

Analisi dei fenomeni di subsidenza nel bacino del fiume Arno mediante interferometria radar

Paolo Canuti¹, Nicola Casagli¹, Paolo Farina¹, Alessandro Ferretti², Florian Marks¹,
Giovanni Menduni³

¹Earth Sciences Department, University of Firenze, V. La Pira 4, 50121, Firenze, ITALY, paolo.canuti@geo.unifi.it
nicola.casagli@geo.unifi.it, paolo.farina@geo.unifi.it, florian.marks@geo.unifi.it

²Tele-Rilevamento Europa, T.R.E., V. Vittoria Colonna 7, 20149, Milano, ITALY, alessandro.ferretti@treuropa.com

³Autorità di Bacino del Fiume Arno, V. dei Servi 15, 50122, Firenze, ITALY, giovanni.menduni@arno.autoritaadibacino.it

Analysis of subsidence phenomena in the Arno river basin using radar interferometry

ABSTRACT: Satellite SAR interferometry (InSAR) was used for mapping and measuring ground subsidence induced by groundwater pumping in the Arno river drainage basin (Central Italy). This technique allowed us to perform a spatial mapping of ground movements due to the wide spatial coverage of satellite data and high resolution and accuracy for the deformation monitoring. The Permanent Scatterers (PS) technique was used; it relies on large dataset of SAR images from the ERS mission in the time interval 1992-2002. The technique overcomes main drawbacks of conventional DInSAR processing like atmospheric artefacts and temporal decorrelation. A PS analysis was carried out on the whole Arno River basin (ca. 9.100 km²) enabling a delineation of areas affected by ground subsidence, mapping their limits and producing a zonation based on the yearly rate of settlement. For one test-site a more detailed PS analysis was used providing time series of PS movements. These time series were compared to a topographic levelling survey allowing a validation of PS results. Moreover a comparison of surface movements obtained by PS with piezometric measurements was carried out aimed at understanding the cause-effect relationships between these two phenomena. To make more comparable the two datasets a selection process for obtaining PS with homogenous behaviour, representative of a specific area around the well, was performed taking into account the coherence value of PS and a cross-correlation threshold from couples of PS. In the same area the spatial distribution of ground displacements was compared to the map of changes in the piezometric height from the 70s to 2000 and to a map of the thickness of compressible terrains. Such an analysis allowed a better understanding of the controlling factors of the subsidence distribution, useful for the definition of mitigation strategies.

Key terms: land subsidence, InSAR, radar interferometry, Permanent Scatterers

Termini chiave: subsidenza, InSAR, interferometria radar, Permanent Scatterers

Riassunto

L'interferometria SAR da satellite (InSAR) è stata utilizzata per mappare e misurare le aree interessate da fenomeni di subsidenza sia naturale che di origine antropica nelle aree di pianura ubicate nel bacino del fiume Arno. La tecnologia permette infatti una mappatura degli spostamenti del terreno su vasta scala, grazie alla copertura spaziale delle immagini radar da satellite e all'elevata risoluzione ed accuratezza nella misura delle deformazioni.

E' stata effettuata un'analisi mediante la tecnica dei Permanent Scatterers sull'intero territorio del bacino del fiume Arno (9.100 km²) utilizzando dati dei satelliti ERS1 ed ERS2 acquisiti nell'intervallo temporale 1992-2002. I risultati hanno permesso di delineare le aree affette da abbassamenti del terreno, definendo i loro limiti e realizzando una zonazione basata sul tasso annuale di spostamento. Inoltre un'analisi di maggiore dettaglio è stata

realizzata su un'area specifica, la parte Sud della pianura lucchese. Oltre ai dati ERS sono stati elaborati su questa zona anche i dati Radarsat acquisiti fino al 2005. Le misure ottenute sono state integrate e confrontate con i dati di livellazione topografica disponibili e con dati idrogeologici quali rilievi piezometrici, dati stratigrafici e fluttuazioni della falda ottenute da alcuni pozzi monitorati a partire dagli anni Settanta.

