

FONDAZIONE  
GEOMETRI ITALIANI

Poste Italiane S.p.A.

Spedizione in abbonamento postale -70% Aut. GIPA/C/NA/10/2012

In caso di mancato recapito restituire al CMP di Napoli.  
Il mittente si impegna a pagare la relativa tariffa.

anno V  
SETTEMBRE - OTTOBRE 2013

numero 29

# GEOCENTRO

MAGAZINE

BIMESTRALE DEI GEOMETRI E GEOMETRI LAUREATI





# La subsidenza naturale e antropica di Venezia

## Monitoraggio e analisi tramite satelliti con tecnologia “Synthetic Aperture Radar” (SAR)

di **Pietro Teatini**  
*Dipartimento di Ingegneria Civile,  
 Edile e Ambientale - Università di  
 Padova, Padova*

**Luigi Tosi**  
*Istituto di Scienze Marine - Consiglio  
 Nazionale delle Ricerche, Venezia*

**V**enezia, una delle città più conosciute al mondo per la sua bellezza, è nota anche per la continua perdita altimetrica rispetto al livello del mare.

La notorietà della subsidenza di Venezia non è dovuta alla magnitudo del processo, che nell'ultimo secolo è stata di circa 15 cm, quanto piuttosto per il fatto che un abbassamento relativamente modesto ha comunque compromesso seriamente il patrimonio architettonico e la sicurezza del centro storico, favorendo l'aumento della frequenza delle alte maree.

Abbassamenti di svariati metri si sono invece verificati ad esempio a Città del Messico e Shanghai, ma con conseguenze non altrettanto importanti sulla sicurezza dell'edificato cittadino quali i pochi centimetri per Venezia.

Va ricordato che la perdita altimetrica rispetto al livello marino è la somma di due processi: la subsidenza, ovvero l'abbassamento del suolo, e l'eustatismo, cioè l'innalzamento del mare dovuto all'incremento del volume d'acqua negli oceani a seguito dei cambiamenti climatici.

Tale processo prende il nome di “innalzamento relativo del livello marino” o

semplicemente RSLR (Relative Sea Level Rise). Per Venezia, dall'inizio del secolo scorso il RSLR è stato quantificato in circa 25 cm, di cui 12 cm di eustatismo e 15 cm di subsidenza.

Considerando l'attuale velocità di subsidenza di Venezia e lo scenario mid-range A1B dell'IPCC (Gruppo Intergovernativo sui Cambiamenti Climatici), il RSLR stimato al 2100 dovrebbe variare fra 17 e 53 cm. Ciò significa che il franco altimetrico del centro storico, che emerge solo 90 cm sul medio mare, sarà drasticamente ridotto con la conseguenza che la frequenza dell'acqua alta, cioè di una marea superiore a 110 cm, passerà dalle 4 volte all'anno attuali ad un numero di eventi variabile tra 20 e 250.

Per quanto riguarda la subsidenza, questa ha due tipologie di cause: naturali o indotte dall'uomo (o antropica). In genere l'abbassamento del suolo legato a cause naturali si sviluppa a scala regionale ed ha un'evoluzione lenta, avvertibile in tempi storici o addirittura geologici; non producendo effetti immediati sul territorio passa spesso inosservata. La subsidenza antropica, invece, si manifesta di regola in tempi relativamente brevi (dell'ordine di qualche decina di anni), interessa una porzione di territorio più limitata ma con effetti che possono compromettere in modo significativo l'ambiente, le opere e le attività umane nel caso in cui non si intervenga con azioni di controllo e gestione.

La separazione del contributo naturale da quello antropico-indotto è generalmente assai complessa. Infatti, le variazioni altimetriche, indipendentemente dalla metodologia adottata per misurarle, includono entrambe le cause; la loro distinzione, generalmente qualitativa, si basa su interpretazioni idrogeologiche e geologiche.

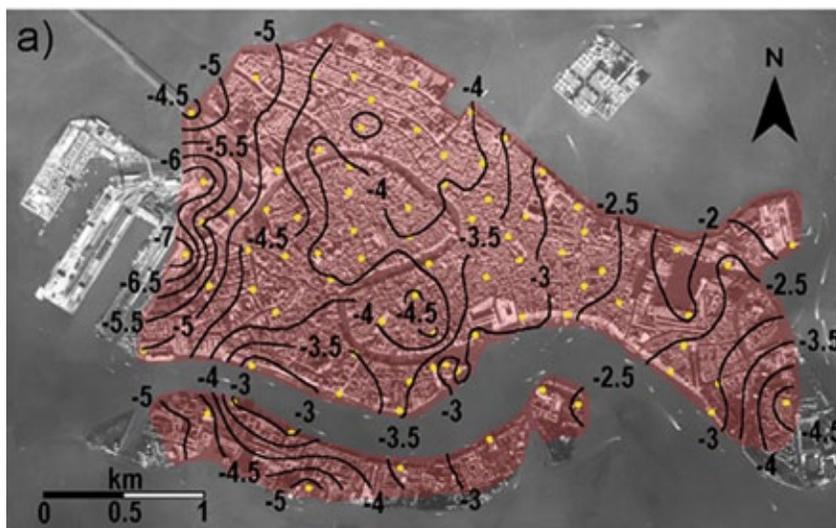
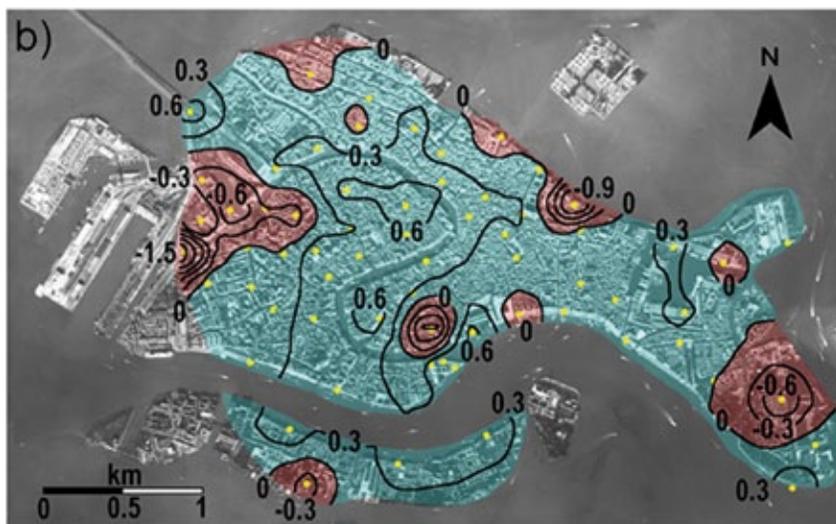


