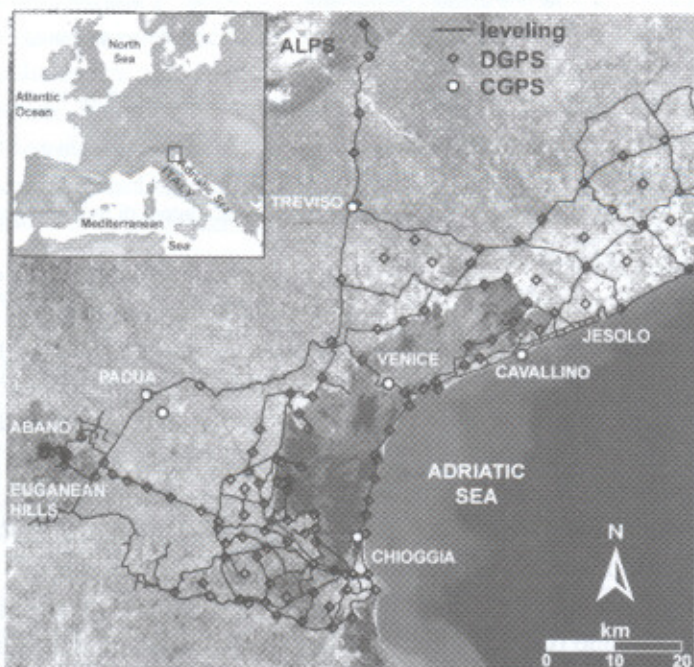


Figura 6. Sviluppo della rete di monitoraggio altimetrico (livellazioni e GPS) a copertura dell'area regionale orientale (da Tosi et al., 2006 in press).

Poiché la maggior parte delle linee di livellazione costituenti la rete IRMA è di nuova istituzione, l'analisi complessiva del processo sarà possibile quando si effettuerà una nuovo monitoraggio totale, previsto entro i prossimi 5 anni. Dai dati confrontabili lungo linee di livellazione già esistenti sono stati elaborati profili di subsidenza, e con l'ausilio dei risultati derivanti dal monitoraggio integrato è stato possibile avere un quadro sufficientemente esaustivo dei movimenti verticali nell'area.

3. Approfondimenti metodologici sul monitoraggio della subsidenza. Sistema integrato

Per oltre un secolo, le livellazioni geometriche sono state il solo sistema di rilievo altimetrico. In anni recenti tecniche basate su misure satellitari con il GPS, sia esso differenziale o in continuo, e l'analisi di immagini radar di tipo SAR hanno allargato il numero dei sistemi utilizzabili per il monitoraggio della subsidenza.

Ciascuna tecnica presenta qualità e limiti diversi (Tabella 1). Le livellazioni geometriche forniscono misure di alta precisione su un numero limitato di capisaldi; per la copertura di vasti territori di *terraferma* richiedono tempi di esecuzione lunghi e hanno costi elevati. Sono ancora molto valide per ristrette aree di particolare interesse, dove le distanze tra i capisaldi sono

limiti in quanto fornisce lunghe serie storiche delle componenti verticale ed orizzontali dello spostamento.

L'interferometria SAR convenzionale (InSAR) si basa sull'analisi dell'evoluzione del valore di fase tra due distinte acquisizioni radar relative alla stessa area. Si genera un "interferogramma" sottraendo la fase di un'immagine da quella dell'altra. Se non avvengono particolari cambiamenti nel periodo tra le due acquisizioni, i contributi alla riflettività si elidono e la fase dell'interferogramma dipende solo dalla distanza sensore-bersaglio e quindi da eventuali fenomeni di spostamento intercorsi tra le due acquisizioni.

Sottraendo poi la componente topografica è possibile stimare la componente dovuta alla subsidenza/innalzamento con un'alta risoluzione spaziale (ad esempio, con pixel di 20x20m utilizzando immagini rilevate dai satelliti ESA ERS-1, ERS-2 e ENVISAT).