1. Introduzione

Le capacità dell'interferometria radar ad apertura sintetica (InSAR) da satellite di misurare movimenti verticali del terreno indotti da fenomeni di subsidenza sono state investigate in maniera approfondita negli ultimi anni (Amelung et al., 1999; Ferretti et al., 2000; Hoffmann et al., 2001). I metodi comunemente utilizzati per misurare le deformazioni del terreno sono rappresentati principalmente

da livellazioni topografiche con strumentazione ottica, campagne reti o permanenti di GPS ed estensimetri in foro. Mentre le tecnologie tradizionali permettono ad ottenere misure accurate su singoli punti, la tecnica InSAR dà la possibilità di ottenere una mappa bidimensionale della distribuzione spaziale dei movimenti con un'accuratezza nella misura comparabile con quella delle tecniche convenzionale.

In questo articolo viene mostrato come i risultati di un'analisi InSAR da satellite possano essere impiegati per mappare i fenomeni di subsidenza su vasta area, a scala di bacino, e come sia possibile su alcune aree specifiche, interessate da tassi di abbassamento particolarmente alti, combinare tali misure con dati tradizionali, quali livellazioni topografiche, rilievi piezometrici e dati stratigrafici del sottosuolo. Mentre le misure topografiche servono per validare i tassi di deformazione misurati dall'InSAR, il confronto con la distribuzione delle variazioni dei livelli piezometrici e con le loro serie storiche di abbassamento su alcuni pozzi permette di valutare la relazione causa-effetto esistente tra l'andamento della falda e l'abbassamento del terreno.

2. Area di studio

Le analisi interferometriche sono state effettuate sul territorio del bacino idrografico del fiume Arno, in corrispondenza delle aree di pianura, suscettibili ai fenomeni di subsidenza del terreno indotti da estrazione di acqua o da naturale compattazione dei terreni soffici. L'area di studio è ubicata in Italia centrale, lungo l'Appennino toscano-emiliano ad una quota media di 353 m.s.l.m (Fig.1), con un'estensione spaziale di circa 9.100 km². A causa dell'evoluzione geologica di questa area nella parte inferiore dei bacini intermontani, a partire dal Pliocene sono stati depositati spessi strati di terreni alluvionali che arrivano a coprire circa un quarto (23%) dell'intero bacino, pari a 2.100 km².

Nel bacino sono presenti quattro diversi domini sedimentari, schematizzabili da W verso E come segue: Valdarno inferiore, dominato da depositi marini pliocenici; Valdarno medio e Valdarno superiore caratterizzati da sedimenti fluvio-lacustri plio-pleistocenici; i sottobacini del Mugello e del Casentino dominati da successioni fluvio-lacustri plio-pleistocenici; Val di Chiana, interessata sia da sedimenti marini pliocenici che da sedimenti lacustri plio-pleistocenici. La parte a granulometria fine di questi sedimenti, rappresentata da argille e limi, ha un comportamento compressibile e risulta quindi suscettibile a fenomeni di subsidenza, soprattutto in corrispondenza di acquiferi oggetto di prolungati ed intensi emungimenti a scopi civili od industriali.

3. Analisi InSAR

Alcuni dei limiti dell'interferometria differenziale classica (DInSAR), causati principalmente dalla presenza di artefatti

atmosferici, dai fenomeni di decorrelazione temporale del segnale indotti dalle variazioni nel tempo delle caratteristiche elettromagnetiche della scena illuminata dal radar e dal rumore intrinseco del segnale (Zebker et al., 1997), possono essere superati mediante l'approccio "multi-interferogramma".

Basandosi sull'utilizzo di grandi data-set di immagini (almeno 20-25) e non di due singole acquisizioni come per le analisi DInSAR, il Politecnico di Milano (POLIMI) ha sviluppato e brevettato un algoritmo di elaborazione interferometrica capace di fornire misure di spostamento con precisione millimetrica su alcuni punti, chiamati Permanent Scatterers (PS), caratterizzati da elevati valori di segnale retrodiffuso su tutte le acquisizioni. Di solito i PS rappresentano strutture antropiche (edifici, ponti, etc.) ma anche riflettori naturali come rocce esposte.