Figure 1 - Mappe di spostamento verticale (mm/anno) della città di Venezia nei periodi (a) 1961-1969 e (b) 1973-1993 ottenute dall'interpolazione delle misure altimetriche mediante livellazione topografica. La rete di capisaldi è rappresentata dai punti di colore giallo. I valori negativi indicano subsidenza



### Metodologie di misura della subsidenza

Le livellazioni geometriche sono state nel secolo scorso l'unico metodo di rilievo altimetrico che abbia consentito di misurare con precisione l'entità della subsidenza "attuale" dell'area costiera nord adriatica. Nella città di Venezia fu installata dal CNR una rete di circa 150 capisaldi di livellazione che fu utilizzata per monitorare la subsidenza del centro storico fino ai primi anni '90 (Figura 1). Solo alla fine del decennio è stata installata una rete per misure GPS in differenziale (DGPS) e in continuo (CGPS).

Negli ultimi dieci anni, inoltre, l'utilizzo del radar ad apertura sintetica (SAR) montato su vettori satellitari ha consentito lo sviluppo e l'affinamento dell'analisi interferometrica differenziale (InSAR) e dell'analisi interferometrica su riflettori persistenti (PSI). Analisi che si sono dimostrate di estrema efficacia per il monitoraggio dei movimenti verticali del suolo. Il principio di funzionamento di un sistema radar è abbastanza semplice: un apparecchio trasmittente illumina lo spazio circostante con un'onda elettromagnetica che incide su

eventuali oggetti subendo un fenomeno di riflessione disordinata (diffusione, scattering). Una parte del campo diffuso torna verso la stazione trasmittente, equipaggiata anche per la ricezione (Figura 2a). Il ritardo temporale tra l'istante di trasmissione e quello di ricezione consente di valutare la distanza a cui si trovano i singoli bersagli radar (Figura 2b), cioè di localizzare gli oggetti lungo la direzione della congiungente con l'emettitore, grazie alle caratteristiche di direttività dell'antenna utilizzata per trasmettere e ricevere il segnale radar. Quanto più grande è l'antenna, tanto meglio è localizzato il bersaglio.

Un modo per ottenere un'antenna equivalente di grandi dimensioni si realizza attraverso la tecnologia SAR ("Synthetic Aperture Radar"), nella quale l'emettitore/ricevitore radar è fatto scorrere lungo un binario di dimensioni variabili da pochi metri a qualche decina di metri. Oltre alla distanza del bersaglio, l'informazione del segnale di ritorno consente di valutare se il bersaglio si è spostato tra un istante e il successivo. Questo tipo d'informazione differenziale, estesa a tutti i punti dell'area illuminata, può essere rappresentato su mappe (interferogrammi) nelle quali vengono rappresentati i movimenti globali dell'area in studio. Due sono le principali strategie di elaborazione dei dati SAR che possono essere utilizzate: *Interferometria differenziale SAR convenzionale (DInSAR)*: qualora l'area di indagine sia caratterizzata dalla presenza di centri abitati di estensione significativa (sui quali il DInSAR è in grado di fornire l'interpretazione della fase interferometrica), questo tipo di analisi è preferibile in quanto, eseguendo una media dello spostamento all'interno di ciascun pixel dell'immagine radar, viene fornita una risposta rappresentativa