Effetti di decorrelazione spaziale e temporale limitano l'applicabilità dell'InSAR alle aree urbanizzate. Per ovviare a tale limite sono state più recentemente sviluppate tecniche basate sull'osservazione di un piccolo sottoinsieme di bersagli radar immuni da effetti di decorrelazione (*Permanent Scatters* -PS: Ferretti et al., 2001, o *Interferometric Point Target Analysis* -IPTA: Werner et al., 2003). L'uso di un data-set di immagini consistente (almeno 25-30) consente di individuare i riflettori adatti a questo tipo di indagine e di separare con estrema

	Risoluzione	Caratteristiche del rilievo	Precisione verticale	Limiti
Livellazioni	250-1000 m	Misurazione geometrica di alta precisione su capisaldi lungo linee o anelli	$\approx$ 1 mm/anno	Dispendioso in tempi e costi
CGPS	decine-centinaia di Km	Alcune stazioni permanenti	$\approx$ 2 mm/anno	Costoso lunghe serie storiche
DGPS	5-10 Km	Punti distribuiti	$\approx$ 5-10 mm/anno	Limitata precisione
InSAR	Spaziale: 20-25 m	Aree urbane	$\approx$ 2 mm/anno	Decorrelazione del segnale in aree rurali
IPTA	Spaziale: 5 x 25 m	Riflettori persistenti	$\approx$ 1 - 2 mm/anno	Richiede analisi di lunghe serie di immagini SAR

Tabella 1. Confronto tra le caratteristiche dei diversi metodi di monitoraggio altimetrico.

ridotte. Le misure GPS differenziale (DGPS) sono più veloci ed economiche delle livellazioni ma meno accurate e, in genere, riferite ad una rete dove i punti di misura sono tra loro molto distanti.

L'applicazione del DGPS è particolarmente utile per il collegamento di una rete locale in aree subsidenti ad un caposaldo stabile di riferimento, o per effettuare monitoraggi altimetrici speditivi quale strumento di ausilio a pianificazioni territoriali, o, ancora, per verificare rapidamente trend di subsidenza noti e dell'ordine dei centimetri/anno. Il GPS in continuo (CGPS) è molto costoso e quindi in genere può essere utilizzato su pochissimi punti di misura. E' comunque di grande uti-

accuratezza i termini di fase dovuti a topografia, spostamento e disturbi atmosferici. Il maggiore costo di questo ultimo tipo di analisi interferometrica rispetto al metodo convenzionale è compensato dalla maggiore accuratezza, dalla possibilità di misurare i movimenti verticali anche su aree poco urbanizzate e addirittura in settori privi di riflettori già captabili con il radar installando in zone umide e/o agricole dei riflettori "artificiali persistenti" ad *hoc*⁽⁶⁾(Fig. 7).

Con l'intendimento di migliorare le possibilità e la qualità del monitoraggio, sia in specifiche aree di interesse che a scala regionale, è stata sviluppata un'origi-