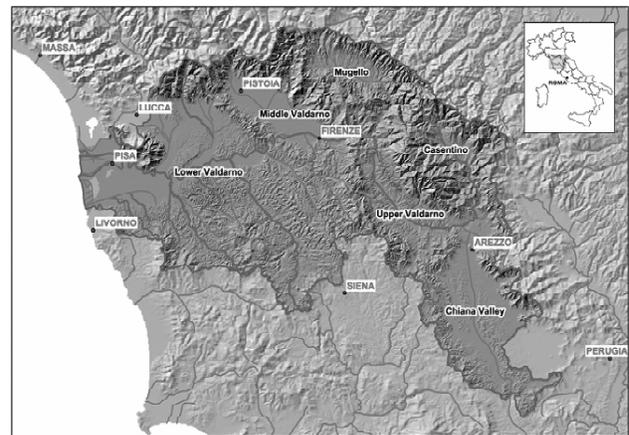


Fig.1: Ubicazione dell'area di studio: bacino del fiume Arno.
Location of the studied area: Arno river basin

Questo tipo di analisi, benché limiti la possibilità di ottenere misure di spostamento ad un sottoinsieme dei pixel dell'intera immagine radar, escludendo quindi zone vegetate o aree in cui lo scenario sia interessato da drastici cambiamenti durante il periodo di monitoraggio, permette di ottenere una rete di punti di misura che in area urbana raggiunge una densità pari a 200-300 PS/km². Per coprire l'intera area di studio sono state acquisite ed elaborate mediante la tecnica dei Permanent Scatterers più di 350 immagini radar dei satelliti ERS1 e ERS2 sia in modalità ascendente che discendente nell'intervallo temporale compreso tra il 1992 ed il 2002. In aggiunta, al fine di effettuare un'analisi di dettaglio per la realizzazione di un servizio di monitoraggio aggiornato su una particolare area di interesse della pianura di Lucca, sono state elaborate mediante la tecnica PS, oltre alle suddette immagini ERS1/2, anche i dati acquisiti dal satellite Radarsat nel periodo 2003-2005.

4. Risultati

L'analisi PS effettuata sull'intero bacino del fiume Arno ha

permesso di ottenere circa 438.000 PS di cui 260.000 da orbite discendenti e 178.000 PS da orbite ascendenti, raggiungendo un valore di densità spaziale pari a 226 PS/km², grazie all'alto livello di urbanizzazione dell'area. Dall'osservazione della distribuzione spaziale dei PS, classificati in funzione della loro velocità di abbassamento media annua, è stato possibile identificare alcune zone

affette da fenomeni di subsidenza con significativi tassi di deformazione annua. Mentre nella piana di Firenze- Prato-Pistoia i dati interferometrici hanno confermato le condizioni di stabilità dell'area fiorentina, in corrispondenza della conoide fluviale del T. Bisenzio hanno invece identificato forti abbassamenti del terreno (Fig.2).