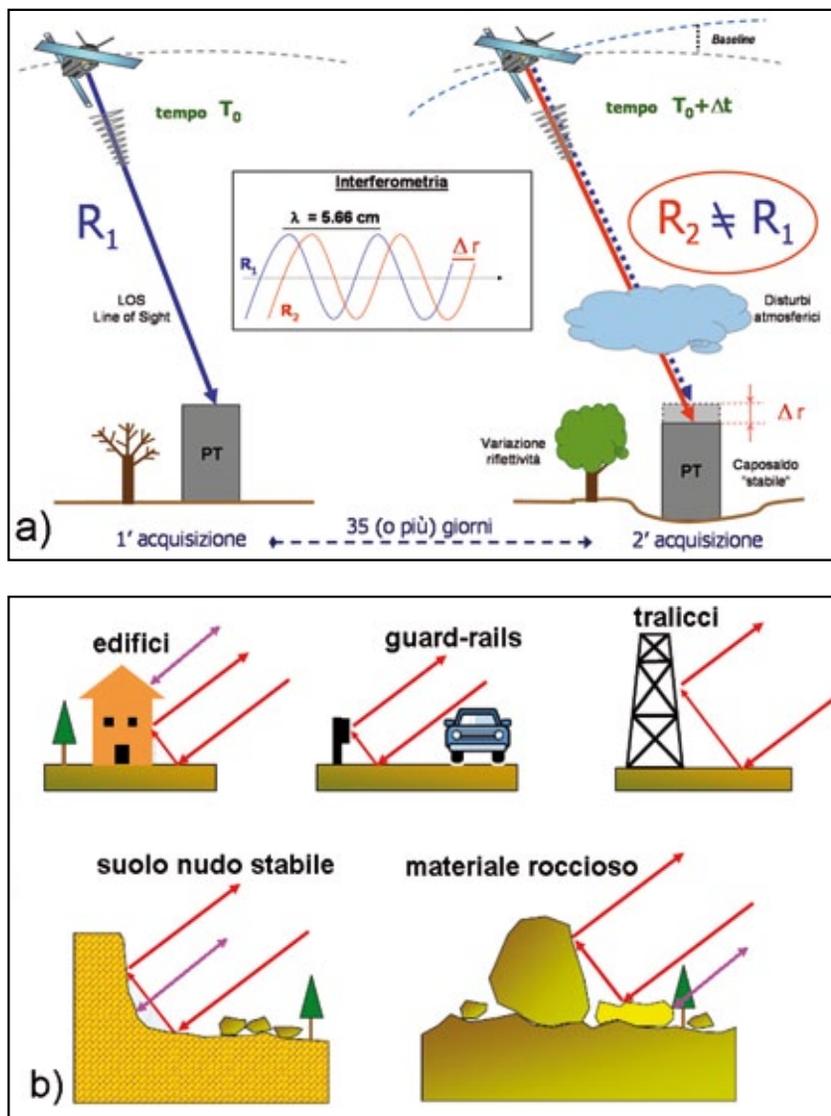


Figure 2 - Principio di funzionamento della metodologia SAR (a). Possibile tipologia di bersagli radar (o "riflettori") di tipo antropico e naturale (b)

dello spostamento a scala regionale eliminando picchi locali relativi, ad esempio, ad instabilità strutturali. Tecniche di "stacking" su serie di interferogrammi possono essere utilizzate per studiare l'evoluzione temporale degli spostamenti. *Analisi su diffusori puntuali persistenti (PSI, Persistent Scatterer Interferometry)*: la tecnica dei diffusori puntuali è stata inizialmente sviluppata presso il Politecnico di Milano con l'acronimo PS (Permanet Scatterers), ed è ora applicata da altri enti di ricerca e ditte in diverse parti del mondo con acronimi simili, ad esempio IPTA (Interferometric Point Target

Analysis) dalla svizzera Gamma Remote Sensing AG. L'esecuzione dell'analisi interferometrica su singoli diffusori particolarmente riflettenti, puntuali (con dimensione inferiore al pixel di acquisizione) e permanenti (sono presenti in tutte le immagini SAR) consente di estendere la metodologia SAR anche ad aree rurali sulle quali sono rilevati gli spostamenti di singole strutture quali fabbricati, tralicci elettrici, ecc. Ne è suggerito l'utilizzo qualora



Figura 3 - Mappa delle velocità dei movimenti del suolo (mm/anno) dell'area veneziana misurati per il periodo 2003-2010. Valori negativi indicano subsidenza. I triangoli bianchi mostrano le posizioni delle stazioni GPS utilizzate per la calibrazione

l'obiettivo sia quello di fornire una mappatura dei fenomeni di deformazione superficiale di territori rurali di elevata estensione. L'approccio PSI richiede comunque che sia presente una densità spaziale di riflettori sufficientemente elevata (maggiore di 5-10 per km<sup>2</sup>). Per l'area d'indagine l'insieme dei bersagli può considerarsi una sorta di rete geodetica naturale. Per ogni singolo riflettore si può ricostruire il trend medio di spostamento con accuratezza compresa tra 0.1 e 1 mm/anno (l'accuratezza

è comunque funzione del numero di immagini e della "qualità" del bersaglio), e l'intera serie temporale di deformazione. L'accuratezza arriva (per i punti migliori) a 1-2 mm su ogni singola misura. Numerosi sono i satelliti SAR che hanno acquisito e stanno acquisendo immagini radar della superficie terrestre: ERS-1/2 ed ENVISAT (banda C) dell'Agenzia Spaziale Europea e RADARSAT dell'Agenzia Spaziale Canadese caratterizzati da una risoluzione spaziale di 20 m; TerraSAR-X e COSMO-SkyMed (banda X),

rispettivamente dell'Agenzia Spaziale Tedesca e Agenzia Spaziale Italiana, caratterizzati da una risoluzione spaziale di 3 m. Il loro utilizzo ha consentito di monitorare la subsidenza su un numero di bersagli radar superiori di 2 o 3 ordini di grandezza alla numerosità dei capisaldi di livellazione. Le analisi hanno permesso la mappatura dei movimenti del suolo a scala "regionale" (su aree di 100×100 km<sup>2</sup>), locale (10×10 km<sup>2</sup>) e puntuale a livello delle singole strutture (Figura 3).