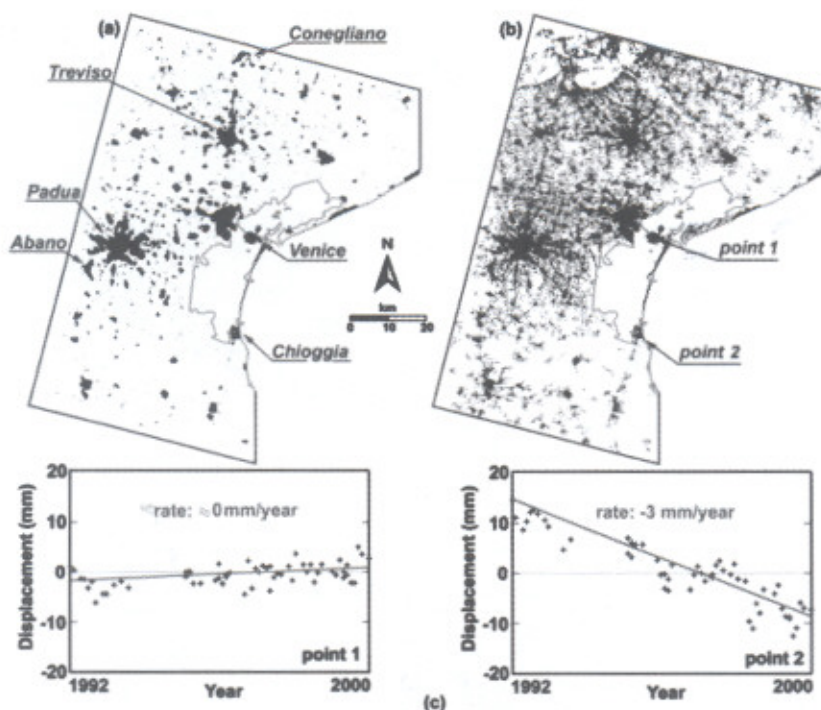


Figura 7. Rete altimetrica (a) InSAR, (b) IPTA nella parte orientale della Regione Veneto, (c) log di subsidenza sui riflettori permanenti 1 e 2 di (b) in (da Strozzi et al., 2005).

⁶ In particolare, è stato finanziato nel 2006 dal Magistrato alle Acque di Venezia il Progetto INLET che prevede l'applicazione dell'Interferometria differenziale SAR per il controllo dei movimenti verticali del litorale veneziano e l'analisi IPTA su un certo numero di riflettori artificiali posizionati in laguna.

nale procedura di integrazione dei risultati forniti dalle diverse metodologie in modo da superare i limiti di ogni singola tecnica di rilevamento (Teatini et al., 2005). Tale "sistema di monitoraggio integrato", SIMS, consente attraverso omogeneizzazione e validazioni incrociate, eliminazione di dati poco affidabili o non rappresentativi, ricampionamento ed elaborazioni statistiche, di produrre mappe accurate di subsidenza a scala regionale con elevata risoluzione spaziale. Nella pianura costiera veneta questo metodo è stato applicato per ricostruire gli spostamenti verticali del territorio nel decennio 1992-2002. La base dati che si è presa in considerazione è formata da:

- le livellazioni condotte nel 1993 e 2000 lungo il margine lagunare;
- i rilievi DGPS eseguiti nel 1999 e 2003 nel settore centro-meridionale dell'area di studio;
- i dati forniti dalle 3 stazioni CGPS installate a Padova, Cavallino e Chioggia negli ultimi anni;
- l'analisi InSAR condotta su 11 immagini ERS-1 e ERS-2 acquisite tra il 1993 al 2000 con un numero complessivo di 380.000 pixel coerenti;
- l'analisi IPTA su 59 immagini ERS-1 e ERS-2 acquisite tra il 1992 ed il 2000 con un numero di circa 120.000 diffusori permanenti. La mappa dei trend di

spostamento ottenuta dall'integrazione delle misure a disposizione è riportata in Fig. 8.

4. Note conclusive

Dopo aver completato gli studi sulla subsidenza della laguna e della città di Venezia quale tema prioritario nell'ambito degli studi a salvaguardia, le ricerche condotte nell'ultimo decennio hanno approfondito le conoscenze sulle cause naturali e antropiche responsabili del processo subsidenziale, ampliando altresì il territorio di indagine oltre i limiti dell'area lagunare.

La subsidenza naturale è stata quantificata con maggiore accuratezza individuandone le cause agenti sul breve e lungo periodo; il tasso medio di lungo periodo, calcolato sull'intera serie quaternaria, di poco inferiore a 0.5 mm/anno, è principalmente ascrivibile all'attività tettonica regionale, mentre il tasso medio di breve periodo stimato in circa 1.3mm/a per gli ultimi 40'000 anni è imputabile alla consolidazione naturale dei sedimenti di apporto recente. Negli ultimi secoli il valore della consolidazione naturale veneziana è sensibilmente diminuito fino a raggiungere il valore ≤ 0.5 mm/anno.