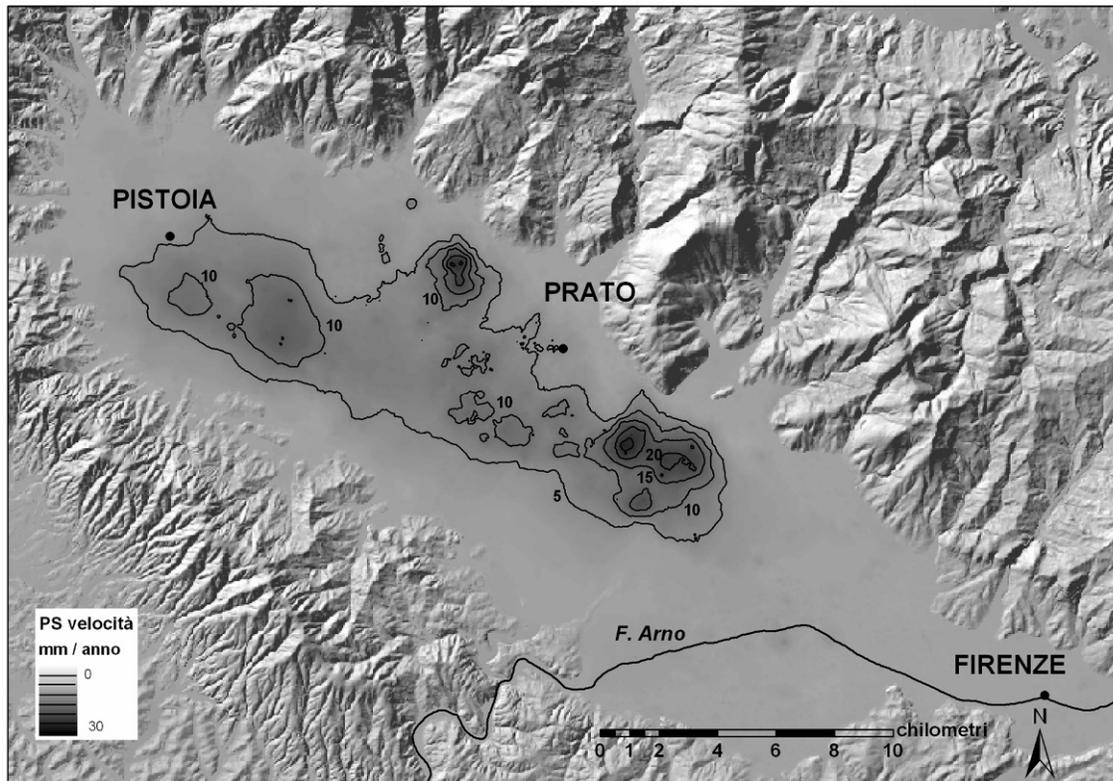


Fig. 2: Curve di isovelocità (equidistanza 5 mm/anno) ottenute dall'interpolazione dei PS.
Iso-velocity contour lines (every 5 mm/year) obtained from the interpolation of the PS.

L'acquifero principale di questa zona è proprio rappresentato dai livelli grossolani dei sedimenti fluviali del Bisenzio ed è interessato dagli anni '60 da estrazione di acqua per alimentare l'acquedotto della città di Prato ed il suo distretto industriale tessile. I tassi dell'abbassamento raggiungono valori superiori ai 10 mm/anno. Sovrimposto a tale trend generale di deformazione che interessa tutta la conoide del Bisenzio, con gli abbassamenti più consistenti nelle zone con i maggiori spessori di ghiaie (zone distali della conoide), sono presenti alcune "bolle" di subsidenza localizzate nella zona di Montemurlo e di Cadenzano. I tassi di abbassamento di queste due zone, correlati all'elevata concentrazione degli impianti industriali in queste aree, raggiungono valori di 30 mm/anno. Su questa stessa zona sono state effettuate in precedenza analisi DInSAR con dati ERS1/2 che avevano mostrato la stessa distribuzione spaziale degli abbassamenti (Colombo et al., 2003; Raucoules et al., 2003).

Un'area di particolare interesse è risultata la zona della

pianura lucchese ad E dei Monti Pisani, dove erano già a conoscenza, e sono stati confermati dalle misure satellitari, fenomeni di subsidenza localizzati tra gli abitati di Porcari e Bientina. Il territorio intorno all'abitato di Bientina mostra tassi del abbassamento superiori a 15 mm/anno nell'intervallo temporale 1992-2002. Per ottenere un aggiornamento delle misure di abbassamento del terreno su questa zona sono state acquisite ed elaborate mediante la tecnica PS anche le immagini radar del satellite canadese Radarsat per il periodo marzo 2003-maggio 2005. L'analisi di questi dati ha evidenziato come in generale negli ultimi 2 anni i tassi di abbassamento siano diminuiti notevolmente nell'area di Porcari, fino quasi ad annullarsi e che l'area di Bientina abbia registrato una leggera diminuzione degli abbassamenti fino a raggiungere valori medi pari a 6-10 mm/anno (Fig.3).