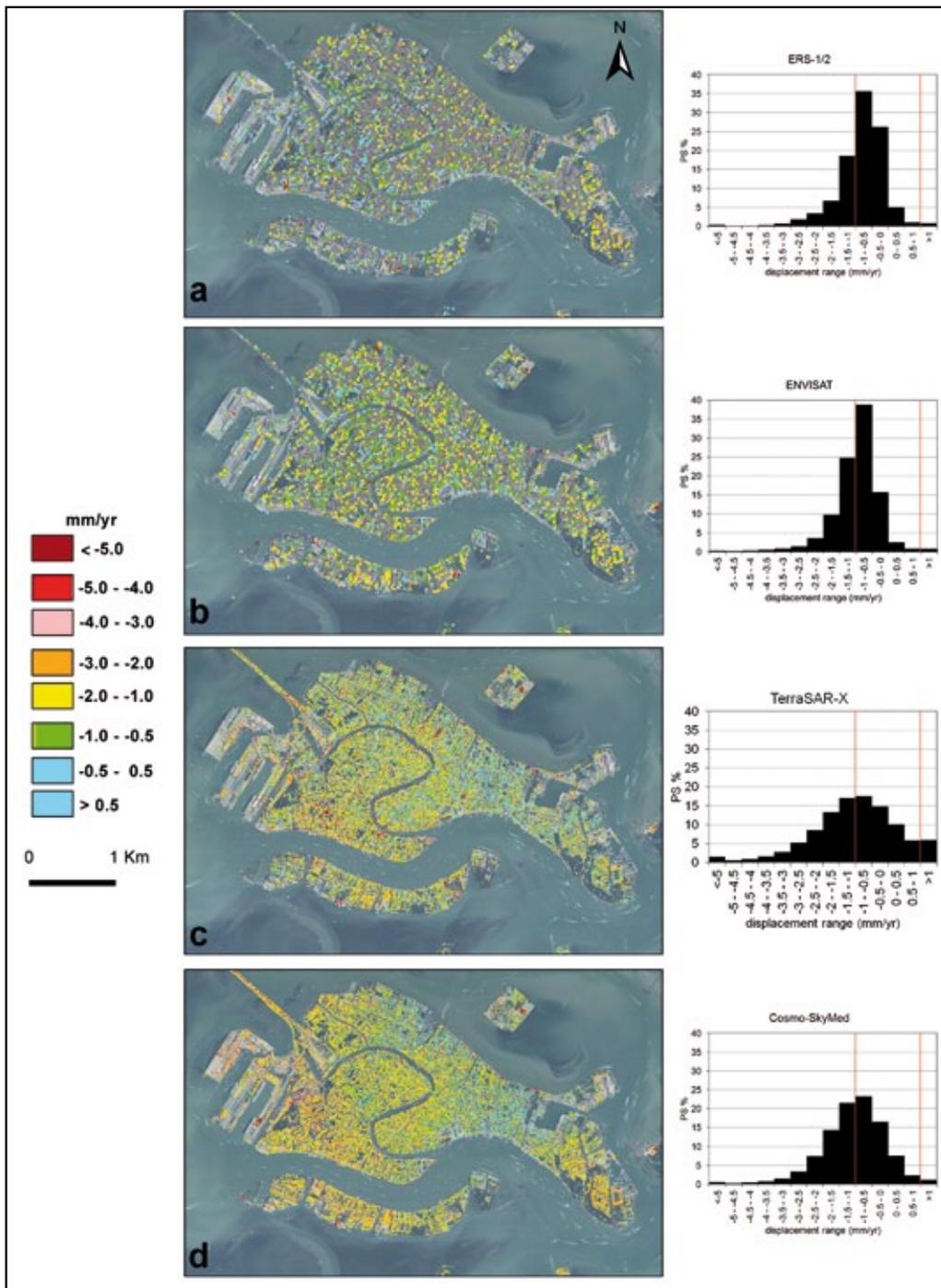


Figura 4 - Velocità di spostamento medio (mm/anno) del centro storico ottenute dall'analisi interferometrica IPTA: a) ERS 1992-2002, b) ENVISAT 2003-2010; c) TerraSAR-X marzo 2008 e gennaio 2009; d) COSMO-SkyMed 2008-2011. I valori negativi indicano subsidenza. La distribuzione della frequenza degli spostamenti per ogni mappa è riportata nel lato destro (Tosi et al., 2013)