L'innalzamento del livello del mare, uno dei 3 tre fattori responsabili della perdita altimetrica relativa misu-

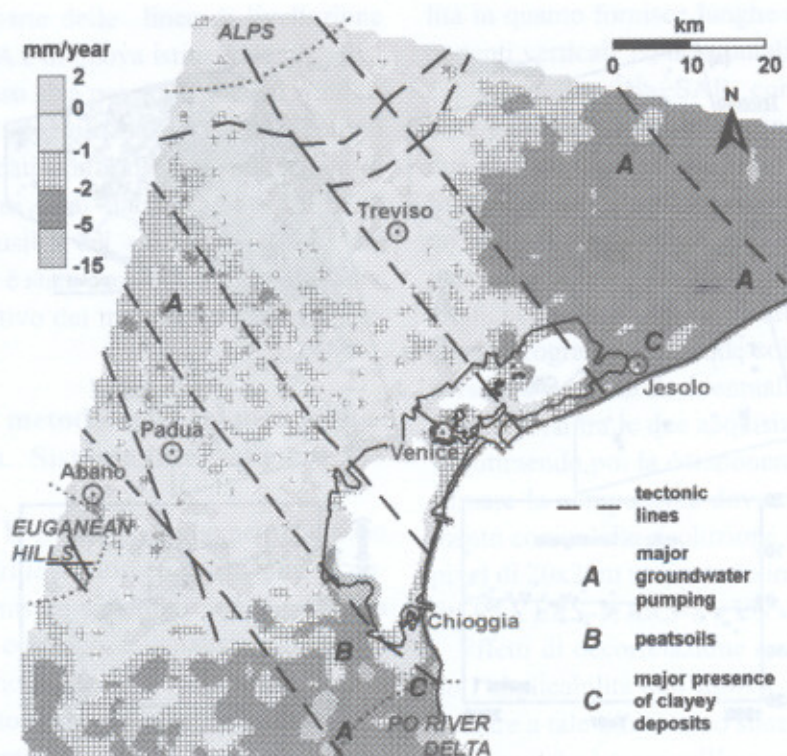


Figura 8. Mappa dei movimenti verticali del suolo (mm) ottenuta con il sistema di monitoraggio integrato (SIMS) per il decennio 1992-2002 (da Teatini *et al.*, 2005).

rata a Venezia, è stato calcolato in circa 1.2 mm/anno dalle analisi delle serie storiche mareografiche di Venezia e Trieste per il periodo dal 1896 al 2002. Sono stati individuati anche i cicli climatici brevi corrispondenti a diversi trend eustatici; in particolare sembra essere in atto dai primi anni '90 un nuovo ciclo freddo-umido cui corrisponde un brusco incremento del l.m.m. ($\cong 6.8$ cm dal 1994 al 2004) che viene visto in modo preoccupante per la salvaguardia di Venezia, benché si tratti di un intervallo temporale non significativo per parlare di *trend*.

Rimanendo in ambito lagunare, ha sollevato un grande interesse, oltre che un dibattito politico-tecnico, la possibilità di produrre gas metano dal giacimento Chioggia Mare, ubicato a circa 10 km al largo del litorale di Chioggia e a 25 km da Venezia.

Le approfondite analisi previsionali, elaborate per diversi scenari di coltivazione, hanno assicurato sull'assenza di qualunque impatto in termini di subsidenza a Venezia e calcolato 1 cm di abbassamento lungo il litorale di Chioggia. Ciononostante lo sfruttamento del giacimento è stato vietato con decreto ministeriale.

Uscendo dai confini lagunari in senso stretto, è stata analizzata la subsidenza geochimica che interessa il bacino scolante meridionale, la cui causa principale è da attribuirsi alla perdita di massa per ossidazione che avviene in corrispondenza delle aree bonificate ad uso

agricolo in presenza di terreni torbosi superficiali. Nelle zone studiate, dove vaste zone si trovano a quote decisamente inferiori al l.m.m., fino a -4 m, solo per gli ultimi 70 anni è avvenuta una subsidenza superiore a un metro.

Anche la contaminazione salina dei suoli, molto estesa in quest'area, è causa di compattazione geochimica dei terreni limo-argillosi.

Lo studio a carattere idrogeologico e geofisico, condotto principalmente con misure in situ, ha evidenziato che il fenomeno intrusivo arriva ad espandersi fino a circa 20 km dalla costa, che la profondità dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata varia da circa 2 a 30 m dal piano campagna in funzione delle diverse condizioni idrauliche e meteo-climatiche; il letto della contaminazione è variabile da 10 ad oltre 100 m dal p.c.. Sulla dinamica del processo di salinizzazione inducono effetti importanti anche la dispersione dagli alvei fluviali e le strutture geologiche e geomorfologiche sub-superficiali presenti nell'area.