La disponibilità di misure di abbassamento del terreno ottenute mediante una livellazione topografica effettuata su circa 25 caposaldi tra il 1995 ed il 1996 nella zona a S di

Porcari ha permesso di validare le misure radar. Il confronto tra le due serie di misure, realizzato proiettando lungo la verticale le misure radar e calcolando la velocità media dei PS nello stesso intervallo temporale delle misure

topografiche (settembre 1995-settembre 1996) ha evidenziato un'elevata correlazione tra i due dataset con valori di residui dell'ordine di 1 mm (Fig.4).

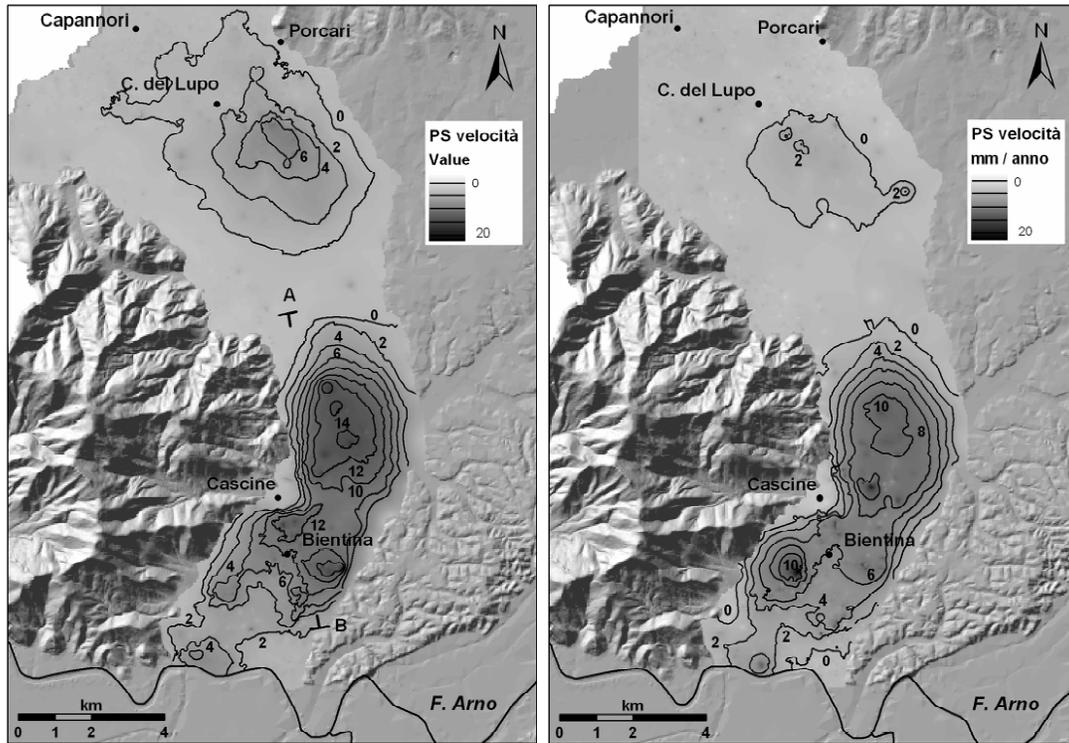


Fig. 3: Curve di isovelocity (equidistanza 2 mm/anno) ottenute dall'interpolazione dei PS nel periodo 1992-2002 (a sinistra) e 2003-2005 (a destra) nella pianura lucchese

Iso-velocity contour lines (every 2 mm/year) obtained from the interpolation of the PS spanning the temporal intervals 1992-2002 (on the left) and 2003-2005 (on the right) for the plain of Lucca

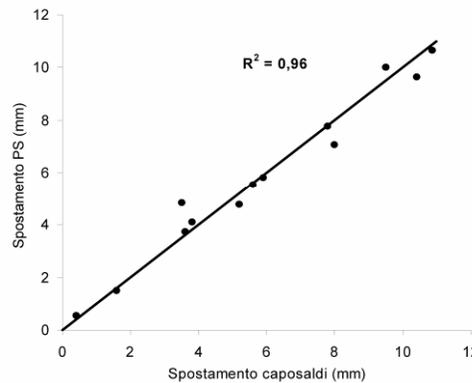
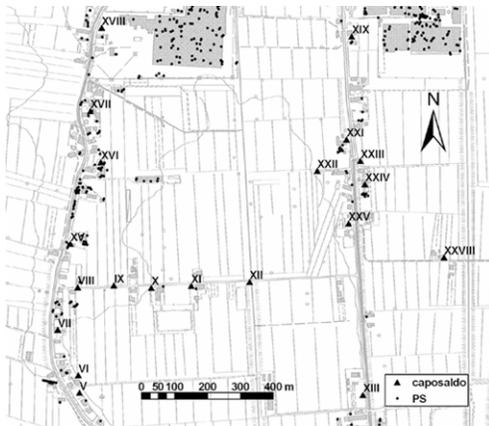