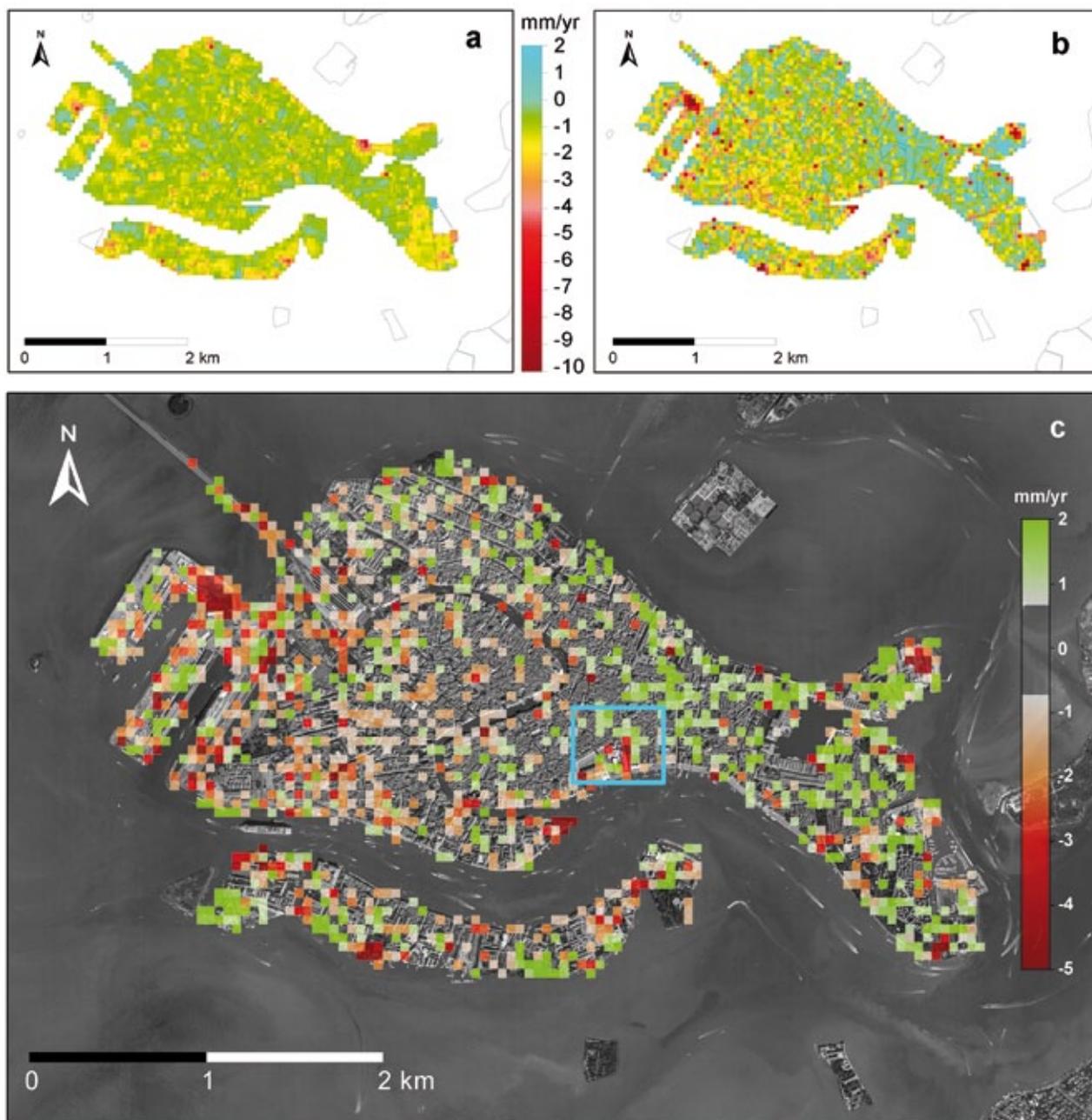
### Risultati dello studio

I satelliti SAR in banda C hanno fornito oltre vent'anni di immagini per le analisi dei movimenti del suolo con cadenza quasi mensile. I risultati ottenuti mostrano che nei due periodi consecutivi, 1992-2002 per ERS e 2003-2010 per ENVISAT, i movimenti verticali del centro storico di Venezia sono sostanzialmente

simili (Figure 4a,b). Il tasso medio di subsidenza e la relativa deviazione standard ammontano a  $0.8 \pm 0.7$  e di  $1.0 \pm 0.7$  mm/anno rispettivamente per il periodo 1992-2002 e 2003-2010. Si noti che questa deviazione standard rappresenta la variabilità del movimento del suolo alla scala dell'intera città e non è correlata all'incertezza

della misura della velocità di spostamento dei riflettori radar (cioè alla precisione della misurazione).

In media le misure in banda C mostrano che circa l'80-85% degli spostamenti di Venezia è compreso tra 0 e -1.5 mm/anno e il 15% da -1.5 a -3 mm/anno. Tenendo conto che la tecnica PSI richiede una risposta