Le recenti analisi territoriali sulla subsidenza del Bacino Euganeo, indotto principalmente da pompaggi di acqua termale, indicano un sensibile ridimensionamento dei tassi di abbassamento misurati in 3-4 mm/anno tra il 1992 e il 1996 contro i 15mm/anno tra il 1970 e il 1986.

Procedendo verso le aree costiere centro-orientali, dai

litorali lagunari al F. Tagliamento, i risultati ottenuti sia da confronti geodetici, sia dalle analisi interferometriche InSAR, evidenziano per il periodo 1992-2000 tassi di subsidenza fino a 5mm/anno.

La livellazione 2004, sebbene confrontabile con la precedente solo su alcuni tratti, conferma questi valori dimostrando la gravità del processo in atto in diversi centri urbani di terraferma e nei litoranei turistici.

Grazie al supporto finanziario dato al CNR-ISMAR da numerosi Enti che operano sul territorio veneto, è stato possibile istituire una rete di livellazione di grande dettaglio spaziale e di notevole utilità per un monitoraggio integrato assieme a misure satellitari e radar.

La rete si sviluppa nelle zone regionali più a rischio di subsidenza per oltre 1200 km, comprende circa 1400 capisaldi dei quali 160 costituiscono la rete GPS.

Con l'intendimento di potenziare le possibilità e la qualità del monitoraggio, sia in specifiche aree di interesse che a scala regionale, è stata quindi sviluppata un'originale procedura di integrazione dei risultati forniti dalle diverse metodologie, cioè livellazioni, GPS differenziale ed in continuo, interferometria satellitare convenzionale (InSAR) e interferometria su riflettori permanenti (IPTA), in modo da superare i limiti di ogni singola tecnica di rilevamento.

Tale sistema di monitoraggio integrato (SIMS) è stato applicato per ricostruire gli spostamenti verticali del territorio nel decennio 1992-2002, con elevata risoluzione spaziale e precisione verticale millimetrica.

BIBLIOGRAFIA

AGIP (1996). Alto Adriatico - Rapporto di Sintesi. AGIP S.p.A., Milano.

Bau' D., Gambolati G., Teatini P. (2000). Can gas withdrawal from Chioggia Mare field affect the stability of the Venetian littoral? *SISOLS 2000, Sixth Int. Symp. on Land Subsidence*, Vol. II, L. Carbognin et al. eds., La Garangola, Padova, Italy, 421-433.

Bixio A.C., Putti M., Tosi L., Carbognin L., Gambolati G. (1998). Finite element modeling of salt water intrusion in the Venice Aquifer System. In: Burganos V. N., G.P. Karatzas, A.C. Payatakes, C.A. Trebbia, W.G. Gray and G.F. Pinder (eds.), *Computational Mechanics Publications, Proceedings of the XII Int. Conference on Computational Methods in Water Resources (CMWR XII '98)*, Creta: Vol. 2, 193-200.

Bortolami G., Carbognin L., Gatto P. (1984). Natural subsidence in the lagoon of Venice. *Proceedings of the Third International Symposium on Land Subsidence*, Venezia: IAHS Publ. n.151, 777-78.

Brambati A., Carbognin L., Quaia T., Teatini P., Tosi L. (2003). The Lagoon of Venice: geological setting, evolution and land subsidence, *Episodes*, 26(3), 264-268.

Brighenti G. (1991). Land Subsidence Due to Thermal Water Withdrawal: The Case of Abano Terme, Northern Italy. In: *Land Subsidence, Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence*, Houston: IAHS Publ. n. 200, 515-523.

Carbognin L., Gambolati G., Marabini F., Taroni G., Teatini P. and Tosi L. (2000a). Analisi del processo di subsidenza nell'area veneziana e sua simulazione con un modello tridimensionale non lineare. *La Ricerca Scientifica Per Venezia, Il Progetto Sistema Lagunare Veneziano, Modellistica del Sistema Lagunare Studio di Impatto Ambientale Ist. Ven. SS.LL AA, Vol.II, Tomo II*, 1017-1048. IVSLA Ed., Venezia (Italy).