Fig. 4: Distribuzione spaziale dei PS e dei caposaldo topografici (a sinistra) e grafico di cross-correlazione tra i due dataset (a destra)

Al fine di evidenziare possibili correlazioni esistenti tra gli abbassamenti della falda nell'area di studio e la distribuzione spaziale delle deformazioni del terreno e la loro variazione nel tempo, le misure fornite dai PS tra il

1992 ed il 2005 sono state analizzate congiuntamente ai dati riguardanti le condizioni idrogeologiche dell'area. Sono stati utilizzate a tal fine carte piezometriche relative a diversi anni a partire dal 1970, dati derivanti dal

monitoraggio piezometrico di alcuni pozzi, sondaggi stratigrafici e prove di laboratorio. La distribuzione spaziale dell'escursione piezometrica tra il 2002 ed il 1970 è solo parzialmente sufficiente a spiegare la distribuzione degli abbassamenti del terreno ottenuta dall'interpolazione dei PS. Per ottenere una migliore comprensione di tale distribuzione sono stati raccolti dati stratigrafici per ricostruire l'andamento nel sottosuolo degli spessori di materiali comprimibili, principalmente argille e limi. La sezione idrogeologica di Fig.5 (per l'ubicazione guardare Fig.3) riporta i livelli piezometrici misurati nel 1971 e nel 2002, la loro differenza, la velocità di abbassamento del

terreno e le stratigrafie ottenute dai sondaggi e pozzi disponibili. L'osservazione della sezione bene evidenzia come spostandosi da N verso S (da A verso B) aumenti lo spessore dei terreni fini, argille e limi, passando da poco più di 10 m fino a circa 30 m. Si può chiaramente notare come le velocità di abbassamento del terreno siano fortemente correlate alla differenza tra i livelli piezometrici del 2002 e del 1971. Inoltre è evidente come le massime velocità di abbassamento del terreno siano localizzate in corrispondenza degli spessori maggiori di materiale comprimibile.