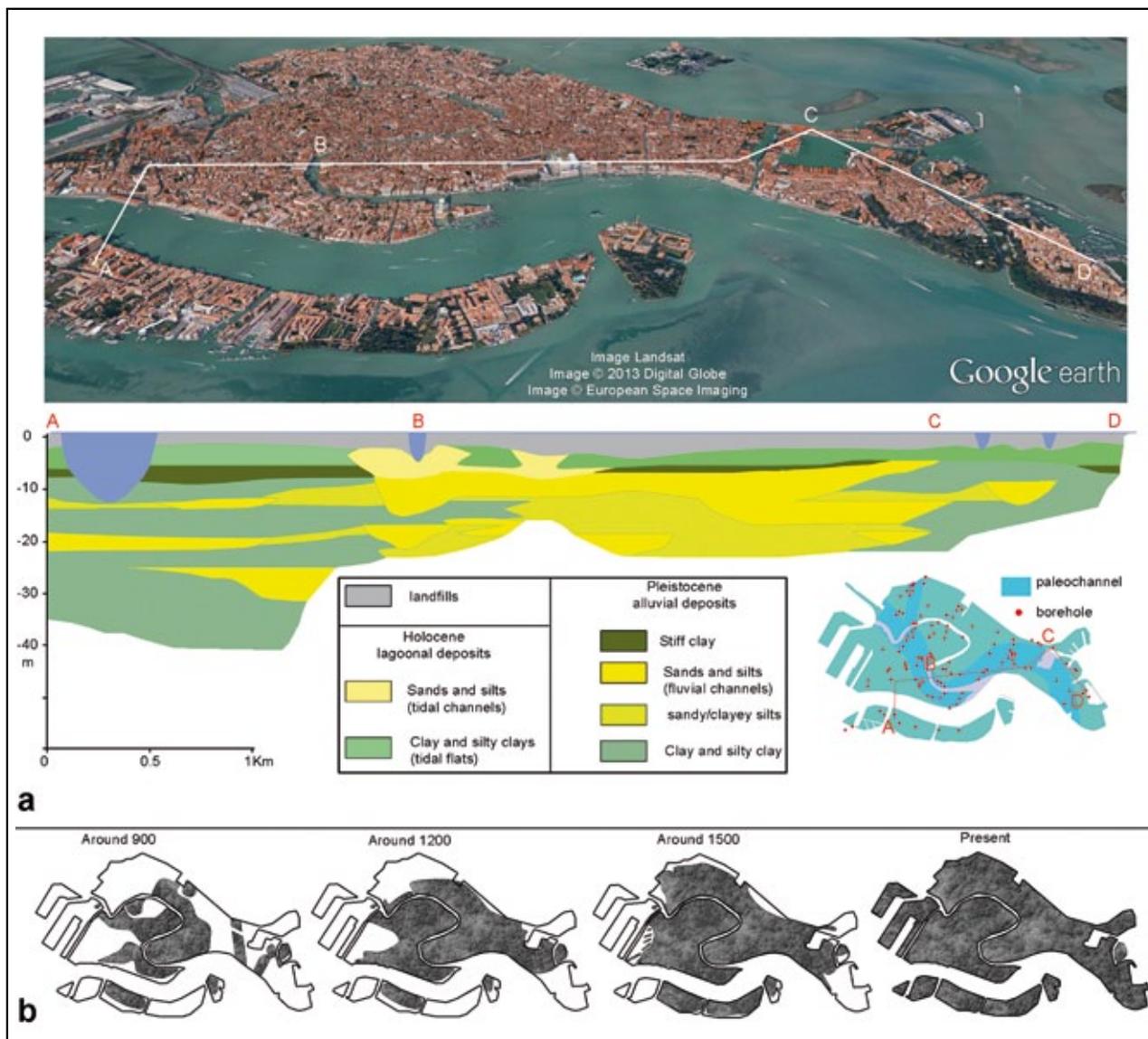


coerente del target nell'intero set d'immagini, cioè il riflettore radar deve essere presente per l'intero periodo di monitoraggio e non avere spostamenti bruschi, pena la perdita del segnale, le mappe dei movimenti a lungo termine possono essere interpretate come un quadro attendibile della subsidenza naturale che interessa ora Venezia.

L'elevata risoluzione spaziale dei satelliti in banda X e il loro breve tempo di rivisitazione

rende possibile indagare gli spostamenti del centro storico con un livello di dettaglio mai ottenuto in passato. I risultati PSI (Figure 4c,d) mostrano una densità dei riflettori rilevati, di un ordine di grandezza maggiore di quello ottenuto dai sensori in banda C; l'analisi statistica delle distribuzioni sottolinea che i tassi medi misurati con i sensori in banda X sono di  $-1.0 \pm 1.6$  mm/anno con TerraSAR-X e  $-1.1 \pm 1.0$  con COSMO-SkyMed.

Figura 5 - Mappe del tasso di spostamento (velocità negative indicano abbassamento del terreno) ottenute interpolando i risultati a) l'ERS-ENVISAT e b) TerraSAR-X IPTA su una griglia regolare 50 m. c) Differenza tra le mappe ERS-ENVISAT e TerraSAR-X che rappresenta gli attuali movimenti di origine antropica a Venezia. In questo caso, i tassi negativi e positivi indicano rispettivamente le aree in cui le attività umane inducono gli abbassamenti o riducono la subsidenza naturale. Il box azzurro in c) si riferisce alla zona indagata di Figura 4 (Tosi et al., 2013)



I valori medi di subsidenza sono abbastanza simili a quelli rilevati dalla banda C satelliti. La differenza sostanziale sta nella deviazione standard che è caratterizzata da valori significativamente maggiori, 1.6 e 1.0 mm/anno con TerraSAR-X e COSMO-SkyMed. Per i sensori in banda X, la distribuzione della frequenza degli spostamenti misurati mostra che il 50 - 60% dei riflettori radar sono caratterizzati da un movimento tra 0 e -1.5 mm/anno e il 25% da -1.5 e -3.0 mm/anno. Dato che le analisi in banda C e X mostrano tassi di spostamento medio simili, è ragionevole

supporre che questi rappresentino la componente naturale attuale della subsidenza, mentre la differenza tra i movimenti ottenuti dalle immagini con ERS/ENVISAT e quelli con TerraSAR-X/COSMO-SkyMed siano indicativi degli effetti causati dalle attività antropiche. Questa ipotesi è stata supportata da una originale elaborazione delle due misure in banda C e X. Si è inizialmente proceduto all'interpolazione separata dei due gruppi di dati PSI su una medesima griglia regolare di 50 m; successivamente applicato un filtraggio per eliminare eventuali outlier forniti dalla analisi in

Figura 6 - a) Modello di architettura del sottosuolo superficiale di Venezia lungo il tracciato AD. I dati geologici sono cortesia del Prof. Fulvio Zezza (IUAV-Venezia). b) Schematizzazione della crescita del centro storico di Venezia dal 900 dC ad oggi (Tosi et al., 2013)

banda C dovuti a bersagli instabili (~5%). Il confronto tra le due mappe così ottenute sottolinea l'omogeneità (nell'intervallo tra 0 e -1 mm/anno) dei tassi di spostamento a lungo termine (Figura 5a) e la grande variabilità dei movimenti di breve termine (Figura 5b) che