Carbognin L., Gatto P., Mozzi G., Gambolati G., Ricceri G. (1977). New trend in the subsidence of Venice. In: J. C. Rodda (ed.), *Proceedings of the Second International Symposium on Land Subsidence*, Dec. 6-11, 1976, Anaheim, USA. *Land Subsidence IAHS Publ.*, No. 121, 65-81.

Carbognin L., Cecconi G., Ardore V. (2000b). Interventions to safeguard the environment of the Venice Lagoon (Italy) against the effects of land elevation loss. In: Carbognin L., G. Gambolati and A. Johnson (eds.), *Land Subsidence, Proceedings of the Sixth International Symposium on Land Subsidence*, Ravenna: Vol. I, 309-324.

Carbognin L., Taroni G. (1996). Eustatismo a Venezia e Trieste nell'ultimo secolo. *Atti Istituto Veneto SS.LL.AA., Classe di Scienze Fis., Mat. e Nat.*, Venezia: Tomo CLIV, 281-298.

Carbognin L., Teatini P., Tosi L. (2004). Eustasy and land subsidence in the Venice Lagoon at the beginning of the new millennium. *Journal of Marine Systems*, 51(1-4), 345-353.

Carbognin L., Teatini P., Tosi L. (2005a). Land Subsidence in the Venetian area: known and recent aspects. *Giornale di Geologia Applicata*, 1, pp. 5-11. DOI: 10.1474/GGA.2005-01.0-01.0001.

Carbognin L., Rizzetto F., Tosi L., Teatini P., Gasparetto-Stori G. (2005b). L'intrusione salina nel comprensorio lagunare veneziano. Il bacino meridionale, *Giornale di Geologia Applicata*, 2, 119-124.

Carbognin L., Tosi L. (2002). Interaction between Climate Changes, Eustasy and Land Subsidence in the North Adriatic Region, Italy. *Marine Ecology*, 23/ S 1, 38-50.

Carbognin L., Tosi L. (2003). Il Progetto ISES per l'analisi dei processi di intrusione salina e subsidenza nei territori meridionali delle Province di Padova e Venezia, © Ed. Progetto ISES, 95 p, 12 Tav. f.t., Grafiche Erredici, Padova (Italy).

Co.Ri.La. A cura di Carbognin L., Cecconi G., Zago C. (1999). Scenari di crescita del livello del mare per la Laguna di Venezia (Scenarios of sea level rise in the Lagoon of Venice, Italy), Venezia, 40 pp.