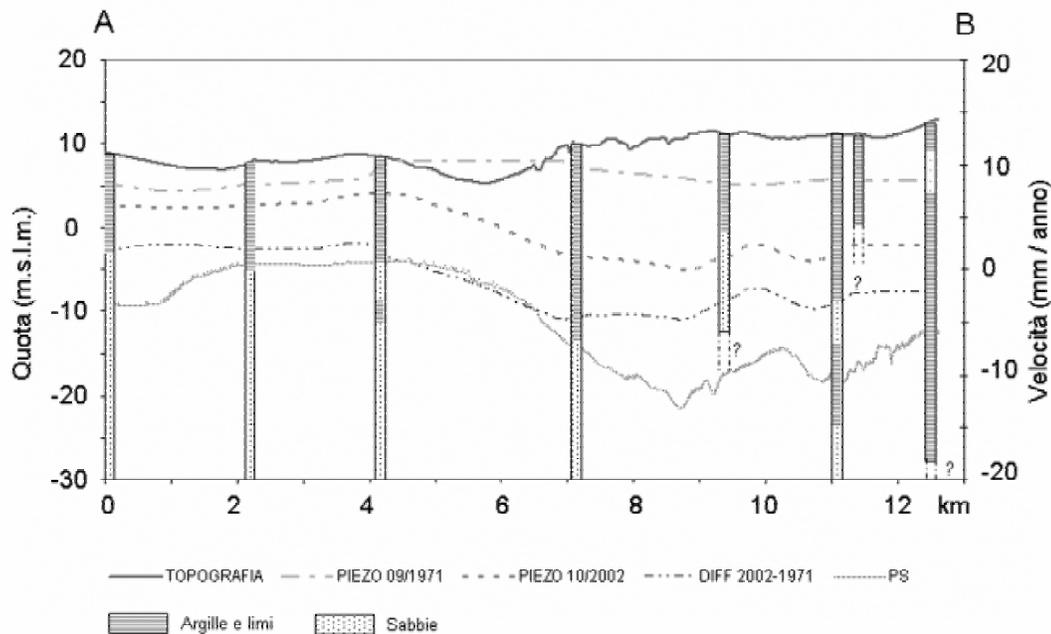


Fig. 5: Sezione idrogeologica dell'area di Bientina (per ubicazione della sezione A-B vedere Fig.3) riportante i livelli piezometrici (PIEZO) misurati nel 1971 e nel 2002, la loro differenza (DIFF) (riferiti alla scala di sinistra) e la velocità dei PS (riferita alla scala di destra)

Hydro-geological profile of the Bientina area (see Fig.3 for the location of profile A-B) showing the piezometric levels (PIEZO) measured in 1971 and 2002, their difference (DIFF) (shown on the left axis) and the PS velocity (shown on the right axis)

L'analisi PS di dettaglio effettuata sulla pianura di Lucca ha permesso di ottenere non solo le velocità medie dei PS nell'intervallo di osservazione, ma ha anche fornito le serie storiche di abbassamento di ogni PS. Per confrontare l'evoluzione degli abbassamenti del terreno con le variazioni dei livelli piezometrici di alcuni pozzi monitorati, sono stati selezionati i PS presenti nelle vicinanze dei pozzi. E' stata sviluppata una procedura per selezionare solo i PS rappresentativi delle deformazioni dell'intorno di ogni pozzo, in maniera da scartare PS relativi a fenomeni locali non correlabili alle variazioni piezometriche. Tale procedura è basata su una soglia di coerenza interferometrica, una stima della qualità delle misure PS, per eliminare i PS rumorosi caratterizzati quindi da una minore accuratezza. Una volta effettuata questa prima selezione le serie storiche dei restanti PS sono state

confrontate tra loro, a coppie, per valutare la cross-correlazione esistente.

In Fig.6 è stata confrontata una serie temporale calcolata dalla media di alcuni PS con l'andamento della falda misurato in corrispondenza di un pozzo. Il grafico mostra un trend in abbassamento per entrambe le misure fino al 1999 per la falda e fino al 2001 per il terreno ed una stabilizzazione di entrambe a partire dal 2002. Da notare la stretta correlazione tra le fluttuazioni stagionali dei livelli piezometrici e le deformazioni del terreno che indicano un suo comportamento parzialmente elastico.

5. Conclusioni

L'articolo ha presentato l'uso dell'interferometria radar per la misura delle fenomeni di subsidenza sia a scala di bacino

che a scala locale per l'analisi di dettaglio di una particolare area interessata da estrazione di acqua dal sottosuolo. Mediante la tecnica dei Permanent Scatterers è stato possibile ottenere una rete di monitoraggio di circa 430.000 punti con una densità di 220 PS/km². Le misure PS hanno permesso di mappare i fenomeni di subsidenza e di misurare i loro tassi del abbassamento, fornendo uno strumento che, integrato con dati idrogeologici tradizionali, ha facilitato la comprensione dei fenomeni in atto e quindi la possibilità di definire strategie di mitigazione. I risultati ottenuti con la tecnica PS sono stati validati, nell'area di Lucca, con dati di una livellazione di precisione.

6. Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato finanziato dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno, nell'ambito del progetto "Subsidence: analisi fenomeni di subsidenza nel territorio dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno". Gli autori desiderano ringraziare Marcello Brugioni, Lorenzo Sulli e Giovanni Montini dell'Autorità di Bacino del Fiume Arno per il supporto dato al progetto. Inoltre si ringrazia Davide Colombo e tutto lo staff di TRE per la realizzazione del processing PS.