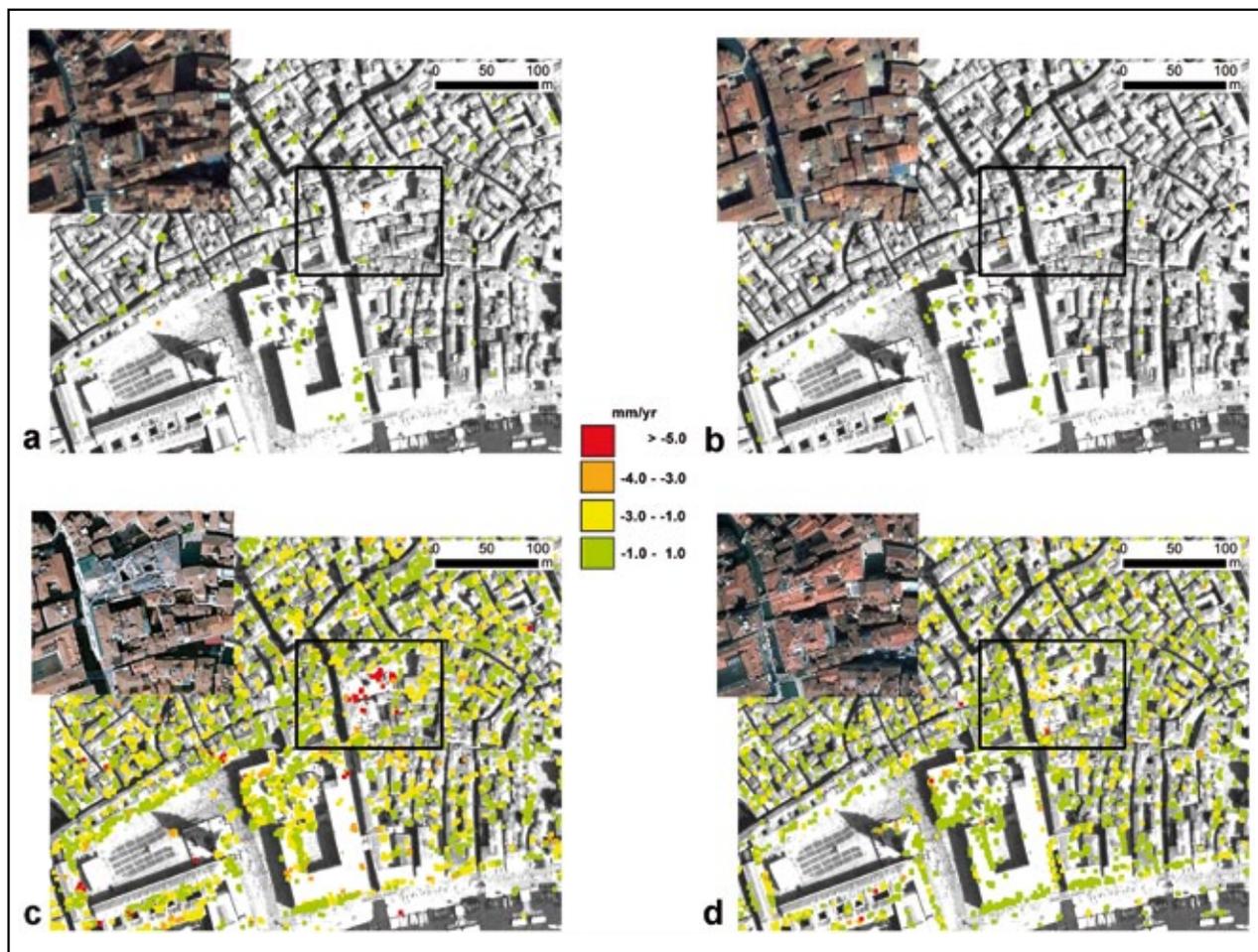


Figura 7 - Esempio di alte velocità di abbassamento indotte da restauri di singoli palazzi in una porzione della città a nord est della Basilica di San Marco. I tassi medi (mm/anno) ottenuti da IPTA si riferiscono: a) ERS, ENVISAT b), c) TerraSAR-X, e d) COSMO-SkyMed. Il confronto delle immagini mette in evidenza come l'analisi a breve termine effettuata con le immagini TerraSAR-X cattura l'effetto dei lavori eseguiti nel 2007 (si veda la corrispondente fotografia aerea mostrato nel riquadro). Le serie temporali più lunghe acquisite dai sensori in banda C mostrano che nel 2007 l'area era stata influenzata unicamente dalla subsidenza naturale (circa 1 mm/anno). Dopo la fine dei lavori, i tassi medi si riducono a seguito del processo di consolidamento, come rilevato da COSMO-SkyMed (Tosi et al., 2013)

si sovrappone ad una velocità di background simile. La quantificazione degli spostamenti antropo-indotti è stata infine ottenuta rimuovendo la soluzione in banda C interpolata da quella corrispondente in banda X, ovvero per differenza tra i due data set interpolati (Figura 5c). La mappa dei movimenti così ottenuta mostra che benché la maggior parte di Venezia sia soggetta a subsidenza naturale, nel 2008 circa il 25% della città ha subito spostamenti causati dalle attività antropiche. Il 15% circa dei movimenti antropo-indotti comporta un aumento

della velocità di subsidenza naturale a lungo termine; viceversa, il 10% ne ha fornito una riduzione. Il tasso medio di subsidenza "naturale attuale" del "centro storico di Venezia" è di 0.8-1.0 mm/anno, coerentemente con i valori stimati a scala geologica. Tuttavia, poiché la subsidenza geologica è stata valutata alla scala delle migliaia di anni su poche misure puntuali, analizzando i sedimenti prelevati con i carotaggi, questa non può ritenersi rappresentativa della presente subsidenza naturale dell'intera città. Una certa variabilità dei tassi di