- Carminati E., Doglioni C., Scrocca D. (2003).** Appennines subduction-related subsidence of Venice (Italy). *Geophys. Res. Lett.*, 30 (13), 1717 doi:10.1029/2003GL017001.
- Di Maio C. (1996).** Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Géotechnique*, 46(4): 695-707.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001).** Permanent scatters in SAR interferometry, *IEEE T. Geosci. Remote Sensing*, 39(1): 8-20.
- Gambolati G., Putti M., Teatini P., Camporese M., Ferraris S., Gasparetto Stori G., Nicoletti V., Rizzetto F., Silvestri S., Tosi L. (2005).** Peatland oxidation enhances subsidence in the Venice watershed. *EOS-Trans. Amer. Geophys. Union*, 86(23), 217-224.
- Gambolati G., Putti M., Teatini P., Gasparetto Stori G. (2006).** Subsidence due to peat oxidation and impact on drainage infrastructures in a farmland catchment south of the Venice Lagoon. *Environ. Geology*, 49(6), 814-820.
- Gambolati G., Teatini P. (1998).** Numerical Analysis of Land Subsidence due to Natural Compaction of the Upper Adriatic Sea Basin. In: G. Gambolati (ed.), *CENAS, Coastline Evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise and Natural and Anthropogenic Land Subsidence*, Kluwer Academic, Chap. 5, 103-131.
- Gatto P., Carbognin L. (1981).** The Lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification. *Hydrological Sciences Bulletin*, 26/4/12, 379-391.
- Gottardi G., Previatello P., Simonini P. (1995).** An Extensive Investigation of Land Subsidence in the Euganean Geothermal Basin, Italy, *Land Subsidence, Proceedings of the Fifth International Symposium on Land Subsidence, The Hague, IAHS Publ. n. 234*, 21-30.
- Kent V.D., Rio D., Massari F., Kukla G., Lanci L. (2002).** Emergence of Venice during the Pleistocene. *Quaternary Science Review*, 21, 1719-1727.
- Marabini F., Veggiani A. (1991).** Evolutional trend of the coastal zone and influence of the climatic fluctuations. *Proceedings of the Second International Symposium on Coastal Ocean Space Utilization, COSU II*, 173-474.
- Rizzetto F., Tosi L., Carbognin L., Bonardi M., Teatini P. (2003).** Geomorphological setting and related hydrogeological implications of the coastal plain south of the Venice Lagoon (Italy). In: E. Servat, W. Najem, C. Leduc and A. Shakeel (eds.), *Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions, IAHS Red Book Ser.*, 278, 463-470.
- Serandrei-Barbero R., Albani A., Donnici S., Rizzetto F. (2006).** Past and recent sedimentation rates in the Lagoon of Venice, Italy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 69, 255 - 269.
- Strozzi T., Carbognin L., Rosselli R., Teatini P., Tosi L., Wegmüller U. (2003a).** Ground vertical movements in urban areas of the Veneto region (Italy) detected by DInSAR. *Proceedings of 4th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems, Bologna: 17-20 June 2003*.
- Strozzi T., Tosi L., Carbognin L., Wegmüller U., Galgaro A. (1999).** Monitoring Land Subsidence in the Euganean Geothermal Basin with Differential SAR Interferometry, *Proceedings of FRINGE'99, Liège: 10-12 November 1999*.
- Strozzi T., Tosi L., Wegmüller U., Werner C., Teatini P., Carbognin L. (2003b).** Land subsidence monitoring service in the lagoon of Venice. *Proc. IGARSS 2003, Toulouse: Vol. 1*, 212-214.
- Strozzi T., Wegmüller U., Werner C., Wiesmann A., Tosi L., Teatini P., Carbognin L. (2003c).** VENEZIA, subsidence monitoring service in the Lagoon of Venice for Regional Administrative and Water Authorities, *Data User Programme II Period. Executive Summary*, European Space Agency, 25 pp.
- Strozzi T., Wegmüller U., Werner C., Teatini P., Tosi L. (2005).** SAR Interferometric Point Target analysis and application to the monitoring of land subsidence in the Venice Lagoon. In: *Land Subsidence, Shanghai Scientific & Technical Publ.*, 417-425. Zhang A, Jonson AI, Carbognin L (eds).
- Teatini P., Baù D., Gambolati G. (2000).** Water-gas dynamics and coastal land subsidence over Chioggia Mare field, northern Adriatic Sea, *Hydrogeol. Jour.*, 8(5): 462-479.
- Teatini P., Tosi L., Strozzi T., Carbognin L., Wegmüller U., Rizzetto F. (2005).** Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system. *Remote Sensing of Environment*, 98, 403-413.
- Tosi L., Carbognin L., Teatini P., Strozzi T., Wegmüller U. (2002).** Evidence of the present relative land stability of Venice, Italy, from land, sea, and space observations. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (12), DOI: 10.1029/2001 GL 013211.
- Tosi L., Teatini P., Carbognin L., Frankenfield J. (2006 in press).** A new project to monitor land subsidence in the northern Venice coastland (Italy). *Environmental Geology*.
- Veggiani A. (1987).** Le Fluttuazioni del clima dal XVIII al XX Secolo. I cicli di Brückner, Torricelliana, Faenza, 37, 108-156.
- Werner C., Wegmüller U., Strozzi T., Wiesmann A. (2003).** Interferometric point target analysis for deformation mapping. *Proc. IGARSS 2003, Toulouse, France, 21-25 July 2003*.