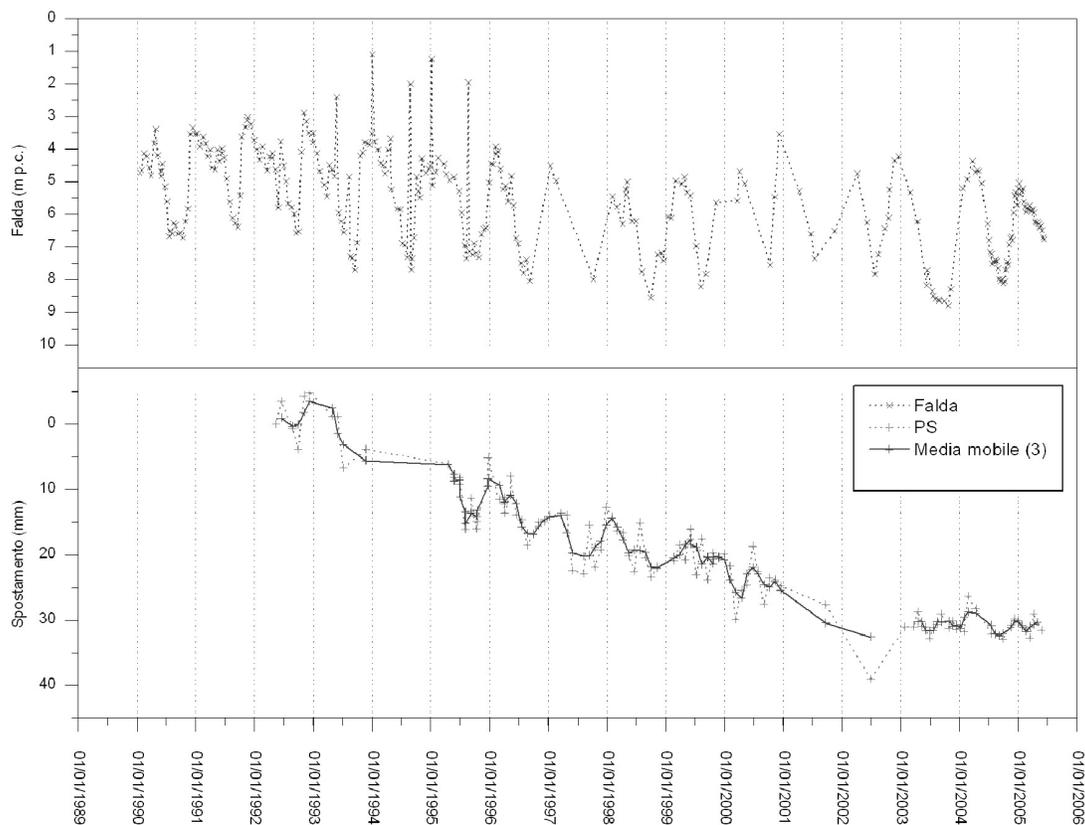


Fig. 6: Confronto tra l'andamento della falda e l'abbassamento del terreno
Comparison of groundwater fluctuations and ground displacements

Bibliografia

- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A. and Lacznik, R. J., 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 27, 483-486.
- Colombo, D., Farina, F., Moretti, S., Nico, G. and Prati, C., 2003. Land subsidence in the Firenze-Prato-Pistoia basin measurement by means of spaceborne SAR interferometry, in *Proc. of IGARSS 2003 - International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2003. Toulouse, France, 2927 - 2929.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., 2000. Non-linear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR interferometry. *Trans. of Geoscience and Remote Sensing*, 38 (5), 2202-2212.
- Hoffmann, J., D. L. Galloway, H. A. Zebker, and F. Amelung, 2001. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry, *Water Resources Research*, 37, 1551-1566.
- Raucoules, D., le Mouelic, S., Carnec, C., Maisons, C., and King, C., 2003. Urban subsidence in the city of Prato (Italy) monitored by satellite radar interferometry, *Int. J. Remote Sensing*, Vol.24, No.4, 891-897.
- Zebker H., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topography maps. *Journal of Geophysical Research*, 102(B4), 7547-7563.