subsidenza naturale è attribuibile all'elevata eterogeneità del sottosuolo. È stato osservato che la presenza di argini sabbiosi sepolti appartenenti a sistemi canalizzati antichi corrisponde bene ai settori della città caratterizzati da abbassamenti minori (Figura 6a). Al contrario, nelle zone della città che poggiano su un sottosuolo costituito da materiale comprimibile, depositi limosi e argillosi, i tassi subsidenza sono più elevati. Un ruolo importante sulla variabilità della subsidenza è quello della consolidazione secondaria (o a lungo termine)

dovuta al carico degli edifici. La città ha iniziato a svilupparsi nel corso del primo millennio su antiche isole sabbiose ben consolidate; successivamente, l'espansione urbana è avvenuta a seguito di bonifiche e riempimenti di canali di marea e rialzi dei bassi fondali lagunari (Figura 6b). L'analisi congiunta della subsidenza e dell'espansione urbana indica che la parte più antica della città (prima del 1500) è caratterizzata dai tassi di subsidenza inferiori a quelli corrispondenti alle aree di sviluppo dell'edificato più recente. Una certa variabilità degli spostamenti è anche dovuta alle diverse profondità delle fondazioni ed al diverso carico dei palazzi storici. Per quanto riguarda la subsidenza antropica, gli spostamenti indotti si verificano a scala molto locale e sono molto eterogenei; nel 2008 sono stati compresi tra -10 e 2 mm/anno (Figura 7). Essi sono causati da interventi di ristrutturazione e ricostruzione per preservare il patrimonio edilizio, insieme ad attività di manutenzione urbana, come il restauro delle murature delle rive dei canali per garantire la loro stabilità. Applicazioni geotecniche quali micropali, ancoraggi, jet grouting volte a migliorare le caratteristiche del sottosuolo nella fase iniziale dei lavori possono indurre dei cedimenti. Inoltre, poiché le zone di cedimento sono generalmente concentrate lungo i principali canali che delimitano e attraversano la città, è possibile ipotizzare che il moto ondoso indotto dai natanti sulle fragili murature dei canali contribuisca ai cedimenti.

## Conclusioni

La subsidenza di Venezia non è più oggi connessa alle estrazioni di acque artesiane, come lo è stata fino agli anni '70. Tuttavia, la peculiare posizione

## Pietro Teatini

Ha conseguito la laurea in Ingegneria Civile nel 1991 (Università di Padova). È funzionario scientifico presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università di Padova e ricercatore associato all'Istituto di Scienze Marine di Venezia.

Membro dell'UNESCO Working Group on Land Subsidence, vincitore del Premio Internazionale "Paolo Gatto" per la modellizzazione del sistema acquifero sottostante la Laguna di Venezia. I principali interessi di ricerca sono relativi allo sviluppo e applicazione di modelli agli elementi finiti per la simulazione dei processi di flusso/trasporto in acquiferi e della subsidenza naturale ed antropica.

## Luigi Tosi

Laureatosi in Scienze Geologiche nel 1991 (Università di Padova) si è specializzato in geologia applicata costiera (ISDGM-CNR). È ricercatore del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) presso l'Istituto di Scienze Marine e si occupa dello studio integrato della dinamica del suolo, dei flussi sotterranei, dell'evoluzione dei complessi sedimentari e paleoidrologici nei sistemi costieri a scala da millenaria a decennale.

Punti chiave delle sue ricerche sono la comprensione degli scambi di acque sotterranee marine e continentali, dei movimenti del suolo naturali e antropo-indotti e la loro relazione con l'assetto geologico, geomorfologico ed idrogeologico. È stato direttore dei Fogli Geologici "Venezia" e "Chioggia-Malamocco" nel progetto di Cartografia Geologica Nazionale (CARG).

della città, situata sopra circa 1.000 m di depositi quaternari, e la struttura del centro storico, che è fondato su pali di legno infissi su strati di sabbia, argilla, riempimenti artificiali di canali di marea e rialzi del fondo lagunare, richiedono di continuare il monitoraggio degli spostamenti del centro storico. L'uso dei sensori SAR in banda C e X montati su satelliti dell'Agenzia Spaziale Europea, Tedesca e Italiana ha permesso di quantificare le componenti naturali e antropiche della subsidenza attuale del centro storico di Venezia. La subsidenza naturale attuale media di Venezia è stata quantificata in 0.8-1.0 mm/anno. Questa è caratterizzata da una certa variabilità correlata con la struttura del sottosuolo poco profondo. La subsidenza antropica è oggi principalmente connessa alle operazioni di restauro e ristrutturazione per la salvaguardia del patrimonio storico-monumentale; nella fase iniziale la presenza di nuovi carichi o i drenaggi nell'area lavori inducono dei cedimenti a scala molto locale e per brevi intervalli di tempo con velocità fino a 10 mm/anno.

La metodologia SAR permette oggi di monitorare questi abbassamenti con una copertura areale e un'accuratezza impossibile da raggiungere con le tradizionali metodologie di misura, ad esempio le livellazioni topografiche. Benché di recente sviluppo, i metodi SAR si possono oggi considerare consolidati ed affidabili. Numerosi sono i software sia di pubblico dominio che commerciali, nonché i corsi che ne illustrano l'utilizzo. Pertanto anche i tecnici, appropriatamente formati, potranno in un prossimo futuro avvalersi di tale metodologia nella pratica della propria professione.

## Bibliografia

Tosi, L., Teatini, P., Strozzi, T., 2013. Natural versus anthropogenic subsidence of Venice. Scientific Reports 3, 2710, doi:10.1038/srep02710  
<http://www.nature.com/srep/2013/130926/srep02710/full/srep02710.html>